

NAFEMS

Mit Stellenmarkt

Online-Magazin

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

Materialcharakterisierung von faserverstärkten Kunststoffen unter Berücksichtigung des postkritischen Verhaltens

Daimler –
Universität München – UAS Weingarten

Numerische Homogenisierung für viskoelastische Faserverbundwerkstoffe

Fraunhofer ITWM –
Stanford University – DHBW

Rapid CFD für die frühe konzeptionelle Design Phase

Fraunhofer IGD – TU Darmstadt

Optimierung einer Sandungsanlage für Straßenbahnen mithilfe numerischer Simulation der Sand-Luft-Zweiphasenströmung

ViF – TU Graz – Knorr-Bremse

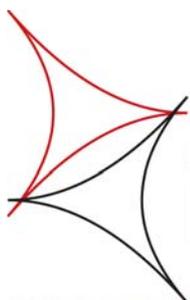
Simulation eines neuen thermodynamischen Wärmekraftprozesses

FH Schmalkalden

Neuigkeiten
Stellenmarkt
Veranstaltungskalender
Schulungen

Neues Jobportal speziell für CAE-Ingenieure:
www.CAE-Stellenmarkt.de
Ab 1. Mai online – 14 Tage kostenlos inserieren – S. 20

Vortragsprogramm
auf Seiten 10 - 15



NAFEMS DEUTSCHSPRACHIGE
KONFERENZ '12

8. – 9. MAI | BAMBERG, DEUTSCHLAND

BERECHNUNG UND SIMULATION – ANWENDUNGEN, ENTWICKLUNGEN, TRENDS

- Keynote-Vorträge:
Dr.-Ing. R. Sundermeier (Volkswagen)
Prof. Dr.-Ing. P. Wriggers (Univ. Hannover)
- 98 Fachvorträge in 28 Sessions
- Große Fachausstellung
- FEM und CFD Trainingskurse
- Neutral, übergreifend, unabhängig!
- Jetzt anmelden: www.nafems.org/dach2012

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

Sehr geehrte Leserin,
sehr geehrter Leser,

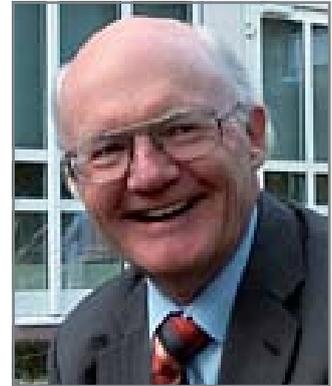
NAFEMS ist eine software-unabhängige Institution mit weltweit über 1000 Mitgliedern. Sie hat es sich zum Ziel gesetzt, numerische Simulationen in unterschiedlichsten Anwendungsfeldern effektiv zu fördern, damit sie erfolgreich und qualitativ hochwertig ausgeführt werden. Das geschieht zum Einen durch überregionale Aktivitäten wie den alle zwei Jahre stattfindenden NAFEMS World Congress und allgemein zugängliche Publikationen wie das Magazin *Benchmark* oder die Bücher „How to ...“ und „Why do ...“. Zum Anderen existiert in NAFEMS aber auch eine Reihe von regionalen Gruppierungen, die jeweils in ihrem Einflussbereich dazu beitragen, die Simulation voranzubringen. Für den deutschsprachigen Raum ist das die sogenannte DACH-Organisation, deren Name auf die beteiligten Länder Deutschland, Österreich und die Schweiz entsprechend deren Autokennzeichen hinweist. In langjähriger Tradition veranstaltet DACH regelmäßig Seminare zu fachspezifischen Themen; auch dieses online Magazin wird von DACH herausgegeben. Zudem findet in diesem Jahr zum ersten Mal eine Konferenz für den deutschsprachigen Raum statt. Am 8. und 9. Mai werden in Bamberg profunde Kenntnisse und neueste Entwicklungen auf vielen Anwendungsgebieten der Simulation vorgestellt und diskutiert. Für viele der genannten Veranstaltungen und Publikationen erhalten NAFEMS-Mitglieder erhebliche Preisnachlässe. Sollte Ihre Firma oder Ihr Institut noch kein Mitglied sein, so wäre das zumindest eine Überlegung wert.

Das vorliegende Heft 21 des Magazins enthält in seinem wissenschaftlichen Teil fünf Beiträge. Vier davon stammen aus Seminaren, die im April 2011 stattgefunden haben. Aus dem Seminar *Fortschritte in der Simulation von Composites* wird eine Materialcharakterisierung von faserverstärkten Kunststoffen nach Erreichen der Versagensgrenze untersucht; hierzu werden die physikalisch begründeten Modelle von Pinho und Camanho verwendet. Auf der Basis der Mikromechanik werden zudem Wege zur Homogenisierung kurzfaserverstärkter Verbunde unter Berücksichtigung viskoelastischen Verhaltens aufgezeigt. In dem Seminar *Die Integration von Strömungsberechnungen (CFD) in den Produktionsentwicklungsprozess* wurde unter anderem über die Nutzung von Graphik-Prozessoren für die Strömungsberechnung in Echtzeit berichtet, einem sehr leistungsfähigen Vorgehen, das sich für den Einsatz in der Entwurfsphase eignet. Zudem wurde dargelegt, wie sich mit Hilfe einer numerischen Simulation der Sand-Luft-Zweiphasenströmung der Sandverbrauch einer Sandungsanlage für Straßenbahnen minimieren lässt. In dem fünften Beitrag wird die Idee einer neuen Wärmekraftmaschine vorgestellt, die mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden kann; ihr thermodynamischer Prozess wird simuliert.

Ich wünsche mir, dass bei dieser Auswahl auch für Sie etwas Interessantes dabei ist.

Mit freundlichen Grüßen

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



Prof. Dr.-Ing.
Klaus Rohwer

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



www.altair.com



www.ansys-germany.com



www.esi-group.com



www.intes.de



www.mscsoftware.com



Leading MBS Technology
for Technology Leaders

www.simpack.com

Über NAFEMS

NAFEMS ist eine not-for-profit 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), (TU Berlin / Femcos mbH), D
 R. L. Dreisbach (The Boeing Company), USA
 D. Ellis, Idac Ltd., UK
 G. Miccoli, Imamoter, I
 S. Morrison, Lusas Ltd., UK
 P. Newton, GBE, UK
 M.-C. Oghly, Flowmaster, F
 A. Ptchelintsev, Nokia, FI
 A. Puri, Selex Sensors & Airborne Systems, UK
 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. A. Gill (Ansys Germany GmbH)
 Dr.-Ing. R. Helfrich (Intes GmbH)
 Dipl.-Ing. G. Müller (Consultant, ehemals Siemens AG)
 Dr.-Ing. G. Müller (CADFEM GmbH)
 Dipl.-Ing. W. Moretti (Schindler Elevator Ltd)
 Dipl.-Ing. F. A. Muggli (Sulzer Innotec)
 Dipl.-Ing. F. J. H. Peeters (Abaqus Europe BV)
 Dipl.-Ing. A. Pfaff (MSC.Software GmbH)
 Prof. Dr.-Ing. K. Rohwer (DLR)
 Dr. A. Svobodnik (Konzept-X)
 Prof. Dr.-Ing. habil. M. Zehn (TU Berlin / Femcos mbH)

Mitglied bei NAFEMS?

NAFEMS hat weltweit über **1.000 Mitgliedsunternehmen und -Institutionen**.

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 1.000 Organisationen weltweit

Werden auch Sie Mitglied !



Benchmark, das internationale NAFEMS Magazin, behandelt in der aktuellen Januar-Ausgabe folgende Themen:

- Interactive Simulation on a Smart Phone
 - Rocket Science
 - NAFEMS Conferences
 - Accelerating Design at Ford
 - Stress Time Signals on a Railway Vehicle
 - Vendor View: Albrecht Pfaff, MSC.Software
 - Icons of CFD: Lewis Fry-Richardson
- ... sowie regelmäßige Rubriken und Features:
 The CAE Guy, CAE news, events, ...

Die nächste Ausgabe erscheint im April 2012.
Jetzt abonnieren – für Mitglieder natürlich frei!

www.nafems.org

Impressum

Editor-in-Chief

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

Redaktioneller Beirat

Gerhard Müller
Consultant, ehem. Siemens AG
Dr. Alfred Svobodnik
Konzept-X
Prof. Dr. Manfred Zehn
TU Berlin / Femcos mbH

Redaktion

Albert Roger Oswald
Tel. +49 (0) 80 51 - 96 74 - 3 22
roger.oswald@nafems.org

Gestaltung / Layout / Anzeigen

Werbos GbR
Osterham 23, D-83233 Bernau
Tel. +49 (0) 80 51 - 96 74 - 3 22
Fax +49 (0) 80 51 - 96 74 - 3 37
Mobil +49 (0) 176 - 217 984 01
e-mail: info@werbos.de
www.werbos.de

Bezugspreis / Aboservice

Kostenlos
Tel. +49 (0) 80 51 - 96 74 - 3 22
magazin@nafems.de

Anzeigenpreise

Preisliste vom 01.01.2012

Verteilung / Bezug

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

Copyright © 2012, Werbos GbR.

Nachdruck – auch auszugsweise -, Ver-
vielfältigung oder sonstige Verwertung
ist nur mit schriftlicher Genehmigung
unter ausdrücklicher Quellenangabe
gestattet. Gekennzeichnete Artikel
stellen die Meinung des Autors, nicht
unbedingt die Meinung der Redak-
tion dar. Für unverlangt eingesandte
Manuskripte und Datenträger sowie
Fotos übernehmen wir keine Haftung.
Alle Unterlagen, insbesondere Bilder,
Zeichnungen, Prospekte etc. müssen
frei von Rechten Dritter sein. Mit der
Einsendung erteilt der Verfasser / die
Firma automatisch die Genehmigung
zum kostenlosen weiteren Abdruck
in allen Publikationen von NAFEMS,
wo auch das Urheberrecht für ver-
öffentlichte Manuskripte bleibt. Eine
Haftung für die Richtigkeit der Veröf-
fentlichungen kann trotz Prüfung durch
die Redaktion vom Herausgeber nicht
übernommen werden.

Alle Produkt- und Firmennamen sind
eingetragene Waren- bzw. Markenzei-
chen ihrer jeweiligen Hersteller.

Vorwort des Editor-in-Chief..... 2

Sponsoren 3

NAFEMS Übersicht 4

Inhalt / Impressum 5

NAFEMS Training

 Schulungstermine 7

 e-Learning Kurstermine..... 7

 Werden Sie NAFEMS Trainer 7

 Trainingskurs: Einführung in die praktische Anwendung der FEM..... 8

 Trainingskurs: Introduction to CFD Analysis: Theory & Applications..... 9

NAFEMS Veranstaltungen

 Deutschsprachige Konferenz 2012 10 - 15

 Weitere NAFEMS Konferenzen 2012 15

 Call for Papers: European Multiphysics Simulation Conference..... 16

NAFEMS Mitgliedschaft im Detail..... 17

NAFEMS Literatur

 Buchbesprechung, Bestellvorgang 18

 Neuerscheinungen, Schreiben Sie ein Buch, e-Library 19

Stellenanzeigen

 www.CAE-Stellenmarkt.de 20

 AeroFEM / DYNAMore / Virtual Vehicle 21 - 23

Neuigkeiten..... 24 - 39

Veranstaltungskalender 40 - 41

Fachbeiträge zu Composites

**Materialcharakterisierung von faserverstärkten
Kunststoffen unter Berücksichtigung des
postkritischen Verhaltens** 42 - 60

 C. Mildner, N. Dölle, D. Moncayo, L. Aktay (Daimler AG);
 K. Drechsler (Universität München); R. Bjekovic (UAS Weingarten)

**Numerische Homogenisierung für viskoelastische
Faserverbundwerkstoffe** 61 - 69

 H. Andrä, M. Kabel, S. Staub (Fraunhofer ITWM);
 F. Krzikalla (Stanford University); V. Schulz (DHBW Mannheim)

Fachbeiträge zu Strömungsberechnungen (CFD)

Rapid CFD für die frühe konzeptionelle Design Phase 70 - 79

 D. Weber, S. Pena Serna (Fraunhofer IGD);
 A. Stork, D. W. Fellner (Fraunhofer IGD / TU Darmstadt)

**Optimierung einer Sandungsanlage für Straßenbahnen
mithilfe numerischer Simulation der Sand-Luft-
Zweiphasenströmung** 80 - 92

 S. Möller, D. Langmayr (ViF); G. Brenn (TU Graz);
 P. Krieg (Knorr-Bremse GmbH)

Fachbeitrag zu Thermodynamik

**Simulation eines neuen thermodynamischen
Wärme kraftprozesses** 93 - 109

 C. Kühhirt, S. Sieder, R. Pietzsch, F. Beneke
 (FH Schmalkalden)

Rückmeldeformular 110 - 111



„NAFEMS Membership is a must for all those truly involved with numerical analysis, for continuous improvement and learning and sharing of experience.“

Instituto Tecnologico de Aragon

Creating Awareness | Delivering Education | Stimulating Standards



NAFEMS is the International Association for the Engineering Analysis Community: an independent, not-for-profit, international membership association, owned by its members. The scope of its activities encompasses all simulation technology, including Finite Element Analysis and Computational Fluid Dynamics. As new application areas and techniques constantly evolve, NAFEMS becomes involved to create awareness and deliver appropriate education and training.

NAFEMS publications and benchmarks are widely regarded within the engineering analysis community as the most authoritative source of information available. The areas covered by NAFEMS are expanding year by year with the growth in membership, and people increasingly view NAFEMS as a one-stop shop for all aspects of information on engineering analysis.

For engineering analysts, NAFEMS offers an excellent platform for continuous professional development.

**Get Involved.
Join NAFEMS Today.**

www.nafems.org

Schulungstermine

Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications
 Bamberg, D - im Rahmen der deutschsprachigen Konferenz
 Inhalte und Infos auf Seite 9
www.nafems.org/events/nafems/2012/cfd-may2012/

Einführung in die praktische Anwendung der FEM
 Bamberg, D
 Inhalte und Infos auf Seite 8
www.nafems.org/events/nafems/2012/dach-fea2/

Nächste Termine

08. - 09. Mai

11. - 13. Juni

e-Learning Kurstermine

E-Learning ermöglicht schnelle, höchst effektive und kostengünstige Trainings. Hier werden Grundlagen vermittelt, die für die sichere und zuverlässige Anwendung kommerzieller Softwareprogramme wichtig sind.

Advanced Dynamic FE Analysis

Non-Linear Analysis

Elements of Turbulence Modeling

Essentials of Fluid Mechanics for CFD

Fatigue & Fracture Mechanics

Composite FE Analysis

Structural Optimization

Practical Introduction to CFD

Basic FE Analysis

FEM-Grundlagen für Konstrukteure - Basis für „Einführung in FEM“

www.nafems.org/e-learning

Nächste Termine

3. April, 3 Wo.

5. April, 4 Wo.

1. Mai, 3 Std.

siehe Web

siehe Web

siehe Web

siehe Web

siehe Web

siehe Web

Werden Sie NAFEMS Trainer

NAFEMS Course Tutors Required

Due to an expansion in training activities at NAFEMS, we currently require additional tutors to work with our current team on presenting and running a number of NAFEMS FEA training courses.

A typical tutor will be well experienced in FEA across a range of Industrial sectors. The tutor will be able to draw on direct experience to relate to the training material and the way it is presented. The Tutor should have a background in teaching in either Industry or Academia. The right candidate will have a passion for FEA and have the ability to impart that to attendees.

Full details are available at www.nafems.org/tutors

NAFEMS wird das Schulungsangebot regional und international ausbauen und sucht Ingenieure aus Industrie und Hochschule, die gerne (nebenbei) als Referenten arbeiten möchten.

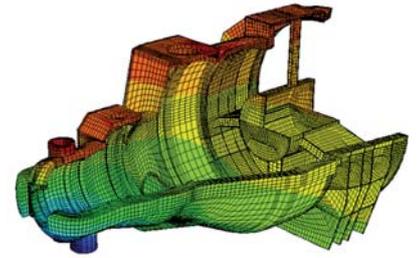
Bei Interesse senden Sie bitte eine e-mail an info@nafems.de

www.nafems.org/tutors

3-tägiger NAFEMS Trainingskurs FEM

Einführung in die praktische Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM)

11. - 13. Juni in Bamberg / auch als Inhouse-Kurs buchbar



Der Kurs vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die notwendigen Grundlagen für den erfolgreichen und effizienten Einsatz der Finite-Elemente-Methode. Nach Auffrischung von strukturellem Basiswissen, welches für das Verständnis und für die kompetente Auswertung von FE-Berechnungen unerlässlich ist, wird auf leicht verständliche Art erklärt, wie die FE-Programme arbeiten. Zahlreiche einfach gehaltene, anwendungsspezifische Beispiele aus der Industrie unterstützen die Diskussion um Voraussetzungen für adäquate Modellbildung und liefern wertvolle Tipps für die professionelle Darstellung und Interpretation der Ergebnisse.

Ingenieure und Konstrukteure, welche ihre Kenntnisse in Technischer Mechanik bzw. Festigkeitslehre aus der Studienzeit im Hinblick auf die Anwendung bei FE-Simulationen auffrischen und ausbauen möchten, sind besonders angesprochen. Der Kurs wird in einer Workshop-Atmosphäre durchgeführt, wodurch eine aktive Mitwirkung gefördert wird.

Inhalte

- Einführung, Grundbegriffe und Prinzipien
 - Freiheitsgrade / Lagerung / Freischneiden / Gleichgewichtsbetrachtung
 - Innere Kräfte / Beanspruchung / Schnittgrößen
 - Spannungszustände / Hauptspannungen
- Typische Beanspruchungsfälle
- Werkstoffparameter / Versagenshypothesen / Sicherheitsfaktor
- Wechsel- und Dauerfestigkeit, Ermüdung und Kerbwirkung
- Thermische Beanspruchung
- Spannungen und Verformungen in dünnwandigen Strukturen
- Stabilitätsprobleme: Knicken und Beulen
- Grundlagen der Elastodynamik / Schwingungen / Dynamische Beanspruchung
- Modellbildung als ingenieurmäßiger Prozess / Möglichkeiten und Grenzen der Vereinfachung
- Lineare und nichtlineare Problemstellungen
- Wie funktioniert FEM?
- Typische Finite-Elemente (1D, 2D und 3D) zur diskreten Beschreibung deformierbarer Körper
- Berücksichtigung von Symmetrien bei der Modellierung
- Modellierung von Materialverhalten / Evaluation von Versagenskriterien
- Dynamische FE-Berechnungen / Modale Analyse / Dämpfung / Transiente Schwingungen
- Thermische / thermo-mechanische Untersuchungen
- Beispiele für nichtlineare FE-Simulationen
- Voraussetzungen für effiziente FE-Modelle und zuverlässige Ergebnisse
- Optimale FE-Modelle dank gezielter Nutzung der Möglichkeiten von CAD-Software
- Tipps und Tricks für problemgerechte FE-Vernetzung
- Qualitätssicherung bei FE-Analysen / Ursachen möglicher Fehler bei der FE-Modellierung und Tipps für deren Erkennung
- Möglichkeiten zur Überprüfung der Ergebnisse
- Fallbeispiele / Workshop / Diskussion

Referent



Dr. sc. techn. ETH/SIA
Yasar Deger

Herr Deger hat langjährige, breitgefächerte Erfahrung in der Praxis der FEM und in der Angewandten Mechanik. Er ist als Dozent für Technische Mechanik und FEM an der HSR, Hochschule für Technik Rapperswil, in der Schweiz tätig und erteilt ausserdem seit 1992 Weiterbildungskurse / Workshops für Konstrukteure und Ingenieure in der Industrie. Sein Buch „Die Methode der Finiten Elemente“ erscheint beim Expert Verlag in der 5. Auflage und ist Teil der Kursunterlagen.

Kurssprache

Deutsch

Inhouse-Kurs

Dieser Kurs wird auch als Inhouse-Kurs bei Ihnen vor Ort angeboten. Bitte fordern Sie nähere Informationen unter Verwendung des Rückmeldeformulars auf der vorletzten Seite an.

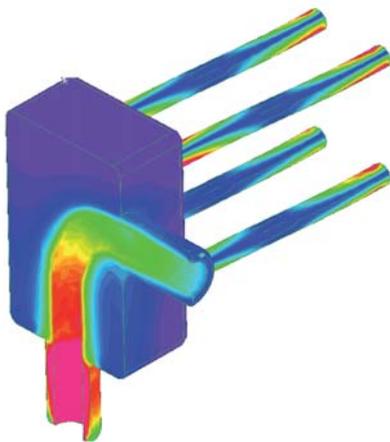
www.nafems.org/events/

2-tägiger NAFEMS Trainingskurs CFD

Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications

08.-09. Mai in Bamberg / auch als Inhouse-Kurs buchbar

Der Kurs vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung (CFD). Neben der Funktionsweise von Programmen, die anhand zahlreicher einfacher Beispiele erläutert wird, steht die Vermittlung des gesamten Lösungsprozesses im Vordergrund. Mit Hilfe von Beispielen wird der gesamte Prozess vom realen Bauteil über das Berechnungsmodell bis zur Interpretation der Ergebnisse gezeigt und auf mögliche Fehlerquellen hingewiesen. Der Kurs wird in einer Workshop-Atmosphäre durchgeführt, die die Teilnehmer zur Mitarbeit bzw. zum Einbringen eigener Fragestellungen einlädt.



Inhalte

- Einleitung / Übersicht
- Welche Gleichungen werden in einem CFD-Programm gelöst?
- Beschreibung der Finite-Volumen Methode zur Lösung der Gleichungen anhand von Beispielen, Darstellung von Problemen / Fehlerquellen beim Lösungsprozess

- Tipps und Hinweise zur CFD-Vernetzung
- Praktische Umsetzung: Vom realen Bauteil zum Simulationsmodell
 - Überlegungen vor der Simulation
 - Annahmen und Voraussetzungen
 - Randbedingungen
 - Gittergenerierung
 - Erläuterung der Probleme an einem Praxisbeispiel
- Qualität von CFD-Berechnungen
 - Überprüfung von CFD-Ergebnissen / Kontrollmöglichkeiten
 - Bewertung der Ergebnisse von CFD-Berechnungen
- Ausblick auf weitere Entwicklungen / Tendenzen in der CFD-Welt (FSI, Optimierung,..)
- Fallbeispiele / Workshop / Diskussionen

Kursprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

Inhouse-Kurs

Dieser Kurs wird auch als Inhouse-Kurs bei Ihnen vor Ort angeboten. Bitte fordern Sie nähere Informationen unter Verwendung des Rückmeldeformulars auf der vorletzten Seite an.

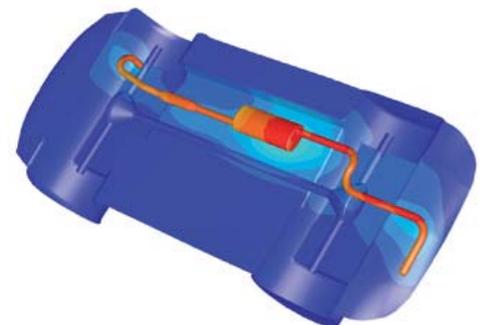
www.nafems.org/events/

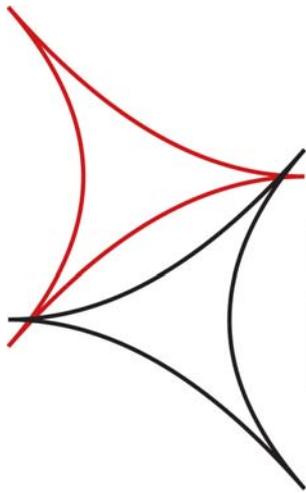
Referent



Prof. Dr.-Ing.
Peter Farber

Herr Farber hat langjährige Praxiserfahrung auf dem Gebiet der Strömungsberechnung. An der Hochschule Niederrhein gründete er 2005 das IMH - Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen. Seit 2006 ist er Leiter des Instituts und in zahlreichen Forschungsprojekten und Industriekooperationen mit unterschiedlichen Anwendungen der Strömungsberechnung aktiv.





NAFEMS DEUTSCHSPRACHIGE KONFERENZ

'12

8. – 9. MAI | BAMBERG, DEUTSCHLAND

BERECHNUNG UND SIMULATION – ANWENDUNGEN, ENTWICKLUNGEN, TRENDS

Die Welt steht derzeit vor wahrhaft globalen Herausforderungen. Die ökologischen Wandlungen mit nicht abzusehenden Folgen, die Suche nach neuen Energiequellen und ein schier unbegrenztes Wachstum der Erdbevölkerung erfordern auf allen Gebieten die Bereitschaft, neue Wege zu gehen.

Diese gravierenden Veränderungen führen auch zu neuen Herausforderungen im Ingenieurbereich und verlangen nach Entwicklung und dem Einsatz neuer Technologien. Eine große Chance bieten Simulationsverfahren, die sich aufgrund der rasch fortschreitenden Leistungsfähigkeit von Computern und dazugehöriger Anwendungssoftware an vielen Stellen etabliert und den Nutzeffekt überzeugend bewiesen haben. Der Fortschritt dieser Verfahren erlaubt es, immer genauere Ergebnisse zu liefern und immer stärker in Design-Entscheidungen einzugreifen.

Die Finite-Element-Methode ermöglicht es, beispielsweise die Lebensdauer dynamisch beanspruchter Bauteile zu prognostizieren, aber auch das Crashverhalten komplexer Fahrzeugstrukturen. In Verbindung mit immer schnelleren Rechnern können verlässliche Aussagen zu Strömungsphänomenen, z. B. für die Auslegung von Windkraftanlagen, gewonnen werden. Schwingungseigenschaften und akustische Effekte spielen

- Keynote-Vorträge
Dr.-Ing. Ralph Sundermeier (Volkswagen AG)
Prof. Dr.-Ing. Peter Wriggers (Universität Hannover)
- 98 Fachvorträge in 28 Sessions
- Umfangreiche Hard- und Softwareausstellung
- FEM und CFD Trainingskurse
- Neutral, übergreifend, unabhängig!
- www.nafems.org/dach2012

beim Betrieb von Maschinen eine wesentliche Rolle; mittels des Einsatzes von Finite-Element-Verfahren und Mehrkörpersystemen können diese immer besser analysiert und beherrscht werden. Stark in den Vordergrund gerückt sind infolge aktueller Anforderungen Simulationen von elektromagnetischen Effekten. Die angeführten Methoden können gekoppelt werden, um die Wechselwirkung zu simulieren, wodurch eine weiter verbesserte Aussagekraft erreicht wird.

Auch für die Fertigungsvorbereitung spielt die Computersimulation eine bedeutende Rolle, z. B. für Ur-, Umform- und Fügeprozesse. Die Medizintechnik ist ein weiteres Gebiet, in dem diese numerischen Verfahren in immer stärkerem Maße eingesetzt werden. Im industriellen Umfeld muss die Simulationstechnologie in die Arbeitsprozesse in-

tegriert werden. Die Arbeitsabläufe müssen so gestaltet sein, dass die für die Berechnungen benötigten Informationen (Geometrie, Belastungen, Material usw.) aktuell und zeitgerecht verfügbar sind. Eine wesentliche Voraussetzung dafür sind sorgfältig festgelegte Prozesse, die die Schnittstellen zu CAD, zu den Analyse- bzw. Auswerteverfahren und den Testergebnissen berücksichtigen. Eine besondere Bedeutung kommt dabei dem Datenmanagement zu.

Mit der Konferenz bietet NAFEMS eine Plattform, auf der neuen Techniken und Tools präsentiert werden sollen und den Teilnehmern die Möglichkeit geboten wird, auf breiter Basis erfolgreiche Anwendungen und Trends mit Spezialisten aus Forschung und im besonderen Maße aus der Industrie zu diskutieren.

Hard- und Softwareausstellung

Nähere Informationen finden Sie auf der Konferenzwebsite.

Begleitende Trainingskurse

Im zeitlichen Umfeld der Konferenz finden Basis-Trainingskurse zu CFD und FEM statt, die unabhängig von der Konferenzteilnahme gebucht werden können (Seiten 8 - 9).

Tagungssprache

Deutsch

Veranstaltungsort / Hotel

Welcome Kongresshotel Bamberg
www.welcome-hotels.com/de/welcomemotel_bamberg

Anmeldung / Bestätigung

Bitte melden Sie sich online unter www.nafems.org/dach2012 an.

Teilnahmegebühren

Nicht-Mitglieder: Euro 660,—
NAFEMS-Mitglieder: frei*
* NAFEMS Mitglieder erhalten sechs seminar credits (1 credit entspricht 1/2 Seminartag) pro Jahr. Für diese Veranstaltung werden vier credits je Teilnehmer benötigt. Sollten diese bereits verwendet worden sein, können NAFEMS Mitglieder zu einem reduzierten Preis teilnehmen:
Euro 440,—
Preise pro Person zzgl. ges. MwSt.

Konferenzwebseite

www.nafems.org/dach2012

Bitte informieren Sie interessierte Kolleginnen und Kollegen.

Aussteller

- Altair Engineering
- Ansys Germany
- Automotive Simulation Center Stuttgart asc(s)
- Autodesk
- Beta CAE Systems
- Cadferm
- CAE Engineering und Service
- CD-adapco
- CEI
- Dassault Simulia
- Dhcae Tools UG
- DYNAMore
- Dynardo
- Easit - EU-Project
- FE-Design
- Fraunhofer Institut SCAI
- Friendship Systems
- HBM nCode
- Hoppenstedt Verlag
- Ingenieurbüro Huß & Feickert
- Intes
- ISKO Engineers
- Key to Metals
- Mentor Graphics
- MSC.Software
- Nafems
- Siemens PLM Software
- Parsolve
- Win-Verlag

Sponsoren der Konferenz

Platin



Gold



Silber



Medienpartner



Vortragsprogramm, Dienstag, 8. Mai 2012

	Plenum
	PLENARVORTRÄGE – KEYNOTES
09.00 - 09.10	Begrüßung und NAFEMS Einführung W. Dirschmid (Vorsitzender des NAFEMS Lenkungs Ausschusses für Deutschland, Österreich, Schweiz)
09.10 - 09.20	Vorstellung des Platin Sponsors: Siemens PLM Software E. Niederauer (Siemens Industry Software GmbH)
09.20 - 09.55	Keynote-Vortrag: Ist die Berechnung vorbereitet auf die aktuellen Herausforderungen der Automobilindustrie? R. Sundermeier (Volkswagen AG)
09.55 - 10.30	Keynote-Vortrag: Mehrskalige Materialmodellierung P. Wriggers (Univ. Hannover)
10.30 - 11.15	Pause
	Raum 1
	CFD 1
11.15 - 11.40	CFD in der Entwicklung modellgestützter Regelungskonzepte M. Schumacher, M. Hufschmidt, M. Weng (aixprocess PartG); U. Küssel, D. Abel (RTWH Aachen)
11.40 - 12.05	Ein Verbrennungsmodell für entwicklungsbegleitende Strömungssimulationen G. Dumnov, V. Streltsov, L. Weinhold (Mentor Graphics GmbH)
12.05 - 12.30	Einsatz von FloEFD.V5 in der Motorenentwicklung bei Porsche Engineering V. Bevilacqua, M. Benz (Porsche Engineering Services GmbH)
12.30 - 13.45	Mittagspause
	CFD 2
13.45 - 14.10	Anwendungsbezogene Berechnungswerkzeuge versus „Multi-Purpose Codes“: Neue Möglichkeiten im CFD Einsatz durch OpenSource basierte Modellentwicklung U. Heck (Dhcae Tools UG)
14.10 - 14.35	Implementierung eines 3D Vortex-Particle Berechnungsmoduls D. Langmayr, B. Lechner, M. Lieschnegg, V. Wippel (Kompetenzzentrum - Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsges. mbH); A. Domaingo (Bentley Systems Austria GmbH)
14.35 - 15.00	Gasfluss- und Plasmasimulation für Niederdruck - Beschichtungsreaktoren A. Pflug, M. Siemers, T. Melzig, B. Szyszka (Fraunhofer IST)
15.00 - 15.25	Simulation und Validierung einer Fahrzeugdurchströmung mit OpenFOAM O. Herz, C. Mielke (Merkle & Partner GmbH)
15.25 - 16.00	Pause
	CFD 3
16.00 - 16.25	Sensitivitätsanalyse verschiedener Anströmungsgeometrien für ein Verdampfersystem eines Clausius-Rankine-Zyklus zur Abwärmenutzung M. Kley (Hochschule Aalen)
16.25 - 16.50	Simulationen von Mehrphasenströmungen für hydraulische Maschinen F. Muggli (Sulzer Markets & Technology AG); S. Krüger (Sulzer Pumps AG)
16.50 - 17.15	Steigerung der Leistungsfähigkeit von hydrodynamischen Bremsen durch Geometrieoptimierung C. Bartkowiak (Hochschule Aalen)
17.15 - 17.40	Inverse Modellparameterbestimmung für die Simulation von Schüttgutströmungen M. Hufschmidt, M. Weng (aixprocess PartG)
17.40 - 18.00	Pause
	ELEKTROMAGNETISCHE FELDER
18.00 - 18.25	Anwendung von Finite-Element Verfahren zur Berechnung gekoppelter magneto-mechanischer Probleme H. Landes, A. Hauck (Simetris GmbH)
18.25 - 18.50	Simulationsgestützte Auslegung von Lineardirektantrieben mit Maxwell, Simplorer und Ansys M. Ulmer, W. Schinköthe (Univ. Stuttgart)
18.50 - 19.15	Partikelbasierte Simulation magnetorheologischer Flüssigkeiten für die Anwendungen in Kupplungen H. Lagger, C. Bierwisch, J. Peguiron, M. Moseler (Fraunhofer IWM)
20.00	Abendveranstaltung

	Raum 2
	BETRIEBSFESTIGKEIT 1
	Regelwerkskonforme Bestimmung von Erschöpfungsgraden auf Basis allgemein elastisch-plastischer Finite Elemente Analyse J. Rudolph, A. Götz, R. Hilpert (Areva NP GmbH)
	Sensitivitätsanalyse zyklisch belasteter Strukturen mit ANSYS und nCode DesignLife F. Mailänder (Cadferm GmbH)
	Spektrale Schädigungsanalyse für multiaxial stochastisch belastete Komponenten W. Hinterberger, O. Ertl, C. Gaier (Engineering Center Steyr); H. Fleischer (BMW AG)
	OPTIMIERUNG 1
	Das Screening – Ein Prozess zur strategischen Einbindung von Optimierungstechnologien in der Produktentwicklung A. Wischnewski (Altair Engineering GmbH)
	Optimierung und stochastische Analyse auf vielen Anwendungsgebieten M. Kellermeyer (Cadferm GmbH)
	Bauteilauslegung durch einen automatisierten Optimierungsprozess T. Swinden, I. Wendling, S. Hildenbrand (TWT GmbH); A. Strobel (Daimler Trucks North America LLC); F. R. Klimetzek (Daimler AG) ¹⁾
	Schwingungsgerechter Entwurf von Sicken R. Helfrich, J. Müller (Intes GmbH)
	OPTIMIERUNG 2
	Materialparameter-Optimierung für die Crashberechnung in frühen Entwicklungsphasen G. Gruber, D. Klein, S. Wartzack (Univ. Erlangen-Nürnberg)
	Simulation und Ansätze zur Parameteridentifikation eines 1D elektrochemischen Modells von Lithium-Ionen-Zellen M. K. Scharrer, F. Pichler, B. Suhr (Kompetenzzentrum - Das virtuelle Fahrzeug Forschungsges. mbH)
	Methodikentwicklung für die multikriterielle Optimierung eines Verbrennungsmotors unter Verwendung von Meta-Modellen und genetischen Algorithmen R. Wohlgethan, G. Buccilli (EnginSoft GmbH); J. Silvestri, J. Zenker (Gamma Technologies Inc.)
	CAE-basierte Robust Design Optimierung in der virtuellen Produktentwicklung J. Will (Dynardo GmbH)
	BETRIEBSFESTIGKEIT 2
	Hochdruckventiltechnik für automobile Wasserstoffapplikationen – Anforderungen und Übertragbarkeit von Konzepten zur Betriebsfestigkeitsrechnung S. Sellen, S. Maas (Univ. Luxemburg)
	Ermüdungsanalyse von geklebten Metallverbindungen S. Vervoort (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH)
	Berücksichtigung von großen Nichtlinearitäten in einer Betriebsfestigkeitsberechnung in Form von Verschiebungen und Kontakt am Beispiel eines Kugelgelenks T. Kroschwald (Tecosim GmbH)



Welcome Kongresshotel Bamberg

Raum 3

STRUKTUR 1

Strukturmechanische Berechnungen am Sonnenteleskop ATST (Advanced Technology Solar Telescope)
 W. Feickert (Ingenieurbüro Huß & Feickert GbR mbH)

Ein effizienter Ansatz zur Modellierung und Simulation von Spiralseilen
 R. Baumann (Hochschule Luzern)

Homogenisierung bei zylindrisch-periodischen Bauteilen
 D. Kreuter, M. Beiteltschmidt (TU Dresden)

COMPOSITES 1

Composite Tool Chain „As-Built“
 T. Wille, R. Hein (DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.)

Kopplung von Formfüllanalysen und Strukturanalyse zur Festigkeitsberechnung von kurzfaserverstärkten Spritzgussbauteilen
 R. Klawatsch (dTech Steyr – Dynamics & Technology Services GmbH)

Management von Composite Werkstoffdaten zur Unterstützung des CAE Prozesses
 T. Weninger, W. Marsden (Granta Design Ltd.)

FACC Analysis ToolSuite: Effizientes FEM Post-Processing von Luftfahrtstrukturen aus Faserverbundwerkstoffen
 M. Fleischmann, J. Noisternig (FACC AG);
 M. Luxner, C. Schücker (Luxner Engineering ZT GmbH)

COMPOSITES 2

Vorhersage der Festigkeit von kurzfaserverstärkten Kunststoffen mittels Prozess-Struktur-Kopplung
 J.-M. Kaiser, M. Stommel (Univ. des Saarlandes);
 S. Pazour, W. Korte (Part Engineering GmbH)

Schnelles Lösungsverfahren der Lippmann-Schwinger-Gleichungen für die Multiskalensimulation von Composites
 H. Andrä, M. Kabel, J. Spahn, S. Staub (Fraunhofer ITWM)

Zur Verallgemeinerung gängiger mikromechanischer Modelle: Der Quermodul einer UD-Schicht
 A. Bleier (Karl Mayer Textilmaschinenfabrik GmbH);
 H. Schürmann (TU Darmstadt)

Modellierung des Einflusses von Unregelmäßigkeiten in der Mikrostruktur auf das Versagen von UD-Composites
 S. Kilchert, M. May, S. Hiermaier (Fraunhofer EMI)

COMPOSITES 3

Micromechanical Modeling of Failure in Plain and Open Hole Test Coupons under Tensile and Compressive Loading
 S. van der Veen (Airbus); J. Seyfarth, R. Assaker (e-Xstream engineering)

Efficient Nonlinear Multi-Scale Modeling of Composite Structures
 J. Seyfarth, R. Assaker (e-Xstream engineering)

Diskussion
 Leitung:
 K. Rohwer (DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.)

Raum 4

CO-SIMULATION

Robuste (Co-)Simulation gekoppelter Probleme mit einem Fokus auf Fluid-Struktur-Wechselwirkung
 C. Gravemeier, W. Wall (AdCo Engineering GmbH) 12.30 - 13.45

Zielsichere Auslegung und Gestaltung von komplexen mechanischen Systemen mittels Modellbibliothek und Co-Simulation
 J. Zehetner (Kompetenzzentrum - Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsges. mbH) 13.45 - 14.10

Co-Simulation elektromechanischer Systeme am Beispiel eines wirbelstrominduzierten Linearaktors
 C. Simonidis, G. Stengel, R. Schmoll, B. Schweizer (ABB AG) 14.10 - 14.35

Optimierung eines 3D elektro-thermischen Batteriemodells
 M. Koplenig, M. K. Scharrer, B. Suhr, T. Heubrandtner (Kompetenzzentrum - Das virtuelle Fahrzeug Forschungsges. mbH) 14.35 - 15.00

CAD / METHODEN

Neue Ansätze zur effizienten Erstellung von CAD-Geometrie und Simulationsmodellen für die Simulation und Optimierung in der Konzeptphase
 C. Fritz (Contact Software GmbH) 15.00 - 15.25

Kann das nicht automatisch gehen? Theorie und Entwicklung einer Skriptsprache für Z 88 Aurora
 M. Zimmermann, F. Rieg (Univ. Bayreuth) 15.25 - 16.00

Eine Implementierung einer Algebra zur Handhabung von fraktionalem Differentialgleichungen in Matlab/Simulink
 R. Herlein (Fraunhofer LBF) 16.00 - 16.25

UMFORMUNG

Zerspannungssimulation – vom „bunten Bildchen“ in der Forschung zum Handwerkszeug in der Industrie
 J. Leopold, S. Usui, T. Marusich, K. Marusich, H. Elangovan (Third Wave Systems) 16.25 - 16.50

Prozesskettensimulation - Berücksichtigung der Umformhistorie bei strukturmechanischen Analysen
 T. Menke (Cadferm GmbH) 16.50 - 17.15

Programmänderungen vorbehalten.

Vortragsprogramm, Mittwoch, 9. Mai 2012

Raum 1	Raum 2
<p>CFD 4</p> <p>08.15 - 08.40 Ein Beitrag zu CFD-Simulationen von Fertigungstoleranzen P. Farber, K. Farber, N. Kroppen (Hochschule Niederrhein)</p> <p>08.40 - 09.05 Kavitationssimulation für industrielle Anwendungen G. Dumnov, A. Muslaev, V. Streltsov, B. Marovic (Mentor Graphics GmbH)</p> <p>09.05 - 09.30 Vergleichende visuelle Analyse von Simulationsdaten H. Doleisch, W. Freiler (SimVis GmbH)</p> <p>09.30 - 09.55 Visuelle Analysemethoden für das Durchströmungsverhalten einer zentrifugalen Pumpe M. Otto, A. Kuhn, W. Engelke, H. Theisel (Univ. Magdeburg)</p> <p>09.55 - 10.30 Pause</p> <p>CFD 5</p> <p>10.30 - 10.55 CFD Topologie Optimierung einer automobilen Abgasreinigungsanlage M. Stephan, M. Böhm (FE-Design GmbH); V. Schaika (Albonair GmbH)</p> <p>10.55 - 11.20 Aeroakustische Berechnung eines generischen Seitenspiegels unter Verwendung eines hybriden CFD-CAA Ansatzes A. Reppenhausen (Kompetenzzentrum - Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsges. mbH); A. Hüppe (Univ. Klagenfurt); M. Kaltenbacher (TU Wien)</p> <p>11.20 - 11.45 Adjoint Methods in Fluid Mechanical Applications – Examples for Optimization and Data-Assimilation J. Sesterhenn (TU Berlin)</p> <p>11.45 - 12.10 Diskussion Leitung: G. Müller (Consultant, ehemals Siemens AG)</p> <p>12.10 - 13.10 Mittagspause</p> <p>AKUSTIK</p> <p>13.10 - 13.35 Computational Experience with Substructuring in Vibroacoustic Simulations F. Ihlenburg (HAW Hamburg)</p> <p>13.35 - 14.00 Neue Simulationsansätze zur Vorhersage des akustischen Verhaltens von Ansaug- und Abgassystemen Y. Elnemr, R. Veloso, J. Girstmair, F. Reich, E. Nijman (Kompetenzzentrum - Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsges. mbH)</p> <p>14.00 - 14.25 NVH Performance Optimization of Full Vehicles in Automotive H. Gruber, J. Guan (Altair Engineering GmbH)</p> <p>14.25 - 14.50 Berechnung von Schallabstrahlung mit akustischen Finite Elemente: Leistungsfähige Simulation mit dem PML/AML Verfahren P. Segaeert, K. Vansant (LMS International)</p> <p>14.50 - 15.20 Pause</p> <p>Plenum</p> <p>PLENARVORTRÄGE</p> <p>15.20 - 15.45 Predictive Lifecycle Assessment H. Sippel (CAEvolution GmbH); M. Küssner (Consultant)</p> <p>15.45 - 16.10 Green CAE – Simulationstools für die Mobilität von Morgen E. Schelkle (Automotive Simulation Center – asc(s e. V.))</p> <p>16.10 - 16.15 Abschlussworte M. Zehn (TU Berlin, Vice Chairman NAFEMS Council und Mitglied des NAFEMS Lenkungsausschusses für Deutschland, Österreich, Schweiz)</p>	<p>OPTIMIERUNG 3</p> <p>Struktureller Leichtbau durch innovative Formoptimierung M. Firl (FEMopt Studios GmbH)</p> <p>Erweiterte Topologieoptimierung zur Steigerung der Energieeffizienz bei dynamisch bewegten Systemen C. Sander (Karlsruher Institut für Technologie)</p> <p>Strukturelle Optimierung der Aufhängung von heckinstallierten und parametrisierten Turbofantriebwerksmodellen A. Zuchlinski (TU Cottbus)</p> <p>Strukturoptimierung für gewichtsm minimale Systemauslegung F. Heinrich (FE-Design GmbH)</p> <p>METHODEN</p> <p>System-Simulation based System Engineering Development Methodology M. Mahler (Siemens Industry Software GmbH)</p> <p>Isogeometric Analysis: Aktuelle Entwicklungen und Trends in LS-Dyna S. Hartmann (DYNAmore GmbH); D. J. Benson (University of California)</p> <p>Mathematische Analyse einer Verzweigung in Crash-Simulation V. Iza Teran (Fraunhofer SCAI)</p> <p>Solving Bottlenecks in Powertrain FE Analyses I. Makropoulou, A. Perifanis, A. Fassas (BETA CAE Systems S.A.)</p> <p>OPTIMIERUNG 4</p> <p>Geometrieoptimierung eines Radialkompressorlaufrades im Hinblick auf CFD- und FEM-relevante Zielgrößen mit Hilfe von automatisierten Optimierungsmethoden A. Rybacki, M. Geller, C. Schemmann (FH Dortmund)</p> <p>Optimierung von Kräfteinleitungselementen in Kunststoff-Metall-Hybridverbunden N. Majic, A. Albers, M. Spadinger (Karlsruher Institut für Technologie); H. Paul (Fraunhofer IWM)</p> <p>Stochastische Simulation – Ein Abgleich mit Versuchsergebnissen am Beispiel der Deformation eines Vierkantrohrs C. Eichmüller (Volkswagen AG); M. Meywerk (Hochschule der Bundeswehr Hamburg)</p> <p>Effiziente Sensitivitätsanalyse in der industriellen Produktentwicklung T. Most, J. Will (Dynardo GmbH)</p>

Weitere regionale NAFEMS Konferenzen:



Raum 3

STRUKTUR 2

Bewertung von Kerbgrundbelastungen mit Ansys und LS-Dyna

H. Beck (Ingenieurbüro Huß & Feickert GbR mbH)

Transient dynamische Simulation der Kollision eines Schneepfluges mit einem Hindernis auf der Straße

M. Züger (pinPlus AG)

Fußgängerinduzierte Schwingungen auf Brücken und deren Bedämpfung am Beispiel des Salzachsteges

N. Romen (HFR Ingenieure GmbH)

Automatisierte Simulation von Elastomerdichtungen

I. Nitsopoulos, G. Sukarie (ISKO Engineers AG)

MATERIAL

Entwicklung eines vereinfachten Ersatzmodells für strukturierte Bleche mittels Homogenisierungsmethode

T. de Silva, A. Kühhorn, M. Golze (TU Cottbus)

Praxisgerechte Messung von Materialkanten am Beispiel eines unverstärkten Kunststoffes und eines Glasfaser-Gewebes

R. Paßmann (Beratender Ingenieur);

J. Förster, E. Preis (EDAG GmbH & Co.KGaA)

Entwicklung einer Datenbank mit fortgeschrittenen Werkstoffeigenschaften

J. Heinemann, V. Pozeit (Key to Metals AG)

Gewinnung von Fließkurven aus 3-Punkt-Biegeversuchen mittels analytischen und numerischen Ansätzen

C. Wehmann, F. Rieg (Univ. Bayreuth);

E. Böhm (Hochschule Ravensburg-Weingarten)

STRUKTUR 3

CAE-Analyse der Gleitlager moderner Hochleistungsröntgenröhren

M. Hainke, W. Schäff, W. Strob (Siemens AG Healthcare Sector)

Beschleunigung der Kolbenberechnung durch hochgradige Prozessautomatisierung

R. Meske (Federal-Mogul Nürnberg GmbH)

Das Verhalten und die Modellierung von Bauteilen aus Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten

J. Ozbolt (Univ. Stuttgart);

A. Sharma (Bhabha Atomic Research Centre)

Kontrollierte Faltenbildung an Funktionsoberflächen technischer Systeme und ihre numerische Analyse

M. Achenbach (Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG)

Raum 4

SIMULATIONS-DATENMANAGEMENT - SDM

Aktuelle Standards und Empfehlungen für die CAE Daten- und Prozessintegration

J. Boy (ProStep AG)

Eine virtuelle Entwicklungsplattform zur gekoppelten Simulation am Beispiel Gesamtfahrzeug

S. Bindick, C. Lange, C. Lund (Volkswagen AG)

Herausforderung XIL-Datenmanagement

S.Thiel, T.Gruber (Audi AG)

Material Lifecycle Management - Drivers and Requirements

R. S. Sadeghi, U. Heinzel (HD Solutions GmbH);

E. Niederauer (Siemens Industry Software GmbH)

MEHRKÖRPERSIMULATION - MKS

Simulation und Optimierung von Großdiesel und -gasmotoren innerhalb eines Simulations Workflows

A. Rieß, S. Sprengler, A. Linke (MAN Diesel & Turbo SE);

R. Hoppe (Univ. Augsburg/Univ. Houston)

Virtuelles Testen zur Risikominimierung bei hochdynamischen Tests von Hochauftriebssystemen

T. Ulmer (Airbus Operations GmbH);

A. Frenzel (EADS Deutschland GmbH)

Genauere Modellierung von Wälzlagern in der Mehrkörperdynamik für effizientes virtuelles Testen

J. Beuse, T. El-Dsoki, C. Rachor, J. Zeischka (MSC.Software GmbH)

Das Interface der neuen Simpack Version 9 zu Finite-Element Programmen

S. Dietz (Simpack AG)

08.15 - 08.40

08.40 - 09.05

09.05 - 09.30

09.30 - 09.55

09.55 - 10.30

10.30 - 10.55

10.55 - 11.20

11.20 - 11.45

11.45 - 12.10

12.10 - 13.10

13.10 - 13.35

13.35 - 14.00

14.00 - 14.25

14.25 - 14.50

14.50 - 15.20

Programmänderungen vorbehalten.



NAFEMS European Conference MULTIPHYSICS SIMULATION 2012

16 - 17 October 2012 Frankfurt | Germany

Call for Papers & Announcement

NAFEMS is pleased to announce the first European Multiphysics Conference. The aim of the conference is to give an overview of advances in state-of-the-art methods and to demonstrate the benefits to industry of Multiphysics Simulation within the context of CAE. The conference will address the development of numerical methods for strongly coupled physical processes in industrial and advanced research applications.

Conference contributions may deal with coupling of physical models, but also realisation of multi-scale models, combinations of 1D and 3D simulations and extending multiphysics simulation to system levels. The ultimate goal is to bring together the multiphysics community consisting of researchers from academia, engineers from industry and commercial solution providers to discuss the current status and to drive the future of multiphysics and multi-scale simulations.

The conference will be organized by NAFEMS in collaboration with Fraunhofer NUSIM and The International Society of Multiphysics.

Fields of interest

Multiphysics modelling and simulation has a number of constitutive components: numerical methods, physical models, software issues and application areas. Contributions to this NAFEMS Multiphysics Conference should deal with these different aspects and clearly demonstrate how different models, nume-

rical representations and scientific domains have been combined for the targeted application.

Multiphysics combination methods

Multiphysics simulation means that data, models, and software from a variety of engineering or scientific domains need to be combined in a single solution environment. Depending on the available tools and methods, there are different levels of multiphysics solution integration.

Simulation domains

Various computational science branches and simulation paradigms have been developed over the last decades and have reached a sufficient level of acceptance in the engineering community (both industrial and research). However it is still a fact that combining software solutions, physical models and even numerical methods from different domains is still a difficult task and is limited to a (small) group of 'multiphysics experts'. One major goal of this conference is to show how such interactions between the domains have been solved successfully.

General issues

Multiphysics modelling and simulation in general raises a lot of challenges and questions at different levels:

The conference will include keynotes, exhibits and breakout sessions with user presentations.

You are cordially invited to submit an abstract.

Scientific committee

- Henrik Nordborg, Chair, HSR Rapperswil, Switzerland
- Klaus Wolf, Vice-chair, Fraunhofer Institute SCAI, Germany
- Moji Moatamedi, Vice-chair, Narvik University College, Norway
- Alfred J. Svobodnik, Vice-chair, Konzept-X, Germany

Exhibition and sponsoring

The conference will be accompanied by an exhibition of software and hardware vendors, solution providers, and consultants. There are several exhibition and sponsoring opportunities available.

Abstract

Deadline for receipt of abstracts:

14 May 2012

Please send by e-mail to roger.oswald@nafems.org.

Conference language

English

Venue and accommodation

Holiday Inn Frankfurt Airport-North Isenburger Schneise 40, D - 60528 Frankfurt, Germany
www.frankfurt-airport-hi-hotel.de
Easy access from Frankfurt Airport by free hotel shuttle service. Delegates traveling by train can travel to Frankfurt airport and use free hotel shuttle service.

The conference will be organized by NAFEMS in collaboration with



MULTIPHYSICS
The International Society
of Multiphysics

www.multiphysics.org

and



www.nusim.fraunhofer.de

Conference website

www.nafems.org/mp2012



Membership to suit you

NAFEMS offers several membership options to suit all of those within the engineering analysis community:

Site membership

A full range of benefits for larger corporations based at one location

NAFEMS site membership provides multiple benefits to your analysis team, including:

- A publication library including your chosen NAFEMS textbooks, reports, how-to guides and benchmarks
- Copies of all new publications as and when they are produced
- Places at a choice of seminars, held regularly and internationally each year
- Benchmark magazine subscription
- Heavily discounted seminars, training courses, e-learning courses and conferences
- Access to members area of the NAFEMS website which gives access to technical papers, seminar proceedings and more
- Networking opportunities with more than 1000 member companies
- Unrivalled exposure of your company within the engineering analysis arena

Corporate membership

Tailored membership for large companies with multiple locations

The very nature of analysis and simulation is constantly changing as companies expand globally to meet the needs of an exponentially growing user base. Multinational corporations are at the forefront of analysis technology, and require much more from NAFEMS than standard benefits for one location.

In response to this, NAFEMS has developed a corporate membership model, aimed specifically at large multinational companies who need to share the benefits of membership over many physical locations.

Corporate Membership is tailored specifically to meet the needs of your company. This allows you to create your own NAFEMS membership which gives your company the benefits you need.

Small company membership

Cost-effective membership for small to medium sized enterprises

NAFEMS recognises that being a small company has its own unique set of circumstances. This is why we can offer a cost-effective option for smaller companies with a limited budget.

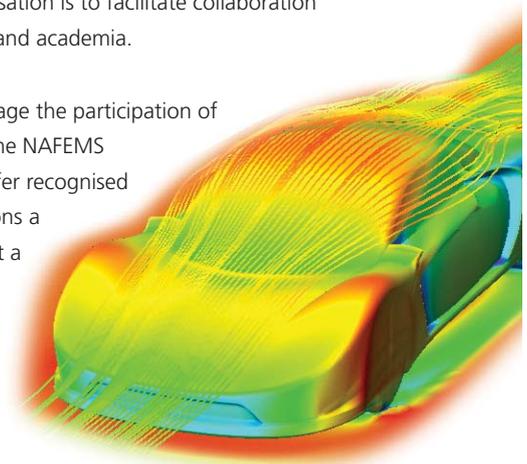
Small Company Membership is tailored to the specific needs of small to medium sized enterprises, and can also be appropriate in areas without a NAFEMS Regional Group.

Academic membership

Offering the benefits of site membership to recognised academic institutions

NAFEMS has always worked extremely closely with the academic arena since its formation and one of the key roles of the organisation is to facilitate collaboration between industry and academia.

In order to encourage the participation of academia within the NAFEMS community, we offer recognised academic institutions a site membership at a reduced rate.



www.nafems.org/one

Buchbesprechung

Finite Element Based Fatigue Calculations

Die Verfahren zur Ermüdungsanalyse moderner Strukturen basieren auf Techniken, die in den letzten 100 Jahren entwickelt wurden. Anfänglich waren dies relativ einfache Verfahren, die gemessene, konstante Spannungsamplituden (von Tests an Prototypen) mit Materialdaten von Proben verglichen haben. Diese Techniken wurden mit der Einführung dehnungsbasierter Methoden, die sich mit den Auswirkungen der lokalen Plastizität befassen, zunehmend anspruchsvoller. Heutzutage können variable Spannungsamplituden behandelt werden.

Darüber hinaus gibt es Techniken, mit denen man ermitteln kann, wie schnell ein Riss durch ein Bauteil wachsen wird, statt lediglich die Lebenszeit vorherzusagen. Zudem wurden vor Kurzem Techniken eingeführt, die das Auftreten von Spannungen in mehr als eine Hauptrichtung (multi-axiale Ermüdung) berücksichtigen und für schwingende Strukturen die Antworten als PSDs (Spektraldichten) der Spannungen vorhergesagen.

Heute sind 95% aller Ermüdungsberechnungen von einem der Ansätze wie Lebensdauerermittlung

oder Risswachstum abgedeckt. Da die Spannungen oder Dehnungen die beherrschenden Variablen sind, war es üblich, Prototypen von Komponenten zu testen, um die erforderlichen Daten für die Ermüdungsanalyse zu erhalten.

Doch mit der Einführung der Finite Element Analyse (FEA) hat man die Möglichkeit, die Ermüdung zu berechnen, lange bevor ein Prototyp existiert. Darüber hinaus hat die außerordentliche Verbesserung der Rechenleistung die Lebensdauer-Berechnungen auf Basis der FE-Analyse zu einer Routineaufgabe gemacht. Die FE-Methode gibt es schon seit geraumer Zeit, und sie ist heute eine ausgereifte Technologie. Der Zweck dieses Buches ist die Einführung in die grundlegenden Konzepte der Ermüdungsanalyse innerhalb der FE-Berechnungsumgebung.

Das Ziel ist weiterhin, Ingenieuren, die die FE-Analyse anwenden, ein grundlegendes Verständnis der Ermüdungsanalyse zu geben und denjenigen, die die Ermüdungsanalyse anwenden ein Verständnis der FE-Analyse zu vermitteln. Eine Reihe von Beispielen veranschau-

licht die Konzepte und mögliche Anwendungen.

Inhalt

- Einführung
- Warum FEA basierte Ermüdungsanalyse?
- Unterschiedliche Philosophien der Modelle für die Lebensdauer vorhersage
- Die Spannungs-Wöhlerlinie (S-N)-Ansatz
- Die Dehnungs-Wöhlerlinie (e-N)-Ansatz
- Rissausbreitungs-Analyse unter Verwendung der LEFM
- Multi-Axiale Ermüdungsanalyse
- Schwingungs-Ermüdungsanalyse
- FE-Modellerstellung und Hinweise zum Post-Processing
- Bibliographie

N.W.M. Bishop & F. Sherratt
Erstveröffentlichung Nov. 2000
Gebundene Ausgabe, 131 Seiten

Über 200 weitere Fachpublikationen aus dem CAE-Berechnungsumfeld erwarten Sie:

www.nafems.org/publications

www.nafems.org/publications/browse_buy/education/ht17/

Publikationen auch über NAFEMS GmbH bestellen

NAFEMS bietet für die Literaturbestellung die bequeme Möglichkeit über den Internet-Shop. Leider führt dies in manchen Unternehmen zu Schwierigkeiten, da eine Bestellung im Ausland umfangreichere Freigabeprozesse erfordert.

Sollten Sie Probleme damit haben oder sollte es schlichtweg einfacher für Sie sein, können Sie gerne Ihre NAFEMS Literaturbestellung über die NAFEMS GmbH in Deutschland abwickeln. Senden Sie uns einfach Ihre Bestellung mit Nennung entsprechenden Literaturnummern zu. Nach Erhalt der Bestellung senden wir Ihnen eine Rechnung zu. Nach Zahlungseingang wird die Literatur umgehend aus dem Zentrallager in UK an Sie versendet.

Wir hoffen, Ihnen damit den Bestellvorgang zu erleichtern.

Neuerscheinungen

Druckfrisch: Neue Literatur von NAFEMS

Simulationsdaten Management, eine Übersicht (Survey Report)

Unter den NAFEMS Mitgliedern gibt es ein beträchtliches Interesse an der neuen Technologie des Simulationsdaten Managements (SDM). Diese Technologie bietet ein erhebliches Potenzial für ein verbessertes Management von Daten, Modellen, Prozessen, Dokumenten und Metadaten.

Die ersten Arbeiten der NAFEMS Simulation Data Management Working Group konzentrierten sich auf eine Zusammenstellung der grundlegenden Anforderungen der Benutzer an SDM. Dieser Bericht enthält die Ergebnisse der Befragung der Industrie.



Warum Mehrkörpersimulation (Why do Multi-Body System Simulation)

Die Mehrkörpersimulation (MKS) bietet Ingenieuren die Möglichkeit, komplexe dynamische Systeme leichter zu verstehen. Sie wird erfolgreich eingesetzt, um das Verhalten der realen Welt in einer Reihe von Branchen wie Transport, Industriemaschinen, Luft- und Raumfahrt und Konsumgüterindustrie zu beschreiben.

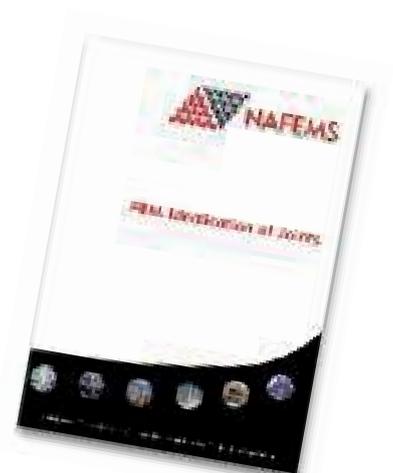
MKS ist Teil der Technologien, die von NAFEMS seit einiger Zeit behandelt werden, doch ist dies unsere erste Veröffentlichung auf diesem Gebiet. Der Zweck des Buches ist es, auf hohem Niveau einen Überblick über die Methode zu geben, anhand von Beispielen zu zeigen, wie sie heute in verschiedenen Branchen verwendet wird sowie ihre Vorteile darzustellen.



FEM-Idealisierungen von Verbindungen

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, Komponenten von Bauteilen miteinander zu verbinden. Um das Verhalten und die Integrität der Verbindungen zu beurteilen, werden diese routinemäßig simuliert. Dafür ist es notwendig, die verschiedenen Idealisierungen so abzubilden, dass sie die Steifigkeits-Charakteristiken wiedergeben und die Ermittlung der Belastungen für die Anwendung auf detailliertere Modelle ermöglichen.

Dieses Dokument enthält den Druck der Vorträge eines NAFEMS Seminars über die Idealisierung der Verbindungen.



Schreiben Sie ein Buch – Invitation 2 Tender

NAFEMS publiziert regelmäßig Fachbücher - werden Sie Autor!

www.nafems.org/publications/tender/

e-Library

Literatur für Mitglieder zunächst im Versuch zum Download.

www.nafems.org/publications/e-library

Neues Jobportal speziell für CAE-Ingenieure:

www.CAE-Stellenmarkt.de

Online ab 1. Mai 2012

Einführungsangebote für Stellenanbieter:

- Die ersten 14 Tage kostenlos inserieren
- Weitere 14 Tage nur 50% des regulären Preises

**Attraktive Preise für Stellenanbieter
auch nach der Einführungsphase**

- Standardanzeige 30/90 Tage online = 220/300 Euro *
- Individuelle Anzeige 30/90 Tage online = 310/480 Euro *
- Kombi-Angebote mit NAFEMS Online-Magazin
- Gerne kooperieren wir und erarbeiten mit Ihnen
gemeinsam individuelle Pakete.

**Bitte leiten Sie diese Information an
Ihre HR/Personalabteilung weiter.**

Kontakt: Telefon +49 (0) 8051 - 9 67 43 22
 E-Mail: info@cae-stellenmarkt.de

Ein Projekt vom

NAFEMS
Online-Magazin

* zzgl. ges. MwSt.



Gesucht Berechnungsingenieur (FH / ETH)

Stellenangebot

Zur Verstärkung unseres Teams suchen wir einen Ingenieur ETH/TH oder FH der Fachrichtungen Flugzeugbau/Maschinenbau. Das Aufgabengebiet umfasst statische und dynamische Strukturanalyse (mit FEM und klassischer Berechnung). Der Schwerpunkt liegt bei Leichtbau-Strukturen.

Ihre Aufgaben

Berechnung von Baugruppen in Zusammenarbeit mit unseren Kunden.
Konstruktionsberatung für unsere Kunden.
Unterstützung unserer Kunden in Belangen der Struktur-Festigkeit, -Stabilität und -Dynamik.
Erstellen von technischen Spezifikationen für Struktur-Komponenten.
Erstellen von Zertifizierungsdokumenten in den Bereichen Lasten, Festigkeit, Dynamik und Tests.
Definition und Durchführung von Strukturtests.
Betreuung der Herstellung von Bauteilen (Werkstatt-Betreuung).

Ihre Perspektiven

Es erwartet Sie eine abwechslungsreiche und vielseitige Tätigkeit in einem hochmotivierten Team. Kompetente Kollegen, eine offene Firmenkultur, moderne Infrastruktur und attraktive Arbeitsbedingungen sind bei uns selbstverständlich.

Anforderungen

Flugzeugbau- oder Maschineningenieur ETH/TH evtl. FH, oder gleichwertige Ausbildung mit Vertiefung im Bereich Strukturfestigkeit / Leichtbau / Konstruktion
Fundierte Kenntnisse klassischer und FEM Berechnungsmethoden.
Leistungsorientierte, innovative, dynamische und flexible Persönlichkeit.
Gute Deutsch und Englischkenntnisse in Wort und Schrift.

Einstellungstermin

Nach Vereinbarung

Kontaktperson

Herr Patrice Verdan
AeroFEM GmbH
Aumühlestrasse 10
CH-6373 Ennetbürgen
+41 41 619 85 02
pverdand@aerofem.com



Die DYNAMore GmbH ist als internationales Unternehmen Entwicklungspartner führender Automobilfirmen im Bereich Softwareentwicklung und Simulation. DYNAMore steht seit vielen Jahren für Innovation, Kreativität sowie für zuverlässiges und serviceorientiertes Arbeiten. Unsere Schwerpunkte sind: Ingenieur- und IT-Dienstleistung, Methodenentwicklung, Finite-Elemente Softwareentwicklung, Schulungen sowie Softwarelösungen für CAE Prozess- und Datenmanagement.

Zum nächst möglichen Termin suchen wir:

CAE Ingenieure / Informatiker (m/w)

Technischer Consultant CAE – Ingolstadt

Ihre Aufgaben:

Beratung, Konzeption und Planung für neue Softwarelösungen im Bereich Prozess- und Datenmanagement für Finite-Elemente Simulationen. Anforderungsanalyse bei Automobilkunden und Koordination der Umsetzung mit Softwareentwicklern. Planung und Durchführung von Optimierungsprojekten im Kundenauftrag. Eigenständige Koordination und Begleitung von Kundenanfragen sowie Konfiguration, Betrieb und Support für DYNAMore IT-Lösungen.

Ihr Profil:

Abgeschlossenes Studium mit oder ohne Promotion als Ingenieur oder Informatiker. Erfahrung im Umgang mit Finite-Elemente-Programmen, vorzugsweise LS-DYNA, Nastran, PAM-Crash oder Abaqus, sind wünschenswert. Verantwortungsbereitschaft, selbstständiges Arbeiten und kommunikative Fähigkeiten. Berufserfahrung ist wünschenswert aber nicht Voraussetzung.

Softwareentwickler/Informatiker – Dresden

Ihre Aufgaben:

Entwurf und Realisierung von Softwarelösungen für Großkunden aus der Automobilbranche im Bereich Prozess- und Datenmanagement im Umfeld der virtuellen Fahrzeugentwicklung.

Ihr Profil:

Abgeschlossenes Informatik-Hochschulstudium. Erfahrung in objektorientierter Softwareentwicklung (z. B. Python, Java, C, C++, C#) in Linux/Windows Systemumgebungen. Kommunikationsfähigkeit, Zielorientierung und hohes Engagement. Berufserfahrung ist wünschenswert aber nicht Voraussetzung.

Finite-Elemente Berechnungsingenieur – Ingolstadt und Neckarsulm

Ihre Aufgaben:

Mitarbeit in anspruchsvollen Methoden- und Entwicklungsprojekten der Automobilindustrie.

Ihr Profil:

Abgeschlossenes Studium als Bau-, Maschinenbau-, Luft-/Raumfahrtingenieur oder Mathematiker und Beschäftigung mit der Finite-Elemente-Methode im Studium. Erfahrung im Umgang mit kommerziellen Finite-Elemente-Programmen und deren Pre- und Postprozessorumfeld. Verantwortungsbereitschaft, eigenständiges Arbeiten und Flexibilität.

Haben wir Ihr Interesse geweckt?

Bitte senden Sie Ihre Bewerbungsunterlagen elektronisch oder per Post an:
DYNAMore GmbH, Personalabteilung, Industriestr. 2, D-70565 Stuttgart,
E-Mail: bewerbung@dynamore.de

Haben Sie Fragen?

Für Auskünfte steht Ihnen Herr Dr. Müllerschön unter der Tel. +49 (0)711-459600-20 gerne zur Verfügung. Informationen zu DYNAMore finden Sie unter www.dynamore.de.

virtual vehicle

CREATE ■ SIMULATE ■ INNOVATE

virtual  vehicle

Bereits über 190 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen arbeiten in unserem internationalen Forschungsunternehmen und globalen Netzwerk mit über 80 Unternehmenspartnern und mehr als 20 Instituten verschiedener Universitäten. Damit eröffnet das VIRTUAL VEHICLE eine Vielzahl interessanter Entwicklungsperspektiven.

Für unseren Standort in Graz (A) suchen wir:

Bereichsleiter (m/w) Thermodynamics (Ref.Nr. B_036)

Senior/Lead - Engineer (m/w) NVH Gesamtfahrzeug (Ref.Nr. C_011)

Junior Researcher (m/w) „LKW-Vorbeifahrtsgeräusch“ (Ref.Nr. C_024)

Senior/Lead - Engineer (m/w) Vehicle Dynamics/Mechatronics (Ref.Nr. D_030)

Lead Researcher (m/w) „Vehicle Safety“ (Ref.Nr. D_050)

Key-/Lead Researcher (m/w) Informationsmanagement (Ref.Nr. A_013)

Junior-/Senior Researcher (m/w) Informationsmanagement (Ref.Nr. A_050)

Vehicle concepts for the future.

Informationen und Details sowie weitere offene Positionen: www.v2c2.at

ALTAIR ENGINEERING

Kooperationsvereinbarung mit Simufact

Altair und die Simufact Engineering GmbH gaben die Unterzeichnung eines mehrjährigen Kooperationsabkommens bekannt, in dessen Rahmen Altairs Software SimLab nahtlos in Simufacts Softwaresuite für Prozesssimulation integriert wird. SimLab ist eine prozessorientierte, template basierte Softwareanwendung für die Erstellung von Finite Elemente Modellen, die es Nutzern ermöglicht, das Verhalten von komplexen Baugruppen genau und schnell zu simulieren. SimLab automatisiert die Modellierung von Simulationsmodellen, um sowohl Fehler, die durch manuelle Vernetzungen entstehen können, als auch den Zeitaufwand für die Erstellung und Interpretation von Finite Elemente Modellen zu reduzieren. SimLab ist kein traditionelles Standard Pre- und Post-processing Werkzeug, sondern eine vertikale Anwendungsentwicklungsplattform, mit der Simulationsprozesse automatisiert und erfasst werden können.

Neue AcuSolve Version

Altair gab die Veröffentlichung von AcuSolve V1.8b, eine neue, leistungsstarke Version der führenden, in HyperWorks enthaltenen, Finite Element basierenden Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationssoftware, bekannt. Das hoch entwickelte Analysewerkzeug, das eine überragende Robustheit, Schnelligkeit und Genauigkeit bei der Analyse von komplexen multiphysikalischen und multidisziplinären Designs anbietet, enthält viele neue Funktionen und Verbesserungen in den Bereichen Post-processing, Solver und Pre-processing und steigert die Anwenderfreundlichkeit immens.

NVH für Gesamtfahrzeuge

Altair gab die Veröffentlichung des NVH Directors, dem ersten kommerziellen Werkzeug, das eine Noise-Vibration-Harshness (NVH) Simulation von Vollfahrzeugen in einer völlig neuen und zielgerichteten Form ermöglicht, bekannt. Der NVH Director nutzt Altairs HyperWorks Suite

von Computer-Aided Engineering (CAE) Werkzeugen in einer nahtlos integrierten, nutzerfreundlichen und anpassbaren Form, um alle Aufgaben, die bei einer NVH Simulation zu berücksichtigen sind, automatisiert zu bearbeiten. Indem der komplette Prozess der Vernetzung, der Modellerstellung, der Lastfallbestimmung und des Post-Processing integriert wird, kann die Zeit, die für eine Vollfahrzeug NVH Simulation benötigt wird, stark reduziert werden. Dies gibt den CAE Ingenieuren die Möglichkeit, sich ganz auf die Optimierung des Produktdesigns und der Produkteigenschaften zu konzentrieren.

MTU entscheidet sich für Altair

Altair gab bekannt, dass sich MTU Aero Engines, ein führender Anbieter von Triebwerken für die zivile und militärische Flugzeugindustrie, für HyperWorks als primäre strategische Lösung für CAE Pre- und Postprocessing und für PBS Professional für HPC Anwendungen entschieden hat. HyperWorks, Altairs umfassende Simulationsplattform, ermöglicht schnelle Designstudien und erleichtert so Entscheidungsfindungen. MTU hat sich nach einem einjährigen unternehmensweiten Benchmark, im Rahmen dessen alle maßgeblichen kommerziellen CAE Werkzeuge detailliert untersucht wurden, für HyperWorks entschieden. Als Ergebnis des Benchmarks wird MTU nun die HyperWorks Module HyperMesh und HyperView in einem Großteil seiner Entwicklungsabteilungen weltweit einsetzen und damit die bisher verwendeten kommerziellen Pre- und Postprocessing Lösungen vollständig ersetzen.

Altair und Ontonix bieten Komplexitätsmanagement

Altair gab eine neue Partnerschaft mit Ontonix bekannt, im Rahmen derer das Komplexitätsmanagement System OntoNet nun über die HyperWorks Partner Alliance (HWP) angeboten wird. Die Partnerschaft wird es Altairs HyperWorks Kunden ermöglichen, ihre Produktentwicklungsprozesse und Analysen weiter zu optimieren. Altairs HyperWorks Kunden können auf OntoNet durch

die HWP, eine Suite von Drittanbieterprodukten der HyperWorks Partner, über die gleichen Units, über die auch Altairs HyperWorks Software genutzt werden kann, zugreifen. Die Flexibilität der HyperWorks Units ermöglicht den Nutzern den Zugriff auf die größte und umfassendste verfügbare Suite an CAE Software – ohne zusätzliche Kosten oder eine längerfristige Bindung.

Compute Manager und PBS Desktop

Altair kündigte mit den neuen Produkten Compute Manager und PBS Desktop zwei wichtige Weiterentwicklungen im Bereich des High Performance Computing an. Der Compute Manager ist Altairs erster strategischer Schritt zum Aufbau einer modernen, web-basierenden und kosteneffizienten Simulationsplattform zur Steigerung der Produktivität von HPC- Aufgaben. Als Modul der neuen „HyperWorks Enterprise Software - auf Basis einer serviceorientierten Architektur (SOA) - versteht der Compute Manager die spezifischen Charakteristika der verwendeten HPC Applikationen und ermöglicht den Anwendern das Starten und Überwachen ihrer Simulationsaufgaben sowie die Ausführung komplexer Analysen mit einigen wenigen Maus-Clicks. Neben dem Compute Manager hat Altair PBS Professional 11.2. angekündigt. Die neueste Version von PBS Professional ist hochgradig skalierbar und unterstützt hunderttausende Prozessoren – vom einfachen Cluster bis hin zu den größten HPC Systemen – und maximiert so den Nutzen der vorhandenen Hardwareressourcen. Darüber hinaus bietet sie eine verbesserte grafische Oberfläche zur Eingabe und Verwaltung von PBS Professional Jobs am Front-end.

Partnerschaft mit Caterham Composites Partnerschaft

Altair Engineering GmbH und Caterham Composites, der Spezialist für zukunftsorientierte Ingenieurdienstleistungen und Technologien im Bereich kohle- und glasfaserverstärkter Kunststoffe, gaben den Abschluss einer neuen Partnerschaft bekannt.

Neues Jobportal für CAE-Ingenieure: **www.CAE-Stellenmarkt.de**

Online ab 1. Mai 2012 – 14 Tage kostenlos inserieren

RadTherm für Wärmeübertragung

Altair gab die offizielle Veröffentlichung von RadTherm in der HyperWorks Partner Alliance (HWP) bekannt. Die RadTherm Wärmeübertragungssoftware ist ein professionelles Werkzeug für thermische Simulationen zur umfangreichen CAE Analyse bei stationären und transienten Wärmeübertragungsbedingungen. Die Solvetechnologie von RadTherm deckt die vollständige Analyse von Temperaturverteilungen und Wärmeübertragungsraten ab. Die Untersuchung von Wärmeabstrahlung, -leitung und Konvektion, ermöglicht es den Anwendern Designzielkonflikte bereits in einer frühen Entwicklungsphase zu erkennen und das finale Produktdesign zu optimieren und zu validieren.

Key to Metals Materialdatenbank

Altair gab die Veröffentlichung und Verfügbarkeit der Key to Metals Materialdatenbank über die HyperWorks Partner Alliance (HWP) bekannt. Key to Metals ist, mit über 4,5 Millionen Einträgen zu Kennwerten und dem Zugriff auf 175.000 Materialien, die weltweit umfassendste Materialdatenbank für metallische Werkstoffe. Mittels internationaler Querverweistabellen kann man Materialien aus der ganzen Welt finden und vergleichen, um grundlegende Vergleichsstudien zur Ermittlung detaillierter Materialeigenschaften, wie der chemischen Zusammensetzung oder mechanischer und physikalischer Eigenschaften, Wärmebehandlungsdiagramme und Materialeigenschaften bei erhöhten Temperaturen, durchzuführen. Zusätzlich zum umfassenden Key to Metals Datenset bietet das integ-

rierte Extended Range Modul, das nahtlos mit den Datenbankfunktionalitäten arbeitet, dem Anwender eine einzigartige Ressource für erweiterte Eigenschaften (siehe auch „Key To Metals“).

StressCheck verfügbar

Altair kündigte die Verfügbarkeit von StressCheck von Engineering Software Research & Development, Inc. (ESRD) über die HyperWorks Partner Alliance an (HWP). StressCheck ergänzt Altairs Finite Elemente Analyse (FEA) Solver Radioss und unterstützt detaillierte Struktur- und Festigkeitsanalysen, darunter Mehrkörperkontakt und die Berechnung von Bruchmechanik-Parametern für Bauteile aus Metall und Verbundmaterial. ESRD ist vor allem in der Luft- und Raumfahrt bekannt.

www.altair.de

ANSYS

Ansys 14.0 verfügbar

ANSYS stellte die neueste Version seiner technischen Simulationssoftware Ansys 14.0 vor. Die ANSYS-Software dient zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen und reduziert den Zeit- und Kostenaufwand für die Realisierung von Produktinnovationen. Die fortschrittliche Technologie hinter Ansys14.0 umfasst Hunderte von neuen, leistungsfähigen Funktionen, mit denen Unternehmen neue Produkte schneller, leichter, kostengünstiger und mit einer höheren Verlässlichkeit hinsichtlich der erzielten Ergebnisse auf den Markt bringen können. Die neue Software-Suite bietet Verbes-

serungen in drei großen Bereichen: 1.) Erhöhen der Ingenieursleistung: Ingenieure arbeiten am effektivsten, wenn sie sich auf die technischen Aspekte der Entwicklungsarbeit konzentrieren können und sich nicht mit manuellen und langwierigen Software-Abläufen beschäftigen müssen. Ansys 14.0 automatisiert viele arbeitsintensive Vorgänge, so dass die Produktentwickler ihren Zeitaufwand für das Aufsetzen von Problemstellungen minimieren können. 2.) Simulation komplexer Systeme: Die heutigen Produkte weisen eine hohe innere Komplexität auf – zum Beispiel Zustandsänderungen, nichtlineare Effekte und das Wechselwirken verschiedener physikalischer Phänomene. Oft müssen Hardware, Elektronik und Software zu einem System kombiniert werden. Dies erfordert neue Ansätze im Entwurfsprozess. Die neueste Version der Ansys-Software ermöglicht es den Ingenieuren, diese in realen Anwendungen bestehenden komplexen Zusammenhänge, für einzelne Bauteile ebenso wie für komplette Systeme, mit kompromissloser Genauigkeit zu simulieren. 3.) Mehr wirtschaftlicher Nutzen mit High-Performance Computing (HPC): Der Wettbewerbsdruck erfordert immer mehr und immer rascherer marktfähige neue Produkte. Diese Produkte müssen außerdem innovativ, attraktiv und von hoher Qualität sein. Die Unternehmen können diese häufig in Widerspruch stehenden Anforderungen nur lösen, indem sie zahlreiche Design-Alternativen prüfen – und genau das ist jetzt schneller als je zuvor möglich. Ansys14.0 nutzt neueste Fortschritte bei der Hardware effizient aus, um

komplexe Simulationsberechnungen schneller durchzuführen, als dies mit anderen Alternativen am Markt möglich ist.

www.ansys-germany.com

AUTODESK

Autodesk PLM 360 verfügbar

Autodesk kommt mit einem eigenem Angebot für das Product Lifecycle Management (PLM) auf den Markt. Die Cloud basierte Lösung Autodesk PLM 360 stellt die nächste Generation von PLM dar und ist eine leistungsfähige, erschwingliche und leicht bedienbare Alternative zu herkömmlichen Produktlebenszyklus-Management-Systemen zu einem Bruchteil der Kosten. Autodesk PLM 360 ist das neueste Angebot des Unternehmens und unterstreicht die führende Rolle im Bereich Cloud basierte Lösungen. Im Gegensatz zu bisherigen PLM-Systemen – die in der Regel teuer und kompliziert sind – ist Autodesk PLM 360 sofort einsetzbar und leicht zu bedienen. Damit können die speziellen Anforderungen der Kunden an Produktlebenszyklus-Prozesse in ihren Unternehmen optimal erfüllt werden. Es ist also die erste Cloud basierte PLM Lösung, die über das Engineering und Materialmanagement hinausgeht. Somit können Mitarbeiter aus vielen Bereichen – von der Planung und Produktenwicklung über das Qualitätsmanagement und Compliance bis hin zum Kundendienst und vieles mehr – leichter auf produkt- oder projektspezifische Informationen zugreifen, um die konstruierten und hergestellten Güter kontinuierlich zu verbessern.

Internationale Maschinenbauer setzen auf Autodesk

Maschinenbauunternehmen auf der ganzen Welt haben in den letzten Monaten die Digital Prototyping Lösungen von Autodesk den Lösungen der Konkurrenz vorgezogen. Die Autodesk Product Design Suite und die Autodesk Factory Design Suite waren dabei die Spitzenreiter. Die Kunden, die sich für neue oder

aktuellere Software entschieden, decken vom Industriemaschinen-sektor über das Transportwesen bis hin zur Nahrungsmittelindustrie eine breite Vielfalt an Branchen ab und kommen aus allen Teilen der Welt. Beispielsweise nutzt Škoda Electric, ein weltmarktführender Lieferant für Elektrolokomotiven, Oberleitungsbusse und Zugmaschinen mit Sitz in der Tschechischen Republik, die Software Autodesk Inventor um die Lieferzeiten bei der Entwicklung ihrer neuesten Generation von S-Bahnen zu verkürzen.

www.autodesk.de

BETA CAE SYSTEMS

Entwicklungspartnerschaft mit Contact Software

Mit dem Ziel, den Bereich der Produktabsicherung in das Product Lifecycle Management (PLM) einzubinden, haben Contact Software und Beta CAE Systems eine Entwicklungspartnerschaft vereinbart, Lücken zwischen der CAD- und Berechnungswelt sollen durch ein integriertes Lösungsangebot geschlossen werden. Besonders von den Automobilherstellern und Zulieferern wird diese disziplinübergreifende Unterstützung im PLM-Kontext nachgefragt, um den virtuellen Entwicklungsprozess zu beschleunigen und die Produktabsicherung zu verbessern (siehe auch „Contact Software“).

Neuer Versionen verfügbar

Beta CAE gab die Verfügbarkeit der neuen Versionen µETA v6.8.0 und ANSA v13.2.2 bekannt.

www.beta-cae.gr

CADFEM

Neue Geschäftsstelle Frankfurt

Seit Anfang Februar 2012 ist der Simulationsspezialist Cadfem auch mit einer Niederlassung im Rhein-Main-Gebiet vertreten. Die Geschäftsstelle Frankfurt der Cadfem GmbH, die siebte in Deutschland (bisher

in Grafing b. München, Berlin, Chemnitz, Dortmund, Hannover und Stuttgart), ist in Liederbach, östlich von Frankfurt, am Fuße des Taunus angesiedelt. Cadfem betreibt die neue Geschäftsstelle Frankfurt in Kooperation mit dem Ingenieurbüro Huß & Feickert (ihf), mit dem schon seit vielen Jahren eine enge Geschäftspartnerschaft besteht. Das Ingenieurbüro hat als Simulationsdienstleister nicht nur im Rhein-Main-Gebiet einen guten Namen, unter anderem gehören auch MAN (Augsburg) und die Adam Opel AG zum anspruchsvollen Kundenkreis. Das Dienstleistungsangebot von ihf konzentriert sich auf die rechnerische Simulation in den Bereichen Strukturmechanik, Kurzzeitdynamik, Crash-Simulation, Festigkeit, Strömungssimulation, Wärmeleitung und Optimierung. Ergänzend bieten die 15 hochqualifizierten Mitarbeiter von ihf ihr Know-how auf dem Gebiet der experimentellen Untersuchungen, der Produktentwicklung, Programmierung und Schulung an. Die Geschäftsstelle Frankfurt, die von Kristin Schuegger geleitet wird, ist in den Räumlichkeiten von ihf untergebracht und kann jederzeit auf deren Know-how und Infrastruktur zurückgreifen, um die bestehende Kundenbasis umfassend zu betreuen und weiter auszubauen. Dazu wurde die Zusammenarbeit zwischen den beiden eigenständigen Unternehmen auf eine qualitativ neue Stufe gestellt. Beispielsweise werden neben gemeinsamen Vertriebsaktivitäten auch verschiedene Schulungsangebote für Kunden und andere Interessierte durchgeführt. Einen Schwerpunkt für dieses Jahr bildet die Entwicklung und Vermarktung einer gemeinsamen Software-Entwicklung, mit der innerhalb der ANSYS Workbench die automatisierte Auswertung von FE-Ergebnissen nach der FKM-Richtlinie (rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile) realisierbar ist. Gemeinsames Ziel der verstärkten Kooperation ist es, die jeweilige Kundenzufriedenheit ständig zu erhöhen und den Kundenstamm weiter auszubauen.

Partnerschaft mit Visual Collaboration Technologies

Cadferm ist mit dem US-amerikanischen Software-Unternehmen VCTI, Visual Collaboration Technologies Inc., eine Vertriebspartnerschaft eingegangen. Diese ermöglicht es Cadferm, die von VCTI entwickelte Software VCollab, die die Zusammenarbeit durch Datenkomprimierung und 3D-Visualisierungen unterstützt, in Deutschland, Österreich und der Schweiz sowie anderen Ländern, in denen Cadferm präsent ist, zu verkaufen. VCollab wird den Cadferm Kunden als Bestandteil von umfassenden CAE-Lösungen für die numerische Simulation angeboten. Beispielsweise wurde die VCollab-Software in die Ansys Workbench als neues Modul C.A.V.E. (Compression And Visualization Engine) integriert. Damit stehen den Anwendern in den gewohnt einfachen Arbeitsabläufen der Ansys Workbench nun die Ergebnisdaten der Simulationsberechnungen in einer stark komprimierten Form zur Verfügung, die einen einfachen Informationsaustausch mit anderen Projektbeteiligten ermöglicht. Damit kann speziell die Zusammenarbeit in größeren Produktentwicklungsteams signifikant verbessert werden. Dazu werden unter anderem umfassende Funktionen mit entsprechenden VCollab-Viewern, die teilweise kostenlos sind, zur Verfügung gestellt. Sie ermöglichen FEM-beziehungsweise CAE-spezifische Visualisierungen und Überprüfungen sowie die Bereitstellung von Berechnungsergebnissen. Die auch für Nicht-Experten einfach zu bedienenden Viewer erleichtern die Interpretation der Simulationsergebnisse und unterstützen dadurch die Entscheidungsfindung im Produktentwicklungsprozess. Beim Einsatz von SDM-Systemen (Simulation Data Management) wie Ansys EKM können die komprimierten und dadurch „leichtgewichtigen“ Ergebnisdaten den Projektbeteiligten jetzt noch einfacher zur Verfügung gestellt werden. Ebenso sind diese „leichtgewichtigen“ Daten auch als dynamische Modelle in MS-Office-Anwendungen und andere Programme integrierbar, um zum


Gesamtheit: ansys.com / Foto: iStock - Fotolia

Berufsbegleitend zum Master of Engineering

Applied Computational Mechanics

- Sie sind** ▶ Berechnungsingenieur, Konstrukteur oder Bachelorstudent
- Sie wollen** ▶ sich fachlich weiterqualifizieren oder mehr über die Theorie und Anwendung der computergestützten Simulation lernen
- Wir bieten** ▶ Ihnen ein zweijähriges berufsbegleitendes, akkreditiertes Studium. Sie erwerben praxisorientiertes Wissen in allen CAE-Disziplinen und profitieren von einer intensiven Lernatmosphäre in kleinen, internationalen Studiengruppen.
- Wir sind** ▶ zwei profilierte deutsche Hochschulen mit dem Fokus auf angewandte Wissenschaften im Verbund mit einem renommierten Anbieter für CAE-Weiterbildung
- Mehr Infos** ▶ Anja Vogel
Tel. +49 (0) 80 92 / 70 05 - 52
oder www.esocaet.com/studium

HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN FH
INGOLSTADT



esocaet
european school of
computer aided engineering
technology

Beispiel einen Web-basierenden Zugriff zu realisieren. Durch den verstärkten Trend zu immer detaillierteren Simulationen und größeren Modellen sowie den wachsenden Anforderungen, beispielsweise immer mehr Entwurfsvarianten bezüglich ihrer Tauglichkeit zu berechnen, werden eine zuverlässige Datenkomprimierung und entsprechende Visualisierungsfunktionen zu einer wichtigen Grundlage von effizienten Produktentwicklungsbeziehungsweise Simulationsprozessen. Dies gilt umso mehr, wenn zur Optimierung der Produktentwicklung zum Beispiel Multiphysik- und Systemsimulationen oder auch RDO-Anwendungen (Robust Design Optimization) einen größeren Stellenwert erhalten.

www.cadfem.de

CARHS-TRAINING

SafetyCompanion 2012

Die carhs.training GmbH hat die Ausgabe 2012 des Handbuchs für Ingenieure „SafetyCompanion“ auf Deutsch und Englisch veröffentlicht. Die 12. Ausgabe enthält 44 Seiten „SafetyWissen“, das praxisorientierte Informationen zu den aktuellen Anforderungen im Bereich der Fahrzeugsicherheit in Form von übersichtlichen Tabellen und Grafiken bietet. Themen sind u.a.: Crash-Gesetze, NCAP Tests, Dummies und Prüfverfahren, Aktive Sicherheit, Unfallvermeidung und funktionale Sicherheit. Der Nutzen für Ingenieure liegt vor allem darin, dass Anforderungen kompakt und verständlich aufbereitet werden, so dass dieses Wissen sofort in der täglichen Arbeit genutzt werden kann. Im SafetyCompanion 2012 wurde das SafetyWissen um 13 Seiten erweitert. Neu hinzugekommen sind u.a. Übersichten zu weltweiten NCAP-Tests (C-NCAP, Latin NCAP und aNCAP), Vorschriften zur Sicherheit von Elektrofahrzeugen und die ersten Testverfahren für Collision Mitigation Systeme. Der neue „Navigator“ gestaltet den Weg zum SafetyWissen schnell und einfach und

führt gezielt zu den Anforderungen der einzelnen Regionen der Erde.

www.carhs.de

CD-ADAPCO

Neues Version verfügbar

CD-adapco gab die Verfügbarkeit der neuen Verion Star-CCM+ v7 bekannt.

Batterie Design LLC

CD-Adapco gab bekannt, dass die Software Batterie Design Studio (BDS) in die Produktpalette aufgenommen wird.

www.cd-adapco.com

CONTACT SOFTWARE

Schweizer Tochter gegründet

Contact Software setzt ihren Expansionskurs fort. Der Anbieter von Lösungen für den Innovationsprozess und das Product Lifecycle Management (PLM) hat eine weitere Tochtergesellschaft gegründet: die Contact Software Schweiz AG. Das Unternehmen mit Sitz in Appenzell bei St. Gallen wird den Ausbau der Kundenbasis vorantreiben. Im Fokus steht dabei vor allem die Maschinen-, Elektro- und Metallindustrie, die mit einem Exportanteil von rund 80 Prozent zu den bedeutendsten Wirtschaftszweigen der Schweiz zählt.

Entwicklungspartnerschaft mit Beta CAE Systems

Mit dem Ziel, den Bereich der Produktabsicherung in das Product Lifecycle Management (PLM) einzubinden, haben Contact Software und Beta CAE Systems eine Entwicklungspartnerschaft vereinbart, Lücken zwischen der CAD- und Berechnungswelt sollen durch ein integriertes Lösungsangebot geschlossen werden. Besonders von den Automobilherstellern und Zulieferern wird diese disziplinübergreifende Unterstützung im PLM-Kontext nachgefragt, um den virtuellen Entwicklungsprozess zu

beschleunigen und die Produktabsicherung zu verbessern (siehe auch „Beta CAE“).

www.contact.de

COMSOL

Neue Niederlassung in Berlin

Die Comsol Multiphysics GmbH gab bekannt, dass das Unternehmen ab April 2012 mit einer neuen Niederlassung im Herzen Berlins vertreten sein wird. Der deutsche Hauptgeschäftssitz des Unternehmens wird in Göttingen verbleiben. Mit der neuen Niederlassung wird Comsol seine Vertriebsaktivitäten in der Region Berlin und Umgebung weiter ausbauen.

Conferenz-CD

Die neue Ausgabe der Comsol Konferenz-CD mit über 400 Fachbeiträgen ist nun verfügbar. Die Zusammenstellung beinhaltet über 700 Paper, Poster und Präsentationen, die Einblicke in die neuesten Forschungsarbeiten und Simulationsprojekte bieten. Ein kostenfreies Exemplar erhalten Sie unter www.comsol.de.

CERN setzt auf Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics gab bekannt, dass das CERN, die Europäische Organisation für Kernforschung sowie das weltweit führende Forschungslabor für Teilchenphysik, mehrere Netzwerklicenzen von Comsol Multiphysics und eine Reihe an Zusatzmodulen erworben hat. Durch diese Lizenzvereinbarung steht die Software nun allen Ingenieuren und Forschern des CERNs zur Verfügung. Comsol Multiphysics ermöglicht es ihnen nun Simulationen physikalisch basierter Systeme in Forschung, Systemauslegung und Entwicklung unter realistischen Bedingungen durchzuführen. Das CERN wird von 20 europäischen Mitgliedsstaaten und unter der Beteiligung mehrerer außereuropäischer Staaten betrieben. Wissenschaftler aus aller Welt nutzen die Einrichtungen des CERN. Die wissenschaftlichen



CAE-Lösungen für die virtuelle Produktentwicklung

Die ISKO engineers AG veranstaltet gemeinsam mit Partnern die Münchner CAE-Technologietage. Im Vordergrund stehen hier neben neuesten Technologien auch die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Simulationslösungen im Produktentstehungsprozess mittelständischer Unternehmen.

Die ersten vier Technologietage bieten Entwicklern ein Forum, um sich aus erster Hand und praxisorientiert über aktuelle Technologien und Trends im Computer Aided Engineering zu informieren.

Der abschließende, fünfte Technologietag richtet sich an Führungskräfte aus dem Mittelstand und vermittelt die Chancen und Risiken der virtuellen Produktentwicklung im Dienste einer erfolgreichen Unternehmensstrategie.

Münchner CAE-Technologietage *(kostenfrei)* Neueste Technologien vorgestellt von ISKO engineers & Partnern

Datum	Thema
21.06.2012 	Bahnbrechende Verfahren zur Bildung physikalischer Modelle und deren Optimierung
26.06.2012 	Entwicklung innovativer Produkte mit optimalen Strömungseigenschaften
28.06.2012 	Fortschrittliche Methoden zur Schwingungstechnik und Vibroakustik
03.07.2012 	Design- und Prozessoptimierung mit modernsten Analysemethoden
05.07.2012 	Chancen und Risiken der Simulation für den Mittelstand

Weitere Informationen und Anmeldungen auf www.isko-engineers.de

und technischen Mitarbeiter des Forschungslabors entwickeln und bauen Teilchenbeschleuniger und stellen ihren ordnungsgemäßen Betrieb sicher. Außerdem unterstützen sie die Vorbereitung, Durchführung, Analyse und Interpretation der Daten der komplexen wissenschaftlichen Experimente. Das CERN beschäftigt 2500 festangestellte Forscher, die von etwa 9500 Gastwissenschaftlern von 608 Universitäten aus 113 Nationen unterstützt werden.

www.comsol.de

DASSAULT SYSTÈMES

Neuer Internetauftritt

Im Zuge der Integration von Simulia in Dassault Systèmes und im Sinne eines einheitlichen Internetauftrittes befinden sich nun alle Simulia-relevanten Themen unter der Domain

www.3ds.com. Der Internetauftritt simulia.com ist somit vollständig integriert worden.

PSA Peugeot Citroën verbessert Effizienz

Dassault Systèmes gab bekannt, dass PSA Peugeot Citroën Delmia in seine Abteilung zur Entwicklung und Fertigung von Antriebssträngen eingeführt hat. Damit vergrößert Dassault Systèmes seinen Fußabdruck im Bereich digitaler Fertigung. Delmia ersetzt bisher eingesetzte Wettbewerbs-Lösungen und unterstützt jetzt die Simulation der Montage, sowie die Bereiche Lackierung, Werksplanung, Stanzen und Antriebsstränge. PSA Peugeot Citroën arbeitet mit denselben Tools und Methoden in sämtlichen großen Abteilungen der Gruppe. Im Lauf der letzten Jahre hat PSA Peugeot Citroën wichtige technologische Innovationen im Bereich An-

triebsstränge eingeführt. In diesem Rahmen wurden auch beträchtliche Investitionen in Forschung und Entwicklung getätigt, um eine neue Generation von Motoren und Getrieben zu entwickeln und auf den Markt zu bringen. So startet die Gruppe beispielsweise die Produktion eines neuen DCT-Getriebes (Dual Stock Transmission) mit Doppelkupplung und verwendet dabei Delmia von Dassault Systèmes. Um Innovationen voranzutreiben und die Beweglichkeit des Unternehmens zu erhöhen, ist es für PSA Peugeot Citroën sehr wichtig, zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung von Antriebssträngen umfassende Änderungen vornehmen zu können, ohne jegliche Einbußen bei der zeitlichen Produktionsplanung in Kauf nehmen zu müssen. Delmia unterstützt dieses Ziel maßgeblich, indem es höchste Planungssicherheit in Kombination mit optimierten

Implementierungszeiten und -kosten sicherstellt. Im Ergebnis ist die Gruppe in der Lage, die Zeitvorgaben zur Entwicklung von Antriebssträngen einzuhalten, Entwicklungs- und Betriebskosten zu reduzieren sowie Ressourcen und Investitionen bei verbesserter Qualität optimal zu planen. Die Gruppe kann außerdem wirtschaftliche Simulationen nutzen, um Produktionskosten zu einem frühen Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses zu evaluieren.

20% mehr Lizenz-Umsatz durch PLM

Dassault Systèmes gibt die ungeprüften Geschäftsergebnisse nach IFRS für das vierte Quartal und das Geschäftsjahr 2011, das zum 31. Dezember endete, bekannt. Zusammenfassung: Umsatz und Gewinn des vierten Quartals übertreffen die Ziele; 2011 wurde der Umsatz für neue Lizenzen, regelmäßig anfallende Software und Services währungsbereinigt im zweistelligen Bereich gesteigert; der Gewinn pro Aktie wurde um 28% auf 2,33 Euro (IFRS) gesteigert, bzw. um 17% auf 2,92 Euro (non-IFRS); die mittelfristige 30% non-IFRS operative Marge wurde bereits vor dem Zieldatum erreicht; starkes Wachstum im Automotive- sowie im Aerospace-Sektor, vorangetrieben durch Catia, Enovia, Simulia und Delmia; 1.000 Kunden haben V6 als ihr PLM-Business-System eingeführt; 18.000 Neukunden für 3D-Anwendungen in 2011.

www.3ds.com

DIVIS

Noesis Solutions und divis kooperieren:

Noesis Solutions und divis intelligent solutions GmbH geben die Integration von ClearVu Analytics Modeler und ClearVu Global Optimizer in Optimus bekannt. Damit haben Optimus-Nutzer exklusiv Zugang zu beiden Modulen, um höchste Surface-Response-Qualität für ihre Anwendung zu erzielen und um hochdimensionale, nicht-lineare globale Optimierungsaufgaben schnell und

zuverlässig zu lösen. Die Integration der bewährten Methoden von divis in die Optimus-Umgebung für die Prozessintegration und die Designoptimierung erlaubt Herstellern schneller Produkte zu entwickeln und zu optimieren, was größere Margen, Gewinne und Marktanteile ermöglicht. Optimus von Noesis Solutions erleichtert den Anwendern die Identifikation von besonders erfolgversprechenden Produktdesigns. Dies geschieht durch die Automatisierung und Optimierung parametrischer Simulationen unter Verwendung bestehender Simulationstools. Die Nutzer von Optimus verfahren typischerweise gemäß der experimentellen Versuchplanung (Design of Experiments), um einen Simulationsplan zu definieren, der ein Höchstmaß an relevanten Designinformationen mit einem Minimum an Simulationsaufwand liefert. Diese Informationen werden anschließend genutzt, um mithilfe von Methoden des Response Surface Modeling (RSM) sowohl das Potential für Design-Verbesserungen auszuloten als auch um Designvarianten zu identifizieren, die unter gleichzeitiger Berücksichtigung unterschiedlicher Zielgrößen und Nebenbedingungen ein Optimum darstellen (siehe auch „Noesis Solutions“).

BMW setzt auf ClearVu Analytics

Die divis intelligent solutions GmbH hat Ende 2011 mit der BMW Group einen Kooperationsvertrag zur gemeinsamen Weiterentwicklung von ClearVu Analytics unterzeichnet. Die Software von divis wird zur Metamodellierung in der digitalen Produktentwicklung eingesetzt. ClearVu Analytics wird aufgrund seiner Funktionalität von BMW als Standardsoftware für die datengetriebene Modellierung experimenteller oder simulationsbasierter Daten verwendet.

www.divis-gmbh.de

DYNAMORE

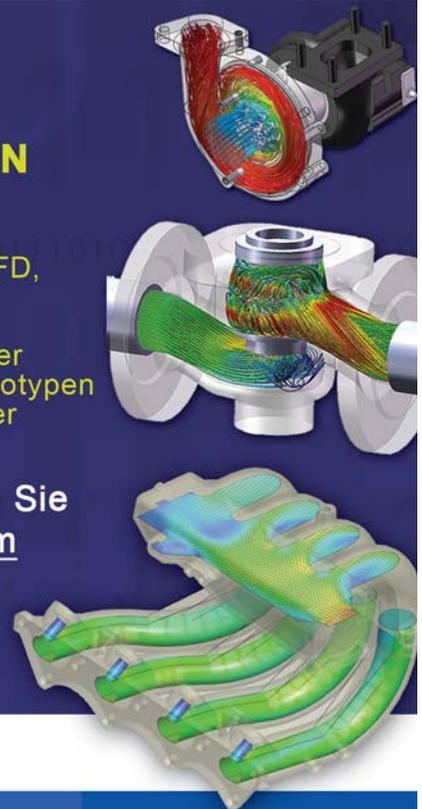
DYNAMore Swiss GmbH gegründet

Die DYNAMore GmbH hat im vergangenen Jahr zusammen mit Bernd Hochholding die DYNAMore Swiss GmbH in Zürich gegründet. Als Spin-off Unternehmen der ETH Zürich hat die DYNAMore Swiss GmbH nun ihre Räumlichkeiten im Technopark Zürich bezogen. Die Geschäftsführung übernimmt Bernd Hochholding. Dieser hatte am Institut für virtuelle Produktion der ETH Zürich im Rahmen seiner Promotionsarbeit und in enger Kooperation mit einem führenden deutschen Automobilhersteller virtuelle Berechnungsmodelle für das sehr komplexe Presshärteverfahren entwickelt. Die in LS-Dyna implementierten neuen Modelle ermöglichen nicht nur die exakte Abbildung der thermo-mechanischen Prozesse, sondern auch die Voraussage der Teileigenschaften für spätere Crash-Belastungen. Dies unterstützt nachhaltig die Bemühungen der Automobilindustrie, zukünftige Fahrzeuge leichter zu bauen. Ein Ziel des neu gegründeten Spin-off Unternehmens wird es sein, die am besten geeigneten Modelle und Softwarelösungen anzubieten. Die DYNAMore Swiss GmbH wird neben diesem Spezialgebiet aber auch Beratung, Auftragsberechnung sowie Konzeption und Support von Softwarelösungen im Bereich Umformsimulation anbieten. Bernd Hochholding, Geschäftsführer der DYNAMore Swiss GmbH, erklärt: „Unser vorrangiges Ziel ist es, Kunden bei der Umsetzung von virtuellen Produktionsmethoden zu unterstützen. Wir freuen uns, dass wir mit dem Institut für virtuelle Produktion, geleitet durch Prof. Dr. Hora, hierfür eine der international führenden Adressen auf diesem Gebiet als Partner gefunden haben. Die Umsetzung der am Institut entwickelten Methoden und Vorgehensweisen in die industrielle Praxis ist für die DYNAMore Swiss GmbH eine spannende und herausfordernde Aufgabe, die wir mit Kunden aus dem Automobilsektor, aber auch mit zahlreichen mittelständischen Unter-

ZEIT IST GELD - REDUZIEREN SIE DIE SIMULATIONSZEIT FÜR STRÖMUNGS- UND WÄRMETECHNISCHE SIMULATIONEN UM 65 BIS 75%

Testen Sie die mehrfach ausgezeichnete CFD Software FloEFD, das einzige vollintegrierte Simulationspaket für strömungs- und wärmetechnische Vorgänge für Pro/ENGINEER Wildfire und CATIA V5. Optimieren Sie die Effizienz und Qualität Ihrer Produkte und reduzieren Sie gleichzeitig die Anzahl der Prototypen und Ihre Entwicklungskosten in viel kürzerer Zeit als mit jeder anderen Software.

Möchten Sie FloEFD selber testen? Dann senden Sie eine Email an questions_mechanical@mentor.com oder rufen Sie uns an unter +49-69-130 253 0. Sie erhalten dann eine kostenlose Testversion für Pro/ENGINEER Wildfire oder CATIA V5.



www.mentor.com/mechanical

Mentor Graphics (Deutschland) GmbH
Hanauer Landstrasse 114-116, 60314 Frankfurt am Main
Tel: +49-69-130 253 0 Email: questions_mechanical@mentor.com

**Mentor
Graphics**

nehmen in der Schweiz, angehen möchten. Hierbei ist die Unterstützung der Unternehmen beim Einsatz industrieller Standard-Software wie LS-DYNA wichtig. Aber auch die Anpassung und Weiterentwicklung der Software auf die speziellen Belange und Bedürfnisse der Anwender von Umformsimulationstools ist eine Aufgabe, die wir von der DYNAMore Swiss GmbH in enger Zusammenarbeit mit der deutschen DYNAMore GmbH angehen möchten“. Prof. Dr. Hora, Leiter des Instituts für virtuelle Produktion der ETH Zürich ergänzt: „Wir freuen uns, dass wir mit DYNAMore einen Partner gefunden haben, mit dem wir die stetigen Technologieinnovationen im Bereich der Umformsimulation angehen können. Dazu bietet die Vielfalt der in LS-Dyna implementierten Methoden und Werkstoffmodelle beste Voraussetzungen. Das am IVP entwickelte und in LS-Dyna implementierte Werkstoffmodell für

rostfreie Werkstoffe stellt ein solches „science-to-software“ Beispiel dar. Die Qualität der Ergebnisse hängt neben den eingesetzten numerischen Methoden aber auch vom Modellaufbau und im starken Maß von den Werkstoffmodellen ab. Ohne exakte Werkstoffmodelle ist eine zuverlässige Abbildung der realen Prozesse unmöglich. Auch auf diesem Gebiet ergeben sich somit Möglichkeiten für eine kontinuierliche Zusammenarbeit. Wir sehen deshalb in unserer Partnerschaft ein großes Potenzial, um unseren Beitrag im Rahmen des Forschungs- und Technologietransfers zwischen Wissenschaft und Industrie in Zukunft noch zu verstärken.“

www.dynamore.de

ESI GROUP

Neue Version der ACE+ Suite

Die ESI Group gab die Freigabe der neuesten Version der ACE+ Suite bekannt. Die richtungweisende Lösung für Modellierung und Simulation von multiphysikalischen Aufgabenstellungen kombiniert Werkzeuge zur numerischen Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD), Finite Elemente-Strukturanalyse sowie zur Simulation von Effekten des Elektromagnetismus (EMAG) und der Gasdynamik. Perfekt aufeinander abgestimmt, unterstützt ACE+ Suite Unternehmen, die richtigen Entscheidungen zu treffen, wenn Herstellung und Leistungsfähigkeit von Produkten durch unterschiedliche physikalische Effekte beeinflusst werden, Produktentwicklungsprozesse zu beschleunigen und die Qualität ihrer Endprodukte zu steigern.

Neuer General Manager von ESI in DACH

Bereits zum September letzten Jahres wurde Andreas Renner (47) zum General Manager der ESI Group in Deutschland, Österreich und der Schweiz berufen. Die in Eschborn beheimatete ESI GmbH ist die deutsche Niederlassung der französischen ESI Group und zuständig für das operative Geschäft im deutschsprachigen Raum (Deutschland, Österreich, Schweiz). ESI Group gilt als einer der weltweit führenden Anbieter von Virtual Prototyping-Lösungen für die Fertigungsindustrie und zählt zahlreiche renommierte internationale Unternehmen zu seinem Kundenstamm. Andreas Renner, der bisher die Position des Director Sales and Marketing für den deutschsprachigen Raum ausübte, ist seit 2007 bei der ESI GmbH. Der diplomierte Luft- und Raumfahrt-Ingenieur verfügt über eine langjährige Erfahrung in der CAE-Branche, u. a. als Director Sales & Marketing Central Europe bei MSC-Software und Director European Business bei Romax Technology. Zeitgleich mit seiner Berufung zum General Manager hat Andreas Renner auch die Geschäftsführung der Mindware GmbH übernommen, einer hundertprozentigen Tochter der ESI Group, die ihre Geschäftsaktivitäten auf Serviceleistungen im CFD-Umfeld ausgerichtet hat. Eine seiner vorrangigen Aufgaben für das begonnene Geschäftsjahr sieht Andreas Renner in der Integration des deutschen operativen Geschäftsfelds des kürzlich übernommenen Virtual Reality-Spezialisten Ic.ido. Die ESI Group ist der erste reine CAE-Anbieter, der sich intensiv mit der Nutzung der Virtual Reality-Technologie auseinandersetzt und beabsichtigt, die faszinierenden Möglichkeiten der VR-Technologie verstärkt auch für simulationstechnische Aufgabenstellungen zu nutzen.

Pam-Form und Pam-Rtm für Verbundwerkstoffe

Die ESI Group kündigte die Freigabe von Pam-Rtm und Pam-Form 2012 an. Die beiden numerischen Simulationsanwendungen für die

Fertigung von Bauteilen aus Verbundwerkstoffen bieten eine einzigartige branchenbezogene Lösung zur Definition und Optimierung von Fertigungsverfahren für Rohtextilien und Prepregs mit der Zielsetzung, Bauteile in besserer Qualität bei kürzeren Produktionszeiten und niedrigeren Produktionskosten herzustellen.

Neue Casting Simulation Suite

Die ESI Group gab die Freigabe der neuesten Version ihrer Casting Simulation Suite, bestehend aus ProCAST und QuikCAST, bekannt. Die Software-Suite ermöglicht eine vorausschauende Beurteilung des gesamten Gießprozesses, einschließlich Füll- und Verfestigungsmängeln, Gefügeänderungen sowie Bauteilverzug. Sie ermöglicht die rasche Visualisierung der Auswirkungen von Konstruktionsänderungen auf Gussteile und hilft damit bereits in einer frühen Phase des Fertigungsprozesses, die richtigen Entscheidungen zu treffen. Virtuelle Prototypen erlauben Gießereien, die Produktentwicklungskosten zu senken, Vorlaufzeiten zu verkürzen und die Produktqualität zu steigern.

Visual-Environment 7.5

Die ESI Group gab die Freigabe von Visual-Environment 7.5 bekannt, einem flexiblen und offenen Engineering-Framework, das auf einer einheitlichen Plattform unterschiedliche Simulationsbereiche adressiert. Visual-Environment deckt den gesamten CAE-Prozess ab, vom Datenaustausch mit CAD-Systemen bis hin zu Erstellung von Simulationsmodellen und dem Postprocessing - alles auf der Basis eines gemeinsamen Berechnungsmodells.

www.esi-group.com

FE-DESIGN

Topologie-/Gestaltoptimierung

In Ergänzung zur Weiterentwicklung von Tosca Fluid hat FE-Design in den letzten 3 Jahren intensiv bei der internationalen Erforschung von

neuen Topologie- und Gestaltoptimierungsverfahren auf der Basis von adjungierten CFD-Lösungen sowie deren Integration in den Produktentwicklungsprozess mitgearbeitet. In dem durch die EU geförderten Projekt „FlowHead“ haben sich Hochschulen, CFD- und Optimierungsspezialisten sowie potenzielle Anwender aus Europa zusammengefunden. FE-Design hat in Zusammenarbeit mit der technischen Universität München sowie der Universität in Kopenhagen, die Anforderungen von Volkswagen und Renault aufgegriffen und einen Software-Prototyp entwickelt, welcher in besonderer Weise den Produktentwicklungsprozess mit dem optimierungsspezifischen Pre- und Postprocessing sowie der Rückführung in den Konstruktionsprozess berücksichtigt. Die ersten Untersuchungen an praktischen Problemstellungen haben sehr interessante Aspekte gezeigt, welche in die zukünftige Softwareentwicklung von neuen Optimierungswerkzeugen bei FE-Design einfließen werden.

Windkraftanlagen

Höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Windturbinen führen zu Extrembelastungen der einzelnen Bauteile. So ist die Hauptantriebswelle über ihre gesamte Lebensdauer einer oszillierenden Biegebelastung ausgesetzt. Durch Optimierung mit Tosca Structure.shape, d.h. einer geringfügigen Gestaltänderung an der Oberfläche, gelingt eine Hotspot-Spannungsreduktion von 30%. Damit lässt sich eine deutlich verbesserte Zuverlässigkeit und Lebensdauer erzielen. Details siehe Hauptantriebswelle. Windkraftanlagen müssen zunehmenden Größenanforderungen gerecht werden, so stieg in den letzten 20 Jahren die Größe der Anlagen um den Faktor 10. Um diesen externen Belastungsanforderungen nicht nur standzuhalten, sondern optimal zu begegnen, erhält man mit Tosca Structure.topology z. B. an einer Nabe ein optimiertes Strukturdesign mit geringerem Gewicht und einer höheren Steifigkeit.

www.fe-design.de

FRIENDSHIP SYSTEMS

Friendship-Framework Version 2.4

Die Potsdamer Firma Friendship Systems hat im März die neue Version 2.4 ihrer CAE-Software Friendship-Framework veröffentlicht. Das Update beinhaltet etwa mit dem Design Lab neue Funktionalität zur intuitiven Erstellung von neuen Produktvarianten. Abwickelbare Flächen können nun ebenfalls parametrisch modelliert und exportiert werden. Ferner wurde die Performance von nutzerdefinierten Funktionen beschleunigt sowie die Drag&Drop-Mechanismen intensiv ausgebaut.

www.friendship-systems.com

GRANTA DESIGN

GRANTA bietet NIMS Kriech- und Ermüdungsdaten

Granta Design Ltd. gab eine Vereinbarung mit dem japanischen National Institute for Materials Science (NIMS) bekannt. Gegenstand der Vereinbarung ist der Zugriff auf die umfangreichen Metallkennwertdaten des NIMS. Der branchenführende Datenpool des NIMS ist das Ergebnis vieler Jahre kontinuierlichen Testens von Metallwerkstoffen, darunter Stähle, wie Kohlenstoffstahl, niedriglegierte Stähle, Stähle mit hohem Chromanteil und austenitische Edelstähle, sowie eine große Auswahl an Legierungen, wie Eisen-, Nickel- und Kobaltlegierungen. Die Daten umfassen die numerischen Rohdaten der detaillierten Kriechmessungen und Ermüdungskennwerte, die für Materialingenieure bei Sicherheitsfragen und langfristigen Zuverlässigkeitsbetrachtungen im Energiesektor äußerst wichtig sind. Das NIMS ist weltweit für seine Expertise über das Langzeitverhalten metallischer Materialien bekannt. Das Langzeitverhalten dieser Materialien ist für Kraftwerke und Produktionsanlagen ein entscheidender Faktor. Die Daten des NIMS sind daher beim Design, der Wartung und der Instandsetzung dieser Anlagen von großer Bedeutung. Das Natio-

nal Institute for Metals wurde 1956 gegründet, die Ergebnisse der in 50 Jahren erlangten Forschungsdaten waren jedoch bisher nur allgemein, in Form von veröffentlichten Diagrammen und Tabellen, erhältlich. Anwender werden nun erstmals auch in der Lage sein, auf die zugrundeliegenden numerischen Rohdaten zuzugreifen. Dabei werden die Daten über das führende Materialdateninformationssystem Granta MI verfügbar sein, das dem Anwender mittels Webbrowser einen einfachen Zugriff für seine Computer Aided Engineering (CAE) Anwendung ermöglicht, um die Daten zu durchsuchen, sie darzustellen und anzuwenden. Das NIMS hat unabhängige Studien zu Verbreitungsmethoden durchgeführt, die eine aktivere Nutzung der wertvollen Daten ermöglicht. Unter der jetzigen Vereinbarung wird das NIMS Granta Kriech- und Ermüdungskennwerte bereitstellen. Der erweiterte Zugriff auf diese Daten wird es Ingenieuren weltweit ermöglichen bei der Entwicklung, Wartung und Instandhaltung von Anlagen einen erheblichen gesellschaftlichen Beitrag zu Sicherheit, Verlässlichkeit und Nachhaltigkeit zu leisten. Die NIMS Daten werden im Laufe des Jahres 2012 als Granta MI Datenmodul verfügbar gemacht. Die Installation von Granta MI auf einem Firmennetzwerk bietet darüber hinaus einen schnellen, eingebundenen und unternehmensweiten Zugriff auf interne und andere Referenzdaten, die den NIMS Datensatz ergänzen.

www.grantadesign.com

HEWLETT PACKARD

NvidiaA und Hewlett Packard befreien Workstation

Mit der Präsentation der neuen „HP Z1“-Workstation verabschiedet sich Hewlett Packard vom traditionellen Towergehäuse. Das Ergebnis ist die erste 27-Zoll All-in-One-Workstation in formschönem Design, die minimalste Abmessungen mit maximaler Rechenleistung professioneller 3D-Grafiklösungen von Nvidias Quadro-Grafikprozessoren vereint.

Die HP Z1 bietet ein 27-Zoll Display, das sich wie eine Motorhaube eines Autos noch oben öffnen lässt. Bestehende Bauteile lassen sich so ohne zusätzliches Werkzeug schnell wechseln und Hardware mit nur wenigen Handgriffen aufrüsten. Trotz des neuen Formfaktors steht Designern, Ingenieuren, Medien- und Entertainment-Profis die benötigte 3D-Grafikleistung im vollen Umfang zur Verfügung. Begleitet wird die Markteinführung der HP Z1 mit einer erneuerten Produktlinie an Nvidia-Quadro-GPUs, die neben einem geringeren Stromverbrauch auch eine reduzierte Hitzeentwicklung gewährleisten. Die NVIDIA-GPUs Quadro 500M, Quadro 1000M, Quadro 3000M und Quadro 4000M wurden speziell für All-in-One-Workstations entwickelt. Sie sind flüsterleise und bieten erweiterbare Grafikeigenschaften (siehe auch „Nvidia“)

www.hp.com

HOCHSCHULE NIEDERRHEIN

Harpoon - das Licht von morgen

Sie gelten als die Lichtquelle der Zukunft: OLEDs - organische Leuchtdioden - könnten die Beleuchtungsindustrie revolutionieren. Grund dafür ist nicht nur ihr natürliches Licht und ihre extreme Dünne, sondern auch die Art und Weise, wie sie dieses Licht abgeben: diffus über die gesamte Oberfläche. Die neue Technologie ist erst kurz auf dem Markt und augenblicklich noch teurer als herkömmliche Lichtquellen. Auch in Sachen Effizienz liegen OLEDs erst am unteren Rand ihrer Möglichkeiten. Doch dies soll sich bald ändern. An der Hochschule Niederrhein arbeiten Wissenschaftler mit mehreren Partnern aus der Wirtschaft im Rahmen des Verbundprojekts „Harpoon“ - die Abkürzung steht für Hochgeschwindigkeits-Abscheidung restriktiv präziser organisch optoelektronischer Nanoschichten - an der OLED von morgen. Ziele des Projektes, welches von der Philips Technologie GmbH geleitet wird, sind die Steigerung der Energieeffizienz, die Optimierung der OLED Produkti-

on und damit eine kostengünstigere Herstellung der Leuchtmittel in größerer Stückzahl. Die Forscher der Hochschule Niederrhein erforschen innerhalb des Projektes numerische Strömungssimulations-Methoden und entwickeln Programme, die für Beschichtungsströmungsvorgänge im Übergangsbereich vom Fein- zum Hochvakuum geeignet sind. Diese Grundlagenforschung erfolgt am Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen (IMH). Die dortigen Wissenschaftler sind spezialisiert in der Entwicklung mathematische Modelle und der Simulation technischer Prozesse.

www.hs-niederrhein.de

HOCHSCHULE TUTTLINGEN

Industrial Materials Engineering

Am Hochschulcampus Tuttlingen der Hochschule Furtwangen startet zum Wintersemester 2012/13 der neue Studiengang Industrial Materials Engineering, der sich mit dem Thema Werkstoffe und Werkstofftechnik beschäftigt. Interessierte können sich bis zum 15. Juli 2012 beim Zulassungsamt in Furtwangen für das Studium bewerben.

Industrial Systems Design

Der neue Studiengang Industrial Systems Design basiert auf breitgefächerten Grundlagen aus den Ingenieurwissenschaften, speziell aus einer Kombination der Informatik, Elektrotechnik und des Maschinenbaus. Die Vertiefung in den höheren Semestern ermöglicht zukünftige branchenübergreifende Tätigkeiten. Fragen der Systemintegration und der industriellen Kommunikationstechnik spielen während des Studiums eine besondere Rolle. Studienschwerpunkte sind zwangsläufig die Automatisierungstechnik,

Antriebstechnik, Sensorik sowie die Digital- und Robotertechnik.

www.hfu-campus-tuttlingen.de

IBM

IBM und Hertz auf dem Elektro-Trip

IBM und Hertz gehen gemeinsam neue Wege beim Thema Elektromobilität. Im Rahmen einer Carsharing-Sondervereinbarung der Partner, die zwischen dem Flughafen Stuttgart und dem etwa 30 Kilometer entfernten IBM Campus in Ehningen gilt, werden ab April Elektrofahrzeuge eingesetzt. Die Besonderheit des Deals: Im Verlauf diesen Jahres werden die Fahrzeuge an intelligenten Ladestationen auf dem IBM Campus mit Energie versorgt. Hertz On Demand, der internationale Carsharing Club von Hertz, und IBM werden im Feldversuch Akzeptanz und Alltagstauglichkeit testen und bei entsprechender Nachfrage weitere IBM Standorte mit einbinden.

Superrechner für die Forschung

Die Forschungsprojekte der Universität Oldenburg werden immer komplexer und datenintensiver: Um sie auch weiterhin erfolgreich abschließen zu können, hat die Universität ihr Rechenzentrum aufgerüstet. Ein High-Performance-Computing-(HPC-)Cluster von IBM mit 4200 Prozessorkernen erhöht die bisherige Rechenleistung um das Zehnfache. Es ist bundesweit eines der größten Rechnernetzwerke im Hochschulbereich, in Europa handelt es sich sogar um einen der größten Hochleistungsrechner für die Windenergieforschung.

Server-Wiederaufbereitungs-zentrum in China

IBM hat die Eröffnung des ersten Server-Wiederaufbereitungszentrums seiner Art in China bekannt gegeben. Das neue Zentrum mit Sitz in Shenzhen kann dazu beitragen, die negativen Auswirkungen von Elektronikabfall auf die Umwelt zu reduzieren. Die Lebensdauer älterer IT-Geräte, die sonst auf der Mülldeponie landen würden, soll durch Wiederaufbereitung verlängert werden. IBM plant zudem, bestimmte ältere IBM Power Systeme von Kunden zurückzukaufen, wenn sie auf neue IBM Systeme umsteigen.

Supercomputer der Max-Planck-Gesellschaft

Die Max-Planck-Gesellschaft, eine der renommiertesten Wissenschaftseinrichtungen in Deutschland, hat IBM damit beauftragt, ein neues Supercomputersystem im Petaflop/s-Bereich zu bauen, das für "Grand Challenge"-Aufgaben in der Wissenschaft eingesetzt werden soll. Nach seiner Fertigstellung im Jahr 2013 wird die Maschine voraussichtlich zu den schnellsten Supercomputern in Europa gehören.

Mercedes-Benz Nutzfahrzeuge

IBM hat die IT-Systemlandschaft der Produktionslogistik im Mercedes-Benz Lkw-Montagewerk in Wörth modernisiert. Damit können die steigenden Anforderungen durch zunehmende Komplexität und Flexibilität auch in Zukunft nachhaltig sicher gestellt werden. Im Wörther Werk, mit rund 11 000 Mitarbeitern das Größte seiner Art weltweit, werden sowohl der Actros sowie die Mercedes-Benz Lkw Modelle Atego, Axor, Econic, Unimog und Zetros produziert. Im Rahmen eines dreistufigen Umsetzungsplans wurden die Prozesse rund um die Verwaltung der Stammdaten, den

**Neues Jobportal für CAE-Ingenieure:
www.CAE-Stellenmarkt.de**

Versand und die operative Logistik modernisiert.

12 Atome zur Speicherung eines magnetischen Bits

Wie viel braucht es, um ein Bit an Information magnetisch zu speichern? Die Antwort von IBM: 12 Atome. Forscher des IBM Almaden Research Centers in Kalifornien konnten erstmals zeigen, dass ein Bit - die Grundspeichereinheit in der Informationstechnologie - in nur zwölf Atomen gespeichert werden kann. Heute übliche Festplatten benötigen für ein Bit ungefähr eine Million Atome. Die Forschungsarbeit, die in der aktuellen Ausgabe des Fachmagazins Science veröffentlicht wurde, zeigt das Potenzial für magnetische Datenspeicherung in atomarem Maßstab mit Speicherkapazitäten, die bis zu 100 Mal größer sind als bei heutigen Festplatten.

www.ibm.com

ISKO ENGINEERS

ISKO engineers AG hat eine Vertriebspartnerschaft mit der MSC Software GmbH geschlossen. Damit erweitert ISKO sein Softwareportfolio mit den führenden Simulationslösungen von MSC. ISKO besitzt als Engineering Dienstleister bereits langjährige Expertise mit den Softwareprogrammen MSC Nastran und Marc und wird diese Erfahrung ab April 2012 in den Lösungsvertrieb einbringen. ISKO hat sich auf hochqualifizierte CAE-Leistungen und Lösungen spezialisiert. Der Name steht für „Innovation in der Simulation von der Konzeption bis zum Optimum eines Produktes.“ Gegründet wurde das Unternehmen im Oktober 1996 als 2-Mann-Start-Up in München als Dienstleister für die bayerische Automobilindustrie. Heute beschäftigt ISKO mehr als 80 Mitarbeiter an fünf Standorten. Schon vor Jahren hat ISKO begonnen, sein Leistungsportfolio vom Engineering Dienstleister zum CAE Lösungsanbieter auszubauen und damit seine Kunden umfassend in der virtuellen Produktentwick-

lung zu betreuen. Neben der Automobilindustrie zählen inzwischen Unternehmen aus den Bereichen Maschinen- und Anlagenbau, Energie-, Elektronik-, Konsumgüterindustrie, Verfahrenstechnik sowie der Luft- und Raumfahrtindustrie zum Kundenkreis. ISKO hat sich für die leistungsfähigen Lösungen von MSC entschieden, da diese den Standard in der virtuellen Produktentwicklung bilden und die ISKO Mitarbeiter sehr viel Erfahrung damit erworben haben. Die Simulationsexperten von ISKO haben sich in der Industrie vor allem in den Bereichen Nichtlineare Dynamik, Festigkeit und Akustik einen hervorragenden Ruf erarbeitet und werden diese Erfahrung in die Betreuung der Softwarelösungen MSC Nastran (Standard in der Automobil- und Luftfahrtindustrie), Marc (robuste nichtlineare Analysen), Adams (führende Mehrkörperdynamik Simulation) und Actran (leistungsfähige Akustik Simulation) einbringen.

www.isko-engineers.de

KEY TO METALS

Materialdatenbank via Altair HWP

Key to Metals gab die Veröffentlichung und Verfügbarkeit der Key to Metals Materialdatenbank über die HyperWorks Partner Alliance (HWP) bekannt. Key to Metals ist, mit über 4,5 Millionen Einträgen zu Kennwerten und dem Zugriff auf 175.000 Materialien, die weltweit umfassendste Materialdatenbank für metallische Werkstoffe. Mittels internationaler Querverweistabellen kann man Materialien aus der ganzen Welt finden und vergleichen, um grundlegende Vergleichsstudien zur Ermittlung detaillierter Materialeigenschaften, wie der chemischen Zusammensetzung oder mechanischer und physikalischer Eigenschaften, Wärmebehandlungsdiagramme und Materialeigenschaften bei erhöhten Temperaturen, durchzuführen. Zusätzlich zum umfassenden Key to Metals Datenset bietet das integrierte Ex-

tended Range Modul, das nahtlos mit den Datenbankfunktionalitäten arbeitet, dem Anwender eine einzigartige Ressource für erweiterte Eigenschaften (siehe auch „Altair“).

www.keytometals.com

KOMPETENZZENTRUM VIF

Co-Simulationstool ICOS 2.0

Von der Batterie über thermische oder elektrische Netzwerke bis hin zu Antriebsstrang oder Fahrdynamik – durch die umfassende Weiterentwicklung der erfolgreichen Co-Simulationsplattform ICOS des Virtual Vehicle Forschungszentrums können Fahrzeugentwickler Simulationsmodelle aus unterschiedlichen Fachbereichen nun umfassender und effizienter miteinander verknüpfen. Die rasche, ressourcen- und kostensparende Entwicklung nachhaltiger, effizienter und umweltschonender Fahrzeuge ist nur durch den Einsatz von hoch spezialisierten Simulationsprogrammen machbar. Besonders die hohe Anzahl an Gesamtfahrzeug-Hardware-Prototypen treibt Entwicklungszeit und -kosten stark nach oben. Das Problem: Für jede der technologischen Teilbereiche und Komponenten eines Fahrzeugs existiert eine Vielzahl von Hard- und Software-Tools, die sich nur eingeschränkt bis gar nicht miteinander verknüpfen lassen. Das Vernetzen und Verstehen verschiedener notwendiger Simulationen ermöglicht es, teure Hardware-Prototypen zu reduzieren. Denn nur dadurch können die immer komplexeren Komponenten und Teilsysteme eines Fahrzeugs schon frühzeitig in der Entwicklung entworfen und überprüft werden. Die unabhängige Co-Simulations-Plattform ICOS (Independent Co-Simulation) des Virtual Vehicle Forschungszentrums ermöglicht genau das: verschiedene gängige Simulationswerkzeuge zu integrieren, zu koppeln und vor allem zu synchronisieren. Konkrete Beispiele in der Anwendung von ICOS wie die Optimierung der Lebensdauer von Batterien in Hybrid-Fahrzeugen oder in der Analyse

von integralen Sicherheitssystemen erzielen deutliche Einsparungen in Bezug auf Entwicklungszeit und Entwicklungskosten von Fahrzeugen.

Startschuss für real-time Co-Simulation

Im Januar 2012 startete das 3-jährige K2-Forschungsprojekt ACoRTA (Advanced Co-Simulation Methods for Real-Time-Applications) mit dem Ziel, die Einsatzmöglichkeiten der Co-Simulation in den Bereich der harten Echtzeitsysteme (Hardware-in-the-Loop Systeme) zu erweitern. Projektpartner sind die AVL List GmbH, die Porsche AG und die Universität Klagenfurt (Lehrstuhl für Mess- und Regelungssysteme).

www.v2c2.at

MSC.SOFTWARE

Neue Patran und MSC Fatigue Versionen

MSC Software gab die geplante Markteinführung der Versionen 2012 von Patran und MSC Fatigue bekannt. Die neuen Versionen werden ab Anfang Februar zum Download bereitgestellt. Verbessert wurden vor allem Funktionen für Modellierung sowie nichtlineare Simulationen und die Berechnung von Versagenskriterien. Zudem wurden die Funktionen für die Lebensdauerprognose von Produkten optimiert. Die neue Struktur des Modellbrowsers von Patran 2012 bietet eine effizientere Menünavigation. So können Anwender besser auf die verschiedenen Komponenten ihrer Modelle zugreifen und diese ändern. Die Struktur ist intuitiv und bedienerfreundlich und kann an den individuellen Arbeitsablauf des Anwenders angepasst werden. Datenbankentitäten lassen sich über die Modellstruktur mühelos visualisieren, aufrufen und bearbeiten. Das verkürzt den Lernprozess, erhöht die Produktivität und trägt dazu bei, dass sich Patran noch intuitiver nutzen lässt. Die Modellbrowserstruktur ist für Windows und Linux verfügbar. Ingenieuren stehen mehr Funktionen für nichtlineare Berechnungen und die Untersuchung von

Versagenskriterien zur Verfügung. Zu den neuen Funktionen gehören die Erzeugung von Kohäsivmodellen, die virtuelle Rissausbreitung zur Fehleranalyse sowie eine umfassendere Unterstützung von Kontakten, beispielsweise die Erkennung von Kantenkontakten, verbesserte Kontakttabellen und neue nichtlineare Elemente. Kohäsionsmodelle dienen der Simulation von Delaminierungen oder Rissausbreitungen und insbesondere der Fehleranalyse im Zusammenhang mit Verbundstoffen. Mit der „Virtual Crack Closure Technique“ lassen sich Rissausbreitungen anhand der durch den Riss freigesetzten Energie simulieren. Der bisher in Marc und MSC Nastran verwendete Segment-to-Segment Kontakt wurde nun auch in Patran implementiert. Es besitzt eine höhere Genauigkeit, da die typischen Einschränkungen von traditionellen Knoten-Segment-Kontakten entfallen. Diese Methode eignet sich sowohl für Elemente mit hoher als auch niedriger Wertigkeit und bietet gleichmäßigere Kontaktspannungen. In der Version 2012 wurde der Kantenkontakt zwischen Balken, Schalen und Solids erweitert. Einige der neuen in MSC Nastran und Marc implementierten Formulierungen für 1D-, 2D- und 3D-Elemente werden ab sofort auch von Patran unterstützt. Damit erhalten Ingenieure bessere Werkzeuge und Optionen für die präzise Analyse von nichtlinearen Modellen. Mit der Einführung des neuen Solvers von MSC Fatigue 2012 wurde die Berechnung von Haltbarkeit und Betriebsfestigkeit vereinfacht. MSC Fatigue berechnet die Lebensdauer von Produkten auf Basis von Spannungs- oder Dehnungsergebnissen von FE-Modellen, Wechsellasten und Materialeigenschaften. Neben der herkömmlichen spannungsbasierten Analyse (S-N oder Gesamtlebensdauer) ist auch eine dehnungsbasierte Analyse (E-N, lokale Dehnung oder Rissinitiierung) möglich. Damit können nun selbst Anwender mit geringen Kenntnissen auf dem Gebiet der Lebensdaueranalyse Berechnungen in der ihnen vertrauten FE-Modellierungsum-

gebung durchführen. Dank der intuitiven Oberfläche und der hohen Analysegeschwindigkeit kann dem Aspekt der Produkthaltbarkeit ein wesentlich größerer Stellenwert innerhalb des Entwicklungsprozesses eingeräumt werden. Mithilfe der neuen Funktion „MSC Fatigue Shaker“ lässt sich die Lebensdauer von Komponenten berechnen, die einer aus einer einzelnen Quelle stammenden willkürlichen Schwingung ausgesetzt sind. MSC Fatigue 2012 beinhaltet zudem ein neues Modul für Nahtschweißverbindungen, das auf struktureller Spannung aufbaut und die gängigen Klassifizierungsstandards (z. B. BS 5400 und BS 7608) zur Entwicklung von Schweißverbindungen mit langer Haltbarkeit erfüllt. Zusätzlich lassen sich mit „MSC Fatigue 2012 Spot Weld“ Punktschweißverbindungen überprüfen.

Neues Programm für Forscher und Wissenschaftler

MSC Software präsentierte sein neues „Research Assist Program“. Mit diesem Programm sollen weltweit Forscher und Wissenschaftler unterstützt werden, die an besonders innovativen Projekten arbeiten. MSC stellt den Wissenschaftlern kostenlose Lizenzen zur Verfügung und möchte so deren Forschungs- und Entwicklungsinitiativen fördern.

www.mssoftware.com

NAFEMS ONLINE MAGAZIN

Neuer CAE-Stellenmarkt online ab 1. Mai 2012

In Zusammenarbeit mit dem NAFEMS Online-Magazin entsteht ab dem 1. Mai ein Online-Stellenportal speziell für CAE-Ingenieure. Während einer zweiwöchigen Einführungsphase können Stellenanbieter für CAE-Ingenieure zunächst kostenlos inserieren. Danach werden für weitere zwei Wochen 50% Ermäßigung auf die regulären Kosten gewährt. Auch nach der Einführungsphase bleiben die Preise attraktiv – eine 30 Tage Standard-Stellenanzeige zum Beispiel kostet 220 Euro zzgl.

ges. MwSt. Das Portal ist offen für Stellenanbieter und Stellensuchende und ist unabhängig von einer NAFEMS Mitgliedschaft.

www.cae-stellenmarkt.de

NOESIS SOLUTIONS

Kooperation mit divis

Noesis Solutions und divis intelligent solutions GmbH geben die Integration von ClearVu Analytics Modeler und ClearVu Global Optimizer in Optimus bekannt. Damit haben Optimus-Nutzer exklusiv Zugang zu beiden Modulen, um höchste Surface-Response-Qualität für ihre Anwendung zu erzielen und um hochdimensionale, nicht-lineare globale Optimierungsaufgaben schnell und zuverlässig zu lösen. Die Integration der bewährten Methoden von divis in die Optimus-Umgebung für die Prozessintegration und die Designoptimierung erlaubt Herstellern schneller Produkte zu entwickeln und zu optimieren, was größere Margen, Gewinne und Marktanteile ermöglicht. Optimus von Noesis Solutions erleichtert den Anwendern die Identifikation von besonders erfolgversprechenden Produktdesigns. Dies geschieht durch die Automatisierung und Optimierung parametrischer Simulationen unter Verwendung bestehender Simulationswerkzeuge. Die Nutzer von Optimus verfahren typischerweise gemäß der experimentellen Versuchplanung (Design of Experiments), um einen Simulationsplan zu definieren, der ein Höchstmaß an relevanten Designinformationen mit einem Minimum an Simulationsaufwand liefert. Diese Informationen werden anschließend genutzt, um mithilfe von Methoden des Response Surface Modeling (RSM) sowohl das Potential für Design-Verbesserungen auszuloten als auch um Designvarianten zu identifizieren, die unter gleichzeitiger Berücksichtigung unterschiedlicher Zielgrößen und Nebenbedingungen ein Optimum darstellen (siehe auch „Divis“).

www.noessolutions.com

NVIDIA

Nvidia und Hewlett Packard befreien Workstation

Mit der Präsentation der neuen „HP Z1“-Workstation verabschiedet sich Hewlett Packard vom traditionellen Towergehäuse. Das Ergebnis ist die erste 27-Zoll All-in-One-Workstation in formschönem Design, die minimalste Abmessungen mit maximaler Rechenleistung professioneller 3D-Grafiklösungen von Nvidias Quadro-Grafikprozessoren vereint. Die HP Z1 bietet ein 27-Zoll Display, das sich wie eine Motorhaube eines Autos noch oben öffnen lässt. Bestehende Bauteile lassen sich so ohne zusätzliches Werkzeug schnell wechseln und Hardware mit nur wenigen Handgriffen aufrüsten. Trotz des neuen Formfaktors steht Designern, Ingenieuren, Medien- und Entertainment-Profis die benötigte 3D-Grafikleistung im vollen Umfang zur Verfügung. Begleitet wird die Markteinführung der HP Z1 mit einer erneuerten Produktlinie an Nvidia-Quadro-GPUs, die neben einem geringeren Stromverbrauch auch eine reduzierte Hitzeentwicklung gewährleisten. Die Nvidia-GPUs Quadro 500M, Quadro 1000M, Quadro 3000M und Quadro 4000M wurden speziell für All-in-One-Workstations entwickelt. Sie sind flüsterleise und bieten erweiterbare Grafikeigenschaften (siehe auch „Hewlett Packard“

www.nvidia.com

SCIENCE + COMPUTING

Veränderung in der Geschäftsführung

Dr. Roland Niemeier, im Vorstand der science + computing ag für Vertrieb und Marketing verantwortlich, verlässt zum 31.03.2012 auf eigenen Wunsch das Unternehmen, um sich neuen Herausforderungen zu widmen. Als Vertriebsleiter war er seit 2003 für den Vertrieb von Softwareprodukten wie scVenus oder Platform LSF verantwortlich. Sein Nachfolger und neuer Vorstandsvorsitzender der science

+ computing ag wird Gerd-Lothar Leonhart. Er kommt von IBM zu science + computing. Dort war er zuletzt verantwortlich für das Business Development in Deutschland – und zwar für die Branchen Automobil, Luft- und Raumfahrt und High-Tech. In seiner Zeit bei IBM hat er zudem den Aufbau von Outsourcing Business Units verantwortet, neue Geschäftsfelder und Dienstleistungen für den Mittelstand entwickelt und die Markteinführung und den Vertrieb anspruchsvoller Produkte und Dienstleistungen geleitet. Gerd-Lothar Leonhart ist gleichzeitig auch Geschäftsführer von Bull Deutschland, der Muttergesellschaft von science + computing. Durch seine doppelte Führungsfunktion werden die beiden Unternehmen zukünftig noch enger zusammenarbeiten.

Cluster Zertifizierung

Seit kurzem ist science + computing Partner des Intel-Cluster-Ready-Programms. Auf Wunsch zertifiziert das Unternehmen Cluster, an deren Konzeption und Installation es beteiligt war. Intel-Cluster-Ready ist ein Zertifizierungsprogramm sowohl für Hardware- wie auch Softwarehersteller, um Cluster-Systeme und Anwendungen schneller und einfacher aufeinander abzustimmen. Das Ergebnis: eine ideal integrierte HPC-Arbeitsumgebung.

www.science-computing.de

SIEMENS PLM SOFTWARE

FibersimT 2012, Syncrofit 2012 und QPE 2012 verfügbar

Siemens PLM Software gab die Einführung von FibersimT 2012 bekannt. Fibersim trägt zur Risikoreduzierung in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilbranche und in der Windkraftindustrie bei, indem die Konstruktion und Herstellung mithilfe innovativer, langlebiger und leichter Verbundwerkstoffstrukturen optimiert werden. Ebenfalls wurde die Einführung der Syncrofit-Softwareversion 2012 (Syncrofit 2012) und Quality Planning Environment (QPE)-Softwareversion 2012 (QPE

2012) bekannt gegeben. Die Produkte wurden von Vistagy entwickelt, einem Unternehmen, das am 7. Dezember 2011 von Siemens übernommen wurde und nun eine Geschäftseinheit innerhalb von Siemens PLM Software bildet.

Boeing unterzeichnet 10-Jahres-Vertrag

Siemens PLM Software gab bekannt, dass Boeing, eines der weltweit führenden Luft- und Raumfahrtunternehmen, erneut einen Vertrag über zehn Jahre unterzeichnet hat. Mit dem Abkommen erweitert Boeing den Einsatz der Technologie von Siemens PLM Software in seinen Geschäftsbereichen Boeing Commercial Airplanes sowie Defense Space und Security. Als Schlüsselargumente für die Vertragsverlängerung nannte das Unternehmen die bewährte Leistungsfähigkeit von NX und Teamcenter, den Innovationsgrad, die Skalierbarkeit sowie die offene Architektur der Software. „Boeing und Siemens PLM Software blicken bereits auf eine lange Geschäftsbeziehung zurück; und wir freuen uns, unseren Vertrag zu verlängern. Wir nutzen die Vorteile der Innovationen, um unsere Kapazitäten weltweit auszubauen“, sagt Nancy Bailey, Vice President of IT Product Systems bei Boeing. „Durch die Partnerschaft mit Siemens PLM Software erweitern wir die Möglichkeiten im Bereich PLM bei Boeing. Die Offenheit der Produkte hilft uns auch zukünftig alle Lösungen, die wir bei Boeing einsetzen, zu unterstützen und fortlaufend zu verbessern. So schaffen wir geschäftlichen Mehrwert für unser Unternehmen.“ „Wir sind stolz auf die bewährte Beziehung zu Boeing und begeistert darüber, dass der Marktführer in der Luft- und Raumfahrtbranche auch weiterhin auf Technologie von Siemens PLM Software setzt“, sagt

Chuck Grindstaff, CEO von Siemens PLM Software. „Boeing wählt unsere integrierte Lösungs-Suite. Das beweist, dass wir unseren Kunden mit innovativen Produkten auf dem Markt zum Erfolg verhelfen.“

Feste Größe im Automobilbau

Siemens PLM Software hat sich als feste Größe in der globalen Automobilindustrie etabliert. Mittlerweile entwickeln und produzieren weltweit 15 der 16 größten Automobilhersteller ihre Fahrzeuge mit Programmen von Siemens PLM Software. In den vergangenen zwei Jahren nahm der Marktanteil von Siemens PLM Software noch einmal deutlich zu. Zu dieser positiven Entwicklung haben nicht zuletzt zwei große Vertragsabschlüsse mit Chrysler und Daimler beigetragen. Beide Hersteller haben ihre bestehenden CAD- und PLM-Systeme durch Lösungen von Siemens PLM Software ersetzt. Ein weiteres Beispiel für erfolgreiches Wachstum auch bei den Zulieferern gibt es bereits: Die Eisenmann AG erweitert den Einsatz von Teamcenter und NX. Eisenmann ist einer der international führenden Systemanbieter für Oberflächentechnik, Umwelttechnik, Materialfluss-Automation und Hochtemperatur-Prozesstechnik und verfügt über umfangreiche Expertise im Anlagenbau. Für den Automobilbau bietet Eisenmann unter anderem Reinigungs- und Vorbehandlungssysteme, vollautomatische Lackieranlagen sowie Materialfluss-Systeme. Das Unternehmen setzt bereits seit längerem auf die bewährten Lösungen von Siemens PLM Software und hat die bereits existierenden Installationen von NX vor kurzem deutlich ausgebaut. Darüber hinaus wechselt Eisenmann mit der Unterstützung von Siemens PLM Software von Teamcenter Engineering zu Teamcenter Unified Architecture. Mit dem

erneuten Auftrag setzen die beiden Unternehmen ihre lange und gute Zusammenarbeit fort. Die Produkte von Siemens PLM Software kommen beim Automobilbau in vielen Bereichen zum Einsatz - von der Planung über die Konstruktion bis hin zur Fertigung von Fahrzeugen und der Auswertung von Daten. Siemens PLM Software setzt dabei auf disziplinübergreifende Funktionen und den direkten Zugang zu Informationen in Echtzeit. Dazu kommen umfangreiche Möglichkeiten für die Analyse und Simulation verschiedener Prozesse. Die Effizienz lässt sich dadurch um zweistellige Werte steigern. Mit dem System-basierten Ansatz, den Siemens PLM Software dabei verfolgt, lässt sich die Vielzahl einzelner Entwicklungsschritte besser aufeinander abstimmen - das Ergebnis sind kürzere Konstruktionszeiten und bessere Produkte.

Teamcenter AppShare fürs iPad

Teamcenter AppShare fürs iPad ist jetzt im App Store verfügbar. AppShare ermöglicht die Freigabe des Computerdesktops, so dass Anwender zusammenarbeiten und Informationen austauschen können. Mit der neuen Teamcenter App stehen diese Möglichkeiten nun mittels einer mobilen Internetverbindung allen iPad-Nutzern zu jeder Zeit und an jedem Ort zur Verfügung. Mit Teamcenter AppShare können Benutzer an vorhandenen AppShare-Konferenzen teilnehmen und die Desktops der Konferenzteilnehmer anzeigen, so als ob alle gemeinsam an einem Desktop sitzen würden.

Zusätzliche Funktionen für Tecnomatix Jack

Siemens PLM Software hat Tecnomatix Jack um zusätzliche Funktionen erweitert. Die neue Version des Simulations- und Modellierungswerkzeugs für Ergonomiestudien,

www.CAE-Stellenmarkt.de

Ab 1. Mai 2012 online – jetzt kostenlos buchen!

Jack 7.1, enthält neben neuen Datenbanken mit menschlichen Standardmaßen auch Verbesserungen bei den Sitzpositionen sowie der Simulation einzelner Hände. Mit Jack 7.1 können produzierende Unternehmen präzisere Ergonomiestudien in kürzerer Zeit erstellen. Das ist eine wichtige Entscheidungshilfe und macht eine höhere Produktqualität möglich. Jack ist ein Bestandteil von Tecnomatix, der führenden Lösung für die digitale Fabrik.

Procter & Gamble verlängert

Siemens gab die Verlängerung des Vertrags mit Procter & Gamble Co. bekannt. Damit erhält P&G weltweiten Zugang auf ein umfassendes Software-Angebot von Siemens PLM Software, P&G arbeitet seit den 1980er Jahren mit Technologie von Siemens PLM Software und hat derzeit tausende User im gesamten Unternehmen eingerichtet. Die Comos Plant Engineering Software, erste Adresse für Lifecycle-Engineering in komplexen Industrieanwendungen, wird bei P&G seit 2009 verwendet.

www.siemens.com/plm

TRANSTEC

iPhone und iPad im Netzwerk

transtec bietet als einer von wenigen IT-Infrastruktur-Spezialisten eine Lösung zum Drucken mit iOS-basierten Systemen an: den neuen Lantronix xPrintServer. Das Gerät ermöglicht es, mobile Endgeräte wie iPhones und iPads unkompliziert in das bestehende Netzwerk einzubinden und an vorhandenen Druckern Dokumente oder E-Mails auszudrucken. Außerdem berät transtec Unternehmen beim Aufbau heterogener Netzwerke und sorgt mit dem transtec Service für deren reibungslosen Betrieb.

Erweiterter Lösungsangebot für industrielle Anwender

transtec bietet Anwendern aus der Industrie individuelle Lösungen auf der Basis des neuen Lynx Senyo Industrie-PC 550MP. Das System ist die optimale Grundlage für Steuerungs- und Automationslösungen, bei denen es auf Effizienz und Ausfallsicherheit ankommt. Mit zwei seriellen Schnittstellen, einem auf 24/7-Dauerbetrieb ausgelegten Mainboard und einer garantierten Verfügbarkeit von PC-Konfiguration und Ersatzteilen über 24 Monate entspricht der Senyo PC optimal den Anforderungen, die von der Industrie an IT-Systeme gestellt werden. Für die entsprechende Rechenleistung sorgen AMD Prozessoren der G-Serie, die sich durch geringen Energieverbrauch auszeichnen. Die neuen Senyo Industrie-PCs sind ab sofort bei transtec erhältlich.

www.transtec.de

WENGER ENGINEERING

Neue Niederlassung in der Schweiz

Wenger Engineering GmbH gab die Eröffnung einer neuen Niederlassung in Reinach bei Basel in der Schweiz bekannt. Das am 01. Januar 2012 eröffnete Büro ist die erste europäische Auslandsniederlassung des Unternehmens und liegt - mit Sitz in der Nähe von Basel - in strategisch günstiger Nähe zu einer ganzen Reihe namhafter Unternehmen aus der Chemie- und Pharmaindustrie. Vom neuen Büro in Reinach aus kann Wenger Engineering Kunden und Interessenten aus dieser Region nun auch lokal betreuen. Die Wenger Engineering GmbH ist in Deutschland bereits seit mehreren Jahren zertifizierter Comsol Consultant. Mit der neuen

Niederlassung wird das Zertifikat nun auch auf die Schweiz ausgeweitet. Das Unternehmen ist damit der erste zertifizierte Comsol Consultant für die Schweiz. Wenger Engineering hat für namhafte Kunden bereits zahlreiche Projekte, wie die Simulation von Wärmetauschern, die Optimierung von Bauteilgeometrien, die Kühlung von Lithium-Ionen-Batterien und viele mehr, erfolgreich durchgeführt. Darüber hinaus hat das Unternehmen in den vergangenen Jahren auch an vielen Projekten im Bereich der Wasserstoffspeicherung und Infrastrukturentwicklung mitgearbeitet und diese erfolgreich umgesetzt.

www.wenger-engineering.de

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

Die hier veröffentlichten Texte wurden nicht redaktionell redigiert und weitgehend unverändert von den jeweiligen Firmen übernommen.

NAFEMS e-Learning Kurs: Nonlinear Analysis

05.04. (4 Wo) Internet www.nafems.org/e-learning NAFEMS

CrashMAT

24.-25.04. Freiburg, D www.crashmat.de Fraunhofer EMI/IWM

DVM-Tag: Multimaterialsysteme

26.-27.04. Berlin, D www.dvm-berlin.de DVM

CAE Grand Challenge

03.-04.04. Hanau, D www.carhs.de carhs.training

Grazer Symposium: Interdisziplinäre Fahrzeugentwicklung

17.-18.04. Graz, A www.gsvf.at ViF

LMS European Vehicle Conference

17.-18.04. München, D www.lmsgermany.com LMS

Hannover Messe

23.-27.04. Hannover, D www.hannovermesse.de Messe Hannover

Ansys Conference & Cadfem Austria Users' Meeting

26.-27.04. Wien, A www.usersmeeting.at Cadfem Austria

Permas Users Conference

26.-27.04. Heidelberg, D www.intes.de Intes

Ansys User Club

27.-28.04. Essen, D www.auc-ev.de Ansys User Club

NAFEMS e-Learning Kurs: Elements in Turbulence Modeling

01.05. Internet www.nafems.org/e-learning NAFEMS

Friendship Systems Users' Meeting and Conference

03.-04.05. Potsdam, D www.friendship-systems.com Friendship Systems

Nastran User Meeting

08.-09.05. München, D www.mscsoftware.com MSC.Software

Safety Week

08.-10.05. Aschaffenburg, D www.carhs.de carhs.training

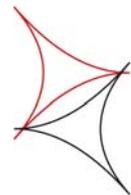
NAFEMS Trainingskurs: Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications

08.-09.05. Bamberg, D www.nafems.org NAFEMS

NAFEMS deutschsprachige Konferenz

Berechnung und Simulation – Anwendungen, Entwicklungen, Trends

08.-09.05. Bamberg, D www.nafems.org/dach202



Adams User Meeting

09.-10.05. München, D www.mscsoftware.com MSC.Software

ProSTEP iViP Symposium

09.-10.05. Hamburg, D www.prostep.org ProStep iViP

NAFEMS NORDIC Conference:

Engineering Simulation: Best Practices, New Developments, Future Trends

22.-23.05. Gothenburg, S www.nafems.org/nordic2012 NAFEMS

Neuere Entwicklungen in der Blechumformung

22.-23.05. Stuttgart, D www.ifu-stuttgart.de IFU Stuttgart

NAFEMS UK Conference: Engineering Simulation: Realising the Potential	30.-31.05.	Lincolnshire, UK	www.nafems.org/uk2012	NAFEMS
International Conference on Multibody System Dynamics - IMSD	29.05.-01.06.	Stuttgart, D	www.imsd2012.uni-stuttgart.de	Universität Stuttgart
NAFEMS France Conference: Simulation Numérique: Moteur de Performance	06.-07.06.	Paris, F	www.nafems.org/france2012	NAFEMS
NAFEMS Trainingskurs: Einführung in die praktische Anwendung der FEM	11.-13.06.	Bamberg, D	www.nafems.org	NAFEMS
HZDR & Ansys Germany Multiphase Flow Conference	13.-14.06.	Dresden, D	www.multiphase-conference.com	Ansys/HZDR
Ansys Conference & Schweizer Cadfem Users' Meeting	21.-22.06.	Zürich, CH	www.usersmeeting.ch	Cadfem Schweiz
ISKO Technologietag: Chancen und Risiken der Simulation für den Mittelstand	05.07.	München, D	www.isko-engineers.de	ISKO Engineers
NAFEMS Trainingskurs: Einführung in die praktische Anwendung der FEM	03.-05.09.	Wiesbaden, D	www.nafems.org	NAFEMS
Norddeutsches Simulationsforum	27.09.	Hamburg, D	www.cae-forum.de	Pike Engineering
LS-Dyna Forum	09.-10.10.	Ulm, D	www.dynamore.de	DYNAMore
NAFEMS European Conference on Multi-Physics	16.-17.10.	Frankfurt, D	www.nafems.org/mp2012	NAFEMS
Optimus World Conference	16.-17.10.	München, D	www.noessolutions.com	Noesis Solutions
EuroBlech	23.-27.10.	Hannover, D	www.euroblech.com	Mack Brooks Exh.
Ansys Conference & Cadfem Users' Meeting	24.-26.10.	Kassel, D	www.usersmeeting.com	Ansys/Cadfem
Simpack Academy	30.-31.10.	München, D	www.simpack.de	Simpack AG
NAFEMS Seminar: Schallentstehung und -ausbreitung in Festkörpern und Fluiden	06.-07.11.	Wiesbaden, D	www.nafems.org/aku2012	NAFEMS
simvec	20.-21.11.	Baden-Baden, D	www.simvec.de	vdi Wissensforum
NAFEMS Trainingskurs: Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications	26.-27.11.	Wiesbaden, D	www.nafems.org	NAFEMS
Euromold	27.-30.11.	Frankfurt, D	www.euromold.com	Demat

2013

**NAFEMS WORLD CONGRESS 2013
& SIMULATION DATA MANAGEMENT (SDM) CONFERENCE**
Mai/Juni Europa www.nafems.org/congress



Weitere NAFEMS Veranstaltungen finden Sie unter www.nafems.org/events

Materialcharakterisierung von faserverstärkten Kunststoffen unter Berücksichtigung des post-kritischen Verhaltens

C. Mildner, N. Dölle, D. Moncayo, L. Aktay (Daimler AG);

K. Drechsler (Universität München); R. Bjekovic (UAS Weingarten)

Für eine erfolgreiche Anwendung endlos faserverstärkter Kunststoffe in der Automobilindustrie ist eine realistische Vorhersage der Schadensmechanismen der Rohbaukomponenten notwendig. In dieser Arbeit wird das unterschiedliche Strukturverhalten faserverstärkter Kunststoffe untersucht. In diesem Zusammenhang werden die Versagensmechanismen von glasfaserverstärkten Kunststoffen in Bezug auf verschiedene Lagenaufbauten analysiert. Basierend auf experimentellen Ergebnissen wird in dieser Studie die realistische Abbildung des Strukturverhaltens von Laminaten im elastischen und post-kritischen Bereich durch die Anwendung von Materialmodellen der Finite Elemente Methode (FEM) diskutiert. Mit den aktuell in dem FEM Solver LS-DYNA implementierten Materialmodellen (*MAT_54 und *Mat_58) sowie den neu implementierten Materialmodellen, deren Versagen auf der Physik basiert, werden in Bezug auf ihre Aussagefähigkeit des Verhaltens nachdem Versagen eingetreten ist analysiert. Basierend auf einer Vielzahl von experimentellen Ergebnissen, wird ein Kompromiss zwischen optimalen Modellierungstechniken und einer realistischen, physikalisch nachvollziehbaren Charakterisierung des Versagens dargestellt.

1 Einleitung

Im Fall einer Zerstörung von faserverstärkten Kunststoffen kommt es zu einer Vielzahl von interagierenden und beeinflussenden Versagensmechanismen [1]. Grundlegende Fehlermechanismen sind Faserbruch, interlaminares (Delamination) und intralaminares Versagen (Faser-Matrix-Schnittstelle). Dieses Strukturverhalten ermöglicht eine Anpassung der Lamineigenschaften, jedoch erhöht es die Komplexität in der Entwurfsphase.

Heute ist die Analyse von Fahrzeugstrukturen mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) ein effektives Instrument um eine kostengünstige Vorauslegung von einzelnen Bauteilen zu realisieren. Zeitintensive experimentelle Untersuchungen an Bauteilen in der ersten Auslegungsphase können durch die FEM deutlich reduziert werden. Die Dimensionierung von Metallbauteilen mittels FEM ist Stand der Technik. Die komplexen Versagensmechanismen faserverstärkter Kunststoffe erschweren die realistische Abbildung durch FEM. Ausschlaggebend für eine richtige Beschreibung der Materialeigenschaften sind Versagenskriterien, die die spezifischen Spannungszustände identifizieren, die zu einer Zerstörung des Materials führen [2]. Eine der größten Herausforderungen ist die Beschreibung des post-kritischen Verhaltens von faserverstärkten Verbundwerkstoffen durch eine realistische Modellierung der Versagensmechanismen.

In diesem Zusammenhang werden zwei fortschrittliche Materialmodelle für faserverstärkte Kunststoffe (FVK) nach der Theorie von Camanho [7], [9], [10] und Pinho [4] mit LS-DYNA betrachtet. Der Vorteil dieser Materialmodelle ist die separate Darstellung der Versagensmechanismen durch unabhängige Versagenskriterien. Dies ermöglicht eine eindeutige Identifizierung der lokalen Versagensmoden sowie eine zielgerichtete Degradierung der Materialeigenschaften. Letztere Eigenschaft ist essentiell für eine genaue Darstellung von nicht-crushingrelevanten Moden sowie des Entlastungsverhaltens. Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die Eingabeparameter der Materialkarte, die alle direkt auf Experimenten basieren. Um das Potenzial der neu implementierten Materialmodelle aufzuzeigen, werden zwei bereits implementierte Materialmodelle (*MAT_054 und *MAT_058) gewählt, um die Testergebnisse zu vergleichen.

Im Folgenden werden die verschiedenen Versagenskriterien der Materialmodelle beschrieben. Um die Materialmodelle zu diskutieren, werden Testergebnisse von Ein-Schalenelementen vorgestellt. Abschließend werden Simulationen von experimentellen Zugversuchen durchgeführt und verglichen.

2 Formulierung der Versagenskriterien

In diesem Abschnitt werden die am häufigsten angewendeten Versagenskriterien erläutert. Es werden die charakteristischen Werte von glasfaserverstärkten Kunststoffen verwendet. Die Abbildungen 1 a-c zeigen die Versagenskurven der Versagenskriterien in der σ_{22} - σ_{11} -Ebene, τ_{12} - σ_{11} -Ebene und τ_{12} - σ_{22} -Ebene.

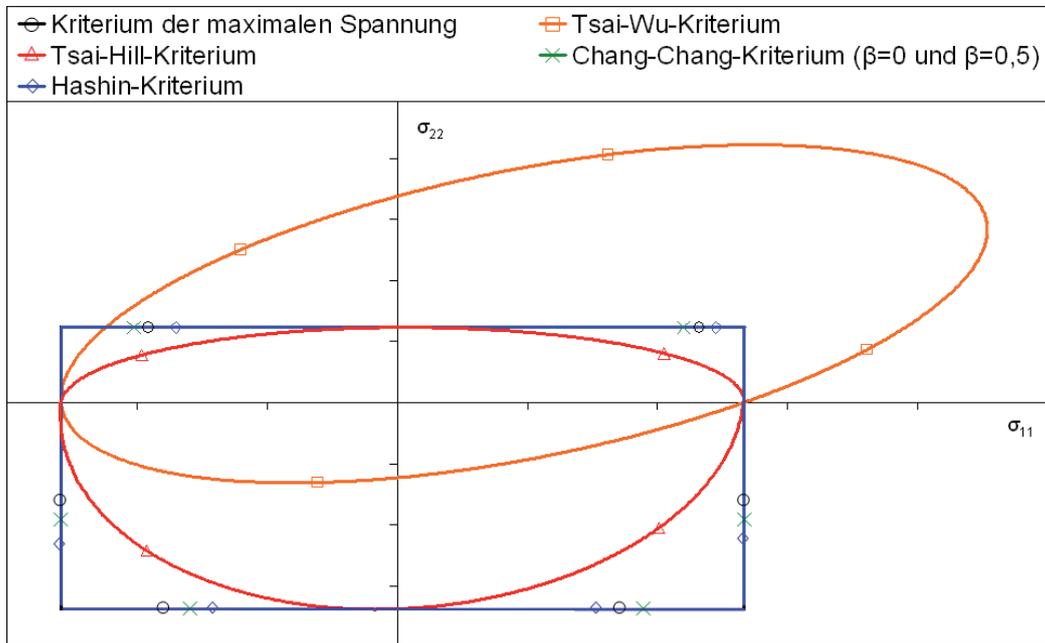


Abb. 1 a: Versagenskurven der σ_{22} - σ_{11} -Ebene

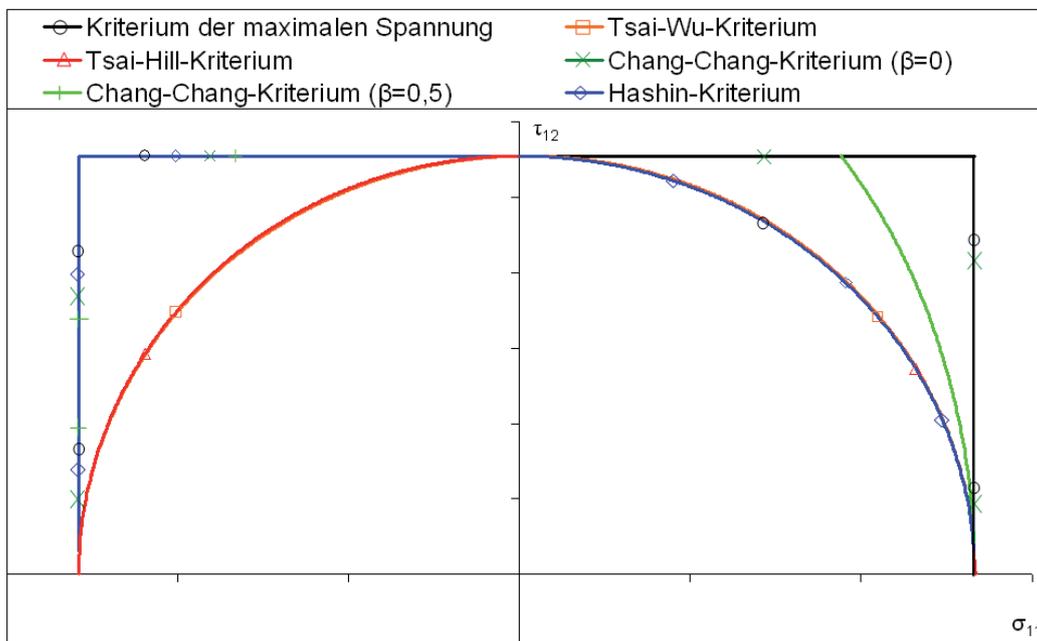


Abb. 1 b: Versagenskurven, τ_{12} - σ_{11} -Ebene

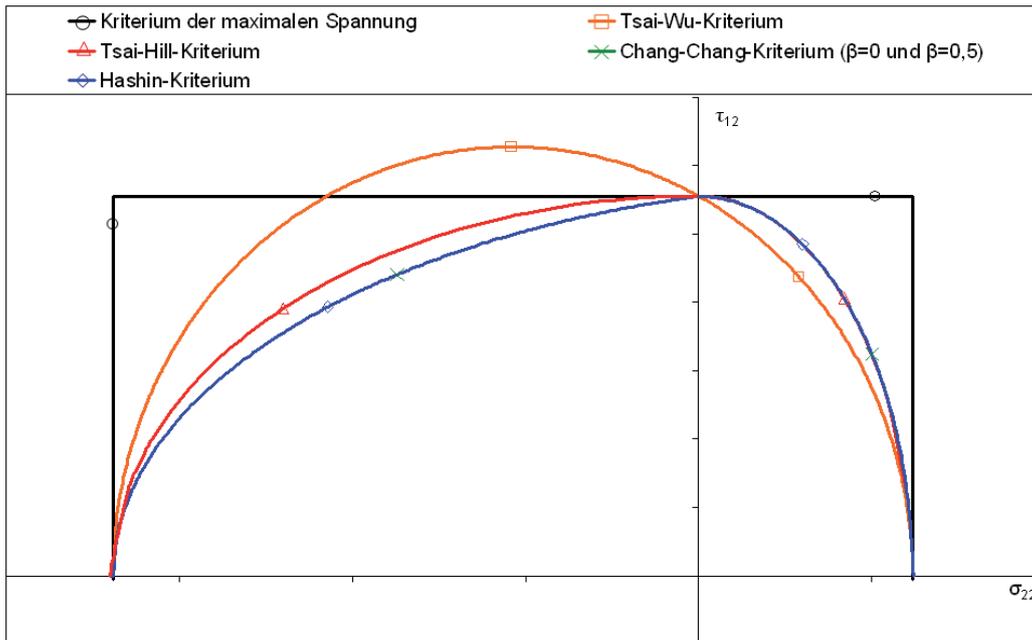


Abb. 1 c: Versagenskurve, τ_{12} - σ_{22} -Ebene

σ_{22} - σ_{11} -Ebene (Abb.1 a):

Es ist festzustellen, dass die Versagensflächen in der σ_{22} - σ_{11} -Ebene des Hashin-Kriteriums und Chang-Chang-Kriteriums mit dem Kriterium der maximalen Spannung übereinstimmen. Im Fall von Tsai-Wu, ist das Zugversagensverhalten überbewertet, während das transversale Druckbelastungsversagen unterbewertet ist. Das Tsai-Hill-Kriterium ist verglichen mit Tsai-Wu konservativer.

τ_{12} - σ_{11} -Ebene (Abb.1 b):

In der τ_{12} - σ_{11} -Ebene sind das Hashin-Kriterium und das Chang-Chang-Kriterium nur für negative σ_{11} -Werte identisch. Für ein positives σ_{11} stimmt das Hashin-Kriterium mit dem Tsai-Wu und Tsai-Hill-Kriterium überein. Das gleiche Verhalten wird durch das Maximal-Spannungs- und dem Chang-Chang-Kriterium beschrieben. Tsai-Wu und Tsai-Hill haben ebenfalls identische Versagensflächen.

τ_{12} - σ_{22} -Ebene (Abb.1 c):

Das Hashin-Kriterium und Chang-Chang-Kriterium sind identisch. Im Fall von Tsai-Wu ist die Schubfestigkeit für ein negatives σ_{22} überbewertet.

3 Ein-Element-Test

In diesem Kapitel werden Simulationen an einem repräsentativen Volumenelement (Ein-Schalenelement) dargestellt. Diese Untersuchungen dienen dem fundamentalen Verständnis der implementierten Materialmodelle (*MAT_054 & *MAT_058) und deren Versagensverhalten sowie den neu implementierten User Materialmodellen (UMAT's) nach Pinho und Camanho.

Für alle Simulationen wird nur eine Elementschicht gewählt. Die Modellierung jeder einzelnen Lage in LS-Dyna erfolgt durch PART_COMPOSITE. Für jede Laminatschicht wird ein Material, die Dicke der Lage und der Winkel des Materials definiert [3]. Bei Verwendung von Schalenelementen wird ein ebener Spannungszustand und eine konstante Schädigung über die Dicke angenommen.

Um die Materialkennwerte für die verschiedenen Materialmodelle zu ermitteln, wurde ein umfangreiches Testprogramm durchgeführt. Die Beschreibung des post-kritischen Verhaltens erfordert zusätzliche Parameter für die UMAT's. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht aller benötigten Parameter.

	Elastisch, orthotrope Parameter	Festigkeit/Dehnung	Bruchenergien
*MAT_054	$E_a, E_b, E_c, \nu_{ab}, \nu_{bc}, \nu_{ca}, G_{ab}, G_{bc}, G_{ca}$	X_t, X_c, Y_t, Y_c, S_C	
*MAT_058	$E_a, E_b, \nu_{ab}, \nu_{bc}, \nu_{ca}, G_{ab}, G_{bc}, G_{ca}$	$X_t, X_c, Y_t, Y_c, S_C, \tau_1$	
UMAT_PINHO	$E_a, E_b, E_c, \nu_{ab}, \nu_{bc}, \nu_{ca}, G_{ab}, G_{bc}, G_{ca}$	$E_{11C}, E_{11T}, E_{22C}, E_{22T}, GMS, \gamma_1$	$G_{XT}, G_{XC}, G_{YT}, G_{YC}, G_{SL}$
UMAT_CAMANHO	$E_a, E_b, E_c, \nu_{ab}, \nu_{bc}, \nu_{ca}, G_{ab}, G_{bc}, G_{ca}$	X_t, X_c, Y_t, Y_c, S_C	$G_{XT}, G_{XT0}, G_{XC}, G_{XC0}, G_{YT}, G_{YC}, G_{SL}$

Tab. 1: Materialparameter

Die elastischen Parameter, ebenso wie die Festigkeiten und Dehnungen, können durch einfache Zug- und Druckversuche bestimmt werden. Um die Bruchenergien für die UMAT's zu erhalten, sind komplexere Testverfahren notwendig, wie beispielsweise Double Cantilever Beam und End Notched Flexure Versuche [4].

Abbildung 2 beschreibt die Lager- und Belastungsbedingungen des Ein-Element-Versuchs bei Belastung in Zug und Druck.

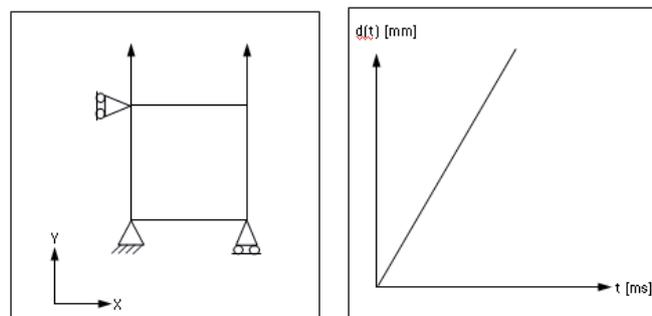


Abb. 2: Rahmen- und Belastungsbedingungen des Ein-Schalen-Elements (links) sowie Weg/Zeit-Funktion (rechts)

Die Belastung wird progressiv auf zwei Knoten des Schalenelements aufgebracht. Das Schalenelement besteht aus 2 Lagen von glasfaserverstärkten Kunststoffen. Jede Lage hat eine Dicke von 0.2mm. Um den Einfluss der Elementgröße darzustellen, werden fünf Elementgrößen (0.1mm, 0.5mm, 1.0mm, 2.5mm und 5.0mm) untersucht.

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die vier Materialmodelle.

3.1 Materialmodell 54: MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE

Das Kriterium, das in *MAT_054 verwendet wird um die Versagensmechanismen von faserverstärkten Kunststoffen zu beschreiben, basiert auf der Theorie von Chang Chang [3]. Es wird ein anisotropes, linear elastisches Verhalten beschrieben, bei dem Nicht-Linearität durch zahlreiche Schadenskriterien initiiert werden [5].

Faser-Zugversagen ($\sigma_{11} \geq 0$)

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \beta \left(\frac{\tau}{S_C} \right) - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{versagt} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (3.01)$$

Faser-Druckversagen ($\sigma_{11} < 0$)

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{versagt} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (3.02)$$

Faser-Matrixversagen ($\sigma_{22} \geq 0$)

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{S_C} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{versagt} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (3.03)$$

Matrix-Druckversagen ($\sigma_{22} < 0$)

$$e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S_C} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_C} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\tau}{S_C} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{versagt} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (3.04)$$

Des Weiteren ist es möglich Schadens- und Vorschädigungsprozesse durch zusätzliche numerische Parameter zu modellieren, aufgeführt in Tabelle 2 und 3.

DFAILT	maximale Dehnung der Faser
DFAILC	maximale Dehnung für Faserdruck
DFAILM	maximale Dehnung der Matrix (Zug und Druck)
DFAILS	maximale Schubdehnung
EFS	effektive Versagensdehnung

Tab. 2: Dehnungsbegrenzende Parameter des LS-DYNA Materialmodells 54 [3]

FBRT	Entfestigungsfaktor der Zugfestigkeit der Faser
YCFAC	Reduktionsfaktor für Faser-Druckfestigkeit nach Matrixversagen
TFAIL	Zeitschrittgröße für Elementlöschung
SOFT	Entfestigungsfaktor für die Materialfestigkeit an der Crashfront

Tab. 3: Zusätzliche Entfestigungs- und Versagensparameter [6]

Die in *MAT_054 verwendeten Kriterien sind spannungsbasierte Kriterien mit der Möglichkeit einer Dehnungsbegrenzung durch die in Tabelle 2 gegebenen Parameter. Nachdem Druckversagen der Matrix eingetreten ist, kann die Zug- und Druckfestigkeit durch FBAT bzw. YCFAC reduziert werden. Der Parameter TFAIL gibt einen minimalen Zeitschritt an. Unterschreitet ein Element diesen Zeitschritt, wird das Element gelöscht. Das E-Modul und die Festigkeit von Elementen, die an bereits versagte Elemente angrenzen, kann durch den Parameter SOFT reduziert werden. Dieses Feature ermöglicht die Simulation eines kontrollierten Crash Prozesses und ermöglicht die Darstellung einer stabilen Crash Front durch die Vorschädigung des Materials [5]. Eine detailliertere Beschreibung des Materialmodells ist in [3] gegeben.

3.1.1 Zug und Druck

In diesem Fall wird die Last in Faserrichtung sowie in Matrixrichtung aufgebracht. Die beeinflussenden Parameter in Faserrichtung (DFAILT/DFAILC) und transversale Richtung wurden zwischen 0,1 und 0,5 variiert, während der globale Parameter (EFS) konstant gehalten wurde.

In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass die Festigkeit bis zu dem in der Materialkarte gesetzten Wert ansteigt. Nachdem der Wert erreicht ist, wird die Festigkeit konstant gehalten, bis die maximale Dehnung erreicht ist. Kurve A versagt bei einer Dehnung von 10%, weil DFAILT gleich 0,1 gesetzt ist. Analog versagt die Kurve B bei 20% Dehnung. Die Kurven C, D, und E versagen, da der EFS-Wert (0,25) erreicht ist. Dasselbe Verhalten kann für die anderen Lastfälle (Abbildung 3 und 4) beobachtet werden. Die Versagensdehnung, eingeleitet durch EFS, liegt unterhalb des Wertes 0,25, da die Dehnungen X, Y, und Z mit eingehen.

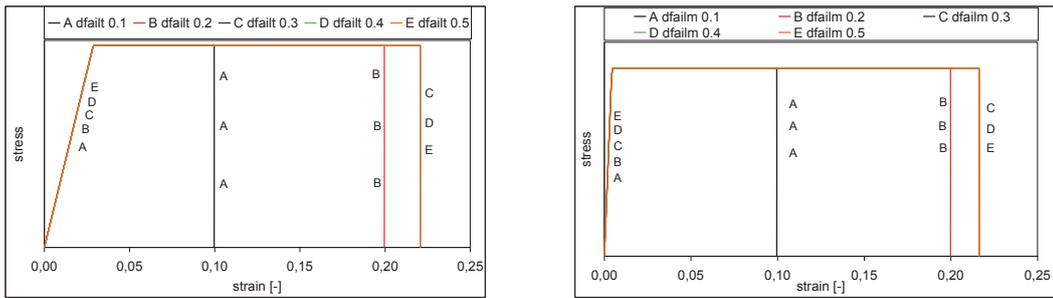


Abb. 3: Spannungs-Dehnungskurve für Zug (links) in Faserrichtung (rechts) und Zug in transversale Richtung *MAT_054

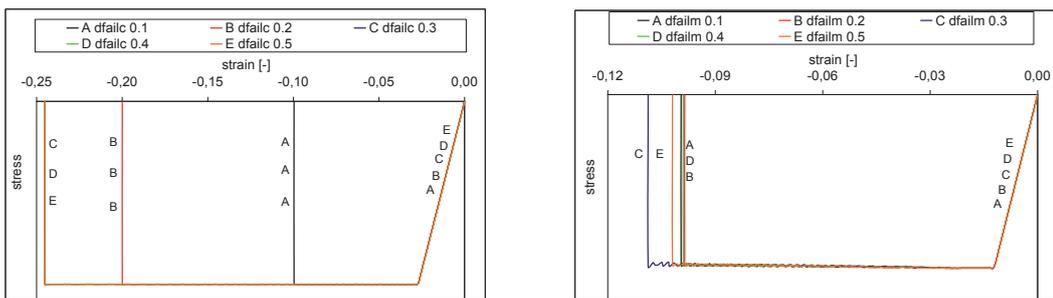


Abb. 4: Spannungs-Dehnungskurve für Druck (links) in Faserrichtung (rechts) in transversale Richtung *MAT_054

Ein Vergleich für den Lastfall Zug in Faserrichtung, in Abhängigkeit verschiedener Elementgrößen, wird in Abbildung 5 dargestellt.

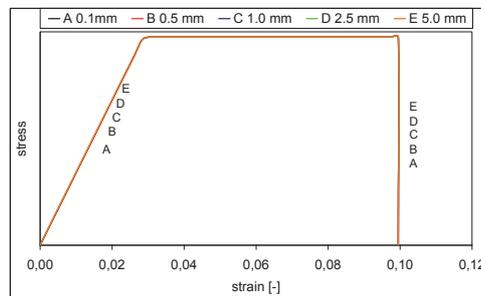


Abb. 5: Spannungs-Dehnungskurve in Faserrichtung für verschiedene Elementgrößen für *MAT_054

Abbildung 5 zeigt, dass alle Kurven die gleiche maximale Festigkeit und Dehnung erreichen.

3.1.2 Simple shear

Um das Schubverhalten zu untersuchen, wird das einzelne Schalen-Element wie in Abbildung 6.

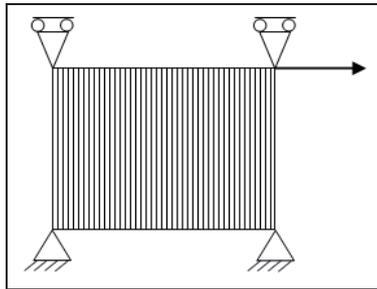


Abb. 6: Lastfall für Schub

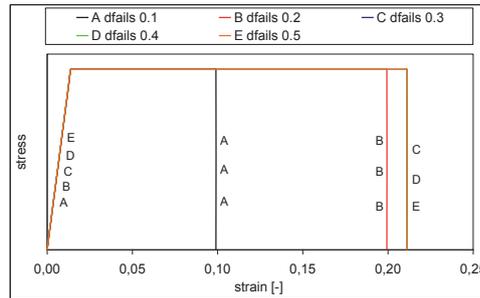


Abb. 7: Spannungs-Dehnungskurve für simple shear für *MAT_054

3.2 Materialmodell 58: MAT_Laminated_Composite_Fabric

Dieses Materialmodell kann angewendet werden, um Verbundwerkstoffe mit unidirektionalen Lagen, vollständige Lamine und Gewebe zu modellieren. Die Versagenskriterien, die in *Mat_058 zur Beschreibung der Versagensmechanismen von faserverstärkten Kunststoffen verwendet werden, basieren auf dem Versagenskriterium nach Hashin [3]:

Faser-Zugversagen ($\sigma_{11} \geq 0$)

$$e_f^2 = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{11}}{X_T} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{versagt} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (3.05)$$

Faser-Druckversagen ($\sigma_{11} < 0$)

$$e_c^2 = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{11}}{X_C} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{versagt} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (3.06)$$

Faser-Matrixversagen ($\sigma_{22} \geq 0$)

$$e_m^2 = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{S_C} \right) - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{versagt} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (3.07)$$

Matrix-Druckversagen ($\sigma_{22} < 0$)

$$e_d^2 = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{22}}{Y_C} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{12}}{S_L} \right) - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{versagt} \\ < 0 & \text{elastisch} \end{cases} \quad (3.08)$$

Die Spannungen, die in den Gleichungen oben verwendet werden, sind effektive Spannungen bezogen auf die Elementfläche. Um die nominalen Spannungen zu erhalten, gelten folgende Beziehungen:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_{11} \\ \tilde{\sigma}_{22} \\ \tilde{\sigma}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 - \omega_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 - \omega_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 - \omega_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.09)$$

Die Schadensparameter sind abhängig von der Lastrichtung ($\omega_{11t} \neq \omega_{11c}$; $\omega_{22t} \neq \omega_{22c}$).

$$\omega_i = 1 - \frac{SLIM \cdot strength}{E \cdot \varepsilon} \quad (3.10)$$

Material 58 kann in Abhängigkeit seiner Versagensfläche in drei verschiedene Materialmodelle aufgeteilt werden. Material 58a hat eine vielseitige Versagensfläche. Es ist ein sogenanntes elastisches Versagensmodell. Mikrorisse werden durch Verformungen in das Material eingeleitet. Dies führt zu einer Steifigkeitsdegradation mit geringer permanenter Verformung [6]. Um das Versagensverhalten von FVK Werkstoffen beschreiben zu können, bei denen das Versagensverhalten in 11- und 22-Richtung nahezu identisch ist, wird das Material 58b mit weichen Übergängen der jeweiligen Versagensflächen verwendet. Bei Material 58c sind alle Versagenskriterien unabhängig voneinander. Dadurch resultiert ein harter Übergang der Versagensflächen. Abbildung 8 gibt eine Übersicht der verschiedenen Versagenskriterien.

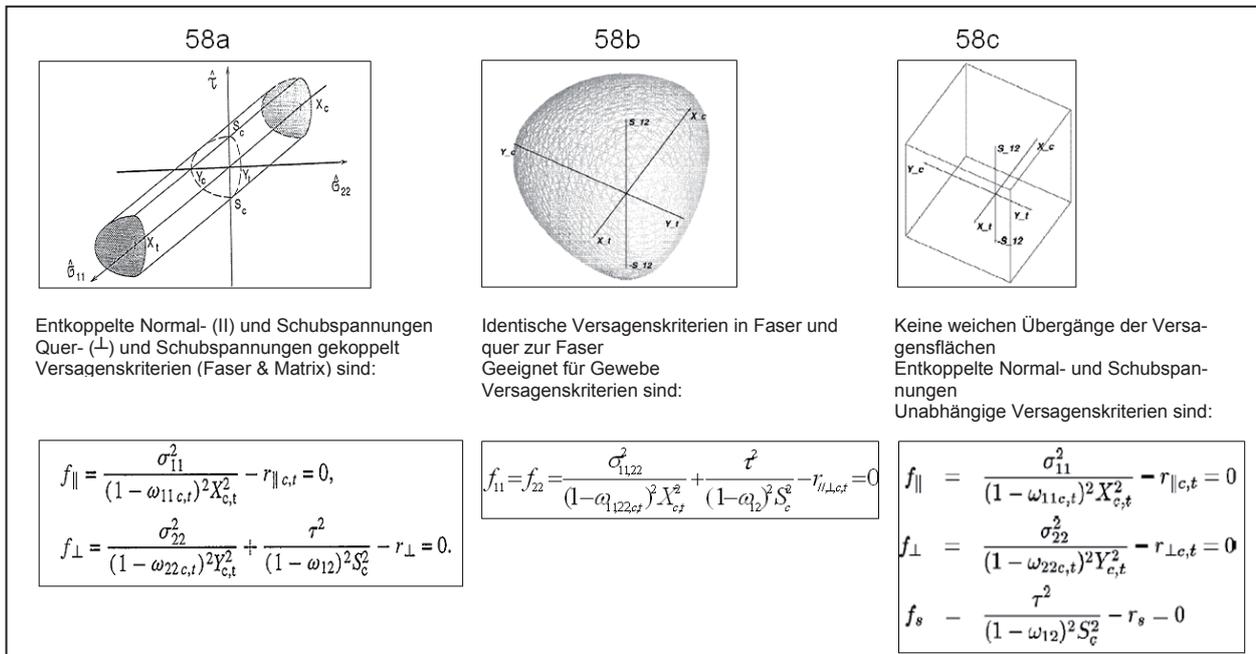


Abb. 8: Versagenskriterien *MAT_058 [6]

Im Folgenden liegt der Fokus auf dem Material 58c, bei dem die Normalspannungen und die Schubspannungen entkoppelt sind.

3.2.1 Zug und Druck

Für *MAT_058c wird eine Übersicht der beeinflussenden SLIM-Parameter präsentiert. Die Validierung des SLIM-Parameters basiert nicht auf Experimenten. Die SLIM-Parameter werden zwischen 0,1 und 0,9 variiert. Abbildung 9 und 10 zeigen die Spannungs-Dehnungskurven bei Zug- und Druckbelastung für *MAT_058c.

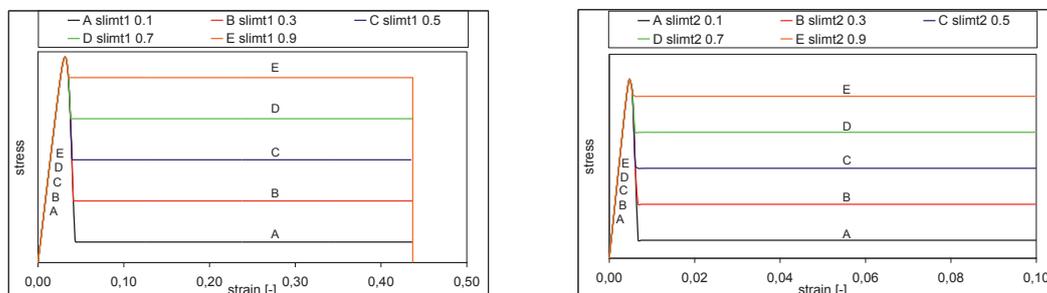


Abb. 9: Spannungs-Dehnungskurven für Zugbelastung (links) in Faserrichtung (rechts) in transversale Richtung für *MAT_058c

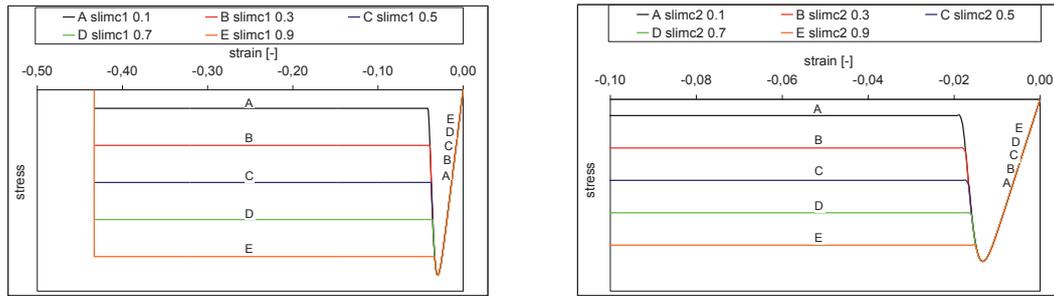


Abb. 10: Spannungs-Dehnungskurven für Druckbelastung (links) in Faserrichtung (rechts) in transversale Richtung für *MAT_058c

Der Einfluss der unterschiedlichen Elementgrößen für Zug in Faserrichtung ist in Abbildung 11 dargestellt. Alle Elemente zeigen dasselbe Verhalten.

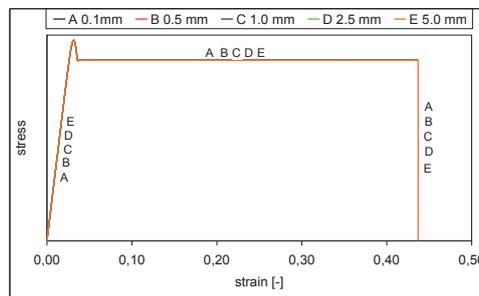


Abb. 11: Spannungs-Dehnungskurve für Zug in Faserrichtung bei unterschiedlichen Elementgrößen für *MAT_058c

3.2.2 Simple shear

Das Schubverhalten wird wie oben analysiert (vergleiche Abbildung 6).

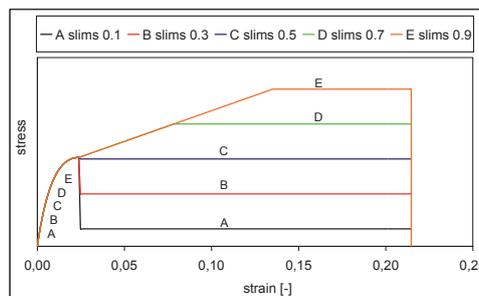


Abb. 12: Spannungs-Dehnungskurve für simple shear *MAT_058c

3.3 Belastungs- und Entlastungsverhalten von *MAT_054 und *MAT_058

Für Crush-dominierte Lastfälle spielt das Entlastungsverhalten eine untergeordnete Rolle. In Automobilbauteilen, beispielsweise einer B-Säule spielt das Entlastungsverhalten eine wichtige Rolle, da es angrenzende Teile des Rohbaus beeinflusst.

Abbildung 13 zeigt das Entlastungsverhalten für *MAT_054 und *MAT_058. Es kann festgestellt werden, dass *MAT_054 keine Degradation der Steifigkeit nach Versagen bei anschließender Entlastung berücksichtigt. Die Entlastungskurve hat dieselbe Steigung wie die Kurve im elastischen Bereich. Eine bleibende Deformation wird berücksichtigt. Im Falle einer Entlastung des Materials *MAT_058 nach Versagen geht die Kurve zum Ursprung

zurück, so dass keine Deformation zurück bleibt. Beide Kurven beschreiben kein realistisches Entlastungsverhalten von faserverstärkten Kunststoffen in einem post-kritischen Spannungszustand.

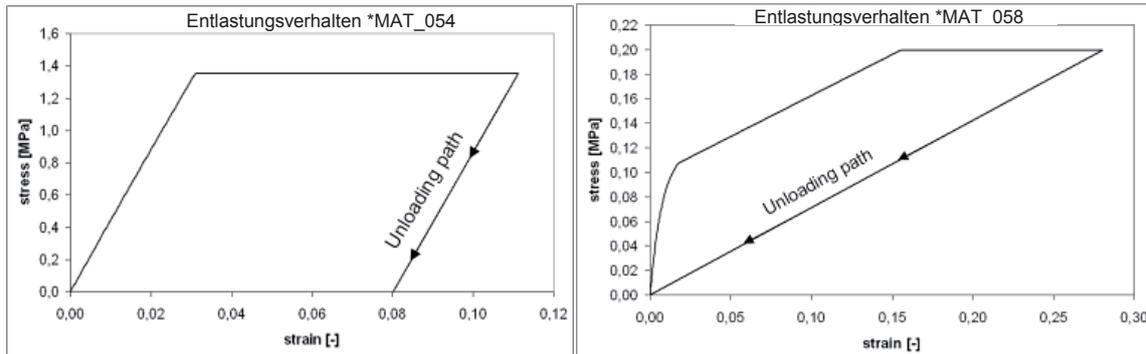


Abb. 13: Entlastungsverhalten von (links) *MAT_054 und (rechts) *MAT_058

3.4 Physikalisch-basiertes Versagensmodell nach Pinho

Pinho fokussiert in seiner Arbeit Versagensmodelle von faserverstärkten Kunststoffen, die die Physik des Versagens genauer wiedergeben. Aus diesem Grund analysiert Pinho verschiedene Versagenskriterien. Das Ziel ist mit diesen Versagenskriterien einfache Proben sowie komplexe Strukturen unter statischen und dynamischen Lasten modellieren zu können. In diesem Zusammenhang wurde ein 3D-Materialmodell formuliert. Dieses Materialmodell unterscheidet zwischen Matrix und Faser sowie Zug- und Druckverhalten und berücksichtigt ein nicht-lineares Schubverhalten mit einem anisotropen plastischen Verformungsverhalten. Das Modell erkennt sobald eine Schädigung eintritt und beschreibt das Nachbruchverhalten [4]. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick der verschiedenen Versagenskriterien gegeben.

Faser-Zugversagen: Maximalspannungsversagen

$$f_{ft} = \frac{\sigma_{11}}{X_t} = 1 \quad (3.11)$$

Faser-Druckversagen: Faser-Knickenversagen

$$f_{kink} = \left(\frac{\tau_T}{S_T - \mu_T \sigma_n} \right)^2 + \left(\frac{\tau_L}{S_L - \mu_L \sigma_n} \right)^2 - 1 \quad \sigma_n \leq 0 \quad (3.12)$$

$$f_{kink} = \left(\frac{\sigma_n}{Y_t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_T}{S_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_L}{S_L} \right)^2 - 1 \quad \sigma_n \geq 0 \quad (3.12)$$

Matrix-Zugversagen:

$$f_{mt} = \left(\frac{\sigma_n}{Y_t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_T}{S_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_L}{S_L} \right)^2 - 1 \quad (3.12)$$

Matrix-Druckversagen:

$$f_{mc} = \left(\frac{\tau_T}{S_T - \mu_T \sigma_n} \right)^2 + \left(\frac{\tau_L}{S_L - \mu_L \sigma_n} \right)^2 - 1 \quad (3.12)$$

Der Einfluss der Dehnungslokalisierung wird durch eine verschmierte Formulierung berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Bruchenergie über das gesamte Volumen des Elements verteilt wird (Abbildung 14). Aus diesem Grund wird ein Parameter mit einer Längen-Dimension, die sich auf die Dimension des Elements bezieht, verwendet. Um eine Netzabhängigkeit zu eliminieren, ist die folgende Gleichung in den LS-Dyna-Code implementiert.

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{\max} \cdot \varepsilon_{\text{final}} \cdot l_{\text{char}} \tag{3.13}$$

Die charakteristische Länge ist wie folgt definiert:

$$l_{\text{char}} = 1,12 \cdot \sqrt{A^*} \tag{3.14}$$

Mit der Fläche des Elements A^*

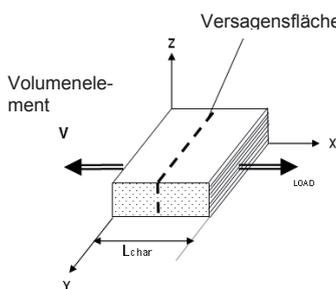


Abb. 14: Versagensfläche eines unidirektionalen Elements

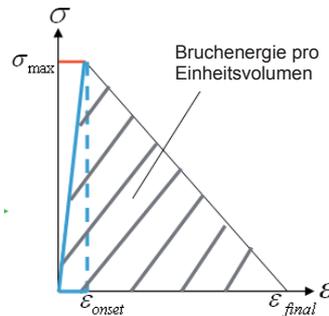


Abb. 15: Materialgesetz mit Degradation

Das Degradationsverhalten ist in Abbildung 15 dargestellt. In diesem Modell werden die Spannungskomponenten linear bis 0 degradiert. Das Degradationsverhalten ist für alle Lastfälle das gleiche. Um eine stabile Simulation zu ermöglichen, ist die minimale Dehnung $\varepsilon_{\text{final}}$ durch folgende Parameter in Tabelle 4 gegeben:

Zug in Faserrichtung, $\varepsilon_{\text{final_ft}}$	1.1 * $\varepsilon_{\text{onset}}$
Zug quer zur Faserrichtung, $\varepsilon_{\text{final_fm}}$	2.0 * $\varepsilon_{\text{onset}}$
Druck in Faserrichtung, $\varepsilon_{\text{final_ct}}$	1.1 * $\varepsilon_{\text{onset}}$
Druck quer zur Faserrichtung, $\varepsilon_{\text{final_cm}}$	2.0 * $\varepsilon_{\text{onset}}$

Tab. 4: Minimale Versagensdehnung

3.4.1 Zug und Druck

Im Falle der physikalisch basierten Materialmodelle (Pinho und Camanho) werden alle Parameter durch Experimente bestimmt. Die Abbildungen 16 und 17 zeigen die Spannungs-Dehnungskurven für Zug und Druck für das Materialmodell nach Pinho.

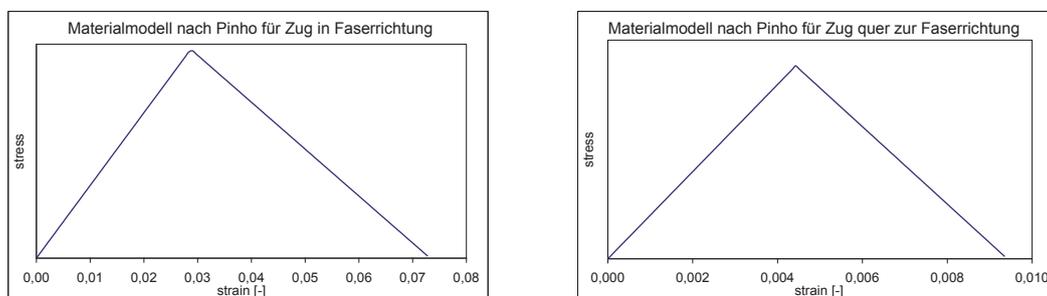


Abb. 16: Spannungs-Dehnungskurven für Zugbelastung (links) in Faserrichtung (rechts) in transversale Richtung

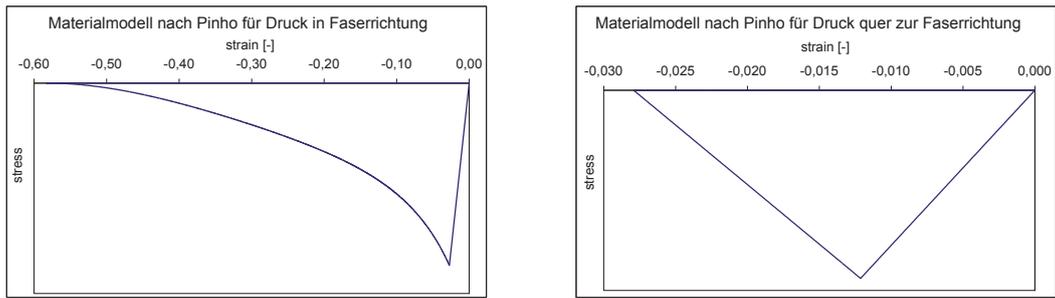


Abb. 17: Spannungs-Dehnungskurven für Druckbelastung (links) in Faserrichtung (rechts) in transversale Richtung

Der Einfluss der verschiedenen Elementgrößen für den Lastfall Zug in Faserrichtung ist in Abbildung 13 dargestellt. Die dissipierte Energie korrespondiert mit einer finalen Versagensdehnung.

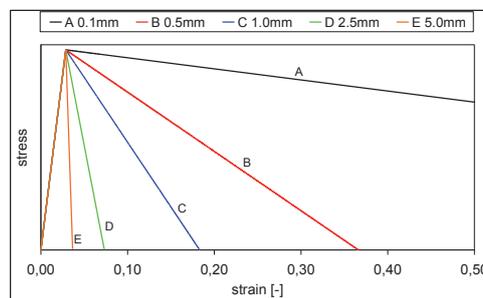


Abb. 18: Spannungs-Dehnungskurve für Zug in Faserrichtung unterschiedlicher Elementgrößen nach Pinho

3.4.2 Simple shear

Das Schubverhalten wird wie oben analysiert (vergleiche Abbildung 6). Das implementierte Materialmodell nach Pinho bietet die Möglichkeit eine experimentelle Spannungs-Dehnungskurve zu implementieren. Abbildung 19 zeigt eine typische Kurve bei Schubbelastung. Nach dem die maximale Festigkeit erreicht ist, beginnt die lineare Degradation hervorgerufen durch Matrixversagen. Bei einer Dehnung von 0,18 ist das Versagenskriterium für Zug in Faserrichtung erreicht. Dies führt zu einer nicht-linearen Degradation.

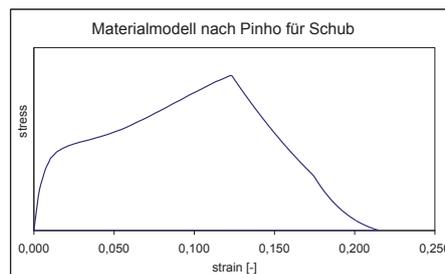


Abb. 19: Spannungs-Dehnungskurve für simple shear des Materialmodells nach Pinho

3.5 Physikalisch-basiertes Versagensmodell nach Camanho

Das Kontinuum Schadensmodell zur Vorhersage des Beginns und der Ausbreitung eines Schadens von faserverstärkten Kunststoffen nach Camanho berücksichtigt vier verschiedene Versagensmechanismen im ebenen Spannungsraum (vergleiche Abbildung 18). Interlaminare Versagensmechanismen bleiben unberücksichtigt. Die Schadenseinleitungsfunktionen basieren auf den LaRC03 und LaRC04 Versagenskriterien.

Für jeden Versagensmechanismus ist eine Schadenseinleitungsfunktion gegeben.

Faser-Zugversagen: Maximales Dehnungsversagen

$$f_{ft} = \frac{\tilde{\sigma}_{11} - \nu_{12} \tilde{\sigma}_{11}}{X_t} - 1 \quad (3.15)$$

Faser-Druckversagen (Faser-Knickversagen):

$$f_{kink} = \frac{\langle |\tilde{\sigma}_{12}^m| + \eta^L \tilde{\sigma}_{22}^m \rangle}{S_L} - 1 \quad (3.16)$$

Matrix-Zugversagen:

$$f_{mt} = \sqrt{(1-g) \frac{\tilde{\sigma}_{22}}{Y_T} + g \left(\frac{\tilde{\sigma}_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{12}}{S_L} \right)^2} - 1 \quad \tilde{\sigma}_{22} \geq 0 \quad (3.17)$$

$$f_{mt} = \frac{1}{S_L} \langle |\tilde{\sigma}_{12}| + \eta^L \tilde{\sigma}_{22} \rangle - 1 \quad \tilde{\sigma}_{22} < 0 \quad (3.18)$$

Matrix-Druckversagen:

$$f_{mc} = \sqrt{\left(\frac{\tilde{\tau}_{eff}^T}{S_T} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\tau}_{eff}^L}{S_L} \right)^2} - 1 \quad \tilde{\sigma}_{22} < 0 \quad (3.19)$$

Das Degradationsverhalten basiert auf dem Materialmodell nach Camanho, das in Abbildung 21 zu sehen ist. In diesem Modell werden die Spannungskomponenten für Belastung in Faserrichtung bi-linear und für Lastfälle in transversale Richtung linear bis null degradiert.

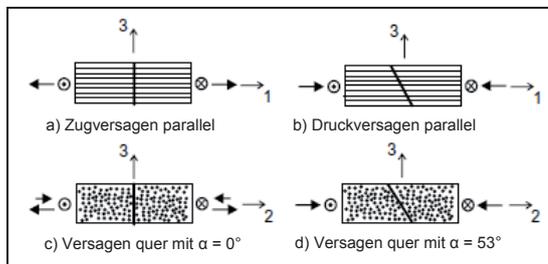


Abb. 20: Betrachtete Bruchflächen [7]

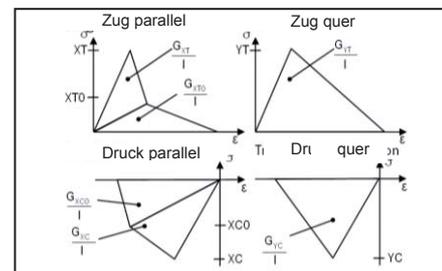


Abb. 21: Materialgesetz mit Degradation

3.5.1 Zug und Druck

Im Fall des physikalisch basierten Materialmodells nach Camanho werden analog zum Materialmodell nach Pinho alle Parameter durch Experimente ermittelt. Aktuell sind geeignete Testverfahren zur Bestimmung der Energien G_{XT0} und G_{XC0} in der Entwicklungsphase. Die Verfahren werden auf dem pull out test basieren [8]. Für den Ein-Element Test wird der Wert von G_{XT0} und G_{XC0} auf 30% von G_{XT} auf G_{XC} gesetzt. Die Abbildungen 22 und 23 zeigen die Spannungs-Dehnungskurven für Zug und Druck für das Materialmodell nach Camanho.

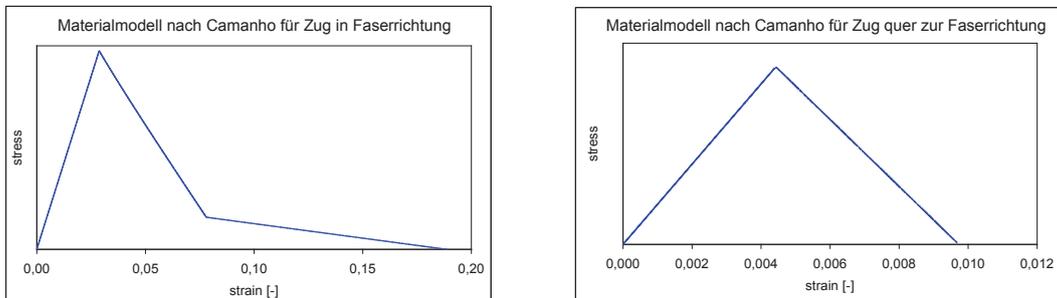


Abb. 22: Spannungs-Dehnungskurven für Zugbelastung (links in Faserrichtung (rechts) in transversale Richtung)

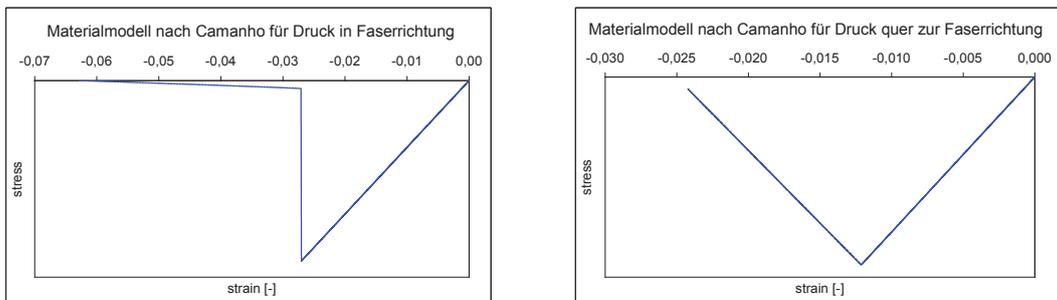


Abb. 23: Spannungs-Dehnungskurven für Druckbelastung (links in Faserrichtung (rechts) in transversale Richtung)

Der Einfluss der verschiedenen Elementgrößen für den Lastfall Zug in Faserrichtung ist in Abbildung 24 dargestellt. Die dissipierte Energie korrespondiert mit einer finalen Versagensdehnung.

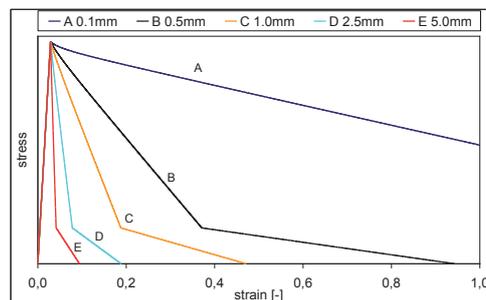


Abb. 24: Spannungs-Dehnungskurve für Zug in Faserrichtung unterschiedlicher Elementgrößen nach Camanho

3.5.2 Simple shear

Das Schubverhalten wird analog zu Abbildung 6 modelliert. Um das nicht-lineare Schubverhalten zu beschreiben, wurde eine einfache 1D elasto-plastische Formulierung für das Schubverhalten in der Ebene hinzugefügt. Dieses Verhalten wird mit einem linearen Schadenausbreitungsgesetz gekoppelt [13]. Abbildung 25 zeigt die typische Schubbelastungskurve. Nach Erreichen der maximalen Festigkeit beginnt die lineare Degradation.

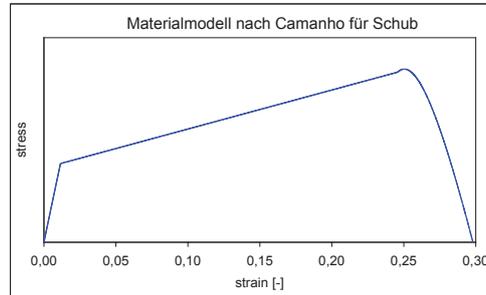


Abb. 25: Spannungs-Dehnungskurve für simple shear des Materialmodells nach Camanho

3.6 Belastungs- und Entlastungsverhalten der physikalisch basierten Materialmodelle nach Pinho und Camanho

Die Abbildung 26 zeigt das Belastungs- und Entlastungsverhalten der physikalisch basierten Materialmodelle nach Pinho und Camanho. Das Materialmodell nach Pinho erlaubt die Implementierung einer Schubkurve, während das Schubverhalten nach Camanho durch zwei charakteristische Punkte modelliert wird. Man kann erkennen, dass beide Materialmodelle eine Degradation berücksichtigen. Die Steigung der Entlastungskurve nach Überschreiten der maximalen Festigkeit unterscheidet sich von der Entlastungskurve im elastischen Bereich. Die Implementierung der Degradation nach einer Schädigung im Laminat, spielt eine wichtige Rolle in der Simulation von Automobilstrukturbauteilen, die nicht primär durch Crushing versagen.

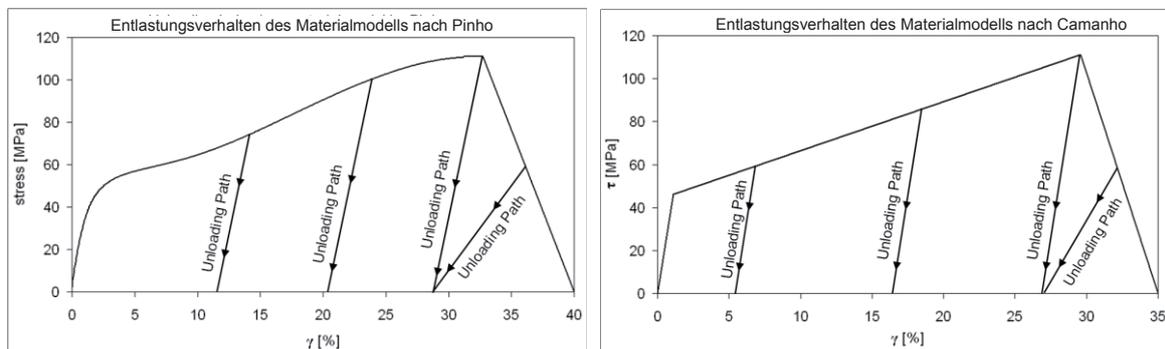


Abb. 26: Entlastungsverhalten nach dem Materialmodell nach Pinho (links) und dem Materialmodell nach Camanho (rechts)

4 Standard Zugtest

Im folgenden Abschnitt werden experimentelle Ergebnisse präsentiert und mit numerischen Simulationen verglichen. Die Lagenorientierungen der Lamine, die in die Simulation verwendet werden, sind mit den experimentellen Versuchen identisch.

4.1 Experimentelle Übersicht

Um die Zuverlässigkeit der verschiedenen Materialmodelle zu analysieren, wird ein umfangreiches experimentelles Testprogramm glasfaserverstärkter Kunststoffe definiert. Standard Zugtests von Proben mit unterschiedlichen Lagenaufbauten werden untersucht. Abbildung 27 gibt eine Übersicht der experimentellen Untersuchungen. Die Geometrie der Proben basiert auf den DIN Normen für Kunststoffe unter Zugbelastung [11], [12].

Titel	Lagen	Lagenaufbau
Unidirektional 0°	10	[0°]
Unidirektional 90°	10	[90°]
Schub ±45°	12	[±45°] _s
Quasi-isotrop	10	[0°/90°/+45°/-45°/0°/90°/-45°/+45°/90°/0°]
0°/90°	12	[0°/90°] _s
90°/45°	12	[90°/45°] _s
0°/45°	12	[0°/45°] _s

Tab. 5: Experimentell untersuchte Proben

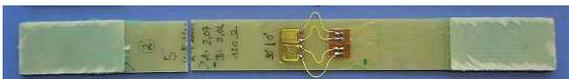
In Abhängigkeit vom Lagenaufbau wurden verschiedene Versagensverhalten festgestellt. Abbildung 25 zeigt die Proben mit den unterschiedlichen Lagenorientierungen nach dem Versagen.

Unidirektional 0°



Explosives Versagen durch Matrixbruch

Unidirektional 90°



Gerader Bruch durch Versagen der Matrix

Schub ±45°



Versagen durch Delamination

Quasi-isotrop



Faserbruch und Delamination

0°/90°



Kombination aus explosivem Faserbruch, geradem transversalem Bruch und Delamination

90°/45°



Diagonaler Bruch in Kombination mit Delamination

0°/45°



Diagonaler Faserbruch und Delamination entlang der kompletten Probe

Abb. 27: Übersicht der verschiedenen Versagensarten von glasfaserverstärkten Kunststoffen in Abhängigkeit der Lagenorientierung

4.2 Vergleich von experimentellen und numerischen Ergebnissen

Die Materialmodelle, die in Kapitel 3 präsentiert wurden, werden nun verwendet, um das Versagen der experimentellen Zugversuche zu simulieren. Um die Qualität der numerischen Ergebnisse darzustellen, wird ein Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven gezeigt.

Im Folgenden werden die Materialmodelle *MAT_054 und *MAT_058c und das Materialmodell nach Pinho mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Die numerischen Parameter nach *MAT_054 und *MAT_058c wurden validiert um eine bestmögliche Anpassung der Simulation an die experimentellen Ergebnisse zu erzielen. Für das Materialmodell nach Pinho war kein Validierungsprozess notwendig.

Abbildung 28 zeigt die Ergebnisse der unidirektionalen Zugversuche in Faser- bzw. quer zur Faserrichtung. Ein typisches sprödes linear elastisches Versagen ist aufgetreten. Man kann feststellen, dass alle Kriterien gut mit den experimentellen Kurven übereinstimmen. Für Zug in Faserrichtung versagten *MAT_058c, bevor die maximale Festigkeit erreicht wurde.

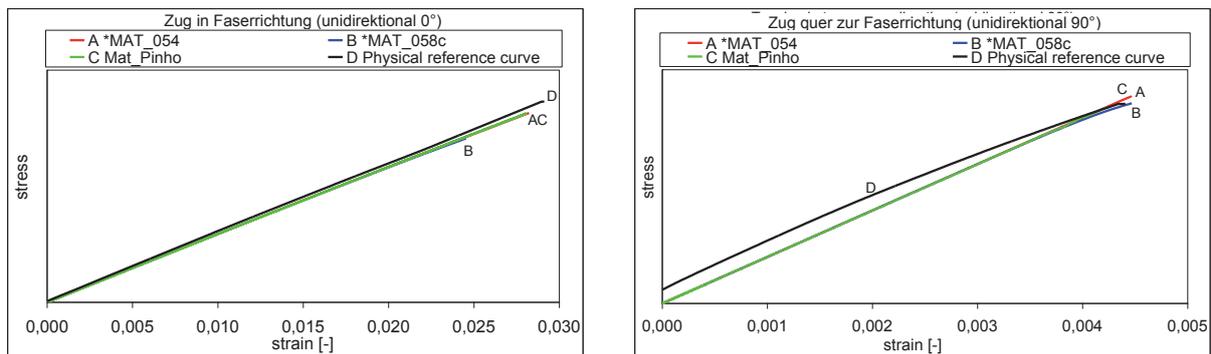


Abb. 28: Zug in Faserrichtung (links) und transversale Richtung (rechts)

Die Zugversuche von Laminaten mit einer Lagenorientierung von $\pm 45^\circ$ sind am schwersten zu simulieren. Der Grund dafür ist die hohe Versagensdehnung der Probe. Diese hohe Versagensdehnung resultiert aus der Delamination der Lagen sowie dem Versagen zwischen der Matrix und den Fasern. Dieses Verhalten kann durch die verwendeten Materialmodelle nicht beschrieben werden. Mit *MAT_054 ist es nicht möglich das Versagensverhalten zu beschreiben. Das Materialmodell nach Pinho versagt bei einer Dehnung von ca. 13%. Die Kurve zeigt dasselbe charakteristische Verhalten wie im Experiment. Die größte Dehnung konnte mit *MAT_058c erreicht werden. Für den Fall des quasi-isotropen Probe wurde die Steifigkeit mit *MAT_054 überbewertet. *MAT_058c und das Materialmodell nach Pinho beschreiben dieses Verhalten besser.

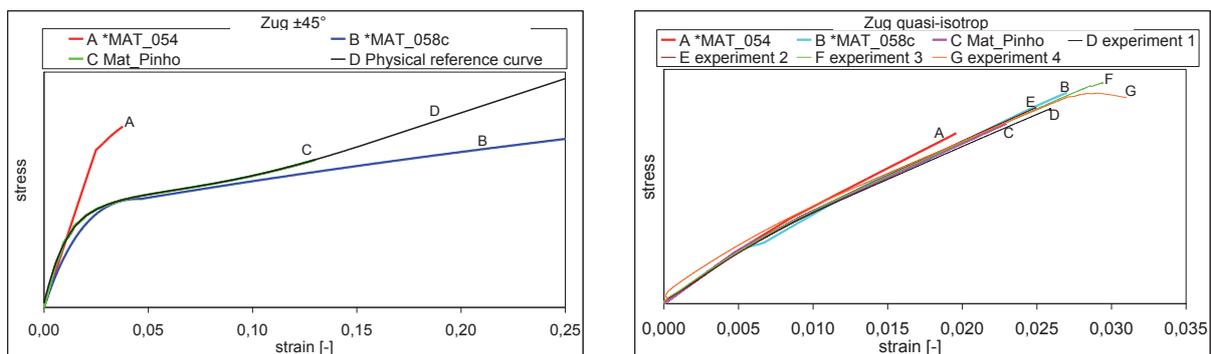


Abb. 29: Zug für das $\pm 45^\circ$ (links) und (rechts) für das quasi-isotrope Laminat

Für den $0^\circ/90^\circ$ und $90^\circ/45^\circ$ Lagenaufbau ist die Versagensfestigkeit, die durch *MAT_054 beschrieben wird, etwas zu hoch. Das Materialmodell nach Pinho kann das Versagen des $90^\circ/45^\circ$ Laminates beschreiben, aber die Festigkeit der $0^\circ/90^\circ$ -Kurve wurde nicht erreicht. Für beide Lagenaufbauten stimmte *MAT_058c gut mit den experimentellen Ergebnissen überein.

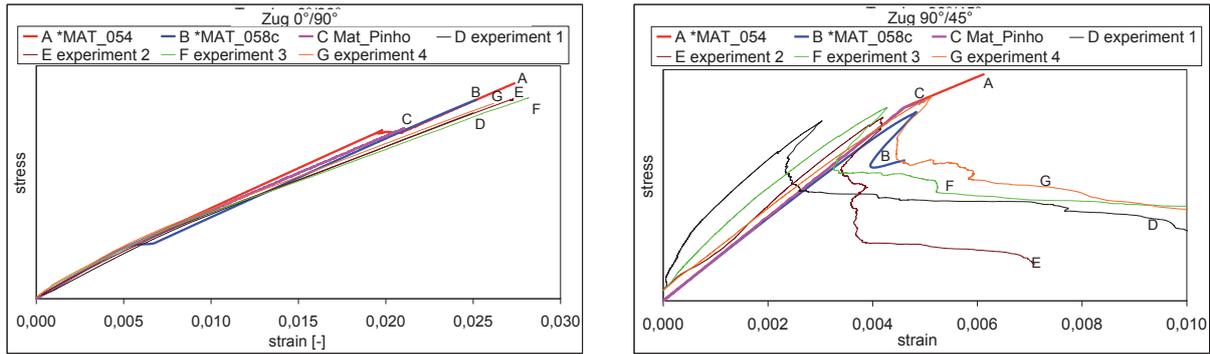


Abb. 30: Zug für das (links) 0°/90° und (rechts) für das 90°/45° Laminat

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse der 0°/45°-Lagenorientierung. *MAT_054 und Pinho erreichten nahezu dieselbe Festigkeit, während *MAT_058c früher versagte. Die Steifigkeit war erneut durch *MAT_054 überbewertet.

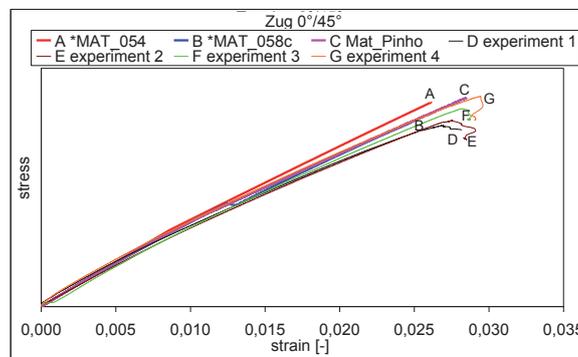


Abb. 31: Zug für das 0°/45° Laminat

Eine visuelle Auswertung des Versagensverhaltens ist in Abbildung 32, in Abhängigkeit der Lagenorientierung, gegeben. Das explosive Verhalten bei Zug für 0° konnte bei allen Materialmodellen wiedergegeben werden. Die Rissbildung des ±45° Laminats ist in der Simulation ähnlich wie im Experiment. Durch die Anwendung einer einzelnen Lage von Schalenelementen zur Darstellung des kompletten Lagenaufbaus bleibt die Delamination unberücksichtigt. Die Risse in der Simulation der 90° und 90/45° Proben stimmen mit den Experimenten überein.

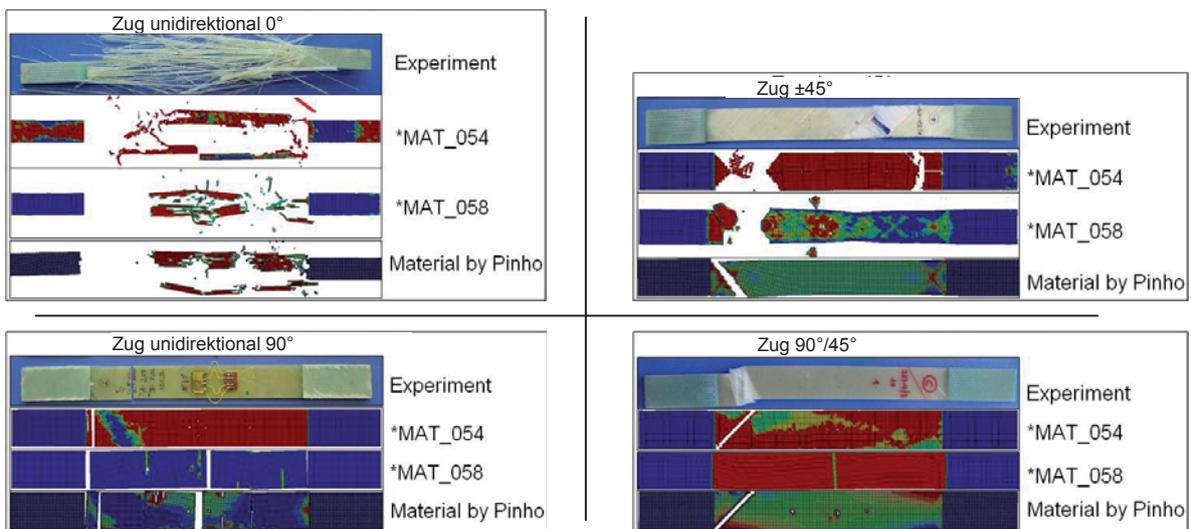


Abb. 32: Versagensverhalten der Versuchsproben in Abhängigkeit der Lagenaufbauten

5 Schlussfolgerung

Die aktuell implementierten Materialmodelle *MAT_054 und *MAT_058c sowie die zwei neuen User-Materialmodelle, entsprechend den Theorien nach Pinho und Camanho, wurden untersucht. Eine grundlegende Untersuchung des post-kritischen Verhaltens nach dem Bruch wurde anhand von Ein-Element Versuchen durchgeführt. Während die implementierten Materialmodelle (*MAT_054 & *MAT_058c) zahlreiche numerische Parameter benötigen um das post-kritische Verhalten zu beschreiben, wird das post-Versagen der User Materialien durch Schadensausbreitungsgesetz, beschrieben, die auf Bruchzähigkeiten basieren. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Materialmodelle nach Pinho und Camanho korrekt implementiert wurden. Die verschmierte Energieformulierung zeigt eine Abhängigkeit in Bezug auf die Netzfeinheit. Eine Netzunabhängigkeit der Materialmodelle nach Pinho und Camanho wird in zukünftigen Untersuchungen diskutiert.

In Bezug auf die Standard Zugversuche konnten die Materialmodelle das experimentelle Verhalten in einer angemessenen Genauigkeit wiedergeben. Während die charakteristische Kurve des Experiments und des Materialmodells nach Pinho gut für den Fall des $\pm 45^\circ$ Versuchs übereinstimmte, konnte die maximale Dehnung nicht erreicht werden. Trotz alledem erfordern die Materialmodelle *MAT_054 und *MAT_058c eine kosten- und zeitintensive Anpassung der Ergebnisse. Die Ergebnisse des Materialmodells nach Pinho basieren auf experimentellen Daten, die direkt in die Materialkarte einfließen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass Festigkeitsanalysen durch das User-Materialmodell nach Pinho gute und nachvollziehbare Ergebnisse, im Vergleich zu den experimentellen Daten liefert. Die Nachbildung der Schadensbilder war ebenfalls realistisch.

Die neuen UMAT's für LS-DYNA, die aktuell bei der Daimler AG untersucht werden, zeigen eine gute und notwendige Verbesserung in der technischen Bewertung von Faserverbund-Strukturen für industrielle Anwendungen.

6 Literatur

- [1] M. Morthorst, Modellierung des Crashverhaltens konischer Faserverbundstrukturen, 2007
- [2] J. Peter, Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Crashverhalten von Strukturbauteilen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen, Schriftenreihe Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik, Band 8, 2005
- [3] LS-Dyna Keyword User's Manual, Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007
- [4] S. T. Pinho, Modelling failure of laminated composites using physically-based failure models, Dissertation, 2005
- [5] K.Schweizerhof, K.Weimar, T Rottner, Improving and testing the composite material models in LS-Dyna, Rep.No. CRASURV 2-1, CADFEM GmbH, Grafing, 1998
- [6] K.Schweizerhof, K.Weimar, Th. Münz, Th. Rotter, Crashworthiness analysis with enhanced composite material models in LS-DYNA - Merits and Limits, LS-DYNA World Conference, Detroit, 1998
- [7] P. Maimí, P.P. Camanho, J.A. Mayugo, C.G. Dávila, A continuum damage model for composite laminates: Part I – Constitutive model, Mechanics of Materials 39, 2007
- [8] J. A. Nairn, C.-H. Liu, D.-A. Mendels, S. Zhandarov, Fracture Mechanics Analysis of the Single-Fiber Pull-Out Test and the Microbond Test Including The Effects of Friction and Thermal Stresses, Proc. 16th Ann. Tech. Conf. of the Amer. Soc. Composites, 2001
- [9] P. Maimí, P.P. Camanho, J.A. Mayugo, C.G. Dávila, A continuum damage model for composite laminates: Part II – Computational implementation and validation, Mechanics of Materials 39, 2007
- [10] P. P. Camanho, C. G. Dávila, S. T. Pinho, L. Iannucci, P. Robinson, Prediction of in situ strengths and matrix cracking in composites under transverse tension and in-plane shear, Composites: Part A 37, 2006
- [11] DIN EN ISO 527-4, Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 4: Prüfbedingungen für isotrope und anisotrope faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe
- [12] DIN EN ISO 527-5, Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe
- [13] S. Hartmann, D. Moncayo, L. Aktay, T. Graf, New Developments in LS-DYNA for the Simulation of long fiber reinforced Composite Materials, NAFEMS, Fortschritte in der Simulation von Composites, Wiesbaden, 2011

Numerische Homogenisierung für viskoelastische Faserverbundwerkstoffe

H. Andrä, M. Kabel, S. Staub (Fraunhofer ITWM);

F. Krzikalla (Dept. Geophysics, Stanford University, Stanford, USA Stanford University);

V. Schulz (DHBW Mannheim)

Die mechanischen Eigenschaften kurzfaserverstärkter Kunststoffe hängen stark von Faktoren wie dem Volumenanteil der eingebrachten Fasern und deren lokaler Orientierung ab. Des Weiteren beeinflussen die geometrischen und elastischen Eigenschaften der Fasern sowie die viskoelastischen Eigenschaften der Polymermatrix das makroskopische Verhalten des Composites. In der vorliegenden Arbeit wird eine Kette von numerischen Verfahren zur Berechnung der makroskopischen mechanischen Eigenschaften vorgestellt, die auf den geometrischen Mikrostruktureigenschaften und den viskoelastischen Parametern der Konstituenten basieren. Ein Schwerpunkt in diesem Vorgehen ist die schnelle, robuste und lokal verfeinerte Tetraedervernetzung von statistischen Volumenelementen, welche komplizierte Mikrostrukturen repräsentieren.

Im Gegensatz zu anderen Ansätzen wird hierzu ein voxelbasierter Ansatz verwendet, welcher sich besonders gut für den Einsatz bei drei-dimensionalen CT-Bildaufnahmen eignet. Mithilfe der Software FeelMath (Finite Elemente für elastische Materialien und Homogenisierung), welche am Fraunhofer ITWM entwickelt wird, werden auf den statistischen Volumenelementen so genannte Mikro-Finite-Element-Simulationen (μ FE-Simulationen) ausgeführt. Diese liefern alle zeitabhängigen Koeffizienten des anisotropen Elastizitätstensors, welche oft nur teilweise in Experimenten gemessen werden können.

1 Einleitung

Verbundwerkstoffe haben aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften ein weiträumiges Einsatzgebiet in diversen Ingenieursanwendungen. Die Kombination verschiedener Materialien liefert Composites mit Eigenschaften, welche sich stark von denen der einzelnen Bestandteile unterscheiden. Ebenso beeinflusst der Aufbau der einzelnen Komponenten in der Mikroebene die effektiven Composite-Eigenschaften, wie z.B. den Elastizitätsmodul, d.h. die Steifigkeit. Aus diesem Grund ist für die a-priori Bestimmung von Materialeigenschaften von Verbundwerkstoffen eine Simulation der Mikroebene nötig. Diese mikroskopischen Ergebnisse werden mit Hilfe von Homogenisierungsmethoden auf die makroskopische Ebene übertragen. Im folgenden wird dieses Vorgehen anhand von faserverstärkten, viskoelastischen Verbundwerkstoffen näher erläutert.

2 Grundlagen der Homogenisierung

Homogenisierungsverfahren dienen der Berechnung von Eigenschaften eines virtuellen homogenen Mediums, das dem realen Material mit Mikrostruktur äquivalent ist. Der einfachste Homogenisierungsansatz ergibt sich aus der sogenannten Vermischungsregel, bei der die benötigten Größen als Mittelung der entsprechenden mikroskopischen Größen, gewichtet mit ihrem Volumenanteil, bestimmt werden. Für die hier betrachteten Verbundwerkstoffe liefert dieser Ansatz nur eine grobe Schätzung, da die effektiven Eigenschaften von faserverstärkten Werkstoffen stark von der lokalen Faserorientierung abhängen, welche in diesem einfachen Ansatz nicht berücksichtigt wird. Ebenso fließen Effekte wie die makroskopische Anisotropie, welche aus der Faserverstärkung resultiert, nicht ein. Daher ist die Anwendung von erweiterten Homogenisierungsansätzen nötig.

Die Bestimmung von oberen und unteren Grenzen der effektiven Steifigkeiten ist gegeben durch die Grenzen von Voigt und Reuss, siehe [1] und [2], welche auf den Annahmen konsistenter Spannungen oder Verzerrungen in der kompletten Mikro-Domäne basieren. Eine Erweiterung dieser Abschätzungskonzepte, beruhend auf varia-

tionellen Formulierungen, stellen die so genannten Hashin-Shtrikman Grenzen für makroskopisch isotrope Materialien dar, siehe [3].

Eine weitere Gruppe von Homogenisierungsmethoden sind die analytischen Methoden, welche aus der Eshelby-Lösung hergeleitet werden können. Im Eshelby-Ansatz [4] werden ellipsoidförmige Einschlüsse in einer unendlich ausgedehnten Matrix betrachtet. Ein großer Nachteil dieses Ansatzes ist die benötigte Annahme einer dünnen Verteilung von Einschlüssen, d.h. nur sehr wenige Einschlüsse können berücksichtigt werden. Deshalb wurden Erweiterungen zu diesem Konzept entwickelt, wie z.B. die selbstkonsistente Methode, bei der die Interaktion zwischen Einschlüssen durch eine effektive Steifigkeit berücksichtigt wird, oder die Mean-Field-Methode, welche effektive Verzerrungen oder Spannungen in der Matrix um den Einschluss vorgibt.

Die asymptotische Homogenisierung stellt ein mathematisches Vorgehen für periodische Mikrostrukturen dar. Basierend auf Variationsprinzipien wird eine Ausweitung der Verschiebungs- und Spannungsfelder von der charakteristischen Längenskala der mikroskopischen Heterogenitäten hin zu den gesuchten effektiven makroskopischen Größen ausgeführt. Aufgrund dieses Vorgehens, eignet sich die asymptotische Homogenisierung sowohl für die Bestimmung von effektiven Eigenschaften als auch zur Berechnung der lokalen Spannungen und Verzerrungen.

Alle bisher vorgestellten Methoden haben den gemeinsamen Nachteil, dass sie nur zunächst für einfache Mikrostrukturen und für rein elastisches Materialverhalten anwendbar sind.

Daher werden für die präzise Vorhersage der effektiven Eigenschaften von Verbundwerkstoffen, die aus einer viskoelastischen Matrix und einer komplexen Anordnung von Fasern bestehen, numerische Homogenisierungskonzepte benötigt. In diesen numerischen Ansätzen ist die Mikrostruktur in einem so genannten Repräsentativen Volumenelement (RVE) erfasst. Das Konzept des RVE wurde erstmals von Hill in [5] erarbeitet.

Im Übergang von der makroskopischen zur mikroskopischen Ebene werden die RVE durch Aufbringung geeigneter Randbedingungen verformt. Verschiebungsrandbedingungen und periodische Randbedingungen, welche beide durch den makroskopischen Deformationsgradienten formuliert werden können, sind Beispiele für zulässige Randbedingungen. Nach der Lösung des hierdurch entstehenden Mikro-Randwertproblems mit einer geeigneten Methode, wie z.B. der hier angewandten Finite-Element-Methode (μ FEM), werden die effektiven Parameter durch Mittelung über das mikroskopische Volumen bestimmt. Die Mittelung ist hierfür definiert durch

$$\Phi = \langle \phi(x) \rangle := \frac{1}{V} \int_{\Omega} \phi(x) dV. \quad (1)$$

Mit dieser Definition ergeben sich die effektiven Spannungen als

$$\Sigma_{ij}(t) = \langle \sigma_{ij}(x, t) \rangle, \quad (2)$$

und die effektiven Verzerrungen als

$$E_{ij}(t) = \langle \varepsilon_{ij}(x, t) \rangle. \quad (3)$$

Der Skalenübergang von der Makro- zur Mikro-Skala muss die so genannte Hill-Bedingung erfüllen, siehe Hill [5], welche die Gleichheit der internen effektiven und der gemittelten internen mikroskopischen Arbeit fordert, d.h.

$$\Sigma_{ij} E_{ij} = \langle \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \rangle. \quad (4)$$

Die zuvor genannten Randbedingungen erfüllen dieses Konsistenzkriterium. Gleichung (4) wird auch als Energieäquivalenzprinzip (*strain energy equivalence principle*) bezeichnet.

Mit diesen Vorbetrachtungen gelten für den effektiven Elastizitätstensor R_{ijkl} die folgenden Beziehungen

$$\begin{aligned} \Sigma_{ij} &= R_{ijkl} E_{kl} \\ R_{ijkl} E_{kl} E_{ij} &= \langle \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

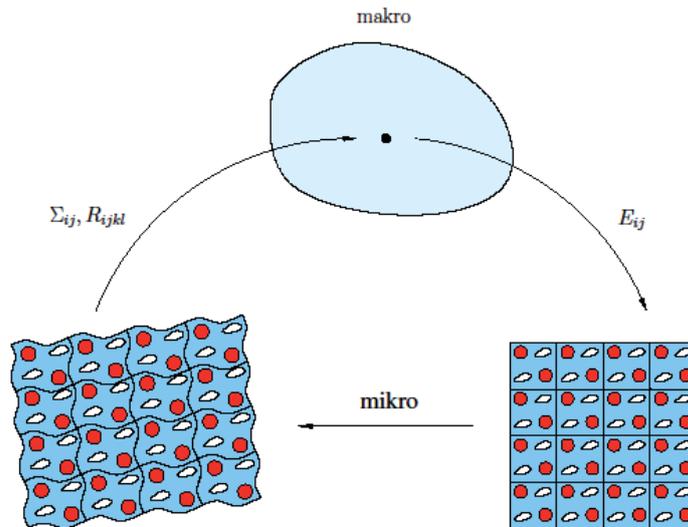


Abb. 1: Skalenübergang für numerisches Homogenisierungsschema

Mit Hilfe des so berechneten lokalen Elastizitätstensors kann die makroskopische Bauteilberechnung so effizient wie für ein makroskopisch homogenes Material ausgeführt werden, wobei jedoch die lokale Faserorientierung berücksichtigt wird. Der Skalenübergang zwischen der makroskopischen und der mikroskopischen Ebene ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Zusammenfassend stellt das angewendete numerische Homogenisierungsschema eine leistungsfähige Methode zur Bestimmung der effektiven Eigenschaften von mikrostrukturierten Materialien zur Verfügung. Diese Methode eignet sich sowohl für komplexe Mikrogeometrien als auch für nicht-lineare und inelastische Materialverhalten und lässt sich daher sehr gut auf die betrachteten faserverstärkten Verbundwerkstoffe anwenden. Eine nähere Beschreibung der zugrunde liegenden Algorithmen findet sich in [6] und [7].

3 μ FE-Simulation

Die Basis der verwendeten μ FE-Simulation ist eine ausreichend "gute" Auflösung der Composite-Mikrostruktur. Eine typische Längenskala auf der Mikroebene ist hierbei gegeben durch eine Auflösung von 1 bis 10 μm . Aus diesen Werten ergibt sich, dass das Volumen der betrachteten Mikrostrukturen durch die Rechenzeit der FE-Berechnung limitiert ist und aktuell in der Größenordnung von ungefähr 500 mm^3 liegt. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Methoden um die dreidimensionale Mikrostruktur des Composites zu erhalten. Die erste besteht aus bildgebenden Methoden, wie z.B. der Mikro-Computer-Tomographie (μ CT). Die zweite Methode basiert auf stochastischen Rekonstruktionen der Mikrostruktur. Wie in der Literatur bereits gezeigt wurde, siehe [8] und [9], liefern die stochastischen Ansätze sehr gute geometrische Modelle für faserverstärkte Strukturen.



Abb. 2: Mikrostruktur eines glasfaserverstärkten Polymers, 512^3 Voxel [10]

Das stochastische Modell liefert eine Mikrostruktur, die durch ein dreidimensionales Volumenbild dargestellt ist, siehe Abb. 2. Wenn der betrachtete Verbundwerkstoff aus nur zwei Materialien besteht, entsteht in diesem Ansatz ein binäres Bild mit den Werten "0" (rot) und "1" (transparent), welche zur Faser und zur Matrix gehören. Für die Anwendung im Rahmen einer μ FE-Berechnung wird zunächst das binäre 3D Bild in ein hierarchisches Tetraedernetz konvertiert, siehe Abb. 3. Details zu diesem Ansatz sind in [11] beschrieben. Eine Erweiterung für glatte Oberflächen wurde zusätzlich erarbeitet. Die Glättung der Oberfläche erfolgt angelehnt an das Marching-Cube-Verfahren [12]. Hierbei wird aus der Information der umliegenden Voxel die Lage der Oberfläche interpoliert. Üblicherweise wird bei diesem Verfahren ein Oberflächendreiecksnetz erzeugt, Abbildung 4 (links) zeigt eine mögliche Konfiguration, bei der sich beispielsweise eine ebene Grenzfläche ergibt. Aus dem mit Hilfe des Marching-Cube-Algorithmus erstellten Oberflächennetz muss für eine μ FE-Berechnung ein Volumennetz erzeugt werden. Hierbei ist ein hoher Aufwand erforderlich um eine ausreichende Netzqualität sicherzustellen. Das Verfahren, das im Rahmen dieses Beitrags verwendet wurde, basiert auf einer direkten Erzeugung eines Volumennetzes aus Tetraedern. Dabei erfolgt eine Zerlegung der Oberflächenvoxel in der Form, dass sich eine zum Marching-Cube-Verfahren analoge, geglättete Oberfläche ergibt. Diese Oberfläche setzt sich aus Seitenflächen von Tetraedern zusammen. Zusätzlich ist die Zerlegung immer kompatibel zu den angrenzenden Tetraedern, so dass es direkt in das beschriebene hierarchische Netz integriert werden kann. Aus den Abbildungen 3 und 4 wird ersichtlich, dass es sich um eine diskrete Anzahl von Tetraedern handelt, die für die Erzeugung beliebiger binärer Bilder verwendet werden. Diese Tetraeder müssen einmal berechnet werden und stehen dann in Form einer Lookup-Tabelle zur Verfügung. Das Berechnungsverfahren beruht auf einer Delaunay-Triangulierung, da ausgehend von einer Zerlegung eines Würfels in fünf Tetraeder zusätzlich Punkte eingefügt werden.

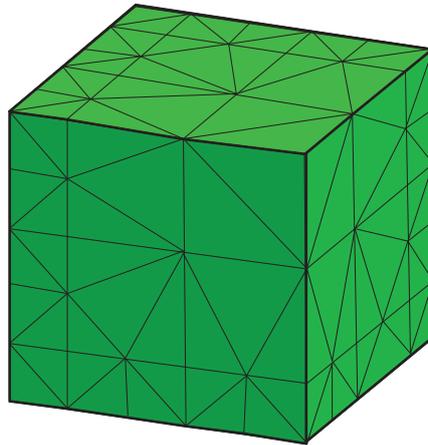


Abb. 3: Detail der hierarchischen Tetraedervernetzung [11]

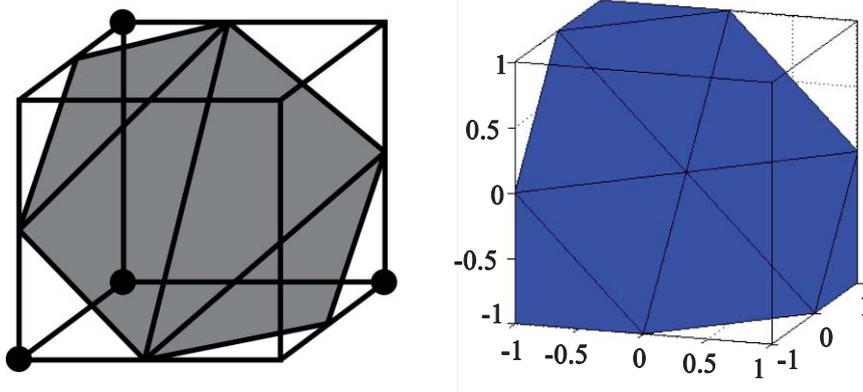


Abb. 4: Vergleich zwischen lokalem Oberflächennetz aus dem Marching-Cube-Algorithmus nach [12] (links) und dem direkt erzeugten Tetraedernetz (rechts)

Der hier verwendete Ansatz zur Vernetzung besticht durch die Robustheit und die a-priori vorhandene Vernetzungsqualität, d.h., dass das Verhältnis von Umkugel zu Inkugel nach unten und oben beschränkt ist. Die er-

zeugten Netze besitzen eine lokale Verfeinerung an den Grenzflächen der Konstituenten. Schließlich hat das Verfahren für die Durchführung einer μ FE-Simulation von Verbundwerkstoffen den großen Vorteil, dass die Netze für die unterschiedlichen Konstituenten a-priori kompatibel sind. Das Ergebnis der beschriebenen Netzerzeugung ist in den Abbildungen 5a und 5b exemplarisch dargestellt.



Abb. 5a: Tetraedernetz einer Einzelfaser, links ungeglättet und rechts geglättet

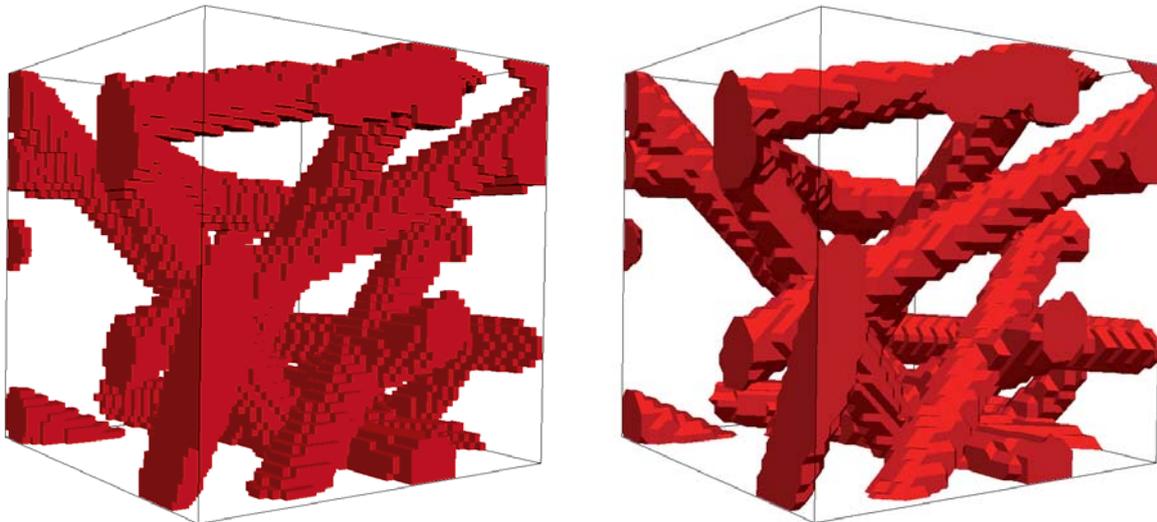


Abb. 6b: Tetraedernetz einer Faserstruktur, links ungeglättet und rechts geglättet

4 Ablauf der Makro-Mikro-Kopplung

Im Folgenden ist die verwendete Kopplung zwischen der makroskopischen Längenskala, die durch das makroskopische Bauteil gegeben ist, und dem mikroskopischen Aufbau, welcher die lokale Orientierung der Glasfasern in der umgebenden Polymermatrix berücksichtigt, näher erläutert.

In der Methode können alle makroskopischen Rechnungen mit einem freien oder kommerziellen FE-Softwaretool, wie z.B. ABAQUS, ausgeführt werden. In jedem makroskopischen Simulationspunkt wird der Einfluss der mikroskopischen Bestandteile durch die Verwendung von effektiven Eigenschaften erfasst. Diese effektiven mikroskopischen Eigenschaften können im makroskopischen Bauteil aufgrund des Herstellungsverfahrens, wie z.B. Spritzgussverfahrens, stark variieren. Vorläufig wird der Festkörpervolumenanteil der Fasern in der Matrix als konstant angenommen und es wird vorausgesetzt, dass der Faserorientierungstensor in jedem makroskopischen Element a-priori bekannt ist. Der Faserorientierungstensor kann entweder durch eine Simulation des Herstellungsverfahrens (Spritzgussverfahrens) oder durch Messungen am Bauteil bestimmt werden. Diese Bestimmung geht allerdings über das Themengebiet der vorliegenden Arbeit hinaus.

Mit Hilfe des Faserorientierungstensors können geeignete Mikrostrukturen erzeugt werden und anschließend werden die gesuchten effektiven Eigenschaften mit dem Softwarepaket FeelMath, welches am Fraunhofer ITWM entwickelt wird, bestimmt. Die Berechnung sowohl der benötigten viskoelastischen Eigenschaften basierend auf rein elastischen μ FE-Simulationen als auch der Reduktion der ausgeführten μ FE-Simulationen werden in den folgenden zwei Abschnitten diskutiert.

5 Effektive viskoelastische Eigenschaften

Im makroskopischen Bauteil wird ein viskoelastisches Materialverhalten modelliert. Das gemessene linear viskoelastische Verhalten kann durch ein Modell mit N Maxwell-Elementen hinreichend genau approximiert werden, wenn N groß genug gewählt wird. Details sind z.B. in Kaliske und Rothert [13] erläutert. Grundlegend kann das viskoelastische Verhalten durch die normalisierte Relaxationsfunktion

$$\Psi(x, t) = 1 + \sum_{j=1}^N \gamma_j(x) \exp\left(-\frac{t}{\tau_j(x)}\right) \quad (6)$$

beschrieben werden. Hierbei entsprechen γ_j und τ_j , $j=1, \dots, N$, den normalisierten Relaxationskoeffizienten und Relaxationszeiten in jedem Maxwell-Element j . Durch Anwendung dieser Relaxationsfunktion kann der Relaxationstensor R_{klmn} mit Hilfe des relaxierten elastischen Steifigkeitstensors c_{klmn}^r , welcher der Steifigkeit zur Zeit $t \rightarrow \infty$ entspricht, durch

$$R_{klmn}(x, t) = c_{klmn}^r(x) \Psi(x, t) \quad (7)$$

berechnet werden. In einem nächsten Schritt wird dann der benötigte (zeitabhängige) viskoelastische Tensor bestimmt durch

$$c_{klmn}^{ve}(x, t) = c_{klmn}^r(x) + R_{klmn}(x, t)(c_{klmn}^u(x) - c_{klmn}^r(x)), \quad (8)$$

wobei c_{klmn}^u dem unrelaxierten elastischen Steifigkeitstensor entspricht, d.h. der Steifigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$ bei einem Relaxationsversuch.

Numerische Studien und analytische Überlegungen, siehe [14], haben gezeigt, dass im Fall von Fasern, welche viel steifer als die umgebende Matrix sind, die normierten Relaxationskurven des Faser-Matrix-Verbundes fast denen des reinen Matrixmaterials entsprechen. Diese Eigenschaft hängt nicht vom Faservolumenanteil und der Faserorientierung ab. Das benötigte Steifigkeitsverhältnis ist bei den betrachteten Glasfasern und der Polymermatrix gegeben. Daher müssen nur die normalisierten Relaxationskoeffizienten und Relaxationszeiten der Matrix in Experimenten bestimmt werden unabhängig von der lokalen Faserorientierung. Somit reduziert sich die Berechnung des effektiven viskoelastischen Tensors zu zwei rein elastischen μ FE-Simulationen zur Bestimmung der unrelaxierten und relaxierten Elastizitätstensoren c_{klmn}^u und c_{klmn}^r . Diese zwei Tensoren wiederum hängen nur vom unrelaxierten, bzw. relaxierten E-Modul und der Querkontraktionszahl der Matrix oder respektive der Faser ab, welche in Experimenten bestimmt werden können. Ausführlichere Hintergrundinformationen zu den elastischen μ FE-Simulationen, welche in FeelMath ausgeführt werden, finden sich in der Arbeit von Wenzlau et al. [15].



Abb. 7: Vergleich von simulierten und gemessenen Relaxationskurven (Labordaten von Robert Bosch GmbH zur Verfügung gestellt), Voxel Bild (links), FE Netz (mitte), Relaxation des Elastizitätsmoduls in x-Richtung (rechts)

Der Ablauf der ausgeführten Berechnungen ist in Abb. 7 zusammengefasst: Ein stochastisches Volumenelement (SVE) wird als Realisierung der stochastischen Geometrie generiert. Dieses SVE ist als Voxelbild dargestellt. Als nächstes wird das Voxelbild mit dem vorgestellten Algorithmus vernetzt. Das Ergebnis hiervon ist ein Tetraeder-netz mit kleinen finiten Elementen an den Materialgrenzflächen. Im Rahmen der μ FE-Simulationen werden mittels Homogenisierung dann die Relaxationskurven aller effektiven elastischen Koeffizienten bestimmt. Beispielhaft ist ein Vergleich des per Simulation ermittelten Elastizitätsmoduls in x-Richtung mit Messdaten in Abb. 7 (rechts) dargestellt.

6 Reduktion der μ FE-Simulationen

Aufgrund der komplexen Mikrostruktur ist es nicht möglich die elastischen μ FE-Simulationen zur Bestimmung der unrelaxierten und relaxierten Elastizitätstensoren in jedem makroskopischen Element auszuführen. Daher wird im folgenden eine Approximation der benötigten Elastizitätstensoren abhängig vom zugehörigen Faserorientierungstensor T entwickelt. Dafür wird zunächst der Faserorientierungstensor in Diagonalgestalt überführt. Da die Spur des diagonalisierten Faserorientierungstensors immer 1 entspricht, kann der Faserorientierungstensor durch nur zwei unabhängige Variablen dargestellt werden. Diese Variablen T_{xx} und T_{yy} liegen in einem zweidimensionalen Dreieck. In einem ersten Schritt werden verschiedene Volumenelemente zugehörig zu verschiedenen Paaren (T_{xx}, T_{yy}) generiert, siehe Abb. 8.

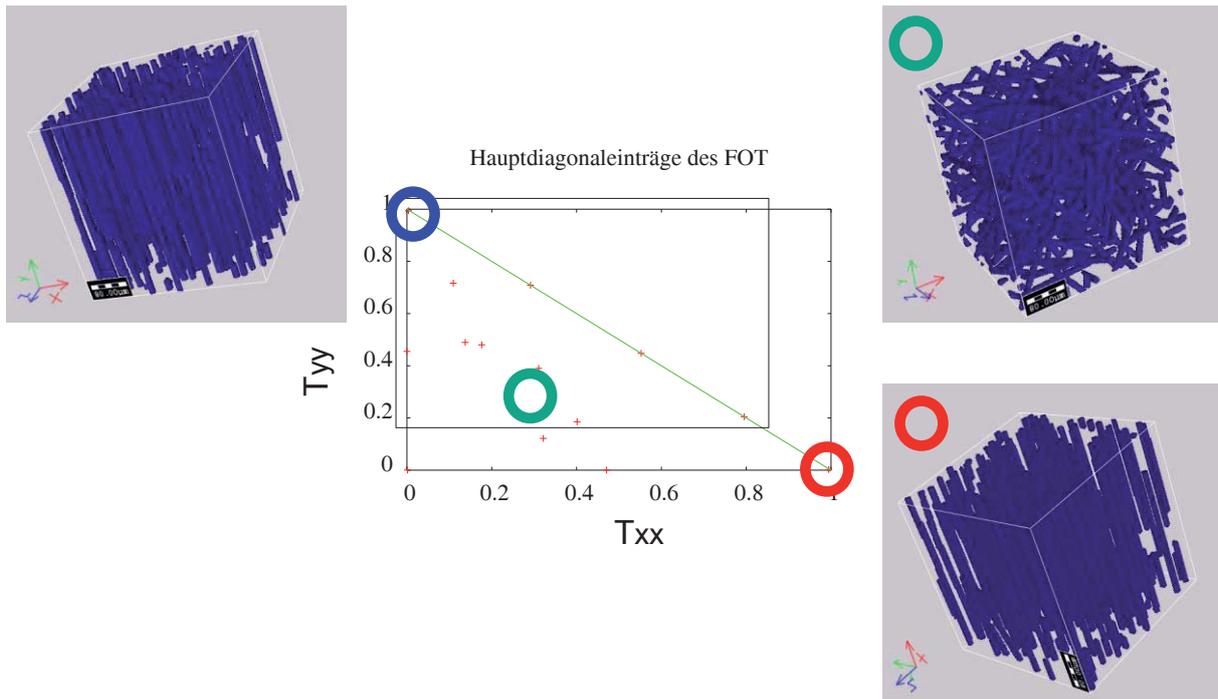


Abb. 8: Diagonalwerte des Faserorientierungstensors und ausgewählte Volumenelemente

Im nächsten Schritt werden anhand dieser Volumenelemente die zugehörigen elastischen μ FE-Simulationen ausgeführt und die unrelaxierten und relaxierten Elastizitätstensoren bestimmt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Simulationen werden im Anschluss die in jedem makroskopischen Element benötigten Elastizitätstensoren mit Hilfe eines nicht-parametrischen Schätzers oder einer linearen Interpolation approximiert. Dazu muss zunächst der Faserorientierungstensor des makroskopischen Elementes durch eine Koordinatentransformation auf Diagonalgestalt transformiert werden. Anschließend wird der zur Diagonalform gehörige Elastizitätstensor durch die inverse Koordinatentransformation zurück ins globale Koordinatensystem gedreht.

Der Vorteil des hier vorgestellten Ansatzes ist die Reduktion der μ FE-Simulationen auf eine bestimmte Anzahl, welche im Voraus (*Preprocessing*) durchgeführt werden kann. Ebenso kann die Abschätzung der effektiven Steifigkeiten zu jeder auftretenden Faserorientierung im Voraus (*Preprocessing*) ausgeführt werden.

7 Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Projekt 03x0513F (MISES-FOK), beaufsichtigt durch den Projektträger Jülich und die *Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation*, Projekt MUSSEH ("Multiskalensimulation für die Entwicklung von Hochleistungsverbundwerkstoffen") gefördert.

8 Literatur

- [1] Voigt, W.: "Über die Beziehung zwischen den Elastizitätskonstanten isotroper Körper", Wiedemanns Annalen 38, 1889, 573-587.
- [2] Reuss, A.: "Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle", Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 9, 1929, 49-58.
- [3] Hashin, Z., Shtrikman, S.: "On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity", Journal of the Mechanics and Physics of Solids 10, 1962, 335-342.
- [4] Eshelby, J.D.: "The determination of the field of an ellipsoidal inclusion and related problems", Proceedings of the Royal Society London A 241, 1957, 376-396.
- [5] Hill, R.: "Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles", Journal of the Mechanics and Physics of Solids 11, 1963, 357-372.

- [6] Ricker, S.: "Multi-Scale Modeling and Simulation in Configurational Mechanics", PhD-Thesis, University of Kaiserslautern, Preprint 2011.
- [7] Kouznetsova, V., Geers, M.G.D., Brekelmans, W.A.M.: "Multi-scale constitutive modelling of heterogeneous material with a gradient enhanced computational homogenization scheme", *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 54, 2002, 1235-1260.
- [8] Redenbach, C., Vecchio, I.: "Statistical analysis and stochastic modelling of fibre composites", *Composites Science and Technology* 71, 2011, 107-112.
- [9] Schladitz, K., Peters, S., Reinel-Bitzer, D., Wiegmann, A., Ohser, J.: "Design of acoustic trim based on geometric modeling and flow simulation for non-woven", *Computational Materials Science* 38, 2006, 56-66.
- [10] www.geodict.com
- [11] Schulz, V., Andrä, H., Schmidt, K.: "Robuste Netzgenerierung zur Mikro-FE-Analyse mikrostrukturierter Materialien", *NAFEMS Magazin* 2, 2007, 28-30.
- [12] Lorensen, W. E., Cline, H. E.: "Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm", *Computer Graphics* 21, 1987, 163-169.
- [13] Kaliske, M. and Rothert, H.: "Formulation and implementation of three-dimensional viscoelasticity at small and finite strains", *Computational Mechanics* 18, 1997, 228-239.
- [14] deBotton, G., Tevet-Derfe, L. : "The response of a fiber-reinforced composite with a viscoelastic matrix phase", *Journal of Composite Materials* 38, 2004, 1255-1277.
- [15] Wenzlau, F., Zemitis, A., Andrä, H., Latz, A.: "Elastic microscale simulation of fiber-reinforced polymers", In: *Proc. NAFEMS NORDIC seminar "Simulation Composite Materials and Structures"*, Esbjerg, Denmark, February 2010.

Rapid CFD für die frühe konzeptionelle Design Phase

D. Weber, S. Pena Serna (Fraunhofer IGD);

A. Stork, D. W. Fellner (Fraunhofer IGD / TU Darmstadt)

Ein wichtiger Teil des Produktentwicklungszyklus ist die Optimierung der strömungs- oder strukturemechanischen Eigenschaften einer Komponente, die normalerweise in einem iterativen und sehr aufwändigen Prozess stattfindet. Neben der Modifikation, Vereinfachung und des Vernetzens der Bauteilgeometrie, kann die Simulation mitunter Stunden bis Tage dauern. In frühen konzeptionellen Designphasen müssen verschiedene Materialparameter sowie unterschiedliche Geometrien ausprobiert und verglichen werden, um zu einem für das spätere Produkt optimalen Design zu gelangen. Dieser zeitaufwändige Prozess begrenzt deutlich die Anzahl der Möglichkeiten, die analysiert werden können. In dieser Arbeit wird das Framework „Rapid CFD“ vorgestellt, das es ermöglicht, schnelle Strömungssimulationen für die frühe konzeptionelle Designphase einzusetzen. Um eine solche Geschwindigkeit zu erreichen, wird die Berechnung und Visualisierung von zweidimensionalen Strömungen in Echtzeit kombiniert. Das ermöglicht die interaktive Modifikation von Parametern und Randbedingungen und damit eine schnelle Analyse und Bewertung von unterschiedlichen Geometrien und eine frühzeitige Optimierung eines Bauteils.

Das Framework führt alle Berechnungen auf der Graphikkarte (graphics processing unit - GPU) aus und vermeidet damit das aufwändige Kopieren zwischen CPU- und GPU-Hauptspeicher. Die Berechnungen werden auf einem Standard-Desktop PC ausgeführt, sodass die Simulationsergebnisse im Graphikkartenspeicher bleiben und direkt zur Visualisierung verwendet werden können. Für die Modellierung der Geometrie werden B-Splines verwendet, damit Benutzer lokal die Form durch einzelne Kontrollpunkte modifizieren können. Die Diskretisierung wird ebenfalls auf der GPU ausgeführt. Die Berechnung eines einzelnen Zeitschritts auch für Millionen von Unbekannten wird in Bruchteilen von Sekunden durchgeführt. Die intuitive geometrische Manipulation in Kombination mit der unmittelbaren Visualisierung der Simulationsgrößen wie Druck und Geschwindigkeit ermöglichen die direkte Analyse des Einflusses von Geometrie- und Parameteränderungen. Obwohl diese neuartige Simulationstechnik noch nicht die hohe Präzision konventioneller Simulationen erreicht, ermöglicht diese Technik die Beobachtung von Trends und Tendenzen.

1 Einleitung

Der Designprozess ist laut Pahl und Beitz [1] in vier Phasen eingeteilt:

- a) *Task Clarification*
- b) *Conceptual Design*
- c) *Embodiment*
- d) *Detail Design*

Für jede einzelne Phase gibt es dedizierte Tools und Techniken, die den Ingenieur in der jeweiligen Problemstellung unterstützen. Für die Phase *Embodiment* gibt es Tools aus den Bereichen Computer-Aided Design (CAD) und Computer-Aided Engineering (CAE), die es ermöglichen, virtuell ein Produkt zu entwickeln und dieses auf unterschiedliche Eigenschaften hin zu untersuchen. Durch eine sinnvolle Form, Dimensionierung und Wahl der Materialeigenschaften für die jeweilige Problemstellung wird das initiale Konzept verwirklicht. Abhängig von der Güte der in der Phase *Conceptual Design* entwickelten Idee, kann der iterative Prozess, das Design bezüglich physikalischer Eigenschaften zu optimieren, mehr oder weniger zeitintensiv sein. Für die Optimierung mit variierender Geometrie werden verschiedene Operationen benötigt: Geometriemodifikation, Vereinfachung des Geometriemodells, Diskretisierung (Vernetzung) sowie Simulation und deren Analyse. Eine einzelne Iteration kann Tage oder sogar Wochen in Anspruch nehmen. Dieser Prozess kann verkürzt werden, indem in der frühen konzeptionellen Designphase ein Tool eingesetzt wird, das die Exploration verschiedener Geometrien und Materialparametern unterstützt, um frühzeitig zu einem „voroptimierten“ Konzept zu gelangen. Die Anzahl der zu evaluierenden Lösungen kann dadurch reduziert und damit Zeit eingespart werden.

In dieser Arbeit wird ein solches Tool vorgestellt, das eine schnelle Strömungssimulation für die frühe konzeptionelle Designphase ermöglicht. Um dies zu erreichen, wurden die Berechnung und die Visualisierung von zweidimensionalen Strömungen in Echtzeit vereinigt und mit einer interaktiven Modifikation von Strömungsparametern, Randbedingungen und Geometrie kombiniert. Dies ermöglicht die schnelle Analyse von verschiedenen Geometrien und damit eine vorzeitige Optimierung der zu entwickelnden Komponente. Das Framework führt alle Berechnungen auf der Graphikkarte (graphics processing unit - GPU) aus und vermeidet damit das aufwändige Kopieren zwischen CPU- und GPU Hauptspeicher. Die Berechnungen werden auf einem Standard-Desktop PC ausgeführt, sodass die Simulationsergebnisse im Graphikkartenspeicher bleiben und direkt zur Visualisierung verwendet werden können. Für die Modellierung der Geometrie werden B-Splines verwendet, damit Benutzer lokal die Form durch einzelne Kontrollpunkte modifizieren können. Die Diskretisierung wird ebenfalls auf der GPU ausgeführt. Die Berechnung eines einzelnen Zeitschritts auch für Millionen von Unbekannten wird in Bruchteilen von Sekunden durchgeführt. Die intuitive geometrische Manipulation in Kombination mit der unmittelbaren Visualisierung der Simulationsgrößen wie Druck und Geschwindigkeit ermöglichen die direkte Analyse des Einflusses von Geometrie- und Parameteränderungen.

Rapid CFD für die frühe konzeptionelle Designphase kann den Produktentwicklungsprozess beschleunigen, in dem der Designraum für konzeptionelle Lösungen schneller exploriert werden kann. Dies wird durch die Kombination von Geometriemodifikation mit einem schnellen visuellen Feedback erreicht. Obwohl diese neuartige Simulationstechnik noch nicht die hohe Präzision konventioneller Simulationen erreicht, ermöglicht diese Technik die Beobachtung von Trends und Tendenzen. Um diese Arbeit einzuordnen wird zunächst eine Übersicht der grundlegenden Konzepte gegeben. Anschließend werden die drei Teile des Frameworks vorgestellt: Modellierung, Diskretisierung und Simulation. Zum Schluss werden verschiedene Simulationen vorgestellt und mit gewöhnlichen CFD Simulationen verglichen.

2 Grundlegende Konzepte

Das entwickelte Framework baut auf vielen verschiedenen Konzepten und Techniken auf. Eine grobe Übersicht über die Themen Kontinuumsmechanik, Vernetzung, Computergraphik, Animation und GPU-Computing wird nun vorgestellt, die als Basis für diese Entwicklungen dienen.

In der Kontinuumsmechanik wird das mechanische Verhalten von Materialien durch kontinuierliche Funktionen modelliert. Dieses Verhalten kann durch partielle Differentialgleichungen (PDGL) modelliert werden, deren Lösung durch spezielle numerische Verfahren angenähert werden kann. Langtangen [2] beschreibt die Herleitung solcher PDGLn für die Simulation kontinuumsmechanischer Phänomene inklusive Strömungsmechanik. Um die jeweilige PDGL zu lösen (z.B. die Navier-Stokes- oder Euler-Gleichung), wird diese durch eine numerische Methode, wie beispielsweise die Finite Elemente Methode (FEM) oder die Finite Volumen Methode (FVM) approximiert. Für beide Methoden muss die Simulationsdomäne räumlich diskretisiert werden, d.h. in einzelne diskrete Objekte zerlegt werden. Frey und George [3] geben einen hervorragenden Überblick über Netzgenerierungsmethoden und deren Anwendung für numerische Simulationen. Die Kombination von numerischer Analyse, Anwendung von Optimierungsalgorithmen, wissenschaftlicher Visualisierung der Resultate mit den zugehörigen Interaktionsmechanismen ist heutzutage unter dem Namen Computer Aided Engineering (CAE) bekannt. Die Grundzüge solcher CAE Systeme wird in Lee [4] vorgestellt.

Die numerische Strömungsmechanik (computational fluid dynamics – CFD) ist ebenfalls Teil von CAE und behandelt die numerische Approximation von Strömungen verschiedener Fluide (z.B. Gase und Flüssigkeiten). Ferziger and Peric [5] geben eine gute Übersicht über verschiedene Methoden für die numerische Strömungsmechanik. CFD wird häufig eingesetzt, um beispielsweise aerodynamische Kenngrößen von Automobilen oder Flugzeugen zu evaluieren, ohne Modelle bzw. Prototypen bauen zu müssen. Hünecke [6] beschreibt verschiedene Methoden, die im Design von Flugzeugen Anwendung finden, inklusive aerodynamischen Analysen mittels CFD. Die numerische Strömungsmechanik wird jedoch nicht nur im Bereich von industriellen Anwendungen verwendet, auch in der Filmindustrie werden diese Techniken eingesetzt, um physikalisch-basierte Animationen zu erzeugen. Stam [7] entwickelte Methoden für die Animation strömungsmechanischer Effekte mittels CFD. Im Werk von Bridson [8] werden verschiedene für Spiele und Filme geeignete Techniken zusammengefasst, welche die Animation von visuellen Effekten, wie beispielsweise die Animation von Feuer, Rauch oder Wasser ermöglichen.

Einige zeitintensive Berechnungen dieser, die aus den numerischen Methoden hervorgehen, werden zunehmend auf der Graphikkarte ausgeführt, um von der massiven Parallelität und der damit verbundenen Rechenleistung (GPU computing) zu profitieren (siehe Owens [9]). Für diese neuartigen Architekturen müssen spezielle Parallelisierungstechniken für die jeweiligen Algorithmen angewendet werden.

3 Übersicht des Frameworks

Das entwickelte Framework besteht aus den drei Hauptkomponenten Modellierung, Diskretisierung und Simulation, die nun im Folgenden beschrieben werden.

3.1 Modellierung

Das Framework bietet intuitive Modellierungsfunktionalitäten, um interaktiv Geometrie in der Simulationsdomäne zu erzeugen und zu modifizieren. Für die geometrische Repräsentation der zu simulierenden Hindernisse werden geschlossene Kurven verwendet. Linienzüge und uniforme B-Spline Kurven sind die Basis zum skizzenhaften Generieren verschiedener Formen (siehe Abb. 1). Eine Punktmenge kann durch mehrere Mausklicks im User-Interface erzeugt werden und wird dann als Linienzug oder B-Spline interpretiert.

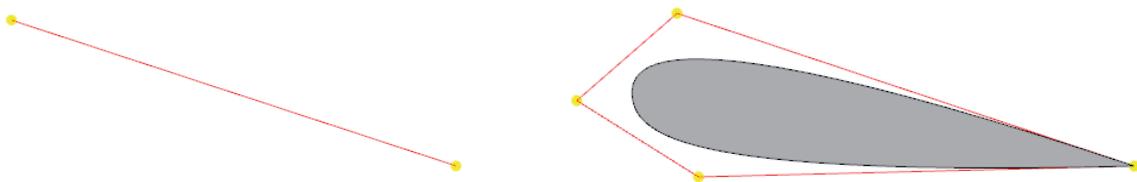


Abb. 1: Die zu simulierende Geometrie – hier eine geschlossene B-Spline Kurve - kann durch wenige Mausklicks erzeugt werden.

Die Geometrie des Objekts kann anschließend modifiziert werden, indem einzelne Punkte selektiert und verschoben werden. Einfache Operationen wie Translation, Skalierung und Rotation des gesamten Objekts können durch Selektion aller Punkte und die Anwendung einer Transformation, wie in Abb. 2 skizziert, erreicht werden. Damit kann die Ausrichtung, Größe und Position des Bauteils interaktiv manipuliert werden. Durch die Modifikation einer Teilmenge der Punkte kann die Geometrie lokal geändert werden.

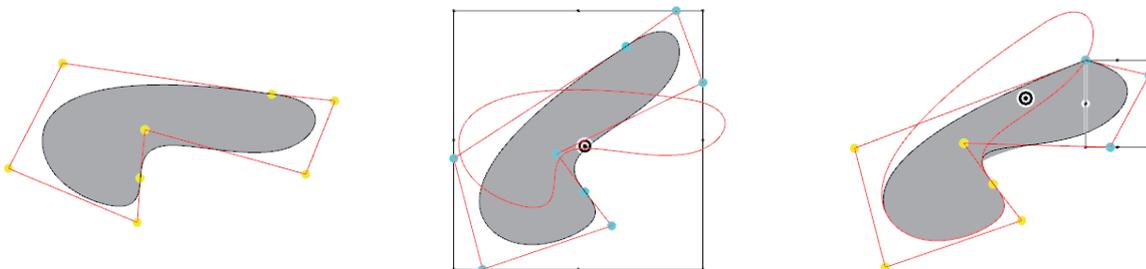


Abb. 2: Modifikation einer skizzierten Geometrie. Die originale Geometrie (links) wird zunächst rotiert (Mitte) und anschließend lokal modifiziert.

3.2 Diskretisierung

Um eine Strömungssimulation mit der modellierten Geometrie durchzuführen, muss diese zunächst vernetzt bzw. diskretisiert werden. Eine einfache Möglichkeit eine Diskretisierung zu bestimmen ergibt sich durch die Schnittberechnung zwischen den von den Kurven eingeschlossenen Gebieten und dem gewählten Berechnungsnetz. Um eine höchstmögliche Effizienz und damit eine hohe Simulationsgeschwindigkeit zu erreichen, wird eine Datenstruktur verwendet, die für Graphikhardware besonders gut geeignet ist. In diesem Fall ist das ein strukturiertes, orthogonales Gitter mit äquidistanten Zellabständen, ähnlich zu einem Bild, das aus Pixeln statt Zellen besteht. Die Diskretisierung wird bestimmt, indem für jede einzelne Zelle geprüft wird, ob diese sich innerhalb oder außerhalb der geschlossenen Kurve befindet. Das resultierende Simulationsnetz könnte dann beispielsweise wie in Abb. 3 skizziert aussehen. Eine Simulation mit einem solchen Netz würde jedoch Treppeffekte hervorrufen, da die Geometrie nur durch Vierecke repräsentiert wird. Daher würde die resultierende Strömung in der Nähe der Geometrie höchst ungenau sein, wie von Batty [11] beschrieben.

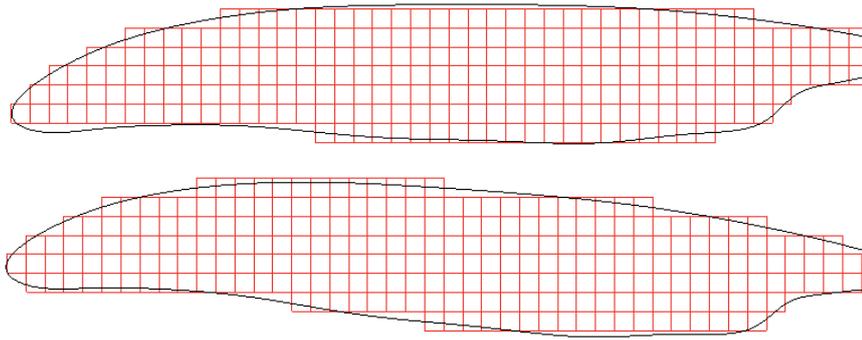


Abb. 3: Diskretisierung mit einem strukturierten, orthogonalen Gitter eines Flügelprofils mit einem Neigungswinkel von 0° (oben) und 10° (unten).

Zur Analyse von Trends und Tendenzen muss eine solche Simulation jedoch die relevanten geometrischen Details erfassen können. Daher wird eine modifizierte Diskretisierung angewendet, die zusätzlich teilgefüllte Zellen erlaubt (siehe Ting Ng [12]). Damit wird Geometrie, die nicht direkt am Gitter ausgerichtet ist, konsistenter diskretisiert. Dafür wird der Schnitt zwischen Kurve und Simulationsnetz exakt bestimmt und die jeweiligen Zellen angepasst. In Abb. 4 sieht man die modifizierte Diskretisierung, bei der Schnittstellen zweier Zellen zu einem bestimmten Teil durchlässig sein können anstatt nur komplett durchlässig oder undurchlässig. Mit der so modifizierten Diskretisierung lässt sich eine Finite Volumen Methode realisieren (siehe Ting Ng[12]).

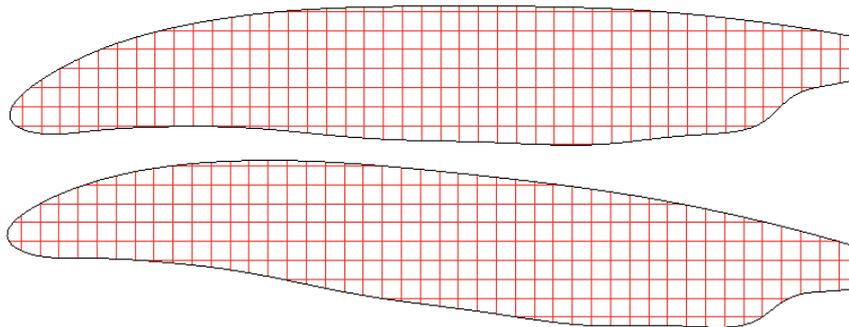


Abb. 4: Angepasste Diskretisierung mit teilgefüllten Zellen eines Flügelprofils mit einem Neigungswinkel von 0° (oben) und 10° (unten).

3.3 Simulation

Rapid CFD ermöglicht die Exploration von verschiedenen geometrischen Designvarianten und deren Auswirkung auf strömungsmechanische Eigenschaften. Um optimale Performanz zu erreichen, werden aktuelle GPUs verwendet, da deren theoretische Rechenleistung die Leistung von konventionellen Prozessoren deutlich übertrifft. Mit geeigneten Programmiersprachen ist es heutzutage möglich, die Graphikkarte zu beliebigen Rechnungen (GPGPU - general purpose GPU) zu verwenden anstatt nur zur Bildsynthese. Für spezielle Problemstellungen kann die Alternative, auf der GPU zu rechnen, zu deutlichen Geschwindigkeitssteigerungen führen (siehe Owens [9]). Durch die Multicore Architektur können Millionen leichtgewichtiger nebenläufiger Threads gestartet werden, die bei geeigneter Parallelisierung beispielsweise Simulationen in Echtzeit ermöglichen.

Die Basis für unsere Strömungssimulation bilden die inkompressiblen Euler-Gleichungen, die aus den inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen entstehen, wenn man ein reibungsfreies Medium voraussetzt.

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \rho \vec{f}$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

Zusätzlich zu diesen partiellen Differentialgleichungen müssen adäquate Randbedingungen spezifiziert werden. Hier ist ρ die (konstante) Dichte, \vec{u} das Geschwindigkeitsfeld, p ist der Druck und \vec{f} sind externe Kräfte. Die Repräsentation der Geschwindigkeitskomponenten befindet sich an einem ortsfesten Gitter, an den Schnittstellen der Zellen. Die Gleichungen werden nach Stam [7] mit einer sogenannten *Fractional Step Method* approximiert. Dazu werden die Gleichungen zerlegt und alle Operatoren getrennt voneinander berechnet. Zuletzt wird ein Projektionsschritt durchgeführt, der den Druckgradient und die Kontinuitätsgleichung mittels einer Finiten Volumen Methode kombiniert, um ein divergenzfreies Geschwindigkeitsfeld zu erhalten. Die einzelnen Operatoren, die die Kraft \vec{f} , die Advektion $\vec{u} \cdot \nabla \vec{u}$ und die Druckkorrektur berechnen, sind massiv parallelisiert und optimiert für die GPU. Das führt zu einer hohen Effizienz und damit zu einem optimalen Verhältnis zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Berechnungen mit dem Framework Rapid CFD mit anderen Tools verglichen und die Fähigkeit des Tools zur Exploration verschiedener Design-Variationen demonstriert.

4.1 Vergleich der Simulationsergebnisse

Als erster Testfall wurde die Umströmung eines Zylinders in einer zweidimensionalen Simulationsdomäne gewählt und die generierten Ergebnisse mit OpenFOAM [13] verglichen. Das gewählte Simulationsgebiet ist quadratisch mit einem zylindrischen Objekt in der Mitte (siehe Abb. 5). Am Inlet (linken Seite) wurde eine konstante Geschwindigkeit als Randbedingung vorgegeben. Für den Druck wurden homogene Neumann Randbedingungen am Rand des Simulationsgebiets und an den Hindernissen vorgegeben.

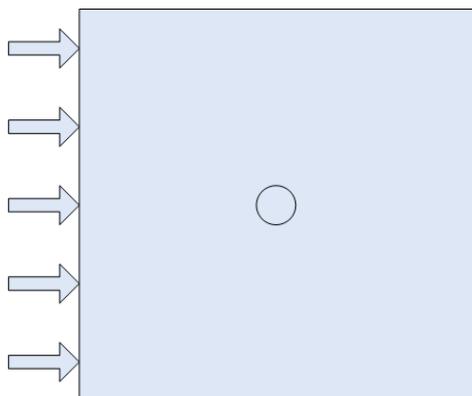


Abb. 5: Schematische Repräsentation des Simulationsgebietes für den Vergleich mit OpenFOAM.

In OpenFOAM wird ein einfacher stationären Löser *simpleFOAM* verwendet, um die Hauptcharakteristiken des Strömungs- und des Druckverlaufs zu bestimmen. Da in OpenFOAM kein Löser für reibungsfreie Fluide existiert, wird eine sehr niedrige Viskosität verwendet. Abb. 6 zeigt einen visuellen Vergleich der Simulation zwischen Rapid CFD (links) und OpenFOAM (rechts). Die Druckfelder beider Simulationen zeigen eine gleiche Verteilung.

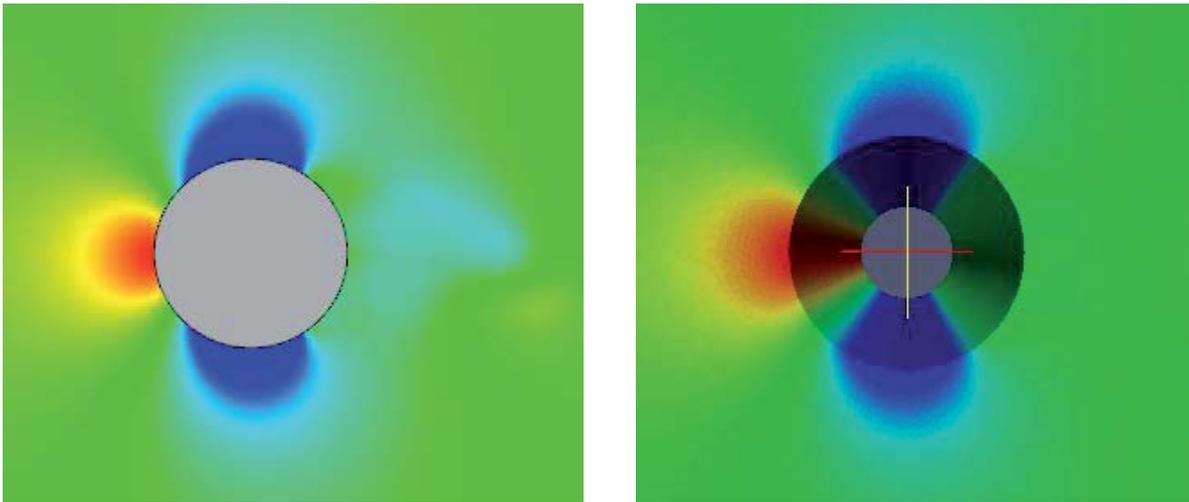


Abb. 6: Visueller Vergleich der berechneten Druckfelder mit Rapid CFD (links) und OpenFOAM (rechts).

4.2 Modellierung von Geometrie

Die folgenden Szenarien demonstrieren die Möglichkeiten von Rapid CFD verschiedene Geometrie zu erzeugen, zu modifizieren und mehrere Objekte gleichzeitig zu simulieren. Abb. 7 zeigt die Simulation des Zylinders aus Abb. 6 bei identischen Randbedingungen, der durch Manipulation der Kontrollpunkte verformt wurde.

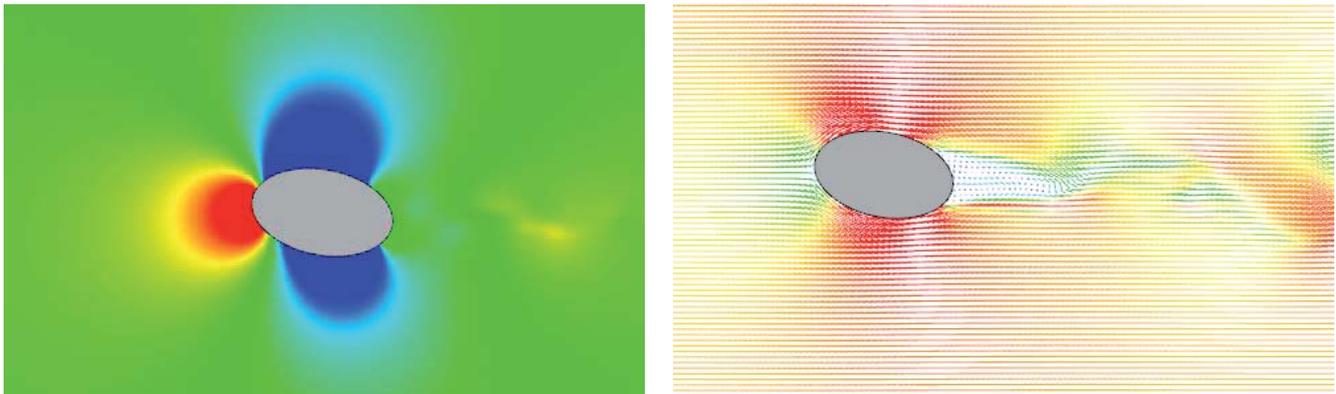


Abb. 7: Visualisierung des Druckfeldes (links) und Vektoren des Geschwindigkeitsfeldes (rechts) des modifizierten Zylinders.

Weiterhin kann das Tool verschiedene Geometrien erzeugen und modellieren (siehe Abb. 8). Zusätzlich zum deformierten Zylinder wurden einige neue Geometrien bei laufender Simulation in das Simulationsgebiet eingefügt. Durch den automatisierten und schnellen Diskretisierungsprozess können die veränderten Randbedingungen direkt in die laufende Simulation integriert werden.

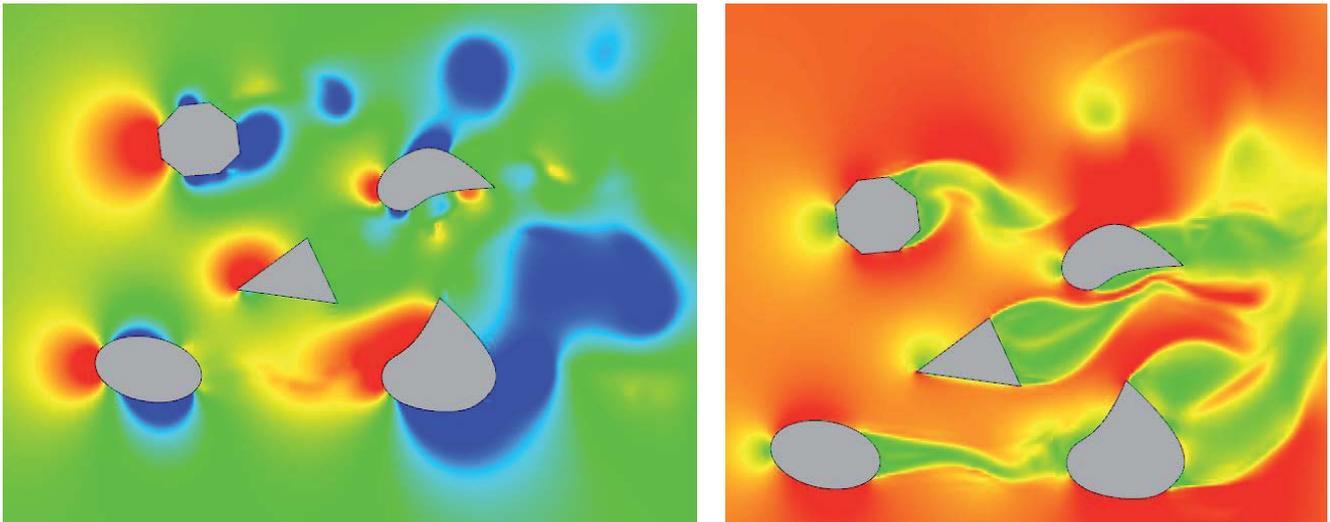


Abb. 8: Simulation von mehreren verschiedenen Geometrien mit Druckfeld (links) und Absolutbetrag der Geschwindigkeit (rechts)

4.3 Geometrimanipulation

Im folgenden Beispiel wird die Möglichkeit der Trend- und Tendenzanalyse demonstriert. Abb. 9 zeigt verschiedene Momentaufnahmen einer Simulation, in der die Geometrie interaktiv modifiziert wird. Die Simulationsergebnisse sind direkt verfügbar auch während des Manipulationsvorgangs. Das linke Bild von Abb. 9 zeigt das Startscenario inklusive der Selektion der zu manipulierenden B-Spline Kontrollpunkte, die anschließend im mittleren Bild verschoben werden und zu einer veränderten Geometrie und Strömung im linken Bild führen. Das Besondere in diesem Szenario ist das direkte Feedback, d.h. die Simulationsergebnisse werden direkt angezeigt und sind während der Manipulation verfügbar. Dies ermöglicht eine schnelle Exploration der Designvariationen, in der in kürzester Zeit viele verschiedene Formen in Echtzeit ausprobiert werden können, um Trends für eine vielversprechende Konfiguration zu erarbeiten.

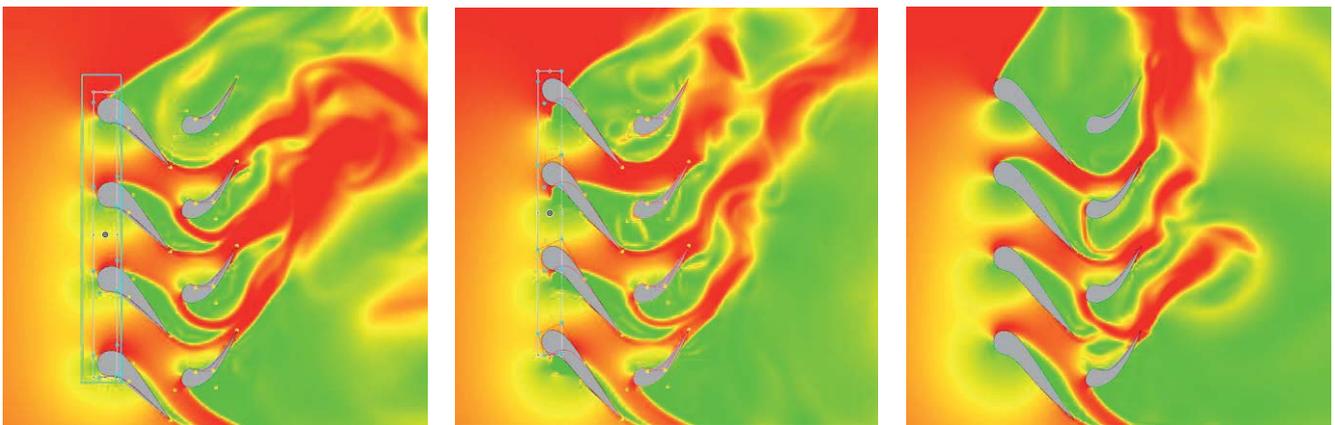


Abb. 9: Rapid CFD für die Analyse von Trends und Tendenzen durch Geometriemanipulation.

4.4 Zeitlich veränderliche Randbedingung durch bewegende Hindernisse

Die schnelle Berechnung und Diskretisierung ermöglicht noch weitere Szenarien, wie beispielsweise die Simulation von sich bewegenden Hindernissen. Im folgenden Beispiel wurde skizzenhaft die Bewegung einer vertikalen Windkraftanlage simuliert, in der verschiedene Flügelprofile sich um ein ausgewähltes Zentrum drehen. Die schnelle Diskretisierung ermöglicht dann die Simulation der bewegenden Schaufeln in Echtzeit. Abb. 10 zeigt drei Schnappschüsse zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation.

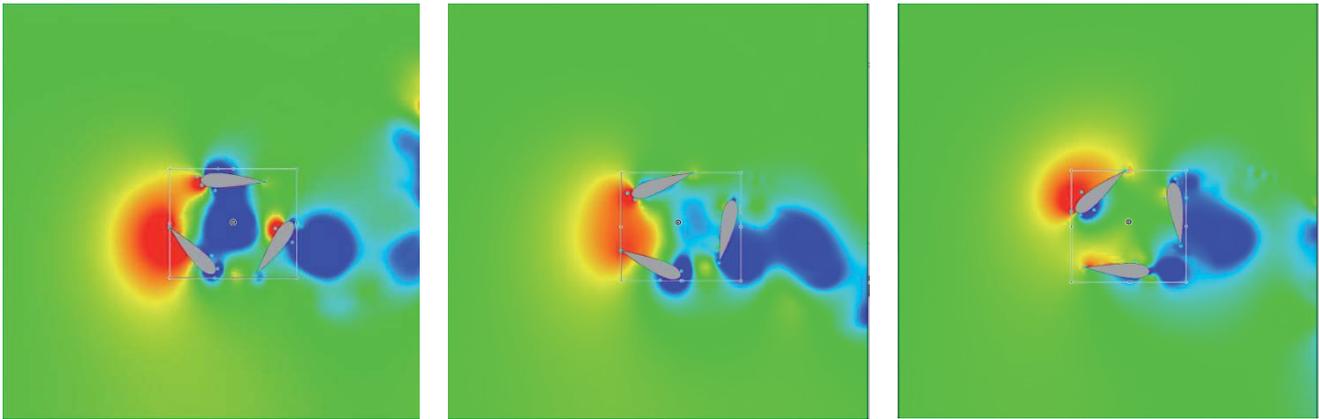


Abb. 10: Simulation einer sich drehenden vertikalen Windkraftanlage.

4.5 Auswertung von aerodynamischen Kenngrößen

In diesem Teil wird die Berechnung der dimensionslosen Druckverteilung (coefficient of pressure - C_p) für zwei Flugzeugflügel vorgestellt. Dafür wird die Umströmung der Profile NACA0010 (Abb. 11) und NACA5420 (Abb. 12) simuliert und der C_p -Verlauf an den Geometriegrenzen für einen Angriffswinkel von 0° und 4° bestimmt. Die Ergebnisse werden mit JavaFoil [14] verglichen, einem Tool, das zur Auswertung von aerodynamischen Kenngrößen von Flügelprofilen verwendet werden kann. Im Gegensatz zu Rapid CFD wird in JavaFoil eine rotationsfreie, stationäre Potentialströmung angenommen. Die folgenden Bilder zeigen die Druckverteilung beider mit Rapid CFD simulierten Flügelprofile.

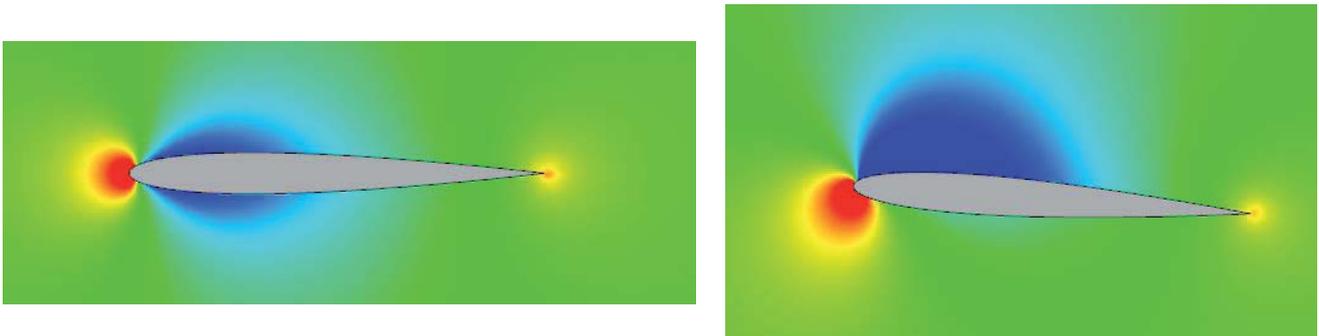


Abb. 11: Druckverteilung für ein NACA 0010 Flügelprofil bei einem Anstellwinkel von 0° (links) und 4° (rechts)

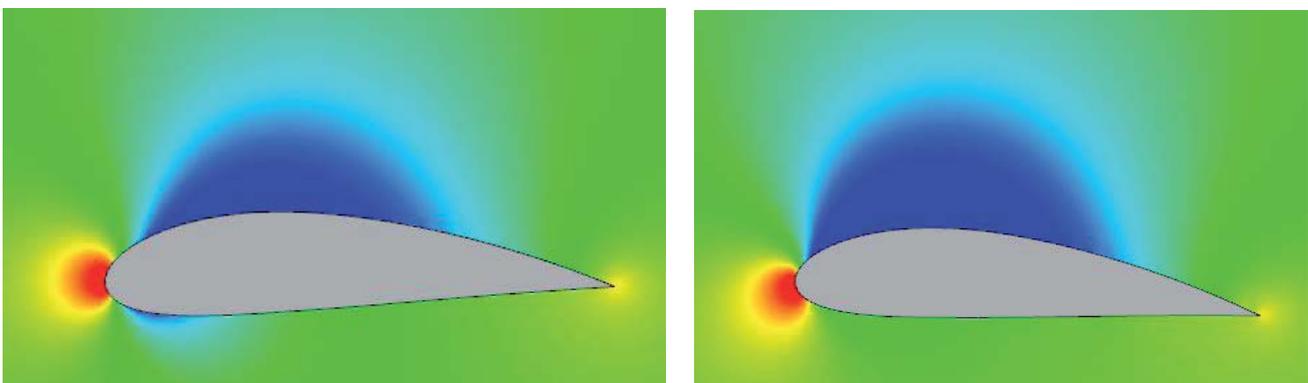


Abb. 12: Druckverteilung für ein NACA 5420 Flügelprofil bei einem Anstellwinkel von 0° (links) und 4° (rechts)

Abb. 13 und 14 zeigen die dimensionslosen Druckverteilungsdiagramme für beide Tools und beide Flügelprofile. Die generierten Diagramme zeigen eine ähnliche Verteilung. Die C_p -Druckverteilung wird direkt an der Flügelgeometrie ausgewertet. Alle Diagramme stellen die Verteilung invertiert dar, d.h. negative Drücke werden auf der positiven y-Achse aufgetragen.

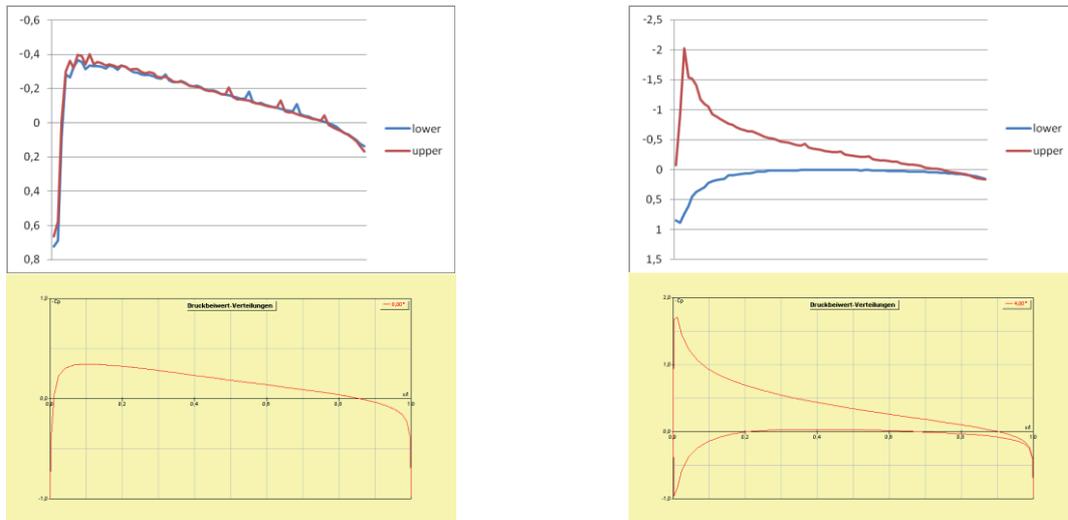


Abb. 13: C_p -Druckverteilungen für das NACA 0010 Flügelprofil mit einem Anstellwinkel von 0° (linke Spalte) und 4° (rechte Spalte). Die oberen Diagramme wurden mit Rapid CFD, die unteren mit JavaFoil generiert.

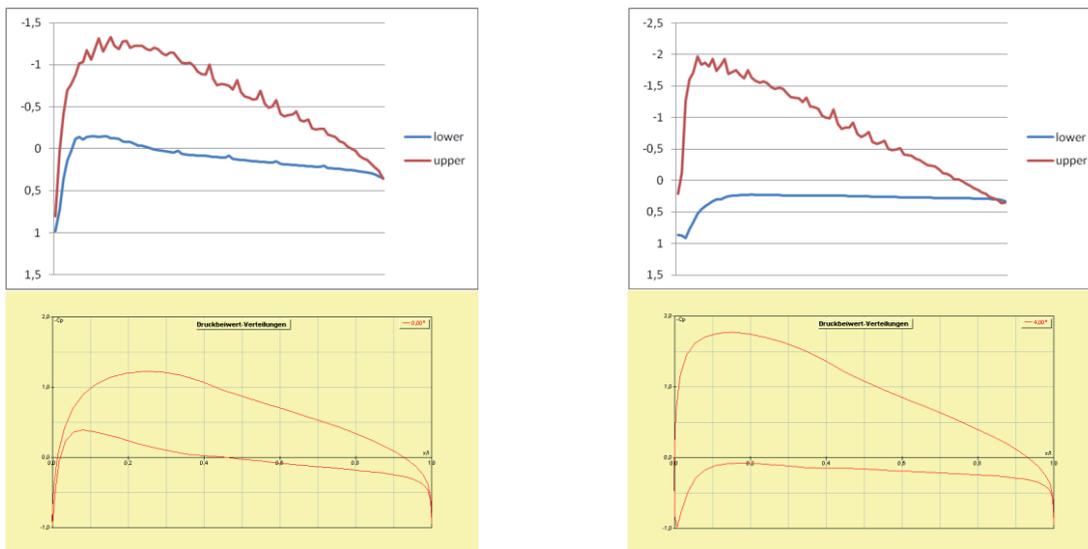


Abb. 14: C_p -Druckverteilungen für das NACA 5420 Flügelprofil mit einem Anstellwinkel von 0° (linke Spalte) und 4° (rechte Spalte). Die oberen Diagramme wurden mit Rapid CFD, die unteren mit JavaFoil generiert.

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Framework für die Exploration von Designvariationen und der Analyse von Trends und Tendenzen in einer konzeptionellen Design-Phase vorgestellt. Das Framework zielt darauf ab, frühzeitig einen voroptimierten Designentwurf zu erzeugen und damit den zeitaufwändigen Prozess »Modifikation, Vernetzung, Simulation und Analyse« zu entlasten. Die entwickelten Komponenten und deren Integration wurden vorgestellt und existierende Arbeiten eingeordnet. Die Ergebnisse demonstrieren die Fähigkeiten des Frameworks zur interaktiven Modifikation mit gleichzeitiger Simulation. Weiterhin wurden die generierten Simulationsergebnisse mit anderen Tools verglichen und eine Analyse der Druckverteilung an Flügelprofilen vorgestellt. Damit ist es möglich, verschiedene Profile bezüglich aerodynamischer Größen zu testen und zu analysieren.

Zukünftig wird das Framework Rapid CFD durch die Integration neuer Funktionalitäten, wie die automatische Berechnung von aerodynamischen Kräften weiterentwickelt. Außerdem ist geplant, mechatronische Systeme zu integrieren, um beispielsweise ausführende Flügelklappen zu simulieren. Die Erweiterung des Codes auf drei Dimensionen ist ebenfalls angestrebt.

Der Einsatz von Rapid CFD für die frühe konzeptionelle Designphase kann einen Mehrwert im Entwicklungsprozess darstellen, indem durch die Modifikation von Geometrie und den physikalischen Randbedingungen mit einem schnellen visuellen Feedback frühzeitig viele verschiedene Konfigurationen ausprobiert werden können.

6 Literatur

- [1] Pahl G. and Beitz W. Engineering Design: A Systematic Approach, 2nd edition. Springer Verlag, United Kingdom, 1996.
- [2] Hans Petter Langtangen. Computational Partial Differential Equations, second edition. Springer Verlag, Germany, 2003
- [3] Pascal Jean Frey and Paul-Louis George. Mesh Generation. Hermes Science Publishing, United Kingdom, 2000.
- [4] Kunwoo Lee. Principles of CAD / CAM / CAE Systems. Addison Wesley Longman, Inc. USA, 1999.
- [5] Joel H. Ferziger and Milovan Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, third edition. Springer Verlag, 2002
- [6] Klaus Hünecke. Die Technik des modernen Verkehrsflugzeuges. Motorbuch Verlag. Germany 2008.
- [7] Jos Stam. 1999. Stable fluids. In Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '99). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY.
- [8] Robert Bridson, Ronald Fedkiw and Matthias Müller-Fischer. Fluid Simulation. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006 Course Notes. ACM, New York, NY, USA
- [9] Owens, J. D., Luebke, D., Govindaraju, N., Harris, M., Krüger, J., Lefohn, A. E., & Purcell, T. J. (2007). A Survey of General-Purpose Computation on Graphics Hardware. Computer Graphics Forum, 26(1), 80-113.
- [10] Garland, M., Le Grand, S., Nickolls, J., Anderson, J., Hardwick, J., Morton, S., Phillips, E., Zhang, Y., Volkov, V. 2008. Parallel Computing Experiences with CUDA. IEEE Micro, 28,4 P.13-27.
- [11] Christopher Batty, Florence Bertails, and Robert Bridson. 2007. A fast variational framework for accurate solid-fluid coupling. In ACM SIGGRAPH 2007 papers (SIGGRAPH '07). ACM, New York, NY, USA
- [12] Yen Ting Ng, Chohong Min, Frederic Gibou, An efficient fluid-solid coupling algorithm for single-phase flows, Journal of Computational Physics, Volume 228, Issue 23, 10 December 2009.
- [13] OpenFOAM: the open source CFD toolbox <http://www.openfoam.com>. Version 1.7.1. Last accessed on March 18th, 2011.
- [14] JavaFoil: Analysis of Airfoils <http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm>. Last accessed on March 18th, 2011.

Optimierung einer Sandungsanlage für Straßenbahnen mithilfe numerischer Simulation der Sand-Luft-Zweiphasenströmung

S. Möller, D. Langmayr (Kompetenzzentrum Das virtuelle Fahrzeug);

G. Brenn (TU Graz, Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung (ISW));

P. Krieg (Knorr-Bremse GmbH)

Bei Straßenbahnen werden Sandungssysteme eingesetzt, um ein Gleiten des Fahrzeugs beim Bremsen oder Beschleunigen durch schlechten Reibkontakt zwischen Rad und Schiene zu verhindern. Die Menge des hierbei eingesetzten Sandes soll möglichst gering sein, um eine unnötige Entstehung von Feinstaub im Straßenverkehr zu vermeiden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollte die Ausbringung des Sandstrahls derart verbessert werden, dass der Sand zu einem möglichst großen Anteil in den Bereich zwischen Rad und Schiene gelangt. Hierzu wurde mithilfe der Software Fluent ein numerisches Simulationsmodell entwickelt, das es erlaubt, die Strömung des Gemisches aus Sand und Luft sowohl im Schlauch als auch außerhalb der Sandungsanlage zu simulieren. Um die benötigten Randbedingungen zur Berechnung der Strömung am Unterboden der Bahn zu erhalten, wurden Strömungsmessungen an einer realen Straßenbahn durchgeführt und mit Ergebnissen von Simulationsrechnungen zur Umströmung der Bahn abgeglichen.

Die Modellierung des Abprallverhaltens der Sandkörner an festen Wänden spielt für eine genaue Abbildung der Realität eine besonders wichtige Rolle. Hierfür wurde ein stochastisches Teilmodell implementiert, dessen Parameter mithilfe eigens durchgeführter Laborversuche abgestimmt wurden.

Eine Reihe von Simulationsrechnungen führte schließlich zu einer Optimierung der Geometrie des Endstücks am Austritt der Sandungsanlage und einem stärker fokussierten Sandstrahl.

1 Einführung

Ein schlechter Gleiszustand, der durch Verschmutzung oder einen Eisbelag entstehen kann, verursacht bei allen Arten von Eisenbahnen Schwierigkeiten beim Beschleunigen oder Abbremsen. Seit langer Zeit werden Sandungsanlagen eingesetzt, um in solchen Fällen den Reibwert zwischen Rad und Schiene zu verbessern. Sandungsanlagen nutzen meist das Prinzip des pneumatischen Transports, um den Sand dosiert auf die Schiene aufzubringen, wo er vom Rad zermahlen wird. Der Betrieb von Sandungsanlagen muss sehr effektiv, zuverlässig und kosteneffizient sein. Dies führt zu verschiedenen Herausforderungen bei Entwurf und Konstruktion solcher Systeme. Beispiele hierfür sind die Trockenhaltung und das präzise Dosieren des Sandes.

Die Hauptkomponenten einer Sandungsanlage, wie sie hier untersucht wird, sind in Abb. 1 dargestellt. Es gibt einen Sandbehälter, aus dem der Sand mittels einer pneumatischen Vorrichtung in den Sandschlauch befördert wird. Hier bildet sich eine Zweiphasenströmung aus Sand und Luft aus, die den Sand in den Radbereich transportiert.

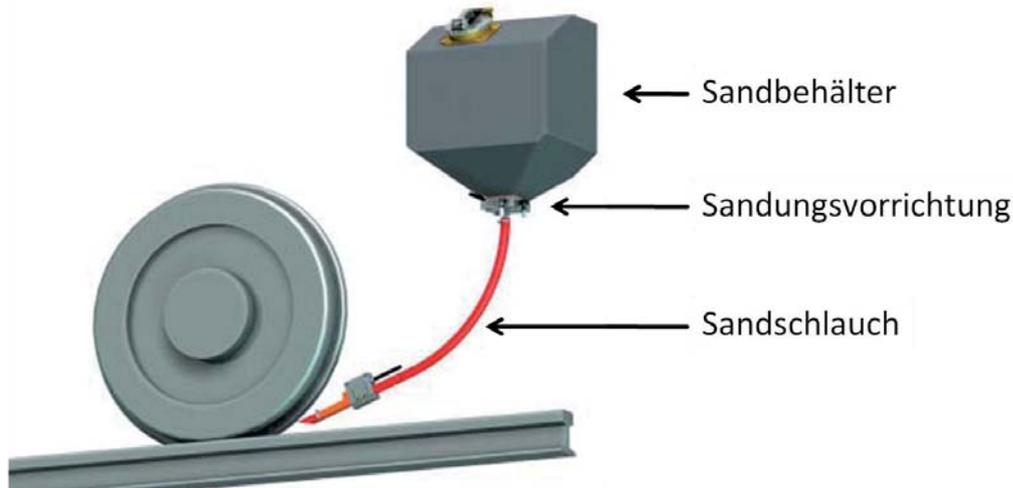


Abb. 1: Komponenten einer Sandungsanlage

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf den pneumatischen Transport des Sandes durch den Schlauch und das Ausbringen in den Kontaktbereich zwischen Rad und Schiene. Der Betrieb des Vorratsbehälters, der Mechanismus zur Dosierung des Sandes und anderer Teile wird hier nicht untersucht.

Im ersten Schritt wird ein Simulationsmodell für die Gas-Feststoffströmung entwickelt und mithilfe von Messwerten validiert. Das Simulationsmodell wird anschließend für die Optimierung der Geometrie des Sandschlauchendstücks verwendet. Die daraus resultierenden Geometrieansätze werden abschließend in Simulationen unter Berücksichtigung der realen Geometrie der Straßenbahn und dem Einfluss der Umgebungsströmung getestet.

2 Theoretische Grundlagen

Der pneumatische Transport von Sand durch einen Gummischlauch und die Ausbildung eines Sandstrahls außerhalb der Sandungsanlage sind spezielle Anwendungen von dispersen Zweiphasenströmungen. Zusätzlich zur Strömung der Gasphase müssen hier die Bewegung der dispersen Partikel und die Wechselwirkungen zwischen den Phasen modelliert werden. Die entsprechenden Modelle werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Neben Genauigkeit der Simulationsergebnisse, ist der erforderliche Rechenaufwand ein wichtiges Kriterium für die Wahl von Teilmodellen. Deshalb konzentriert sich diese Untersuchung auf die dominierenden physikalischen Effekte und Randbedingungen.

2.1 Gasphase

Aufgrund der geschätzten maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s und nahezu konstanten Temperaturen im Bereich von 283.15K liegen bei den betrachteten Strömungen niedrige Machzahlen vor. Daher wird hier von inkompressiblen Verhältnissen mit homogener Dichteverteilung ausgegangen. Die Grundgleichungen für das vorliegende Problem sind die Navier-Stokes-Gleichungen in folgender Form [1]

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}\vec{u}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p,$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0.$$

Hier ist \vec{u} der Geschwindigkeitsvektor und ν die kinematische Viskosität des Fluids. Der Druck und die Massendichte sind p bzw. ρ .

Mit Ausnahme der Umströmung der Straßenbahn, die in einem späteren Abschnitt beschrieben wird, werden die vorliegenden Strömungen als instationär behandelt.

In den Simulationen, wird der URANS-Ansatz angewendet. Hierbei wird das realizable-k-epsilon Turbulenzmodell mit dem "advanced wall-function"-Ansatz kombiniert, der in der Software Ansys Fluent implementiert ist.

2.2 Verdünnte Partikelströmung

Zur Modellierung der dispersen Phase, stehen in Ansys Fluent verschiedene Teilmodelle zur Verfügung. Ihre Anwendbarkeit hängt sowohl von Charakteristiken der Partikel und ihrer Verteilung als auch von Charakteristiken der Trägerströmung ab.

Die Sandpartikel im vorliegenden Problem sind grundlegend dadurch gekennzeichnet, dass es keinen thermischen oder chemischen Austausch zwischen ihnen und ihrer Umgebung gibt. Die wichtigsten Aspekte in ihrer Modellierung sind daher die variierende Form und Größe der Partikel. Das Verhältnis der materialdichten von Luft und Sand (Silicium) ist sehr klein. Deshalb ist eine große Massenbeladung verbunden mit einem geringen Volumenanteil typisch für die vorliegende Strömung. Der Volumenanteil der Partikel α_d ist definiert als Verhältnis des Volumens der Partikel zum Volumen des betrachteten Teils des simulierten Bereiches in dem sich die Partikel aufhalten. Betrachtet man das Innere des Sandschlauchs, lässt sich der maximale Volumenanteil der Partikel mit $\alpha_d \approx 0.03$ abschätzen. Da dies unterhalb einer Grenze von 10-12% liegt, kann die Partikel-Phase bezüglich der Wirkung ihrer Volumenverdrängung auf die Gasphase als „verdünnt“ charakterisiert werden [2]. Die Massenbeladung Z ist als das Verhältnis der Massenströme der Partikel und des Trägerfluids definiert [3]. Da im vorliegenden Fall mit $Z \approx 30$ ein hoher Wert vorliegt, kann die Wirkung der Partikel auf die Gasphase nicht vernachlässigt werden und eine geeignete Kopplung zwischen den Phasen muss modelliert werden.

In Ansys Fluent sind zur Simulation der Partikel insbesondere das Eulersche und das Lagrangesche Teilmodell geeignet. Beim Euler-Ansatz werden die Partikel als Fluid modelliert, das mit dem Trägerfluid vermischt ist. Dieser Ansatz ist speziell für die Simulation sehr kleiner Partikel empfehlenswert, die recht gleichmäßig verteilt vorliegen, was für den vorliegenden Fall nicht zutrifft. Der größte Nachteil dieses Modells ist der Rechenaufwand, der aus der Notwendigkeit resultiert, einen vollständigen Satz der Erhaltungsgleichungen für jede Klasse von Partikelgrößen zu lösen, die modelliert werden soll.

Im Lagrangeschen Ansatz werden die Partikel in einzelnen Teilchenpaketen modelliert, die jeweils eine bestimmte Anzahl von Partikeln ähnlicher Eigenschaften enthalten. Die Bewegung dieser Teilchenpakete wird individuell mithilfe des Kräftegleichgewichts berechnet. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Arten von Kräften die auf die Partikel wirken, lautet die entsprechende Bewegungsgleichung

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_f + \vec{F}_c + \vec{F}_V.$$

Die Masse und die Geschwindigkeit der Partikel sind hier m bzw. \vec{v} . Die Größe \vec{F}_V ist die Summe der Volumenkräfte, welche hier äquivalent der Gravitation ist. Die Größe \vec{F}_c repräsentiert die Kontaktkräfte aus den Stößen der Partikel mit der Wand oder untereinander. Dies wird in Abschnitt 2.3 näher beschrieben. Die Fluidkraft \vec{F}_f ist, entsprechend der Gleichung

$$\vec{F}_f = \vec{F}_d + \vec{F}_l$$

aus dem Umströmungswiderstand \vec{F}_d und dem Auftrieb \vec{F}_l zusammengesetzt,.

Der Auftrieb, der hauptsächlich durch die Magnus-Kraft und die Saffman-Kraft bestimmt ist, wird vernachlässigt, da die Rotation der Partikel wegen des großen Aufwands hier nicht simuliert wird. Außerdem bestehen bei der Berechnung der Rotationskräfte Unsicherheiten, die ihre Ursache in der Asphärizität der Partikel haben.

Der Umströmungswiderstand wird mit dem Modell von Haider und Levenspiel [4] dargestellt, in dem der Widerstandskoeffizient C_d in Abhängigkeit von der Partikel-Reynoldszahl Re_p und einer dimensionslosen

Kennzahl ϕ berechnet wird, welche den Grad der Asphärizität der Partikel beschreibt. Dieser Parameter ϕ ist als das Verhältnis der Oberfläche einer Vergleichskugel mit gleichem Volumen und der tatsächlichen Oberfläche eines Partikels definiert. Die Partikel-Reynoldszahl Re_p ist definiert als $Re_p = \frac{D}{\nu} |\vec{v}_F - \vec{v}_P|$, mit der Fluidgeschwindigkeit \vec{v}_F , der Partikelgeschwindigkeit \vec{v}_P und dem Durchmesser der Vergleichskugel D . Die Größe ν ist die kinematische Viskosität des Trägerfluids. In Abb. 2 ist der Verlauf des Widerstandsbeiwerts für drei unterschiedliche Werte von ϕ dargestellt.

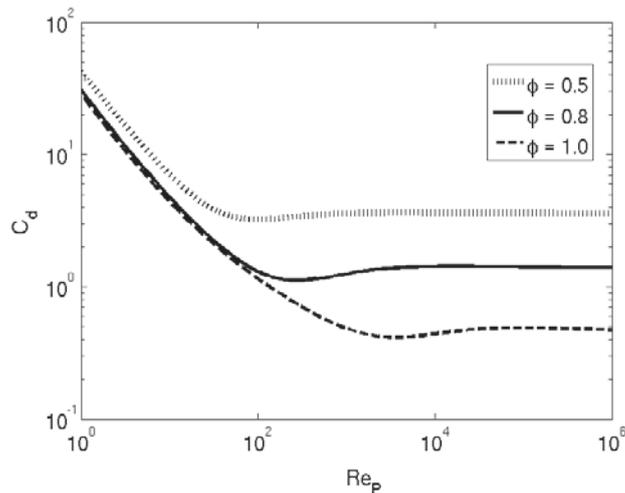


Abb. 2: Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Partikel-Reynoldszahl für verschiedene Asphärizitäten, nach Haider-Levenspiel [4]

Mit dem Widerstandsbeiwert C_d berechnet sich der Umströmungswiderstand als

$$\vec{F}_d = \frac{18 C_d}{24 D} |\vec{v}_F - \vec{v}_P|.$$

2.3 Partikelkollisionen

Die Kollisionskraft \vec{F}_c resultiert aus zwei verschiedenen Arten von Kollisionen, die im vorliegenden Fall auftreten: die Partikel-Partikel-Kollisionen und die Partikel-Wand Kollisionen. Die Bedeutung der Partikel-Partikel-Kollisionen hängt von der Häufigkeit ihres Auftretens ab, die mithilfe des Volumenanteils der Partikel und einem durchschnittlichen Partikeldurchmesser abgeschätzt werden kann. Weiterhin spielen auch die Relativgeschwindigkeiten der Partikel zueinander eine wichtige Rolle.

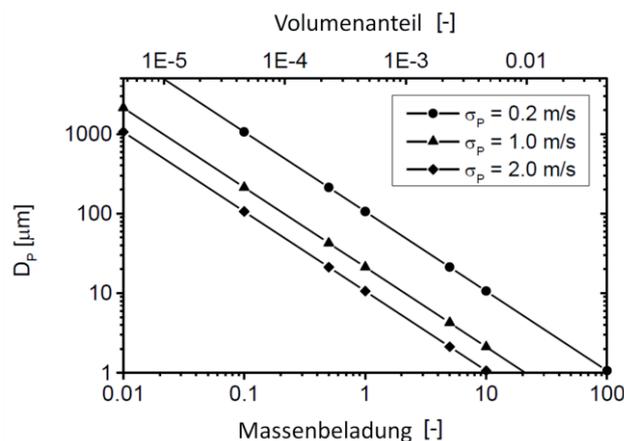


Abb. 3: Unterscheidung zwischen verdünnter und dichter partikelbeladener Strömung [5]

In Abb. 3, ist ein Diagramm gegeben, das auf der Basis der mittleren freien Weglänge der Partikel die Wichtigkeit der Partikel-Partikel-Stöße einzuschätzen hilft. Hier definiert die Fläche über den Linien den Bereich der "dichten" Partikelströmungen, bezogen auf diese Art der Stöße. Die Linien sind für verschiedene Fluktuationsgeschwindigkeiten σ_p dargestellt, welche für den vorliegenden Fall mit $\sigma_p = 0.2 \text{ m/s}$ abgeschätzt werden kann. Mit dem oben erwähnten typischen Wert für die Massenbeladung und einem Partikeldurchmesser von $D_p \approx 1 \text{ mm}$, würde die Strömung als "dichte" Strömung klassifiziert und Partikel-Partikel-Kollisionen sollten nicht vernachlässigt werden. In diesem speziellen Fall wurde jedoch festgestellt, dass solche Stöße weit weniger bedeutend für das Simulationsergebnis sind als die Partikel-Wand-Stöße, da diese deutlich häufiger auftreten. Dies gilt sowohl für den Gummischlauch, wo die freie Weglänge zwischen Wandstößen generell kurz ist, als auch außerhalb des Schlauches, wo der Volumenanteil der Partikel sukzessive abnimmt und ihre Bewegung durch Kollisionen mit Rad und Schiene bestimmt wird.

So konzentrierte sich die Modellierung auf das Wandabprall-Verhalten der Partikel. Da hier der größte Teil des Energieverlustes aufgrund von Reibung und nichtelastischen Deformationen stattfindet. Diese Kollisionen sind bezüglich des Abprallwinkels und der Abprallgeschwindigkeit irregulär (Abb. 4).

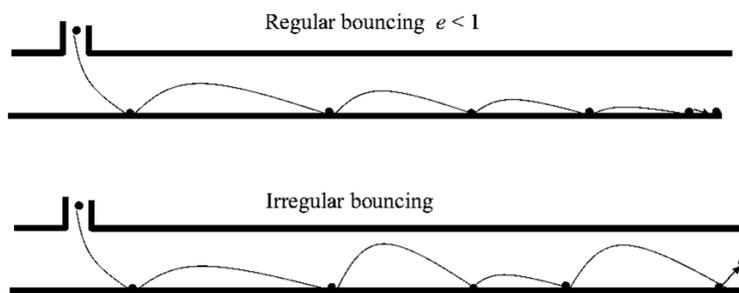


Abb. 4: Vergleich zwischen regulärem und irregulärem Wandabprall, aus [6]

Dies wird einerseits durch die Wandrauigkeit und andererseits durch die Asphärizität der Partikel kombiniert mit ihrer Rotation verursacht. Beide Phänomene zeigen ähnliche Effekte, die sich in einer stochastischen Streuung der Abprallwinkel und -geschwindigkeit zeigen, was zu einer stärkeren Dispersion der Partikel über den Strömungsquerschnitt und einem größeren Druckverlust über die Schlauchlänge führt. Hier findet der sogenannte "shadow effect" statt, der im Detail z.B. in [7] beschrieben ist. Für kleine Aufprallwinkel führt dieser Effekt im Mittel zu signifikant höheren Abprallwinkeln, was auf der rechten Seite von Abb. 5 illustriert ist.

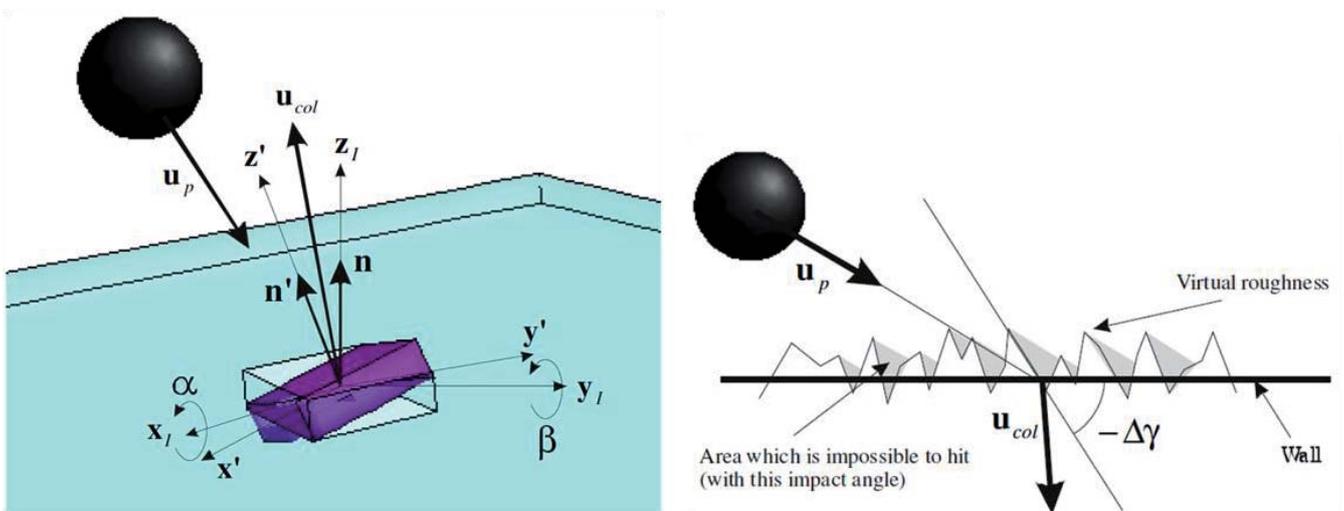


Abb. 5: "Virtual-wall model" und "shadow-effect", aus [8]

Die Geschwindigkeitsänderung während des Wandabpralls wird mithilfe des sogenannten "virtual-wall model" berechnet, das von Tsuji eingeführt wurde, und im Detail z.B. in [9] beschrieben ist (Illustration in Abb. 5). In diesem Modell wird die Geschwindigkeitsänderung unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Erhaltungsgleichungen für Impuls und Drehimpuls, angewendet auf eine ideale Kugel, die mit einer glatten Wand kollidiert, berechnet. Hierbei wird die Wand jedoch stochastisch geneigt, wobei die Neigungswinkel einer Normalverteilung folgen. Es werden zwei verschiedene Szenarien unterschieden. Im Ersten gleitet die Partikeloberfläche an der Wand, beginnt aber noch während des Stoßes zu haften (Haftstoß). Im Zweiten hält das Gleiten während des Stoßes an. Diese Unterscheidung führt zu folgenden Gleichungen für den Haftstoß:

$$\begin{aligned}v_X &= \frac{5}{7} \left(v_X^{(0)} - \frac{D}{5} \omega_Z^{(0)} \right) \\v_Y &= -e v_Y^{(0)} \\v_Z &= \frac{5}{7} \left(v_Z^{(0)} - \frac{D}{5} \omega_X^{(0)} \right),\end{aligned}$$

und den Gleitstoß:

$$\begin{aligned}v_X &= v_X^{(0)} + \varepsilon_X \mu_D (e+1) v_Y^{(0)} \\v_Y &= -e v_Y^{(0)} \\v_Z &= v_Z^{(0)} + \varepsilon_Z \mu_D (e+1) v_Y^{(0)}\end{aligned}$$

mit

$$\varepsilon_X = \frac{v_X^{(0)}}{\sqrt{v_X^{(0)2} + v_Z^{(0)2}}} \quad \varepsilon_Z = \frac{v_Z^{(0)}}{\sqrt{v_X^{(0)2} + v_Z^{(0)2}}}.$$

Hier ist D der Durchmesser der Kugel, e die Stoßzahl, und μ_D der dynamische Reibungskoeffizient. Die Größen v und ω stellen die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors bzw. des Rotationsvektors dar. Die Indizes X, Y, Z kennzeichnen die Koordinatenrichtung, wobei Y die wandnormale Richtung kennzeichnet. Die Komponenten mit X oder Z sind tangential zur Wand. Der obere Index (0) markiert den Zustand vor der Kollision. Die Gleichungen für den Gleitstoß werden angewendet, wenn folgende Bedingung erfüllt ist

$$\sqrt{\left(v_X^{(0)} + \frac{D}{2} \omega_Z^{(0)} \right)^2 + \left(v_Z^{(0)} + \frac{D}{2} \omega_X^{(0)} \right)^2} \geq \frac{7}{2} \mu_0 (1+e) v_Y^{(0)}.$$

Hier ist μ_0 der statische Reibungskoeffizient. Wie in [9] gezeigt wurde, müssen die Stoßzahl e und der Reibungskoeffizient μ_D als Funktionen des Aufprallwinkels vorgegeben werden, wie in Abb. 6 gezeigt ist.

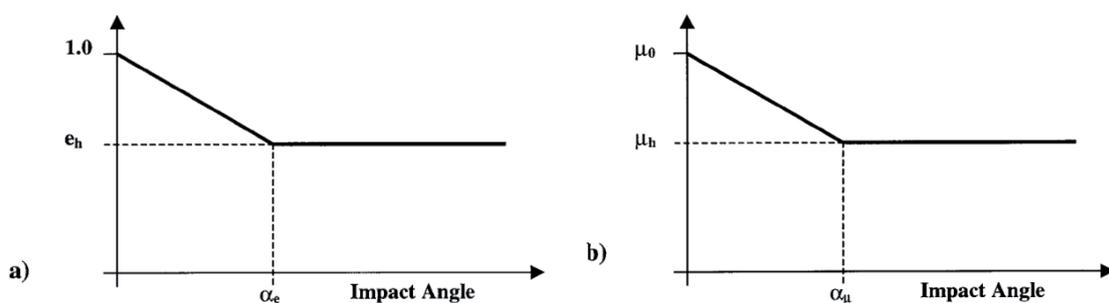


Abb. 6: Profile für die Stoßzahl(a) und den Reibungskoeffizienten(b) für das Wandabprall-Modell [5]

Die Winkelgeschwindigkeit ω wird stochastisch vorgegeben, da sie nicht in der Simulation berechnet wird. Die Verteilungen der Winkelgeschwindigkeiten und der Neigungswinkel sowie die charakteristischen Werte für die effektive Stoßzahl und die effektiven Reibungskoeffizienten müssen vom Anwender vorgegeben werden. Deshalb wurden am Institut für Fahrzeugsicherheit der TU Graz spezielle Experimente durchgeführt, um aus Messdaten diese Simulationsparameter bestimmen zu können. Während dieser Messungen wurde das Verhalten der Sandpartikel beim Wandabprall mithilfe von Hochgeschwindigkeitsvideos und anschließender digitaler Bilddatenauswertung untersucht, um Winkel und Geschwindigkeiten der Partikelbewegung zu erhalten.

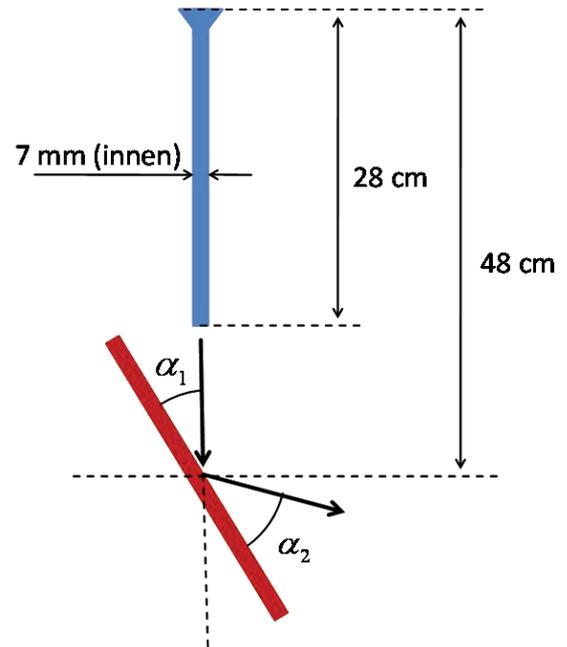
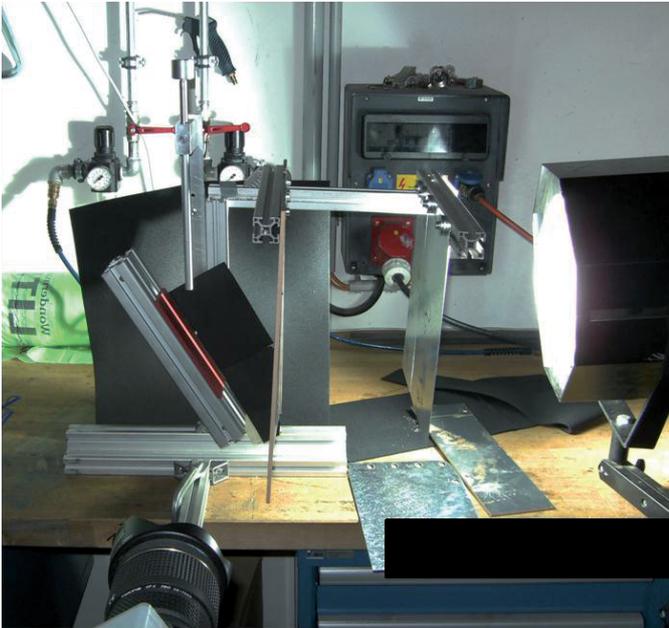


Abb. 7: Experimente zum Wandabprall

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 7 gezeigt. Die Partikel wurden durch ein fixiertes Metallrohr fallen gelassen, um reproduzierbare Geschwindigkeiten an der Prallplatte zu erhalten. Diese Platte wurde geneigt um verschiedene Aufprallwinkel zu untersuchen. Abb. 8 zeigt einen Vergleich von gemittelten Ergebnissen des abgestimmten Wandabprall-Modells mit interpolierten Ergebnissen dieser Experimente.

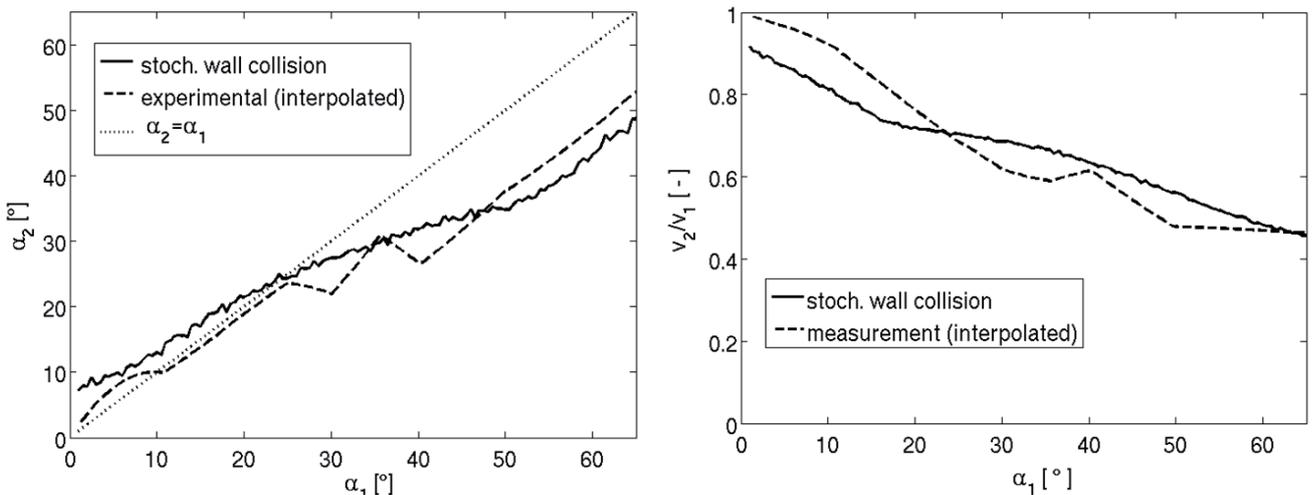


Abb. 8: Abprallwinkel und Abprallgeschwindigkeiten, abhängig vom Aufprallwinkel, Vergleich von berechneten und gemessenen Werten

2.4 Kopplung der Phasen

Die Notwendigkeit der Phasenkopplung hängt im Wesentlichen von der Größe der Massenbeladung der Strömung ab. Mit der in einem früheren Abschnitt erwähnten großen Massenbeladung, hat die Gegenwart der Partikel einen substantiellen Einfluss auf die Trägerströmung. Deshalb muss im vorliegenden Fall eine 2-Wege-Kopplung angewendet werden.

Unter den getroffenen Annahmen, bestimmt der Umströmungswiderstand der Partikel den Austausch von Impuls und Energie zwischen den Phasen. In den Impulsgleichungen des Trägerfluids wird dies durch einen speziellen Quellterm realisiert, dessen Größe lokal für jedes Kontrollvolumen auf der Basis des Strömungswiderstands der Partikel berechnet wird, die das Kontrollvolumen im betreffenden Zeitschritt passieren.

3 Implementierung und Validierung

Nach dem vorliegenden Ansatz, werden die Partikel mit dem Fluent DPM Model (Discrete Phase Model) modelliert. Allgemein werden hier Partikel mit gleichen Eigenschaften in Teilchenpaketen, sogenannten Parcels, zusammengefasst, deren Bewegung mithilfe eines Lagrange-Ansatzes modelliert wird. Im vorliegenden Fall ist die Gesamtzahl der zu simulierenden Partikel allerdings klein genug, um jeweils ein Partikel je Parcel zu betrachten.

Das DPM-Modell beinhaltet die Möglichkeit, verschiedene Typen von Injektoren und spezielle Typen von Randbedingungen zu definieren. Zusätzlich wurde das stochastische Modell für den Wandabprall in Form von "user defined functions" (UDF's) implementiert.

Zur Validierung des Simulationsmodells, wurden Ergebnisse mit Messwerten verglichen, die an einem Versuchsstand bei der Firma Knorr-Bremse GmbH und an einer Sandungsanlage, die an einer realen Straßenbahn montiert war, gewonnen wurden. Es wurden der Druckverlust über die Schlauchlänge und die mittlere axiale Geschwindigkeit der Partikel gemessen, letzteres mithilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, die am Computer ausgewertet wurden. *Abb. 9* und *Abb. 10* zeigen exemplarisch einen Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten.

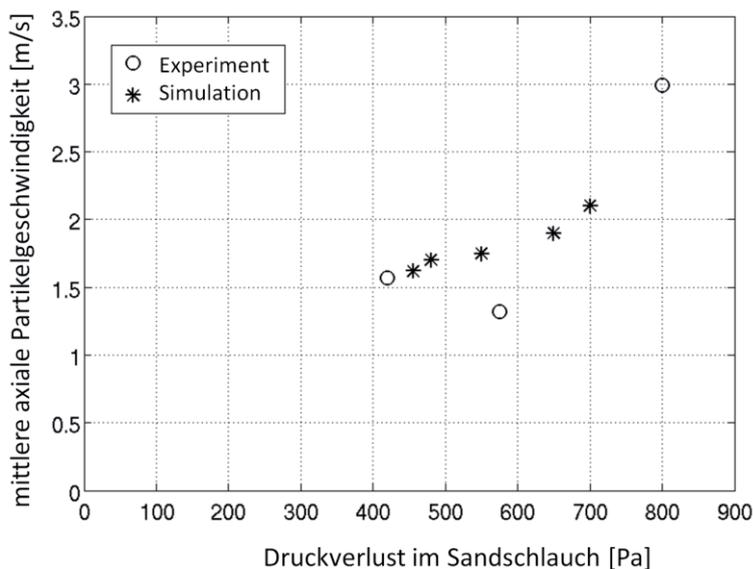


Abb. 9: Vergleich von Simulationsergebnissen und Messwerten bezüglich der Partikelgeschwindigkeit am Austritt der Sandungsanlage und dem Druckverlust über die Schlauchlänge

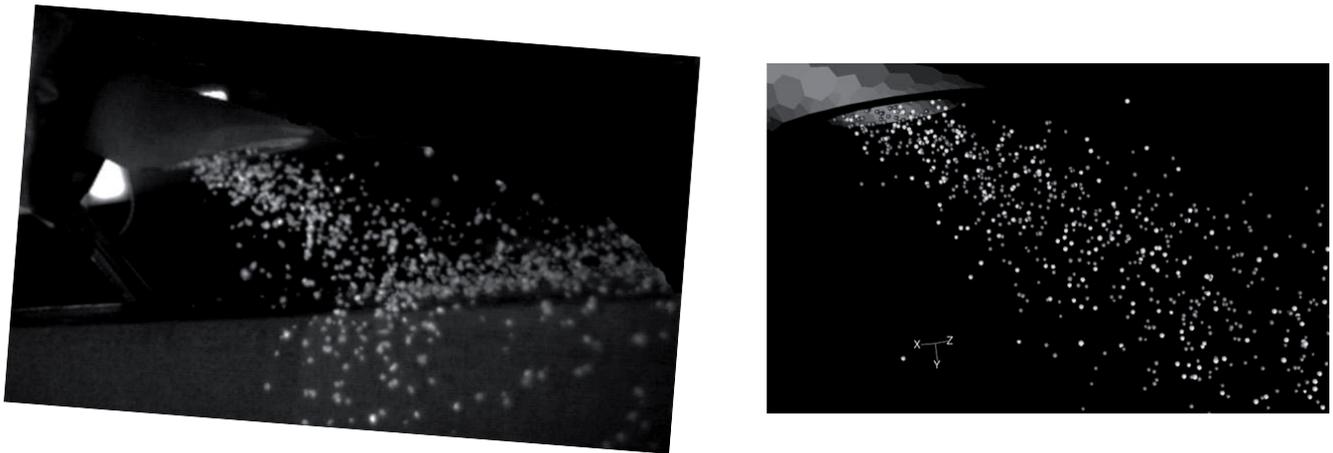


Abb. 10: Vergleich zwischen Realität (links) und Simulation (rechts)

Sowohl in der Gegenüberstellung der Zahlenwerte, als auch beim optischen Vergleich, kann eine gute Ähnlichkeit zwischen Simulationsergebnissen und Realität beobachtet werden.

4 Optimierung

Im nächsten Schritt, wurde das nun vorliegende Simulationsmodell angewendet, um das generelle Verhalten des Sandungssystems zu optimieren. Das Hauptziel hierbei war, durch das Untersuchen verschiedener Geometrievarianten des Endstücks des Sandschlauches, eine Fokussierung der Sandpartikel zu erreichen.

Der Rechenaufwand wurde dadurch reduziert, dass nur ein kurzes Stück des Sandschlauches und das Endstück in den Simulationen berücksichtigt wurden (Abb. 9). Die Randbedingungen am Eintritt dieser Geometrie wurden aus Ergebnissen einer Referenzsimulation des gesamten Sandschlauches übernommen, indem die Eigenschaften derjenigen Partikel, die sich dort durch einen bestimmten Schlauchquerschnitt bewegten, in einer Datei aufgezeichnet wurden, und in der verkleinerten Simulationsdomain am entsprechenden Ort und zur entsprechenden Zeit injiziert wurden. Diese Funktionalität wurde mithilfe von UDFs in Ansys-Fluent implementiert.

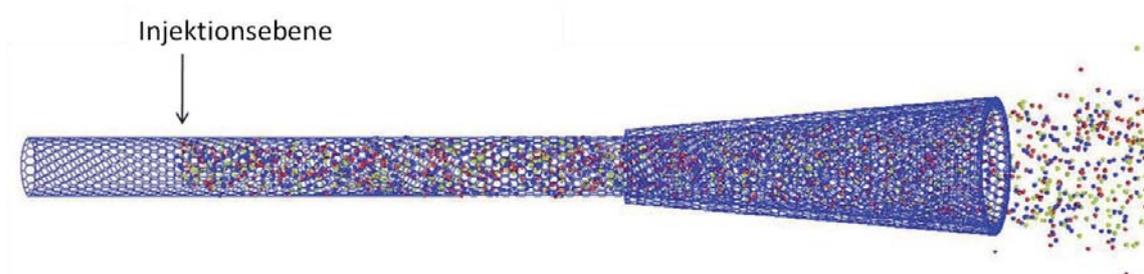


Abb. 9: Injektion eines zuvor berechneten Partikelstroms

In Abb. 10 sind Beispiele von Endstückgeometrien gezeigt, die in dieser Arbeit getestet wurden. Verschiedene Arten von Diffusor- und Düsengeometrien wurden auf ihren Einfluss auf den Strahlwinkel und die axialen Geschwindigkeiten des Sandes hin untersucht. Letzteres spielt besonders im Hinblick auf die Robustheit des Sandstrahls gegenüber Seitenwind unter realen Bedingungen eine Rolle.

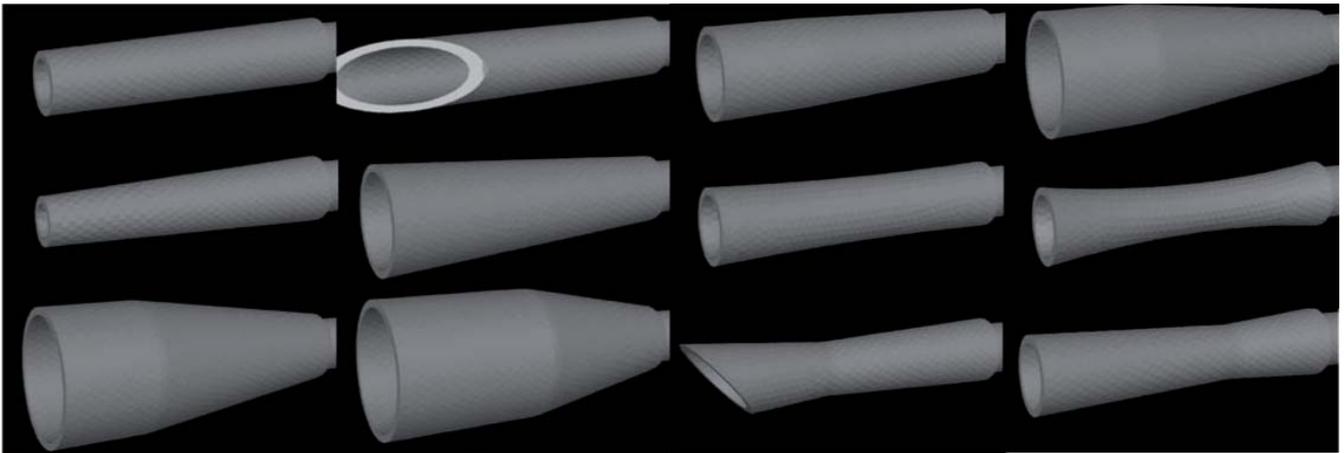
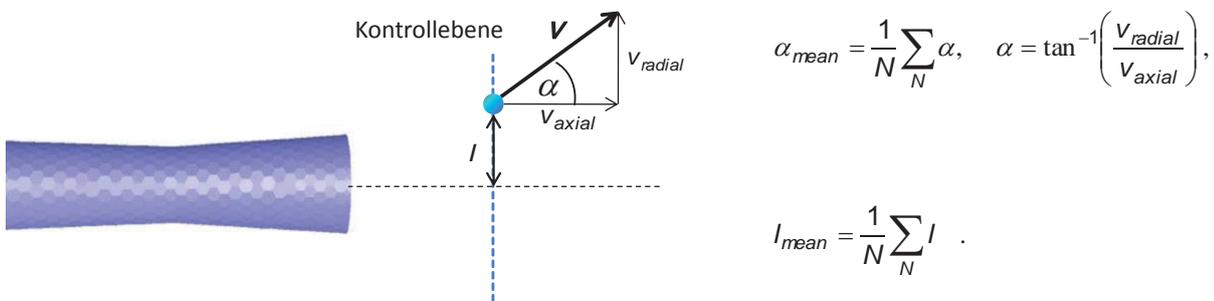


Abb. 10: Beispiele von getesteten Austrittsgeometrien

Die Vergleichskriterien sind mit der Gesamtzahl N der Partikel, wie folgt definiert



Hier ist α_{mean} der mittlere Öffnungswinkel des Sandstrahls und l_{mean} der mittlere Strahlradius. Beide Größen sollen minimiert werden. Die Ergebnisse wurden an Kontrollebenen an festgelegten Abständen vom Austrittsquerschnitt ausgewertet. Als ein Beispiel für die erhaltenen Ergebnisse, ist in Abb. 11 eine kumulative Verteilungsfunktion gezeigt, die die radiale Verteilung des Partikelmassenstroms für Düsen-/Diffusorgeometrien mit verschiedenen Austrittsdurchmessern darstellt. Zusätzlich sind die jeweiligen Mittelwerte eingezeichnet.

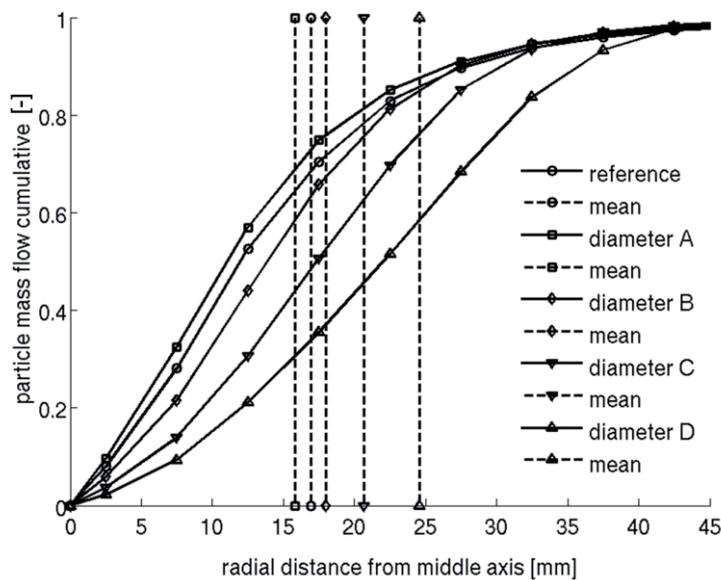


Abb. 11: Radiale Verteilung des Partikelmassenstroms für verschiedene Austrittsdurchmesser

In *Abb. 11* sind signifikante Unterschiede zwischen den Geometrievarianten erkennbar. Betrachtet man beispielsweise einen virtuellen Strahlkern mit einem Radius von 20 mm, befinden sich bei Verwendung des Durchmessers A etwa 80 % des Massenstroms innerhalb des Strahlkerns, während beim Durchmesser D nur etwa 40 % des Massenstroms erreicht werden.

5 Reale Randbedingungen

Eine Auswahl von aus der Optimierung resultierenden Geometrievarianten, wurde unter realistischen Randbedingungen untersucht, die den Einfluss der realen Geometrie der Straßenbahn und den Einfluss der Außenströmung beinhalten. Da die instationäre Simulation der Umströmung der gesamten Straßenbahn unter Berücksichtigung der Sandströmung einen zu großen Aufwand an Rechenzeit erfordern würde, wurden die Rechnungen in einem kleineren Simulationsgebiet ausgeführt, welches nur den Bereich um ein Rad und den Austritt der Sandungsanlage umfasste. Um gültige Randbedingungen für diesen Bereich zu erhalten, wurden separate Simulationen der Umströmung der Straßenbahn durchgeführt.

5.1 Umströmung der Straßenbahn

Für diese Simulationen wurde ein vereinfachtes Geometriemodell der Straßenbahn verwendet, das nur die wesentlichen Bauteile, insbesondere am Unterboden der Bahn, enthält. Es wurde eine stationäre Simulationemethode gewählt und die partikelbehaftete Strömung wurde vernachlässigt. Als Ergebnis der Rechnungen sieht man in *Abb. 12* auf der linken Seite die Verteilung der Geschwindigkeitsbeträge auf einer horizontalen Schnittebene unterhalb der Straßenbahn. Auf der rechten Seite ist eine vertikale Schnittebene durch den Bereich des Rades dargestellt.

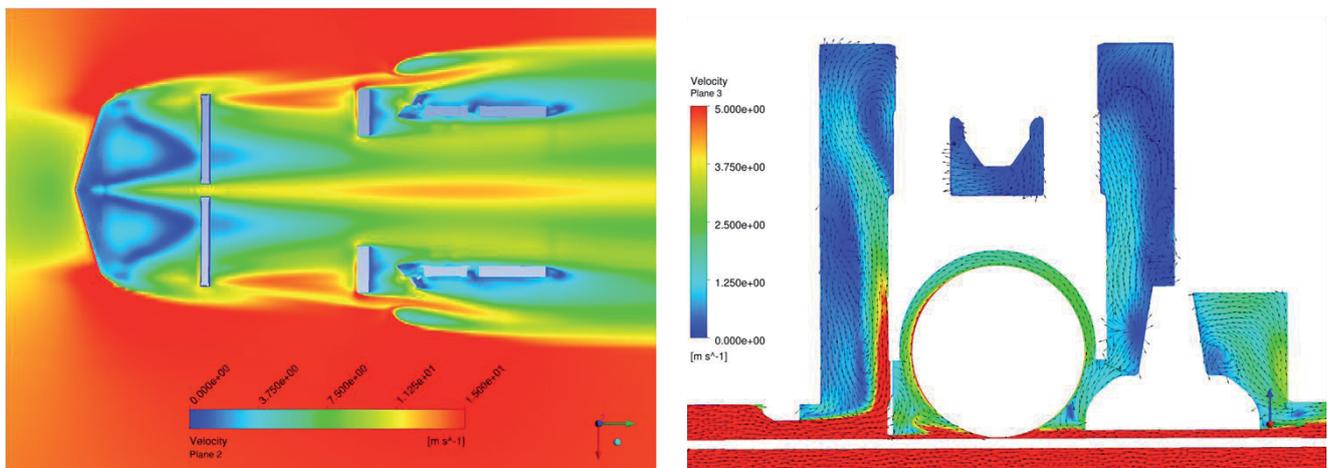


Abb. 12: Simulationsergebnisse, Umströmung der Straßenbahn

5.2 Strömung im Radbereich

An den Randflächen der verkleinerten Simulationsdomain im Radbereich wurden stationäre Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen aufgeprägt, die aus den Ergebnissen der Simulation der Straßenbahnnumströmung entnommen wurden. Die partikelbehaftete Strömung wurde nur im letzten Abschnitt des Sandschlauchs simuliert, um den Rechenaufwand zu reduzieren. Ähnlich wie bei der Geometrieoptimierung (siehe Abschnitt 4), wurde auch hier der Partikelstrom am Eintritt dieses Bereiches aus einer Referenzsimulation übernommen. In diesen Simulationen werden Partikel, die in unmittelbarer Nähe des Kontaktbereichs zwischen Rad und Schiene mit einer Wand kollidieren aus der Simulation entfernt.

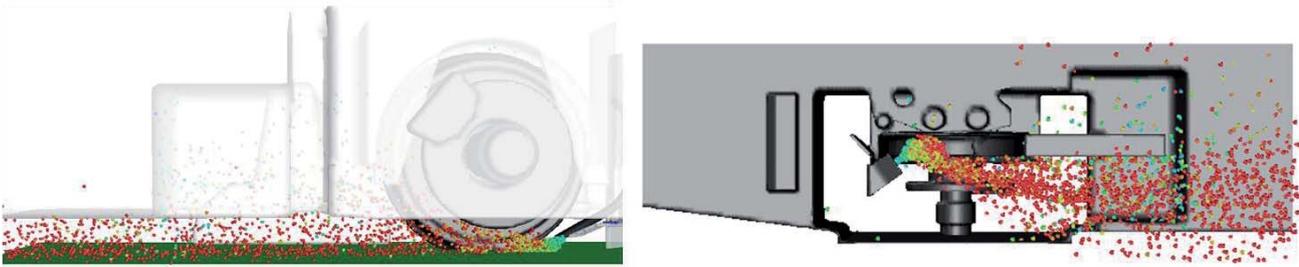


Abb. 13: Simulationsergebnisse im Radbereich

In Abb. 13 ist die Verteilung der, hier vergrößert dargestellten, Partikel aus verschiedenen Perspektiven erkennbar. Die verschiedenen Werte für den Massenanteil der Sandpartikel, die zwischen Rad und Schiene zermahlen werden und damit für die Vergrößerung des Reibwerts wirksam werden, ist in Abb. 14 dargestellt. Hierbei zeigen die Geometrievarianten 2 und 3 eine signifikante Verbesserung gegenüber dem Originalzustand der Sandungsanlage.

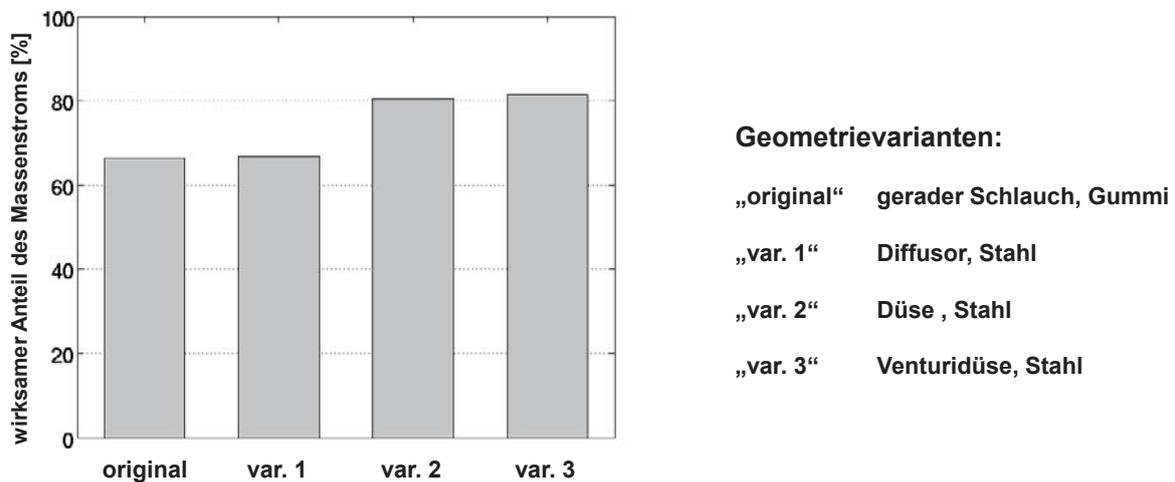


Abb. 14: wirksamer Anteil des Partikelmassenstroms für verschiedene Geometrievarianten

6 Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelt die numerische Simulation von Sandungsanlagen für Straßenbahnen. Hierbei wurde das in Ansys Fluent enthaltene DPM-Modell zur Simulation der Partikelbewegung während des Sandungsprozesses angewendet. Für die Genauigkeit der Simulationsergebnisse spielen verschiedene physikalische Phänomene eine Rolle. Insbesondere ist die Partikel-Wand-Interaktion von Bedeutung, da die Asphärität der Sandkörner, verbunden mit ihrer Rotation zu irregulärem Verhalten bei den Wandstößen führt. Ein stochastisches Teilmodell wurde mithilfe von „user defined functions“ in Ansys Fluent implementiert und mit experimentellen Ergebnissen abgestimmt. Mit Verwendung dieses Teilmodells war es möglich, eine Optimierung der Geometrie der Sandungsanlage durchzuführen, die zu einer verstärkten Fokussierung des Sandstrahls nach dem Verlassen des Endstücks des Sandschlauchs führte. Tests der optimierten Geometrievarianten in Simulationen mit realistischen Randbedingungen zeigten signifikante Verbesserungen im Hinblick auf die Größe des, für die Reibwertverbesserung wirksamen Anteils der Sandmasse.

7 Danksagung

Die Autoren möchten dem „COMET K2 Forschungsförderungs-Programm“ des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), des Österreichischen Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend (BMWFJ), der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), des Landes Steiermark sowie der Steirischen Wirtschaftsförderung (SFG) für die finanzielle Unterstützung danken.

Ebenfalls danken wir den unterstützenden Firmen und Projektpartnern Knorr Bremse GmbH und Wiener Linien GmbH & Co KG sowie der Technischen Universität Graz.

8 Literatur

- [1] Ferziger J. H. and Peric M.: „Numerische Strömungsmechanik“, Berlin : Springer, 2008
- [2] Ansys: „Ansys Fluent 12 Documentation“, 2009
- [3] Crowe C., Sommerfeld M. and Tsuji Y.: „Multiphase Flows with Droplets and Particles“ Boston : CRC Press, 1998
- [4] Haider A. and Levenspiel O.: „Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles“, *Powder Technology*, vol. 58. 1989, pp. 63-70.
- [5] Sommerfeld M.: „Theoretical and Experimental Modelling of Particulate Flows“, Vorlesungsskriptum, 2000
- [6] Tsuji Y.: „Solid-Fluid Multiphase Flow“, Vorlesungsskriptum. 2008
- [7] Sommerfeld M. and Huber N.: „Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions“, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 25. 1999, pp. 1457-1489.
- [8] Kahrmanovic D., Pirker S. and Kloss C.: „Numerical study and experimental validation of particle strand formation“, *6th International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries*, 2008
- [9] Huber N.: „Zur Phasenverteilung von Gas-Feststoff-Strömungen in Rohren“, *Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg (Deutschland)*, 1997

Simulation eines neuen thermodynamischen Wärmekraftprozesses

C. Kühhirt, S. Sieder, R. Pietzsch, F. Beneke (FH Schmalkalden)

Der im Folgenden vorgestellte thermodynamische Wärmekraftprozess ist im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsprojektes „Entwicklung einer Wärmekraftmaschine (NR-Motor) zur Verbrennung nachwachsender Rohstoffe“ entwickelt worden. Neu gegenüber konventionellen Wärmekraftprozessen ist die Realisierung einer nahezu vollständigen Expansion des Arbeitsgases in der Kolbenkraftmaschine durch die Aufteilung von Kompression und Expansion auf unterschiedlich große Zylinder und eine gezielte Temperierung der Zylinder. Anhand von Simulationen wird gezeigt, dass durch die vollständige Expansion die Fläche im Arbeitsdiagramm (pV-Diagramm) grundsätzlich vergrößert und die im Gas steckende Energie besser genutzt werden kann.

Die beschriebene Simulation ist die Grundlage für die Dimensionierung des NR-Motors. In Kürze wird die Funktion im praktischen Betrieb erprobt.

1 Einleitung

In der Thermodynamik gibt es verschiedene Wärmekraftprozesse. Zu diesen zählen beispielsweise der Otto- und Dieselprozess sowie der Stirling-Prozess. Eine Gemeinsamkeit, die diese Wärmekraftprozesse ausweisen, ist die unvollständige Expansion des Arbeitsgases in den Zylindern. Bei der Umwandlung in mechanische Arbeit bleibt dabei immer ein Teil der im Gas enthaltenen Exergie ungenutzt, was den thermischen Wirkungsgrad negativ beeinflusst.

Für eine effiziente Ausnutzung der im Gas enthaltenen Energie soll daher ein Konzept entwickelt werden, in dem die vollständige Expansion des Arbeitsgases erreicht wird. Dieses thermodynamische Wärmekraftkonzept wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Entwicklung einer Wärmekraftmaschine zur Verbrennung fester nachwachsender Rohstoffe (NR-Motor) umgesetzt. Den Nachweis und die Funktionsbestätigung dieses Prinzips beweist das nachfolgende Simulationsmodell auf Basis der Erhaltungssätze der Thermodynamik. Dieser Artikel befasst sich mit der Herleitung und Berechnung des Simulationsmodells und der Auswertung des pV-Diagramms.

2 Beschreibung des Aufbaus und der Verschaltung der Wärmekraftmaschine

Bei dem NR-Motor handelt es sich um eine Kolbenmaschine mit vier sternförmig angeordneten und in Reihe geschalteten Zylindern.

Das Fluid -das Arbeitsgas Luft- befindet sich in einem geschlossenen Kreislauf. Eine Leckage durch Spaltverluste wird für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt. Dieses System wird aus den fluidführenden Bauteilen der einzelnen Teilsysteme ① bis ④ gebildet. Ein Teilsystem besteht aus

- einem Expansionszylinder,
- einem Kompressionszylinder,
- einer Wärmekammer und
- einem Wasserkühler.

In Abb. 1 ist der allgemeine Aufbau sowie die Leitungsführung/das Verschaltungskonzept der Wärmekraftmaschine, im weiteren NR Motor (nachwachsende Rohstoffe-Motor) genannt, zu sehen. Hier ist zu erkennen, dass vier Kolbensysteme kreuzförmig angeordnet sind. Jeder Kolben arbeitet um 90° zum Nachbarkolben versetzt.

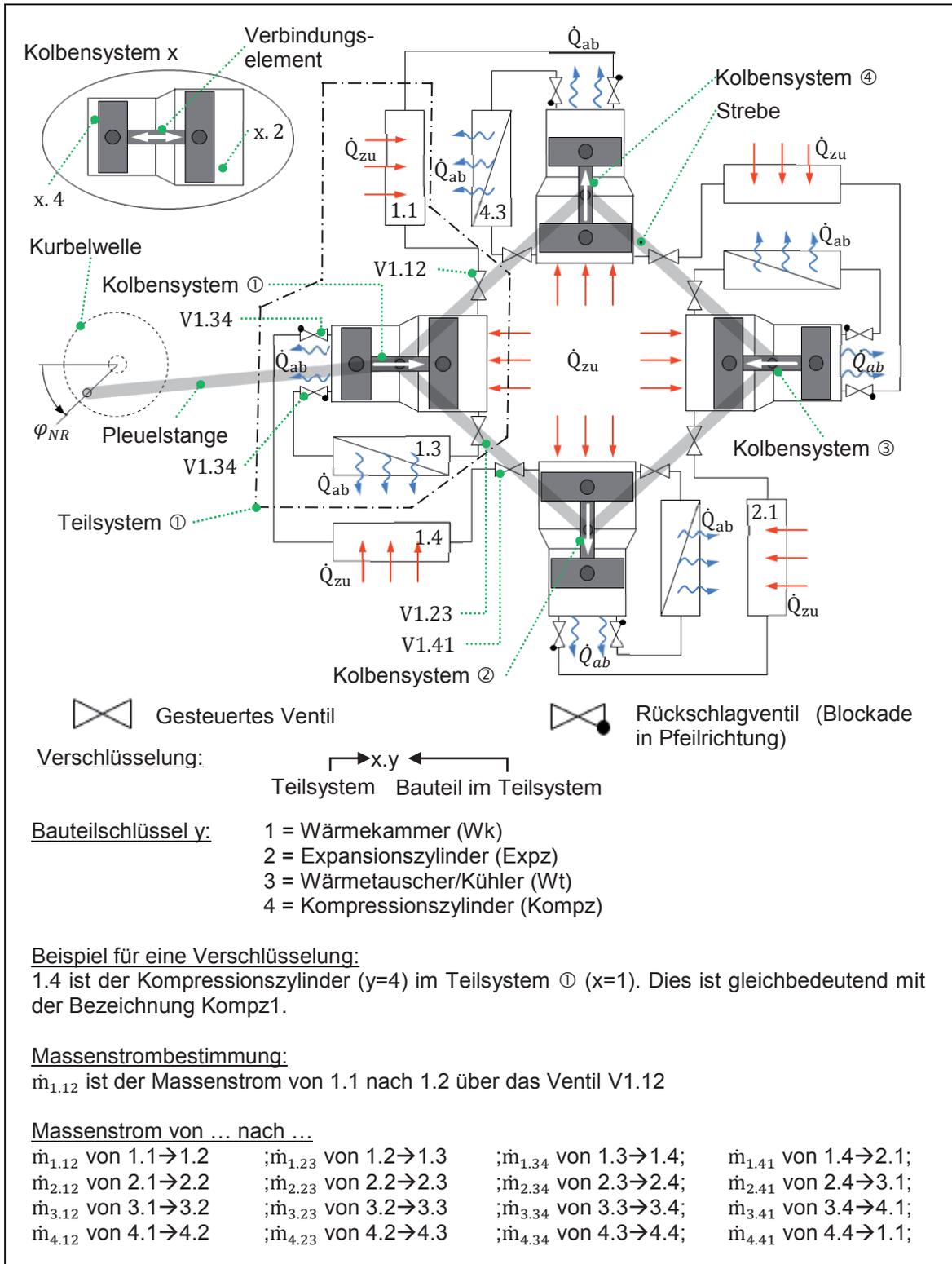


Abb. 1: Schematischer Aufbau des NR-Motors

Jeweils benachbarte Kolbensysteme sind mittig mit einer Strebe verbunden. Die vier Streben bilden einen Rhombus, weshalb diese Art der Kolbensystemverbindung als Rhombusgetriebe bezeichnet wird.

Durch die Verbindung über das Rhombusgetriebe bewegen sich gegenüberliegende Kolbensysteme (hier Kolbensystem ① und Kolbensystem ③ sowie Kolbensystem ② und Kolbensystem ④) immer aufeinander zu oder voneinander weg. Weiterhin sorgt das Rhombusgetriebe dafür, dass benachbarte Kolbensysteme immer eine

entgegengesetzte Bewegung ausführen, was die Richtungspfeile in Abb. 1 verdeutlichen. Ein Kolbensystem ist ein Ensemble aus zwei Kolben unterschiedlichen Durchmessers, die starr auf ein Verbindungselement gekoppelt sind. Der Zwischenraum zwischen den beiden Kolben des Kolbensystems ist gegenüber den Arbeitsräumen (Kompressions- und Expansionskammer des jeweiligen Kolbensystems) abgedichtet.

Eines der Kolbensysteme (hier Kolbensystem ①) ist über die Pleuelstange mit einer außenliegenden dezentralen Pleuelstange verbunden. Dadurch wird aus den geradlinigen Bewegungen des Kolbensystems (über Pleuelstangen gekoppelt) eine Drehbewegung der Pleuelstange erzeugt. An der Pleuelstange kann dann ein Generator angetrieben werden.

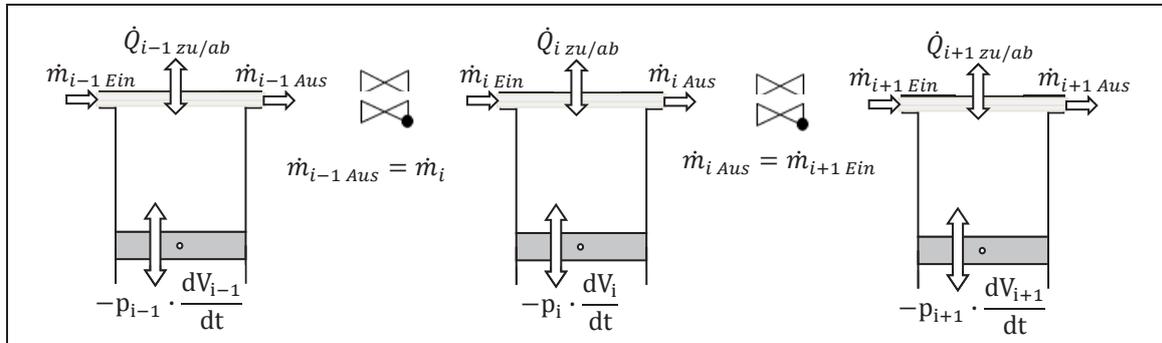


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines offenen Systems am Beispiel eines Zylinders

$$\frac{dU_i}{dt} = \dot{m}_{Ein} \cdot u_{Ein} + \dot{m}_{Ein} \cdot p_{Ein} \cdot v_{Ein} - \dot{m}_{Aus} \cdot u_{Aus} - \dot{m}_{Aus} \cdot p_{Aus} \cdot v_{Aus} + \left(-p_i \cdot \frac{dV_i}{dt}\right) + \dot{Q}_i \quad (1)$$

$p_{Ein} / p_{Aus} / p_i$	Druck	[Pa]
u_{Ein} / u_{Aus}	Spezifische innere Energie	[J · kg ⁻¹]
v_{Ein} / v_{Aus}	Spezifisches Volumen	[m ³ · kg ⁻¹]
$\dot{m}_{Ein} / \dot{m}_{Aus}$	Massenstrom in das/aus dem System i	[kg · s ⁻¹]
\dot{Q}_i	Zeitliche Änderung der Wärmemenge über die Systemgrenze i	[W]
$\frac{dU_i}{dt}$	Zeitliche Änderung der inneren Energie des Systems i	[J · s ⁻¹]
$\frac{dV_i}{dt}$	Zeitliche Änderung des Volumens des Systems i	[m ³ · s ⁻¹]

In Gleichung (1) sind $\dot{m} \cdot u$ die Änderung der inneren Energie und $\dot{m} \cdot p \cdot \dot{V}$ die Förderarbeit durch das Zu- und Abströmen der Masse, $-p_i \cdot \frac{dV_i}{dt}$ die Volumenänderungsarbeit der Zylinder und \dot{Q}_i die Wärmeströme über die Systemgrenze (siehe Abb. 2). Die Volumenänderungsarbeit ist für die starren Kammern und Rohrleitungen gleich null.

Mit dem idealen Gasgesetz (2) sowie den kalorischen Zustandsgleichungen für die innere Energie

(3) und die Enthalpie (4) kann Gleichung (1) anders geschrieben werden. Es folgt:

$$\text{mit } p_i \cdot v_i = R_s \cdot T_i \quad (2)$$

$$u_i = c_v \cdot T_i \rightarrow du_i = d(c_v \cdot T_i) \rightarrow dU_i = d(m_i \cdot c_v \cdot T_i) \quad (3)$$

$$\text{mit } c_v = \text{const.} \rightarrow dU_i = c_v \cdot d(m_i \cdot T_i) = c_v \cdot (T_i \cdot dm_i + m_i \cdot dT_i)$$

$$\frac{dU_i}{dt} = c_v \cdot \frac{d(m_i \cdot T_i)}{dt} = c_v \cdot \left(T_i \cdot \frac{dm_i}{dt} + m_i \cdot \frac{dT_i}{dt} \right)$$

$$h_i = c_p \cdot T_i \rightarrow H_i = m_i \cdot c_p \cdot T_i \rightarrow h_i = u_i + p_i \cdot v_i = c_v \cdot T_i + R_s \cdot T_i = (c_v + R_s) \cdot T_i \quad (4)$$

$$c_v \cdot \left(T_i \cdot \frac{dm_i}{dt} + m_i \cdot \frac{dT_i}{dt} \right) = \dot{m}_{\text{Ein}} \cdot (u_{\text{Ein}} + p_{\text{Ein}} \cdot v_{\text{Ein}}) - \dot{m}_{\text{Aus}} \cdot (u_{\text{Aus}} + p_{\text{Aus}} \cdot v_{\text{Aus}}) + \left(-p_i \cdot \frac{dV_i}{dt} \right) + \frac{dQ_i}{dt}$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{Ein}}}{m_i} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{c_v} \right) \cdot T_{\text{Ein}} - \frac{\dot{m}_{\text{Aus}}}{m_i} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{c_v} \right) \cdot T_{\text{Aus}} - \frac{p_i}{m_i \cdot c_v} \cdot \frac{dV_i}{dt} + \frac{1}{m_i \cdot c_v} \cdot \frac{dQ_i}{dt} - \frac{T_i}{m_i} \cdot \frac{dm_i}{dt}$$

$$\text{mit } \kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + R_s}{c_v} = 1 + \frac{R_s}{c_v}$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{Ein}}}{m_i} \cdot \kappa \cdot T_{\text{Ein}} - \frac{\dot{m}_{\text{Aus}}}{m_i} \cdot \kappa \cdot T_{\text{Aus}} - \frac{p_i}{m_i \cdot c_v} \cdot \frac{dV_i}{dt} + \frac{1}{m_i \cdot c_v} \cdot \frac{dQ_i}{dt} - \frac{T_i}{m_i} \cdot \frac{dm_i}{dt} \quad (5)$$

c_v	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$[J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$T_{\text{Ein}} / T_{\text{Aus}}$	Temperatur der in das System i ein- oder ausströmenden Massen	$[K]$
$\frac{dm_i}{dt}$	Zeitliche Änderung der Masse des Systems i	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\frac{dT_i}{dt}$	Zeitliche Temperaturänderung des Systems i	$[K]$
κ	Verhältnis der spezifischen Wärmekapazität c_p und c_v	$[1]$
	Isentropenexponent	

Gleichung (5) stellt einen Zwischenschritt für die Formulierung der Temperaturänderung dar (vgl. Gleichung (23)).

Aus Gleichung (5) ist zu erkennen, dass die Temperaturänderung des Systems nur bestimmbar ist, wenn Gesetzmäßigkeiten zum Beschreiben

- des Zylindervolumens V_i ,
- der ein- und ausströmenden Massenströme $\dot{m}_{\text{Ein/Aus}}$,
- der Masse des Systems sowie
- der Änderung der Wärmemenge

vorhanden sind. Diese erforderlichen Größen werden nachfolgend beschrieben:

$$x_1(\varphi) = R \cdot (1 - \cos \varphi) + L - \sqrt{L^2 - R^2 \cdot \sin^2 \varphi} \quad (8)$$

- L Länge des Pleuels des NR-Motors [m]
- R Exzentrizität der Kurbelwelle des NR-Motors [m]
- φ Winkel in Radiant ausgehend vom Totpunkt (siehe Abb. 3) [rad]

Nach der Überführung von Gleichung (8) auf das Koordinatensystem $x_{1\text{NR}}$ ergibt sich für die Kolbenbewegung $x_{1\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}})$ folgende Funktion:

$$x_{1\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}) = x_{3\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}) = R \cdot (1 - \cos \varphi_{\text{NR}}) - L + \sqrt{L^2 - R^2 \cdot \sin^2 \varphi_{\text{NR}}} \quad (9)$$

φ_{NR} Winkel ausgehend vom Totpunkt (siehe Abb. 3) [rad]

Wird vorausgesetzt, dass die positive Richtung der Bewegungsachse zum Zentrum/zur Energiequelle hin gerichtet ist, so kann Gleichung (9) für die Beschreibung der Bewegung der Kolbensysteme ① und ③ verwendet werden, da diese gleichgerichtete Bewegungen ausführen (zum Zentrum hin oder von diesem weg). Die Bewegung des Kolbensystems ④ kann wie folgt beschrieben werden (siehe Abb. 3):

$$x_4(\varphi) = x_4(\varphi)_{\text{max}} - x_{4\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}})$$

$$\text{mit } x_4(\varphi)_{\text{max}} = \sqrt{C^2 - A^2} - B$$

$$x_{4\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}) = \sqrt{C^2 - A^2} - B - x_4(\varphi)$$

$$x_{4\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}) = \sqrt{C^2 - A^2} - \sqrt{C^2 - (A + 2 \cdot R - x_{1\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}))^2} \quad (10)$$

$$\text{mit } C^2 = (A + 2 \cdot R)^2 + B^2$$

$$x_{4\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}) = \sqrt{4 \cdot R^2 + 2 \cdot A \cdot R + B^2} - \sqrt{B^2 - (x_{1\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}))^2 - 2 \cdot (A + 2 \cdot R) \cdot x_{1\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}})} \quad (11)$$

A Abstand vom Zentrum zum oberen Totpunkt der Bewegung beim Teilsystem eins/drei [m]

B Abstand vom Zentrum zum oberen Totpunkt der Bewegung beim Teilsystem zwei/vier [m]

Wird wieder vorausgesetzt, dass die positive Richtung der Bewegungsachse zum Zentrum/zur Energiequelle hin gerichtet ist, so kann Gleichung (11) für die Beschreibung der Bewegung der Kolbensysteme ② und ④ verwendet werden, da diese ebenfalls gleichgerichtete Bewegungen ausführen (zum Zentrum hin oder von diesem weg).

Da das zum Schluss zu bildende Gleichungssystem viele Gleichungen enthalten wird, ist es sinnvoll Gleichung (9) und (11) zu vereinfachen, da hierdurch die Lösbarkeit des Gleichungssystems mit entsprechenden Programmen vereinfacht wird. Für Gleichung (9) geschieht dies durch die Annahme, dass das Verhältnis der Pleuellänge L zur Exzentrizität R der Kurbelwelle $L/R > 4$ ist. Hierfür ergibt sich, dass $R^2 \cdot \sin^2 \varphi_{\text{NR}} \ll L^2$ wird und somit vernachlässigt werden kann. Dadurch reduziert sich Gleichung (9) auf Gleichung (12). Der abweichende Bewegungsverlauf ist links in Abb. 4 dargestellt.

$$x_{1\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}) = x_{3\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}) = R \cdot (1 - \cos \varphi_{\text{NR}}) \quad (12)$$

Durch diese Vereinfachung ergibt sich für den Bewegungsverlauf des Kolbensystems zwei/vier folgende Gleichung:

$$x_{4\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}) = x_{2\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}}) = \sqrt{C^2 - A^2} - \sqrt{C^2 - (A + R \cdot (1 + \cos \varphi_{\text{NR}}))^2} \quad (13)$$

$$\text{mit } C^2 = (A + 2 \cdot R)^2 + B^2$$

Der Bewegungsverlauf ist rechts in Abb. 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass wenn $A \neq B$ ist, die Wegfunktionen $x_{1\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}})$ und $x_{4\text{NR}}(\varphi_{\text{NR}})$ verschieden sind (Phasenverschiebung nicht berücksichtigt). Diese nähern sich aber einander an, wenn $A = B$ wird. Für diesen Fall sind die Bewegungsverläufe aber immer noch verschieden,

da die Funktionsverläufe der roten und der schwarzen Kurve in den Umkehrpunkten unterschiedlich sind (siehe Abb. 4). Trotz dieser Abweichung wird für die Vereinfachung angenommen, dass der Funktionsverlauf für $x_{2NR}(\varphi_{NR}) = x_{4NR}(\varphi_{NR})$ durch einen Cosinus- oder Sinus-Verlauf angenähert werden kann. Diese Voraussetzung wird erfüllt durch den analogen Aufbau der Teilsysteme des NR-Motors.

Es ergibt sich für die vereinfachte Bewegung der um π versetzten Kolbensysteme ② und ④ Gleichung (14). Sie beschreibt die Bewegung der Kolbensysteme durch eine Cosinusfunktion.

$$x_{2NR}(\varphi_{NR}) = x_{4NR}(\varphi_{NR}) = R \cdot (1 - \cos(\varphi_{NR} + \pi)) = R \cdot (1 + \cos \varphi_{NR}) \tag{14}$$

Nachdem der Bewegungsverlauf für die Kolbensysteme aufgestellt wurde, kann die Volumenänderung bestimmt werden. Dies geschieht durch die Multiplikation der Bewegungsgleichung (12) bzw. (14) mit der jeweiligen Kolbenfläche A_i der Zylinder.

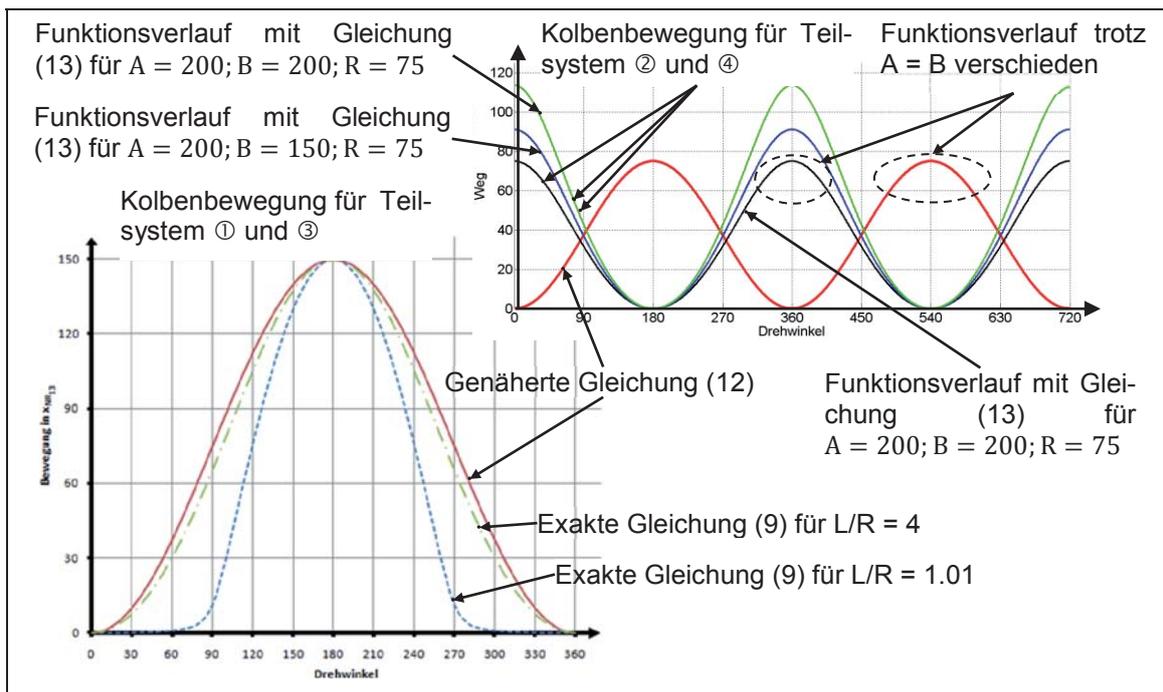


Abb. 4: Wegfunktionen für die Kolbensysteme bei unterschiedlichen Geometrie Größen

Für die allgemeine Volumenänderung ΔV der Zylinder ergibt sich:

$$\Delta V_i = x_{iNR}(\varphi_{NR}) \cdot A_i = R \cdot (1 \pm \cos \varphi_{NR}) \cdot A_i \tag{15}$$

ΔV_i Volumenänderung in der Zylinder x. 2 oder x. 4 [m³]

Es ist zu beachten, dass bisher vom Bewegungsverlauf des Kolbensystems gesprochen wurde. Jetzt wurde diese Bewegungsänderung in eine Volumenänderung des entsprechenden Systems umgerechnet. Jedes Kolbensystem besitzt aber zwei sich ändernde Volumina: das des Kompressions- und das des Expansionszylinders. Dies wirkt sich auf das Vorzeichen des Cosinus in Gleichung (15) aus. Es ergibt sich für den Expansions- und Kompressionszylinder der Teilsysteme ① und ④:

$$\begin{aligned} \Delta V_{1.2} &= R \cdot (1 + \cos \varphi_{NR}) \cdot A_{1.2} & \Delta V_{1.4} &= R \cdot (1 - \cos \varphi_{NR}) \cdot A_{1.4} \\ \Delta V_{4.2} &= R \cdot (1 - \cos \varphi_{NR}) \cdot A_{4.2} & \Delta V_{4.4} &= R \cdot (1 + \cos \varphi_{NR}) \cdot A_{4.4} \end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen zum Zeitpunkt $\varphi_{NR}(t = 0) = 0$ kann das Zylindervolumen in Abhängigkeit des Drehwinkels φ_{NR} bestimmt werden. Dabei setzt sich das Zylindervolumen aus dem Totvolumen V_{Tot} und dem Änderungsvolumen ΔV der Zylinder zusammen.

Für die Zylinder 1.2 und 1.4 (siehe Abb. 1) ergibt sich:

$$V_{1.4} = V_{1.4\text{Tot}} + \Delta V_{1.4} = V_{1.4\text{Tot}} + R \cdot A_{1.4} \cdot (1 - \cos \varphi_{\text{NR}})$$

$$\begin{aligned} V_{1.4\text{Max}} &= V_{1.4\text{Tot}} + \Delta V_{1.4\text{Max}} & \text{mit } R \cdot A_{1.4} &= \frac{\Delta V_{1.4\text{Max}}}{2} \\ V_{1.4\text{Max}} &= V_{1.4\text{Tot}} + 2 \cdot R \cdot A_{1.4} \\ V_{1.4\text{Tot}} &= V_{1.4\text{Max}} - 2 \cdot R \cdot A_{1.4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{1.4} &= V_{1.4\text{Max}} - 2 \cdot R \cdot A_{1.4} + R \cdot A_{1.4} \cdot (1 - \cos \varphi_{\text{NR}}) \\ V_{1.4} &= V_{1.4\text{Max}} - R \cdot A_{1.4} \cdot (1 + \cos \varphi_{\text{NR}}) \end{aligned}$$

$$V_{1.4} = V_{1.4\text{Max}} - \frac{\Delta V_{1.4\text{Max}}}{2} \cdot (1 + \cos \varphi_{\text{NR}}) \tag{16}$$

Analog folgt für den Expansionszylinder:

$$V_{1.2} = V_{1.2\text{Max}} - \frac{\Delta V_{1.2\text{Max}}}{2} \cdot (1 - \cos \varphi_{\text{NR}}) \tag{17}$$

V_i	Volumen des Expansions- 1.2 und Kompressionszylinders 1.4 in Abhängigkeit des Drehwinkels φ_{NR}	[m ³]
$V_{i\text{Max}}$	Maximalvolumen des Expansions- 1.2 und Kompressionszylinders 1.4	[m ³]
$V_{i\text{Tot}}$	Totvolumen des Expansions- 1.2 und Kompressionszylinders 1.4	[m ³]
$\Delta V_{i\text{Max}}$	Maximale Volumenänderung des Expansions- 1.2 und Kompressionszylinders 1.4	[m ³]

Für die zeitliche Ableitung des Zylindervolumens ergibt sich mit $\varphi_{\text{NR}} = \omega \cdot t$:

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{V_i - \frac{\Delta V_{i\text{Max}}}{2} \cdot (1 \pm \cos(\omega \cdot t))}{dt} = \mp \frac{\Delta V_{i\text{Max}}}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega \tag{18}$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_{1.2}}{dt} &= - \frac{\Delta V_{1.2\text{Max}}}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega \\ \frac{dV_{1.4}}{dt} &= + \frac{\Delta V_{1.4\text{Max}}}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega \end{aligned}$$

$\frac{dV_i}{dt}$	Volumenänderung des Expansions- 1.2 und der Kompressionszylinders 1.4	[m ³ · s ⁻¹]
ω	Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle des NR-Motors	[rad · s ⁻¹]
$\Delta V_{i\text{Max}}$	Maximale Volumenänderung des Expansions- 1.2 und Kompressionszylinders 1.4	[m ³]

Durch gleiches Vorgehen lässt sich die Änderung des Zylindervolumens für den Expansions- und Kompressionszylinder 4.2 und 4.4 beschreiben. Für diese folgt:

$$\begin{aligned} V_{4.2} &= V_{4.2\text{Max}} - \frac{\Delta V_{4.2\text{Max}}}{2} \cdot (1 + \cos \varphi_{\text{NR}}) & V_{4.4} &= V_{4.4\text{Max}} - \frac{\Delta V_{4.4\text{Max}}}{2} \cdot (1 - \cos \varphi_{\text{NR}}) \\ \frac{dV_{4.2}}{dt} &= + \frac{\Delta V_{4.2\text{Max}}}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega & \frac{dV_{4.4}}{dt} &= - \frac{\Delta V_{4.4\text{Max}}}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega \end{aligned}$$

2.2 Zeitliche Änderung der Wärmeeinträge und Reibung

Die zeitliche Änderung der Wärmemenge des Systems wird durch einen Wärmestrom \dot{Q} über die Systemgrenze hervorgerufen. Dieser setzt sich aus dem Wärmestrom durch die Reibung zwischen Kolben und Zylinderwand (oder Laufbuchse) \dot{Q}_{Reib} und dem zu-/abgeführten Wärmestrom durch den Temperaturunterschied zwischen dem Arbeitsmedium und der Umgebung (Flammentemperatur/ Kühlmedientemperatur) $\dot{Q}_{\text{Ein/Aus}}$ zusammen.

Zur Berechnung der Reibungswärme wird eine Gleichung mit quadratischer Abhängigkeit von der Drehzahl formuliert. Es gilt das folgende empirische Modell:

$$\dot{Q}_{\text{Reib}} = \eta \cdot n^2 = \eta \cdot \left(\frac{\omega}{2 \cdot \pi}\right)^2 \tag{19}$$

n	Drehzahl der Kurbelwelle	$[\text{min}^{-1}]$
\dot{Q}_{Reib}	Wärmestrom infolge der Reibung	$[\text{W}]$
η	Reibkoeffizient	$[\text{J} \cdot \text{s}]$
ω	Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$

Zur Auswertung des Differenzialgleichungssystems werden für die Konstante η zunächst empirisch ermittelte Größen vorgegeben. Die Bestimmung der Konstanten η erfolgt hierbei durch die Annahme, dass für die freie Bewegung eines Kolbens (keine Druckaufbau in den Kammern und Zylindern), zum Erreichen einer gewissen Bewegungsfrequenz f eine mechanische Leistung aufgebracht werden muss, welche gleich der Wärmemenge infolge der Reibung ist (siehe Abb. 5).

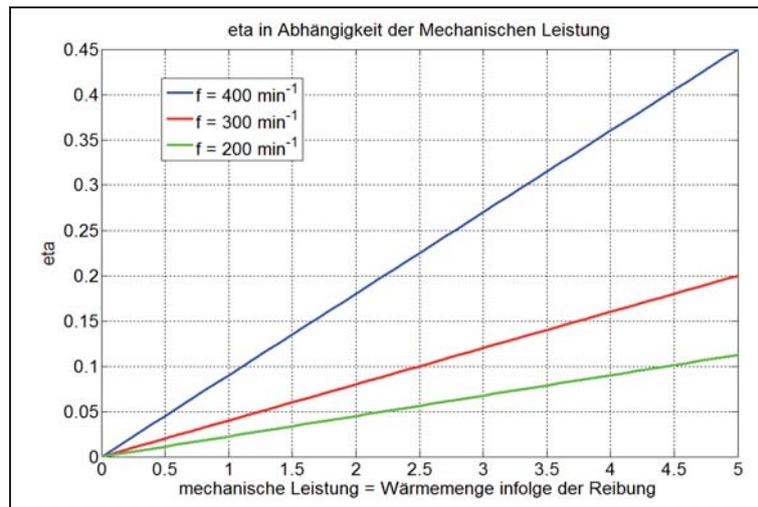


Abb. 5: η in Abhängigkeit der mechanischen Leistung

Die genauen motorspezifischen Werte können erst durch praktische Versuche ermittelt werden. Für den Wärmestrom durch den Temperaturunterschied zwischen dem Arbeitsgas und der Kühlwasser- oder Flammentemperatur T_U gilt die Gleichung für den Wärmedurchgang:

$$\dot{Q}_{\text{Ein/Aus}} = k \cdot A \cdot (T_U - T_i) \quad (20)$$

k	Wärmedurchgangskoeffizient	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
A	Wärmeübertragende Fläche	$[\text{m}^2]$
T_i	Temperatur im System	$[\text{K}]$
T_U	Temperatur außerhalb (Kühlwasser, Brennkammer)	$[\text{K}]$
$\dot{Q}_{\text{Ein/Aus}}$	Wärmestrom durch den Temperaturunterschied zwischen dem Arbeitsgas und der Kühlwasser- oder Flammentemperatur T_U	$[\text{W}]$

Hierbei ist zu beachten, dass ein positiver Wärmestrom dem System zugeführt und ein negativer Wärmestrom aus dem System entzogen wird. Nach dem Addieren der Gleichungen (19) und (20) ergibt sich für die zeitliche Änderung der Wärmemenge:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{Reib}} + \dot{Q}_{\text{Ein/Aus}} = \eta \cdot \left(\frac{\omega}{2 \cdot \pi} \right)^2 + k \cdot A \cdot (T_U - T_i) \quad (21)$$

Andere Wärmeübertragungsvorgänge, wie zum Beispiel Strahlung, werden vereinfacht durch den Wärmedurchgangskoeffizienten k berücksichtigt. Die Wärmeübergangskoeffizienten für die einzelnen Bauteile des NR-Motors wurden in der Konzeptphase der Entwicklung zunächst aus Tabellen (siehe [VDI06] und [GF97]) interpoliert und im Rahmen der späteren Entwurfsphase durch die Auswertung von konkreten CFD-Simulationsergebnissen angepasst.

2.3 Massenbilanz

Die in Gleichung (5) enthaltene Änderung der Systemmasse kann mit Hilfe der Massenbilanz beschrieben werden. Sie besagt, dass die Änderung der Systemmasse gleich der Summe der ein- und ausströmenden Massen ist. Unter der Annahme, dass keine Verluste auftreten, folgt:

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_{\text{Ein}} - \dot{m}_{\text{Aus}} \quad (22)$$

$$\begin{array}{ll} \dot{m}_{\text{Ein}}/\dot{m}_{\text{Aus}} & \text{Massenstrom der in das System } i \text{ ein- und/oder ausströmt} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ \frac{dm_i}{dt} & \text{Änderung der Systemmasse} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{array}$$

Anschließend werden die Gleichungen (21) und (22) in Gleichung (5) eingesetzt. Es folgt:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{Ein}}}{m_i} \cdot (\kappa \cdot T_{\text{Ein}} - T_i) - \frac{\dot{m}_{\text{Aus}}}{m_i} \cdot (\kappa \cdot T_{\text{Aus}} - T_i) - \frac{p_i}{m_i \cdot c_V} \cdot \frac{dV_i}{dt} + \frac{\eta}{m_i \cdot c_V} \cdot \left(\frac{\omega}{2 \cdot \pi}\right)^2 + \frac{k \cdot A}{m_i \cdot c_V} \cdot (T_U - T_i)$$

Wird angenommen, dass die Temperatur des ausströmenden Fluides T_{Aus} gleich der Fluidtemperatur T_i im System ist, kann diese Gleichung vereinfacht werden. Es ergibt sich:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{Ein}}}{m_i} \cdot (\kappa \cdot T_{\text{Ein}} - T_i) - \frac{\dot{m}_{\text{Aus}}}{m_i} \cdot (\kappa - 1) \cdot T_i - \frac{p_i}{m_i \cdot c_V} \cdot \frac{dV_i}{dt} + \frac{\eta}{m_i \cdot c_V} \cdot \left(\frac{\omega}{2 \cdot \pi}\right)^2 + \frac{k \cdot A}{m_i \cdot c_V} \cdot (T_U - T_i)$$

Um den Systemdruck p_i zu bestimmen, wird die Zustandsgleichung des idealen Gases, Gleichung (2), verwendet. Dabei ist zu beachten, dass sich das Volumen, die Temperatur sowie die Masse des Systems ändern. Es folgt:

$$p_i = \frac{R_s \cdot T_i \cdot m_i}{V_i} \quad (2)$$

Nach Substitution des Druckes im Term für die Volumenänderungsarbeit ergibt sich für die Temperaturänderung folgender Zusammenhang:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{Ein}}}{m_i} \cdot (\kappa \cdot T_{\text{Ein}} - T_i) - \frac{\dot{m}_{\text{Aus}}}{m_i} \cdot (\kappa - 1) \cdot T_i - \frac{R_s \cdot T_i}{c_V \cdot V_i} \cdot \frac{dV_i}{dt} + \frac{\eta}{m_i \cdot c_V} \cdot \left(\frac{\omega}{2 \cdot \pi}\right)^2 + \frac{k \cdot A}{m_i \cdot c_V} \cdot (T_U - T_i)$$

Zur weiteren Vereinfachung der Differenzialgleichung kann das Verhältnis von spezifischer Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p zu der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_V durch den Isentropenexponent κ ersetzt werden:

$$\frac{c_p}{c_V} = \frac{c_V + R_s}{c_V} = \frac{R_s}{c_V} + 1 = \kappa \rightarrow \frac{R_s}{c_V} = \kappa - 1$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{Ein}}}{m_i} \cdot (\kappa \cdot T_{\text{Ein}} - T_i) - \frac{\dot{m}_{\text{Aus}}}{m_i} \cdot (\kappa - 1) \cdot T_i - (\kappa - 1) \cdot \frac{T_i}{V_i} \cdot \frac{dV_i}{dt} + \frac{\eta}{m_i \cdot c_V} \cdot \left(\frac{\omega}{2 \cdot \pi}\right)^2 + \frac{k \cdot A}{m_i \cdot c_V} \cdot (T_U - T_i) \quad (23)$$

Die Massenströme kommen zustande, sofern eine Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende eines Strömungsweges herrscht. Aus der Fachliteratur [Sch11] geht hervor, dass der Druckunterschied quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit zunimmt. Aus Rücksicht auf die Lösbarkeit des Gleichungssystems wird allerdings der Druckverlust zwischen den Bauteilen vereinfacht als linearisierter Zusammenhang angenommen. Für den Druckverlust gilt somit:

Quadratischer Zusammenhang: $\Delta p \sim v^2$
[Sch11]

$$\Delta p = \xi \cdot \theta \cdot \frac{v^2}{2}$$

Linearer Zusammenhang: $\Delta p \sim v$
(Vereinfachung)

$$\begin{aligned} \Delta p &= \xi_{\text{Lin}} \cdot \theta \cdot \frac{v}{2} = \xi_{\text{Lin}} \cdot \theta \cdot \frac{\dot{V}}{2 \cdot A} = \frac{\xi_{\text{Lin}}}{2 \cdot A} \cdot \dot{m} \\ \Delta p &= \Phi \cdot \dot{m} \end{aligned}$$

v	mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Fluids	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
A	Strömungsquerschnitt	$[\text{m}^2]$
\dot{m}	Massenstrom	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

\dot{V}	Volumenstrom	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
θ	Dichte des strömenden Fluids	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ξ	Druckverlustbeiwert	[1]
ξ_{Lin}	Druckverlustbeiwert nach Linearisierung	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
Φ	Druckverlustbeiwert nach dem Zusammenfassen	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$
Δp	Druckverlust über das Bauteil	[Pa]

Somit kann die ein- und ausströmende Masse näherungsweise berechnet werden. Dabei gilt zu beachten, dass die Massenströme \dot{m}_{Ein} und \dot{m}_{Aus} positiv sein müssen. Die Strömungsrichtung ist bereits mit dem Vorzeichen in Gleichung (23) berücksichtigt. Durch den Aufbau des Motors als Reihenschaltung gilt, dass die jeweils aus dem System $i - 1$ ausströmende Masse gleich der in das System i einströmenden Masse ist und die ausströmende Masse des Systems i ist gleich der in das System $i + 1$ einströmenden Masse.

$$\dot{m} = \frac{\Delta p}{\Phi} \quad (24)$$

2.4 Ventilschaltfunktion

Nachdem der Massenaustausch benachbarter Bauteile beschrieben ist, müssen Öffnungs- und Schließbedingungen für die Ventile zum Steuern des Gasflusses zwischen den Bauteilen definiert werden. Dies erfolgt für ideale Ventile, d.h. Trägheiten der Ventile und deren Auswirkungen auf die Schaltzeiten werden hier nicht berücksichtigt. Um die Ventilschaltfunktion im Gleichungssystem umzusetzen, wird die Gleichung (24) durch weitere Zusammenhänge ergänzt. Hierbei gilt es zu beachten, dass sowohl gesteuerte Ventile als auch Rückschlagventile modelliert werden müssen. Dabei wird bei den Schaltventilen (Ventil V1.12 und V1.23) angenommen, dass der Massenstrom immer die gleiche Richtung besitzt und somit ein Rückstrom über Schaltventile ausgeschlossen ist ($p_{i-1} \geq p_i$), wobei die Machbarkeit der Annahme weiter unten im Abschnitt bestätigt wird.

Für den Massenstrom über ein gesteuertes Ventil ergeben sich folgende Gleichungen im MatLab-Simulationsmodell:

$$\dot{m}_{i\text{Ein}} = \text{interp1}(X_i, Y_i, \varphi(0 \leq \varphi \leq 2 \cdot \pi), 'cubic') \cdot \frac{p_{i-1} - p_i}{\Phi} \quad \dot{m}_{i\text{Aus}} = \text{interp1}(X_i, Y_i, \varphi(0 \leq \varphi \leq 2 \cdot \pi), 'cubic') \cdot \frac{p_i - p_{i+1}}{\Phi}$$

In diesen Gleichungen ist X_i eine Matrix, welche die Winkelstellungen der Kurbelwelle enthält, bei denen die Ventilbewegungen durchgeführt werden sollen. Die Y_i Matrix gibt dabei die zugehörige Ventilstellung an (der Wert „1“ steht für „offen“ und der Wert „0“ für geschlossen). Mit $\varphi(0 \leq \varphi \leq 2 \cdot \pi)$ wird der auf einen Winkel zwischen $0 \cdot \pi$ und $2 \cdot \pi$ gerechnete Kurbelwellenwinkel φ bezeichnet.

In der zur Berechnung des Simulationsmodells verwendeten Software (MatLab) beschreibt der Befehl „Interp1“ eine Funktion, die es ermöglicht, zwischen den einzelnen Feldern der Matrix zu interpolieren (hier: Kubisch; 'cubic'). Abb. 6 zeigt beispielhaft einen Ventilschaltvorgang während der Simulation des Motors.

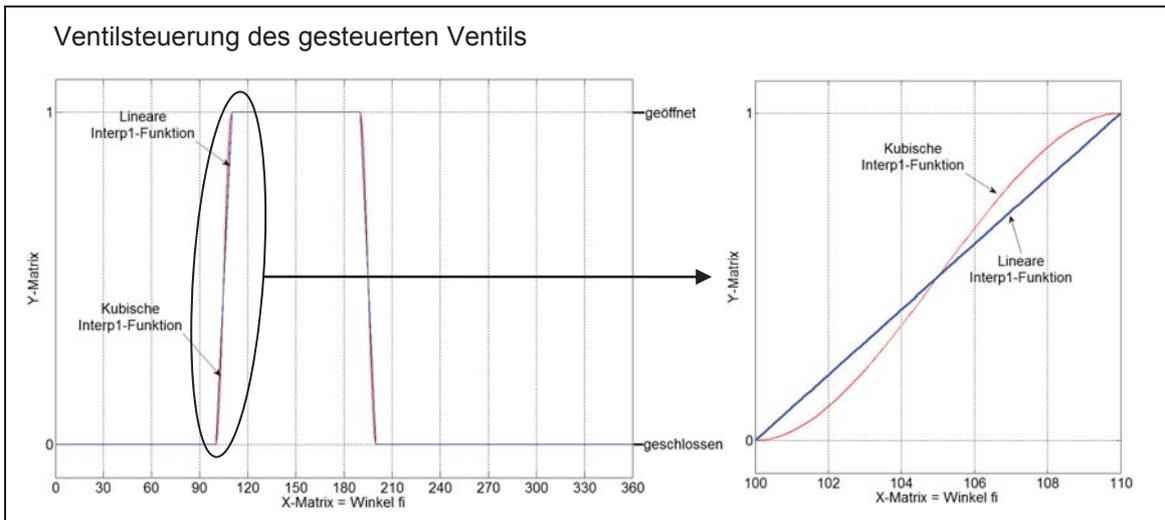


Abb. 6: Darstellung einer beispielhaften Ventilsteuerung

Um den Massenstrom über ein Druckrückschlagventil abzubilden, muss Gleichung (24) so erweitert werden, dass sie nur für positive Druckdifferenzen einen Massenstrom zulässt. Das wäre mit Hilfe der Signumfunktion einfach zu modellieren. Diese Funktion ändert sich jedoch sprunghaft, mit negativen Konsequenzen für die Integrierbarkeit des Systems. Eine bessere Lösung gelingt unter Anwendung der Gaußschen Fehlerfunktion, kurz erf-Funktion. Diese Funktion ist von minus- bis plus-Unendlich definiert und lässt sich so adaptieren, dass sie sich zwischen den Werten null und eins stetig ändert. Die einzelnen Anteile der Gaußschen Fehlerfunktion sowie der Unterschied zur Signumfunktion sind in Abb. 7 dargestellt.

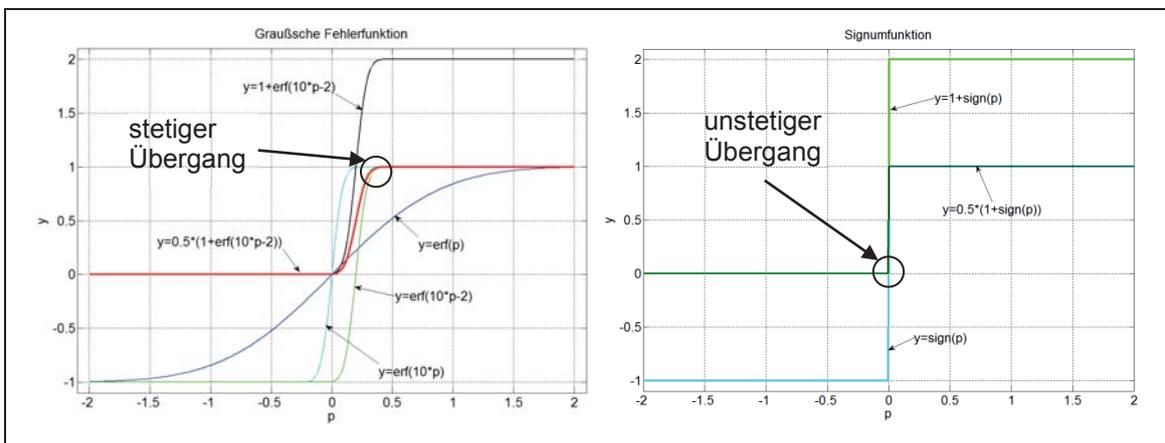


Abb. 7: Gegenüberstellung der Gaußschen Fehlerfunktion (links) und der Signumfunktion (rechts)

Für die Massenströme über ein Druckrückschlagventil ergibt sich unter Verwendung der Fehlerfunktion:

$$\dot{m}_{\text{Ein}} = \frac{(1 + \text{erf}(10 \cdot (p_{i-1} - p_i) - 2))}{2} \cdot \frac{p_{i-1} - p_i}{\Phi} \quad (25)$$

$$\dot{m}_{\text{Aus}} = \frac{(1 + \text{erf}(10 \cdot (p_i - p_{i+1}) - 2))}{2} \cdot \frac{p_i - p_{i+1}}{\Phi} \quad (26)$$

Nachdem die allgemeinen theoretischen Gleichungen für die Berechnung des NR-Motors aufgestellt sind, werden die Gleichung (23) sowie die Gleichungen für die Massenströme auf die einzelnen Teilsysteme angewandt. Im Folgenden wird die Anwendung des Gleichungssystems auf ein einzelnes Teilsystem demonstriert.

3 Anwendung der allgemeinen Gleichungen auf das Teilsystem eins des NR-Motors

Für Teilsystem ① gilt:

Wärmekammer 1.1:

- Kein Wärmeeintrag durch Reibung,
- Keine Änderung der Temperatur durch ein variierendes Zylindervolumen,
- Wärmeeintrag infolge der höheren Flammentemperatur T_{Flamme}

$$\frac{dT_{1.1}}{dt} = \frac{\dot{m}_{4.41}}{m_{1.1}} \cdot (\kappa \cdot T_{4.4} - T_{1.1}) - \frac{\dot{m}_{1.12}}{m_{1.1}} \cdot (\kappa - 1) \cdot T_{1.1} + \frac{(k \cdot A)_{1.1}}{m_{1.1} \cdot c_V} \cdot (T_{\text{Flamme}} - T_{1.1})$$

Gesteuertes Ventil 1.12 von der Wärmekammer zum Expansionszylinder:

- Annahme: Fluid strömt nur in eine Richtung (aus der Wärmekammer in den Expansionszylinder)

$$\dot{m}_{1.12} = \text{interp1}(X_{1.12}, Y_{1.12}, \varphi(0 \leq \varphi \leq 2 \cdot \pi), 'cubic') \cdot \frac{p_{1.1} - p_{1.2}}{\Phi}$$

Expansionszylinder 1.2:

- Wärmeeintrag durch Reibung und infolge der höheren Flammentemperatur T_{Flamme} ,
- Änderung der Zylindertemperatur durch variierendes Zylindervolumen

$$\begin{aligned} \frac{dT_{1.2}}{dt} &= \frac{\dot{m}_{1.12}}{m_{1.12}} \cdot (\kappa \cdot T_{1.1} - T_{1.2}) - \frac{\dot{m}_{1.23}}{m_{1.2}} \cdot (\kappa - 1) \cdot T_{1.2} - (\kappa - 1) \cdot \frac{T_{1.2}}{V_{1.2}} \cdot \frac{dV_{1.2}}{dt} + \frac{\eta}{m_{1.2} \cdot c_V} \cdot \left(\frac{\omega}{2 \cdot \pi}\right)^2 \\ &+ \frac{(k \cdot A)_{1.2}}{m_{1.2} \cdot c_V} \cdot (T_{\text{Flamme}} - T_{1.2}) \end{aligned}$$

mit:

$$V_{1.2} = V_{1.2\text{Max}} - \frac{\Delta V_{1.2\text{Max}}}{2} \cdot (1 - \cos \varphi_{\text{NR}}) \qquad \frac{dV_{1.2}}{dt} = -\frac{\Delta V_{1.2\text{Max}}}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega$$

Gesteuertes Ventil 1.23 vom Expansionszylinder zum Wärmetauscher/Kühler:

- Annahme: Fluid strömt nur in eine Richtung (aus dem Expansionszylinder in den Wärmetauscher)

$$\dot{m}_{1.23} = \text{interp1}(X_{1.23}, Y_{1.23}, \varphi(0 \leq \varphi \leq 2 \cdot \pi), 'cubic') \cdot \frac{p_{1.2} - p_{1.3}}{\Phi}$$

Wärmetauscher/Kühler 1.3:

- Kein Wärmeeintrag durch Reibung,
- Keine Änderung der Temperatur durch ein variierendes Zylindervolumen,
- Temperaturabsenkung durch eine niedrigere Umgebungstemperatur/Kühlmediumtemperatur $T_{\text{Kühlung}}$

$$\frac{dT_{1.3}}{dt} = \frac{\dot{m}_{1.23}}{m_{1.3}} \cdot (\kappa \cdot T_{1.2} - T_{1.3}) - \frac{\dot{m}_{1.34}}{m_{1.3}} \cdot (\kappa - 1) \cdot T_{1.3} + \frac{(k \cdot A)_{1.3}}{m_{1.3} \cdot c_V} \cdot (T_{\text{Kühlung}} - T_{1.3})$$

Rückschlagventil 1.34 vom Wärmetauscher zum Kompressionszylinder:

- Kein Rückströmen vom Kompressionszylinder in den Wärmetauscher möglich

$$\dot{m}_{1.34} = \frac{(1 + \text{erf}(10 \cdot (p_{1.3} - p_{1.4}) - 2))}{2} \cdot \frac{p_{1.3} - p_{1.4}}{\Phi}$$

Kompressionszylinder 1.4:

- Wärmeeintrag durch Reibung,
- Temperaturabsenkung infolge der niedrigeren Umgebungstemperatur/Kühlmediumtemperatur $T_{\text{Kühlung}}$,
- Veränderung der Zylindertemperatur durch variierendes Zylindervolumen

$$\begin{aligned} \frac{dT_{1.4}}{dt} &= \frac{\dot{m}_{1.34}}{m_{1.4}} \cdot (\kappa \cdot T_{1.3} - T_{1.4}) - \frac{\dot{m}_{1.41}}{m_{1.4}} \cdot (\kappa - 1) \cdot T_{1.4} - (\kappa - 1) \cdot \frac{T_{1.4}}{V_{1.4}} \cdot \frac{dV_{1.4}}{dt} + \frac{\eta}{m_{1.4} \cdot c_V} \cdot \left(\frac{\omega}{2 \cdot \pi}\right)^2 \\ &+ \frac{(k \cdot A)_{1.4}}{m_{1.4} \cdot c_V} \cdot (T_{\text{Kühlung}} - T_{1.4}) \end{aligned}$$

mit:

$$V_{1.4} = V_{1.4\text{Max}} - \frac{\Delta V_{1.4\text{Max}}}{2} \cdot (1 + \cos \varphi_{\text{NR}})$$

$$\frac{dV_{1.4}}{dt} = + \frac{\Delta V_{1.4\text{Max}}}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega$$

Rückschlagventil 1.41 vom Kompressionszylinder zur Wärmekammer des nächsten Teilsystems:

- Kein Rückströmen von der Wärmekammer des nächsten Teilsystems in den Kompressionszylinder möglich

$$\dot{m}_{1.41} = \frac{(1 + \operatorname{erf}(10 \cdot (p_{1.4} - p_{2.1}) - 2))}{2} \cdot \frac{p_{1.4} - p_{2.1}}{\Phi}$$

Analog zum Teilsystem eins werden die Gleichungen für die übrigen Teilsysteme aufgestellt. Mit den anschließend zu einem Gleichungssystem zusammengefassten Gleichungen werden die Temperatur- und Druckverläufe in den Bauteilen über eine Kurbelwellendrehung berechnet. Zusätzlich werden die Massenströme über die Ventile bestimmt.

3.1 Diskussion und Darstellung der Simulationsergebnisse

Wird von einem symmetrischen Aufbau des NR-Motors ausgegangen, so ist es ausreichend, ein Teilsystem auszuwerten. Für Teilsystem ① sind der Verlauf der Druck-, Temperatur- und Massenstromgrößen in Abb. 8 dargestellt. Die Zustandsgrößen der anderen Teilsysteme verhalten sich analog, nur dass deren Kurven phasenverschoben sind. Das sei durch die zusätzliche Druckkurve der Wärmekammer des Teilsystems ② und des Kompressionszylinder des Teilsystems ④ in Abb. 8 verdeutlicht. Es ist aus deren Verlauf zu erkennen, dass benachbarte Teilsysteme jeweils um 180 Grad phasenverschoben sind. Dies ist auf die Verbindung der Teilsysteme über das Rhombusgetriebe zurückzuführen.

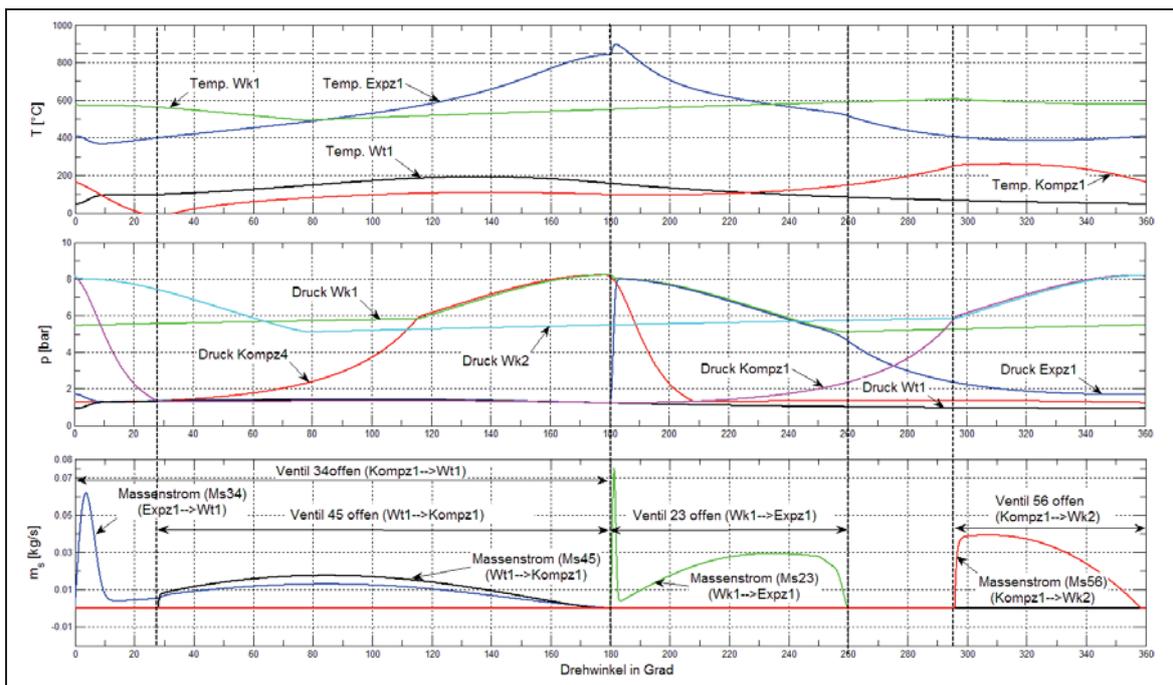


Abb. 8: Druck, Temperatur und Massenströme für eine Umdrehung im Teilsystem eins

In Abb. 8 ist zu erkennen, dass der maximale Druck im System einen Wert von acht bar nicht überschreitet. Dieser baut sich im jeweiligen Expansionszylinder des vorhergehenden Teilsystems (hier: Kompz4) und der Wärmekammer (hier: Wk1) kontinuierlich auf und wird beim Öffnen des Schaltventils (hier: Ventil V1.12) zum Expansionszylinder (hier: Expz1) in diese entspannt. Dadurch bewegt sich das Kolbensystem. Das in dem zugehörigen Kompressionszylinder (hier: Kompz1) befindliche Arbeitsmedium wird gleichzeitig verdichtet und in die Wärmekammer des nachfolgenden Teilsystems (hier: Wk2) über das Druckrückschlagventil verschoben. Bei der Rückwärtsbewegung des Kolbensystems ist das Schaltventil V1.12 geschlossen und das im Expansionszylinder (hier: Expz1) befindliche Arbeitsmedium wird nahezu isobar über den Wärmetauscher (hier: Wt1) in den Kompressi-

onszylinder (hier: Kompz1) verschoben. Dies ist am gezeichneten Druckverlauf Wk1 zwischen 180 Grad und 360 Grad zu erkennen.

Zusätzlich zu den Druck- und Temperaturkurven sind die Massenströme über die Ventile des Teilsystems ① in Abb. 8 dargestellt. Bei den Massenströmen ist erkennbar, dass keiner der Massenströme jemals kleiner als null wird und somit kein Rückstrom des Arbeitsgases stattfindet. Im Fall der Schaltventile bedeutet das, dass die weiter oben getroffene Vereinfachung (Annahme: kein Rückstrom über Schaltventile) als zulässig angesehen werden kann.

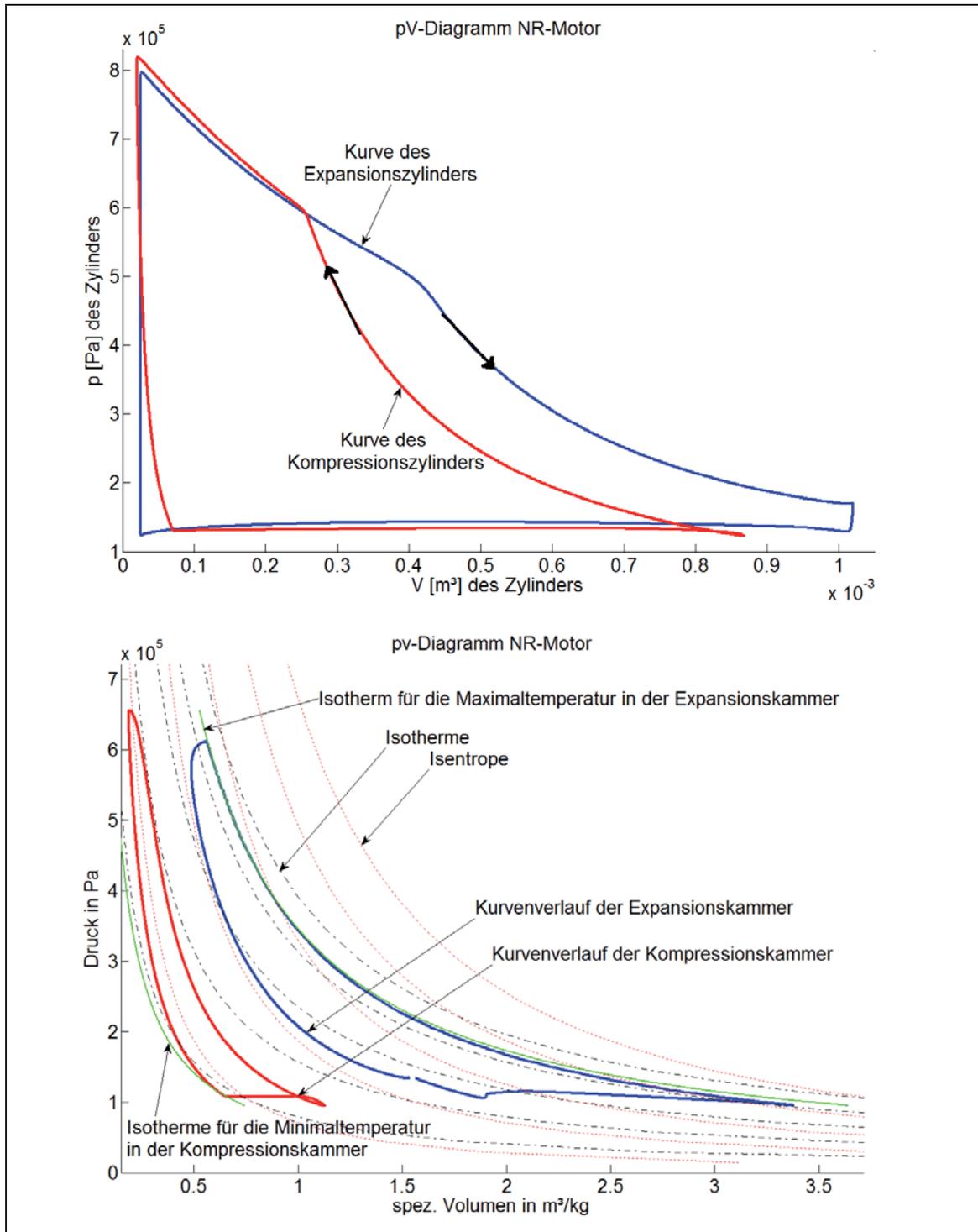


Abb. 9: pV -Diagramm und spezifisches pv -Diagramm des NR-Motors

Aus den berechneten Druckverläufen für den Expansions- und Kompressionszylinder kann die Erstellung eines pV-Diagramms (Arbeitsdiagramm; siehe Abb. 9, oben) vorgenommen werden. In dem pV-Diagramm werden die Zylinderdrücke in Abhängigkeit des Zylindervolumens dargestellt. Mit Hilfe eines solchen Diagrammes kann die zu erwartende theoretische Leistung des Motors bestimmt werden. Dabei ist die oben festgelegte Vorzeichenregelung zu beachten;

- dem System zugeführte Größen sind positiv (+) und
- aus dem System abgezogene Größen sind negativ (-) zu werten.

Abb. 9 stellt das pV-Diagramm des NR-Motors mit der Realisierung der vollständigen Expansion im Arbeitsprozess des Gases vor.

Das in Abb. 9 dargestellte pV-Diagramm muss für den Vergleich mit anderen Wärmekraftprozessen in ein spezifisches pv-Diagramm umgewandelt werden. Dieses ist unten in Abb. 9 dargestellt. Im spezifischen Diagramm ist gut zu erkennen, dass die Expansion im Expansions- und Kompressionszylinder jeweils vollständig abläuft und somit die eingeschlossene Fläche vergrößert.

3.2 Auswertung des pV-Diagramms zur Leistungsbestimmung

Unter Berücksichtigung der Vorzeichenregelung ist die Fläche des Expansionszylinders als negativ und die des Kompressionszylinders als positiv zu werten. Die Größe der Flächen ist dabei ein Maß für die vom Expansionszylinder verrichtete beziehungsweise der am Kompressionszylinder benötigten Arbeit. Für die Differenz der Flächen ergibt sich die Nutzarbeit W :

$$W = W_{\text{Expz.}} + W_{\text{Kompz.}} = -|W_{\text{Expz.}}| + |W_{\text{Kompz.}}|$$

Um mit der aus dem pV-Diagramm bestimmten Arbeit die theoretische Leistung zu berechnen, muss die Arbeit W mit der Drehzahl n multipliziert (gegeben durch die Kurbelwellendrehzahl) und das Ergebnis um die aufzubringende Energie zum Überwinden der Reibung am Expansions- und Kompressionskolben verringert werden. Für die theoretisch abgegebene Leistung \dot{P}_{th} des Motors ergibt sich:

$$\begin{aligned} \dot{P}_{\text{th}} &= \dot{P}_{\text{th Motor}}^{(-)} + \dot{P}_{\text{Reib.Kompz}} + \dot{P}_{\text{Reib.Expz}} \\ \dot{P}_{\text{th}} &= (W_{\text{Expz.}} \cdot z - W_{\text{Kompz.}} \cdot z) \cdot \frac{n}{60} + \dot{Q}_{\text{Expz.}} \cdot z + \dot{Q}_{\text{Reib.Kompz.}} \cdot z \\ \dot{P}_{\text{th}} &= z \cdot \left((W_{\text{Expz.}} - W_{\text{Kompz.}}) \cdot \frac{n}{60} + (\eta_{\text{Expz.}} + \eta_{\text{Kompz.}}) \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \right) \end{aligned} \tag{27}$$

n	Drehzahl der Kurbelwelle	[min ⁻¹]
z	Anzahl der Kompressions- und Expansionszylinder (hier vier)	[1]
W_{Kompz}	Arbeitsaufnahme durch die Kompressionszylinder	[J]
W_{Expz}	Arbeitsabgabe durch die Expansionszylinder	[J]
\dot{P}_{th}	Theoretische Leistung des NR-Motors	[W]
$\eta_{\text{Reib.Kompz/Expz}}$	Angenommener Reibkoeffizient für den Kompressions- und Expansionszylinder	[J · s]

Werden für verschiedene Drehzahlen des NR-Motors die theoretische Arbeit und anschließend mit Gleichung (27) die theoretische abgegebene Leistung bestimmt, kann die in Abb. 10 dargestellte theoretische Leistungskurve ermittelt werden.

Hinsichtlich des Drehzahlverhaltens kann der NR-Motor durchaus mit dem Stirling-Motor verglichen werden. Die Wärmezufuhr erfolgt bei beiden Wärmekraftmaschinen durch konvektiven und konduktiven Wärmetransport, der -anders als eine Verbrennung- stark von der Zeit aber auch von der Wärmeübertragungsfläche abhängig ist. Je höher die Drehzahl des Motors ist, umso weniger Zeit bleibt für die Wärmezufuhr pro Zyklus. Für den NR-Motor wurde eine Leerlaufdrehzahl von 900 min⁻¹ ermittelt. Sie ergibt sich aus einem Gleichgewicht zwischen der von den Zylindern abgegebenen Volumenarbeitsleistung und der mechanischen Gleitreibung \dot{Q}_{Reib} nach Gleichung (19). Die Leistungsverluste bedingt durch die Strömungswiderstände werden in der Gleichung für die innere Energie berücksichtigt. Entsprechend des Einflusses beider Größen entsteht bei niedrigeren Drehzahlen ein

nutzbarer Leistungsüberschuss, der bei ca. 300 min^{-1} maximal wird und etwa 1.6 kW beträgt. Nenndrehzahlen von Stirlingmotoren können durchaus bei 1000 min^{-1} und höher liegen [SZ05].

Mit den Simulationsergebnissen kann zunächst theoretisch das NR-Motorkonzept bewiesen und das Betriebsverhalten bei der Trennung von Kompression und Expansion untersucht werden. Zum endgültigen Beweis des Motorenkonzepts und der Validierung des Berechnungsmodells dient die Auswertung der Messungen am realen Prototypen. Die praktischen Versuche stehen derzeit noch aus.

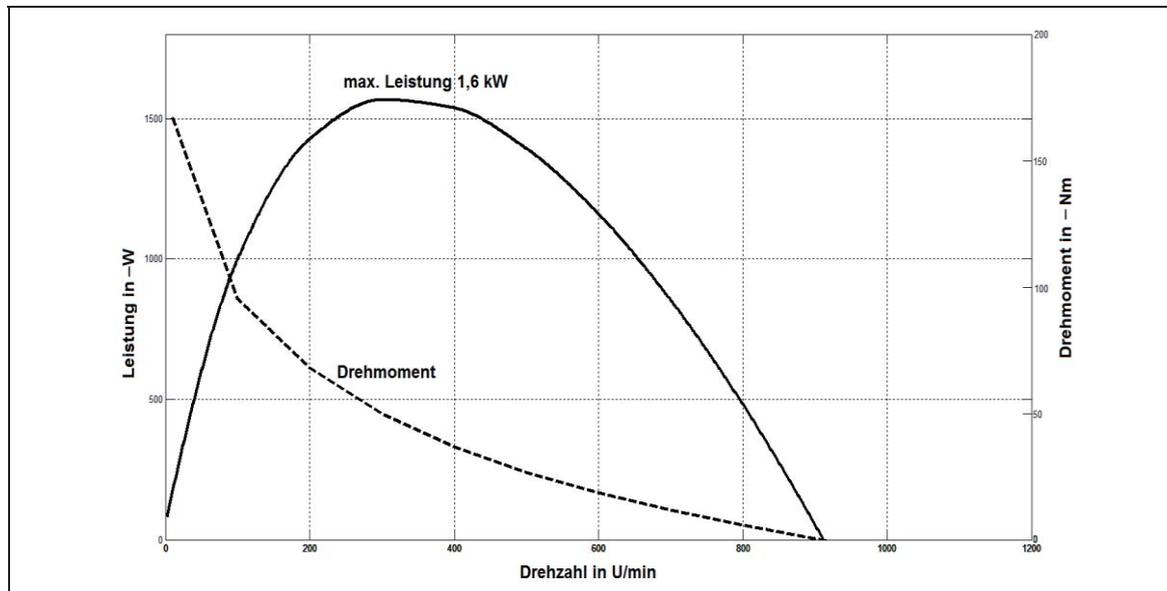


Abb. 10: Theoretische Leistungskurve des NR-Motors

4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wurde der Aufbau sowie die mathematische Beschreibung eines neuen thermodynamischen Wärmekraftprozesses vorgestellt. Neu an diesem Wärmekraftprozess ist die vollständige Expansion des Arbeitsgases in der Kolbenkraftmaschine, wobei die vollständige Expansion durch eine Trennung von Kompression und Expansion mit jeweils gezielter Temperierung der Einzelbauteile erreicht wird. Hierfür wurde gezeigt, dass durch die vollständige Expansion des Arbeitsgases die Fläche des pV-Diagramms vergrößert und somit die Exergie des Arbeitsgases besser genutzt wird. Dies führt zu einem höheren thermischen Wirkungsgrad. Weiterhin wurde die theoretische Leistungskurve für die vorliegende Kolbenkraftmaschine berechnet und angegeben.

5 Literatur

- [GF97] Grote, K.-H.; Feldhusen J.: „DUBBEL - Taschenbuch für den Maschinenbau“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1997
- [Sch11] Schweizer, Anton: „Projektierungshilfe für Stromaggregate - Druckverlust durch Armaturen“, Online verfügbar unter http://www.schweizer-fn.de/stroemung/druckverlust/v2_druckverlust.htm, zuletzt aktualisiert am 17.10.2011
- [SZ05] Schleder F.; Zoppke H.: „Auslegung von Stirlingmotoren - Eine Frage der Drehzahl“, Online verfügbar unter <http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Projekte/Seeg/NTDrehzahl.pdf> BWK Bd.5 (2005) Nr.6
- [VDI06] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: „VDI-Wärmeatlas“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006

Bitte per Post oder Fax senden:

Tel.: +49 (0) 80 51 - 96 59 3 49

Fax: +49 (0) 80 51 - 96 74 3 37

e-mail: info@nafems.de

Adresse für Fensterkuvert

NAFEMS GmbH
Osterham 23D-83233 Bernau am Chiemsee
Germany

Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (1/2012)

 Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft | <input type="checkbox"/> Anzeigenmarkt |
| <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. Ich interessiere mich für www.CAE-Stellenmarkt.de. Bitte kontaktieren Sie uns.

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: _____

Bitte per Post oder Fax senden:

Tel.: +49 (0) 80 51 - 96 59 3 49

Fax: +49 (0) 80 51 - 96 74 3 37

e-mail: info@nafems.de

Adresse für Fensterkuvert



NAFEMS GmbH
Osterham 23

D-83233 Bernau am Chiemsee
Germany

Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (1/2012)

Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft | <input type="checkbox"/> Anzeigenmarkt |
| <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.

Ich interessiere mich für www.CAE-Stellenmarkt.de. Bitte kontaktieren Sie uns.

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: _____

NAFEMS Online-Magazin

NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH
Osterham 23
D-83233 Bernau am Chiemsee, Germany

Tel. +49 (0) 80 51 – 96 59 3 49
Fax +49 (0) 80 51 – 96 74 3 37
e-mail: info@nafems.de

www.nafems.org

ONE
ASSOCIATION
1 0 0 0 M E M B E R
O R G A N I S A T I O N S

ONE
VISION
3 0 0 T E C H N I C A L
G R O U P P A R T I C I P A N T S

ONE
COMMUNITY
O V E R 3 0 0 0
E V E N T A T T E N D E E S

ONE
NAFEMS
T H E I N T E R N A T I O N A L
A S S O C I A T I O N F O R
T H E E N G I N E E R I N G
A N A L Y S I S C O M M U N I T Y



www.nafems.org