



# **1. Tag der Ingenieurin der Fakultät für Maschinenwesen der TUM 2011**

**Tagungsband**

Garching, den 27. Oktober 2011

## Herausgeber:

Cornelia Schwarz  
Frauenbeauftragte der Fakultät für Maschinenwesen  
Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik  
Technische Universität München  
Boltzmannstr. 15  
D-85748 Garching

## Beteiligte Organisationen und Personen



R. Recsetar, T. v. Feilitzsch  
Fakultäts-Graduiertenzentrum der Fakultät für Maschinenwesen



C. Schwarz  
Fakultätsfrauenbeauftragte der Fakultät für Maschinenwesen  
U. Weber  
TUM Genderzentrum

Die Fakultät für Maschinenwesen bedankt sich für die Förderung der Veranstaltung aus Mitteln des Gender Issue Incentive Funds der Exzellenzinitiative an der TU München.

Die Deutsche Nationalbibliothek ( <http://dnb.ddb.de/> ) verzeichnet diese Publikation unter der URN urn:nbn:de:bvb:91-epub-20111017-1086219-0-9

©2011, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München.

Dieser Tagungsband, der Vorträge und Poster des 1. Tags der Ingenieurin der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München am 27.10.2011 enthält, erscheint als teilredigierte Online-Veröffentlichung. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Autoren wieder.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Grußwort</b>	<b>3</b>
<i>K. Bengler</i>	
<b>_____Vorträge</b>	
<b>Entwicklung von Hochgradienten-Magnetseparatoren für die Bioproduktaufarbeitung</b>	<b>4</b>
<i>S. Berensmeier</i>	
<b>_____Poster</b>	
<b>Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik</b>	
<b>Development of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations</b>	<b>6</b>
<i>A.I. Heft</i>	
<b>Lehrstuhl für Energiesysteme</b>	
<b>Untersuchung der Hochtemperatur-Chlorkorrosion bei der energetischen Nutzung biogener Festbrennstoffe</b>	<b>8</b>
<i>G. Balan, H. Spliethoff</i>	
<b>Lehrstuhl für Ergonomie</b>	
<b>Operational loads on sport bicycles</b>	<b>10</b>
<i>C. Hölzel, V. Senner</i>	
<b>Einsatz von EKIDES in Produktentwicklung und Lehre</b>	<b>12</b>
<i>I. Jastrzebska-Fraczek</i>	
<b>Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik</b>	
<b>Dynamische Kraftwerksberechnungen</b>	<b>14</b>
<i>S. Schneider, W.A. Günthner</i>	
<b>Lehrstuhl für Maschinenelemente</b>	
<b>Das FVA-Programm RIKOR (Ritzelkorrektur)</b>	<b>16</b>
<i>S. Stiller, B.-R. Höhn, K. Stahl</i>	
<b>Lehrstuhl für Produktentwicklung</b>	
<b>Automated Gearbox Design</b>	<b>18</b>
<i>C. Königseder, K. Shea</i>	
<b>Lehrstuhl für Thermodynamik</b>	
<b>Einfluss neuer, brennstoffflexibler Vormischbrenner auf die thermoakustischen Eigenschaften von Ringbrennkammern</b>	<b>20</b>
<i>S. Bade, T. Sattelmayer</i>	
<b>Untersuchung einer selbstzündenden Gasturbinenbrennkammer mit Abgasrezirkulation</b>	<b>22</b>
<i>E.-M. Haner, G. Tautschnig, T. Sattelmayer</i>	

<b>Selective Catalytic Reduction (SCR) of Nitrogen Oxides for Marine Diesel Engines</b>	<b>24</b>
<i>K. Johe, T. Sattelmayer</i>	
<b>Emissionsverminderung bei der Effizienz- und Leistungserhöhung von Gasturbinen</b>	<b>26</b>
<i>A. Marosky, V. Seidel, T. Sattelmayer</i>	
<b>Brennstoffflexibles Verbrennungssystem</b>	<b>28</b>
<i>J. Sangl, T. Sattelmayer</i>	
<b>Experimental Analysis of a Reacting Jet in Hot Crossflow</b>	<b>30</b>
<i>D. Schmitt, T. Sattelmayer</i>	
<b>Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik</b>	
<b>Oxygen diffusion hardening of tantalum coated titanium for biomedical applications</b>	<b>32</b>
<i>C. Hertl, E. Werner</i>	
<b>Gefüge von lasergeschmolzenen Proben aus einer Ni-Basis Superlegierung</b>	<b>34</b>
<i>C. Kellerer, E. Werner</i>	
<b>Quantification of the martensite fraction in dual phase-steel by the use of electron backscatter diffraction (EBSD)</b>	<b>36</b>
<i>L. Koll, E. Werner</i>	

# Grußwort

K. Bengler

Die Fakultät für Maschinenwesen veranstaltet heute zusammen mit dem Gender-Zentrum Garching ihren ersten „Tag der Ingenieurin“. Noch vor wenigen Jahren waren Maschinenbau-Ingenieurinnen tatsächlich noch in einer Exotenrolle: so wurden 2001 weniger als 4 % der Dissertationen von Frauen eingereicht - mittlerweile sind dies stabil über 10 %. Ein sehr ähnliches Bild sehen wir bei den Studierendenzahlen, wo der Frauenanteil bei den Studienanfängern im gleichen Zeitraum von rund 9 % stabil auf über 15 % gestiegen ist.

Auch wenn also ganz offensichtlich die Präsenz der Frauen in den Ingenieurwissenschaften zunimmt, gibt es nach wie vor ein erhebliches Potenzial. Also sollen Veranstaltungen wie diese das Selbstverständliche in den Mittelpunkt stellen: in den verschiedensten Bereichen der Fakultät für Maschinenwesen tragen Wissenschaftlerinnen - Studentinnen, Doktorandinnen, Post-Docs wie Professorinnen - mit ihrer Arbeit maßgeblich zu den hervorragenden Leistungen der Fakultät bei.

Wie heben wir dieses Potenzial, vor allem angesichts der Tatsache, dass der Frauenanteil zwischen 50 % in der Medizintechnik und 6,5 % in der Fahrzeug- und Motorentechnik schwankt? Es darf nicht darum gehen, Klischees zu bestätigen, sondern durch Kommunikation und Information die individuelle Lebensentscheidung optimal zu begleiten.

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig zu überlegen, wie wir die Faszination junger Frauen für die Ingenieurskunst wecken können. Unsere Aufgabe ist es, den Begriff „Maschinenbau“ so reichhaltig wie möglich zu kommunizieren, sodass für Schülerinnen und Wissenschaftlerinnen die Reichhaltigkeit der Themen sich erschließt, an denen in unserer Fakultät gearbeitet wird. Schließlich schaffen Ingenieurinnen und Ingenieure mit Leidenschaft die technischen Lösungen für die gesellschaftlichen Herausforderungen der Zukunft. Gerade das Spektrum der eingereichten Beiträge ist ein Beleg für diese beiden Thesen. Ich bin fest davon überzeugt, dass wir ein wesentlich breiteres Publikum begeistern können, wenn wir diese Problemlösungskompetenz stärker in den Vordergrund rücken.

Die heutige Veranstaltung ist ein wichtiger Beitrag. Mein Dank gilt dem Organisationsteam, unseren Professorinnen, die es sich trotz des anstrengenden Tagesgeschäftes nicht haben nehmen lassen, den Tag der Ingenieurin mit Vorträgen zu bereichern, und den teilnehmenden Nachwuchswissenschaftlerinnen, die uns in Ihren Beiträgen zum Tagungsband und ihren Postern einen Einblick in ihre vielfältigen Forschungsthemen gewähren.

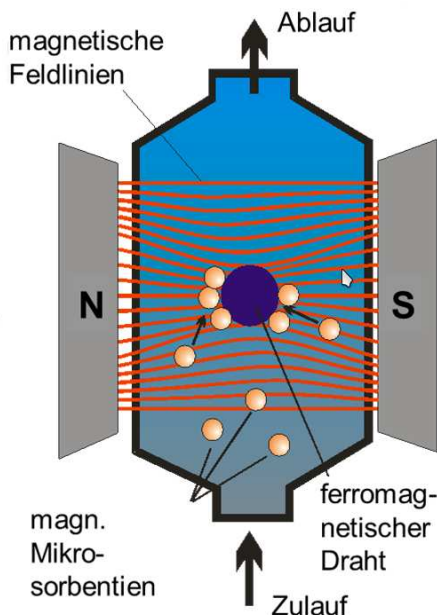
Garching, den 27.10.2011

# Entwicklung von Hochgradienten-Magnetseparatoren für die Bioproduktaufarbeitung

S. Berensmeier

Fachgebiet für Selektive Trenntechnik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Die direkte Isolierung von biologischen Wertprodukten aus den feststoffhaltigen und oftmals viskosen Fermentationsbrühen bereiten bei der technischen Umsetzung nach wie vor erhebliche Schwierigkeiten, insbesondere wenn große Durchsätze gefordert sind. Hier sind selektive magnetische Mikroadsorber eine gute Alternative, da sie aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften verfahrenstechnisch einfach abgetrennt werden können und zudem aufgrund ihrer geringen Größe ( $\approx 1\mu\text{m}$ ) große spezifische Oberflächen aufweisen. Die Magnetpartikelseparation und hier insbesondere die Hochgradienten-Magnetseparation (HGMS) stellt als relativ neues Verfahren zur Fest-Flüssig-Trennung eine interessante Alternative zu konventionellen Methoden wie z.B. der Sedimentation oder der Tiefenfiltration dar. Das Grundprinzip der HGMS ähnelt dabei dem der Tiefenfiltration, das heißt während des Betriebs durchströmt die zu reinigende Suspension eine Filterkammer, wobei die abzutrennenden Feststoffpartikel an einer Abscheidematrix zurückgehalten werden (s. Abb. 1).



**Abbildung 1:** Funktionsprinzip eines Hochgradienten-Magnetseparators (HGMS).

Im Unterschied zur Tiefenfiltration dienen jedoch durch ein Hintergrundmagnetfeld aufmagnetisierte Drahtnetze bzw. Lochscheiben als Abscheidematrix. Ein weiterer wichtiger Unterschied ergibt sich daraus, dass die Filamente der Abscheidematrix über makroskopische Distanzen von mehreren Filamentdurchmessern eine stark anziehende Kraft auf magnetische Partikel ausüben. Aufgrund des über die sehr hohe Filterporosität bedingten niedrigen Druckverlusts und der durch die aktive Anziehungskraft bedingten hohen Effizienz können Hochgradienten-Magnetseparatoren mit Filtergeschwindigkeiten von bis zu 1000 m/h betrieben werden. Der zur Generierung starker Magnetfelder benötigte zusätzliche Aufwand wird daher in verschiedenen Anwendungsfällen durch die pro Filterfläche realisierbaren hohen Durchsätze ausgeglichen. Bei der HGMS kommt es zu einer Akkumulation der magnetischen Partikel im Separatorvolumen und sobald die Aufnahmekapazität erschöpft ist, muss ein Reinigungszyklus erfolgen, der durch ein Abschalten des Magnetfelds oder eine räumliche Trennung der Abscheidematrix von der Magnetfeldquelle eingeleitet wird.

Nach der Entdeckung des HGMS-Konzepts Anfang der 1970er Jahre im Bereich der Wassertechnologie kam es sowohl bei der Konstruktion verschiedener Bauformen als auch bei der Herleitung theoretischer Berechnungsmodelle zu einer rasanten Entwicklung. In Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie

(KIT) wird an einem neuen Hochgradienten-Magnetseparator gearbeitet, der den Anforderungen der pharmazeutischen Industrie gerecht wird.

Neben einer Einführung in die Separation von Biomolekülen mittels magnetischer Partikel wird das Konzept und das Design vom Hochgradienten-Magnetseparator sowie weitere Schwerpunkte des Fachgebiets für Selektive Trenntechnik vorgestellt.

## Literatur

- [1] M. HEYD, M. FRANZREB, S. BERENSMEIER: *Continuous rhamnolipid production with integrated product removal by foam fractionation and magnetic separation of immobilized Pseudomonas aeruginosa*, Biotechnology Progress **27**(3), 706-716 (2011).
- [2] H. MOTEJADDED, B. KRANZ, S. BERENSMEIER, M. FRANZREB, J. ALTENBUCHNER: *Expression, one-step purification, and immobilization of HaloTag<sup>TM</sup> fusion proteins on chloroalkane-functionalized magnetic beads*, Applied Biochemistry and Biotechnology, **162**(7), 2098-110 (2010).
- [3] U. PEUKER, O. THOMAS, T. HOBLEY, M. FRANZREB, S. BERENSMEIER, M. SCHÄFER, B. HICKSTEIN: *Bioseparation, Magnetic Particle Adsorbents*. Book-Chapter, Wiley Encyclopedia of Industrial Biotechnology (2010).
- [4] N. STANKIEWICZ, A. GOLD, Y. YÜKSEL, S. BERENSMEIER, T. SCHWARTZ: *In vivo labeling and specific magnetic bead separation of RNA for biofilm characterization and stress-induced gene expression analysis in bacteria*, Journal of Microbiological Methods, **79**(3), 344-352 (2009).
- [5] A. MEYER, S. BERENSMEIER, M. FRANZREB: *Demonstration of an Automated Process for Direct Protein Capture by Means of Lactoferrin Isolation from Whey Using High-Gradient Magnetic Separation*, Reactive & Functional Polymers **67**, 1577–1588 (2007).
- [6] S. BERENSMEIER: *Magnetic Particles for Separation and Purification of Nucleic Acid Molecules*, Appl. Microbiol. Biotechnol. **73**, 495-504 (2006).

## Weitere Vorträge

Neben Prof. Sonja Berensmeier hielten im Rahmen des 1. Tags der Ingenieurin auch

- Prof. Birgit Vogel-Heuser, Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme, und
- Prof. Kristina Shea, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Fachgebiet Virtuelle Produktentwicklung,

jeweils einen Vortrag zu ausgewählten Forschungsthemen, zu denen jedoch kein Beitrag zu diesem Tagungsband vorliegt.

# Development of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations

A.I. Heft

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Aerodynamic research of vehicles often concentrates on strongly simplified car models, such as the Ahmed and the SAE body, to explain general phenomena. Due to their high degree of abstraction the results obtained with these models can only to some extent be used for the optimisation of production vehicles. On the other hand the aerodynamic research performed on specific vehicles is often limited because of their short life span and restricted access. To close this gap a new realistic generic car model for aerodynamic research – the DrivAer body – is developed.

## 1 Introduction

The reduction of CO<sub>2</sub> emission is considered essential in modern society. The car sector as one of the big contributors to the overall CO<sub>2</sub> emission is therefore obligated to lower the fuel consumption of contemporary cars. Big saving opportunities still lie in the aerodynamic optimization of vehicles, especially as the importance of a low drag coefficient increases with the use of recuperation systems (see Hucho [1]).

To further improve the car geometry it is necessary to fully understand the occurring aerodynamic phenomena. In recent papers on the subject of vehicle aerodynamics G.M. Le Good [2] identifies two main approaches: investigations were either performed on strongly simplified generic car models or carried out using real production cars.

A lot of time-accurate investigations use strongly simplified bodies, such as the SAE body, as described by Cogotti [3] and the Ahmed body, as presented by Ahmed [4]. This is due to the advantage of a significantly smaller computational and experimental effort compared to production vehicles. In contrast to specific production vehicles a broad spectrum of both numerical and experimental data of these models is available. Thus these models are well suited for validation purposes.

As the geometries of these simplified models differ considerably from actual car geometries, the insights are not completely transferable. Especially more complex areas such as the A- and C-pillars, the highly curved rear end, and the wheelhouse region are not represented properly in simplified models.

Therefore the actual optimization process is often based on real production cars. As their access is usually strictly limited and typically little validation data is available due to their short life span it is not feasible to study basic phenomena on specific production vehicles.

To close the gap between the two approaches the Institute of Aerodynamics and Fluid Mechanics of the Technische Universität München (TUM), in cooperation with two major car companies, the Audi AG and the BMW Group, proposes a new realistic generic car model – the DrivAer model.

To encourage independent experimental and numerical studies the CAD data of the DrivAer model along with numerical and experimental results will be published on the homepage of the Institute of Aerodynamics and Fluid Mechanics at the TUM <sup>1</sup>.

## 2 Development of the DrivAer model

The DrivAer model is based on two medium sized cars, the Audi A4 and the BMW 3 Series (see Heft et al. [5]). The CAD geometries of the different configurations of the original vehicles were provided by the Audi AG and the BMW Group. The original vehicle surfaces were smoothed and described by characteristic curves. The curves of both original cars were then merged to generate the new CAD geometry.

To allow for a high universality the investigation of different vehicle types is possible. The DrivAer model was developed as a modular concept with three interchangeable tops, namely a fastback, a hatchback, and a notchback top, and two different underbody geometries. While the smooth underbody is available for symmetrical investigations the detailed underbody based on the simplified underbody geometry of the Audi A4 can be used for more profound investigations. Figure 1 shows the interchangeable tops of the DrivAer model.

<sup>1</sup><http://www.aer.mw.tum.de/en/research-groups/automotive/drivaer/>



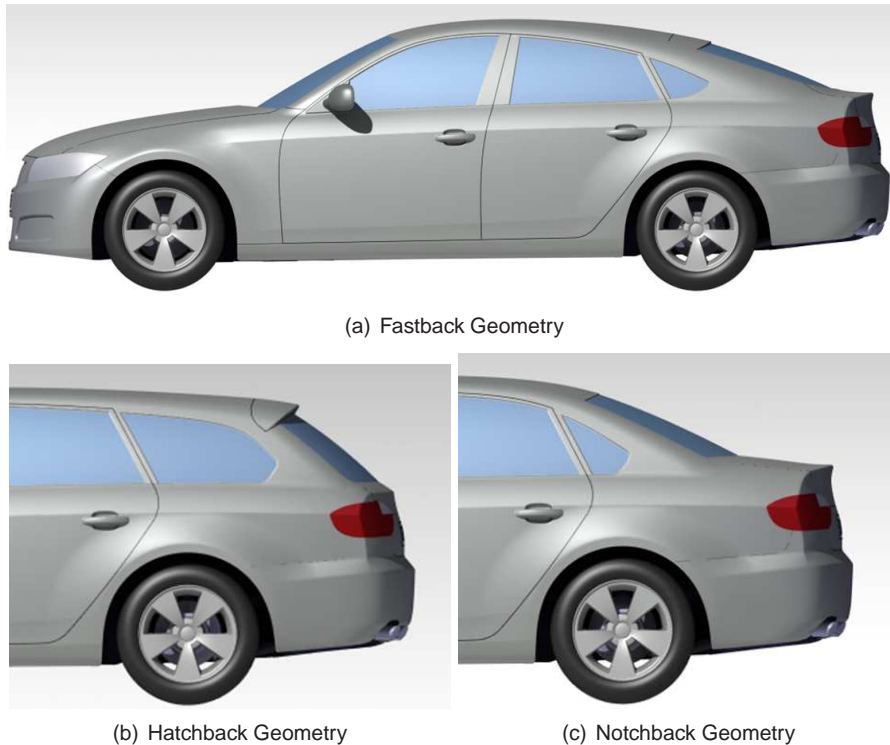


Figure 1: Different Geometries of the DrivAer model.

### 3 Future work

The DrivAer model will be tested both experimentally and numerically. Especially the investigation of instantaneous phenomena will be pushed.

Wind tunnel experiments will be performed both with and without ground simulation. To estimate the effects of blockage and Reynolds number dependency measurements in different wind tunnels will be considered.

### References

- [1] W.-H. HUCHO: *Reduzierung des Luftwiderstandes – volle Wirkung mit regenerativem Bremsen*, Automobil-Revue Nr. 36 (2009).
- [2] G.M. LE GOOD AND K.P. GARRY: *On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics*, SAE Technical Paper 2004-01-1308 (2004).
- [3] A. COGOTTI: *A Parametric Study of the Ground Effect of a Simplified Car Model*, SAE Technical Paper 980031 (1998).
- [4] S.R. AHMED, G. RAMM AND G. FALTIN: *Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake*, SAE Technical Paper 840300 (1984).
- [5] A.I. HEFT, T. INDINGER, AND N.A. ADAMS: *Investigation of Unsteady Flow Structures in the Wake of a Realistic Generic Car Model*, AIAA-2011-3669 (2011).

# Untersuchung der Hochtemperatur-Chlorkorrosion bei der energetischen Nutzung biogener Festbrennstoffe

G. Balan, H. Spliethoff

Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Die größte Herausforderung im Bereich der energetischen Nutzung biogener Festbrennstoffe stellt die Hochtemperatur-Chlorkorrosion dar. Die bei der Verbrennung entstehenden korrosiven Aschen begrenzen die Dampfparameter und somit die Effizienz bisheriger Anlagen. Im Rahmen dieser Arbeit wird Grundlagenforschung zur Aschebildung, Ascheablagerung an kühlen Oberflächen und der damit verursachten Korrosion betrieben.

## 1 Einleitung

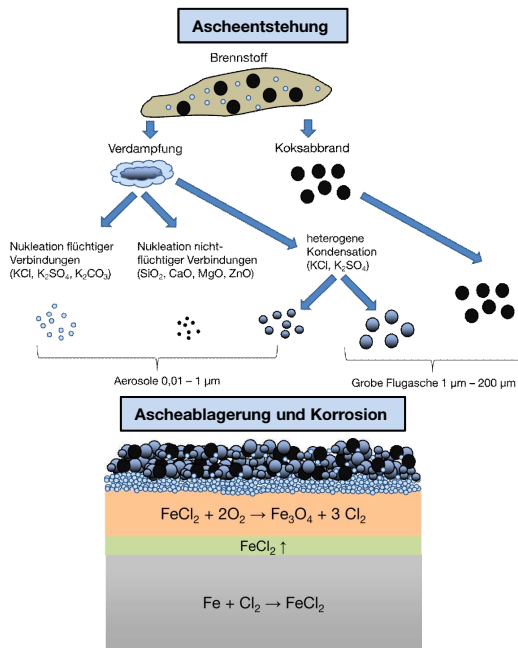
Im Hinblick auf die endlichen fossilen Ressourcen und des fortschreitenden Klimawandels setzen sich das „Energiekonzept“ und der „Nationale Biomasseaktionsplan“ zum Ziel den Anteil der Erneuerbaren Energien zu erhöhen und die Effizienz der Energieversorgung zu steigern [1, 2]. Biomasse hat den Vorteil einer speicherfähigen Form zur bedarfsorientierten Strom- und Wärmeerzeugung. Der Dampfkraftprozess mit und ohne Wärmeauskopplung ist für den Einsatz von fester Biomasse das am weitesten ausgereifte und marktverfügbare Verfahren zur Stromerzeugung [3]. Allerdings erfordert die Zusammensetzung der Biomasse aufgrund der Bildung korrosiver Partikel und Gase, die sich an den Wärmeübertragerflächen ablagern und dort Verschmutzung und Hochtemperatur-Chlorkorrosion verursachen, eine Limitierung der Frischdampftemperaturen und somit eine begrenzte Effizienz [4]. Die Verschmutzungs- und Korrosionsschäden sind Hauptursache für unplanmäßige Anlagenstillstände, begrenzte Anlagenverfügbarkeiten und hohe Wartungs- und Instandhaltungskosten.

## 2 Theoretische Grundlagen

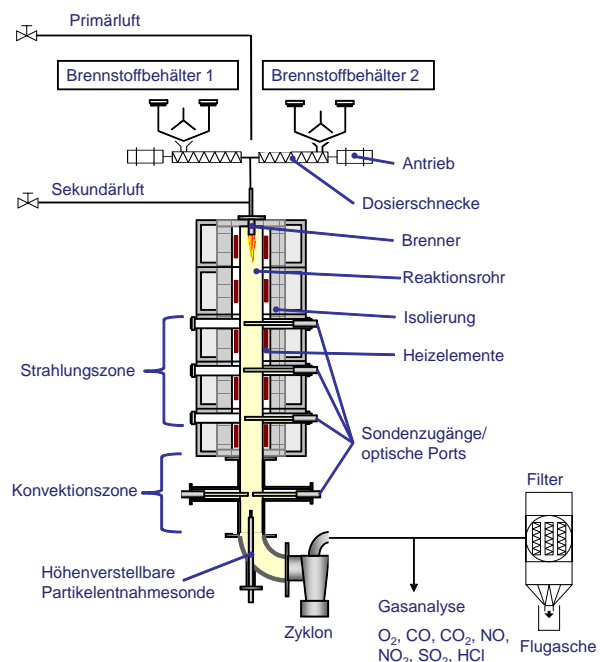
Ursache der Hochtemperatur-Chlorkorrosion ist in erster Linie die Brennstoffzusammensetzung, da diese die Fracht der im Rauchgasstrom antransportierten korrosiven Aerosole, Aschepartikel und Gase definiert. Die bei einem Verbrennungsprozess ausgetragene Asche kann grundsätzlich in zwei Größenbereiche eingeteilt werden. Einerseits verdampfen flüchtige Verbindungen wie z.B. Alkalien, Chlor und Schwefel bei hohen Temperaturen und können in Gebieten niedriger Temperatur zu kleinen Aerosolen kondensieren. Andererseits wird ein Großteil an nichtflüchtigen Aschebestandteilen wie z.B. Aluminium-Silikate und Erdalkaliverbindungen während des Abbrands des Brennstoffpartikels mit dem Rauchgasstrom mitgerissen und fällt als grobe Flugasche an [5]. Je nach Größe, Morphologie und Konsistenz der Partikel können sich diese anhand von unterschiedlichen Belagsbildungsmechanismen an den Wärmeübertrageroberflächen ablagern. Eine für die Korrosion wichtige Rolle spielen besonders die Aerosole, da sie einen Großteil der Chlorverbindungen enthalten. Scheiden sich die Aerosole in Form von Belägen an den Wärmeübertragerrohren eines Kessels ab, ermöglicht der direkte Kontakt zwischen Chlorid und Metall einen Angriff der Rohroberfläche. Nach heutigem Wissensstand sind besonders die Aereosole an der Initialschichtbildung beteiligt und erhöhen aufgrund der teilweise klebrigen Konsistenz die Haftwahrscheinlichkeit für weitere Aschepartikel. Der Weg von der Ascheentstehung zur Korrosion ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Einen weiteren wesentlichen Einfluss auf die Korrosion haben die Betriebsparameter der Verbrennungsanlage, darunter die Feuerführung und die konstruktionsbedingten Temperatur- und Strömungsprofile. Generell erschweren die heterogene Brennstoffzusammensetzung der Biomasse und die Vielzahl von Betriebsparameter die Korrosionsforschung.

## 3 Forschungsziele

Übergeordnete wirtschaftliche Zielsetzung der Forschungsarbeiten ist die Effizienzsteigerung bestehender und geplanter Biomasseverbrennungsanlagen besonders im Hinblick auf die energetische Nutzung schwieriger biogener Brennstoffe. Um die Verbrennung bei genau definierten Betriebsbedingungen zu simulieren, steht am Lehrstuhl für Energiesysteme ein 50 kW Flugstromreaktor zur Verfügung. Der Aufbau des Flugstromreaktors ist in Abb. 2 ersichtlich. Im Inneren besitzt der Reaktor ein Reaktionsrohr in dem die Verbrennung stattfindet. Mithilfe von Heizelementen ist es möglich, das Rohr auf eine Temperatur von 1600°C zu heizen. Die



**Abbildung 1:** Von der Ascheentstehung bis zur Korrosion



**Abbildung 2:** Schema des Flugstromreaktors

gemahlene Brennstoffe gelangen mit Hilfe zweier Dosiereinrichtungen über das Brennstoffzuführungsrohr von oben in den Reaktor. Hierbei ist die Anlage für die gleichzeitige Verbrennung von zwei festen staubförmig vorliegenden Brennstoffen ausgelegt, die in einem beliebig einstellbaren Verhältnis dosiert werden können. Die Brennstoffe werden mit Hilfe der Primärluft durch das Brennstoffzuführungsrohr in das Reaktionsrohr eingeblasen. Zusätzlich senkrecht zur Partikelflugrichtung eingeblasene Sekundärluft ermöglicht eine Verwirbelung der Partikel bei dem Eintritt in das Reaktionsrohr. Anschließend verbrennen die Partikel während ihres Fluges durch das Reaktionsrohr. Horizontal angeordnete optische Ports bieten Zugänge, in denen verschiedene Messtechniken zur Untersuchung der Ascheentstehung, der Belagsbildung und der Korrosion eingebracht werden können. Mithilfe der am Lehrstuhl entwickelten Messtechniken soll ein tiefergehendes Verständnis des Verbrennungsprozesses gewonnen werden.

## Literatur

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE & BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, *Energiekonzept*, 28. September 2010
- [2] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ & BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, *Deutscher Biomasseaktionsplan für Deutschland*, April 2009
- [3] RODE M. ET AL. & BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, *Naturschutzverträgliche Erzeugung und Nutzung von Biomasse zur Wärme- und Stromgewinnung*, BfN-Skripten 136, 2005
- [4] SCHIRMER M. & EVONIK INDUSTRIES, *Betriebstechnische Erfahrungen im Holz-Heizkraftwerk Dresden*, Präsentation: VDI Fachkonferenz, Feuerung und Kessel, Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen; Stuttgart; 2009
- [5] BRUNNER T., *Aerosols and coarse fly ashes in fixed-bed biomass combustion*, Formation, characterisation and emissions; Dissertation; TU Graz; 2006

# Operational loads on sport bicycles

C. Hölzel, V. Senner

Lehrstuhl für Ergonomie, Fachgebiet Sportgeräte und -materialien, Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching

Especially for carbon fiber sport bicycle frames and components the existing standards for fatigue tests don't satisfy the needs to ensure the athletes safety as numerous failure cases in field show. In order to determine realistic loading pattern for fatigue tests, operational loads for typical usage and reasonable foreseeable misuse have to be known. To determine the occurring operational loads a test bicycle has been developed. Field measurements and special situations were measured and compared to show the importance of additional strength tests for existing test standards.

## 1 Introduction

In cycling especially the combination of cyclic pedal movements and random loads occurring by overcoming an obstacle or overriding a rough surface leads to uncontrolled loads on the bicycle. For this reason it is difficult to assume the loads theoretically. It is also a fact that numerous failure cases occur in field and that the actual test standards for bicycles are not adequate to ensure save products, because they are based on loads occurring during common cycling only. They don't cover foreseeable misuse. Therefore it is important to get to know about the operational loads occurring in field and during possible misuse. The aim of the study was to show the importance of overloads for existing test standards and to integrate static strength tests into fatigue testing methods. Due to this field measurements and foreseeable misuse situations were performed with a special bike (Fig. 1).

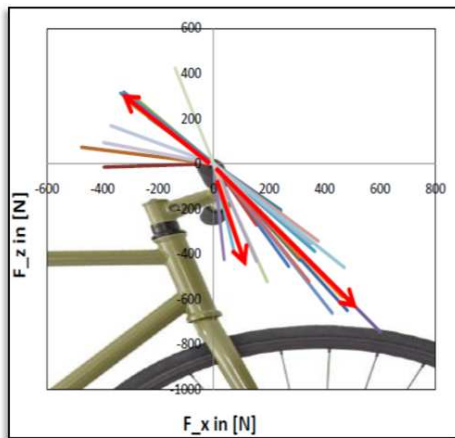


Figure 1: Test bike with global coordination system.

## 2 Methods

To detect the occurring operational loads during mountain biking a special test bike for force measurements was developed. Strain gauges are directly bonded to the components and react corresponding to the elastic movement of the parts. For the test bicycle strain gauges were attached on the handle bar ( $F_x$ ,  $F_z$ ), the seat tube ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), the stem ( $M_x$ ) and the pedals ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ). Ground reaction forces ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) are measured with strain gauges in the front wheel hub and with a special lever arm at the back wheel. Information about the current crank angle, needed for transformation of pedal forces from local coordination system into global coordination system, is given by a Hall Effect sensor which differentiates between forward and backward rotation of the crank. Linear displacement transducers at the suspension fork and the shock detect the range of travel. Reed-Relays measure the speed at the back wheel. The sensor signals from strain gauges are amplified by a data acquisition hardware (National Instruments). The hardware, including analog digital conversion, was connected to a mini-pc fixed at the bicycle frame. A data logging software records the sensor signals with a sampling rate of 500 Hz. Power supply is realized by rechargeable batteries, which have an operational time of more than one hour. Compared to recent studies testing over longer distances is now possible due to this technical solution [1, 2]. For field measurements a standardized test terrain with typical mountain bike up- and downhill passages and trails was selected (2,2 km, 70 m altitude difference) according to the distribution determined in [3]. To determine operational loads in possible misuse situations jumps from different levels, driving against a wall, rough hitting a road curb and descending down stairs were performed. All loads were multiplied with a safety coefficient. The loads from field measurements are classified with a Rainflow analysis. The loads out of possible misuse situations were analyzed to get the resulting forces. Peak forces and force orientation were examined afterwards.

### 3 Results



**Figure 2:** Resulting forces at the handle bar, calculated from possible misuse situations.

A fatigue testing protocol for the handle bar was figured out. Therefore mean stress ranges between  $-207\text{ N}$  to  $148\text{ N}$  in vertical direction with an amplitude between  $567$  to  $70,95\text{ N}$ . Overall 20 million cycles would be required if one would directly derive the test protocol from raw data. Reducing cycle time by miners rule in a damage equivalent way can shorten cycle time to about 100.000. Due to this testing time is reduced to about 8 hours. However this test procedure corresponds to the loads in normal cycling only. To account to possible misuse situations the peak forces of these situations are evaluated according to the direction of the force and its magnitude. Forces range between  $300\text{ N}$  and  $1000\text{ N}$  at the handle bar. Differences are caused by different situations performed. Highest load occurred while riding against a wall. Lowest load was detected during riding up stairs. Directions of the forces are shown in Figure 2.

### 4 Discussion

Results for common use show much lower loads compared to the possible misuse situations. The forces at the handle bar, while for example performing a drop jump, can be twice as big then during normal biking. Due to this the force difference between proper use and possible misuse is high. Occurring loads during field tests range between  $400$  and  $450\text{ N}$  whereas the highest load during possible misuse is around  $1000\text{ N}$  for the handle bar. This fact shows that additional static strength tests are important for realistic product testing. Most of the actual testing standards do not include static strength tests additionally to the fatigue tests [4]. Due to this athletes safety cannot be ensured. This paper exemplary shows data analysis procedure for the handle bar, beginning with field data collection resulting in product tests. Furthermore a suggestion for enhanced product testing caused by the addition of static strength tests to dynamic fatigue testing is given. The occurring load levels show, that static peak loads outrange dynamic peak loads by factor two. For this reason existing dynamic test methods don't account for typical misuse situations. The generated lab testing methods for bicycle frames and components might be an enhancement for current test standards due to the integration of the loads occurring in possible misuse situations.

### References

- [1] E. GROSS: Betriebslastenermittlung, Dimensionierung, strukturmechanische und fahrwerkstechnische Untersuchungen von Mountainbikes. Düsseldorf, VDI Verlag (1997).
- [2] R. SPAHL: Lastkollektivbezogene Prüftechnik von Sicherheitsbauteilen an Fahrzeugen. Aachen, Shaker Verlag (1996).
- [3] M. BLÜMEL, V. SENNER: *Aktuelle Betriebslastenermittlung an Sportfahrrädern*. MP Materials Testing **52**, 3 (2010).
- [4] DIN 14766: Geländefahrräder (Mountainbikes) – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren. Deutsche Fassung, EN 14766:2005.

# Einsatz von EKIDES in Produktentwicklung und Lehre

## I. Jastrzebska-Fraczek

Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Das Werben mit Ergonomie hat bei den Herstellern von Produkten zugenommen und die Anwendung ergonomischer Erkenntnisse an die Produktgestaltung wächst langsam aber stetig. Defizite sind aber noch zu beobachten. Es ist also unerlässlich das Wissen über Ergonomie in verschiedenen Formen (Bücher, Forschungsberichte, Normen, Regeln und Vorschriften) zu verbreiten. Die erste kondensierte, kurze und präzise Form, das Ergonomische Wissen zu präsentieren und die ergonomischen Anforderungen als Grundlage für Überprüfung zu nehmen, war im Buch von Prof. Schmidtke „Ergonomische Prüfung von Technischen Komponenten, Umweltfaktoren und Arbeitsaufgaben. Daten und Methoden“ , das 1989 erschienen ist, realisiert. Die rechnergestützte Bereitstellung dieser Daten für die Gestaltung technischer Systeme mit dem Ergonomischen-Datenbank-Systems (EDS) folgte kurz danach (Jastrzebska-Fraczek, Schmidtke, 1992), (Schmidtke, Jastrzebska-Fraczek 2000). Das Wissensmanagement System EKIDES (**E**rgonomics **K**nowledge and **I**ntelligent **D**esign **S**ystem) von heute ist ein umfassendes, zweisprachiges Tool für die Unterstützung des Gestaltungsprozesses sowie zur Steigerung der Qualität der Produkte und Arbeitsplätze (Jastrzebska-Fraczek et al 2006). Die Deutsch-Englisch-Japanische Version wurde schon 2005 erstellt (Fukuda et al, 2005)). EKIDES ist in folgende Module gegliedert:

- Das **Basismodul** enthält **3283** Datensätze über:
  - **Arbeitsaufgaben** (z.B. Visuelle Überwachung, Systemführung),
  - **Umweltfaktoren** (z.B. Beleuchtung, Schall)
  - **Technische Komponenten** (z.B. Konsolen, Informationsmittel, Stellteile)
  - **Betriebshandbücher und Dienstvorschriften** (z.B. rechtliche Voraussetzungen des Betriebes)
  - **Anthropometrische Daten, Kräfte, Bewegungsumfänge und Bewegungszeiten**
- Das **Arbeitsplatzmodul** beinhaltet **2291** Datensätze für spezifische Arbeitsplätze (z.B. Montage, Überwachung)
- Das **Produktmodul** enthält **1983** Datensätze für die Gestaltung von **Software, WEB-Internetportal, Medizingeräte, Personenkraftwagen und Infotainment**
- In dem Modul **Alter und Leistung** (**107** Datensätze) werden mögliche mentale und physische Beeinträchtigungen bei wachsendem Alter kurz erklärt und anhand einiger Forschungsergebnisse grafisch dargestellt.

Alle Datensätze sind einheitlich in den Blättern strukturiert, mit der Kodierung der Relevanz und Angabe der Literaturquelle (siehe Abb.1).

Beschreibung	Wert	Quelle
4 Höhe Arbeitsplatte bei unbelegter Pultfläche (h2)	720 mm	DIN EN 527-1
5 Tiefe der Arbeitsplatte mit integriertem Bedienfeld für manuelle Prozessführung	250 - 500 mm	KTA 3904
6 Tiefe der Arbeitsplatte mit integriertem Bedienfeld für automatische Prozessführung	250 - 790 mm	KTA 3904
7 Breite Arbeitsbereich bei bodenfestem Sitz (b)	≤ 1500 mm	HfE C-4.2.3

Abbildung 1: Ausschnitt aus einem Datenblatt mit mehreren Datensätzen


Das System wird seit Jahren am Lehrstuhl für Ergonomie gepflegt, ergänzt und um immer neue Module erweitert. In mehreren Projekten des Lehrstuhls werden nicht nur die Daten des Systems eingesetzt sondern auch die zahlreiche Prüfungsmethoden, die als rechnergestützte ergonomische Prüfung in den Modulen untergebracht sind (Jastrzebska-Fraczek, Bubb 2003). Folgende Analysemethoden sind in EKIDES enthalten:

- Modul „Berechnungen“
- Rechnergestützte ergonomische Prüfung
- Belastungsanalyse mit 3 verschiedenen Analyseverfahren
- Checklisten und subjektive Bewertungen für Produkte und Arbeitsplätze
- Gefährdungsanalyse gemäß § 5 Arbeitsschutzgesetz
- Akzeptanzanalyse auf der Basis von 6, 8 oder bis zu 20 Bewertungskriterien

Das Modul Suchfunktionen und Bibliothek bietet dem Benutzer 1230 Literaturhinweise sowie 1772 Definitionen ergonomisch relevanter Begriffe. EKIDES ist in das „Ergonomische Praktikum für Maschinenbau Studenten“ integriert. Im Praktikumsabschnitt „Arbeitsplatz- und Produktgestaltung“ werden exemplarisch einige technische Systeme mit dem rechnergestützten Prüfverfahren und mit den eingebauten Checklisten bewertet. Eine Untersuchung der Schnittstellen am Beispiel der Software und Hardwaregestaltung wird mit dem Simulationsprogramm durchgeführt.

**Frage – Beispiel - Lösung**

Wie können Verwechslungsfehler reduziert oder sogar ausgeschlossen werden?



Form vor Farbe!

Vermeiden der Verwechslungsfehler!

Beschreibung	Sub-Kriterien	Quelle
6 Formgebung (Größe, Anzahl der Kontaktstifte, Position von Führungs- oder Passstiften usw.)	fehlerhafte Verbindung ausgeschlossen	HfE C-3.3.6
7 Farbkodierung von Anschlussstellen	Farben bei Betriebsbeleuchtung unterscheidbar	HfE C-3.3.6
8 Sicherung von Kabelverbindungen mittels Stecker	bei Zugkraftübertragung auf Kabel <math>\leq 20\text{ N}</math> keine Kontaktunterbrechung	HfE

Die Anwendung von EKIDES in der Praxis dient dazu, die vorhandenen Arbeitsplätze oder Produkte zu dokumentieren, ergonomisch zu bewerten und gegebenenfalls Verbesserungen vorzunehmen. In den einzelnen Praktikumsversuchen kann eine breite Palette ergonomischer Fragestellungen mit EKIDES bearbeitet werden. Gerne untersuchen die Studenten die eigene Leistung im Vergleich mit anderen Altersgruppen im Bereich der Untersuchungsreihe „Mentale Beeinträchtigungen“ oder versuchen mit EKIDES Hilfe für die Lösungen der Fragen (Abb.2) zu finden. In Zukunft soll mit EKIDES die Benutzer-Zufriedenheit, die Akzeptanz und schließlich auch der „joy of use“ noch genauer und einfacher beurteilt werden.

Abbildung 2: Beispiel einer Frage für die Maschinenbau Studenten

## Literatur

- [1] FUKUDA, R. ; JASTRZEBSKA-FRACZEK, I. ; BUBB, H. ; SCHMIDTKE, H.: *Development of a Trilingual Ergonomics Knowledge and Intelligent Design System (EKIDES)*, HCI International 2005: 11th International Conference on Human-Computer Interaction. CD-ROM, Las Vegas USA (2005).
- [2] JASTRZEBSKA-FRACZEK, I. ; SCHMIDTKE, H.: *EDS - Ein ergonomisches Datenbanksystem mit rechnergestütztem Prüfverfahren*. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft **46** (18NF) Nr. 1, 41–50 (1992).
- [3] JASTRZEBSKA-FRACZEK, I. ; SCHMIDTKE, H. ; BUBB, H. ; KARWOWSKI, W: *Ergonomics Knowledge and Intelligent Design System (EKIDES) - Software Tool for Design, Assessment and Ergonomics Teaching*. In: International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors, 2. Auflage, W. Karwowski (Hrsg.), London:Taylor & Francis, 1613–1625 (2006).
- [4] LANDAU, K. (Hrsg.): *Ergonomic Software Tool in Product and Workplace Design*. Stuttgart: ERGON GmbH (2000).
- [5] SCHMIDTKE, H.: *Ergonomische Prüfung von Technischen Komponenten, Umweltfaktoren und Arbeitsaufgaben. Daten und Methoden*. München, Wien: Hanser (1989).
- [6] SCHMIDTKE, H. ; JASTRZEBSKA-FRACZEK, I.: *The ergonomic database system (EDS) - an example of computer-aided production of ergonomic data for the design of technical systems*. In: Landau, K.; (Hrsg.). *Ergonomic Software Tool in Product and Workplace Design*, 214–229. Stuttgart: ERGON GmbH (2000).

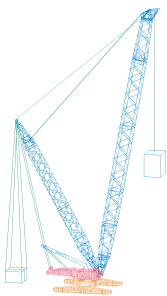
# Dynamische Kraftwerksberechnungen

S. Schneider, W.A. Günthner

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Systematischer Vergleich der dynamischen Beanspruchungen von Gittermast-Fahrzeugkranen mit den Ergebnissen der quasistatischen Auslegung nach DIN EN 13001.

## 1 Motivation

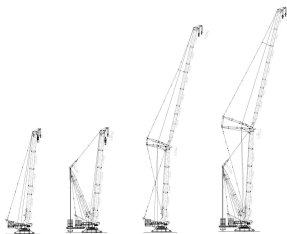


Wenn besondere Anforderungen an Hubhöhe, Tragfähigkeit und auch Ausladung des Krans gestellt werden, kommen Gittermast-Fahrzeugkrane zur Anwendung. Sie besitzen schlanke, elastische Auslegersysteme aus hochfesten Feinkornbaustählen mit spitzwinkligen Seilabspannungen, die sehr hohe Traglasten erzielen. Jedoch weisen sie schon im Gebrauchszustand ein ausgeprägt geometrisch nichtlineares Last-Verschiebungs-Verhalten auf. Ihre Auslegungsberechnung erfolgt gemäß den einschlägigen Normen auf der Basis von quasistatischen Berechnungsansätzen. Dabei werden die statischen Lasten lediglich mittels Dynamikbeiwerten vervielfacht. Die Qualität einer solchen Berechnung ist aufgrund des nichtlinearen Systemverhaltens schwer einzuschätzen und die Berechnungsansätze liefern nur Abschätzungen der dynamischen Beanspruchung des Krans.

## 2 Methode und Ziele

Das Forschungsprojekt zielt darauf ab, die maximalen dynamischen Beanspruchungen des Krans für die Vorgänge Lastheben, Wippen und Drehen für eine repräsentative Auswahl von Rüstzuständen und Auslegstellungen mittels dynamischer Finite-Elemente-Methode zu bestimmen. Hierzu findet das FE-Programm NODYA Anwendung. Dieses Programm wurde, speziell auf die Erfordernisse der Kranberechnung abgestimmt, am Lehrstuhl fml - Fördertechnik Materialfluss Logistik der TU München entwickelt. Lineare als auch geo-metrisch sowie materiell nichtlineare Berechnungen können problemlos durchgeführt werden. Die Beanspruchungen charakteristischer Bauteile werden anschließend denen aus einer quasistatischen Berechnung nach Norm gegenüber gestellt. Die Untersuchungen liefern Aussagen über die Güte der Lastannahmen und den Geltungsbereich der gängigen Krannormen. Somit sollen Risiken und Potentiale der aktuellen Auslegungsweise von Gittermastkranen aufgedeckt werden.

## 3 Ausgangsdaten

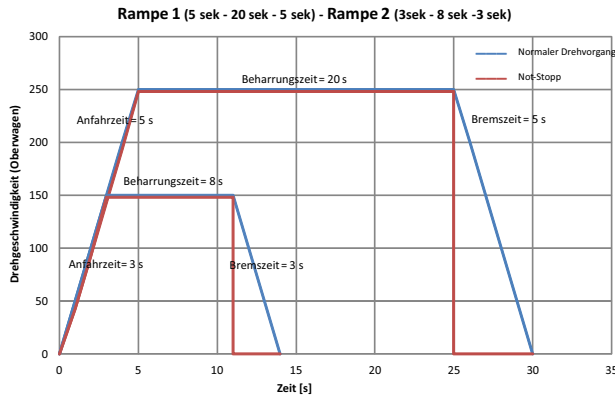


Die den Berechnungen zugrunde liegenden Krane sind große Gittermastkrane mit Raupenfahrwerk, die Tragfähigkeiten von über 1000t und Hakenhöhen von über 220m bewerkstelligen können. Gittermastkrane werden überall dort eingesetzt, wo Teleskopkrane die geforderten Traglasten nicht mehr bringen können oder auch wenn Lasten verfahren werden sollen. Sie sind unentbehrliche Helfer im Schwertransport. Gittermastkrane besitzen eine hohe Vielfalt an Auslegersystemen, die sich zu unterschiedlichsten Höhen montieren lassen. Damit können die verschiedensten Hubvorgänge realisiert werden. Große Kransysteme bieten dabei bis zu 40 verschiedene Rüstkonfigurationen. Raupenkrane werden notwendig, wenn keine Straßen vorhanden sind, es sich folglich um schwieriges Gelände oder schlechte Bodenbeschaffenheit handelt. Sind die Anforderungen an Traglast, Hubhöhe und Reichweite hoch, so ergeben sich weitere prädestinierte Einsatzbereiche für Raupenkrane. Typische Arbeiten findet man im Kraftwerks- und Industriebau, sowie beim Aufbau von Windenergieanlagen. Sie werden heute fast ausschließlich von Raupenkranen durchgeführt.



## 4 Projektablauf

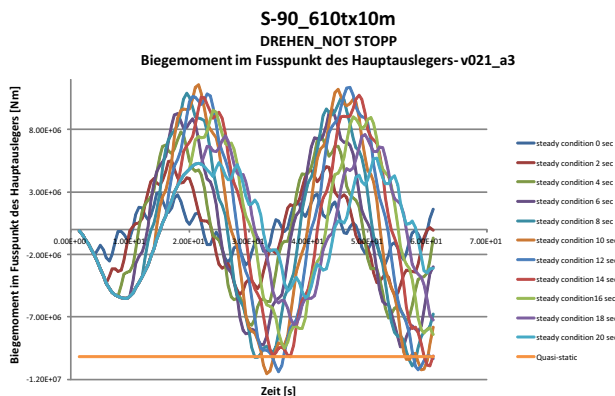
Neben einer Betrachtung verschiedener Auslegersysteme und Rüstzustände erscheint es günstig die Untersuchungen an zumindest zwei Kranen unterschiedlicher Tragfähigkeitsklassen vorzunehmen.



Die erste Phase der Kranberechnung beinhaltet die Generierung eines FE-Rechenmodells. Dieses basiert auf realen Daten vorhandener Krane. Charakteristisch ist, dass jeweils ein hinsichtlich der Steifigkeits- und Masseigenschaften äquivalentes Balkenelement je einem Gittermastzwischenstück zugeordnet wird. Anschließend werden die Antriebe modelliert. Das Antriebssystem wird mit seinen Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Beharrungsintervallen realitätsgetreu abgebildet. Einem dynamischen Rechengang geht stets ein statischer Rechenschritt voraus. In diesem werden die Eigenlasten definiert und die somit hervorgerufenen Tragwerks- und Seilbelastungen ermittelt. Am Ende des Statikrechenlaufs werden Hublast und Gegengewicht aufgebracht. Die sich anschließenden dynamischen Prozesses des Lasthebens, Krandrehens und -wippens beginnen letztlich aus einem statischen Zustand, einem Zustand ohne Bewegung. Die Resultate des Statikrechengangs sind Basis der sich anschließenden dynamischen Berechnung.

## 5 Ergebnisse

In den ersten Berechnungen zum Krandrehen wurden verschiedene mögliche Einflussparameter untersucht. Um die maximalen Belastungen zu fassen erfolgten die Berechnungen mit verschiedenen Beharrungszeiten nach Erreichen der gewählten Drehgeschwindigkeit. Als charakteristische Größe für die



resultierend wirkende Belastung am Kran diente das Biegemoment im Fußpunkt des Hauptauslegers. Dieses war maßgeblich von der Drehgeschwindigkeit abhängig. Beschleunigung und Betriebsmodus (Normaler Drehvorgang, Not-Aus), sowie die Position der Hublast spielten eine untergeordnete Rolle. Die Werte der quasistatischen Rechnung, die für den Vergleich mit der Berechnung nach Norm DIN EN 13001 ermittelt wurden, waren geringer als die Werte der dynamischen Rechnung. Als Fazit der ersten nichtlinearen dynamischen Berechnungen zum Krandrehen kann festgehalten werden, dass die Drehgeschwindigkeit als Haupteinflussparameter auf die wirkenden Belastungen am Kran identifiziert wurde und dass der Ansatz der quasistatischen Berechnung ungeeignet ist. Nur eine dynamische Berechnung gibt das Systemverhalten korrekt wieder!

# Das FVA-Programm RIKOR (Ritzelkorrektur)

S. Stiller, B.-R. Höhn, K. Stahl

Lehrstuhl für Maschinenelemente (FZG), Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Das Programm „Ritzelkorrektur“ ermittelt eine Flankenkorrektur zum Ausgleich der lastbedingten Getriebeverformungen. Es werden hierfür zum Einen die Verformungen des Welle-Lager-Systems und der Zähne ermittelt, zum anderen werden die Belastungen im Zahnkontakt berechnet. Die mit RIKOR berechneten topologischen Beanspruchungen können zur Beurteilung der Zahnradtragfähigkeit verwendet werden.

## 1 Forschungen zum Thema Zahnräder und Getriebebau

Die Anwendungen von Getrieben sind vielseitig. Sie reichen von Scheibenwischergetrieben, über Automobilmotoren bis hin zu Großgetrieben in Schiffen und in Windkraftanlagen. Die Anforderungen an alle Arten von Getrieben sind unter anderem eine hohe Zuverlässigkeit, eine hohe Sicherheit gegen Versagen, eine hohe Leistungsdichte und ein hoher Wirkungsgrad. Forschungen zum Thema Getriebe haben zum Ziel möglichst detaillierte und exakte Aussagen über das Verhalten des Getriebes und der enthaltenen Maschinenelemente im Betrieb zu geben und somit Größen wie eine Sicherheit gegen Versagen abschätzen zu können. Die Verzahnungen im Getriebe bilden hier einen Schwerpunkt in der Forschung. Im Auftrag der Forschungsvereinigung für Antriebstechnik e.V. (FVA), dem weltgrößten Forschungsnetzwerk mit über 200 Mitgliedsfirmen, wurden eine Vielzahl von Programmen entwickelt, welche die Übertragung der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse in die industrielle Praxis bringen. Die Programme beinhalten unter anderem die folgenden Themen:

- Berechnung der Geometrie und der Tragfähigkeit unterschiedlicher Verzahnungsarten, darunter von Stirnradverzahnungen (STplus)
- Berechnung der Verformungen in Verzahnungen und der daraus resultierenden Lastverteilung und der resultierenden Tragfähigkeit (RIKOR)
- Berechnung des Schwingungs- und Geräuschverhaltens von Stirnradgetrieben (DZP)
- Berechnung der Tragfähigkeit von Kegelradverzahnungen mit einem Flankengenerator und KNplus

Mit den Berechnungsprogrammen wird das Ziel verfolgt, möglichst ganzheitlich ein Getriebe betrachten zu können.

## 2 Berechnungsumfang des Programms Ritzelkorrektur (RIKOR)

Das Programm „Ritzelkorrektur“ berechnet das Verformungsverhalten von Stirnradgetrieben. Die folgenden Anteile werden berücksichtigt (vgl. Abb. 1):

- die elastischen Verformungen der Ritzelwelle sowie der Radwelle, einschließlich des Radkörpers
- Wellenverlagerungen aufgrund von Lagerluft und elastischer Verformung des Lagers, des Gehäuses und des Fundaments
- Verformungen der Zähne durch Biegung, Schub und Hertzscher Abplattung

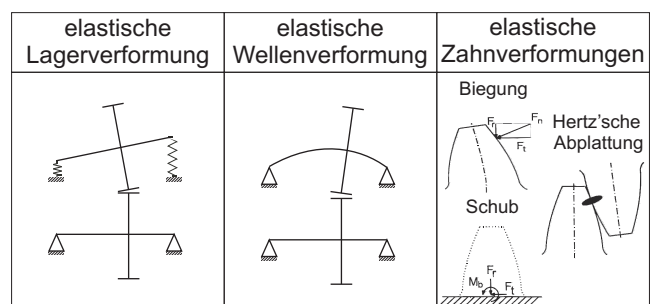


Abbildung 1: Verformungen in Getrieben

Aus den Verformungen der einzelnen Maschinenelemente resultiert eine ungleichmäßige Lastverteilung im Zahnkontakt, welche die Tragfähigkeit eines Getriebes mindert.

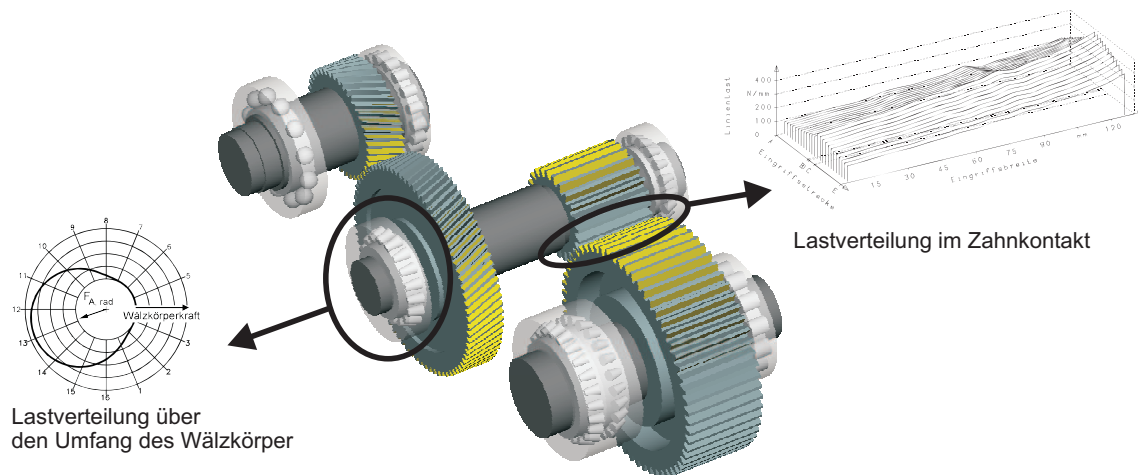
Das Programm RIKOR ermittelt Flankenkorrekturen zum Ausgleich der lastbedingten Getriebeverformungen. Dabei sind im Programm zwei verschiedene Berechnungsverfahren integriert:

- **Die ebene Betrachtungsweise**

Bei der ebenen Betrachtungsweise wird die Steifigkeit beim Durchlauf des Zahneingriffs zeitlich gemittelt und der Zahn entlang der Zahnbreite in voneinander unabhängige „Scheibchen“ unterteilt. Diese vereinfachte Betrachtung ergibt einen Faktor zur Beurteilung der Ungleichmäßigkeit der Lastverteilung über der Zahnbreite. Das Vorgehen hat in ein Berechnungsverfahren nach Norm DIN 3990 Eingang gefunden.

- **Die topologische Betrachtungsweise**

Bei der topologischen Betrachtungsweise werden örtliche Steifigkeiten der Flankenbereiche berücksichtigt. Es wird so die Lastverteilung für den gesamten Eingriff berechnet (vgl. Abb. 2). Es werden Flankenkorrekturen ermittelt, die eine günstige Lastverteilung ergeben. Die gewünschte Form der Lastverteilung kann vom Anwender vorgegeben werden.



**Abbildung 2:** Beispiele für Berechnungsergebnisse des Programms RIKOR

Die beschriebenen Berechnungen können für jeweils eine Stirnradstufe durchgeführt werden. Es werden die Verformungen der betrachteten Zahnräder, der dazugehörigen Wellen und auf den Wellen befindliche Lager berücksichtigt. Besteht ein Getriebe aus mehreren Stufen können resultierende Wellenverformungen berechnet werden.

### 3 Zukünftige Entwicklungsschritte

In der Berechnung der Lastverteilung im Zahnkontakt sind Kreuzeinflüsse von mehreren Stirnradstufen in einem Getriebe untereinander bislang nicht erfasst. Der Nutzen einer ganzheitlichen Berechnung eines Getriebes mit allen Kreuzeinflüssen sind z.B. die Abbildung komplexer Getriebesysteme (z.B. eine Welle-in-Welle-Lagerung) oder die Berücksichtigung der Auswirkungen einer ungleichmäßigen Lastverteilung auf die Lebensdauer der Lagerung.

Hierfür wird eine Berechnung entwickelt, in der alle Zusammenhänge im Getriebe in ein Gleichungssystem gefasst werden. Nach dem Lösen des Gleichungssystem liegen alle Verformungen und Belastungen vor. Dieses Gleichungssystem wird im ersten Schritt allgemeingültig aufgestellt und umgesetzt. Für die Anwendung auf praxisrelevante Getriebe werden verschiedene Randbedingungen ergänzt. Zusätzlich sind mehrere Iterationen um das Gleichungssystem herum notwendig, z.B. um nichtlineares Verhalten von Wälzlager zu berücksichtigen zu können.

# Automated Gearbox Design

C. Königseder, K. Shea

Lehrstuhl für Produktentwicklung, Fachgebiet Virtuelle Produktentwicklung, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Currently computers are used to support engineers especially during the later stages in the development of new products. Goal of this research is to computationally support the early design stages. Computational Design Synthesis based on graph grammars can be used to enable the computer to design and suggest valid and even creative solutions of an engineering task to a designer. Research in this area is presented and some preliminary results are demonstrated on an application where a gearbox is generated automatically.

## 1 Motivation

Increased power of computer hardware and more computer fluency of engineers as well as improved software and user interaction have enabled designers to integrate the computer into their daily work. In the product development process, especially for product modeling in CAD systems and for simulation, computer tools are widely used. At these stages, several decisions on the design have already been made and the computer supports the engineer to model or analyze the product. This has shown high potentials of reducing cost and time, e.g. because less physical prototypes have to be manufactured, when preliminary simulations can be done on a computational model. Computer support was also necessary to enable people to handle more complex products. Up to now, available software focuses on these later development stages, focusing on the definition of the product geometry, but current research is also going in the direction of supporting the early design stages. Here, little is known about the product but decisions in this stage have great effect on quality and costs of the product to be developed. Enabling the computer to support the engineer also in these early stages can be advantageous for the whole development process.

## 2 Computational Design Synthesis using graph grammars

In general, designing is a process of decision making. The designer creates different alternatives, evaluates them and makes a decision on which one to use. This process is time consuming and can often be supported with computational methods. Computational Design Synthesis (CDS) is a research area that focuses on approaches to synthesize product designs. Main tasks are the generation of designs and design alternatives and the search and optimization to identify good designs out of the range of synthesized designs. [1] One approach is to use graph grammars for design synthesis. In this approach a product design is represented as a graph. This graph is developed and changed using graph rules. An overview of the CDS process using graph grammars is given in Figure 1. In this four step approach the specification of graph rules is executed in the representation step. In this step the problem specific knowledge is formulated in graph rules. An initial graph is also developed from which the design synthesis is started.

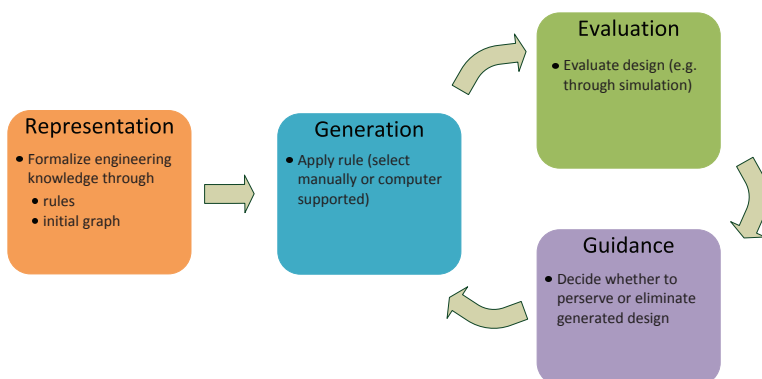


Figure 1: Overview of the CDS process using graph grammars.

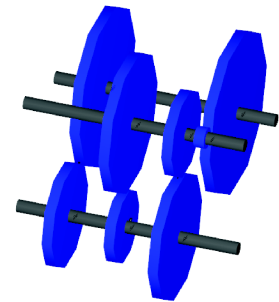
In the generation step, the rules are applied. This can either be done manually by the designer or through computer based decisions. The application of a rule changes the graph, i.e. the design that is represented by the graph. Through the recursive execution of this generation step, new designs can be synthesized. To influence this generation process and to achieve better designs, the evaluation and guidance steps are used. In the evaluation step, the generated designs are evaluated while the guidance step includes strategies for preserving good or eliminating bad designs and for terminating the process.

### 3 Automated synthesis of a gearbox

A gearbox synthesis problem is used to show current work and the benefits of using CDS methods for supporting the early design phases. Designing a gearbox can be a very time consuming task and has several repetitive steps like calculating gear ratios. This makes it a good application area for using CDS methods, as the computer can easily layout a gearbox and calculate the key parameters.

The gearbox synthesis problem is closely related to research performed by Lin et al. [2] The difference between this work and previous work is that it aims to provide research results in a new open-source tool that is usable for industry. The tool is based on a graph grammar interpreter, that was also developed within the Virtual Product Development Group. [3]

For the gearbox design, positions of input and output shaft as well as the number of speeds and their gear ratios are given. Additionally, the dimensions of the bounding box are given in which the gearbox has to fit. Goal of the CDS method is to find several gearbox designs that meet the given requirements. For this the engineering knowledge is defined in rules, e.g. to add, change or delete gears and shafts. A simple gearbox with one input and one output shaft can be specified as an initial design. Topological as well as parametric graph grammar rules are implemented to influence number, position and size of gears and shafts. Applying the rules to the initial design enables to generate gearboxes. To meet the requirements an optimization algorithm drives the process of rule applications.



**Figure 2:** Result from automated gearbox design.

### 4 Results and outlook

A gearbox design as a result of the current state of work is shown in Figure 2. Gearboxes can automatically be designed using the user inputs and an implemented algorithm to guide the search process. Up to now the design tool is restricted to a prismatic bounding box for the required space and to spur gears. Further work to improve the gearbox generation aims at the consideration of more complex space requirements and of different kinds of gears, e.g. bevel gears.

### References

- [1] K. SHEA, M.I. CAMPBELL: Computational Design Synthesis Special Interest Group, Design Society <http://www.cdssig.org/sc/whatisCDS.htm>
- [2] Y. LIN, K. SHEA, A. JOHNSON, J. COULTATE, J. PEARS: *A Method and Software Tool for Automated Gearbox Synthesis*, Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009 August 30 - September 2, 2009, San Diego, California, USA
- [3] B. HELMS, K. SHEA: booggie: brings object-oriented graph grammars into engineering <http://www.booggie.org>

# Einfluss neuer, brennstoffflexibler Vormischbrenner auf die thermoakustischen Eigenschaften von Ringbrennkammern

S. Bade, T. Sattelmayer

Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

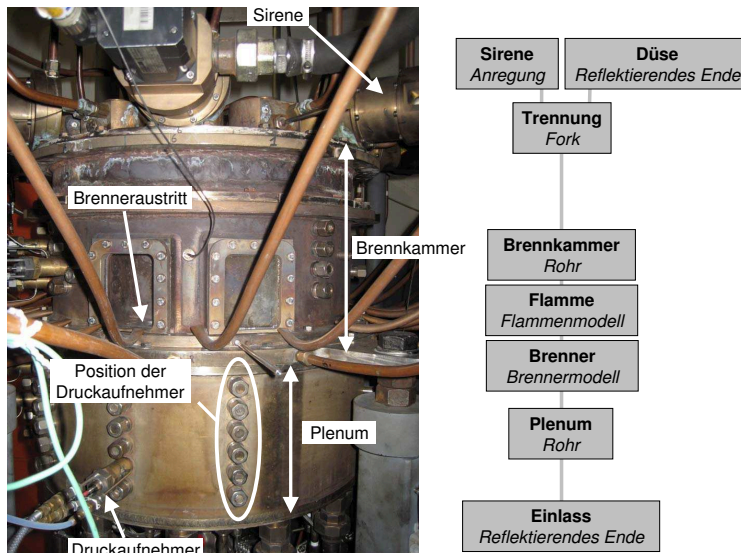
In diesem Projekt, aus der Forschungsinitiative KW21 II, das gefördert wird durch den Freistaat Bayern und Alstom Power Systems GmbH, werden der Einfluss grundlegender Eigenschaften von Vormischbrennern auf die thermoakustische Stabilität in Ringbrennkammern experimentell untersucht und mithilfe von Netzwerken modelliert. Ziel der Untersuchungen soll eine, durch einen "Design for Stability"-Prozess vorhergesagte Brennergeometrie sein, die für einen bestimmten Betriebsbereich in der Ringbrennkammer zu thermoakustisch stabilem Verhalten führt.

## 1 Ausgangssituation

Die in Kombikraftwerken für die Stromerzeugung eingesetzten schadstoffarmen Gasturbinen, in denen in Mehrbrenneranordnung Erdgas verbrannt wird, basieren auf der mageren Niedertemperaturverbrennung. Diese Technologie bringt aber die Gefahr thermoakustischer Instabilitäten mit sich, die in kurzer Zeit zu massiven Schäden in der Brennkammer führen können.

Da es immernoch große Unsicherheiten in der Stabilitätsvorhersage bei Neukonstruktionen oder erheblichen Änderungen der Betriebsweise des Verbrennungssystems gibt, ist der Entwicklungsprozess, durch aufwendige, experimentelle Verifikationen, auf geringste Schrittweiten beschränkt. Nach wie vor besteht Bedarf zur Abklärung der grundlegenden Instabilitätsmechanismen und ihrer systematischen Beschreibung.

### 1.1 Ziel des Projektes



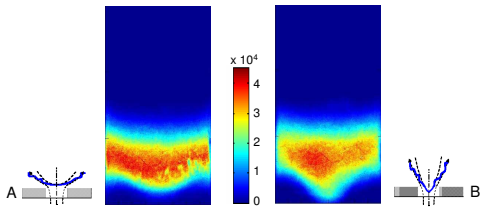
**Abbildung 1:** Ringbrennkammerversuchsstand (links) mit entsprechendem Netzwerkmodell (rechts)

Anhand des Stabilitätsverhaltens einer Ringbrennkammer wird untersucht, welche grundlegenden Eigenschaften neuer, brennstoffflexibler Vormischbrenner für die thermoakustische Stabilität maßgeblich sind. Dazu wird ein modularer Brenner mit den Merkmalen der neuen Technologie entwickelt. Der Einfluss auf die thermoakustischen Eigenschaften verschiedener Brennervariationen wird in Einzelbrennerexperimenten untersucht. Diese Daten werden in einem "Design for Stability-Prozess" zur Entwicklung eines parametrisierten Netzwerkmodells sowohl für den Brenner als auch für die Flamme genutzt. Mit dem Netzwerkmodell der Ringbrennkammer [1] (Abbildung 1 rechts), in das das Brenner- und Flammenmodell implementiert sind, werden dann durch Stabilitätsanalysen die Parameter ermittelt, die für einen vorgegebenen Betriebsbereich

thermoakustische Stabilität vorhersagen. Der den Parametern entsprechende Optimalbrenner wird anschließend für die Ringbrennkammer (Abbildung 1 links) gefertigt um die Vorhersage experimentell zu überprüfen.

## 2 Erste Teilergebnisse

### 2.1 Erzeugung verschiedener Flammenstabilisierungstypen mit modularem Brenner



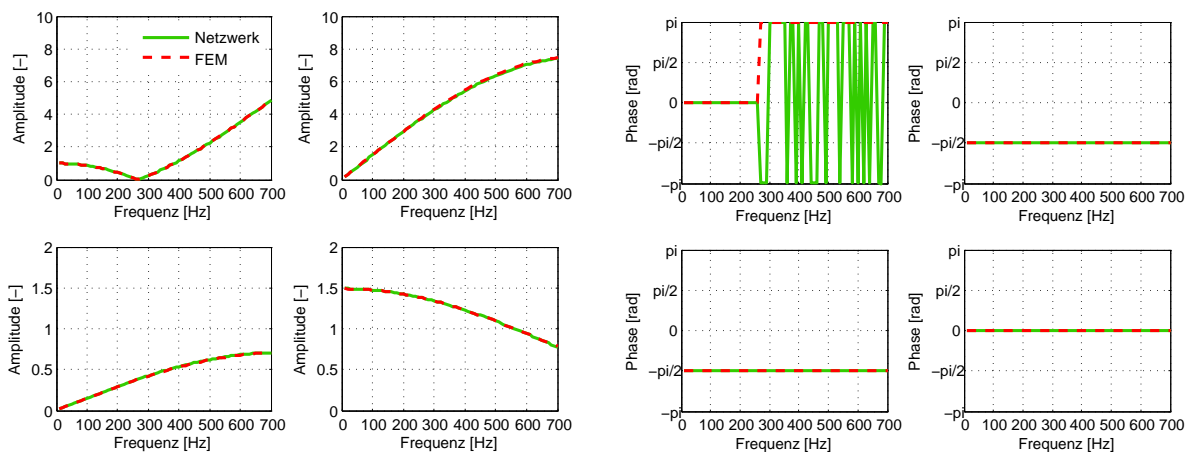
**Abbildung 2:** OH\*-Intensitätsbilder der Flammenstabilisierungstypen A und B

Zunächst wurde ein modularer Brenner entworfen, der verschiedene Drallstärken, Druckverluste und Verzugszeiten von Geschwindigkeitsschwankungen ermöglicht.

Abhängig vom ausgebildeten Drallströmungsfeld sowie von gemischbedingten turbulenten Reaktionsgeschwindigkeiten können sich unterschiedliche Flammenstabilisierungstypen ausbilden, deren Einfluß auf die Stabilität es ebenfalls zu untersuchen gilt. Zwei Flammentypen, eine schüssel- (A) und eine kegelförmige (B) Flamme, (Abbildung 2) wurden durch Variation der Axialluft erzeugt.

### 2.2 Entwicklung eines Netzwerkmodells

Desweiteren wird ein Netzwerkmodell für den modularen Brenner entwickelt, mit dem das Übertragungsverhalten von Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen in Form von Transfermatrizen berechnet werden kann. Der Brenner wird dabei aus einzelnen Rohr- und Flächensprungelementen zusammengesetzt. Das reine akustische Verhalten dieses Modells konnte schon durch Lösung der eindimensionalen Wellengleichung mit der Finiten Elemente Methode (FEM) validiert werden. Dazu wurden Amplitude und Phase der Transfermatrix, aufgetragen über die Frequenz, sowohl mit dem Netzwerkmodell als auch aus der FEM-Rechnung bestimmt. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, beschreibt das Modell das Übertragungsverhalten exakt.



**Abbildung 3:** Vergleich der Amplitude (links) und der Phase (rechts) der Transfermatrix des Brenners bestimmt mit dem Netzwerkmodell und der Lösung der Wellengleichung mit der Finiten Elemente Methode

### 2.3 Aktueller Stand

Stand des Projektes ist die Entwicklung eines Flammenmodells, um die in Abschnitt 1.1 erwähnten Stabilitätsanalysen zur Ermittlung eines Optimalbrenners durchführen zu können. Dazu werden die Eigenschaften der Flamme von Brennern mit unterschiedlichen Verzugszeiten in einem Einzelbrennerversuchsstand experimentell untersucht.

#### Literatur

- [1] D. FANACA: Influence of Burner-Burner Interaction on the Flame Dynamics in an Annular Combustor, Dissertation 2010.

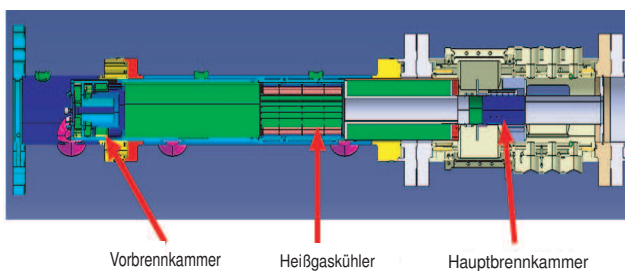
# Untersuchung einer selbstzündenden Gasturbinenbrennkammer mit Abgasrezirkulation

E.-M. Haner, G. Tautschnig, T. Sattelmayer

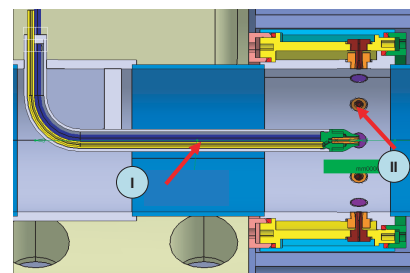
Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Mehrstufige Verbrennungsprozesse in Gasturbinenkraftwerken zeichnen sich durch hohe Wirkungsgrade im Teillastbetrieb aus. Hierbei wird in die heißen Verbrennungsgase der ersten Brennkammer nach der Hochdruckturbine nochmals Kraftstoff eingespritzt. Durch die hohen Temperaturen brennt das Gemisch der zweiten Kammer infolge Selbstzündung.

## 1 Versuchsaufbau und Projektstrategie



(a) Aufbau des Verbrennungsexperiments



(b) Injektionssystem mit zentraler Lanze (1) und Querstrominjektoren (2)

**Abbildung 1:** Versuchsaufbau

Ziel dieses Projekts ist es, den Einfluss der Abgasrezirkulation (AGR) auf die Selbstzündung zu untersuchen. Der Aufbau im Verbrennungsexperiment, dargestellt in Abbildung 1(a), besteht aus drei Komponenten. In einer Vorbrennkammer werden heiße Gase in unterschiedlicher Zusammensetzung erzeugt, um verschiedene Rezirkulationsraten zu simulieren. Der daran anschließende Heißgaskühler reguliert die Eintrittstemperatur in die Hauptbrennkammer. Durch die konstante Eintrittstemperatur soll dieser Einflussparameter ausgeschlossen werden, um sich auf die Auswirkungen der Abgasrezirkulation auf die Selbstzündung zu fokussieren. Die nachfolgende runde Hauptbrennkammer besitzt zwei verschiedene Injektionssysteme, deren Auswirkung auf das Zünden untersucht wird. Über einen zentralen Injektor, bezeichnet mit I in Abbildung 1(b), wird Kraftstoff parallel zur Hauptströmungsrichtung eingebracht. Dieser Aufbau ist ähnlich mit den atmosphärischen Versuchen in [4] und [5]. Das Mischungsverhalten dieser Injektion ist weitestgehend verstanden und eignet sich besonders, um den Einfluss der AGR mit Druckerhöhung und variierte Injektionsgeschwindigkeiten zu verstehen. Die Querstromeindüsung ist das zweite Injektionssystem. Sie besteht aus einem Ring mit sechs Injektoren, die alle senkrecht zur Strömungsrichtung am Rand der Brennkammer gleichförmig angeordnet sind, gekennzeichnet in der Nummer II in Abbildung 1(b). Das Eindringverhalten dieser Injektoren ist für nicht reagierende Strömungen bekannt aus [6]. Dieser Kraftstoffstrom wird zusätzlich noch mit Stützluft ummantelt, um ein Zünden direkt an der Eindüsung zu vermeiden. In dieser Konfiguration bilden sich eng an die Brennkammerwand anliegende Jets, die über eine lange Strecke hin bestehen bleiben. Die Querstromeindüsung ist ein in der Technik häufig verwendetes Injektionskonzept, für das bisher kaum publizierte Verbrennungsversuche existieren. Diese beiden Injektionssysteme sollen sowohl in Kombination als auch getrennt betrieben werden. Der kombinierte Betrieb ist in Hinblick auf die Wechselwirkungen der beiden Systeme von Interesse und wird ebenfalls in diesem Projekt untersucht.

## 2 Hintergrundwissen

Experimentelle Ergebnisse in Spadaccini und Colket [1] zeigen, dass das Einsetzen der Selbstzündung von der Temperatur, dem Druck und der Kraftstoffzusammensetzung abhängt. [1] konstatieren, dass neben diesen



Faktoren der Mischungszustand zwischen Kraftstoff und Heissgas entscheidend dafür ist, wann die Reaktion einsetzt und ob der Kraftstoff vollständig verbrannt wird.

Mit dem Einfluss der Mischung auf das Einsetzen der Selbstzündung setzt sich Mastorakos in [2] auseinander. Aus Simulationsergebnissen schlussfolgert er, dass neben dem Mischen durch Turbulenz und Diffusion auch die Mischungshistorie dafür entscheidend ist, ob sich aus lokalen Zündereignissen schließlich stabile Flammenfronten einstellen. Dabei sind sowohl zeitliche als auch räumliche Ungemischtheiten ausschlaggebend. Diese Theorie ist bisher nicht vollständig experimentell bestätigt.

Bei der Abgasrezirkulation an einer Gasturbine wird ein Teil der Frischluft am Eintritt des Kompressors durch rezirkuliertes, abgekühltes Abgas ersetzt. Infolge des dadurch verringerten Sauerstoffgehalts und erhöhten  $\text{CO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ - Anteils wird die Reaktivität des Gemischs vermindert. Untersuchungen hierfür zeigen, dass infolge dessen der Zündverzug  $\tau_{\text{ign}}$ , die Zeit vom Eindüsen bis zur Entzündung des Brennstoffs, zunimmt [3]. Dadurch mischt der eingedüste Kraftstoff länger und besser, bevor es zur Zündung kommt, und die Entstehung von  $\text{NO}_x$  bei der nachfolgenden Verbrennung wird verringert.

### 3 Versuche und angewendete Messtechnik

Zur Untersuchung des Einflusses der AGR auf die Selbstzündung werden Versuche auf zwei Prüfständen durchgeführt. Die Verbrennungsversuche erfolgen im Hochdruckversuchsstand. Neben Zündverhalten werden dort die Flammenstabilisierung und Emissionsentstehung untersucht.

Da im Verbrennungsprüfstand die optische Zugänglichkeit sehr begrenzt ist, sollen die Untersuchungen mit Messungen des Strömungs- und Mischungseinflusses im Wasserkanal begleitet werden. Die gute optische Zugänglichkeit des Kanals lässt Detailstudien zu. Durch Reynoldsähnlichkeit ist eine Übertragbarkeit dieser Messgrößen gewährleistet und die Ergebnisse lassen eine Interpretation der Verbrennungsergebnisse zu, wie man in [7] sehen kann. Die Strömungsfelder werden mittels Particle Image Velocimetry (PIV) bestimmt.

Da das Injektionsverhalten der zentralen Injektion weitestgehend bekannt ist, liegt der Fokus bei den Mischungsuntersuchungen auf den sechs senkrecht zur Strömungsrichtung eingedüsten Kraftstoffströmen. Mittels Laser Induced Fluorescence (LIF) soll das Mischungsverhalten der Injektion mit verschiedenen Injektionsgeschwindigkeiten charakterisiert werden. Bei LIF wird der kleinere Stoffstrom der Strömung mit fluoreszierenden Stoffen, sogenannten Tracern, eingefärbt, die durch Anregung mit dem Laser Licht aussenden. Da das ausgesendete Licht proportional zur Tracerkonzentration ist, kann damit die lokale Mischung bestimmt werden. Bei der Querstromeindüsung handelt es sich um ein Dreistoffsystem, da neben Kraftstoff noch Stützluft zugeführt wird. Deshalb muss neben dem bereits verwendeten Farbstoff Uranin ein weiterer Tracer eingesetzt werden. Die verwendete Messtechnik muss entsprechend adaptiert werden.

Das hier vorgestellte Projekt, COORETEC 2.1.5, gehört zum AG Turbo Teilverbund Projekt Verbrennung. Die AG Turbo, eine Kooperation zwischen Industrie, Forschungseinrichtungen und Universitäten, wird dabei vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt. Direkter Projektpartner ist Alstom.

### Literatur

- [1] L.J. SPADACCINI, M.B. COLKET III: *Ignition Delay Characteristics of Methane Fuels*, Prog. Energy Combust. Sci., **20**, 431–460 (1994).
- [2] M. EPAMINONDAS: *Ignition of turbulent non-premixed flames*, Progress in Energy and Combustion Science, **35**, 57–97 (2008).
- [3] F. GÜTHE, G. MARTA DE LA CRUZ, A. BURDET: *Flue gas recirculation in gas turbines: investigation of combustion reactivity and  $\text{NO}_x$  emission*, Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air (2009).
- [4] C. MARKIDES: *Autoignition in a Turbulent Duct Flow*, Phd Thesis, University of Cambridge (2008).
- [5] R. CABRA, J.-Y. CHENA, R.W. DIBBLE, A.N. KARPETIS, R.S. BARLOWB: *Lifted methane-air jet flames in a vitiated coflow*, Combustion and Flame, **143**, 491–506 (2005).
- [6] J.D. HOLDEMAN, T.D. SMITH, J.R. CLISSET, W.E. LEAR: *A Spreadsheet for the Mixing of a Row of Jets With a Confined Crossflow*, NASA/TM (1999).
- [7] A. LACARREL, S. GÖKE, C.O. PASCHEREIT: *A quantitative link between cold-flow scalar unmixedness and  $\text{NO}_x$  emissions in a conical premixed burner*, Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air (2010).

# Selective Catalytic Reduction (SCR) of Nitrogen Oxides for Marine Diesel Engines

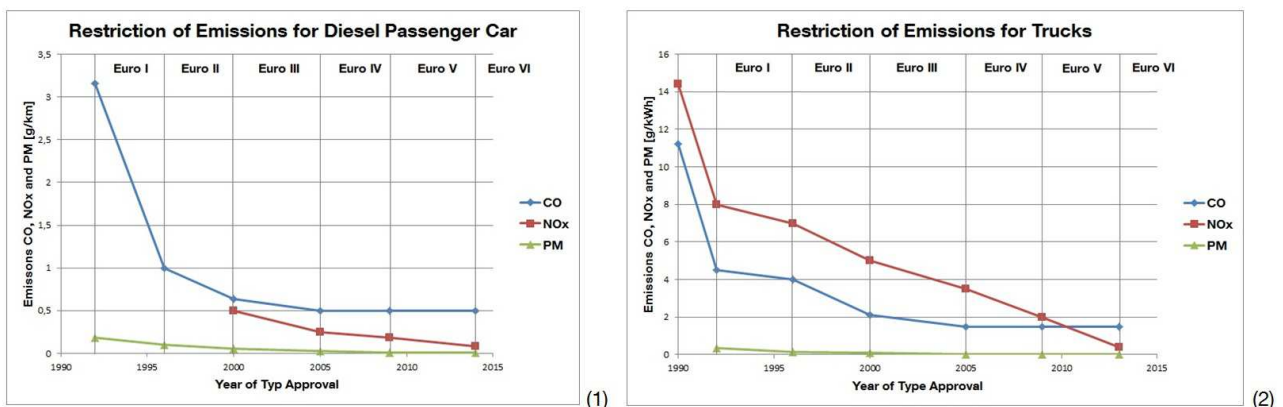
K. Johe, T. Sattelmayer

Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

The SCR technology is a established research area at the Lehrstuhl für Thermodynamik, whereat the main field of activity lays on the conversion of urea to ammonia. The focus of the current project is the application of the hydrolysis catalyst for production of ammonia for marine diesel engines.

## 1 Motivation

Exhaust gas treatments for diesel engines in private or commercial application are nowadays state of the art to achieve the prescriptive limits (Figure 1). The first european restriction was established in 1970 for carbon monoxids (CO) and hydrocarbons ( $C_nH_{2n+2}$ ). Followed in 1977 by limits for nitrogen oxides and particulate matter for diesel engines in 1988. Since this time the restrictions have been readjusted about every five years. For marine diesel engines only the optimization of the combustion was used to reduce the toxic substances in the past. Due to the reason that the restrictions of emissions of nitrogen oxides will be tighten also for marine diesel engines in the next few years, treatments as Selective Catalytic Reduction and diesel particulate filters are necessary to minimize the substances to the requested level.



**Figure 1:** European restrictions for emissions of carbon dioxides (CO),  $NO_x$  and particulate matter (PM) for diesel engines in private (1) and commercial (2) application.

## 2 Selective Catalytic Reduction Chemistry

Nitrogen oxides (generic term is  $NO_x$  used for  $NO$  and  $NO_2$ ) are produced during combustion, especially at high temperatures and have a negative influence on environment and human health.

Selective Catalytic Reduction characterize the selective conversion of  $NO_x$ , with the aid of catalysts, into water ( $H_2O$ ) and diatomic nitrogen ( $N_2$ ). The reducing agent is ammonia ( $NH_3$ ) and the chemical equations for the stoichiometric reaction are:



Thereby the first equation shows the standard SCR, the second equation the  $NO_2$  SCR and the third the fast SCR.

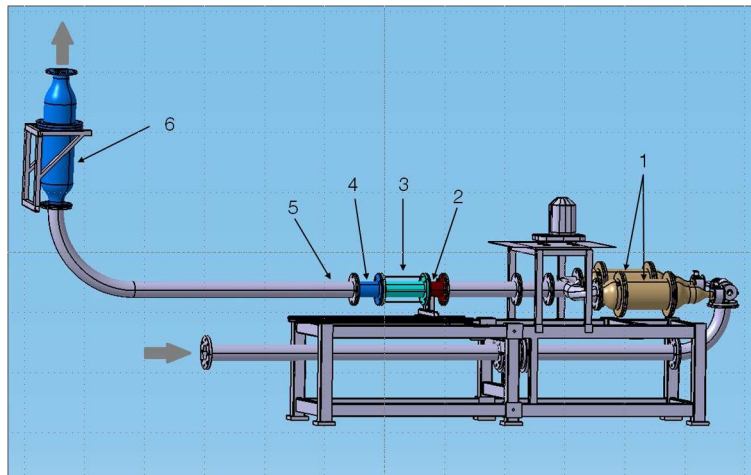
For commercial applications ammonia may not be transported as pure substance, so it has to be produced out of an urea-water-solution (commercial AdBlue: 32.5 % urea-water-solution). For this production a hydrolysis catalyst is needed, composed of an injector for urea ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), a vaporization space and the hydrolysis catalyst itself. The production of ammonia depends on a few boundary conditions, but primarily on the temperature. The activation temperature of the thermolysis and the hydrolysis is about 520 K, though temperatures between 570 K and 670 K are preferred in order to achieve better rates of conversion and avoid deposit.

### 3 Description and Objectives of the Project

The current project at the Lehrstuhl für Thermodynamik, in cooperation with MAN Diesel & Turbo SE in Augsburg, is concerned with the adaption of SCR catalyst technology used for trucks to the requirements of marine diesel engines. The main topic is the application of a hydrolysis catalyst for the production of ammonia due to the clearly higher massflows of exhaust gas.

### 4 Assembly of the test facility

The main part of the test facility is the hydrolysis catalyst with its components. To simulate the temperature of the exhaust gas the air/gas-massflow is heated by two cartridge heaters. Afterwards the urea-water-solution is inserted through the injector, while the injector disperses the liquid and the drops evaporate in the vaporization space. The conversion of the urea to ammonia occurs at the hydrolysis catalyst, which is coated with titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ). To measure the conversion rates a Fourier Transform Infrared Spectroscopy spectrometer (FTIR-spectrometer) is used and finally an oxidation catalyst converts the toxic ammonia before the gas-massflow exits.



**Figure 2:** Assembly of the test rig consisting of: income gas-massflow, heaters (1), injector (2), vaporisation space (3), hydrolysis catalyst (4), extraction point for the FTIR-spectrometer (5) and the oxidation catalyst (6).

### References

- [1] S. STEINBACH: Einfluss der Transportvorgänge auf die Effizienz von harnstoffkatalysatoren in SCR-Abgasanlagen, Dissertation, Technische Universität München (2007).
- [2] J. GRÜNWARD: Verbesserung der Reduktionsmitteldispersion und -verdunstung in SCR-Abgasanlagen, Dissertation, Technische Universität München (2007).

# Emissionsverminderung bei der Effizienz- und Leistungserhöhung von Gasturbinen

A. Marosky, V. Seidel, T. Sattelmayer

Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Durch Brennermodifikationen wird die Feinmischung von Brennern stationärer Gasturbinen verbessert um somit die Stickoxidproduktion zu senken. Zusätzlich wird der Einfluss der Primärzonenkühlluft auf die Verbrennungsstabilität untersucht. Es wird ein kombinierter Lösungsansatz aus numerischen und experimentellen Studien verwendet.

## 1 Motivation und Ziele

Für Hersteller von Gasturbinen zur Stromerzeugung ist es üblich im Rahmen von Modernisierungsmaßnahmen verbesserte Komponenten anzubieten, welche die Effizienz und die Zuverlässigkeit der Maschinen erhöhen und gleichzeitig die Schadstoffemissionen senken. Eine damit erreichte Verbesserung der Thermodynamik des Prozesses führt in der Regel zu einer Erhöhung der Spitzentemperaturen und damit ohne Verbesserungen der Verbrennungstechnik zu einem Anstieg der Stickoxidproduktion. Bisherige Versuche, diese Emissionen nur durch Erhöhung der Globalluftzahl zu verringern waren nicht erfolgreich. Es wurde ein kontinuierlicher Anstieg der Pulsationspegel mit zunehmender Luftzahl beobachtet, wobei die Gründe dafür bisher nicht verstanden sind.

Ziel dieses Projektes ist es, den Betriebsbereich von Vormischbrennern weiter in den mageren Bereich zu verschieben, ohne dass die Betriebssicherheit leidet, und gleichzeitig die Luftzahlfluktuationen in der Primärzone abzubauen. Zunächst wird das Potential zur Verbesserung der Feinmischung unter Berücksichtigung der restriktiven Randbedingungen der vorhandenen Maschinen untersucht. Auf Basis der bisher eingesetzten Technologie wird die Mischstrecke verlängert, um die lokalen Ungemischtheiten zu verringern. Der Projektfokus liegt auf dem bisher unzureichend geklärten destabilisierenden Einfluss der Primärzonenkühlluft auf die Verbrennungsstabilität von Mehrbrennersystemen. Dabei werden sowohl analytisch-numerische Analysen als auch experimentelle Studien im Wasserkanal sowie im atmosphärischen Verbrennungsprüfstand durchgeführt.

## 2 Stand des Forschungsvorhabens

### 2.1 Aerodynamik und Feinmischung

Im ersten Teil des Projektes wurde ein neuer Prototypbrenner entwickelt, der über eine verbesserte Feinmischung verfügt. Bei der Brennerentwicklung wurde ein kombinierter numerisch-experimenteller Ansatz zur Charakterisierung von Strömungsfeld und Mischungsverhalten verfolgt. Die aerodynamische Auslegung erfolgte numerisch mittels RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) und LES (Large Eddy Simulation). Die Ergebnisse wurden experimentell an einer Brennergeometrie in Maschinengröße anhand von HS-PIV (High Speed Particle Image Velocimetry) im Wasserkanal validiert. Basierend auf numerischen Vorstudien wurde ein Konzept zur Eindüsung des Brennstoffes in die Hauptströmung ausgelegt. Die erzielbare Mischungsgüte wurde im Wasserkanal mit Hilfe von HS-LIF (High Speed Laser Induced Fluorescence) ermittelt. Exemplarisch für die Experimente im Wasserkanal, ist in Abbildung 1 b) der Messaufbau für Mischungsstudien der axialen Brenneraustrittsebene dargestellt. Je nach Messaufbau ist eine Bestimmung des axialen bzw. tangentialen Strömungsfeldes sowie des Mischungsverhältnis von Hauptströmung zu Brennstoff- bzw. Kühlluftinjektion möglich. Flammenstabilität sowie die globale und lokale Emissionsbildung werden sowohl im extern wie auch im technisch vorgemischten Betrieb untersucht. In Abbildung 1 a) ist dazu der Messaufbau des atmosphärischen Verbrennungsprüfstandes illustriert.

### 2.2 Einmischverhalten der Kühlluft

Im zweiten Teil der Mischungsstudien im Wasserkanal wird das Einmischverhalten von simulierter Kühlluft vom Frontbereich des Brenners in die Hauptströmung analysiert. In Anlehnung an das tatsächliche Maschinendesign wurden unterschiedliche Varianten der Eindüsung per Ringspalt bzw. zentrisch um den Brenneraustritt

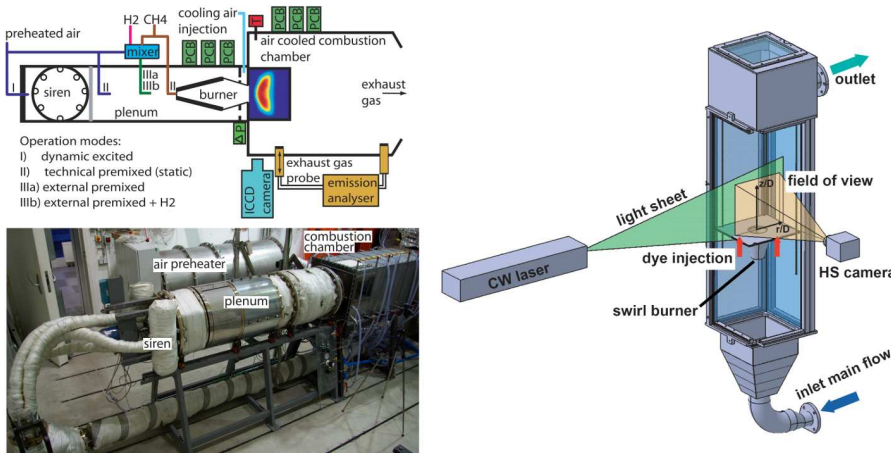


Abbildung 1: a) atmosphärischer Verbrennungsprüfstand b) LIF-Messaufbau im Wasserkanal

angeordneten Injektorbohrungen gewählt. Beispielhaft sind in Abbildung 2 eine instantane Aufnahme sowie Mittelwertbilder der Kühlluft einmischung und des dazugehörigen Strömungsfeldes abgebildet. Analog zu den mit HS-LIF ermittelten Daten wurden numerische LES-Studien zur Kühlluft einmischung durchgeführt. Hauptinteresse galt auch hier dem Einmischverhalten der Kühlluft sowie dem Einfluss der Kühlluft auf das instationäre Strömungsverhalten. Die numerischen Ergebnisse bestätigen dabei die Erkenntnisse der experimentellen Studien.

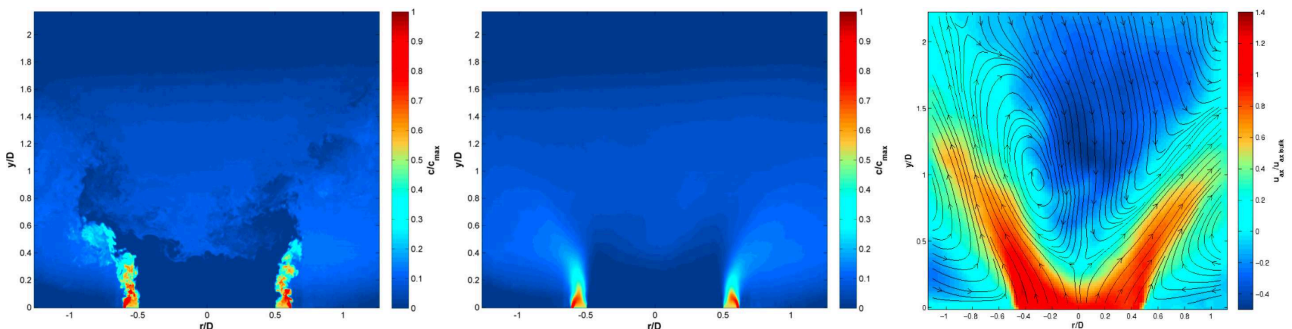


Abbildung 2: Kühlluft einmischung a) instantan b) Mittelwert c) mittleres axiales Strömungsfeld

### 3 Ausblick

Im weiteren Projektverlauf werden die Kühlluftstudien im Verbrennungsprüfstand implementiert. Experimentelle Untersuchungen sollen zeigen, wie sich Menge und Eindüsungsposition der Kühlluft auf die Verbrennungsstabilität auswirken. Ein weiterer wichtiger Teilsapekt dieses Projektes ist die numerische Simulation einer Mehrbrenneranordnung. Dazu wurde bereits das aerodynamische Strömungsfeld eines Brennkammersegments mittels RANS ermittelt. Im nächsten Schritt soll nun in die numerischen Simulationen, analog zu den Ergebnissen der Einzelbrenneruntersuchungen, die Kühlluft einmischung integriert werden.

### 4 Projektpartner

Dieses Projekt wird im Rahmen der Forschungsinitiative KW21, Phase II (Kraftwerkstechnologie des 21. Jahrhunderts) mit finanzieller Unterstützung von Alstom Power Systems GmbH und dem bayerischen Staatsministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie durchgeführt.

# Brennstoffflexibles Verbrennungssystem

J. Sangl, T. Sattelmayer

Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Brennstoffflexible, emissionsarme Verbrennungssysteme erlangen aufgrund der steigenden Verfügbarkeit unterschiedlicher Brennstoffe eine immer größere Bedeutung. Eine Möglichkeit, wie die häufig angewendete, aerodynamisch stabilisierte Vormischverbrennung für Erdgase, Synthesegase und reinen Wasserstoff bei gleichzeitig niedrigen Emissionen realisiert werden kann, wird in diesem Projekt untersucht. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Brenngase erlauben eine gezielte Beeinflussung der Wirbeldynamik und ermöglichen damit eine brennstoffspezifische Flammenstabilisierung. Isotherme Experimente zur Bestimmung von Strömungs- und Konzentrationsfeldern sowie Verbrennungsversuche bestätigen das Potential dieser Idee.

## 1 Motivation

Mit der steigenden Verfügbarkeit unterschiedlicher Brennstoffe wächst das Interesse, unabhängig von einem spezifischen Brennstoff zu sein. Bisher wird in stationären Gasturbinen primär Erdgas mit der Hauptkomponente Methan verbrannt. Wasserstoffhaltige Synthesegase (kurz: Syngase) und reiner Wasserstoff stellen vielversprechende Alternativen zur Erweiterung des Brennstoffspektrums dar. Die, im Vergleich zu Erdgas, unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften (wie z.B. Flammgeschwindigkeit und volumetrischer Heizwert) der wasserstoffhaltigen Syngase und des reinen Wasserstoffs reduzieren aber die Betriebssicherheit vieler aktuell eingesetzter Verbrennungssysteme erheblich. Daher soll in diesem Projekt ein neuer Ansatz zur Erhöhung der Brennstoffflexibilität für die aerodynamisch, stabilisierte Vormischverbrennung untersucht werden.

## 2 Idee, Vorgehensweise und Ergebnis

Aufgrund der verschiedenen Eigenschaften der Brenngase sind unterschiedliche Methoden zur Flammenstabilisierung und bei gleichbleibender Brennerleistung, auch unterschiedliche Brennstoffvolumenströme im Verbrennungssystem notwendig. Durch die Nutzung der sich aus den verschiedenen Volumenströmen ergebenden unterschiedlichen Brennstoffimpulse kann die Wirbeldynamik eines aerodynamisch stabilisierten Drallbrenners so manipuliert werden, dass die erforderliche brennstoffspezifische Flammenstabilisierung erreicht wird (Abbildung 1). Gleichzeitig muss dabei die für niedrige Emissionen notwendige, homogene Vormischung gewährleistet werden. Isotherme Experimente zur Bestimmung von Strömungs- und Konzentrationsfeldern sowie Verbrennungsversuche bei atmosphärischem und leicht erhöhtem Druck dienen zur Überprüfung dieser Idee [1].

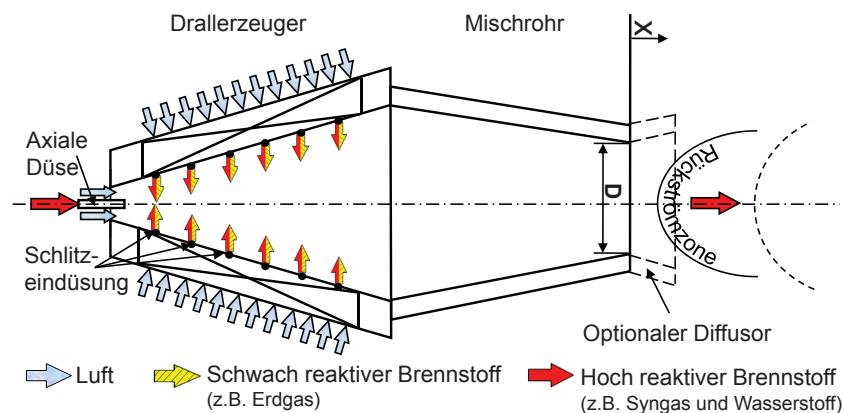
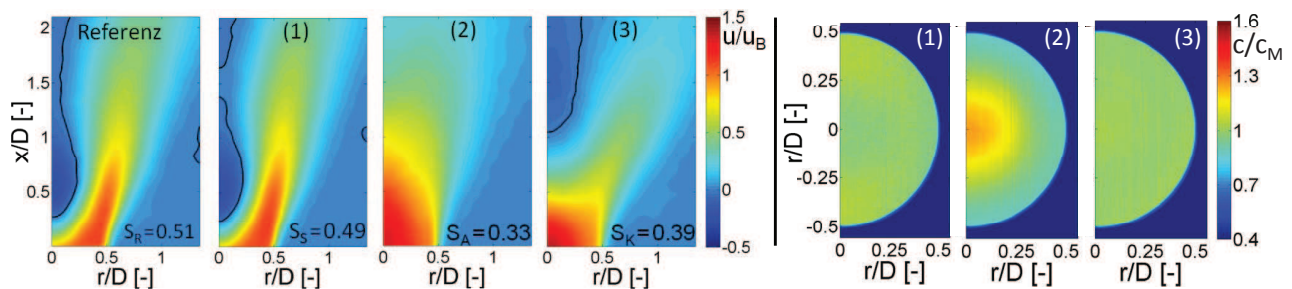


Abbildung 1: Brennergeometrie und Brennstoffeindüsungsstrategie [1]

Nach Vorauslegung der Grundaerodynamik durch Variation verschiedener Geometrieparameter des Brenners wie Schlitzbreite und Öffnungsverhältnis des axialen Lufteinlasses wurde der Einfluss der Brennstoff-

eindüsung auf das isotherme Strömungsfeld im Wasserkanal unter Einhaltung von Ähnlichkeitsbedingungen mittels Particle Image Velocimetrie (PIV) untersucht. Anschließend wurde die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) ebenfalls im Wasserkanal zur Bestimmung der Mischungsqualität verwendet, um Aussagen über die im realen Verbrennungssystem zu erwartenden Emissionen der Eindüsungsmethoden zu erhalten. Abbildung 2 links zeigt verschiedene Strömungsfelder in der Brennkammer, anhand derer der Einfluss der Brennstoffeindüsung auf die Brenneraerodynamik ermittelt werden konnte. Die dazugehörigen Konzentrationsverteilungen am Brenneraustritt sind rechts in Abbildung 2 dargestellt. Die Schlitzdüsung (1) zeigt, dass die für die Erdgasverbrennung ausgelegte Grundaerodynamik (Referenz) kaum verändert wird und sich die Rückströmzone nahe am Brenneraustritt befindet. Gleichzeitig wird eine homogene Konzentrationsverteilung erzielt. Die Axialeindüsung (2) macht deutlich, wie stark das Strömungsfeld für die Verbrennung hoch reaktiver Brennstoffe durch die Eindüsungsmethode beeinflusst werden kann, aber erst die Kombination (3) von Schlitz- und Axialeindüsung ermöglicht auch die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte.



**Abbildung 2:** links: Strömungsfelder ohne (Referenz) und mit verschiedenen Eindüsungsmethoden (1) Schlitzdüsung, (2) Axialeindüsung, (3) Kombinierte Düsung; rechts: dazugehörige Konzentrationsfelder

Um die isothermen Experimente zu validieren, wurden die besten Varianten aus dem Wasserkanal zusätzlich in einem Verbrennungsprüfstand unter atmosphärischem und leicht erhöhtem Druck getestet. Dabei konnte die Flammenkontur mit Hilfe von Chemilumineszenzmessungen und das Betriebsfenster durch die Bestimmung von Rückschlags- und Verlöschgrenzen ermittelt werden [2].

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Wasserkanal- und Verbrennungsexperimente, dass sich in dem entwickelten Verbrennungssystem die aerodynamische Flammenstabilisierung mit einer hohen Brennstoffflexibilität kombinieren lässt. Damit stellt diese Arbeit einen ersten erfolgreichen Entwicklungsschritt auf dem Weg zu einem sicheren, emissionsarmen, vorgemischten und brennstoffflexiblen Verbrennungssystem für Erdgas, Syngas und Wasserstoff dar.

### 3 Projektpartner

Das vorgestellte Projekt COORETEC-turbo 2.1.6 ist Teil des AG-turbo Verbundprojekts Verbrennung. Die AG-turbo, eine Kooperation zwischen Industrie, Forschungseinrichtung und Universitäten wird dabei vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt. Direkte Projektpartner dieses Vorhabens waren Alstom Power und das DLR in Köln [3].

### Literatur

- [1] J. SANGL, C. MAYER, T. SATTELMAYER: *Dynamic Adaptation of Aerodynamic Flame Stabilization of a Premix Swirl Burner to Fuel Reactivity Using Fuel Momentum*, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.: 133, Nr.: 7, S. 1-11 (2011).
- [2] C. MAYER, J. SANGL, T. SATTELMAYER: *Study on the Operational Window of a Swirl Stabilized Syngas Burner under Atmospheric and High Pressure Conditions*, In Proceedings of ASME Turbo Expo Vancouver, GT2011-45125 (2011).
- [3] B. SCHUERMANS, T. SATTELMAYER: *Flexibles Verbrennungssystem für wasserstoffhaltige Brennstoffe*, Vorhabensbeschreibung, COORETEC-turbo Teilverbundprojekt Verbrennung, Vorhaben-Nr. 2.1.6; , www.ag-turbo.de (2006).

# Experimental Analysis of a Reacting Jet in Hot Crossflow

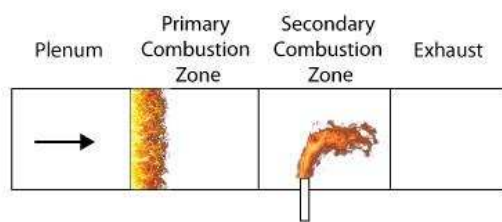
D. Schmitt, T. Sattelmayer

Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Experimental analysis of a reacting jet in hot crossflow is undertaken to gain a deeper physical insight into the formation of emissions and its determining parameter. The test rig consists of two combustion zones. The hot crossflow is supplied by a primary combustion, into which a jet of a fuel-air mixture will be injected. The formation of  $\text{NO}_x$  emission depends on temperature and residence time. Therefore, low emission levels are expected, because of the fast mixing and burnout of the second combustion zone.

## 1 Motivation and Introduction

A current approach in heavy-duty gas turbine combustors trying to improve emissions of the turndown-ratio (part load behavior) is an axial staging of the combustion zones. In this staging method, a part of the combustion air is redirected and injected downstream of the primary zone in low load range. In the higher load range the air is injected together with fuel. Doing so, firstly ensures that the primary combustion has a high enough temperature to avoid CO- and UHC-formation also in the lower load range, and secondly, the residence time of the second stage is short due to quick mixing of the injected jet, and therefore, overall lower  $\text{NO}_x$  emissions are expected.



**Figure 1:** Outline of a staged combustion.

In the schematic diagram shown in Fig. 1, the principal outline of a staged combustion is depicted. Further downstream of the main combustion a secondary combustion zone is realized by one or more jet injections normal to the main crossflow. The configuration of a jet in crossflow is a problem in fluid dynamics and has to some extent already been studied for the non-reacting type, see for example [1]. However, in the configuration with a fuel or a fuel-air jet penetrating into a hot crossflow, so far correlations and predictions about mixing, igniting and propagation of the flame are

missing. Thus, a better physical understanding is needed in order to control the flame and optimize the combustion in terms of emissions, i.e.  $\text{NO}_x$ .

## 2 Definitions, Parameters and Characterization of the Jet

The jet injected perpendicular to the main stream penetrates to some extent into the crossflow before deflecting into the main stream direction. The course of the jet can be best described by the trajectory line intersecting the maximum jet concentration as a function of downstream distance. The trajectory starts at the orifice midpoint and bends with the jet.

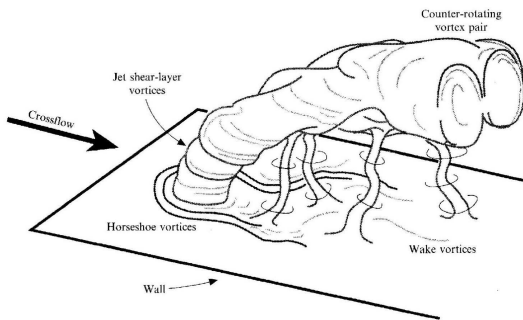
$$\frac{z}{d} = 0.76 \left( \frac{\rho_j}{\rho_m} \right)^{0.15} J^{0.52} \left( \frac{x}{d} \right)^{0.27} \quad (1)$$

Eq.(1) shows the correlation by Holdeman [2, 3] deduced from experimental results of a single heated jet in a cold crossflow determining the trajectory of the jet as the centerplane with highest temperature, where  $x$  is the stream wise coordinate of the crossflow starting at the centerpoint of the jet orifice and  $z$  is the penetration height of the jet normal to the crossflow. However, the correlation is not suitable for reacting jets as the density gradually changes with the conversion of the reactants in the flame in the mixing jet.

$$J = \frac{\rho_j U_j^2}{\rho_m U_m^2} \quad (2)$$



The parameters are 1) the orifice diameter  $d$  of the jet, 2) the densities of the jet  $\rho_j$  and the main crossflow  $\rho_m$ . Further the definition of the momentum ratio  $J$  with the densities  $\rho$  and the velocities  $u$  of the jet and the main cross flow is given in eq.(2).



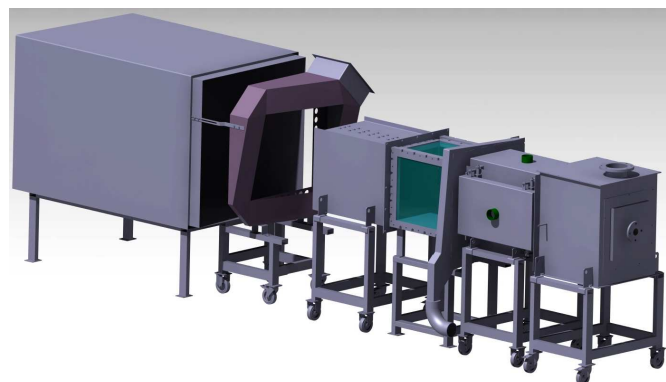
**Figure 2:** Vortices in a jet in crossflow [1].

This vortex system and the interaction between the wall and the jet result in an enhanced mixing, especially on the lee side of the jet expecting the flame to ignite there first.

The flow field of a jet in a cross flow can be to some extent compared to the well-known problem of a bluff body. As in the case with a jet no boundary layer exists, the only source of new vorticity comes from the wall boundary layer downstream of the injection. In contrast to the bluff body there is no separation of the flow. In Fig. 2 the different vortices in a jet in crossflow are depicted. Near the exit of the jet, a system of horseshoe-like vortices is generated and around the jet shear layer vortices also exist. In the section normal to the trajectory a counter-rotating steady vortex pair is shaped. Following [1], the wake vortices are established by separation events from the wall boundary layer.

### 3 Experimental Rig

The 2MW experimental atmospheric test rig (see Fig. 3 for a CAD model) consists - according to the schematic diagram in Fig. 1 - of two distinct sections: The crossflow is provided by the hot exhaust gas of 16 burners of the primary combustion; the secondary combustion zone, where the jet is injected, is of main interest and has a good optical access. This setup allows the investigation of the influence of the distinct parameters. Different injector types, premixed and partially premixed, can be tested under varying momentum ratios and injector equivalence ratios. Different measurement methods like High-Speed PIV, OH\*/CH\* Chemiluminescence, LIF as well as emission analysis and fast thermocouple measurement will be applied. Doing so, a deeper insight into the physical behavior of the reacting jet, its trajectory, mixing, auto-ignition and burnout under varying conditions can be achieved in order to be able to predict and reduce the formation of emissions, i.e.  $\text{NO}_x$ .



**Figure 3:** CAD drawing of the test rig.

### Acknowledgements

The research program on a reacting jet in hot crossflow is funded by GE Energy and includes experimental studies as well as a numerical investigation not mentioned in this abstract.

### References

- [1] T.F. FRIC, A. ROSHKO: *Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet*, Journal of Fluid Mechanics **279**, 1–47 (1994).
- [2] J.D. HOLDEMAN: *Correlation for the Temperature Profiles in the Plane of Symmetry Downstream of a Jet Injected Normal to a Crossflow*, NASA TN D-6966 (1972).
- [3] D.S. LISCINSKY, B. TRUE, J.D. HOLDEMAN: *Crossflow Mixing of Noncircular Jets*, Journal of Propulsion and Power **12**(2), 225–230 (1996).

# Oxygen diffusion hardening of tantalum coated titanium for biomedical applications

C. Hertl, E. Werner

Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

A two step heat treatment for tantalum on titanium was investigated in order to generate a biofunctional, self-healing gradient-like hard coating on titanium. It is possible to increase surface hardness of tantalum by up to 80 % according to heat treatment parameters.

## 1 Introduction

Titanium and its alloys are widely used as implant materials [1]. These materials have beneficial mechanical as well as chemical properties, which predestine them for hard tissue replacement like dental implants or hip joint endoprostheses. The biocompatibility of metallic implant materials depends on their surface properties, mainly on corrosion- and wear resistance. Titanium has an excellent corrosion resistance in physiological media, because of its native oxide layer. Titanium's modulus of elasticity is nearest to bone. Nevertheless bone implant material react slightly different to mechanical load in human body. Therefore relative micromotion occurs between implant and bone, which can damage the implant's surface. In case of corrosion or wear debris, ion release and small particle cause inflammatory reactions, which can result in aseptic loosening of the prosthesis after short implant duration [2]. Titanium and even more tantalum surfaces show a self healing effect in case of a damaged oxide layer: corrosion stops immediately and no more ions will release; no inflammatory reactions of the surrounding bone occur. But one disadvantage of pure metals is their low wear resistance, so this property has to be improved.

A lot of work has been done improving the tribological properties of the titanium surface by different coating technologies such as chemical [3], respectively physical vapour deposition [4], or by thermal and electrochemical oxidation processes [5]. Mainly hard material layers of metal oxides and nitrides should improve the abrasion resistance of the bulk material. A disadvantage of these material systems is an abrupt transition between the brittle-hard mechanical properties of the surface coating and the ductile properties of the bulk material, leading to delamination of the coating. A gradient-like transition zone between these different mechanical properties would be preferable. In case of pure titanium this aim was achieved by oxygen diffusion hardening (ODH) [6]. The aim of this contribution is to transfer ODH to tantalum coated titanium. The combination of titanium's beneficial mechanical properties as bulk material with tantalum's excellent self healing surface properties is aspired. Since the improvement of implant materials belongs to many interdisciplinary questions, there is a close collaboration between the Institute of Materials Science and Mechanics of Materials, TUM, and the Department of Functional Materials in Medicine and Dentistry, Universitätsklinikum Wuerzburg.

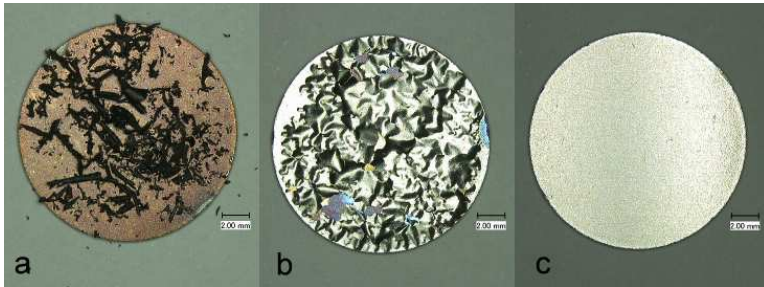
## 2 Experiments and results

### 2.1 Heat treatment

For ODH titanium grade 2 sheets of 15 mm diameter and 1 mm thickness were coated with tantalum. Using physical vapor deposition technique, a 5  $\mu\text{m}$  thick layer of tantalum was deposited on the titanium substrate. These specimens were placed in a quartz recipient, which is part of a vacuum pump station and can be positioned in a tube furnace. The annealing atmosphere was regulated by evacuating the recipient and inserting oxygen or argon. The heat treatment was developed by varying the annealing temperature and duration as well as the pressure of the gas atmosphere. Based on experience with titanium, the process includes the steps oxidation and diffusion annealing, which were performed one after another but without cooling down the specimen in between. ODH of tantalum occurs without damaging the layer at annealing temperatures in the range of 350 °C to 550 °C. The optimum gas pressure is about  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar. The duration of oxidation should be less than two hours to avoid delamination. The duration of diffusion annealing depends on the oxidation, but within further two hours of annealing the dissolution of oxygen in tantalum is possible.

At high temperatures tantalum delaminates (fig. 1), for example at 650 °C only tantalum oxide powder was left

on titanium sheet metal. The annealing temperatures for tantalum are about 300 - 400 K lower than titanium's. So diffusion of oxygen through the whole tantalum layer into titanium substrate seems to be not impossible within practicable annealing durations. A gradient-like transition zone is expected within the 5  $\mu\text{m}$  thick layer of tantalum.

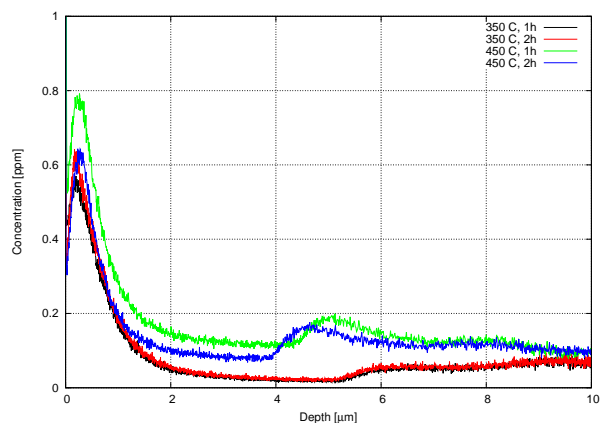


**Figure 1:** a) and b) show delamination of tantalum after ODH at too high temperatures; c) shows a faultless tantalum layer on titanium after ODH at 450 °C

## 2.2 Material characterisation

Using glow discharge spectroscopy, quantitative depth profiles of oxygen content in tantalum were measured. These show a small gradient transition zone of oxygen. The oxygen diffusion zone shows an increasing oxygen content with increasing annealing temperature and also an increasing depth at longer annealing duration (fig. 2). Since the oxygen content is very low, no oxides have been detected by this method.

The hardening effect of oxygen diffusion is also dependent of temperature and duration of heat treatment. The increase of hardness HV<sub>0,05</sub> could be determined from 30 % up to 80 % for temperatures in the range of 350 °C to 650 °C and oxidation durations up to 2 hours.



**Figure 2:** Depth profiles of oxygen content by glow discharge spectroscopy

## References

- [1] D.M. BRUNETTE, P. TENGVALL, M. TEXTOR, P. THOMSEN: *Titanium in Medicine. Material Science, Surface Science, Engineering; Biological Responses and Medical Applications*. Springer (2001).
- [2] R. THULL: *Surface modifications to improve biocompatibility and mechanical properties of orthopedic implants*, *Orthopaede* **32**, 51–59 (2003).
- [3] JH. OUYANG, S. SASAKI, J. MURAKAMI, Y. ZHOU, J. ZHANG: *Mechanical and unlubricated tribological properties of titanium-containing diamond-like carbon coatings*, *Wear* **266**, 96–102 (2009).
- [4] J. PROBST, U. GBURECK, R. THULL: *Binary nitride and oxynitride PVD coatings on titanium for biomedical applications*, *Surface and Coatings Technology* **148**, 226–233 (2001).
- [5] D. VELTEN, V. BIEHL, F. AUBERTIN, B. VALESKE, W. POSSART, J. BREME: *Preparation of TiO<sub>2</sub> layers on cp-Ti and Ti6Al4V by thermal and anodic oxidation and by sol-gel coating techniques and their characterization*, *Journal of Biomedical Materials Research* **59**, 18–28 (2002).
- [6] C. HERTL, E. WERNER, R. THULL, U. GBURECK: *Oxygen Diffusion Hardening of cp-Titanium for Biomedical Applications*, *Biomedical Materials* **5**, 054104 (2010).

# Gefüge von lasergeschmolzenen Proben aus einer Ni-Basis Superlegierung

C. Kellerer, E. Werner

Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Im laufenden Projekt werden Bauteile und Prüfkörper, die durch Laserschmelzen aus IN 718 hergestellt werden, umfassend auf ihr Gefüge hin untersucht. Dazu werden neben anderen Methoden vor allem Licht- und Rasterelektronenmikroskopie angewendet. Bedingt durch das Verfahren weisen lasergeschmolzene Proben ein ausgeprägt anisotropes Gefüge auf. Variationen der Bauparameter haben großen Einfluss sowohl auf Baufehler als auch auf Kornform und -größe. Forschungsziel ist, den Herstellprozess mit der Gefügeausbildung zu korrelieren.

## 1 Einleitung und Motivation

Das Selektive Laserschmelzen (selective laser melting, SLM) von Metallen und Legierungen gehört zu den generativen Fertigungsverfahren. Die Bauteile werden im Pulverbett schichtweise ohne Werkzeug aufgebaut, was komplexe, filigrane Formen ermöglicht, die nicht durch herkömmliche Verfahren erzeugt werden können. SLM findet derzeit als schnelle und wirtschaftliche Technologie in die Branchen Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt, Automotive und Energietechnik Einzug. So können beispielsweise inzwischen im Triebwerksbau einige gegossene oder geschmiedete Bauteile durch lasergeschmolzene ersetzt werden [1]. Geeignete Werkstoffe sind u. a. die Ni-Basis Superlegierungen Inconel Alloy 625 und 718 (IN 718). Letztere steht für die Untersuchungen zur Verfügung.

Zur Verarbeitung von IN 718 mit anderen generativen Verfahren gibt es bereits Erfahrungen, vgl. etwa [2]. Im laufenden Projekt sollen SLM-gefertigte Bauteile und Probekörper aus IN 718 näher untersucht werden. Arbeitspakete des Forschungsprojektes sind eine Potential- und Sensitivitätsstudie des Verfahrens, sowie die Werkstoffdatenermittlung, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

## 2 Das SLM-Verfahren

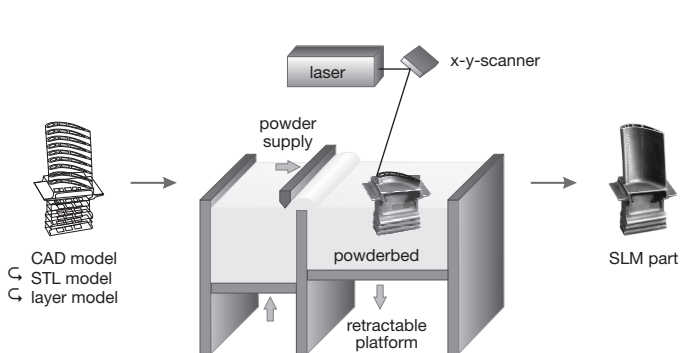


Abbildung 1: Prinzip des Selektiven Laserschmelzens.

Ein 3D-CAD-Modell des Bauteils wird in zwei-dimensionale Schichten mit Dicken zwischen 20 – 60  $\mu\text{m}$  zerlegt und an die SLM-Anlage übertragen [3]. Die Geometrien der Schichten werden in der Prozesskammer mit dem Laser auf dem Pulverbett zeilenweise abgefahren. Dabei schmilzt das Legierungspulver an den laserbelichteten Stellen vollständig auf und erstarrt, nachdem sich der Laser weiterbewegt hat. Das nicht belichtete Pulver bleibt lose. Ist eine Schicht komplett gescannt, wird die nächste Pulverschicht aufgetragen. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis das komplette Bauteil aufgebaut ist (s. Abb. 1).

Die Bauparameter, wie z. B. Schichtdicke, Laserspuraabstand (Hatch), Scangeschwindigkeit oder Laserleistung, können variiert werden.

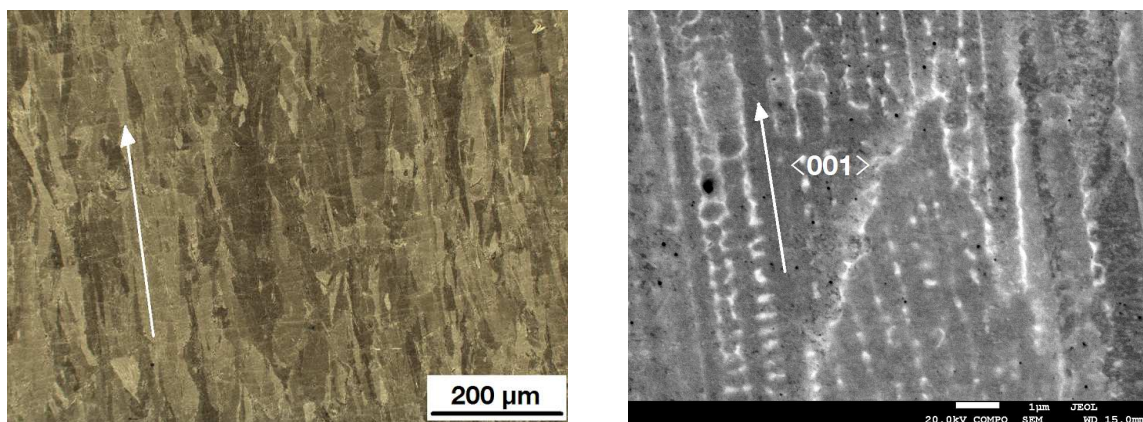
## 3 Baufehler

Mit dem Lichtmikroskop (LOM) werden auf polierten Schlifflinien Baufehler wie Poren, Einschlüsse und flache, oxidschichtbelegte Fehler, sog. Bindungsfehler, sichtbar. Mit Hilfe von Bildanalyse und programmierten Makros werden der Fehlerflächenanteil, die Fehlerform und eine Fehlergrößenverteilung ermittelt. Über Abstandskriterien werden Fehleranhäufungen (Cluster) erkannt und deren resultierende Durchmesser ausgegeben. Es

hat sich gezeigt, dass die auf mittleren Positionen im Bauraum der SLM-Anlage gebauten Bauteile weniger und kleinere Fehler aufweisen als die im Randbereich gebauten. Werden die Bauparameter geändert, hat das auch Einfluss auf die Baufehler. So erhöhen z. B. eine größere Schichtdicke oder ein größerer Hatch (d. h. "schnelles" Bauen) deren Anzahl und Größe.

#### 4 Gefüge

Das Gefüge wird mit dem Lichtmikroskop an geätzten Schlifflinien senkrecht und parallel zur Baurichtung untersucht. Der Senkrechtschliff zeigt ein gleichachsiges Gefüge. Da im Parallelschliff langgestreckte Körner erkennbar sind (s. Abb. 2(a)), liegen also säulenförmige Körner vor, die in Baurichtung über die Bauschichten hinweg gewachsen sind. Diese Textur ergibt sich aus der sehr hohen Abkühlgeschwindigkeit beim Laserschmelzen, die das Kristallwachstum bevorzugt in  $\langle 001 \rangle$ -Richtung erzwingt [2]. Das kann anhand der Dendriten im Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop (FE-REM) nachgewiesen werden (s. Abb. 2(b)). Die Bauparameter



(a) LOM: Gefüge, geätzt mit 25 ml HCl und 3 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in 75 ml Ethanol. Der Pfeil kennzeichnet die Baurichtung.

(b) FE-REM: Rückstreuelektronenbild mit Dendriten und hellen Nb-reichen Bereichen zwischen den Dendriten und an der Korngrenze.

**Abbildung 2:** Parallelschliff von lasergeschmolzenem IN 718.

ter beeinflussen auch die Kornform. "Langsames" Bauen, bei geringer Schichtdicke und engem Laserspurenabstand, ergibt sehr große Körner mit ausgeprägtem Achsenverhältnis. "Schnell" gebaut jedoch, bleiben die Körner kleiner und wachsen nicht mehr in Baurichtung, sondern weichen davon um bis zu 30° ab. Weitere Untersuchungen, z. B. der Einfluss des Pulvers auf das Gefüge, sind nötig.

#### 5 Zusammenfassung

SLM ist ein geeignetes Verfahren für die Fertigung von Bauteilen aus IN 718. Durch optimierte Bauparameter werden die Baufehler in Anzahl und Größe verringert. Die Kornform, -größe und -orientierung kann über die Bauparameter maßgeschneidert werden.

#### Literatur

- [1] C.L. ENGLISH, S.K. TEWARI, D.H. ABBOTT: *An overview of ni base additive fabrication technologies for aerospace applications*, In 7th International Symposium on Superalloy 718 and Derivates, 399–412, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) (2010).
- [2] X. ZHAO, J. CHEN, X. LIN, W. HUANG: *Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718*, Materials Science and Engineering A **478**, 119–124 (2008).
- [3] W. MEINERS: *Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe*, Shaker Verlag (1999).

# Quantification of the martensite fraction in dual phase-steel by the use of electron backscatter diffraction (EBSD)

L. Koll, E. Werner

Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

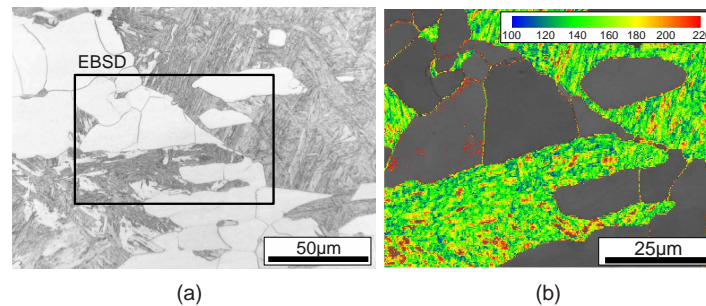
Electron backscatter diffraction (EBSD) enables the determination of phases directly in the scanning electron microscope (SEM), as far as their lattice parameters vary about 5%. Within the investigated dual phase (DP)-steel the lattice parameters of low-carbon martensite and ferrite are too similar to be identified separately by EBSD. The EBSD-parameter band slope (BS) sensitive to lattice distortion was found to be suitable for the quantitative determination of the martensite phase fractions within different DP-microstructures. The scaling of BS coloring martensite only defined for a coarse-grained DP-steel is also applicable on fine-grained microstructures of the same alloy.

## 1 Introduction

Dual phase (DP)-steels have excellent mechanical properties resulting from their ferritic-martensitic microstructure. Therefore, they are used for many applications in automotive industry. For the development of optimized DP-steel grades the information about the individual phases such as the phase fractions are essential. Ferrite and martensite exhibit very similar chemical and crystallographic properties for low carbon contents as in the investigated DP-grades. Hence, it is difficult to identify the individual phases by the use of diffraction methods such as electron backscatter diffraction (EBSD) or chemical analysis. A quantitative determination of the martensite fraction for coarse-grained microstructures is possible by light-optical investigation of etched sections. For very fine-grained (grain sizes around 1  $\mu\text{m}$  and below) steel grades and more complex microstructures such as complex phase (CP)-steels containing additional phases the clear differentiation of the individual phases for the quantification is very difficult or even impossible by the use of light-optical or scanning electron microscopy. High resolution EBSD (1024  $\times$  1024 pixels) enables the identification of phases as far as the difference of their lattice parameters is around 5% [1]. The extent of the lattice distortion in martensite is dependent on its carbon content [2]. Low carbon contents cannot exceed in a change of the lattice parameters of 5%. Therefore, martensite is generally identified as ferrite by EBSD. The increased lattice distortion within martensite can be detected by parameters describing the quality of EBSD-patterns (EBSPs). Hence, the evaluation of the EBSP-quality can be used for the quantitative determination of the martensite fraction within a DP-microstructure. Especially the EBSP-quality parameter band slope (BS) is recommended in literature for this purpose [3]. BS characterizes the average intensity of a Kikuchi-line compared to the intensity of all Kikuchi-lines in shades of grey from 0 - 255 [4]. The higher the value for BS the better is the quality of the corresponding EBSP. In this contribution the EBSP-parameter band slope (BS) has to be evaluated according to its efficiency for the quantification of martensite. The martensite fraction obtained by EBSD for a coarse grained DP-steel grade has to be compared with results of the light-optical investigation. It has to be determined, if the BS-scaling obtained for the coarse-grained material can be successfully applied on more fine-grained variations of the same alloy leading to reliable results.

## 2 Material characterization, experimental procedure and results

For this investigation a base material with a chemical composition of 0.1 wt.-% C, 0.15 wt.-% Si, 1.5 wt.-% Mn, 0.8 wt.-% Cr+Mo and 97.45 wt.-% Fe was used. Different heat-treatments of the base material led to three different DP-microstructures (DP1, DP2 and DP3) with varying martensite fractions  $x_{\text{Mart}}$  and ferrite grain sizes of 13 (DP1), 5 (DP2) and 1.5 (DP3)  $\mu\text{m}$ . For DP1 the defined area shown in figure 1 was investigated by light-optical microscopy and EBSD by the use of the field emission scanning electron microscope JEOL JSM 7600F equipped with a high-resolution EBSD-camera (Nordlys 2, HKL). By line intercept measurements applied on the light-optical image of the investigated area marked in figure 1a the martensite fraction was determined to be 48.38%. For EBSD-investigation the sample was prepared by OP-S-polishing according to the literature [5]. The EBSD-measurement conditions were set to an acceleration voltage of 20 kV, a working distance of 25 mm, a specimen-tilt of 70° and a low probe current of 1 nA to keep the influence of the electron beam on the sample as low as possible. The step size of the EBSD-measurement was set to 250 nm. The total measured



**Figure 1:** Martensite and ferrite within the investigated area of DP1: a) light-optical image of the nital-etched area (martensite grey and ferrite white), the area used for the EBSD-mapping is marked; b) BS-map scaled from 100 to 220 to color martensite exclusively, ferrite appears grey.

area was of a size of  $120\ \mu\text{m} \times 90\ \mu\text{m}$ . A data clean-up was performed to reduce all zero-solutions for the quantification of the martensitic phase fraction. The scaling of the EBSD-quality parameter BS was modified to color exclusively martensite until the best visual agreement with the light-optical image of the same area was obtained (figure 1). The most reliable result of a martensite fraction of 47.24 % was obtained for a BS-scaling within the range from 100 to 220. BS-values above 220 belong to EBSPs of the less distorted ferrite. The BS-range from 100 to 220 was applied on EBSD-measurements conducted on DP2 and DP3. Due to their fine-grained microstructure, the martensite fraction within the area of EBSD-measurement was determined by applying line intercept measurements on images obtained by scanning electron microscopy (SEM) instead of light-optical microscopy. By this way martensite fractions of 20.3 % for DP2 and of 31.32 % for DP3 were determined. The quantification of the martensite fraction by the use of the scaling of BS obtained for DP1 resulted in 20.5 % for DP2 and of 28.0 % for DP3. For DP2 the martensite fraction detected by the use of EBSD fits well to the values obtained by line intercept measurements. In the case of DP3 the values for the martensite fraction vary about 3 % between both methods. This aberration can be a result of a slightly varying measurement position used for the line intercept measurements and the EBSD-investigation. In general, the results show that the evaluation of the EBSP-quality by the parameter band slope (BS) is very suitable for the separation of ferrite and martensite. The different grain sizes of the investigated grades DP1, DP2 and DP3 do not significantly influence the EBSP-quality. It can be concluded that for the quantitative determination of the martensite fraction in a certain alloy the scaling for BS has to be defined only once for a coarse grained microstructure. The values can be applied on more fine-grained grades of the same alloy to obtain reliable quantitative information about the martensite fraction.

### 3 Acknowledgement

The authors thank DFG for the financial support in purchasing the field emission electron microscope JEOL JSM 7600F.

### References

- [1] S.I. WRIGHT, M.M. NOWELL: *EDS Assisted Phase Differentiation in Orientation Imaging Microscopy*, Materials Science Forum **509**, 11–16 (2006).
- [2] L. XIAO, Z. FAN, Z. JINXIU, Z. MINGXING, K. MOKUANG, G. ZHENQI: *Lattice-parameter variation with carbon content of martensite. I. X-ray diffraction experimetal study*, Physical Reviwe B **52**, 9970–9978 (1995).
- [3] R. PETROV, L. KESTENS, A. WASILKOWSKA, Y. VAN HOUBAERT: *Microstructure and texture of lightly deformed TRIP-assisted steel characterized by the means of the EBSD technique*, Materials Science and Engineering A **447**, 285–297 (2007).
- [4] OXFORD INSTRUMENTS HKL A/S, HOBRO, DENMARK: *Oxford Instruments HKL Channel5 User Manual*, (June 2007).
- [5] L. KOLL, P. TSIPOURIDIS, E.A. WERNER: *Preparation of metallic samples for electron backscatter diffraction and its influence on measured misorientation*, Journal of Microscopy **243**, 206–219 (2011).