



NAFEMS

MAGAZIN

Zeitschrift für numerische Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete
FEM – CFD – MKS – VR / VIS – PROZESS – PDM

Fachbeiträge:

Fokus Virtual Testing

Produktentwicklung mit verknüpften Simulationen und praktischen Tests- Zweckmäßiger CAE Einsatz bei High-Tech-Polymeren

F. Rieg, B. Alber (Universität Bayreuth)

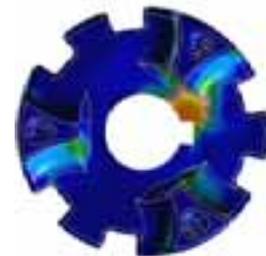
Seite 16



Automatische Formoptimierung einer Abgasanlage

T. Lehnhäuser (Fluent Deutschland GmbH); M. Ratzel (Altair Engineering GmbH); J. Braun, L. Marie (J. Eberspächer GmbH & Co. KG)

Seite 21



Fokus Computational Fluid Dynamics (CFD)

Mehrköpersimulation eines oszillierenden aeroelastischen Tragflügelmodells

J. Arnold, W. Krüger (DLR Institut für Aeroelastik); G. Einarsson (DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik)

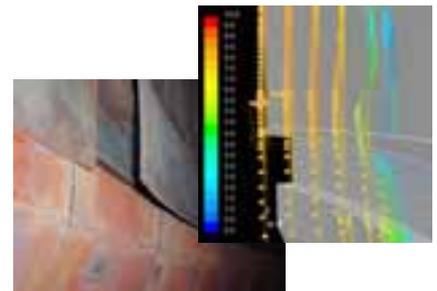
Seite 28

Übereinstimmung Simulation und Praxis (Bild: Universität Bayreuth)

Fluid-Struktur-Interaktion an einer Schweißkonstruktion unter hoher thermischer Belastung

G. Haider, H. Lang, C. Reichl (arsenal research)

Seite 37



Methode zur Berechnung von geschmierten Friktionskontakten in Mischreibungsgebieten

A. Albers, L. Nowicki, H.-G. Enkler (IPEK - Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH))

Seite 45

FSI an einer Schweißkonstruktion (Bild: arsenal research)



NAFEMS Magazin, eine Online-Information über Sicherheit und Zuverlässigkeit auf dem Gebiet der numerischen Simulation

Sehr geehrte Leserin,
sehr geehrter Leser,

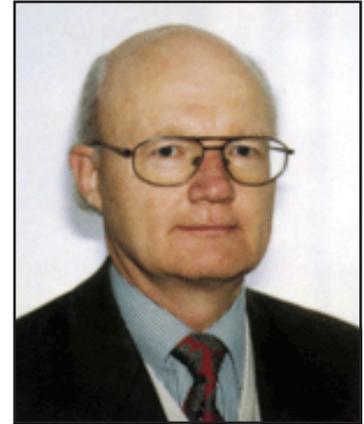
Immer wieder hört man Aussagen wie: „Die physikalischen Phänomene sind doch in den numerischen Rechenprogrammen implementiert; darum brauchen wir uns nicht mehr zu kümmern.“ oder auch: „Die Berechnung zeigt, was sich in der Realität abspielen wird; wozu brauchen wir noch Versuche?“ Sogar an Universitäten gibt es gelegentlich die Vorstellung, man brauche die Grundlagen für die vorhandenen Programmsysteme nur noch am Rande oder gar überhaupt nicht mehr zu lehren. Allgemein scheint das Vertrauen in die Ergebnisse von Computersimulationen so stark zu sein, dass man meint, auf eine Prüfung verzichten zu können. Dem soll hiermit ausdrücklich widersprochen werden. Der Anwender muss sich in jedem Fall davon überzeugen, dass das berechnete Modell die Wirklichkeit hinreichend genau abbildet. Das lässt sich am besten durch Versuche erreichen.

Nun gibt es tatsächlich Probleme, für die sich eine realitätsnahe Prüfung verbietet: Flugzeugabsturz auf ein Kernkraftwerk, lebensbedrohliche medizinische Eingriffe oder Ähnliches. Darüber hinaus lassen sich durch virtuelles Testen auch erhebliche Kosten sparen. Hier ist der Ingenieur gefordert. Durch Vergleiche und Analogien muss er sicherstellen, dass das gewählte Modell zumindest die wesentlichen Aspekte der Wirklichkeit korrekt wiedergibt. Verbleibende Unwägbarkeiten müssen möglichst klar benannt und bewertet und mit angemessenen Sicherheiten abgedeckt werden. In einem zweiten Schritt muss dann eine numerische Formulierung gefunden werden, die das Modellverhalten zuverlässig beschreibt. Und schließlich muss diese numerische Aufgabe auch noch gelöst werden.

Im vorliegenden Heft 5 des Magazins werden Beiträge aus den Seminaren über Virtual Testing und über CFD veröffentlicht. In allen Fällen wird neben der eigentlichen numerischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit auch Wert gelegt auf Modelle und Methoden, die die wesentlichen Eigenschaften der realen Probleme möglichst gut erfassen. Mit diesen Beiträgen erhalten Sie zudem einen kleinen Einblick in das breite Spektrum der NAFEMS Seminare.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr.-Ing. Klaus Rohwer
Editor-in-Chief



Prof. Dr.-Ing. Klaus Rohwer

NAFEMS
World Congress
Vancouver, Canada
May 22nd - 25th
2007

Mehr Infos unter
www.nafems.org/conference

Engineering Simulation:
Innovation Leads to Competitive Advantage

Wir bedanken uns herzlich bei den Sponsoren, ohne deren Unterstützung
ein solches Magazin nicht realisierbar wäre:



www.abaqus.de



www.altair.de



www.esi-group.com



www.fluent.de
www.ansys.com



www.intes.de



www.ugs.com

Die nächsten NAFEMS Trainingskurse:

Basiswissen für die Anwendung von Finite-Element-Berechnungen für Ingenieure und Konstrukteure

Basic 1:

Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre
Wiesbaden, D

19. - 20.03.2007

Basic 2:

Praxisorientierte Grundlagen für FEM-Analysen
Wiesbaden, D

23. - 24.04.2007

Das nächsten NAFEMS Seminare:

Materials Modelling – FEA Simulations of the Behavior of Modern Industrial Materials Including their Failure
Oslo, N

20. - 21.03.2007

CFD im Wandel: Zuverlässiger Einsatz CAD-basierter Software sowie anwendungsspezifischer Codes
Wiesbaden, D

26. - 27.03.2007

Zuverlässiger Einsatz numerischer Simulationsmethoden in der Vorausberechnung
Wiesbaden, D

28. - 29.03.2007

Simulation von Verbunden: Material und Strukturen
Wiesbaden, D

voraussichtlich

03. - 04.12.2007

Mehr Infos finden Sie unter www.nafems.de bzw. unter www.nafems.org -> nordic

NAFEMS Literatur

kürzlich erschienen:

- Why Do Multi-Physics Analysis?
- An Introduction to Modelling Buckling and Collapse
- How To Manage Finite Element Analysis in the Design Process
- International Journal of CFD Case Studies Vol 5
- Advanced Finite Element Contact Benchmarks
- Benchmarks for Membrane and Bending Analysis of Laminated Shells - Part 1: Stiffness Matrix and Thermal Characteristics
- BENCHmark Magazine
BENCHmark October 2006
BENCHmark July 2006

geplant:

NAFEMS bietet mit über 200 Publikationen eine umfangreiche Auswahl an Fachliteratur im Berechnungsumfeld an. Auch in Zukunft wird sich NAFEMS um die Weiterentwicklung und Erstellung neuer Fachliteratur für ihre Mitglieder und für den weiteren Kreis der Ingenieure bemühen. In Kürze werden erscheinen:

- How to Idealise a Problem for CFD
- How to Use Beam, Plate & Shell Elements
- Why Do Electromagnetics
- NAFEMS International Journal of CFD Case Studies
Editor - Green
- BENCHmark Magazin



Mehr Informationen finden Sie unter

www.nafems.org/publications

Impressum

Editor in Chief

Prof. Dr. Klaus Rohwer
(Deutsche Zentrum für Luft- und
Raumfahrt e.V.)

Redaktioneller Beirat

- Dr. Yasar Deger (HSR, CH)
- Dr. Moris Habip (Consultant, D)
- Dr. Alfred Svobodnik (Harman/
Becker Automotive Systems, A)
- Prof. Dr. Manfred Zehn (Univ.
Magdeburg / Femcos mbH, D)

Redaktion

Albert Oswald (NAFEMS Kontakt
Deutschland, Österreich, Schweiz
und Nordic)

Herausgeber

NAFEMS Kontakt DACH & Nordic
Schillerstr. 6, D-85567 Grafing
Tel. +49 (0) 8092 – 8 35 50
Fax +49 (0) 8092 – 8 35 51
e-mail: magazin@nafems.de

Gestaltung / Layout / Grafik

Werbos GbR
Schillerstr. 6, D-85567 Grafing
Tel. +49 (0) 8092 – 8 35 50
Fax +49 (0) 8092 – 8 35 51
e-mail: info@werbos.de

Bezugspreis

Kostenlos

Verteilung / Bezug

Per e-mail an NAFEMS Datenbasis
DACH und als Download über
www.nafems.de. Bezug durch
Aufnahme in den Verteiler.

Anzeigenpreise

Preisliste vom 31.10.2005

**Copyright © 2006 NAFEMS Kontakt
DACH & NORDIC, Werbos GbR.**

Nachdruck – auch auszugsweise -, Ver-
vielfältigung oder sonstige Verwertung
ist nur mit schriftlicher Genehmigung
des Verlages unter ausdrücklicher
Quellenangabe gestattet. Gekenn-
zeichnete Artikel stellen die Meinung
des Autors, nicht unbedingt die Mei-
nung der Redaktion dar. Für unverlangt
eingesandte Manuskripte und Daten-
träger sowie Fotos übernehmen wir kei-
ne Haftung. Alle Unterlagen, insbeson-
dere Bilder, Zeichnungen, Prospekte
etc. müssen frei von Rechten Dritter
sein. Mit der Einsendung erteilt der Ver-
fasser / die Firma automatisch die Ge-
nehmigung zum kostenlosen weiteren
Abdruck in allen Publikationen von
NAFEMS, wo auch das Urheberrecht
für veröffentlichte Manuskripte bleibt.

Eine Haftung für die Richtigkeit der
Veröffentlichungen kann trotz Prüfung
durch die Redaktion vom Herausgeber
nicht übernommen werden.

Vorwort des Editor in Chief 2

NAFEMS World Congress - Call for Papers 2

Sponsoren 3

NAFEMS DACH Aktuell 4

Impressum 5

Inhalt 5

Über NAFEMS / Mitgliedschaft 6

NAFEMS EU-Projekt Autosim 7

Neuigkeiten 8 - 12

Veranstaltungen 13

Stellenanzeigen 14 - 15

Fachbeiträge

Fokus Virtual Testing

**Produktentwicklung mit verknüpften Simulationen
und praktischen Tests- Zweckmäßiger CAE Einsatz
bei High-Tech-Polymeren**
F. Rieg, B. Alber (Universität Bayreuth) Seite 16

Automatische Formoptimierung einer Abgasanlage
T. Lehnhäuser (Fluent Deutschland GmbH);
M. Ratzel (Altair Engineering GmbH);
J. Braun, L. Marie (J. Eberspächer GmbH & Co. KG) Seite 21

Fokus Computational Fluid Dynamics (CFD)

**Mehrkörpersimulation eines oszillierenden
aeroelastischen Tragflügelmodells**
J. Arnold, W. Krüger (DLR Institut für Aeroelastik); G. Einarsson
(DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik) Seite 28

**Fluid-Struktur-Interaktion an einer Schweißkonstruktion
unter hoher thermischer Belastung**
G. Haider, H. Lang, C. Reichl (arsenal research) Seite 37

**Methode zur Berechnung von geschmierten Friktions-
kontakten in Mischreibungsbereichen**
A. Albers, L. Nowicki, H.-G. Enkler (IPEK - Institut für
Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH)) Seite 45

Rückmeldeformular 51

Werbeanzeigen

Dr. Heck Consulting and Engineering 8

Intes GmbH 9

Femlab GmbH 11

Über NAFEMS

NAFEMS ist eine gemeinnützige Organisation zur Förderung der sicheren und zuverlässigen Anwendung von Simulationsmethoden wie FEM und CFD.

1983 in Großbritannien gegründet, hat sich die Organisation längst in eine internationale Gesellschaft zur Förderung der rechnerischen Simulation entwickelt. Mit NAFEMS ist die neutrale und von Software- und Hardwareanbietern unabhängige Institution entstanden.

NAFEMS vertritt die Interessen der Anwender aus der Industrie, bindet Hochschulen und Forschungsinstitute in ihre Tätigkeit ein und hält Kontakt zu Systemanbietern.

Mitglieder des Internationalen NAFEMS Councils

C. Stavriniadis (Chairman), ESA, NL
 M. Zehn (Vice Chairman), Femcos mbH, D
 D. Ellis, Idac Ltd., UK
 A. Ezeilo, TWI Ltd., UK
 G. Miccolli, Imamoter, Italien
 S. Morrison, Lusas Ltd., UK
 P. Newton, GBE, UK
 M.-C. Oghly, Flowmaster, F
 A. Ptchelintsev, Nokia Research Centre, FI
 A. Puri, Selex Sensors & Airborne Systems, UK
 V. Sharan, Sony Ericsson, S
 J. Wood, Strathclyde University, UK

Um die Aktivitäten von NAFEMS im deutschsprachigen Raum neutral zu leiten und die nationalen Belange innerhalb der NAFEMS zu vertreten, wurde ein Lenkungsausschuss etabliert.

Mitglieder des deutschen NAFEMS Steering Committees

Dr.-Ing. W. Dirschmid (Consultant), Chairman
 Dr.-Ing. Y. Deger (Hochschule Rapperswil)
 Dr.-Ing. A. Gill (Fluent Deutschland GmbH)
 Dr.-Ing. R. Helfrich (Intes GmbH)
 Dipl.-Ing. G. Müller (Siemens AG)
 Dr.-Ing. G. Müller (CADFEM GmbH)
 F. J. H. Peeters (Abaqus Europe BV)
 A. Pfaff (MSC Software GmbH)
 Prof. Dr.-Ing. K. Rohwer (DLR)
 Dr. A. Svobodnik (Harman/Becker Automotive Systems)
 Dr. T. Wintergerste (Sulzer Chemtech Ltd.)
 Prof. Dr.-Ing. habil. M. Zehn (Femcos mbH)

Der NAFEMS Kontakt für DACH und Nordic wie auch die Realisierung der Aktivitäten werden von der Werbos GbR übernommen.

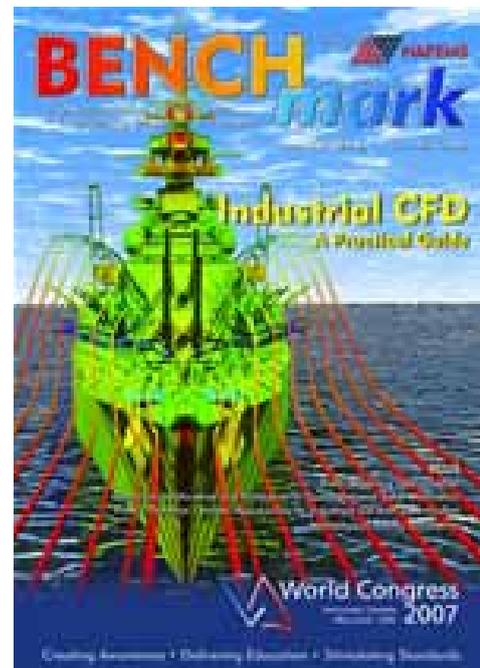
Mitglied bei NAFEMS?

NAFEMS hat über **740 Mitgliedsunternehmen und -Institutionen in 37 Ländern.**

NAFEMS Mitglieder erhalten unter anderem:

- Benchmark (Internationales FEM-Magazin)
- Literatur
- Freie Seminarplätze
- Ermäßigungen für Trainingskurse, Kongresse und Literatur
- Zugriff auf passwortgeschützten Webbereich mit Kontaktmöglichkeiten und Informationen
- Kontakt zu über 740 Organisationen weltweit

Werden auch Sie Mitglied !



„Benchmark“
 – das internationale NAFEMS Magazin

Jetzt abonnieren
 – für NAFEMS-Mitglieder natürlich frei

Weitere Informationen erhalten Sie unter:

www.nafems.de
 (regional)

www.nafems.org
 (international)

SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME PRIORITY
[6.2]
[SUSTAINABLE SURFACE TRANSPORT]

012497 DEVELOPMENT OF BEST PRACTICES
AND IDENTIFICATION OF BREAKTHROUGH
TECHNOLOGIES IN AUTOMOTIVE ENGINEERING
SIMULATION - AUTOSIM



Dritter Workshop in Lissabon erneut zahlreich besucht



Das EU-Projekt Autosim vereint die europäische Automobilindustrie mit dem Ziel, die effektive Anwendung numerischer Simulationsmethoden zu verbessern um so den größtmöglichen Nutzen zu erzielen. Vor diesem Hintergrund sollen „Best Practise“ Guidelines erstellt und das Potenzial an „Breakthrough Technologies“ identifiziert werden. Innerhalb der Projektpartner wurden diesbezüglich die drei primären Themen „Integration der Simulation in den Entwicklungsprozess“, „Materialbeschreibung“ und „Verbesserung des Vertrauens in numerische Simulationsmethoden“ definiert.

Nach den ersten beiden Workshops in diese Jahres in Barcelona/Spanien (Januar) und in Sonnenhausen in der Nähe von München (Mai) fand der dritte vom 23. - 24. November in Lissabon/Portugal statt. **47 Teilnehmer** kamen, um teils in Plenarvorträgen, teils in parallelen Arbeitsgruppen die definierten Themen zu bearbeiten. Folgende Präsentationen wurden gehalten:

- **Application of Material Law in the Car Development Process**
T. Schneider, S. Paulke (P+Z Engineering GmbH, D)
- **Materials Property Data for Simulation: Standardised Representation of Engineering Properties**
N. Swindells (Ferroday Ltd., UK)
- **Up-front CAE Simulation - Just a Catchword or Already a Fact of Modern Automotive Engineering?**
E. Schelkle (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG via CAEvolution GmbH, D)
- **Increasing Confidence in the Use of Simulation: Views of the NAFEMS Analysis Management Working Group**
C. Rogers (CREA Consultants Ltd., UK)
- **New Variants of Evolution Strategies for Global Optimization**
M. Schütz (NuTech Solutions GmbH, D)
- **Enabling Technologies for Design-Simulation Integration**
C. Armstrong (University of Belfast, UK)
- **Current and Continuing Issues in CFD**
A. de Souza (Pall Aerospace, UK)
- **Design Languages – on some Technological Advantages and Commercial Benefits of a Potential Break-through Technology**
S. Rudolph (IILS mbH, D)
- **Benefits of Multi-Objective Design Optimization and Process Integration Approach in the Early Stages of Design Process**
L. Fuligno (EnginSoft Spa, I)
- **Computation of Stress Intensity Factors for Cracked and Notched Components by the Fractal-like Finite Element Method**
S. O. Oyadiji (University of Manchester, UK)
- **MSC SimManager - Enterprise Simulation Management**
A. Soeiro (MSC.Software, F)
- **Aspects of Connection Modelling for Crash Applications**
T. Münz (DYNAmore GmbH, D)
- **Integrated Flow, Thermal and Stress**
F. Mendonca (cd-adapco, UK)
- **Ansys Workbench - a New Environment for Complex Simulation Tasks**
R. Rauch (Cadferm GmbH, D)
- **SFE Concept CAE Design: a Key Enabler in Virtual Product and Vehicle Development**
H. Zimmer (SFE GmbH, D)

Die nächsten Workshops finden voraussichtlich vom **5. – 6. July 2007** im European Technical Center bei Renault in der Nähe von Paris/Frankreich bzw. vom **15. - 16. November 2007** bei Labein in Bilbao/ Spanien statt.

Die Teilnahme an den Workshops ist offen für alle in der numerischen Simulation Beschäftigten aus dem Automobilumfeld. Beiträge aus Industrie, Forschung und Hochschule sind Willkommen.

Nähere Informationen unter:
NAFEMS DACH & Nordic
Schillerstraße 6
D-85567 Grafing b. München
phone +49 (0) 80 92 - 8 35 50
fax +49 (0) 80 92 - 8 35 51
e-mail info@autosim.org

Die Präsentationen sowie umfangreiche Informationen finden Sie im Inernet unter

www.autosim.org

Abaqus / Dassault Systèmes

Dassault Systèmes stellt neue Version Abaqus Student Edition Version 6.6 vor

Dassault Systèmes gibt die Verfügbarkeit der neuen Abaqus Student Edition Version 6.6. bekannt. Die Software ermöglicht Studenten die Anwendung der neuesten Simulationstechniken, wie sie in der kürzlich veröffentlichten kommerziellen Abaqus 6.6 Version verfügbar sind.
www.abaqus.com

Altair Engineering

Altair Engineering kündigt die Veröffentlichung von HyperWorks 8.0 an

Die Altair Engineering, Inc. gibt die Veröffentlichung der Version von HyperWorks 8.0 – The Engineering Framework for Product Design bekannt. Das integrierte CAE Framework stellt mit seinen leistungsstarken CAE Softwaretools eine hoch

entwickelte Technologie und Funktionalität zur Verfügung, um Effizienz zu steigern und Entwicklungszeiten neuer, innovativer und robuster Produkte zu verkürzen. „Wenn Hersteller neue Wege suchen, um ihre Produktentwicklung effizienter zu gestalten und um der Konkurrenz einen Schritt voraus zu sein, wächst die Bedeutung von CAE“, sagte Jeff Brennan, Vizepräsident der Altair Business Unit HyperWorks. „Diese Softwareversion - die bisher größte unserer Firmengeschichte - folgt unserer Tradition einer offenen Softwarearchitektur und bietet Best-in-Class Technologie, die Entscheidungsfindungen verbessert und Simulationsprozesse beschleunigt.“ Die neuen HyperWorks 8.0 Produkte und Funktionalitäten bilden gemeinsam die umfangreichste Simulations-Suite für PLM. Dieses Release zielt auf drei Hauptbereiche, die Hersteller dabei unterstützen, innovative Produkte schneller auf den Markt zu bringen: es bietet ein

integriertes, multidisziplinäres Framework, ermöglicht einen CAE gesteuerten Designprozess und verkürzt die Simulationszyklen.
www.altair.de

Ansys/Fluent

Fluent 6.3 mit umfassendem CFD-Anwendungsspektrum

Ansys, Inc. kündigte die neueste Version seiner CFD-Software Fluent 6.3 an. Neben neuen Funktionalitäten für den industriellen Einsatz wurden wichtige numerische Verbesserungen hinsichtlich Genauigkeit, Effizienz und Stabilität implementiert. Insgesamt sind mehr als 100 neue Funktionen verfügbar, die Fluents Möglichkeiten in vielen Bereichen, einschließlich bewegter Netze, reagierender Strömungen und Mehrphasenströmungen deutlich erweitern. Fluent 6 Technologien tragen nun wesentlich zum Ansys-CFD-Angebot bei.

Icepak 4.3 freigegeben

Ansys, Inc. hat die neue Version 4.3 der Icepak freigegeben.

Alfred Karcher GmbH & Co. KG nutzt Fluent for Catia V5

Die Alfred Karcher GmbH & Co. KG, einer der weltweit größten Reinigungsgerätehersteller entschied sich für den Einsatz von Fluent for Catia V5 für die CFD-Berechnungen.
www.ansys.com

Werbeanzeige

Dr. Heck
Consulting and Engineering

Simulation und Optimierung
Strömungsvorgänge
Strukturmechanik
Wärmetransportprozesse

Besonderes Know-How:
Fluid-Struktur-Wechselwirkungen

Informationen und viele Anwendungsbeispiele:
www.dhcae.de

Tel: 02151/821493
Fax: 02151/821494
Postfach 19 02 54, 47762 Krefeld

Cadferm

Cadferm Users Meeting 2006

Vom 25. – 27. Oktober 2006 konnten die Cadferm GmbH und die Ansys Germany GmbH 630 Gäste zum 24. Cadferm Users´ Meeting mit 2006 German Ansys Conference begrüßen. Einmal mehr ist es gelungen, ein einzigartiges Informationsangebot zur rechnerischen Simulation in der Produktentwicklung aus Vorträgen, Workshops und einer Fachausstellung zu schaffen. Keynotes u.a. von Porsche, Bosch Siemens Hausgeräte oder Brose sowie von den FEM-Pionieren Dr. Swanson (Ansys) und Dr. Hallquist (LS-Dyna) folgten Sessions, die sich ganz speziellen Themengebieten widmeten. Zusätzlich boten sich den Teilnehmern viele Gelegenheiten zu Diskussion und

Gedankenaustausch mit anderen Anwendern und Vertretern von Soft- und Hardwareherstellern. Auch das Rahmenprogramm stand im Zeichen des „Engineering Spirit“: Ein Abend im neuen Mercedes-Benz Museum in Stuttgart.

www.cadfem.de

CD-adapco

Strömungssimulation:

Star-CCM+ V2.04

CD-adapco hat Star-CCM+ V2.04 freigegeben. Die neue Version für numerische Strömungsmechanik bietet innerhalb einer Softwareumgebung zahlreiche Verbesserungen vom importierten Geometriemodell bis zum CFD-Simulationsergebnis.

www.cd-adapco.com

Dynamore

5. LS-DYNA Forum 2006 – das Treffen der LS-Dyna Anwender erneut ein großer Erfolg

Vom 12. - 13. Oktober 2006 fand das 5. LS-Dyna Anwenderforum in Ulm statt. Organisiert wurde die Veranstaltung von der Dynamore GmbH, dem Distributor von LS-Dyna im deutschsprachigen Raum. 260 Teilnehmer informierten sich in über 80 Fachvorträgen und in einer begleitenden Hard- und Softwareausstellung mit mehr als 20 Ausstellern über Anwendungen, Entwicklungen, Trends, Hardware und Zusatzprodukte rund um LS-Dyna. Die umfassenden Informationsmöglichkeiten, der Wissens- und Erfahrungsaustausch und die Möglichkeit der fachlichen Diskussion machten dieses Anwenderforum erneut zu einem großen Erfolg. Der Tagungsband ist unter der ISBN-Nr. 3-9809901-2-5 oder direkt bei Dynamore erhältlich. Die Vortragsmanuskripte können unter www.dynamore.de heruntergeladen werden.

www.dynamore.de

PERMAS

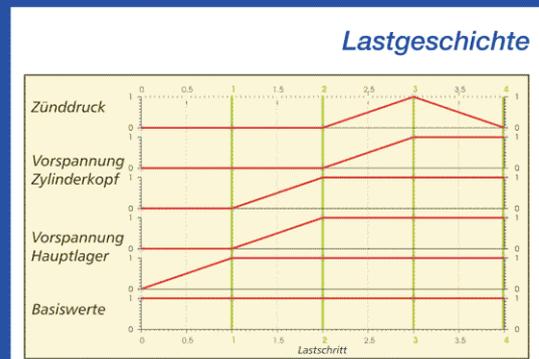
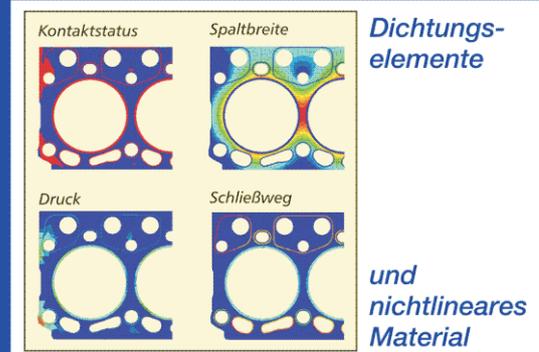
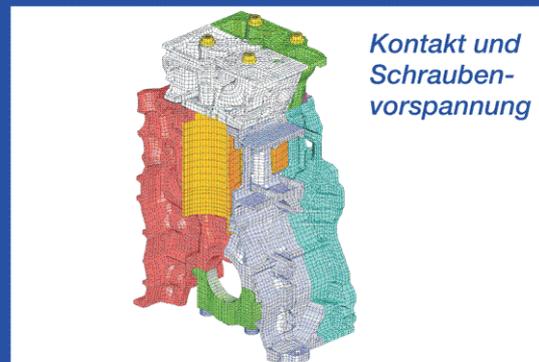
Die innovative Kraft der Simulation



Finite Elemente für erfolgreiche Produkte:

- Statik, Dynamik, Akustik, Wärmeleitung, Elektromagnetik;
- Linear und nichtlinear;
- Kurze Rechenzeit, sehr große Modelle;
- Integrierte Optimierung und Zuverlässigkeitsanalyse.

Zum Beispiel: Motorberechnung



Entwicklung - Beratung - Schulung - Berechnung

INTES GmbH
Schulze-Delitzsch-Str. 16
D-70565 Stuttgart
Tel.: +49-711-784990
Fax: +49-711-78499-10
E-Mail: permas@intes.de
Web: www.intes.de



FE-Design

FE-Design entwickelt Software-Lösung der DaimlerChrysler Forschung zur Topologie-optimierung von Strömungsstrukturen weiter

FE-Design entwickelt die von der DaimlerChrysler Forschung konzipierte Software Autoduct weiter. Diese Lösung erlaubt es, durchströmte Kanäle nicht-parametrisch, d.h. nur durch Vorgabe des zur Verfügung stehenden Bauraumes, zu optimieren. In Kombination mit Star-CD, einem der führenden CFD-Pakete, werden nun Bauteile, durch die flüssige und gasförmige Materialien geleitet werden, rechnerisch optimal ausgelegt. Auf diese Weise wird der Gesamtdruckverlust in Kanälen um bis zu 50 % reduziert; der aerodynamische Wirkungsgrad der optimierten Bauteile steigt signifikant. Für derartige schnelle und effiziente Methoden zur Auslegung von verlustoptimierten strömungsführenden Bauteilen für Motoren, Antrieb, Abgas- und Klimasysteme gibt es in allen Bereichen der Technik einen hohen Bedarf.

www.fe-design.de

Femlab / Comsol

Neue Version 3.3. von Comsol Multiphysics mit erweiterten Funktionen

Mit einem deutlich erweiterten Funktionsumfang kann die Simulationssoftware Comsol Multiphysics in der neuen Version 3.3 jetzt in zusätzlichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Eine erweiterte Auswahl an vordefinierten multiphysikalischen Kopplungen, die Modellbaum-Ansicht für eine noch leichtere Bedienung, die interaktive Gittererzeugung, das Zusammenführen von Komponenten bei der Modellerstellung, die Unterstützung von CAD-Baugruppen und eine weitgehend automatisierte Auswahl der Löser sind nur einige der wichtigsten Neuerungen. Die integrierte Modelldatenbank ermöglicht die Online-Suche in der MatWeb-Datenbank und kann durch den Import zusätzlicher Materialeigenschaften erweitert werden. www.femlab.de / www.comsol.com

GNS Systems

GNS Systems GmbH betreut CAE-Infrastruktur der Autoliv B.V. & Co. KG

Die GNS Systems GmbH hat mit der Autoliv B.V. & Co. KG (Autoliv) einen weiteren namhaften Kunden aus dem Automobilsektor gewinnen können. Seit Anfang des Jahres ist die GNS Systems GmbH verantwortlich für die Systempflege des CAE-Bereichs der Autoliv in Dachau und Elmshorn. Autoliv ist mit nahezu 40.000 Mitarbeitern und 80 Niederlassungen in über 30 Ländern führender Anbieter von passiven Insassenschutzsystemen wie beispielsweise Airbags und Sicherheitsgurte sowie Fahrerassistenzsysteme. Insgesamt werden an den Autoliv-Standorten Elmshorn und Dachau 30 Workstations und 25 Compute Server unter Linux betrieben und remote von einer Spezialistengruppe am Firmensitz der GNS Systems GmbH in Braunschweig betreut. Darüber hinaus sind GNS Systems-Mitarbeiter regelmäßig vor Ort, um auch im direkten Gespräch mit den Anwendern Probleme zu lokalisieren und zu beseitigen.

www.gns-systems.de

Intes

Permas auf Open Solaris

Permas ist ab sofort unter Open Solaris für Intes und AMD X86 Prozessoren verfügbar. Die Permas Version läuft im *D64* Modus, der 64-Bit für Adressen und 32-Bit für ganze Zahlen und Gleitpunktzahlen in einfacher Genauigkeit verwendet.

www.intes.de

LMS

LMS führt in LMS Virtual.Lab Structures Version 6 vollständige Funktionalität für die Erstellung von FE-Netzen ein

LMS führt Version 6 von LMS Virtual.Lab Structures, die integrierte Lösung für Strukturmodellierung und -analyse, ein. Um die vollständigen Funktionen zur Erstellung von Netzen ergänzt, umfasst LMS Virtual.Lab Version 6 nun den gesamten Prozess zur Modellerstellung

und Analyse, von der allgemeinen Vor- und Nachbearbeitung bis hin zur Simulation der Leistungsfähigkeit anhand einer Vielzahl von Attributen. Ausgehend von einem Gittermodell, einer Fläche oder einem Festkörper ist LMS Virtual.Lab Structures Version 6 in der Lage, mit Hilfe zahlreicher Methoden zur Netzerstellung unterschiedliche strukturelle Netztypen zu generieren.

LMS Test.Lab hilft Audi bei NVH-Prüfaufgaben

Audi implementiert die Software LMS Test.Lab erfolgreich für akustische und schwingungstechnische Tests, um die immer engeren Termine bei Entwicklungsprogrammen für neue Fahrzeuge einzuhalten. Das Unternehmen setzt Testsysteme von LMS seit langem dafür ein, bestimmte Geräuschprofile für neue Modelle abzusichern. Nach einer umfangreichen Bewertung beschloss Audi, auf das Softwarepaket LMS Test.Lab umzustellen und das neue Testsystem für mehr als 50 Anwender einzuführen. Die Implementierung umfasste mehrere NVH-Testsysteme für Labor- und Praxistests basierend auf dem Frontend LMS Scadas III für die Datenerfassung.

www.lmsintl.com

M-Base Engineering + Software

Verfügbarkeit von CAE Daten für Stahl

Im Rahmen des VDEh Projekts "Erarbeitung werkstoff- und verfahrensgerechter Kennwerte für Feinbleche aus normal- und höherfesten, sowie nichtrostenden Stählen", wurden umfangreiche und qualitativ hochwertige CAE Daten für zahlreiche Stähle generiert. Die Daten umfassen, neben den allgemeinen Ingenieursgrößen, Fließlinien bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten, Grenzformänderungsdiagramme und Wöhlerlinien. Einflüsse wie Wärmebehandlung der Proben und Vorverformungen wurden ebenfalls berücksichtigt. Somit bieten diese Daten eine extrem wertvolle Datenbasis für CAE Berechnungen, inklusive Umform- und Crash Simulation. Bislang waren diese Daten den Projektteilnehmern vorbehalten. Ab sofort können die-

se Werkstoffdaten in einer Kooperation zwischen dem Stahlinstitut VDEh und M-Base allen Interessierten angeboten werden. Gemessen am extrem hohen Aufwand für die Prüfung dieser Daten können diese Dateien sehr preisgünstig angeboten werden.

www.m-base.de

MSC.Software

MSC.Software kündigt ein weltweites „Impact-Channel-Programm“ an

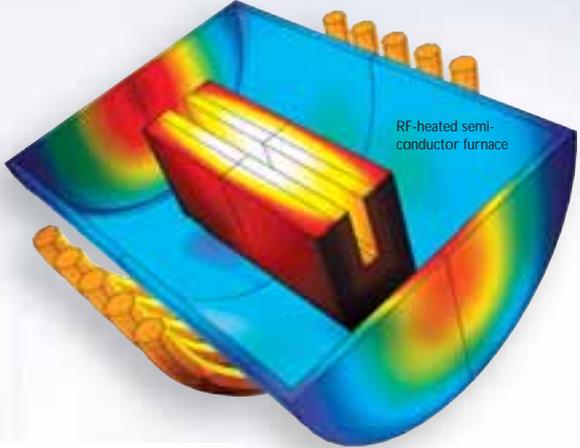
MSC.Software hat mit MSC Impact ein globales Channel-Programm vorgestellt, das es Vertriebspartnern gestattet, fortschrittliche Simulationssoftware an eine Vielzahl von Unternehmen auszuliefern. MSC Impact soll Simulationstechnologien nicht nur Großunternehmen, sondern auch kleinen und mittelständischen Betrieben zugänglich machen, die entweder noch keine oder nur in geringem Maße Simulationslösungen einsetzen. Dank des neuen Programms verfügen die Vertriebspartner von MSC.Software nun über ein stimmiges Simulationsangebot für Kunden, deren Angebot spezialisierte oder ausgelagerte Berechnungen umfasst.

Die europäische Virtual Product Development-Konferenz lockt führende Unternehmen an

MSC.Software Corp. hat den weltweiten Erfolg der VPD-Konferenzen des Unternehmens bekannt gegeben. Die in Europa, USA und Asien durchgeführten Konferenzen lockten mehr als 3.000 Besucher an. Die Konferenzen boten den Kunden von MSC.Software und der globalen Engineering-Community die Möglichkeit, das neue Enterprise Simulation-Angebot von MSC.Software kennen zu lernen. Die US-Konferenz markierte auch den Beginn der strategischen Allianz des Unternehmens mit IBM. Im Rahmen dieser Allianz sollen gemeinsam Enterprise Simulation-Lösungen angeboten werden, die dem Bedarf an unternehmensbasiertem Computer-Aided Engineering (CAE) und Analyse im PLM-Bereich gerecht werden.

www.mscsoftware.com





RF-heated semiconductor furnace

Hoch entwickelt, leicht zu bedienen.

Mit COMSOL Multiphysics® können Sie physikalische Eigenschaften beliebig koppeln: Analysieren Sie Strukturmechanik, Elektromagnetik und Wärmetransport in einem einzigen Simulationsmodell.



**Kostenfreie CD
mit Modell-
beispielen:**

www.comsol.de/intro



COMSOL MULTIPHYSICS IS A REGISTERED TRADEMARK OF COMSOL AB.

Noesis

Noesis kündigt PLM Optimization CAA V5 an

Noesis Solutions hat die das neue Release der in Catia V5 integrierten PLM Optimization Software freigegeben.

www.noessolutions.com

Tecosim

Team Hai-Tec gewinnt 2.ten Platz

Das Tecosim Team der Niederlassung in Köln hat mit seinem „Flughai“ einen hervorragenden zweiten Platz beim Fun- Wettbewerb des Red Bull Flugtages am Fühlinger See belegt. Vor über 130.000 Zuschauern glänzten die genialen Ingenieure-/innen u.a. mit dem weitesten Flug.

www.tecosim.de

nente der UGS Velocity Series. cPDM steht für collaborative Product Data Management. Diese wegweisende PLM-Lösung für den Mittelstand wurde im Herbst 2005 erstmals vorgestellt und wird heute bereits weltweit in 16 Ländern erfolgreich eingesetzt. Die Version 2 enthält erweiterte Funktionen für die Zusammenarbeit im Konstruktionsprozess, das Fertigungsdaten-Management und die ERP-Integration.

UGS und PLM Europe melden Rekordbesuch für Anwenderkonferenz

Die UGS Corp. verzeichnet einen Rekord bei der Besucherzahl der PLM Europe 2006, der jährlichen Konferenz für UGS-Anwender aus EMEA. Kunden und Partner aus 31 Ländern besuchten die Veranstaltung, die vom 9. bis 11. Oktober in Frankfurt stattfand: Das sind über 50 Prozent mehr Kunden als im Vorjahr.

www.ugs.com

Unigraphics Solutions

UGS stellt Version 2 von Teamcenter Express vor

Die UGS Corp. hat die Version 2 von Teamcenter Express angekündigt. Die Version enthält wichtige neue Funktionen für ein umfassendes Produktdatenmanagement (cPDM) für kleine und mittelständische Fertigungsunternehmen - von der Konstruktion bis zur Fertigung. Teamcenter ist die cPDM-Kompo-

Bitte senden Sie Ihre Pressemitteilungen an magazin@nafems.de.

**Suchen Sie Berechnungsingenieure?
Suchen Sie eine neue Herausforderung?**

Schalten Sie ein/e

Stellenanzeige/Stellengesuch *

im NAFEMS online-Magazin. Sprechen Sie die richtige Zielgruppe an
– ohne Streuverluste! Natürlich vertraulich und auf Wunsch auch unter Chiffre!

NAFEMS DACH, Schillerstr. 6, 85567 Grafing, Tel. 08092-83550, Fax 08092-83551, e-mail: info@nafems.de

* Die Schaltung von Stellenanzeigen ist NAFEMS Mitgliedern vorbehalten.

2007

| | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------|
| NAFEMS Seminar: Materialmodellierung | 05.-06.12.06 | Wiesbaden, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| Samtech Users Conference | 13. - 14.03. | Liège, B | www.samcef.com | Samtech |
| NAFEMS Trainingskurs Basic 1: Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre | 19.-20.03. | Wiesbaden, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| NAFEMS Nordic Seminar: Materials Modelling | 20.-21.03. | Oslo, N | www.nafems.org | NAFEMS Nordic |
| NAFEMS Seminar: CFD im Wandel - Zuverlässiger Einsatz CAD-basierter Software sowie anwendungsspezifischer Codes | 26.-27.03. | Wiesbaden, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| NAFEMS Seminar: Zuverlässiger Einsatz numerischer Simulationsmethoden in der Vorausberechnung | 28.-29.03. | Wiesbaden, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| Europäische LMS Konferenz | 17.-18.04. | Stuttgart, D | www.lmsintl.com | LMS GmbH |
| Hannover Messe | 16.-20.04. | Hannover, D | www.hannovermesse.de | Deutsche Messe AG |
| NAFEMS Trainingskurs Basic 2: Praxisorientierte Grundlagen für FEM-Analysen | 23.-24.04. | Wiesbaden, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| NAFEMS World Congress | 22.-25.05. | Vancouver, CAN | www.nafems.org | NAFEMS |
| Europäische LS-DYNA Conference | 29.-30.05. | Gothenburg, S | www.erab.se | Engineering Research AB |
| Blechexpo | 13.-16.06. | Stuttgart, D | www.schall-messen.de | P.E. Schall GmbH |
| Autosim Workshop | 05.-06.07. | Paris, F | www.autosim.org | NAFEMS |
| European Automotive CFD Conference (EACC) | 05.-06.07. | Frankfurt, D | www.eacc.ansys.com | Ansys Fluent |
| Abaqus Benutzerkonferenz | 17.-18.09. | Baden-Baden, D | www.abacus.de | Abaqus Deutschland GmbH |
| LS-Dyna Forum 2007 | 11.-12.10. | Frankenthal, D | www.dynamore.de | Dynamore GmbH |
| Autosim Workshop | 15.-16.11. | Bilbao, E | www.autosim.org | NAFEMS |
| Simpack User Meeting | November | | www.simpack.de | Intec GmbH |
| NAFEMS Seminar: Simulation von Verbunden: Material und Strukturen | 03.-04.12. | Wiesbaden, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |

INNOVATION DURCH SIMULATION




Zur Verstärkung unseres Teams suchen wir, möglichst für unsere Niederlassung in Darmstadt, eine/n abschlussstarke/n

CFD-Vertriebsingenieur(in)

für den Bereich **Chemie, Verfahrenstechnik und Materialverarbeitung**

Fluent Deutschland ist eine Tochtergesellschaft von ANSYS, Inc., dem führenden CAE-Anbieter mit über 1.400 Mitarbeitern weltweit, davon mehr als 100 in Deutschland an den Standorten Darmstadt, Otterfing und Hannover. Unsere Produkte FLUENT, ANSYS CFX und ANSYS ICEM CFD sind die weltweit renommiertesten CFD-Softwaresysteme (Computational Fluid Dynamics). Mit unseren CFD-Lösungen straffen unsere Kunden Entwicklungszyklen und erhöhen gleichzeitig die Designsicherheit; das verschafft wertvolle Wettbewerbsvorteile.

Idealerweise besitzen Sie Erfahrung im Vertrieb von Ingenieursoftware für Finite-Element-Berechnungen oder Strömungssimulationen (PLM, CAE, o.ä.) und können entsprechende Erfolge vorweisen. Ihr ingenieurtechnischer Hintergrund ist geprägt durch fundierte Kenntnisse im Bereich des Anlagenbaus, der Metallurgie, der Verfahrenstechnik bzw. Bioverfahrenstechnik oder der Prozesssimulation.

Die Funktion umfasst die Betreuung von Bestandskunden und die aktive Akquise von Neukunden. Dabei werden Sie von einem erfahrenen Team in jeder Phase des Prozesses optimal unterstützt. ANSYS legt mit jährlich zweistelliger Wachstumsrate in einem stark expansiven Markt die Grundlage für ein überdurchschnittliches Einkommenspotenzial.

Wir freuen uns auf Ihre aussagekräftigen Bewerbungsunterlagen mit Lichtbild, Gehaltsvorstellungen und möglichem Eintrittstermin. Bitte senden Sie Ihre Unterlagen an Frau Margit List. Gerne steht Ihnen für Fragen vorab auch Herr Dr. Martens zur Verfügung.

Fluent Deutschland GmbH
 Frau Margit List · Birkenweg 14 a · 64295 Darmstadt
 Telefon +49 6151 3644-0 · bewerbung@fluent.de

www.fluent.de

in tec

Ingenieurgesellschaft
für neue Technologien GmbH

Die INTEC GmbH, mit Hauptniederlassung bei München, ist ein international tätiges und stark expandierendes Software- und Consultingunternehmen im Bereich Virtual Prototyping und 3D-Simulation. Für unsere Kunden aus der Kraftfahrzeug- und Schienenfahrzeugindustrie sowie dem Maschinenbau entwickeln und vermarkten wir die Mehrkörpersimulations-Software SIMPACK.

Mit SIMPACK wird das Bewegungsverhalten und die Belastung von mechanischen und mechatronischen Systemen simuliert. Der Consulting Bereich von INTEC führt im Auftrag unserer Kunden Engineering Dienstleistungen durch.

Zum weiteren Ausbau unseres technologischen Vorsprungs suchen wir folgende neue Mitarbeiter (m/w)

- Application Engineer Rail and General

Bearbeitung von Simulationsprojekten für unsere Schienenfahrzeugkunden in den Bereichen Fahrdynamik, Fahrkomfort, Fahrzeugschwingungen und Antriebsdynamik. Weitere mögliche Arbeitsfelder liegen in den Bereichen Windenergie, Luft- und Raumfahrt und Antriebstechnik.

- Application Engineer Engine

Bearbeitung von Simulationsprojekten für unsere Automotive Kunden in den Bereichen Ventiltrieb, Steuertrieb, Kurbeltrieb.

- Application Engineer Automotive

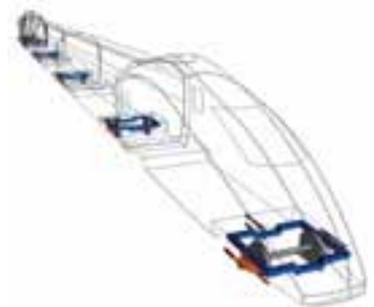
Bearbeitung von Simulationsprojekten für unsere Automotive Kunden in den Bereichen Fahrdynamik, Fahrkomfort, Fahrzeugschwingungen und Motordynamik.

- Senior Software Developer

Design, Implementierung und Umsetzung neuer Datenstrukturen und GUIs für unsere QT basierte Applikation SIMPACK.

Für die ausführlichen Stellenbeschreibungen gehen Sie bitte zu www.simpack.com, company, vacancies.

Wir freuen uns darauf Sie kennen zu lernen.



INTEC GmbH
Personalabt. Frau Engert
Argelsrieder Feld 13
82234 Wessling

Tel: 08153 9288-0
Fax 08153 9288-11
Erni.Engert@simpack.de
www.simpack.com

Produktentwicklung mit verknüpften Simulationen und praktischen Tests- Zweckmäßiger CAE Einsatz bei High-Tech-Polymeren

Prof. Dr.-Ing. F. Rieg, Dipl.-Ing. B. Alber
Lehrstuhl Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Es wird ein Konzept für den computergestützten Entwicklungsprozess mit Hochleistungspolymeren vorgestellt, welches aufgrund des komplexen Materialverhaltens der Polymere mehrere Simulationsmethoden kombiniert, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Die Frage bleibt, wie verlässlich die Simulationen bei Kunststoffen sein können und inwieweit die Ergebnisse mit der Realität übereinstimmen. Um diese Problematik exemplarisch zu verdeutlichen wird eine Fallstudie einer Klauenkupplung aus Langglasfaser verstärktem Kunststoff am Lehrstuhl Konstruktionslehre und CAD der Universität Bayreuth durchgeführt, in der die Simulation mit dem Experiment verglichen wird.

Simulation von Kunststoffen – Stand der Technik?

Thermoplastisch verarbeitbare Kunststoffe sind mittlerweile als Konstruktionswerkstoffe etabliert und werden seit längerem mit Computerunterstützung (Finite Elemente Analyse, Spritzgussimulation) in der Konstruktion verwendet. Durch die völlig andere molekulare Struktur der Kunststoffe im Vergleich zu den Metallen ergeben sich jedoch gänzlich verschiedene Materialeigenschaften. Diese Besonderheiten im Materialverhalten, die relevant sind bei der Auslegung von Bauteilen, der Vorhersage der Betriebsfestigkeit und der Simulation, gilt es zu berücksichtigen [5]. Vier Hauptinflussfaktoren bestimmen die Leistungsfähigkeit eines Kunststoffbauteils: das Material, die Verarbeitung, das Design und der Einsatz.

In der letzten Zeit hat sich eine neue Gruppe der thermoplastischen Polymere im Gebrauch etabliert: faserverstärkte Kunststoffe mit einer Glasfaserlänge von mehr als 7 Millimetern.

Diese Kunststoffe werden als Langglasfaser verstärkt bezeichnet. Mit ihren außergewöhnlichen Eigenschaften, wie verbesserte Steifigkeit und Schlagzähigkeit, sowie geringere Kriechneigung, ist diese Werkstoffgruppe besonders viel verspre-

chend für den Einsatz bei Maschinenelementen. Durch die spezielle Struktur der neuartigen Kunststoffe müssen die vielfältigen Problemgrößen in der computergestützten Konstruktion mit Kunststoffen diskutiert werden. Welche computergestützte Analyse mit welchem Aufwand durchgeführt werden kann oder muss, ist vielfach schwer abzuschätzen. Zusätzlich bereitet die Interpretation der Ergebnisse durch das ausgeprägte nichtlineare Materialverhalten erhebliche Schwierigkeiten [8]. Verschiedenste Materialmodelle und unterschiedliche Berechnungssolver versprechen das Materialverhalten hinreichend zu charakterisieren, allerdings werden dabei eine Fülle von Materialkennwerten und die Kenntnis der Finiten-Elemente-Methoden vorausgesetzt. Letztlich bestimmt daher der Aufwand zur Beschaffung der notwendigen Informationen den Einsatz der FEA. Oftmals wird wegen dieses Aufwands auf eine Simulation verzichtet, obwohl selbst eine einfache statische Analyse des Bauteils schon erhebliche Kenntnis der Vorgänge im Bauteil bringen kann. Die Entwicklung von Bauteilen aus Hochleistungskunststoffen mittels ICROS (Intelligent CROSS-linked Simulations) hat sich aus dieser Problematik heraus entwickelt und wird in einer Bauteilfallstudie verdeutlicht. Die Methode besteht darin, die vorhandenen Simulationsprogramme

gezielt zu verwenden, die notwendigen Simulationsparameter bereitzustellen und den Ablauf der einzelnen Programme zielgerichtet vorzugeben. Bei der Konstruktion mit Kunststoffen funktioniert dies wie folgt: das Füllverhalten von Thermoplasten lässt sich mit Spritzguss-simulationsprogrammen gut vorher-sagen. Hierdurch können Form- und Werkzeuggestaltung, Einspritzpunkte oder Prozessparameter vorab optimiert werden. Die Aussagen zur Festigkeit werden durch Finite-Elemente-Programme getroffen. Ob und wie die optimale Spritzgussform gefertigt werden kann, wird durch eine Fertigungssimulation der notwendigen Fräs- und Erodier-vorgänge entschieden. Da die lokale Festigkeit eines faserverstärkten Bauteils abhängig von der einspritzbedingten Faserlage ist, muss hier nach der 3D-CAD-Modellierung des Bauteils zuerst eine Füllsimulation erfolgen und dann nachgeschaltet erst eine FEA-Berechnung durchgeführt werden. Bei unverstärkten Polymeren kann die Festigkeitsrechnung dagegen bereits vor der Füllsimulation angesetzt werden.

Fallstudie Kunststoffkupplung

Klauenkupplungen (Bild 3) werden zur verlust-, schwingungs- und stoßfreien Übertragung von Drehmomenten verwendet. Zusätzlich kön-

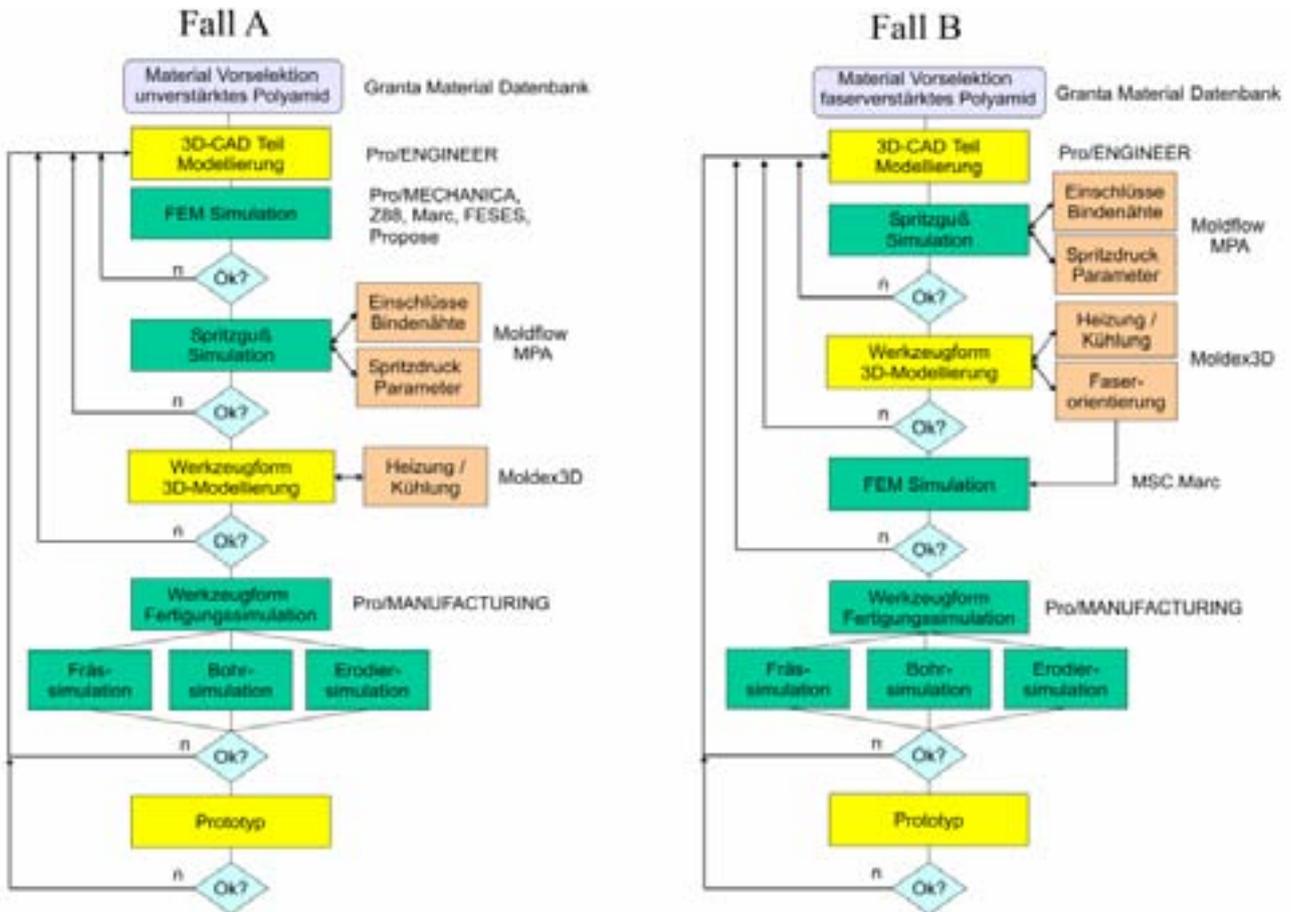


Bild 1: Vorgehensweise bei der Verwendung von ICROS

nen Fluchtungsfehler und Versätze zwischen den Wellen ausgeglichen werden. Herkömmlich werden diese Maschinenelemente aus hochfestem Aluminium hergestellt [7]. Die Fallstudie soll zeigen, dass einer Substitution von metallischen Werkstoffen bei einem stark belasteten Maschinenelement durch Simulationseinsatz zielgerichtet möglich ist.

Material

Das verwendete Material ist ein Langglasfaser verstärktes Polyamid 66 (FACTOR PA LGF) der Firma EPIC POLYMERS, welches im Pultrusionsverfahren hergestellt wird. Das Material besitzt einen E-Modul von 21.700 MPa und eine Zugfestigkeit von 220 MPa. Durch die Langglasfaserverstärkung werden durch Steigerung der Fasertlänge höhere Leistungen erreicht. Das Polymergranulat besitzt eine Stäbchenform der Länge 9 mm. Die Glasfasern laufen über die gleiche Länge längs durch das Granulat. Je

länger die Fasern im Bauteil sind, desto besser ist bei Belastung die Kraftübertragung der Polymermatrix auf die Verstärkungsfaser.

Finite-Elemente-Analyse

Es wurden mehrere Finite-Elemente-Analysen durchgeführt. Die Formoptimierung erfolgte an Hand von linear-statischen Analysen, daraus folgend entstand das abgewandelte verrundete und verrippte Design. Für den Festigkeitsnachweis ist diese Methode aber ungenauer als eine nichtlineare Berechnung. Die nicht-

lineare Berechnung erfolgte durch Übernahme von Spannungswerten aus Zugversuchen.

Spritzguss-Analyse

Die Optimierung der Form in Hinblick auf die Fertigung im Spritzgussprozess wurde sowohl in 2 ½ D als auch in 3 D mit und ohne Faser-Verteilung durchgeführt. Die Lage der Lufteinschlüsse und Bindenähte kann in beiden Verfahren vorhergesagt werden. Die Faserorientierung ist normalerweise nur bei 3 D Simulationen zuverlässig [4]. Das verwen-

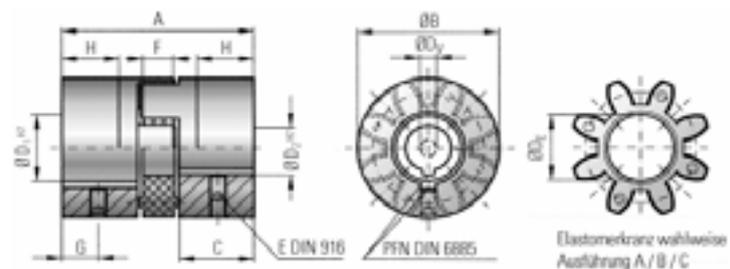


Bild 2: Konventionelle Klauenkupplung aus Aluminium (R+W)

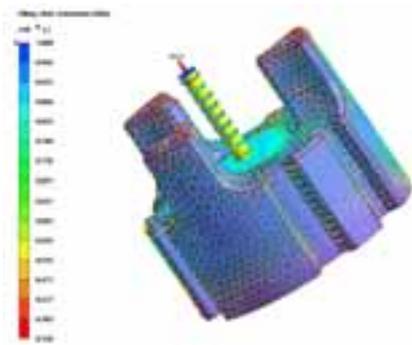


Bild 3: Spritzgussanalyse mit Faserorientierung in Moldex3D



Bild 4: Ergebnisse des Veraschungsversuches: Fasergerüst links, Faserlänge rechts

dete Langglasfaser verstärkte Material kann mit den in Spritzgussanalyseprogrammen verwendeten Materialmodellen nicht berechnet werden. Durch Einstellung eines ähnlichen Materialverhaltens und gezielte Änderung des Fasereinflusses können allerdings Aufschlüsse über das Verhalten der Fasern gegeben werden

Versuchsverifikation – Übereinstimmung mit Simulation?

Die durchgeführten Simulationen können einen Einblick in die Leistungsfähigkeit des Bauteils geben. Spannungsspitzen und Dehnungsverhalten des Bauteils geben Aufschlüsse über das Verhalten während des Einsatzes. Trotz allem können viele auftretende Einflüsse auf das Material- und Bauteilverhalten durch die Komplexität des Bauteils nicht ausreichend simuliert werden. Dies sind im einzelnen: das Verhalten unter Betriebsbedingungen, die Verteilung der Fasern im Bauteil und somit die Leistungsfähigkeit des Bauteils, sowie Aussagen über die Dauerfestigkeit des Bauteils unter Einbeziehung der Alterung des Werkstoffes.

Um Aussagen zum Alterungsverhalten und die zuverlässige Vorhersage der Bauteilfestigkeit unter Dauerbelastung treffen zu können, ist die Durchführung von Prototypentests unerlässlich. Die hier vorgestellte Kupplung wird mit einer Arburg Allrounder 320 Spritzgussmaschine gefertigt und anschlie-

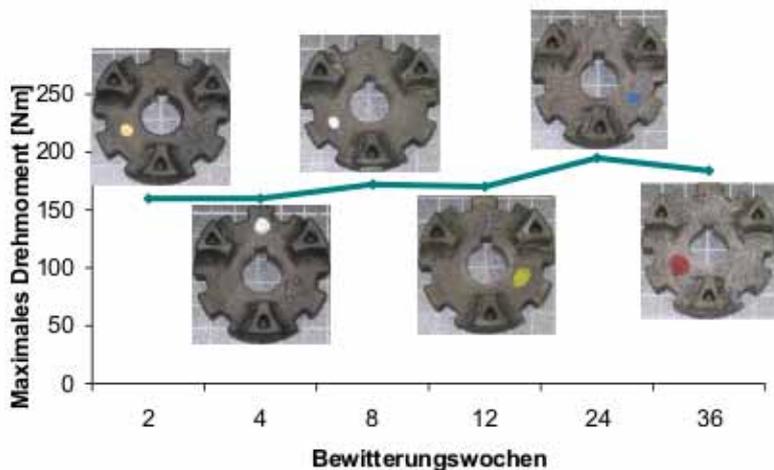


Bild 5: Eigenschaftsentwicklung während der Bewitterung



Bild 6: Entstehung des Prototyps der Kunststoffkupplung

ßend, wie bei Teilen aus Polyamid üblich, bei Raumklima konditioniert. Um bei Kunststoffen spezifische Alterungseinflüsse zu charakterisieren und so ein Versagen nach mehreren Jahren Laufzeit auszuschließen, werden Tests an, mit in einer Bewitterungsmaschinen gealterte Proben, durchgeführt. Bei Langglasfaser verstärkte Materialien sollten zusätzlich Veraschungsversuche Aufschluss über die Faserlänge im Bauteil geben. Diese Versuche werden ebenfalls am Beispielbauteil

durchgeführt.

Um Aussagen über die Dauerfestigkeit zu geben, werden konditionierte und gealterte Prototypen am lehrstuhleigenen Prüfzentrum auf Dauer- und Schwingfestigkeit geprüft. Dies geschieht auf einem 1.250 kW Motorprüfstand, bei dem das Drehmoment durch mechanisches Verspannen des Antriebsstrangs auf den Prüfling aufgebracht wird. Dazu werden bei einer Drehzahl von 3000 min⁻¹ die Kupplungen



Bild 7: Betriebsfestigkeitsprüfstand

für jeden Test mit 4?107 Lastwechselspielen schwingend zyklisch belastet. Mit unterschiedlichen vorgegebenen Drehzahlen wurden so über 60 Kupplungshälften getestet.

Faserverteilung

Langfaserverstärkte Polymere entfalten ihre herausragenden Eigenschaften erst ab einer Faserlänge von mehr als 2 mm. Um die Faserverteilung innerhalb des Bauteils und



Bild 8: Übereinstimmung Simulation und Praxis

die Faserlänge zu bestimmen, werden die Bauteile in einem Muffelofen bei 800°C verascht [2]. Das organische Polymer zersetzt sich und übrig bleibt das Fasergerüst aus Glas. Mit diesem Gerüst können Rückschlüsse auf die Dimensionierung des Bauteils gezogen werden. Die Angussform bestimmt die Fließeigenschaften und die Verteilung der Fasern. Scharfe Umlenkpunkte lassen die Fasern brechen, durch den Strom des flüssigen Kunststoffes werden die Fasern teilweise orientiert. Die Form des Teiles sollte, nach der Veraschung größtenteils erhalten bleiben. Um die Verstärkungswirkung der Fasern zu charakterisieren, wird das Fasergerüst zerstört und

die Fasern vermessen. Je länger die Fasern sind, desto besser sind die verstärkenden Eigenschaften, im Beispiel ist die statistische Faserlänge 7 mm.

Künstliche Bewitterung

Kunststoffe verändern im Laufe der Zeit aufgrund von Alterungsprozessen sowohl ihre optischen, mechanischen, als auch ihre haptischen Eigenschaften. Dieser Effekt verstärkt sich durch Einfluss von Medien oder UV-Strahlung. Bei komplexen Kunststoffbauteilen kann das Verhalten der Materialeigenschaften unter Witte-rungseinflüssen nur schwierig exakt vorhergesagt werden [1]. In vielen Anwendungen ist aber die

Leistungsfähigkeit des Kunststoffes über eine Langzeitbelastung entscheidend. Es empfehlen sich hier Versuche mit bewitterten Prototypen. Beschleunigte Alterungsversuche werden weitläufig verwendet, obgleich die Ergebnisse aus solchen Tests nicht komplett übertragen werden können, da die verwendeten Energielevel meist höher sind als in der Realität.

Die Prozesse, welche bei beschleunigter Alterung auftreten, sind meist dieselben wie bei natürlicher Alterung. Allerdings können hierbei lediglich relative Aussagen über das Verhalten des Bauteils, aber keine absoluten Vorhersagen getroffen

werden. Im Beispielfall wurden die Kupplungen 9 Monate abwechselnd vier Stunden lang UV- und Kondensationszyklen ausgesetzt. Anschließend erfolgten die dynamischen und statischen Leistungsfähigkeitstests an den bewitterten Bauteilen [3].

Es zeigt sich zum Einen eine deutliche Veränderung der Oberfläche. Es treten Glasfasern hervor, was sich in einem gräulichen Erscheinungsbild und der haptisch rauen Oberfläche bemerkbar macht. Dieser Effekt hat aber keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und kann nur als optisch störend empfunden werden. Zum Anderen zeigt sich eine Erhöhung des maximal ertragbaren Drehmoment der Kupplungen. Dies hängt mit dem gewählten Material zusammen. Polyamid nimmt durch seine chemische Struktur Wasser auf. Dies führt einerseits zu Toleranzschwankungen der Bauteile, andererseits wird das Material zäher. Die Kupplungen können bei Belastung mehr verformt werden, ohne dass der Bruch auftritt - das maximale Drehmoment steigt an. Ein weiterer Effekt ist das Nachkristallisieren des teilkristallinen Kunststoffes, wodurch ebenfalls höhere Festigkeiten erreicht werden.

Die Proben zeigten über die Versuchszeit keine gravierenden Änderungen der mechanischen Eigenschaften. Es ist davon auszugehen, dass die Bauteile im Einsatzfall keinen höheren Belastungen, als die hier simulierten, ausgesetzt werden.

Schlussbetrachtung und Ausblick

Polymere Werkstoffe sind komplexe Materialien, welche durch ihre vielseitigen Eigenschaften immer eine Herausforderung an die computergestützte Konstruktion darstellen werden. Mit dem Einsatz von Simulationen und der intelligenten Mischung bekannter Simulationsmethoden kann die Anzahl an Prototypenversuchen reduziert, und viele Schwachstellen bereits in der Anfangsphase der Entwicklung vermieden werden. Die Simulation ist

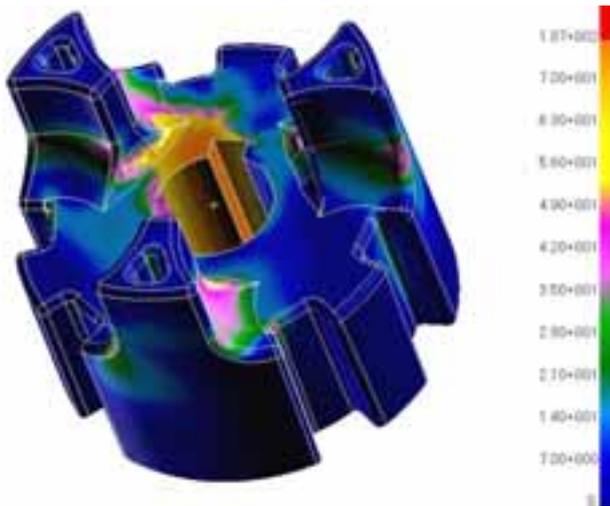


Bild 9: Finite Elemente Analyse des Prototyps

immer nur so genau wie es die Vorgaben für die Analyse sind. Es bedarf einer kritischen Hinterfragung der Ergebnisse und einer genauen Definition der Erwartungen, die an die Simulation gestellt werden.

Die Kupplung kann 130 Nm Drehmoment dauerhaft übertragen und ist dabei 62 % leichter als die Aluminiumvariante. Das Beispiel zeigt, dass Simulationen mit Prototypenversuchen gemeinsam angewendet werden müssen, um durch beide Methoden das optimale konstruierte Bauteil zu erhalten.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 1110: "Kunststoff-Polyamide-Beschleunigte Konditionierung von Probekörpern", Berlin: Beuth, 1998.
- [2] DIN EN ISO 3451: "Kunststoff-Bestimmung der Asche", Berlin: Beuth, 1997.
- [3] DIN EN ISO 4892: "Kunststoff-Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten", Berlin: Beuth, 2001.
- [4] Haag, R.: "Anisotrope Bauteil-Auslegung mit Moldex3D, Einsatz professioneller Spritzguß-

simulation in der Prozeßkette", Proceedings of the 7th Bayreuther Konstrukteurstag, Rieg, F. (Ed.), Hackenschmidt, R. (Ed.), Bayreuth, 2005.

- [5] Kaiser, W.: „Kunststoffchemie für Ingenieure“, München: Hanser, 2006.
- [6] Rieg, F., Hackenschmidt, R.: "Finite Element Analyse für Ingenieure", München: Hanser, 2003.
- [7] Rieg, F., Kaczmarek, M.: „Taschenbuch der Maschinenelemente“, München: Hanser, 2006.
- [8] Stojek, M., Stommel, M., Korte, W.: "FEM zur Auslegung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen", Düsseldorf: Springer, 1998.
- [9] VDI-Wissensforum: „Konstruieren mit Kunststoffen“, Düsseldorf: Springer, 2003.

Autoren

Dr.-Ing. Frank Rieg ist Professor für Konstruktionslehre und CAD an der Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften der Universität Bayreuth.

Bettina Alber ist diplomierte Ingenieurin. Sie promoviert über die Modellierung und Simulation von neuartigen Polymeren an der Universität Bayreuth.

Automatische Formoptimierung einer Abgasanlage

Thomas Lehnhäuser (Fluent Deutschland GmbH, Darmstadt, Germany)

Marc Ratzel (Altair Engineering GmbH, Böblingen, Germany)

Joachim Braun, Laurence Marie (J. Eberspächer GmbH & Co. KG, Esslingen, Germany)

In dieser Studie wird ein Verfahren zur automatischen Formoptimierung von Strömungsgebieten präsentiert. Der Ansatz findet Anwendung bei der Optimierung der Effizienz eines katalytischen Konverters in einer Abgasanlage für Otto-Motoren. Dabei wird die Form der Abgasanlage so variiert, dass die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit über einen Auswertequerschnitt möglichst gleichförmig ist und der Totaldruckverlust über der Anlage minimal ist.

Die Bestimmung der entsprechenden strömungsmechanischen Kennwerte erfolgt durch die numerische Simulation mit Hilfe eines CFD-Werkzeugs (Computational Fluid Dynamics). Dieses Verfahren wird bereits seit längerem erfolgreich in der Entwicklung von Abgassystemen eingesetzt, jedoch zumeist in Verbindung mit einer manuellen Optimierung der Konstruktion in einem CAD-System. Diese Vorgehensweise ist in der Regel sehr zeit- und arbeitsintensiv.

Für eine vollständige Automatisierung des Verfahrens ist es notwendig, eine Formvariation ohne Interaktion des Benutzers in jeder Optimierungsschleife zur Verfügung zu stellen. Das kann durch die Verwendung der so genannten „Morphing“-Technologie erreicht werden. Dieses Verfahren beeinflusst die Lage der numerischen Berechnungspunkte, so dass die abgebildete Geometrie verändert wird. Durch die Kopplung des Morphing-Ansatzes und des CFD-Tools mit einem Optimierungswerkzeug erhält man schließlich eine automatisierte Prozedur.

In der vorliegenden Arbeit werden für die Optimierung HyperStudy und für die Formvariation die Morphing-Möglichkeiten von HyperMesh verwendet. Für die Simulation der Strömung findet das CFD-Werkzeug Fluent Anwendung.

Einleitung

Verbrennungsmotoren haben den Nachteil des unvermeidbaren Ausstoßes von Schadstoffen. Eine Hauptaufgabe von modernen Abgassystemen (Katalysatoren oder Dieselpartikelfiltern) ist daher, die Schadstoffe in weniger schädliche Produkte umzuwandeln. Die Leistungsfähigkeit dieser Systeme beruht auf einer Vielzahl von Parametern, unter anderem der Temperatur- und Strömungsverteilung. Diese strömungsmechanischen Eigenschaften lassen sich durch eine geschickte Wahl von konstruktiven Parametern positiv beeinflussen. Solche Formänderungen und anschließende Messungen an realen Prototypen sind für die systematische Entwicklung der Anlagen, wenn überhaupt möglich, sehr teuer und zeitraubend. Die numerischen Simulationstechniken hingegen lassen eine große Flexibilität hinsichtlich der geometrischen Parametervariation zu und werden zudem seit längerem erfolgreich angewendet, um die Strömungs- und Temperaturverteilung in modernen Abgassystemen zu bestimmen.

Die numerische Strömungssimulation (CFD, Computational Fluid Dynamics) hat sich daher zu einem verlässlichen Werkzeug bei der Entwicklung von Abgasanlagen entwickelt. Dabei wird der so genannte Gleichverteilungssindex am Einlass des Katalysators zur Beurteilung der Konvertierungseffizienz der Anlage herangezogen.

Um den Prozess der Formoptimierung ohne Benutzerinteraktion durchzuführen, ist es notwendig, die Variantengenerierung zu automatisieren. Numerisch kann man eine solche automatische Anpassung der Geometrie durch das Morphing-Verfahren erreichen. Dabei werden verschiedene Variationen basierend auf einem Anfangsgitter definiert. Zur automatisierten Generierung von Formvarianten werden diese Gittervariationen individuell skaliert und anschließend kombiniert.

Die Automatisierung des Prozesses ergibt sich durch den Einsatz eines numerischen Optimierungswerkzeugs. Dieses berechnet basierend auf den CFD-Auswertungen solange neue Design-Parameter, bis sich ein Optimum hinsichtlich der Zielfunktion einstellt.

In dieser Arbeit werden die folgenden Werkzeuge verwendet:

1. Optimierung: HyperStudy
2. Morphing: HyperMesh
3. CFD-Simulation: Fluent

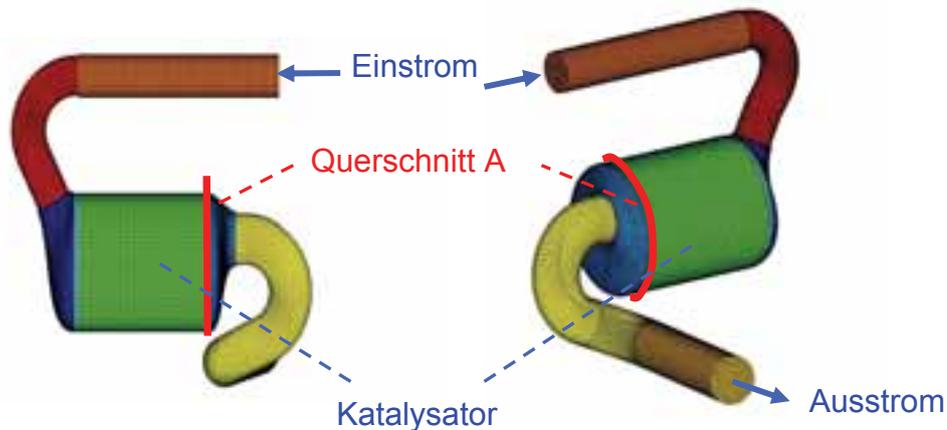


Abb. 1: Numerisches Modell für die Simulation des Abgassystems

Numerisches Modell für die Strömungssimulation

Die maßgebliche Geometrie für die Strömungssimulation besteht aus einem Einstromrohr, dem Katalysator und einem Ausstromrohr. Das numerische Gitter besteht aus ca. 250.000 Zellen. Turbulenzeffekte werden durch das bekannte $k-\varepsilon$ Modell mit Standardwandfunktionen abgebildet. Als Randbedingung ist am Einlass ein Massenstrom vorgegeben, während am Ausstrom ein Gegendruck angenommen wird. Dabei wird die Größe des Gegendrucks durch die Form der restliche Abgasanlage bestimmt. Die Modellierung des Katalysators erfolgt durch die Vorgabe eines erhöhten Strömungswiderstands unter Verwendung des Modells „Poröses Medium“.

Die Ausgeglichenheit der Geschwindigkeit am Auswertequerschnitt A wird durch den Gleichverteilungsindex γ beschrieben:

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{|w_i - w_{mean}| A_i}{A w_{mean}}$$

wobei die folgenden Bezeichnungen verwendet werden:

- n - Anzahl der Elemente auf der Auswerteebene
- w_i - lokale Geschwindigkeit auf den Elementen der Auswerteebene
- w_{mean} - mittlere Geschwindigkeit auf der Auswerteebene
- A_i - Flächeninhalt der Elemente auf der Auswerteebene
- A - Gesamtfläche der Auswerteebene

Für den idealen Fall einer konstanten Geschwindigkeitsverteilung ergibt sich γ zu Eins.

Formvariation mit Morphing

Basierend auf einem vorhandenen Gitter, können mit Hilfe der Morphing Technologie schnell und einfach Formvariationen erzeugt werden. Das Gitter wird hierzu parametrisiert und in Teilgebiete (*Domains*) unterteilt. An beliebigen Stellen können *Handles* aufgebracht werden, die einer bestimmten *Domain* zugeordnet sind. Beim Verschieben der *Handles* werden nur Berechnungsknoten verschoben, die in der zugehörigen *Domain* liegen. Die Zell- bzw. Knotennummern bleiben dabei unverändert. Damit können lokale und auch globale Formvariationen

erzeugt werden, die als *Shapes* gespeichert werden. Durch die Kombination verschiedener *Shapes* werden neue Designs definiert. Mit Hilfe von Glättungsalgorithmen wird die Verzerrung der Zellen auf ein Minimum beschränkt.

Durch die *Shapes* wird der Designraum für die Optimierung festgelegt. Jede *Shape* ist ein zusätzlicher Freiheitsgrad und hat damit einen direkten Einfluss auf die möglichen Ergebnisse der Optimierung.

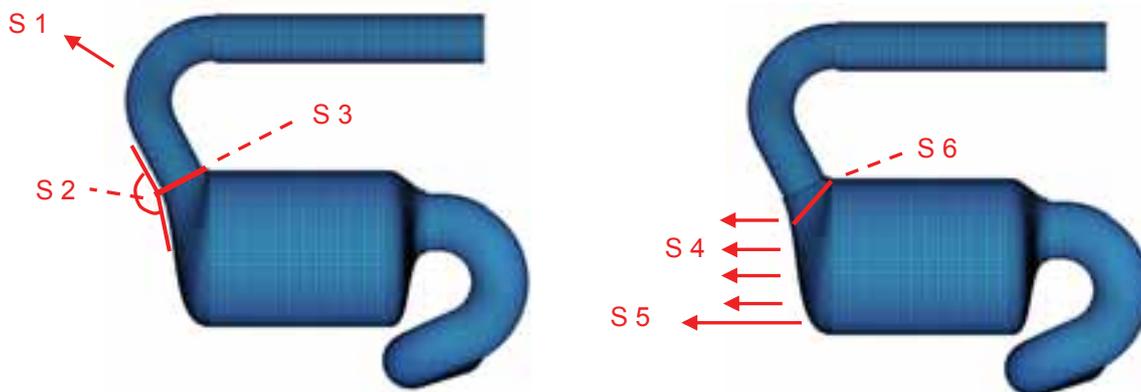


Abb. 2: Formvariationen der Abgasanlage

Im Rahmen dieser Studie werden sechs *Shapes* definiert, die in der Optimierung als Designvariablen benutzt werden, vgl. Abb. 2. Formvariation S1 erhöht die Krümmung des Bogens, indem die Knoten in dem gebogenen Teilstück in Richtung des roten Pfeils verschoben werden. An vier Stellen werden die Knoten auf dem entsprechenden Querschnitt relativ zu einander fixiert, so dass sie nur als starre Scheibe verschoben werden können. Damit wird sichergestellt, dass das Rohr seinen kreisförmigen Querschnitt beibehält. Die zweite Variation S2 verändert den Winkel zwischen dem geraden Teilstück und dem trichterförmigen Einlass. Der Eintrittsdurchmesser des Einlasses wird durch die Variable S3 variiert. Durch die Modifikation S4 werden die Knoten auf der Oberfläche des Einlasses in Richtung des roten Pfeils verschoben, so dass sich auch die darunter liegenden Knoten mit verschieben. Die Formvariation S5 verändert den unteren Teil des Einlasses. Mit der Variablen S6 wird der Durchmesser unterhalb der Eintrittskante variiert.

Optimierung mit HyperStudy und Fluent

HyperStudy ist ein solverunabhängiges Tool zur Durchführung von DoE (Design of Experiment) Studien, Optimierungen oder stochastischen Untersuchungen. Die von HyperStudy zur Verfügung gestellten Design-Parameter werden in dieser Untersuchung dazu verwendet, die in HyperMesh erzeugten *Shapes* S1 bis S6 zu skalieren. Durch die anschließende Linearkombination der skalierten *Shapes* erhält man das Berechnungsgitter für die nachfolgende Strömungssimulation. Bezeichnen die Parameter w_1, \dots, w_6 die Skalierungsfaktoren, so lässt sich der Design-Raum wie folgt definieren:

$$S = w_1 S1 + \dots + w_6 S6.$$

Während der Optimierung variiert HyperStudy die Faktoren w_1, \dots, w_6 und generiert für jede Kombination ein Fluent Eingabe-File, *.cas File. Fluent wird im Batchbetrieb gestartet, das *.cas File wird importiert und es wird eine CFD Simulation mit einem anschließenden Post-Processing Schritt ausgeführt. Basierend auf den Fluent Simulationsergebnissen bestimmt HyperStudy die Faktoren w_1, \dots, w_6 neu, und ein weitere Simulation wird gestartet, vgl. Abb. 3.

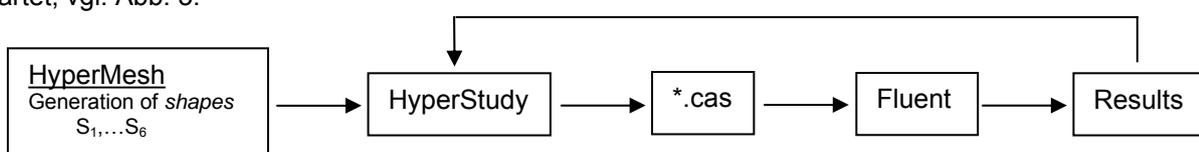


Abb. 3: Ablaufdiagramm für die Optimierung mit HyperWorks und Fluent

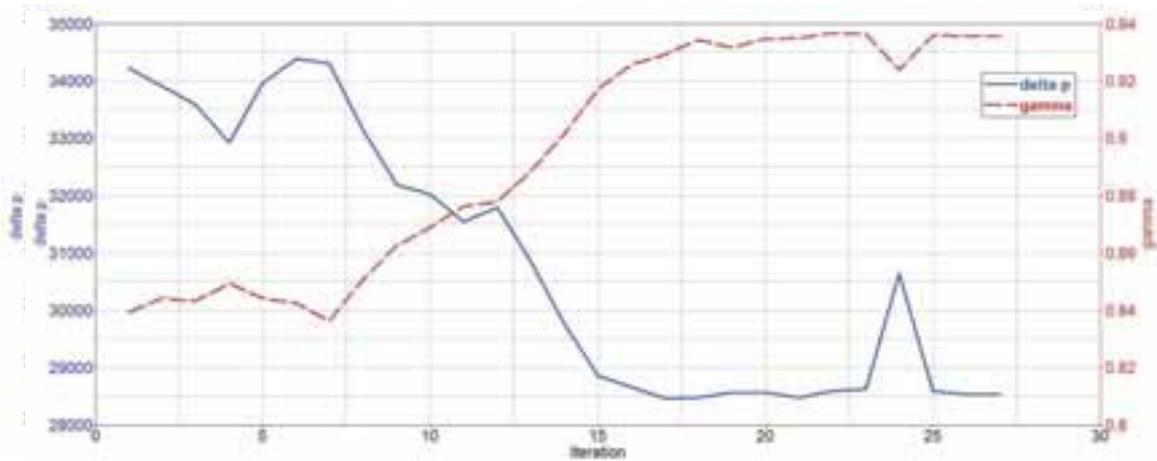


Abb. 4: Verlauf von gamma und delta_p [Pa] für Optimierung (1)

Das Optimierungsproblem ist definiert durch eine Zielfunktion, eine Nebenbedingung und einen Designraum. Damit lässt es sich folgendermaßen formulieren: „Suche ein optimales Design aus dem Designraum, für das die Zielfunktion minimiert/maximiert wird und welches die Nebenbedingung erfüllt.“

Mit Hilfe des Sequential Response Surface Verfahrens bestimmt HyperStudy in Kombination mit Fluent ein optimales Design. Ziel dieser Optimierung ist die Maximierung des Gleichverteilungsindexes γ in der Schnittebene A, unter Berücksichtigung der Druckdifferenz zwischen dem Einström- und dem Ausströmrand, vgl. Abb. 1. Dazu werden zwei verschiedene Zielfunktionen definiert und in unabhängigen Optimierungsstudien untersucht. Die erste Zielfunktion enthält nur den Gleichverteilungsindex, während die Druckdifferenz in einer Nebenbedingung berücksichtigt wird. Eine Kombination aus Gleichverteilungsindex und Druckdifferenz wird für die zweite Zielfunktion verwendet.

Ergebnisse und Diskussion

In der ersten Optimierungsstudie wird der Gleichverteilungsindex γ maximiert, wobei die Druckdifferenz zwischen Einström- und Ausströmrand unterhalb eines Grenzwertes liegen muss:

$$\gamma \longrightarrow \max, \quad \Delta p < \Delta p_{\text{init}} \quad (1)$$

In Abb. 4 ist der Verlauf von γ und Δp während der Optimierung dargestellt. Im ersten Iterationsschritt wird das Ausgangsdesign benutzt, d.h. alle *Shape* Faktoren werden mit dem Faktor Null aufgebracht. In den Iterationsschritten zwei bis sieben wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Jede *Shape* wird einzeln aufgebracht, um die Auswirkung auf die Systemantwort und die Nebenbedingung zu untersuchen.

Die eigentliche Optimierung startet mit dem achten Iterationsschritt. Der Gleichverteilungsindex γ wächst monoton an und ändert sich ab dem 18. Iterationsschritt nur noch unwesentlich, mit der Ausnahme von Iterationsschritt 24, dessen Design eine Verschlechterung in γ bewirkt.

Die Druckdifferenz Δp verhält sich im Verlauf der Optimierung analog und fällt monoton ab. Ab dem 18. Iterationsschritt ist ebenfalls ein konvergierter Wert erreicht, mit der Ausnahme von Iteration 24.

Abb. 5 zeigt einen Vergleich des initialen und des optimierten Designs. Die *Shapes* S2 und S3 werden mit dem Faktor eins aufgebracht, was zu einer maximalen Aufweitung des Einlasses

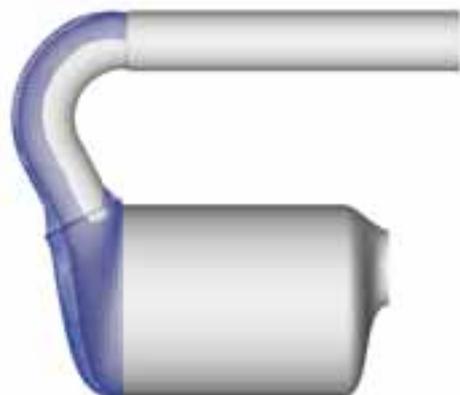


Abb. 5: Vergleich des initialen (grau) und des optimierten (blau, wire frame) Designs, Optimierung mit (1)

führt. Durch die *Shape* S1 wird das gebogene Teilstück verändert und S4 und S5 modifizieren den Einlass vor dem Katalysator. In der Sensitivitätsanalyse hat sich gezeigt, dass die *Shape* S6 einen negativen Einfluss auf γ und Δp hat. Daher wird S6 im Optimierungsalgorithmus nicht berücksichtigt. Die Optimierung mit Zielfunktion und Nebenbedingung aus Gleichung (1) liefert ein Design, dessen Gleichverteilungsindex γ um 12%, von 0.83 auf 0.94, erhöht wurde und dessen Druckdifferenz Δp um 16%, von 34,215 Pa auf 28,539 Pa, reduziert wurde.

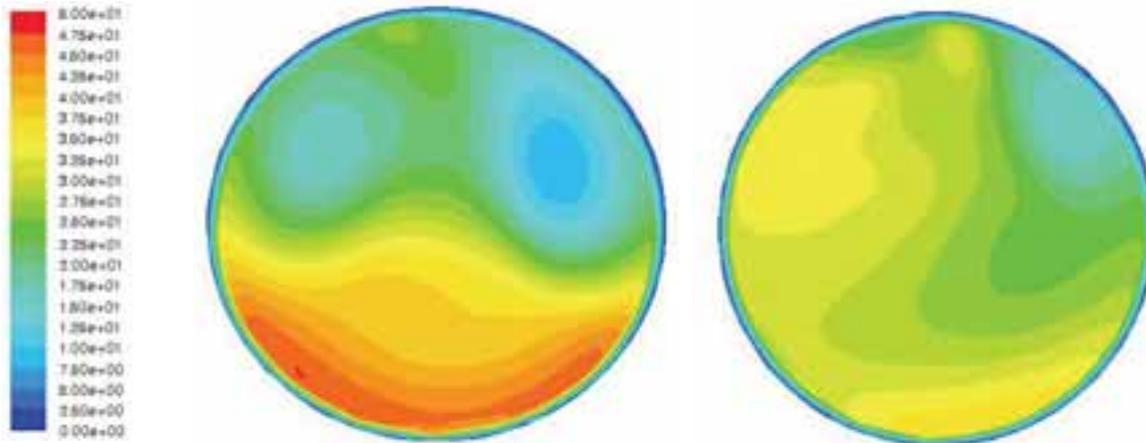


Abb. 6: Betrag der axialen Geschwindigkeit [m/s] in der Schnittebene **A** für das Ausgangsdesign (links) und das optimierte Design (rechts), Optimierung mit (1)

Der Betrag der axialen Geschwindigkeit in der Schnittebene **A** für das Ausgangsdesign und das optimierte Design ist in Abb. 6 dargestellt. Im Original-Design (links) ist die Strömungsgeschwindigkeit in der unteren Hälfte relativ groß. In der oberen Hälfte treten zwei kreisförmige Gebiete auf, in denen eine relativ kleine Strömungsgeschwindigkeit vorliegt. Das optimierte Design (rechts) besitzt ein wesentlich kleineres Gebiet mit hoher Geschwindigkeit am unteren Rand, und auch die kreisförmigen Regionen in der oberen Hälfte sind nicht mehr so stark ausgeprägt. Die Strömungsgeschwindigkeit ist im optimierten Design gleichförmiger als im Ausgangsdesign.

In der zweiten Optimierungsstudie wird eine andere Formulierung der Zielfunktion gewählt. Der Designraum, sprich die *Shapes*, bleibt jedoch unverändert. Als Zielfunktion wird eine Linearkombination aus der Druckdifferenz und dem Kehrwert des Gleichverteilungsindex gewählt. Beide Summanden werden mit den Initialwerten p_{init} und γ_{init} normalisiert:

$$\beta = \frac{\Delta p}{\Delta p_{init}} + \frac{1}{\gamma} \gamma_{init} \rightarrow \min \quad (2)$$

Die Funktion β ist minimal, wenn die Druckdifferenz Δp minimal und der Gleichverteilungsindex γ maximal ist. Eine Optimierung mit der Zielfunktion aus (2) wird ein anderes Ergebnis liefern als die erste Optimierung, da die Druckdifferenz nun explizit in der Zielfunktion auftritt und nicht in einer Nebenbedingung berücksichtigt wird.

Der Verlauf der Systemantworten γ , Δp und der kombinierten Zielfunktion β ist in Abb. 7 dargestellt. Die ersten sieben Iterationsschritte liefern die gleichen Ergebnisse wie die Optimierung mit Zielfunktion (1), da die Sensitivitätsanalyse mit den gleichen *Shapes* durchgeführt wird. Ab der achten Iteration fällt die Funktion β monoton ab. Damit verkleinert sich die Druckdifferenz und der Gleichverteilungsindex wächst an. Mit der Zielfunktion aus (2) konvergiert der Optimierungsalgorithmus in 19 Schritten.

Das optimierte Design ist in Abb. 8 dargestellt. Im Vergleich zum Ergebnis der ersten Optimierungsstudie, vgl. Abb. 5, sind der Bogen und der Einlass weniger stark modifiziert. Die Gewichtungsfaktoren w_1, \dots, w_6 der beiden optimierten Designs sind Tab. 1 aufgelistet.

Die Optimierung mit der kombinierten Zielfunktion β ergibt ein Design, dessen Gleichverteilungsindex um 11.7%, von 0.83 auf 0.927, angestiegen ist und eine um 17% reduzierte Druckdifferenz, von 34,215Pa auf 28,382Pa, aufweist.

Der Betrag der axialen Strömungsgeschwindigkeit in der Schnittebene **A** für das Ausgangsdesign und das mit der kombinierten Zielfunktion (2) optimierte Design ist in Abb. 9 dargestellt. Im Vergleich zum initialen Design weist das optimierte Design eine gleichförmigere Geschwindigkeitsverteilung auf.

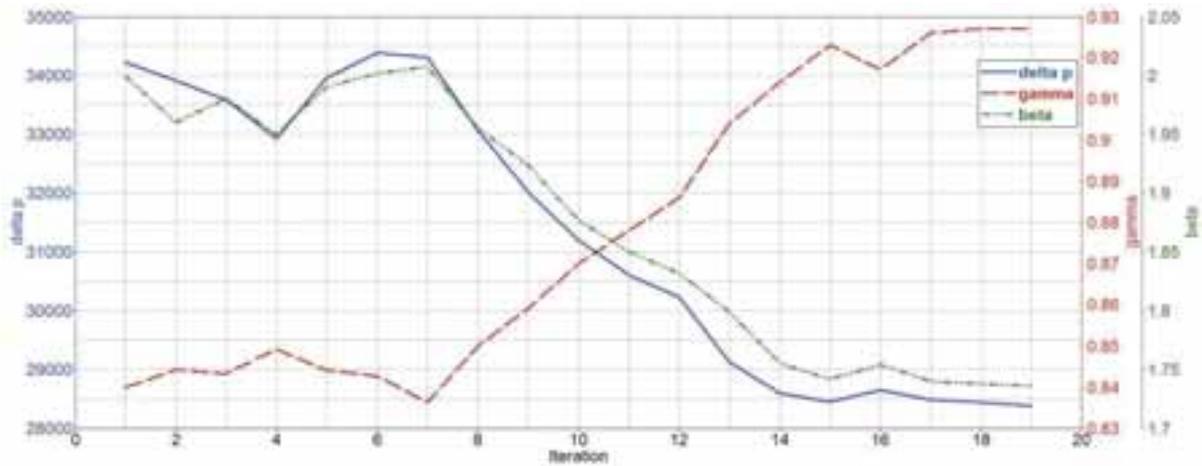
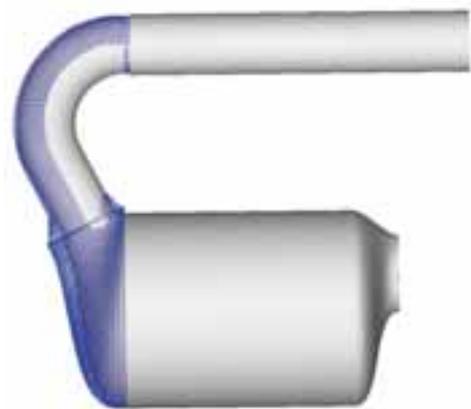


Abb. 7: Verlauf von γ , Δp und der kombinierten Zielfunktion β für Optimierung (2)

| Shape | Optimierung (1) | Optimierung (2) |
|-------|-----------------|-----------------|
| S1 | 0.88 | 0.46 |
| S2 | 1.0 | 0.61 |
| S3 | 1.0 | 1.0 |
| S4 | 0.56 | 0.75 |
| S5 | 0.81 | 0.08 |
| S6 | 0 | 0 |



Tab. 1: Gewichtungsfaktoren der optimierten Designs

Abb. 8: Vergleich des initialen (grau) und des optimierten (blau, wire frame) Designs, Optimierung mit (2)

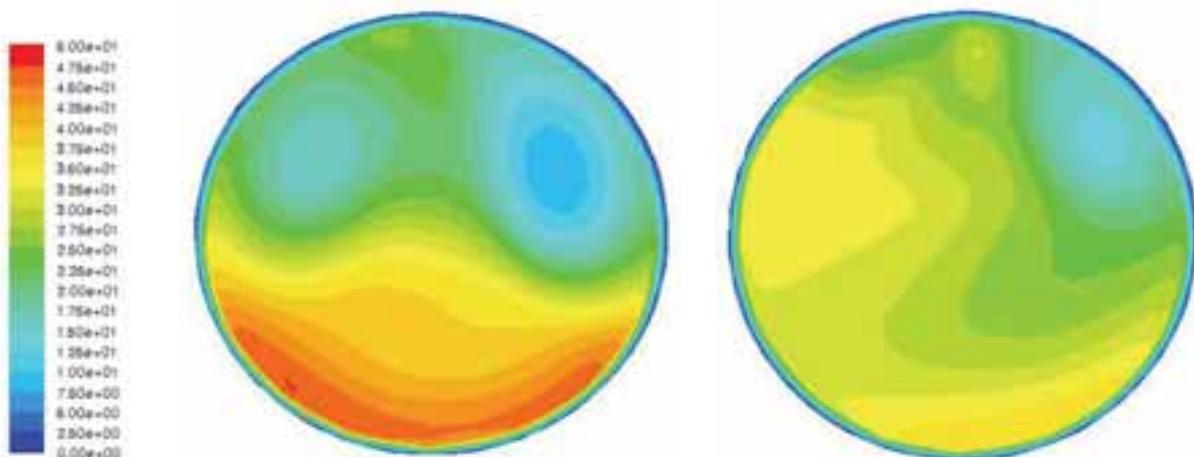


Abb. 9: Betrag der axialen Geschwindigkeit [m/s] in der Schnittebene **A** für das Ausgangsdesign (links) und das optimierte Design (rechts), Optimierung mit (2)

Zusammenfassung

In dieser Studie wird die automatische Formoptimierung einer Abgasanlage vorgestellt. Das Ziel ist, den Gleichverteilungsindex in einer Schnittebene des Katalysators zu maximieren, um dadurch die Effizienz des Monolithen zu steigern. Gleichzeitig soll die Druckdifferenz zwischen Einström- und Ausströmrand der Abgasanlage minimiert werden.

Mit Hilfe der Morphing Technologie in HyperMesh werden Formvariationen generiert, die für die Optimierung mit HyperStudy als Designvariablen benutzt werden. Beide Tools sind Bestandteil der Altair HyperWorks Suite. Während der Optimierung wird für jedes untersuchte Design automatisch eine CFD Simulation mit Fluent durchgeführt.

Der Designraum wird durch sechs Formvariationen, *Shapes*, aufgespannt, die linear miteinander kombiniert werden. Es werden zwei unabhängige Optimierungen mit zwei verschiedenen Zielfunktion durchgeführt. Das Ergebnis ist ein Design, dessen Gleichverteilungsindex um ca. 12% höher und die Druckdifferenz um ca 17% geringer als im Ausgangsdesign ist.

Literatur

- [1] Altair Engineering Inc., *Altair HyperWorks user's manual (online help)*, 2006
- [2] Ratzel M., Hägele T., Plüschke S., Reichenbach J., *Strömungsoptimierung mit Altair HyperWorks*, Proceedings von NAFEMS Simulation komplexer Strömungsvorgänge, 2005.
- [3] Fluent 6.2 User's Guide, Fluent Incorporated, Lebanon, NH 03766, 2005
- [4] Stefan Menzel, Markus Olhofer and Bernhard Sendhoff, Application of Free Form Deformation Techniques in Evolutionary Design Optimization, 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, 30 May - 03 June 2005, Brazil

Mehrköpersimulation eines oszillierenden aeroelastischen Tragflügelmodells

Jürgen Arnold¹, Gunnar Einarsson², Wolf Krüger¹

¹ DLR Institut für Aeroelastik, 37073 Göttingen

² DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, 38108 Braunschweig

Die Herausforderung liegt in der zeitgenauen Simulation der aeroelastischen Kopplung für ein flexibles Tragflügelmodell in erzwungenen Schwingungen großer Amplitude, die durch Starrkörperbewegungen vorgegeben werden. Durch die aufgebrachten Starrkörperanteile werden flugmechanische Freiheitsgrade in die aeroelastische Simulation eingeführt. Simulationen für das Windkanalmodell des Tragflügels umfassen die Ermittlung vom statisch aeroelastischen Gleichgewichtszustand und erzwungene Schwingungen für die translatorische Schlagbewegung (Heave) und die rotatorische Anstellwinkeldrehung (Pitch). Für den Gleichgewichtszustand erfolgt der Vergleich mit Windkanalmessungen.

Einleitung

Die aeroelastische Simulation hat für die reine Fluid-Struktur-Interaktion zwischenzeitlich einen befriedigenden Reifegrad, sowohl für stationäre wie auch für instationäre Probleme, erreicht. Eine wesentliche Erweiterung stellt die zusätzliche Beachtung von großen Bewegungsanteilen aus einem Flugmanöver dar. Hierzu ist das DLR-Projekt SikMa (Simulation komplexer Manöver) eingerichtet worden, das sich inhaltlich mit der Entwicklung einer Simulationsplattform in einer verteilten Rechenumgebung zur zeitgenauen Simulation eines elastischen Kampfflugzeuges^{1,2} mit beweglichen Steuerflächen im Flugzustand von hohen Anstellwinkeln auseinandersetzt. Für die Ergebnisse aus Simulation erfolgt der Vergleich mit experimentellen Daten aus Windkanalversuchen.

Spezifische Anforderungen an die Simulation umfassen die richtige mechanische Modellierung des elastischen und starren Körpers, die genaue Beschreibung der komplexen Umströmung für Flugzeugkonfigurationen mit Deltaflügel unter Berücksichtigung von Ablösung und Wirbelplatzen, wie auch die zeit- und energiegenaue Beschreibung der aeroelastischen Kopplung. Somit ist die hier vorgestellte Konfiguration für einen Verkehrsflugzeugflügel nicht typisch für SikMa, wird aber zur Validierung der entwickelten Simulationsumgebungen für sub- und transonische Geschwindigkeiten herangezogen. Das Flügelmodell geht auf das 'Aeroelastic Model Programme (AMP)³ von Airbus, EADS, DLR und ONERA zurück, das im Jahr 1990 abgeschlossen worden ist. Der Versuchsaufbau ist in Bild 1 gezeigt und umfasst den Modellflügel, ein generisches Rumpfmittel und die angetriebene Modellhalterung zur Anregung der Anstellwinkelschwingung.



Bild 1: AMP-Modellflügel im transonischen ONERA S2MA Windkanal

Die Beachtung großer Amplituden führt auf ein dynamisch aeroelastisches Problem mit kombinierter Flugmechanik. Diese Fluid-Struktur-Flugmechanik Kopplung muss die linear elastischen und die nichtlinearen Anteile der Starrkörperbewegung berücksichtigen. Durch Verwendung eines elastischen Mehrkörpersystems (EMKS) werden beide Anteile von einem einzigen Programm erfasst. Ergebnisse liegen für gekoppelte Simulationen vom elastischen Windkanalmodell mit CFD im reibungsfreien Eulerverfahren für Schlag- und Drehschwingungen bei Machzahl 0.6 vor.

Nomenklatur

| | | |
|----------------|----------------------------|-------|
| α | Anstellwinkel | [°] |
| $\Delta\alpha$ | Amplitude Anstellwinkel | [°] |
| C_p | Druckbeiwert | [-] |
| C_l | Auftriebsbeiwert | [-] |
| $D(t)$ | Verschiebungsvektor | [m] |
| $F(t)$ | Aerodynamischer Lastvektor | [N] |
| F_z | Kraft z-Richtung | [N] |
| Ma | Machzahl | [-] |
| f | Frequenz | [Hz] |
| p_0 | Staudruck | [bar] |
| t | Zeit | [s] |
| dz | Verschiebung in z-Richtung | [m] |
| Δz | Amplitude Schlagbewegung | [m] |

Software und Modelle zur Simulation

Aerodynamik

Die Umströmung des untersuchten Körpers wird mit dem Tau-Code ^{4, 5, 6} berechnet, einem am DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik entwickelten CFD Tool. Der Tau-Code löst die kompressiblen, dreidimensionalen, zeitgenauen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen anhand einer Finite Volumen Formulierung. Der Ansatz basiert auf der Verwendung von unstrukturierten Netzen und nutzt somit den Vorteil der hybriden Netze in der Auflösung von reibungsbehafteten Scherschichten in Wandnähe und der Flexibilität in der Netzerstellung mit unstrukturierten Netzen. Die Nutzung von dualen Netzen macht den Strömungslöser von den im primären Gitter verwendeten Zelltypen unabhängig.

Der Tau-Code besteht unter anderem aus folgenden Modulen:

- Preprocessor-Modul zur Erzeugung der dualen Netze aus dem primären Gitter,
- Strömungslöser-Modul zur Strömungsberechnung auf den dualen Netzen und zur Aufbringung von geführten Starrkörperbewegungen (falls definiert),
- Deformations-Modul zur Übertragung der Verschiebung an der Netzoberfläche auf die Netzumgebung,
- Postprocessing-Modul zur Umwandlung der Tau Ergebnisse in Dateiformate zur Visualisierung.

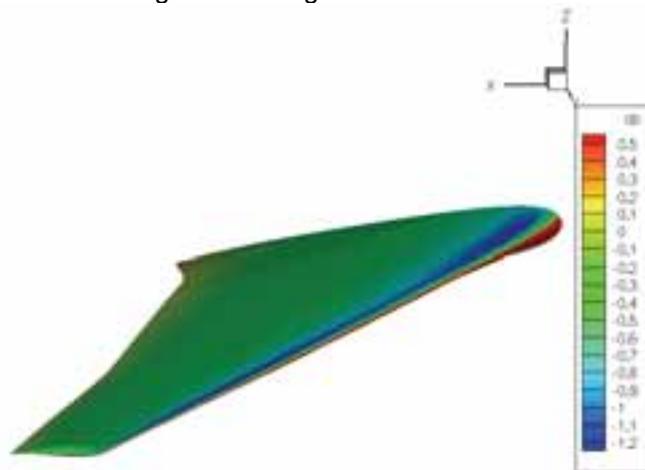


Bild 2: CFD Euler Modell vom AMP-Flügel

Im Strömungslöser-Modul sind mehrere Upwind-Schemata und ein zentrales Schema mit künstlicher Dissipation für die räumliche Diskretisierung vorhanden. Der Strömungslöser kann in drei Modi gestartet werden: Euler, Navier-Stokes mit 1-Gleichungs-Turbulenzmodell und 2-Gleichungs-Turbulenzmodell. Alle Ergebnisse in dieser Arbeit basieren auf dem reibungsfreien Eulermodus. Für stationäre Rechnungen wird ein explizites mehrstufiges Runge-Kutta Zeitschrittverfahren verwendet. Zeitgenaue instationäre Rechnungen werden mit einem impliziten Zeitschrittverfahren dualer Zeit durchgeführt. Der Tau-Code ist durch Netzzerlegung parallelisiert und die Verwendung eines Multigrid Ansatzes erhöht die Performance.

Einige Tau Module besitzen eine Python-Schnittstelle und sind somit als Bibliotheksfunktionen über ein Python-Skript zugänglich. Die vorliegende Implementierung der Schnittstelle zur Flugmechanik-Kopplung im Tau-Code benötigt die Verwendung vom Strömungslöser mit einem Python-Skript, das die entsprechenden Aufrufe zur Schnittstelle beinhaltet. Die Flugmechanik-Daten können dem Python-Skript entweder mit einer Socket-Verbindung oder, wie im Falle dieser Arbeit, anhand einer kleinen Textdatei übermittelt werden. Die Textdatei beinhaltet die translatorischen Werte für Position und Geschwindigkeit vom Flugzeugursprung sowie Angaben zum Gier-, Anstell- und Rollwinkel mit den entsprechenden Drehgeschwindigkeiten zur Beschreibung der Fluglage. Die Daten, die dem Python-Skript durch den Socket oder die Textdatei übermittelt werden, werden in einer allgemeinen Schnittstelle zum Tau Motion Modul weitergeleitet. Dort werden die erforderlichen Transformationsmatrizen für den Strömungslöser abgeleitet.

Mehrkörperdynamik

Das Mehrkörpersystem SIMPACK ^{7, 8} wird zur Simulation des mechanischen Modells unter Einbeziehung der großen Starrkörperbewegung und kleinen elastischen Deformationen der Struktur verwendet. Die Entwicklung dieses Simulationspakets wurde im DLR begonnen und später an INTEC abgegeben. Das MKS stellt die gesamten nichtlinearen Kopplungsterme 2. Ordnung aus der Massenträgheit bereit und erlaubt den Aufbau elastischer Simulationsmodelle mit einem Modalansatz für lineare Finite Element Modelle. Über diesen klassischen Umfang der MKS-Funktionalität hinaus, liegt eine Vielzahl von Schnittstellen zu Standardsoftware aus dem Bereich von Computer Aided Engineering (CAE) und Control Engineering (CACE) vor und erlaubt die Behandlung mechatronischer Fragestellungen. Im Automobil- und Schienenfahrzeugentwurf gilt SIMPACK als Standardwerkzeug.

Funktionalitäten im Zusammenhang mit Flugmechanik erlauben die Modellierung der untersuchten Manöver im Windkanal. Hierbei sind folgende Module und Schnittstellen von besonderem Interesse:

- Finite Element Analyse (FEA) Schnittstelle, hier NASTRAN
- Co-Simulation Schnittstelle zum Datenaustausch mit beliebiger Software, hier CFD Tau
- Interaktive, grafische Oberfläche zum Modellaufbau und Animation von Kinematik und Ergebnissen

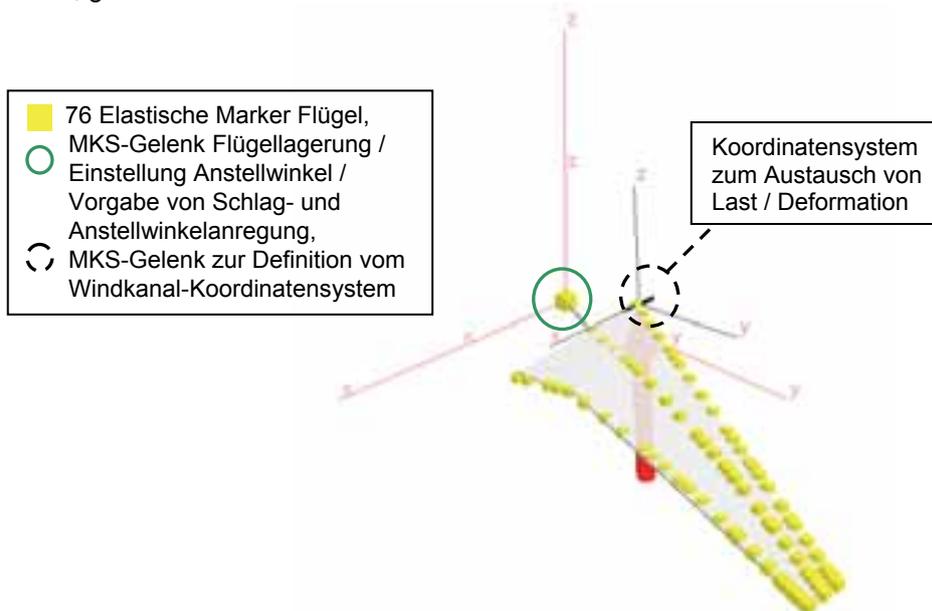


Bild 3: Elastisches MKS Simulationsmodell für den AMP-Flügel

Eine umfangreichere Darstellung der Funktionalitäten von SIMPACK in luftfahrttechnischen Anwendungen findet man in Quelle ⁹. Zur Bereitstellung der aerodynamischen Luftkräfte ¹⁰ sind drei Ansätze mit unterschiedlichen Anforderungen an die Genauigkeit realisiert. Sie umfassen zwei eng gekoppelte Vorgehensweisen mit ae-

rodynamischen Krafterelementen und modaler Aerodynamik sowie den Ansatz loser Kopplung mit Co-Simulation, der Gegenstand dieser Abhandlung ist.

Netzinterpolation

Die räumliche Kopplung vom Struktur- und Strömungsnetz wie auch der Datentransfer zwischen den gekoppelten Programmen erfolgt mit der MpCCI-Kopplungsbibliothek^{11, 12}, die von Fraunhofer SCAI entwickelt wird. MpCCI erlaubt die netzbasierte Kopplung von parallelen Programmen, setzt auf der Bibliothek MPICH^{13, 14} zur Kommunikation zwischen den verkoppelten Programmen auf und bietet mehrere Möglichkeiten von Kopplungs- und Interpolationsalgorithmen an, die entweder auf Knoten- oder Elementebene arbeiten. Die vorliegende Anwendung greift auf die konservative Interpolation zur Übertragung der aerodynamischen Kräfte und die nicht-konservative Interpolation für die elastische Netzdeformation zurück. Beide Algorithmen basieren auf einer Elementbeschreibung der Oberflächen.

Die Verkopplung von Programmen mit MpCCI erfordert folgende Vorbereitungen:

- Integration von MpCCI-Aufrufen in die Partnerprogramme
- Beschreibung der zu koppelnden Oberflächen bezüglich Knoten- und Elementgeometrie für MpCCI
- Gemeinsame MpCCI Parameterdatei für die Kopplung

Verwendete Modelle

Die ungefähre Spannweite vom AMP-Flügel liegt bei 1.05 m ohne Rumpf. Der Pfeilwinkel beträgt 30° und der Flügel wiegt etwa 25 kg. Das vom Tau-Code verwendete Euler CFD-Modell ist, wie in Bild 2 gezeigt, auf den Flügel begrenzt und vernachlässigt den Rumpfteil. Bei dem Modell handelt es sich um ein kleines strukturier-tes Hexaeder-Netz, das für subsonische Machzahlen kurze Rechenzeiten bei guter Genauigkeit liefert. Somit ist das Netz ideal für Test und Entwicklung der Simulationsumgebung.

Das vorhandene Finite Element Modell umfasst den Flügel inklusive Lagerung. Für jeden elastischen Knoten der modalen Lösung aus NASTRAN SOL 103 wird in der SIMPACK FEA-Schnittstelle ein elastischer MKS-Marker erzeugt. Diese sind in Bild 3 nach Einbindung der elastischen Struktur in das MKS zu sehen. Jeder elastische Marker des Flügelkörpers ist mit einem Krafterelement und einem Sensorelement versehen, die als xyz-Komponenten im aerodynamischen Lastvektor $F(t)$ und dem Verschiebungsvektor $D(t+dt)$ für die MpCCI-Kommunikation organisiert sind. Die Komponenten liegen sowohl im aerodynamischen wie auch im mechanischen Flügelmodell in körperfesten Koordinaten vor und können in jedem Zeitschritt ohne Koordinatentransformation ausgetauscht werden. Wesentliche Information zu den Modellen ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

| | Teilstruktur | Gesamtmodell | Kopplungsfläche |
|------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| CFD | Flügelmodell | ≈150.000 Knoten, ≈141.000 Hexaeder | ≈17.400 Oberflächen-Rechtecke |
| MKS | Flügelmodell, Modellhalterung | 76 elastische Marker Flügel, 20 elastische Eigenformen | 3 Dreiecke und 46 Rechtecke vom elastischen Flügel |

Tabelle 1: Charakteristische Modelldaten

Simulationsumgebung

Kopplung von Tau-MpCCI-Simpack

Das Mehrkörpersystem kombiniert das strukturelle und das flugmechanische Modell in einem einzigen Programm, wobei jedes dieser Probleme aus einer kleinen Anzahl von Freiheitsgraden (FHG) besteht und somit nur kurze Rechenzeiten erfordert. Im Gegensatz hierzu steht die zeitintensive und teure CFD-Rechnung, die in der Regel in einer auf große aerodynamische Modelle angepassten Umgebung durchgeführt wird.

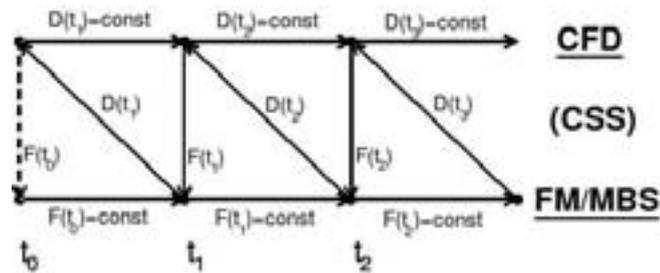


Bild 4: Zeitkopplungsschema CSS

Beide Programme tauschen ihre Ergebnisse in jedem physikalischen Zeitschritt mit Co-Simulation über einen TCP/IP-Socket aus, nachdem MpCCI die aerodynamischen Kräfte und die strukturellen Verschiebungen auf das entsprechende Partnernetz interpoliert hat. Das zugrunde liegende Zeitkopplungsschema des 'Conventional Serial Staggered CSS' ¹⁵ ist in Bild 4 erklärt, das entwickelte Schema der Kommunikation ist in Bild 5 für die eingebundene Software dargestellt. Die Kommunikation ist für stationäre und instationäre aerodynamische Lasten gleich.

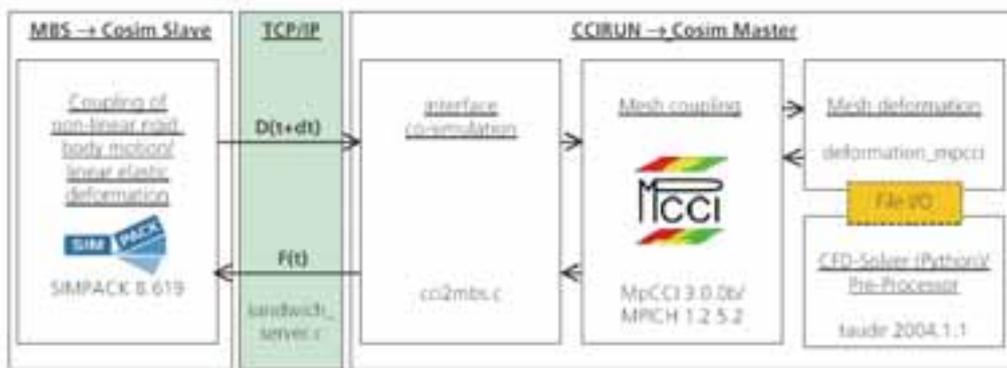


Bild 5: Kommunikationsschema für die Co-Simulation

Simulationsergebnisse und Vergleich

Übersicht der Simulationsfälle

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der vorhandenen gekoppelten Simulationen unter Einbeziehung von Aerodynamik, Strukturmechanik und Flugmechanik für das AMP-Flügelmodell:

| | Simulationsparameter (Ma = 0.6, p ₀ = 0.9 bar) | Mechanisches Modell für die Flügelagerung | MKS-Gelenkdefinition für Bewegungsvorgabe |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Gleichgewicht | α = 2.03°, stationäre / instationäre Aerodynamik | fest eingespannt | fest (0 FHG Gelenk) |
| Schlagbewegung [16] | α = 2.03°, f = 12.2661 Hz, Δz = ±0.046234 m | sinusförmige Anregung in globaler z-Richtung | Translation entlang z-Achse (Rheonomes Gelenk) |
| Anstellwinkeldrehung | α = 2.03°, f = 12.2661 Hz, Δα = ±0.5° | sinusförmige Anregung um die lokale Flügelachse 30° | Rotation um PQR-Achsen (Rheonomes Gelenk) |

Tabelle 2: Vorhandene Simulationen und mechanische Modelle

Die ungefähre Rechenzeit (wall-clock time) für 500 Schritte in Co-Simulation mit CFD im Eulermodus beträgt auf einem standardmäßigen Linux PC mit einem Prozessor (Pentium 4 mit 3GHz, 2 GB RAM) für die Berechnung der Gleichgewichtslage mit instationärer Aerodynamik oder eine der Oszillationen etwa 15 Stunden. Im

Wesentlichen wird die Rechenzeit vom gewählten Residuum für das duale Zeitschrittverfahren auf CFD-Seite bestimmt, das mechanische System hat einen vergleichsweise geringen Rechenbedarf.

Aeroelastisches Gleichgewicht

Die Gleichgewichtslage für den deformierten AMP-Flügel wird anhand von zwei unterschiedlichen Ansätzen berechnet, die beide vom undeforzierten Flügel starten. Hierbei handelt es sich um Simulationen zur Berechnung des statisch aeroelastischen Gleichgewichts mit stationärer Aerodynamik innerhalb von 5 Kopplungsschritten sowie die transiente Simulation für die physikalische Zeit t von 1.0 s mit zeitgenauer instationärer Aerodynamik und 500 Schritten mit Co-Simulation. Die verwendeten Euler CFD und wesentliche mechanische Parameter sind in Tabelle 2 angegeben.

Die resultierenden Verschiebungen an der Flügelspitze in z -Richtung und die Kraft in z -Richtung an der Einspannung sind für die beiden gerechneten Ansätze mit stationären und instationären aerodynamischen Kräften gleich. Es liegen Werte von 0.0353 m und 1853 N in den Windkanal-kordinaten von Bild 3 vor. Bild 6 zeigt die Geschichte der Flügelspitzenverschiebung für die statisch aeroelastische Simulation und das transiente Einschwingen. Die Flügelverformung wird auch für den statischen Ansatz mit einer MKS Zeitbereichslösung bestimmt, aber die aerodynamischen Lasten werden in jedem Iterationsschritt konstant gehalten [16]. Wie Bild 6 zu entnehmen ist, entspricht ein statischer Iterationsschritt 200 'inneren Zeitschritten', in denen die elastische Struktur jeweils für die nächste Iteration eingeschwingen wird.

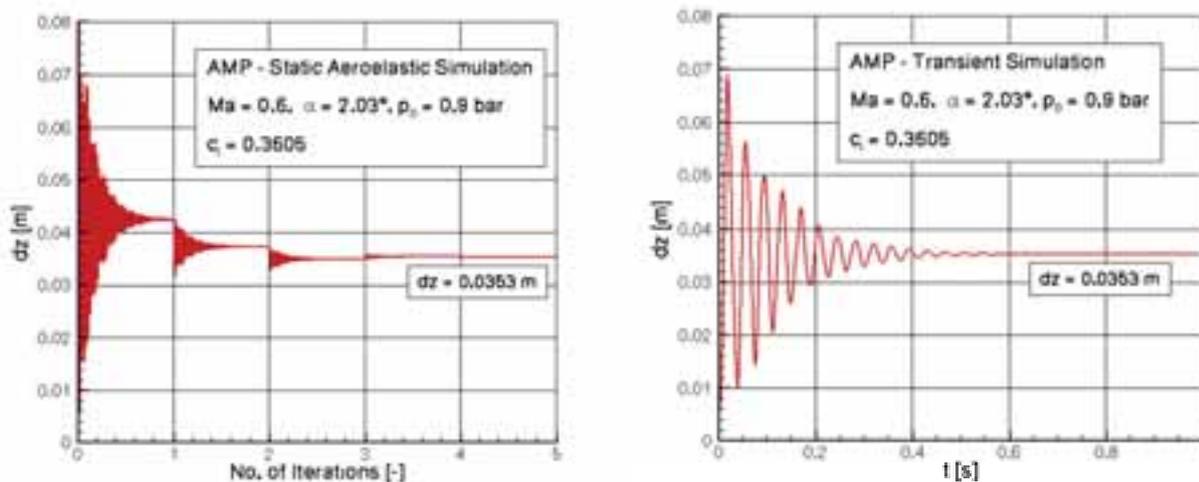


Bild 6: Verschiebung in z -Richtung an der Flügelspitze

Die Verteilungen vom Druckbeiwert C_p für den verformten Flügel sind für statisches und dynamisches Vorgehen identisch und werden für mehrere spannenweitige Positionen y/s in Bild 7 dargestellt. Hier entspricht die Flügelwurzel einem Wert y/s von Null und die Flügelspitze einem Wert von Eins. Alle Darstellungen sind auf die normalisierte Flügeltiefe x/l mit Wert Null an der Flügelvorderkante und Eins an der Hinterkante bezogen. Ein Vergleich der gemessenen Verteilungen zeigt gute Übereinstimmung für die Querschnitte auf der Flügeloberseite (Dreiecke) und sich verbessernde Übereinstimmung in Richtung Flügelspitze auf der Unterseite (Quadrate). Der Rumpfeinfluß ist bisher nicht berücksichtigt worden, kann aber die Druckverteilungen vor allem für kleine Werte y/s beeinflussen.

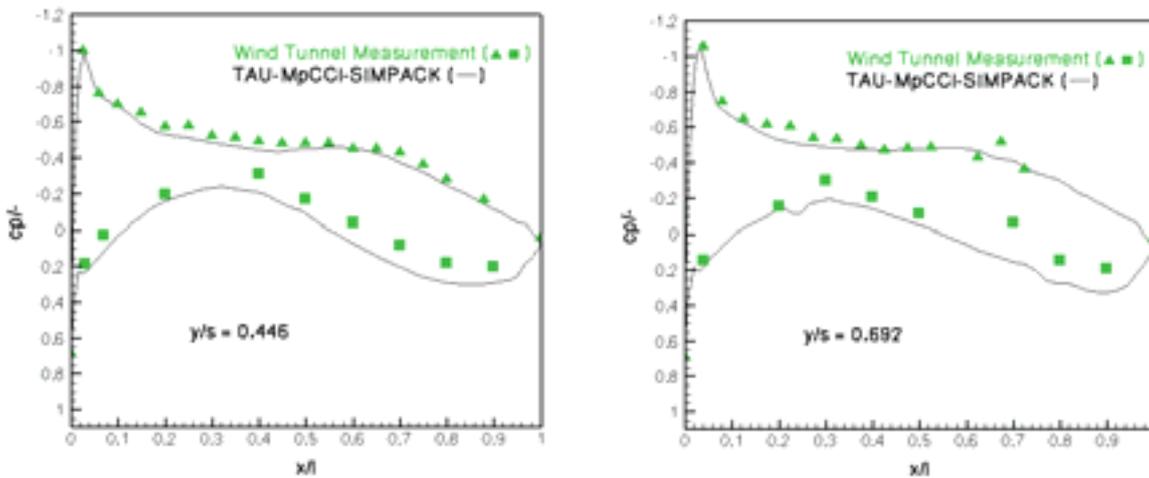


Bild 7: Druckverteilungen im aeroelastischen Gleichgewicht ($Ma = 0.6$, $\alpha = 2.03^\circ$, $p_0 = 0.9 \text{ bar}$)

Anstellwinkeldrehung

Die Antwort des elastischen AMP-Flügels auf eine an der Modellaufhängung angeregte Anstellwinkeldrehung mit Frequenz 12.2661 Hz wird mit zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen untersucht, die im aeroelastischen Gleichgewicht starten. Die transienten Simulationen werden für die physikalische Zeit t von 1.0 s mit instationärer Aerodynamik durchgeführt und umfassen 500 Schritte in Co-Simulation. Die CFD Euler und wesentliche mechanische Parameter sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Ein Ansatz behandelt den Starrkörperanteil der Anstellwinkeldrehung und die elastische Flügeldeformation aus den aerodynamischen Lasten durch Deformation des CFD-Netzes mit dem Tau Deformations-Modul. Der zweite Ansatz verwendet das Tau Deformations-Modul ausschließlich zur Verformung des elastischen Flügels und zusätzlich das Tau Motion-Modul für die Starrkörperbewegung vom CFD-Ursprung. Diese Bewegung wird mit zwölf Flugmechanik (FM) Parametern definiert und umfasst drei Winkel mit den zugehörigen Winkelraten in körperfesten Koordinaten und drei Translationen mit entsprechenden Geschwindigkeiten in geodätischen Koordinaten. Die FM-Parameter werden in Tau über eine Python-Schale mit MKS-Sensordaten aktualisiert und im Deformationsvektor $D(t+dt)$ aus Bild 5 übermittelt. Auf Tau-Seite sind somit beim Übergang von der Dreh- auf eine andere Anregung keine Änderungen erforderlich. Im Fall der Anstellwinkeldrehung sind wegen der gepfeilten Drehachse und der Lage des CFD-Ursprungs an der Flügelvorderkante acht FM-Parameter aktiviert, nämlich alle Lagen und der Pitch-Winkel mit den zugehörigen Geschwindigkeiten.

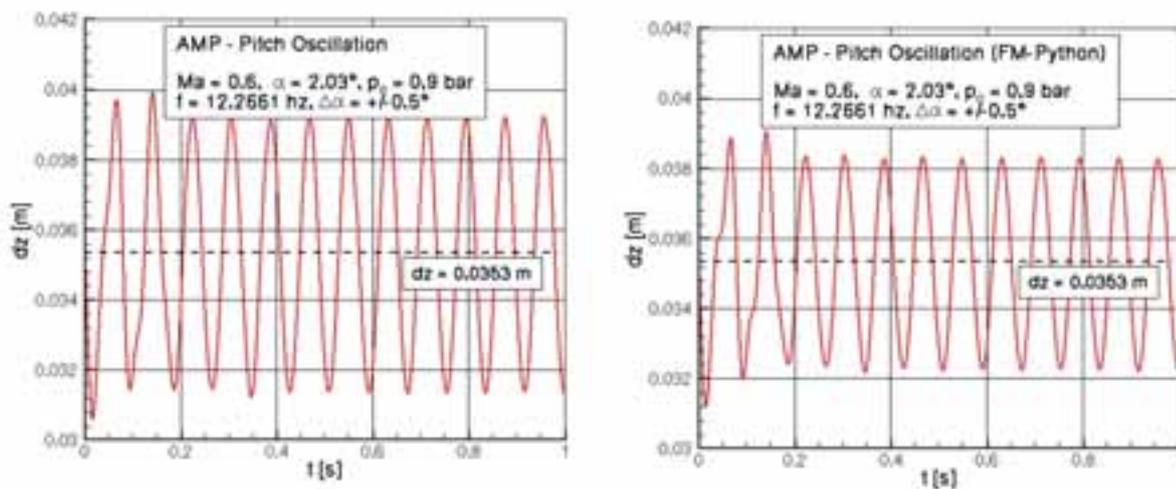


Bild 8: Vergleich der Deformation an der Flügelspitze für die Anstellwinkeldrehung

Die Zeitverläufe der oszillierenden Verschiebung in z-Richtung an der Flügelspitze und die z-Komponente der Kraft an der Modellhalterung zeigen, im Gegensatz zur rein translatorischen Schlagbewegung [16], für die beiden Ansätze stark voneinander abweichende Ergebnisse. Diese sind in Bild 8 und Bild 9 zusammen mit den Vorgaben für Verschiebung und Kraft aus dem aeroelastischen Gleichgewicht im Windkanal Koordinatensystem aus Bild 3 gezeigt. Der Ansatz, der die Starrkörperbewegung zusammen mit der elastischen Flügeldeformation durch Netzdeformation abbildet, zeigt im Widerspruch zur kombinierten Verwendung von Netzdeformation und dem Tau Motion-Modul, für kleinere aerodynamische Kräfte eine größere Auslenkung der Tragflügelspitze. Ursache hierfür ist die unzureichende Abbildung des Starrkörperanteils der Drehung um die mit 30° gefeilte Flügelachse mit der Netzdeformation. Das grobe Netz kann der Deformation zwar noch folgen, aber die Zellen an der Flügeloberfläche degenerieren und die Qualität des CFD-Netzes wird stark herabgesetzt. Eine Verfeinerung des Netzes könnte die Problematik noch erhöhen und nach der Deformation auf ein ungünstiges Netz führen. Dahingegen bleibt bei der kombinierten Anwendung vom Tau Deformations- und Motion-Modul eine gute Netzqualität an der Flügeloberfläche erhalten, da das deformierte Netz nur den elastischen Anteil abbildet.

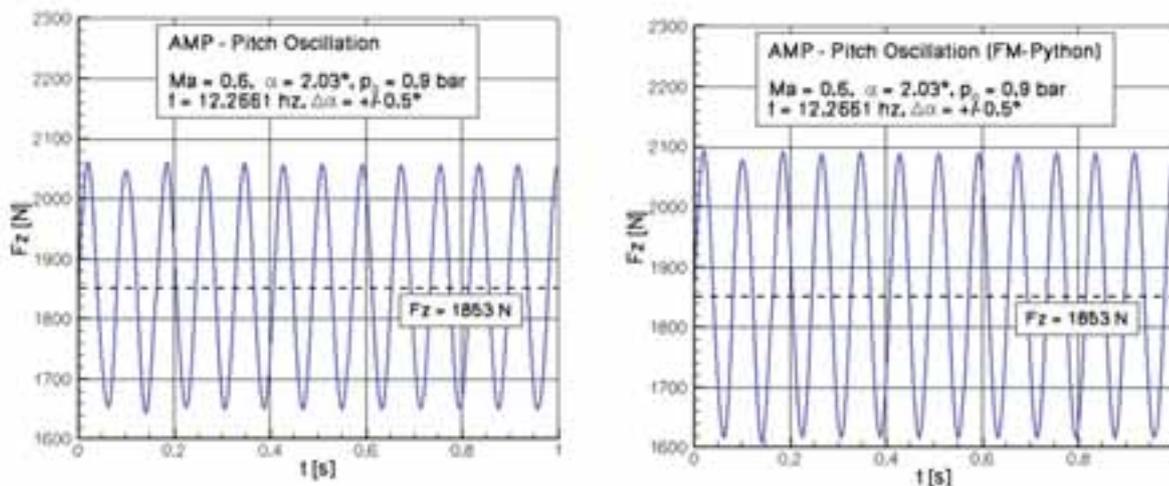


Bild 9: Vergleich der Lagerkraft an der Modellhalterung für die Anstellwinkeldrehung

Zusammenfassung und Ausblick

Eine gekoppelte Simulation unter Einbeziehung der Aerodynamik, Strukturdynamik und Flugmechanik ist für das elastische Windkanalmodell eines gefeilten Tragflügels aufgebaut worden. Die räumliche Kopplung zwischen dem CFD-Code Tau und dem Mehrkörpersystem SIMPACK erfolgt mit MpCCI. CFD ist im reibungsfreien Eulerverfahren bei Machzahl 0.6 angewendet worden.

Vorliegende Simulationen zur Berechnung des aeroelastischen Gleichgewichts zeigen gleiche Ergebnisse für stationäre und instationäre aerodynamische Kräfte. Die resultierenden Druckverteilungen für den verformten Tragflügel sind in guter Übereinstimmung mit Windkanalmessungen. Erzwungene Schwingungen durch Vorgabe einer Schlagbewegung [16] und einer Anstellwinkeldrehung sind für zwei verschiedene CFD-Ansätze, die sich in der Beachtung des aufgezwungenen Starrkörperanteils an der Modellhalterung unterscheiden, untersucht worden. Ein Ansatz deckt den starren, flugmechanischen Bewegungsanteil und die elastische Deformation mit dem Tau Deformations-Modul ab. Der zweite Ansatz behandelt die flugmechanische Bewegung großer Amplitude mit dem Tau Motion-Modul und die elastische Verformung mit dem Tau Deformations-Modul. Der Vergleich zeigt gleiche Ergebnisse für die Schlagbewegung, wohingegen die Anstellwinkeldrehung zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Die Ursache hierfür liegt in einer Verschlechterung des CFD-Netzes bei Behandlung des Starrkörperanteils aus der Drehung um die gefeilte Flügelachse mit der Netzdeformation. In diesem Fall liefert das Vorgehen mit der getrennten Betrachtung vom Starrkörper- und elastischen Anteil der Gesamtverschiebung nach wie vor gute Netzqualität an der Flügeloberfläche und bessere Ergebnisse für die aerodynamischen Kräfte.

Zukünftige Arbeitsschwerpunkte werden die Implementierung einer Trimm-Funktion zur automatischen Anpassung vom Anstellwinkel zum Erreichen einer vorgegebenen Auftriebskraft und den Vergleich mit Windkanal Ergebnissen für transonische Machzahlen mit CFD im reibungsbehafteten Navier-Stokes Verfahren beinhalten.

Autor

Dipl.-Ing. Jürgen Arnold

DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Aeroelastik, Göttingen

- Studium Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart, Abschluß Diplom-Ingenieur 09/96 - 09/96-05/98: Berechnungsingenieur bei BOC Cryostar-France im Bereich thermodynamische und aerodynamische Auslegung von Turbinenrädern zum Einsatz in Luftzerlegungsanlagen
- 06/98-09/02: Entwicklungsingenieur bei Fairchild-Dornier im Bereich Aeroelastik mit Arbeitsschwerpunkten in Erstellung von dynamischen Finite Elemente Modellen und theoretischen Untersuchungen von statischer (Ruderumkehr) und dynamischer Aeroelastizität (Flattern) am Regionalflugzeug 728JET
- seit 09/02: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR Institut für Aeroelastik mit Arbeitsschwerpunkten in der Integration von CFD-Methoden in ein Mehrkörperprogramm und der gekoppelten Simulation von Aeroelastik und Flugmechanik

Quellen

- [1] Schütte A, Einarsson G, Raichle A, Schöning B, Mönnich W, Neumann J, Arnold J, Alrutz T, Heinecke J, Forkert T. Prediction of the unsteady behavior of maneuvering aircraft by CFD aerodynamic, flight-mechanic and aeroelastic coupling. *Proc RTO-MP-AVT-123*, Budapest, 2005.
- [2] Arnold J, Einarsson G, Schütte A. Multibody simulation of an aeroelastic delta wing in roll manoeuvres. *Proc ICAS 2006*, Hamburg, 2006.
- [3] Zingel H. Measurement of steady and unsteady airloads on a stiffness scaled model of a modern transport aircraft wing. *Proc IFASD 1991, DGLR 91-069*, Aachen, 1991.
- [4] Galle M. Ein Verfahren zur numerischen Simulation kompressibler, reibungsbehafteter Strömungen auf hybriden Netzen. *DLR-FB 99-04*, 1999.
- [5] Galle M, Gerhold T, Evans J. Technical documentation of the DLR Tau-Code. *DLR-IB 233-97/A43*, 1997.
- [6] Gerhold T, Galle M, Friedrich O, Evans J. Calculation of complex three-dimensional configurations employing the DLR Tau-Code. *AIAA-97-0167*, 1997.
- [7] www.simpack.de
- [8] Lugner P, Arnold M, Vaculin O (Eds). *Vehicle System Dynamics (Special issue in memory of Professor Willi Kortüm)*, Vol. 41, No. 5, 2004.
- [9] Krüger W, Heinrich R, Spieck M. Fluid-structure coupling using CFD and multibody simulation methods. *Proc ICAS 2002*, Toronto, 2002.
- [10] Spieck M, Krüger W, Arnold J. Multibody simulation of the free-flying elastic aircraft. *Proc 1st AIAA Multidisciplinary Design Optimization Specialist Conference*, Austin, 2005.
- [11] www.mpcci.org
- [12] Fraunhofer Institute for Algorithms and Scientific Computation SCAI. MpCCI Mesh based parallel code coupling interface. *Specification of MpCCI version 2.0*, 2003.
- [13] www.mcs.anl.gov/mpi/mpich
- [14] Gropp W, Lusk E. Installation and user's guide to MPICH, a portable implementation of MPI version 1.2.3. The ch_p4 device for workstation networks. Argonne National Laboratory, 2002.
- [15] Farhat C, Lesoinne M. Higher-Order Staggered and Subiteration Free Algorithms for Coupled Dynamic Aeroelasticity Problems. *AIAA 98-0516*, 1998.
- [16] Arnold J, Einarsson G, Krüger W. Multibody simulation of an oscillating aeroelastic wing model. *Proc NAFEMS Seminar: Simulation of Coupled Flow Phenomena*, Wiesbaden, 2006.

Fluid-Struktur-Interaktion an einer Schweißkonstruktion unter hoher thermischer Belastung

Gernot Haider, Hermann Lang, Christoph Reichl

Forscher im Geschäftsfeld Verkehrstechnologien in einer Arbeitsgruppe für numerische Strömungssimulation von arsenal research, Vienna, Austria

Aufgrund von hohen thermischen Spannungen trat an einem geschweißten Bestandteil des Hilfskamins eines kalorischen Kraftwerks ein Riss auf. Ursache dafür war die Einwirkung großer Temperaturgradienten einer Abgasströmung auf eine kalte Schweißkonstruktion. Um in einem ersten Schritt die Ursachen der Rissbildung zu verstehen, wurde eine instationäre CFD-Simulation mit einer FEM-Analyse gekoppelt. Daraus wurden Maßnahmen zur Optimierung abgeleitet und deren Effekte wiederum im Rahmen einer Analyse der Fluid-Struktur-Interaktion geprüft.



Abb. 1: Ansicht von der Donau auf das kalorische Kraftwerk „Theiß“ mit Hilfskamin

Einleitung

Das kalorische Kraftwerk „Theiß“ befindet sich in Niederösterreich und liefert mehr als 500 MW elektrische Energie und bis zu 60 MW Wärmeenergie als Fernwärme (Abb. 1). Als Brennstoffe werden Erdgas und Schweröl eingesetzt. Der Block B wurde als Gaskombikreisprozess ausgeführt, dessen Abwärme aus der Gasturbine in einem Dampferzeuger zum Antrieb einer Dampfturbine genutzt wird. Ein Hilfskamin, der Bestandteil in Block B ist und 8 m Durchmesser aufweist, wird ausschließlich beim Anfahren der Gasturbine und im Notfall eingesetzt (Abb. 2). Während und außerhalb des stationären Kraftwerksbetriebs ist der Hilfskamin durch eine Flügelklappe bestehend aus zwei halbkreisförmigen Klappen geschlossen (Abb. 3). Die Flügelklappe ist durch einen massiven Flansch an dem darunter befindlichen Teil des Kamins montiert.



Abb. 2: Hilfskamin mit Flügelklappe

Im Jahr 2004 wurde im Rahmen einer Inspektion ein Riss am Flansch entdeckt, der auch mit freiem Auge deutlich sichtbar war. Abb. 4 gibt eine Ansicht des Risses von außen, wobei diese Ansicht erst nach der Entfernung von Abdeckblechen und Isolationsmaterial ermöglicht wurde. Der Riss wurde nahe einer Materialanhäufung gefunden, wo zwei massive Stahlrippen durch Schweißnähte miteinander verbunden wurden.

Mit dem Ziel begründete Anweisungen an die Revisionsarbeiten geben zu können, wurde eine numerische Berechnung durchgeführt. Herausfordernder Aspekt dieses Projektes war, binnen weniger Wochen diese Anweisungen geben zu können damit der Ausfall an Energieerzeugung gering gehalten werden konnte.

Um den Ursachen der Rissbildung auf den Grund zu gehen, wurde eine Einwegkopplung einer instationären CFD-Simulation mit einer Serie von quaistationären FEM-Strukturanalysen durchgeführt. Aus den Berechnungsergebnissen der initialen Analyse wurden geeignete Maßnahmen zu Optimierung abgeleitet. Verschiedene Designvarianten wurden anschließend im Rahmen weiterer Berechnungen dieser Variante der Fluid-Struktur-Interaktion bewertet.

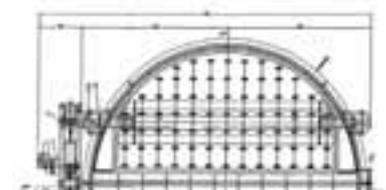


Abb. 3: Halbkreisförmige Klappe



Abb. 5: Außenansicht des Risses im Flansch (Isoliermaterial entfernt)

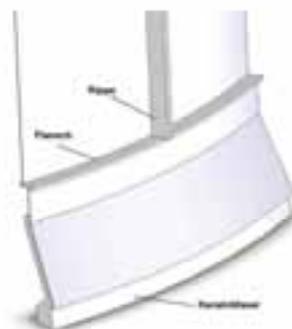


Abb. 4: 3D CAD Modell des 30° Kaminsegments (Darstellung ohne äußerem Isoliermaterial)

3D CAD Modell und Berechnungsnetz – Initiales Design

Ein 30° Rohrsegment wurde als 3D CAD Modell unter Berücksichtigung des abgasdurchströmten Rohrvolumens, aller verschweißten Stahlteile und der Isolation erstellt (siehe Abb. 5). Die Schweißverbindungen wurden als 5 mm breite Verbindungsflächen modelliert entsprechend dem Schweißprozess entlang der Naht zwischen den beiden längs geteilten Hauptteilen des Klappenflansches. Aufgrund der Unsicherheit über die Qualität der Schweißverbindungen wurde der kleine Wert von 5 mm gewählt, um hier ein eher ungünstiges Szenario abzubilden. Abb. 6 zeigt dazu die unverschweißte verbleibenden Flächen an den Verbindungen.



Abb. 6: Unverschweißte Flächen an den Verbindungen

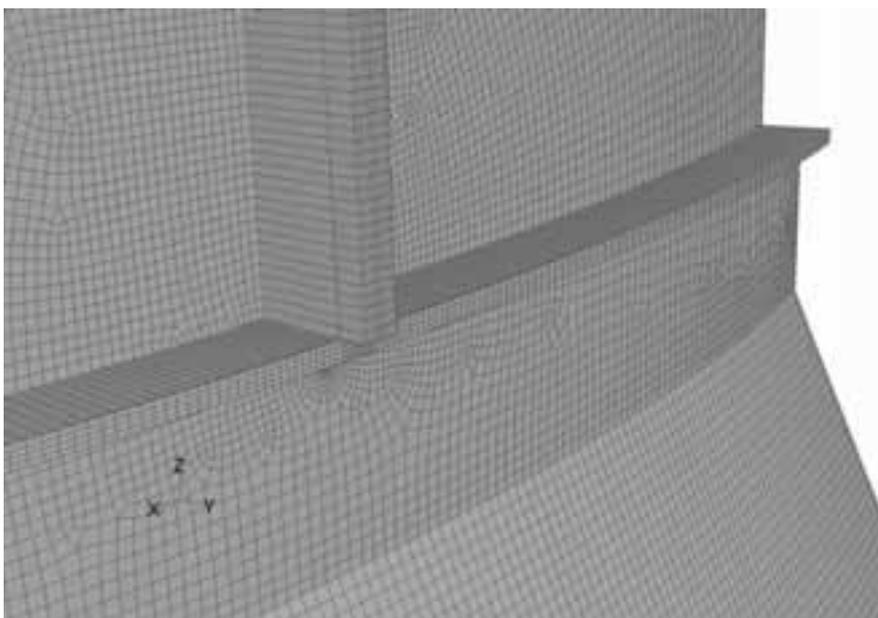
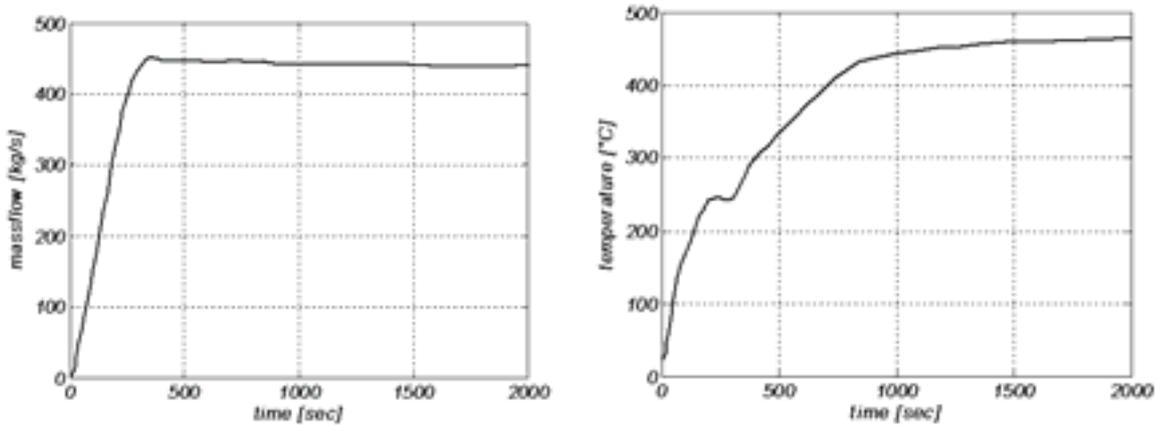


Abb. 7: Berechnungsnetz der Stahlteile

Das gesamte Berechnungsnetz besteht aus etwa 1.5 Millionen Volumenzellen. Davon entfallen 100.000 Zellen auf die Stahlteile, welche innerhalb der Strömungssimulation zur Berechnung des Wärmetransportes und innerhalb der Strukturberechnung zur Spannungsanalyse herangezogen werden (siehe Abb. 7). Das Berechnungsnetz wurde mit Fluent Inc.'s Netzgenerator Gambit erzeugt, welcher in der Lage ist, sowohl CFD Netze als auch FEM Elemente zu erzeugen. Jede den Stahlteilen zugeordnete Berechnungszelle wird daher als CFD Volumenzelle sowie als finites 8-Knoten Strukturelement eingesetzt.



Links: *Abb. 8: Massenstromverlauf während des Kaltstarts der Gasturbine*
 Rechts: *Abb. 9: Temperaturverlauf während des Kaltstarts der Gasturbine*

CFD Analyse – Initiales Design

Entsprechend dem Umstand, dass die Temperaturgradienten während des Kaltstarts der Gasturbine größer als im Normalfall sind, wurden zeitlicher Abgasmassenstrom- und Temperaturverlauf als instationäre Randbedingungen am Abgaseintritt des Modells entsprechend dem Startvorgang vorgegeben (Abb. 8 und Abb. 9).

Die Strömungssimulation wurde mit einer Zeitschrittweite von $\Delta t = 2$ s für insgesamt 2 000 Sekunden (mehr als 33 Minuten) Echtzeit durchgeführt. Abb. 8 und Abb. 13 zeigen Innenansichten des Strömungsfeldes sowie Wärmeübergangskoeffizienten in den kritischen Bereichen Schweißkonstruktion.

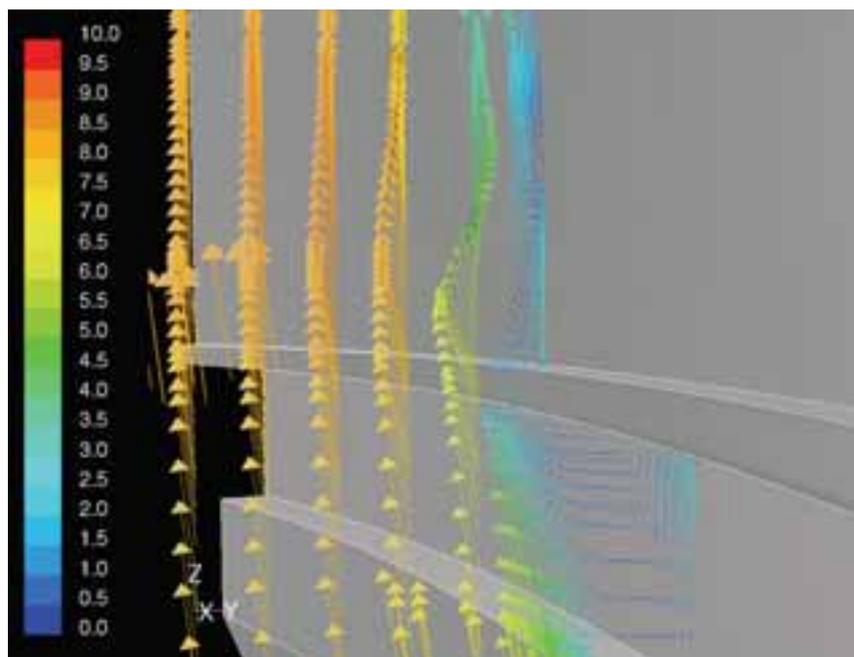


Abb. 10: Vektordarstellung der Geschwindigkeitsbeträge in [m/s] nahe den Innenwandoberflächen zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s

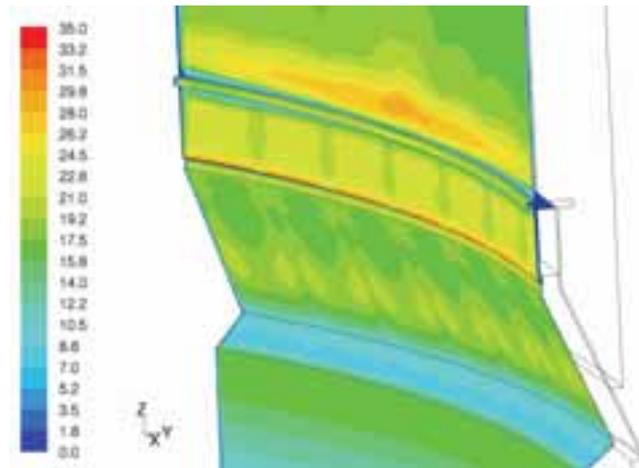
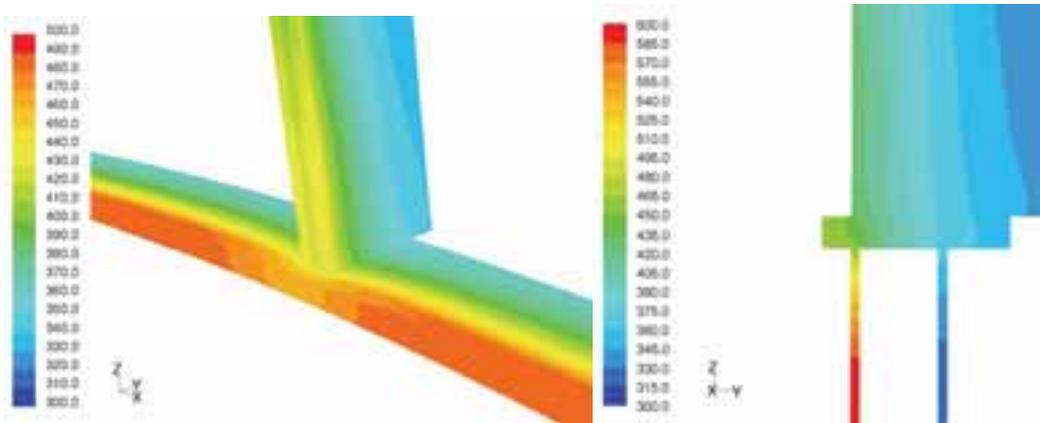


Abb. 11: Konturdarstellung des Wärmeübergangskoeffizients in $[W/m^2K]$ an den Innenwandoberflächen zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s



Links: Abb. 12: Wandtemperaturen in $[K]$ an Rippe und Flansch zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s

Rechts: Abb. 13: Temperatur in $[K]$ in einem Schnitt durch Rippe und Flansch zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s

Dateigesteuerte Fluid-Struktur-Kopplung

Temperaturdifferenzen verursachen thermische Spannungen ohne Zeitverzug. Die Rückwirkungen der gering deformierten Konstruktion auf das Strömungsfeld wurden vernachlässigt. Demzufolge ist der Einsatz einer Einwegkopplung des Strömungsfelds mit dem Spannungsfeld in der Schweißkonstruktion gerechtfertigt, um thermische Spannungen aus Wärmetransport und Temperaturfeldern zu berechnen.

Konkret wurde nach jedem zehnten CFD-Zeitschritt automatisch ein Temperaturfeld der Stahlkonstruktion exportiert. Über entsprechende Ausdehnungskoeffizienten wurde das Hooke'sche Gesetz (1) um die Terme der Temperaturexpansion gemäß [1] erweitert.

$$\bar{\sigma} = \bar{E}(\bar{\varepsilon} - \bar{\alpha} \cdot \Delta T) \quad (1)$$

Abgesehen von den Wärmespannungen wurde die Konstruktion als spannungsfrei betrachtet. Die Referenztemperatur zur Berechnung der Temperaturdifferenz ΔT wurde gleich der Umgebungs- bzw. Initialtemperatur gesetzt. Aufgrund des weitgehend isotropischen Materialverhaltens sind sämtliche Komponenten der Elastizitätsmatrix und des Vektors der Ausdehnungskoeffizienten für alle Raumrichtungen gleich.

Der Export des Temperaturfeldes, die Aufarbeitung der Randbedingungen und der Start einer Serie quasistationärer FE-Strukturberechnungen wurde dabei vollautomatisch von eigens dafür geschaffenen Routinen gesteuert.

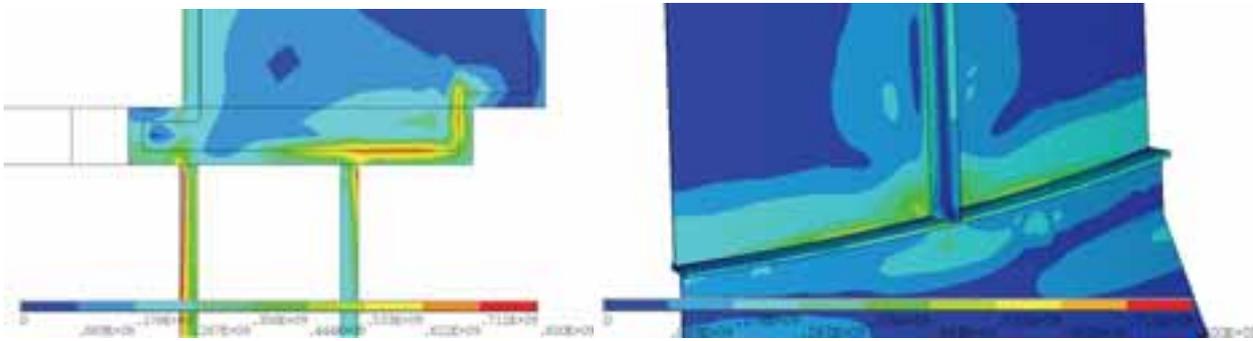
FEM Analyse – Initiales Design

Die FEM-Analyse wurde unter der Annahme linear elastischen Materialverhaltens durchgeführt. Für die Beobachtung von Risswachstum ist diese Vorgehensweise freilich ungeeignet. Zu dem Zweck der Ursachenforschung wodurch die thermischen Spannungen über den Bereich des linear elastischen Materialverhaltens hinaus ansteigen, erscheint dieser Ansatz ausreichend exakt. Die Untersuchung des Risswachstums selbst war nicht Ziel der Analyse. Darüber hinaus sollte die Materialstreckgrenze in den optimierten Konstruktionsvarianten auch nicht überschritten werden.

Die Auswertung des Spannungsfeldes erfolgt über Von Mises Vergleichsspannungen σ_v .

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (2)$$

Die gesamte Konstruktion wurde aus austenitischem Stahl X6CrNiTi18-10 hergestellt. Dessen Zugfestigkeit liegt zwischen 500 – 700 N/mm² und dessen 0.2% Streckgrenze bei 200 N/mm² bei Raumtemperatur [2]. Die Ergebnisse der FE-Strukturberechnung sind in Von Mises Vergleichsspannungen in Abb. 14 und Abb. 15 dargestellt.



Links: Abb. 14: Von Mises Vergleichsspannungen in [N/m²] an einem Schnitt durch Rippe und Flansch zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s

Rechts: Abb. 15: Von Mises Vergleichsspannungen in [N/m²] an der äußeren Wandoberfläche zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s



Abb. 16: Abgelöstes Blech unterhalb des Flansches

Die Spannungen an den Stahlblechen unterhalb des Flansches und in den Wurzeln der Schweißverbindungen übersteigen die Zugfestigkeit des Stahls. Dies korrespondiert exakt mit der beobachteten Position des aufgetretenen Risses (Abb. 4) sowie einem abgelösten Blech unterhalb des Flansches (Abb. 16).

Optimiertes Design

Nach zwei Optimierungsschritten wurde eine Designvariante gefunden, welche im Rahmen der Revisionsarbeiten in Realität umgesetzt wurde. Da die massive Rippenkonstruktion nur während der Montage des gesamten Hilfskamins Verwendung gefunden hat, konnte diese ohne weiteres herausgeschnitten werden, ohne das statische Gleichgewicht zu stören. Ihre ursprüngliche Aufgabe war lediglich, Koaxialität bei der Montage in Kombination mit Bolzen zu gewährleisten, bis ein Schweißprozess die jeweiligen Hälften von Flansch und Klappe dauerhaft verbunden hat.

Die Schnittführung zur Entfernung der Rippenkonstruktion wurde dabei mit dem Ziel gestaltet, möglichst geringen Aufwand bei den Revisionsarbeiten zu verursachen. Demzufolge verblieb von der Rippe nur ein schmaler Steg oberhalb des Flansches unter Rücksichtnahme aufwendige Schleifarbeiten zu minimieren. Die Rippe wurde nur direkt über dem Flansch komplett entfernt. Das innenseitige Stahlblech unter dem Flansch wurde entfernt, um eine gleichmäßigere Temperaturverteilung während des Aufheizprozesses zu ermöglichen (Abb. 17). Zusätzlich wurde den Scheißarbeiten mindestens 10 mm tiefe Schweißnähte für das optimierte Design empfohlen.

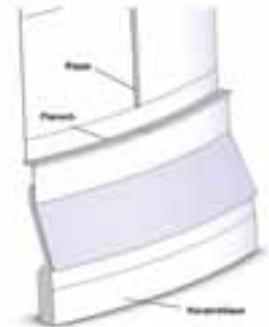


Abb. 17: 3D CAD Modell des optimierten Designs (Darstellung ohne äußerem Isoliermaterial)

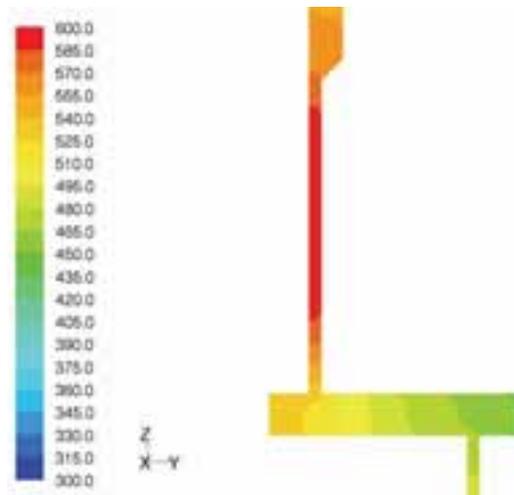
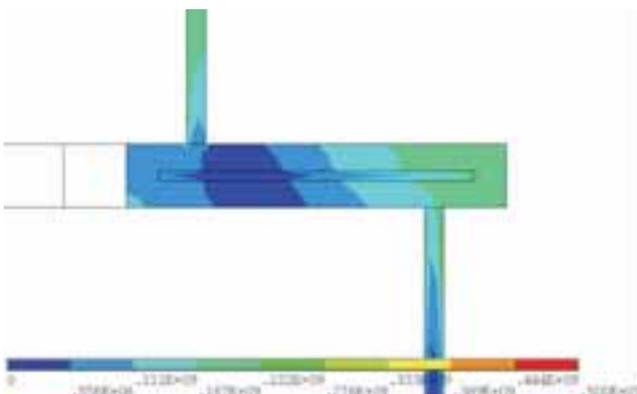
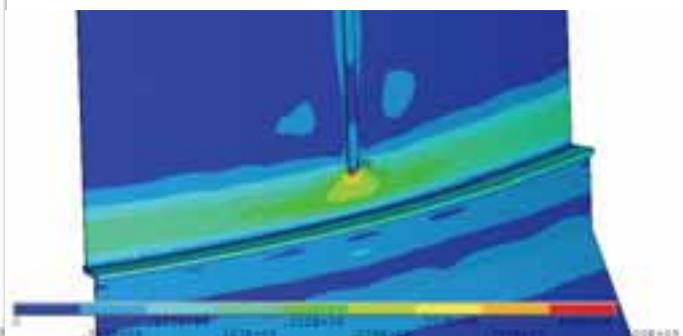


Abb. 18: Temperatur in [K] in einem Schnitt durch Rippe und Flansch zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s



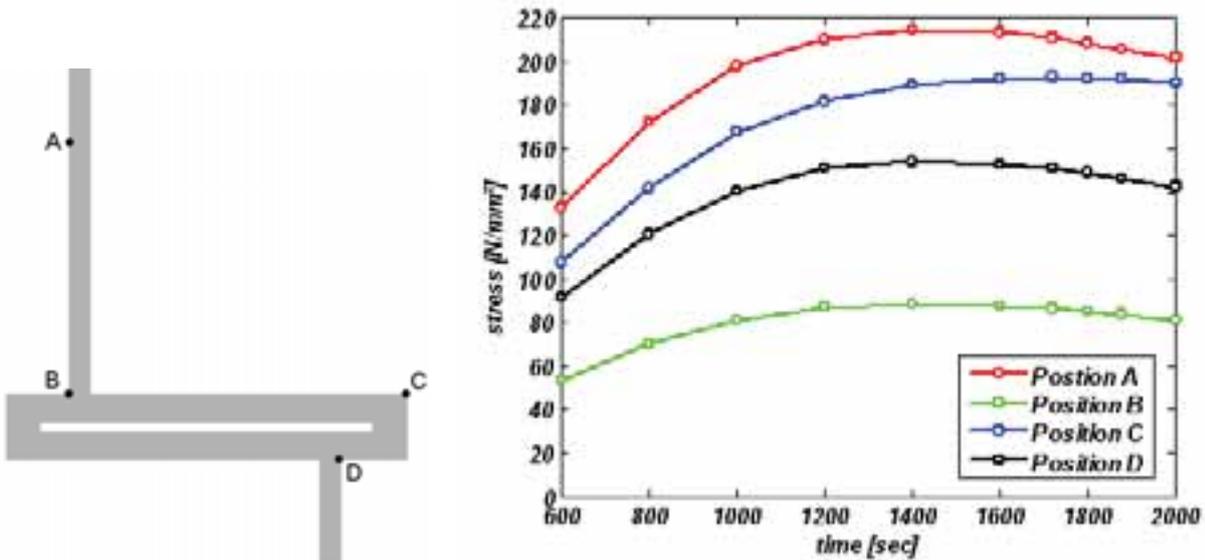
Links: Abb. 19: Von Mises Vergleichsspannungen in $[N/m^2]$ an einem Schnitt durch Rippe und Flansch zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s



Rechts: Abb. 20: Von Mises Vergleichsspannungen in $[N/m^2]$ an der äußeren Wandoberfläche zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s

Abb. 18 gibt die Temperaturverteilung im Längsschnitt durch den Flansch und den verbliebenen Teilen zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s.

Abb. 19 und Abb. 20 zeigen Ergebnisse der FE-Strukturberechnung von der optimierten Designvariante. Die Maximalspannungen haben sich in den Bereich oberhalb des Flansches verlagert. Der Maximalwert der Von Mises Vergleichsspannung wurde am Ansatz des verbliebenen Stegs errechnet, welcher sich in dieser Variante inmitten der thermisch belasteten Zone befindet. Daraus folgte die klare Anweisung, den Stegansatz nach oben außerhalb der Zone hoher thermischer Spannungen zu verlegen.



Links: Abb. 21: Monitorpunkte A bis D an der Schweißverbindung

Rechts: Abb. 22: Von Mises Vergleichsspannungen in [N/mm²] an den Monitorpunkten

Um sicher zu gehen, die Spannungsmaxima auch über den Zeitverlauf erfasst zu haben, wurden Monitorpunkte A bis D in der Ebene der Schweißverbindung gesetzt (Abb. 21). Abb. 22 zeigt, dass sämtliche Monitorpunkte ihr Spannungsmaximum innerhalb der berechneten Zeitspanne durchlaufen haben. Tabelle 1 gibt einen Vergleich zwischen dem initialen und dem optimierten Design.

Ansteigende Temperaturen verursachen eine Verringerung der Materialstreckgrenze. Zonen um den Monitorpunkt A überschreiten 300°C und die korrespondierende 1%-Standardstreckgrenze bei 175 N/mm^2 . Typische Werte der Streckgrenze für austenitischen Stahl X6CrNiTi18-10 können in der Praxis um 60% höher angesetzt werden (siehe [3]). Entsprechend dieser Überlegung konnten die Ziele für ein optimiertes Design als erreicht erklärt werden.

| Postion | Stress, Initial Design [N/mm²] | Stress, Optimized Design [N/mm²] |
|---------|--------------------------------|----------------------------------|
| A | 339,5 | 201,4 |
| B | 335,0 | 81,5 |
| C | 181,3 | 189,9 |
| D | 609,0 | 142,5 |

Tabelle 1: Vergleich der Von Mises Spannungen zum Zeitpunkt $t = 2.000$ s zwischen dem initialen und dem optimierten Design

Revisionsarbeiten

Entsprechend den Anweisungen aus der Analyse der Fluid-Struktur-Interaktion wurde die Rippenkonstruktion herausgeschnitten. Schleifarbeiten wurden in der Form durchgeführt, sodass der verbleibende Rippensteg außerhalb der thermischen Belastungszone ansetzt. Die durch den Riss zerstörten Zonen des Flansches und der Rohrwand wurden großzügig ausgeschnitten und sorgfältig neu eingeschweißt.



Abb. 23: Revisionsarbeiten an der Außenseite des Hilfskamins

Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projektes konnte gezeigt werden, dass Wärmespannungen über Wärmetransport aus komplexen Strömungen in einer komplexen Stahlkonstruktion durch ein eher einfaches dateigesteuertes Kopplungsverfahren analysiert werden kann. Dabei brauchten keine aufwendigen Kopplungswerkzeuge (wie z.B. MpCCI) zur Anwendung kommen. Unter einem restriktiv vorgegebenen Zeitplan hat sich dieses Verfahren für praktische Anwendungen als stabil und ausreichend exakt herausgestellt.

Danksagung

Die Autoren danken DI Johannes Schlederer and DI Karl Hainzl von FMT Industrieservices, die das Projekt unterstützten und die Revisionsarbeiten entsprechend den Vorgaben aus dieser Analyse vorantrieben.

Zusätzlich danken die Autoren EVN, dem Betreiber des Kraftwerks „Theiß“ und dort namentlich Ing. Martin Fries

Quellen

- [1] Rammerstorfer, F. G.: "Grundzüge – Finite Elemente und andere Numerische Ingenieursmethoden", Vorlesungsbehef, 1998, S. 21
- [2] Böhler: "Böhler A700", Prospekt A700 DE 04.03 EM-WS, 2003, S. 5
- [3] Südwestfalen: "1.4541, X6CrNiTi18-10", Datenblatt, 2000, Rev. 4541-0

Methode zur Berechnung von geschmierten Friktionskontakten in Mischreibungsgebieten

Albers, A., Nowicki, L., Enkler, H.-G.
IPEK - Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH)

Das Institut für Produktentwicklung befasst sich mit einem Ansatz zur Berechnung von geschmierten Friktionsproblemen in Mischreibungsgebieten. Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) soll der Einfluss ausgewählter Parameter auf die Triboeigenschaften bestimmt werden. Hierzu wird ein dreidimensionales, parametrisiertes FEM-Modell vorgestellt, das die Gleichungen der Strukturmechanik mit den Navier-Stokes-Gleichungen koppelt.

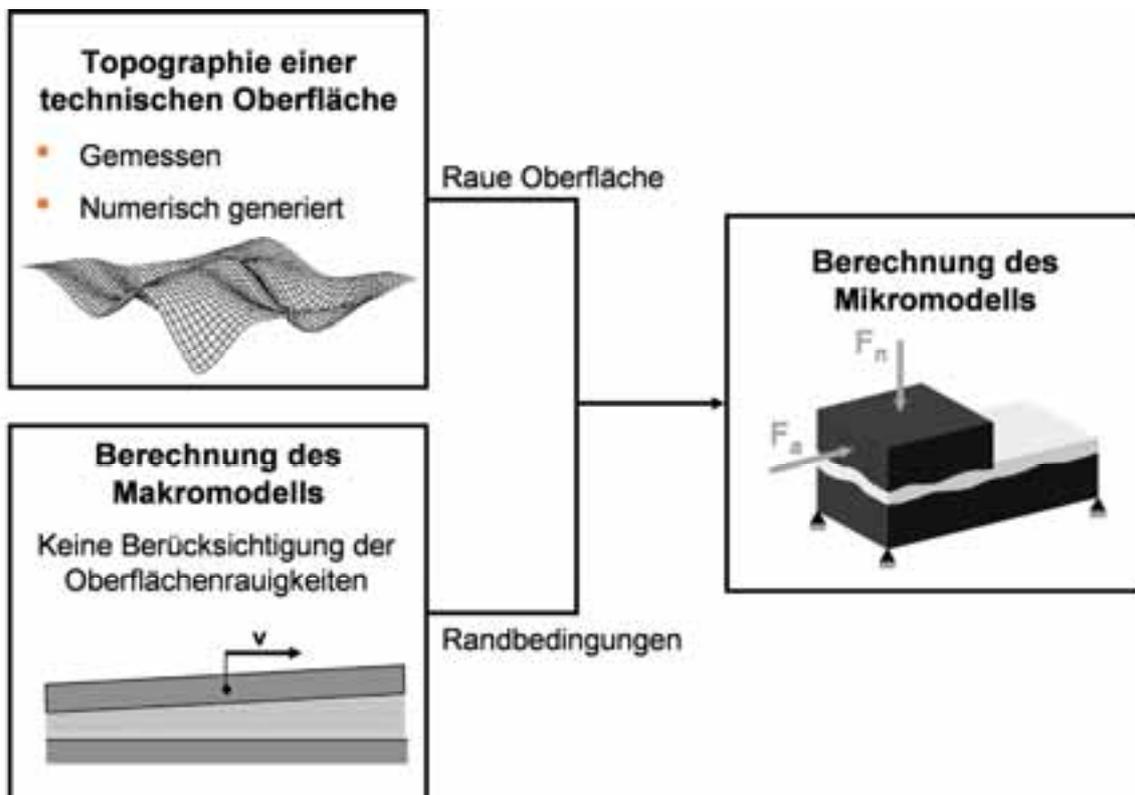


Abb. 1: Flussdiagramm des Gesamtprozesses

Einleitung

Geschmierte Friktionskontakte sind Bestandteil vieler technischer Systeme. Sie leisten einen entscheidenden Beitrag zur ihrer Funktionserfüllung. Eine Funktionsgerechte Gestaltung der Kontaktflächen erfordert die Erarbeitung einer Methode zur Erforschung der Mechanismen des tribologischen Systems. Dabei spielt die numerische Simulation mit dem zunehmenden Fortschritt der Computertechnologie eine immer stärkere Rolle. Anbetracht dieser Entwicklung wurde am Institut für Produktentwicklung ein Ansatz entwickelt, der sich dieser Herausforderung stellt. Für die gegebene Problemstellung wird zunächst ein Makromodell erstellt und berechnet. Anhand dieses Modells können die, aus tribologischer Sicht kritischen Bereiche, wie z.B. minimale Spalthöhe oder Ort des größten Druckes detektiert werden. Zusätzlich liefert dieser Schritt notwendige Randbedingungen für die nachfolgende Berechnung dieser kritischen Bereiche in einem Mikromodell. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeiten wird berücksichtigt in dem den Festkörpern eine vorgegebene Topographie aufgeprägt wird.

Charakterisierung technischer Oberflächen

Die Herausforderung bei der Beschreibung der Oberflächencharakteristik liegt in der Zuordnung eines bestimmten Zahlenwertes, der ihre wesentlichen Eigenschaften beschreibt und aussagefähige Angaben über ihr späteres Funktionsverhalten liefert [1]. Zur vollständigen Beschreibung der Oberflächeneigenschaften muss neben den bekannten Rauheitsparametern (R_a , R_q , R_z) die Form des Profils berücksichtigt werden. Dies geschieht mit Hilfe der Materialanteil-Kurve (Abbottkurve), die den Traganteil des Materials (M) als Funktion der Profilrautiefe beschreibt. Diese lässt sich mit Hilfe von drei Parametern in drei Bereiche: reduzierte Spitzenhöhe (R_{pk}), reduzierte Riefentiefe (R_{vk}) und die Kernrautiefe (R_k) aufteilen [2]. Die Kernrautiefe beschreibt den Bereich des Profils, der die größte Zunahme des Materialanteils aufweist. Die reduzierte Spitzenhöhe macht eine Aussage über die Form und Anzahl der Rauheitsamplituden. Analog dazu beschreibt der R_{vk} -Parameter den Riefenbereich. Die Summe dieser drei Parameter ergibt die Profilhöhe (R_t)

Zur Oberflächengenerierung ist es nun erforderlich messbare Größen zur Charakterisierung der Oberflächen festzulegen. Zur Beschreibung der Abbottkurve wird der Materialanteil (M) als Funktion der Profiltiefe (R) betrachtet.

$$M = f(R) \tag{1}$$

Mit deren Hilfe kann ein Vektor folgender Form geabb.et werden:

$$\bar{A} = \left\{ \begin{array}{l} M_0 = M(R_t) \\ M_1 = M\left(\frac{n-1}{n} * R_t\right) \\ M_2 = M\left(\frac{n-2}{n} * R_t\right) \\ \vdots \\ M_n = M(0) \end{array} \right\}, n = 20 \tag{2}$$

Die Beschreibung der Rauigkeit der Oberfläche erfolgt im Rahmen der Untersuchungen mit Hilfe des quadratischen Mittelwerts (R_q).

Zur Analyse der technischen Oberflächen wird eine zweidimensionale Fourier-transformation durchgeführt. Mit Hilfe des Frequenzspektrums und den dazugehörigen Amplituden wurden für ausgewählte Fertigungsverfahren (Fräsen, Drehen, Schleifen, Läppen) dominante Frequenzen ermittelt. Die Untersuchung ergab, dass die Anzahl an relevanten Frequenzen abhängig vom Fertigungsverfahren auf einen überschaubaren Wert eingegrenzt werden kann, mit deren Hilfe Oberflächen mit gewünschter Charakteristik generiert werden können. Hierzu wurde ein Optimierungsverfahren gewählt, das an den biologischen Evolutionsprozess angelehnt ist. Die Amplituden der dominanten Frequenzen werden variiert bis das Skalarprodukt zwischen den Abbottkurven einer Musteroberfläche und der generierten Fläche maximal wird und der quadratische Mittenrauwert einen gewünschten Betrag einnimmt.

Beispiel stochastisch generierten Oberflächen

Zur Verifikation der Methode wurden für das Fertigungsverfahren „Drehen“ zwei Optimierungen aufgesetzt. Für beide Optimierungsläufe wurde als Musterkurve für die Zielfunktion die gemessene Abbottkurve verwendet. Als Nebenbedingung sollten in Optimierung 1 ein R_q -Wert von 1.5µm und in Optimierung 2 ein R_q -Wert von 2.5µm angestrebt werden.

Die Ergebnisse der beiden Optimierungsläufe weisen einen für das angestrebte Fertigungsverfahren typischen Verlauf auf. Das Skalarprodukt des ersten Ergebnisses mit dem Muster ergab den Wert 0.9999, was einen nahezu gleiche Verlaufscharakteristik bedeutet. Die Gleichheitsnebenbedingung konnte mit einem R_q -Wert von 1,5005µm sehr gut eingehalten werden. Das zweite Ergebnis ist etwas ungenauer als das erste, liegt jedoch

noch im Toleranzbereich. In diesem Fall liefert das Skalarprodukt einen Betrag von 0,9947, der R_q -Wert beträgt 2,4959 μm .

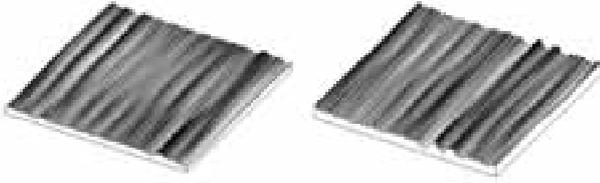


Abb. 2: Stochastisch generierte Oberflächen; links: $R_q = 1.5\mu\text{m}$, rechts: $R_q = 2.49\mu\text{m}$

Das Mikromodell

Das Mikromodell besteht aus zwei dreidimensionalen, rauen Festkörpern, die miteinander in Kontakt stehen. Zwischen den Festkörpern befindet sich das Fluid. Die Knoten des unteren Körpers werden eingespannt um statische Bestimmtheit zu gewährleisten. Der obere Körper wird über den unteren und das Fluid geführt. Hierbei kann die Führung über eine Zwangsverschiebung oder auch über Kräfteinleitung erfolgen. Zur Beschreibung der Verhältnisse im Fluid wird die Navier-Stokes-Gleichung aufgestellt und numerisch gelöst. Beim Fluid handelt es sich um eine nicht Newtonsche Flüssigkeit. Der Zusammenhang zwischen dem Spannungstensor und dem Schergefälle erfolgt nach dem Potenzgesetz:

$$\tau = k|\dot{\gamma}|^n \dot{\gamma} \quad \forall (n < 0) \quad (3)$$

mit: τ = Spannungstensor, $\dot{\gamma}$ = Schergefälle, k = Stoffkonstante,

n = Grad des Potenzansatzes

Die Abhängigkeit der Viskosität von dem Druck und der Temperatur kann prinzipiell berücksichtigt werden, wurde jedoch im Verlauf dieser Arbeiten noch nicht berücksichtigt. Zwischen dem oberen Körper und dem Fluid wurde eine Interaktion als Randbedingung aufgegeben. Die Anzahl und Art der Randbedingungen ist von der Aufgabenstellung abhängig.

Modellerstellung

Für die numerische Simulation der Mischreibung müssen zwei unabhängige Modelle erstellt werden. Das eine Modell Abb. 1 zeigt die Welt der Strukturmechanik ab, das andere Modell die der Fluidmechanik. Die Vorgehensweise beim Aufbau des Modells ist in beiden Fällen ähnlich.

Einlesen der virtuellen Oberflächen

In diesem Schritt werden Messpunkte der beiden Oberflächen erfasst und entsprechend ihrer Koordinaten sortiert. Es wird dabei vorausgesetzt, dass bei jeder dieser Punkte äquidistant verteilt ist.

Detektion der Kontaktstellen

Für beide Flächen werden Kontaktbereiche ermittelt. Liegen zwei Punkte der beiden Oberflächen näher als ein vorgegebener Grenzwert, werden diese im Fluid zu einem zusammengefasst. Punkte, die von den Festkörpern durchdrungen werden, werden entfernt.

Aufbau der Geometrie

Mit Hilfe der vorliegenden Punkte werden auf der Ober- und Unterseite Flächen der Gleichung

$$z(x, y) = A \cdot x + B \cdot y + C \cdot x \cdot y + D \quad (4)$$

mit A, B, C, D als Konstante

Vernetzung des Modells und das Anbringen der Randbedingungen

Das Modell wird zunächst mit 2-dimensionalen Elementen vernetzt. Mit Hilfe des 2d Netzes wird anschließend ein Tetraedernetz generiert. Es handelt sich hierbei um Elemente mit einem linearen Ansatz. Es werden Knoten- und Elementflächengruppen geAbb.et. Mit derer Hilfe können anschließend alle notwendigen Randbedingungen definiert werden.

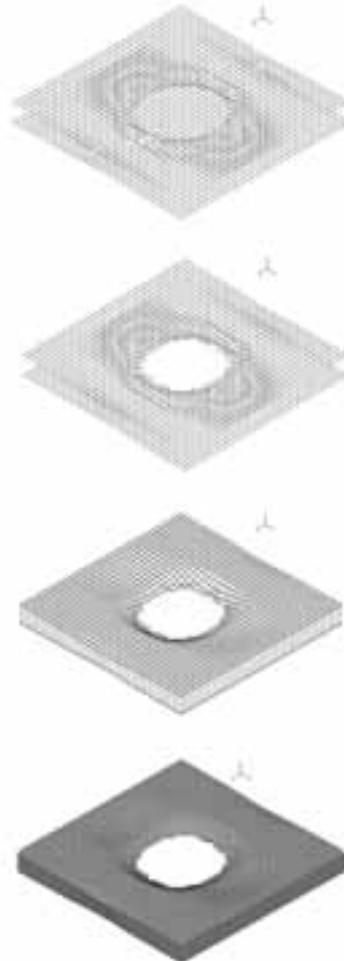


Abb. 3: Preprocessing des Fluidmodells

Beispiel

Am Beispiel eines Axialgleitlagers soll die Methode angewendet werden. Hier gleitet ein schräg gestellter Gleitschuh wenige Mikrometer über der Gleitfläche.

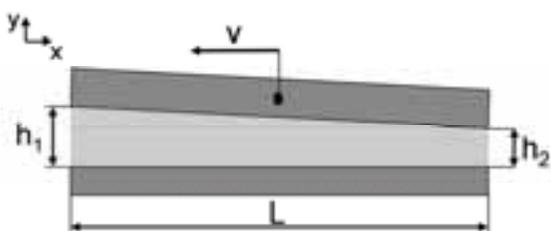


Abb. 4: Axialgleitlager

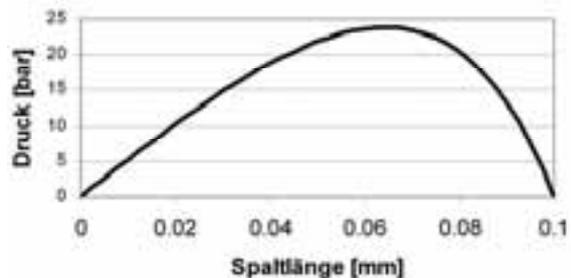


Abb 5: Druckverteilung im Spalt

Der Verlauf der Spalthöhe lässt sich mit Hilfe einer linearen Funktion beschreiben:

$$h(x) = h_1 - \frac{h_1 - h_2}{L} * x \tag{5}$$

Durch die Gleitbewegung des Gleitschuhs wird das Öl in den konisch verlaufenden Spalt gepresst, wodurch ein Druckanstieg hervorgerufen und die Berührung mit der Gleitfläche verhindert wird. Die Verteilung des Druckes im Spalt lässt sich wie dargestellt berechnen:

$$p(x) = \int_0^L 6 * \eta * v * \left(\frac{1}{h^2(x)} + \frac{c_1}{h^3(x)} \right) dx \tag{6}$$

mit: η = Viskosität, V = Geschwindigkeit, C_1 = Konstante

Für das dargestellte Beispiel beträgt die maximale Spalthöhe $9\mu\text{m}$ und die minimale Spalthöhe $5\mu\text{m}$. Der Gleitschuh ist 100mm lang und gleitet mit einer Geschwindigkeit von 600mm/s . Das Öl verfügt über eine Viskosität von $2.2\text{e-}8\text{Ns/mm}^2$. Für diese Randbedingungen beträgt der maximale Druckbetrag im Spalt 23.9 bar . An dieser Stelle ist der Spalt $6.5\mu\text{m}$ hoch. Dort soll im Folgenden das Mikromodell berechnet werden.

Zum Aufbau des Mikromodells werden neben den Randbedingungen aus dem Makromodell, Informationen über die Oberflächentopographie benötigt. Hierzu wurden zwei Bereiche einer geschliffenen für das Mikromodell herausgesucht. Für den Gleitschuh wurde ein Abschnitt von $50 \times 50\mu\text{m}$ heraussepariert. Die Gleitfläche wurde durch eine $75 \times 50\mu\text{m}$ große Fläche abgeAbb.et.

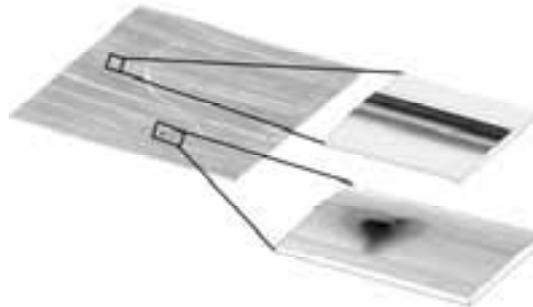


Abb. 6: Oberflächenrauigkeit

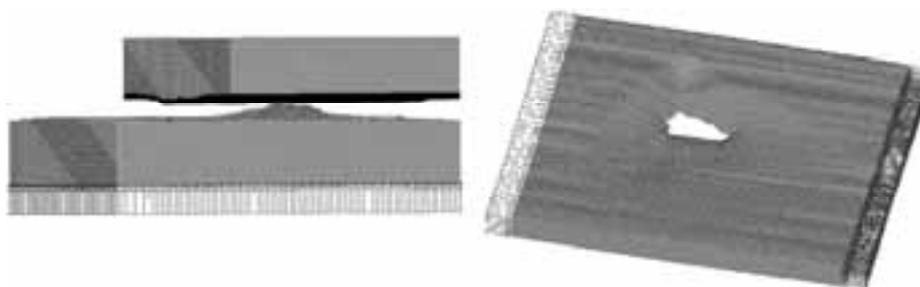


Abb 7: FE-Modell Axialgleitlager; links: Festkörpermodell, rechts: Fluidmodell

Die Mittelebenen der beiden Festkörper wurden durch Vorgabe einer Zwangsbewegung auf einen Abstand von $6.5\mu\text{m}$ gebracht. Zwischen den Festkörpern wurde eine Kontakttrandbedingung definiert. Dem Fluid wurde an seinen Grenzflächen ein äußerer Druck aus dem Makromodell aufgebracht(Abb. 8 rechts). Zwischen dem Fluid und dem Festkörper wurde eine Interaktion definiert.

Das Beispiel zeigt auf, dass die Rauigkeit der Oberfläche eine lokale Druckschwankung hervorgerufen kann. In unserem Fall ist die Druckerhöhung gegenüber dem Wert aus der Makrowelt eher gering, so dass der Einfluss des Druckes im Fluid auf die Verformung der Festkörper vernachlässigt werden kann. Wird jedoch die Gleitgeschwindigkeit entsprechend hoch und die Spalthöhe gering wird ein elastohydrodynamischer Zustand

erreicht in dem Drücke von mehreren tausend bar erreicht werden können. In diesem Fall spielen lokale Effekte im Hinblick auf die Festigkeit und den Reibwert durchaus eine Rolle.



Abb. 8: Druckverteilung im Fluid [N/mm²]

Zusammenfassung

Der in diesem Artikel vorgestellte Ansatz ermöglicht unter der Verwendung kommerzieller und freier Softwaretools eine Berechnung von geschmierten Friktionskontakten in Mischreibungsgebieten. Durch den Einsatz der Methode zur stochastischen Generierung technischer Oberflächen ist dieser Ansatz durchgängig virtuell. Die stochastischen Oberflächen wurden hergestellt unter Verwendung der Fouriertransformation und der stochastischen Optimierungsalgorithmen. Die Berechnung der Mischreibung erfolgte mit Hilfe der Finiten Element Methode. Als Demonstrator der Methode fungierte ein axiales Gleitlager.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers

Ordinarius für Maschinenkonstruktionslehre und Produktentwicklung und Leiter des Institutes für Produktentwicklung IPEK der Universität Karlsruhe (TH)

Dipl.-Ing. Lukas Nowicki

Wissenschaftlicher Angestellter am IPEK, Institut für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe (TH)

Dipl.-Ing. Hans-Georg Enkler

Wissenschaftlicher Angestellter am IPEK, Institut für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe (TH)

Literatur

- [1] Rometsch, R, Letzner, R-D, „Rauheitsmessung, Theorie und Praxis“, Hommelwerke GmbH, Schnurr Druck, 1993.
- [2] DIN EN ISO 13565, „Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren“, Part 1 till Part 3. Hrsg, Deutsches Institut für Normung. Berlin, Köln: Beuth-Verlag, 1997.
- [3] Sundararajan, D, „The Discrete Fourier Transform“, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, 2001.
- [4] Kursawe, F, Schwefel, H-P, „Optimierung mit Evolutionären Algorithmen“, Automatisierungstechnische Praxis, vol. 39 nr. 9, 1997, page 10-17.
- [5] Rechenberg, I, „Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution“, Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973
- [6] Albers, A., Nowicki, L., Minx, J.: A method for the consideration of influences of the surface roughness on the behaviour and design of global systems, 15th International Conference on Engineering Design ICED 05, Melbourne, Australia, August 15th-18th 2005

Bitte per Post oder Fax senden:

Tel.: +49 (0)8092-83550

Fax: +49 (0)8092-83551

e-mail: info@nafems.de

Adresse für Fensterkuvert



NAFEMS Kontakt DACH & Nordic
Schillerstr. 6

D-85567 Grafing
Germany

Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe 5

Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

- | | |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft | <input type="checkbox"/> NAFEMS World Congress 2007 (Vancouver, CAN) |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“ | <input type="checkbox"/> Registered Analyst Zertifizierung |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare | <input type="checkbox"/> EU-Projekte |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse | <input type="checkbox"/> Internationale Arbeitsgruppen |

Bitte nehmen Sie mich in Ihren Verteiler auf.

Senden Sie das NAFEMS Magazin bitte auch an meine/n Kollegen/in (Adresse unten).

Ich möchte folgendes zum NAFEMS Magazin anregen:

Ich interessiere mich für Werbe-/Stellenanzeigen - bitte senden Sie uns die Mediadaten zu.

Absender

Firma: _____

Abt.: _____

Titel, Vor-/Nachname: _____

Straße: _____

PLZ-Ort: _____

Tel.: _____

Fax: _____

e-mail: _____

Bitte senden Sie das NAFEMS Magazin auch an:

Firma: _____

Abt.: _____

Titel, Vor-/Nachname: _____

Straße: _____

PLZ-Ort: _____

Tel.: _____

Fax: _____

e-mail: _____