

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

## Fachbeiträge:

### Fokus Faserverbundwerkstoffe

Theorie und Anwendung von nichtlinearen Konstitutivgesetzen für Verbundwerkstoffe im Rahmen von FEM Analysen

H. E. Pettermann  
 (Austrian Aeronautics Research (AAR) - Technische Universität Wien)

Simulation des Schädigungsverhaltens von thermomechanisch beanspruchten Blindnietverbindungen in CFK/Al-Strukturen

W. Hufenbach, M. Gude, A. Freund  
 (ILK, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden)

### Fokus Computational Fluid Dynamics

Unstrukturierte finite Elemente Simulationen für die Tsunami-Frühwarnung in Indonesien

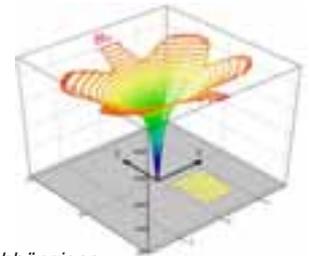
J. Behrens (Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research)

Berechnung komplexer Mehrphasenströmungen gekoppelt mit Wärmeübertragung in Industrieanwendungen

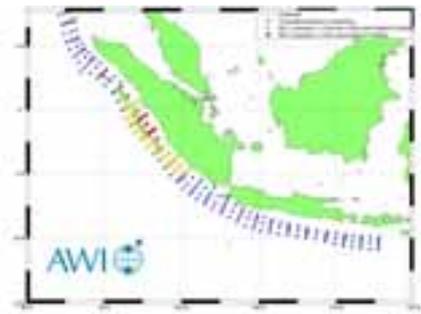
D. Lakehal (Ascomp GmbH)

Das Auge im System – Strömungssimulation optimiert Messgeräte

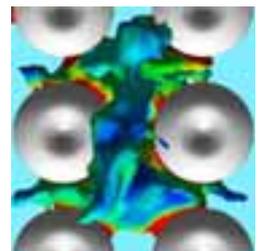
M. Lottfey (Fluent Deutschland GmbH);  
 A. Vedder (VSE Volumenteknik GmbH)



Richtungs- und lastabhängiges Nietzonen-Strukturverhalten



Epizentren von Tsunami-Szenarien



3D Drauf- und Seitenansicht der Temperaturverteilung auf einer Gasoberfläche: Turbulente Strömung

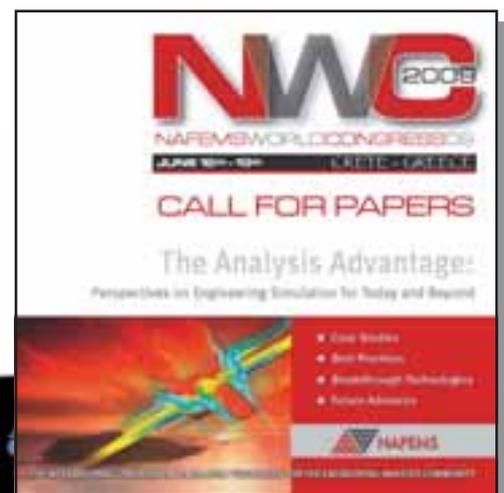
#### Trainingskurse

- Basic 1: Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre  
06.-07.10.2008 \*
- Basic CFD: Praxisorientierte Grundlagen für CFD-Berechnungen  
10.-11.11.2008 \*
- Basic 2: Practical CFD Analysis (in English)  
10.-11.11.2008 \*

#### Seminar

- Simulation und Test in der Stukturdynamik (Call for Papers)  
12.-13.11.2008 \*

\* Wiesbaden



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

Sehr geehrte Leserin,  
sehr geehrter Leser,

Sie erhalten hiermit das 10. Heft des NAFEMS Magazins, der Zeitschrift für numerische Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete. Nun ist das allein sicher noch kein Grund zum feiern. Ich möchte aber nicht versäumen, allen denen zu danken, die das regelmäßige Erscheinen dieser Zeitschrift möglich machen. Dazu gehören die Autoren der wissenschaftlichen Beiträge ebenso wie die Inserenten und die Sponsoren. Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle die Arbeit der Redaktion in Gestalt von Herrn Oswald, der auch für das Layout verantwortlich ist. Nur wer einmal versucht hat, Beiträge aus den verschiedensten Quellen mit unterschiedlichen Formaten und Darstellungsweisen zu einer Einheit zusammenzufassen, die zudem noch den Randbedingungen der Mailserver genügt, der kann die Ergebnisse vollständig würdigen.

In dem vorliegenden Heft finden Sie zwei Beiträge aus dem NAFEMS Seminar "Simulation von Verbunden: Material und Strukturen" vom November 2007. Darin werden zum einen nichtlineare Materialgesetze für Verbunde mit Metall- und Kunststoffmatrix behandelt; zum anderen wird das Versagensverhalten einer Nietverbindung zwischen einer CFK- und einer Aluminiumstruktur untersucht. Ebenfalls zwei Beiträge stammen aus dem NAFEMS Seminar "Simulation komplexer Strömungsvorgänge (CFD) – Anwendungen und Trends" vom März 2008. Einer behandelt die numerische Simulation von Tsunamis und Überschwemmungen für das Deutsche Frühwarnsystem in Indonesien; in dem anderen werden Mehrphasenströmungen besonders mit Anwendung auf Wärmetauscher berechnet. Zudem wird ein direkt eingesandter Artikel aufgenommen, der sich mit der Anwendungen der CFD für die optimale Auslegung von Durchflussmessgeräten befasst. Bereits diese kleine Auswahl lässt erkennen, wie vielfältig die Anwendungsmöglichkeiten der numerischen Simulation sind. Aber auch die dabei auftretenden Schwierigkeiten und Probleme werden angesprochen.

Ich wünsche Ihnen eine informative und anregende Lektüre.

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.de](http://www.altair.de)



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



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



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



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



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

## Die nächsten NAFEMS Trainingskurse

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

**Basic 1: Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre** 06. - 07. Okt. 2008

Referent: Dr.-Ing. Yasar Deger (HSR - Hochschule für Technik Rapperswil)

**Basic 2: Praxisorientierte Grundlagen für FEM-Analysen** 10. - 11. Nov. 2008

Referent: Dr.-Ing. Yasar Deger (HSR - Hochschule für Technik Rapperswil)

**Practical CFD Analysis** (in English)

10. - 11. Nov. 2008

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske (ISMVT - Steinbeis-Transferzentrum)



Dr.-Ing. Y. Deger  
HSR



Prof. Dr. U. Janoske,  
ISMVT

## Das nächste NAFEMS Seminar in DACH

**Zusammenwirken von Simulation, Experiment und Messung:  
Neue Anforderungen und neue Möglichkeiten in der  
Strukturmechanik**

12. - 13. Nov. 2008

Call for Papers - Abgabetermin: 1. September 2008

Alle Kurse und Seminare finden in Wiesbaden statt. Mehr Informationen zu den Veranstaltungen sowie das internationale NAFEMS Seminar- und Kursangebot finden Sie unter [www.nafems.org](http://www.nafems.org).

## NAFEMS Literatur

**NAFEMS bietet mit über 200 Publikationen eine umfangreiche Auswahl an Fachliteratur im Berechnungsumfeld an.**

Häufig bestellte Publikationen sind zum Beispiel:

- How To Undertake a Smoke Movement Analysis in Complex Enclosed Spaces using CFD
- NAFEMS QSS 001 - Engineering Simulation – Quality Management Systems – Requirements
- How To Do Seismic Analysis Using Finite Elements
- NAFEMS Work Session on the Management of Simulation Data
- A Finite Element Primer
- How to Use Beam, Plate and Shell Elements
- BENCHmark Magazin

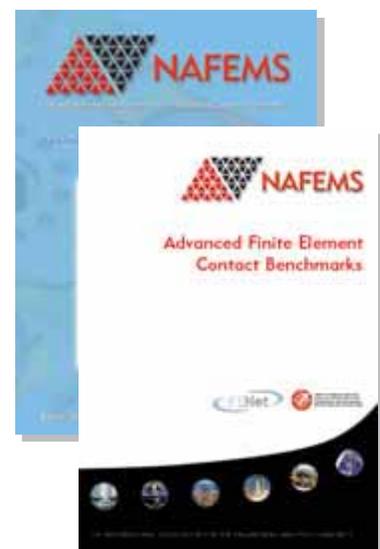
Auch in Zukunft wird sich NAFEMS um die Weiterentwicklung und Erstellung neuer Fachliteratur für ihre Mitglieder und für den weiteren Kreis der Ingenieure bemühen.

Falls Sie Interesse haben, eine Publikation im Auftrag von NAFEMS zu verfassen oder daran mitzuwirken, setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung.

Aktuell werden Autoren für die geplante NAFEMS Publikation:

**„How to Analyse Practical Problems“**

gesucht. Deadline für Vorschläge ist der 21. September 2008. Informationen hierzu finden sie unter [www.nafems.org/publications/tender](http://www.nafems.org/publications/tender).



**Ein vollständige Liste und online-Bestellmöglichkeiten finden Sie unter**

[www.nafems.org/publications](http://www.nafems.org/publications)

**Impressum**

**Editor in Chief**

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

**Redaktioneller Beirat**

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

**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  
Mobile +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 16.10.2007

**Verteilung / Bezug**

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

**Copyright © 2008, Werbos GbR.**

Nachdruck – auch auszugsweise -, Ver-  
vielfältigung oder sonstige Verwertung  
ist nur mit schriftlicher Genehmigung  
unter ausdrücklicher Quellenangabe  
gestattet. Gekennzeichnete Artikel stel-  
len die Meinung des Autors, nicht un-  
bedingt die Meinung der Redaktion dar.  
Für unverlangt eingesandte Manuskrip-  
te und Datenträger sowie Fotos über-  
nehmen wir keine Haftung. Alle Unter-  
lagen, insbesondere Bilder, Zeichnun-  
gen, Prospekte etc. müssen frei von  
Rechten Dritter sein. Mit der Einsen-  
dung erteilt der Verfasser / die Firma  
automatisch die Genehmigung zum ko-  
stensen weiteren Abdruck in allen Pu-  
blikationen von NAFEMS, wo auch das  
Urheberrecht für veröffentlichte Manu-  
skripte bleibt. Eine Haftung für die Rich-  
tigkeit der Veröffentlichungen kann trotz  
Prüfung durch die Redaktion vom Her-  
ausgeber 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 DACH Aktuell / Literatur ..... 4

Impressum ..... 5

Inhalt ..... 5

Über NAFEMS / Mitgliedschaft ..... 6

NAFEMS EU-Projekt Autosim ..... 7

    NAFEMS Kongresse ..... 8

Neuigkeiten ..... 9 - 15

Veranstaltungskalender ..... 16

**Stellenanzeigen** ..... 17 - 21

**Fachbeiträge**

**Fokus Verbundwerkstoffe**

**Theorie und Anwendung von nichtlinearen Konstitutiv-  
gesetzen für Verbundwerkstoffe im Rahmen von FEM Analysen .... 22**

H. E. Pettermann  
(Austrian Aeronautics Research (AAR) - Technische Universität Wien)

**Simulation des Schädigungsverhaltens von thermo-  
mechanisch beanspruchten Blindnietverbindungen  
in CFK/Al-Strukturen ..... 30**

W. Hufenbach, M. Gude, A. Freund  
(ILK, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden)

**Fokus Computational Fluid Dynamics (CFD)**

**Unstrukturierte finite Elemente Simulationen  
für die Tsunami-Frühwarnung in Indonesien ..... 41**

J. Behrens (Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research)

**Berechnung komplexer Mehrphasenströmungen gekoppelt  
mit Wärmeübertragung in Industrieanwendungen ..... 52**

D. Lakehal (Ascomp GmbH)

**Das Auge im System - Strömungssimulation optimiert  
Messgeräte bei VSE Volumentchnik ..... 63**

M. Lofey (Fluent Deutschland GmbH);  
A. Vedder (VSE Volumentchnik GmbH)

**Rückmeldeformular** ..... 67

**Werbeanzeigen**

Comsol Multiphysics GmbH ..... 13

Schneider Digital · Josef J. Schneider e.K. .... 11

## Über NAFEMS

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

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

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

### Mitglieder des internationalen NAFEMS Councils

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

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

### Mitglieder des deutschen NAFEMS Steering Committees

Dr.-Ing. W. Dirschmid (Consultant), Chairman  
 Dr.-Ing. Y. Deger (Hochschule Rapperswil)  
 Dr.-Ing. A. Gill (Fluent Deutschland GmbH)  
 Dr.-Ing. R. Helfrich (Intes GmbH)  
 Dipl.-Ing. G. Müller (Siemens AG)  
 Dr.-Ing. G. Müller (CADFEM GmbH)  
 Dr. Felix 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 (Harman/Becker Automotive Systems)  
 Prof. Dr.-Ing. habil. M. Zehn (TU Berlin / Femcos mbH)

## Mitglied bei NAFEMS?

NAFEMS hat über **830 Mitgliedsunternehmen und -Institutionen in 37 Ländern.**

### NAFEMS Mitglieder erhalten unter anderem:

- Benchmark (Internationales FEM-Magazin)
- Literatur
- Freie Seminarplätze
- Ermäßigungen für Trainingskurse, Kongresse und Literatur
- Zugriff auf passwortgeschützten Webbereich mit Kontaktmöglichkeiten und Informationen
- Kontakt zu über 830 Organisationen weltweit

## Werden auch Sie Mitglied !



„Benchmark“  
 – das internationale NAFEMS Magazin

Jetzt abonnieren  
 – für NAFEMS-Mitglieder natürlich frei

Weitere Informationen erhalten Sie unter:

[www.nafems.org](http://www.nafems.org)

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

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

# autosim

## Projektbericht in Kürze verfügbar



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

Nach den Workshops in Barcelona/ Spanien (Jan. 2006), Sonnenhausen bei München (Mai 2006), Lissabon/ Portugal (Nov. 2006), Guyancourt nahe Versailles/Frankreich (Juli 2007), dem Mid-term Review in Graz/Österreich (Januar 2007) und

den beiden letzten Workshops in Bilbao/Spanien (Nov. 2007) und Birmingham/UK (April 2008) fand am 20. Juli 2008 ein abschließendes Meeting des Consortium Steering Committees in Mestre/Italien statt.

Das Projekt läuft noch bis 31. August. In Kürze wird ein Projektbericht veröffentlicht, der die in den vergangenen drei Jahren gesammelten Ergebnisse der 32 Projektpartner sowie zahlreicher externer Experten zum Thema „Best Practices and Breakthrough Technologies in Automotive Engineering Simulation“ zusammenfaßt. Einzelne Präsentationen, Beiträge und Teilberichte des Projektes finden Sie auf der website zum downloaden unter:

[www.autosim.org](http://www.autosim.org)

NAFEMS bedankt sich herzlich bei den Projektmitgliedern, den externen Experten und insbesondere bei den Mitgliedern des Consortium Steering Committees.

### Weitere Projekte

#### CCOPPS

Certification of Competencies in the Power and Pressure Systems Industry  
[www.nafems.org/projects/ccopps/](http://www.nafems.org/projects/ccopps/)

#### ILTOF

Innovative Learning and Training On Fracture  
[www.nafems.org/projects/iltof/](http://www.nafems.org/projects/iltof/)

#### NUFRIC

Numerical Based Medium Level Training on Industrial Friction Problems  
[www.nafems.org/projects/nufric/](http://www.nafems.org/projects/nufric/)

#### GEM

Generic Engineering Analysis Model  
[/www.nafems.org/projects/gem/](http://www.nafems.org/projects/gem/)

#### SAFESA

SAFE Structural Analysis  
[www.nafems.org/projects/safesa/](http://www.nafems.org/projects/safesa/)

#### FENet

Thematic Network  
[www.nafems.org/projects/fenet/](http://www.nafems.org/projects/fenet/)



Teilnehmer des Autosim Workshops in Birmingham, UK

Reichen Sie einen Abstract ein!

**NWMC** 2009

NAFEMSWORLDCONGRESS09

JUNE 16<sup>th</sup> - 19<sup>th</sup>

CRETE - GREECE

**CALL FOR PAPERS**

Abstract Submission deadline: October 6, 2008

The Analysis Advantage:

Perspectives on Engineering Simulation for Today and Beyond



THE INTERNATIONAL CONGRESS ON SIMULATION TECHNOLOGY FOR THE ENGINEERING ANALYSIS COMMUNITY

- Case Studies
- Best Practices
- Breakthrough Technologies
- Future Advances



[www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress)

In the Jahren zwischen dem alle zwei Jahre stattfindendem NAFEMS World Congress werden in bestimmten Regionen lokale NAFEMS Konferenzen organisiert. Hier die entsprechenden Termine. Nähere Informationen finden Sie unter [www.nafems.org](http://www.nafems.org)

**NA** Regional Summit  
2008  NAFEMS  
2020 Vision of Engineering Analysis and Simulation

29. - 31. Oktober 2008, Hampton, Virginia, USA

**NORDIC**  
 NAFEMS Regional Summit  
Best Practises and Trends  
in Engineering Simulation and Analysis 2008

17. - 18. November 2008, Göteborg, Schweden

## Altair Engineering

### Altair baut westeuropäische Präsenz durch Partnervereinbarung mit FEMTO aus

Altair Engineering, Inc. gibt eine Partnervereinbarung mit FEMTO Engineering, einem niederländischen Anbieter von Software und Ingenieursdienstleistungen, bekannt. Im Rahmen der Vereinbarung wird FEMTO in den Niederlanden, Belgien und Luxemburg die komplette HyperWorks Plattform und den damit verbundenen Service anbieten. Altair kann Dank dieser Partnerschaft seinen Kunden aus den Bereichen der Luft- / Raumfahrt-, Automobil-, Fertigungs- und Anlagenbauindustrie lokale Unterstützung und professionelle Dienstleistung auf regionaler Ebene anbieten.

### Altair und FTSS entwickeln gemeinsam integrierte Lösung für Sicherheitsanalyse

Altair Engineering, Inc. gibt eine langfristig angelegte Vereinbarung mit First Technology Safety Systems, Inc. (FTSS), dem weltweit führenden Entwickler und Hersteller von hoch entwickelten physikalischen und virtuellen Crashtest Dummies bekannt. Im Rahmen dieser Vereinbarung werden die FTSS Crashtest Dummy Modelle in Altair's Crashanalyse-Software RADIOSS integriert und angeboten. Diese einzigartige Vereinbarung bildet die Grundlage für die gemeinsame Entwicklung einer integrierten und genauen Lösung für Fußgänger- und Insassenschutz, die speziell auf die Bedürfnisse der weltweiten Anwenderschaft im Bereich Crash zugeschnitten ist.

### Altair öffnet HyperWorks Software Plattform für Anwendungen von Drittanbietern

Altair Engineering gibt bekannt, dass es seine branchenführende HyperWorks Plattform für unternehmensweite Analyse und Simulation für Anwendungen von Drittanbietern geöffnet hat, und Partnerprodukte seinen Kunden jetzt auch komplett unter dem revolutionären, bedarfsorientierten Lizenzierungssystem zur Verfügung stellt. Sechs führen-

de unabhängige Softwareanbieter (ISVs) haben sich dem HyperWorks Partner Solution Programm bereits angeschlossen. Ohne dass zusätzliche Kosten für den Kunden entstehen, ermöglicht dieses Programm die Benutzung von 15 neuen Anwendungen von Drittanbietern unter Verwendung der bestehenden HyperWorks-Lizenzen.

### Altair veröffentlicht HyperWorks 9.0 und bietet Ingenieuren Zugang zu neuen Solvertechnologien und dem Global Grid

Altair Engineering gibt die Veröffentlichung von Altair HyperWorks 9.0, der neuesten Version seiner integrierten, populären Computer Aided Engineering (CAE) Softwaresuite bekannt. HyperWorks ist eine unternehmensweite Simulationsplattform die Product Lifecycle Management (PLM) Prozesse unterstützt und die führende simulationsgesteuerte Lösung für Produktentwicklung, welche in allen großen Unternehmen der Welt eingesetzt wird.

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

## ANSYS / Fluent

### Technologie von ANSYS verhilft Schwimmern im Vorfeld der Olympischen Spiele zum Erfolg

ANSYS, Inc. hat bekanntgegeben, dass bereits 35 Schwimm-Weltrekorde von Athleten gebrochen wurden, die einen mit ANSYS Simulationssoftware entwickelten Hochleistungsschwimmanzug getragen haben. Der für Profischwimmer entwickelte und im Februar vorgestellte Speedo LZR RACER Schwimmanzug hat in Tests gezeigt, dass er die Leistung von Schwimmern besser als jeder andere Schwimmanzug steigern kann. Siebzehn von insgesamt achtzehn Weltrekorde wurden allein bei der FINA Schwimmweltmeisterschaft (25m) gebrochen, was vermuten lässt, dass der Speedo LZR RACER auch bei den Olympischen Spielen in Peking ins Rampenlicht tritt. ANSYS Software spielte eine entscheidende Rolle in der Entwicklung des Schwimmanzugs. Die

Technologie wurde eingesetzt um die Wasserumströmung eines Leistungsschwimmers in der ausgestreckten Gleitposition (die direkt im Anschluß nach dem Start und bei jeder Wende eingenommen wird) vorherzusagen. So konnten die Zonen ermittelt werden, in der Reibungswiderstand und eine damit verbundene Bremswirkung auftritt. Außerdem wurden die Simulationsdaten verwendet, um die bestmögliche Platzierung der speziell dafür entwickelten widerstandsreduzierenden Speedo LZR RACER Elemente auf dem Anzug festzulegen, die diesen negativen Effekten entgegenwirken. Anschließend wurden Simulationen durchgeführt, um zu belegen dass der Widerstand tatsächlich effektiv reduziert wurde und es Athleten erlaubt, schneller als jemals zuvor zu schwimmen.

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

## Autodesk

### Autodesk schließt Übernahme von Moldflow ab

Am 25. Juni hat Autodesk die Übernahme der Moldflow Corporation erfolgreich abgeschlossen. Für 297 Millionen US-Dollar erwarb Autodesk das Unternehmen für die Simulation von Kunststoff-Spritzguss-Vorgängen und baut damit seine Digital Prototyping Strategie weiter aus.

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

## Blue Ridge Numerics

### Neue Version CFdesign v10

Blue Ridge Numerics kündigt die CFD-Software CFdesign Version 10 mit umfangreichen Erweiterungen, wie z. B. einfache Benutzbarkeit für Einsteiger in die Strömungssimulation, an. Ein HPC-Modul für Windows HPC Server ist optional erhältlich. CFdesign v10 ist verfügbar für Autodesk Inventor, Catia, CoCreate, NX, Pro/Engineer, SolidWorks, Solid Edge und SpaceClaim.

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

## CADFEM

### CADFEM und e-Xstream unterzeichnen Distributionsabkommen

Die Software DIGIMAT bietet einen vollständigen Satz an Werkzeugen für die Untersuchung der Eigenschaften von nicht-linearen, anisotropen Komposit-Materialien. Die abgeleiteten Materialgesetze finden über die DIGIMAT Schnittstellen den direkten Einsatz in FEM Berechnungen und ermöglichen unter anderem die Kopplung von Spritzguss mit strukturmechanischen Simulationen. Für den deutschsprachigen Raum wurde die Distribution von der Software des belgischen Entwicklers e-Xstream einschließlich aller produktbegleitenden Dienstleistungen im Mai 2008 der CADFEM GmbH übertragen, die damit ihr Portfolio an CAE-Werkzeugen um eine führende Lösung für mikroskopische Simulationen erweitert.

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

## CD-adapco

### Neue STAR-CD V4.06

CD-adapco kündigte die Freigabe von STAR-CD V4.06 an. Seit seiner ersten Veröffentlichung von 20 Jahren hat sich STAR-CD einen ausgezeichneten Ruf hinsichtlich seiner Vielseitigkeit erworben und ist noch immer unerreicht in seiner Fähigkeit, komplexe Multiphysikaufgabenstellungen in Verbindung mit komplizierten Geometrien (sei es mit stationären oder mit bewegten Gittern) zu bewältigen. In seinem neuesten Release steigert STAR-CD V4.06 diesen Ruf sogar noch durch einen verbesserten Vernetzungsprozess und durch die Fähigkeit physikalische Phänomene zu simulieren, die bislang jenseits der Möglichkeiten etablierter Strömungssimulationstechnologie lagen. STAR-CD V4.06 bietet insbesondere für CD-adapcos umfangreiche Anwendergemeinde an Konstrukteuren und Ingenieuren, die sich mit internen Verbrennungsmotoren beschäftigen, neue Leistungsmöglichkeiten.

[www.cd-adapco.com](http://www.cd-adapco.com)

## Comsol

### Benchmarktests von Multiphysik-Software

Weil die moderne Simulationssoftware zunehmend schnell weiterentwickelt wird, sind objektive Mess- und Vergleichsmethoden wie Benchmarktests unabdingbar. Was können die Tools leisten, wo liegen ihre Stärken und Schwächen? Dr. Darrell W. Pepper von der University of Nevada, Las Vegas und Dr. Xiuling Wang von der Purdue University-Calumet haben eine Reihe von Aufgabenstellungen für Benchmarktests publiziert. Die Zielsetzung ihres Projekts war die Entwicklung von vier Standard 3-D Aufgaben, in denen Kosten, Effizienz und Exaktheit verschiedener Software zur Multiphysik-Simulation verglichen werden sollten. In den vier Tests wurden folgende Aufgabenstellungen untersucht: Fluid-Struktur-Interaktion (FSI), vollständig gekoppelter elektronischer Stromfluss mit Joule'scher Erwärmung und Strukturanalyse, Elektromagnetische Wellenausbreitung und die magnetischen Felder innerhalb und außerhalb einse rotierenden elektrischen Generators. Der Report Benchmarking Comsol Multiphysics 3.4 beschreibt Aufgabenstellungen, Testkriterien und -methoden. Wissenschaftliche Quellen und experimentelle Daten werden kommentiert und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Vergleichstabellen und Farbgrafiken veranschaulichen die Ergebnisse. Weil Multiphysiktechnologien mittlerweile zum Standard in Forschung und Entwicklung gehören, sind Benchmarktests wie diese sehr wichtig. Betrachtet man verschiedene Codes hinsichtlich ihrer Performance kann man eine interessante Beobachtung machen: ein Multiphysik-Code kann genauso schnell oder schneller sein als spezialisierte Codes. Ob Strukturanalysen, Strömungssimulationen, Wärmetransport- oder elektromagnetische Analysen durchgeführt werden, die Lösungsgeschwindigkeit ist immer abhängig von der Lösung des Systems der Partiellen Differentialgleichungen. Alle Systeme beruhen

auf ähnlichen Lösern und Multiphysik Codes verwenden dieselben Codealgorithmen für rechenintensive Aufgabenstellungen.

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

## Dassault Systèmes

### Dassault übernimmt Engineous Software

Zum Preis von 40 Mio US Dollar übernimmt Dassault den Softwarehersteller Engineous Software. Engineous bietet die Tools iSight (Prozessintegration und -optimierung) und Fiper (Modellierung von Prozessen und Verknüpfung von Best Practices) an, die dazu verwendet werden, verschiedene Software miteinander zu verbinden und verteilte Entwicklungsumgebungen herzustellen. Diese Software soll in die Simulationsumgebung Simulia V6 von Dassault eingebunden werden.

### Neue Version Abaqus 6.8

Die Dassault Systèmes kündigt die Verfügbarkeit der Version Abaqus 6.8 an.

[www.3ds.com](http://www.3ds.com), [www.simulia.com](http://www.simulia.com)

## Engineous Software

### Dassault übernimmt Engineous Software

-> siehe Dassault Systèmes

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

## ESI Group

### Schnellster Supercomputer der Automobilindustrie bei Audi

ESI Group gibt bekannt, dass Audi zur weiteren Verbesserung seiner Sicherheitsstandards den schnellsten Computer der Automobilindustrie implementiert hat. Das neue System ist zur Optimierung der Fahrzeugsicherheit von zentraler Bedeutung und basiert auf der Simulationssoftware PAM-CRASH 2G von ESI Group und der HP Cluster-Plattform 3000BL. Das System mit einer Re-

chenleistung von 15,36 Teraflops/s wird von Audi für die Verarbeitung von Crash-Simulationsmodellen eingesetzt. Mit der Implementierung des Supercomputers steht der führende Hersteller von Premium-Fahrzeugen auf Platz 123 der Top500-Liste der schnellsten Supercomputer der Welt und verfügt über das schnellste System in der Automobilindustrie. Für die weltumspannende Ein- und Durchführung seiner globalen Fahrzeugsicherheitsprojekte ging Audi eine Partnerschaft mit ESI Group ein. Ausschlaggebend waren für Audi dabei u. a. die konkurrenzlose Recheneffizienz und einfache Anwendung der PAM-CRASH 2G-Software.

### EuroPAM 2008 ein voller Erfolg

Am 28. und 29. Mai veranstaltete ESI Group ihre jährliche europäische Anwenderkonferenz EuroPAM. Über 300 Teilnehmer folgten der Einladung nach Prag, um unter dem Motto „Get it Right the First Time with Simulation-Based Design“ aus erster Hand neueste Informationen zu erhalten, Erfahrungsberichten zu lauschen und um Erfahrungen und Ideen untereinander auszutauschen und zu diskutieren.

[www.esi-group.com](http://www.esi-group.com)

### FE-Design

#### Markteinführung der Optimierungsoftware TOSCA Fluid 1.0

FE-DESIGN führt mit TOSCA Fluid eine Neuentwicklung im Bereich der Strömungsoptimierung ein. Die Optimierungslösung TOSCA Fluid ermittelt mit Hilfe einer parameterfreien Optimierung den optimalen Strömungskanal in einem vorgegebenen Bauraum. In Kombination mit Standard-CFD Solvern ist es möglich, Bauteile, durch die flüssige oder gasförmige Materialien geleitet werden, optimal auszulegen. Auf diese Weise wird der Gesamtdruckverlust in Kanälen um bis zu 60% reduziert und der energetische Wirkungsgrad signifikant erhöht. Weitere Optimierungsziele sind gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilungen in



Professionelle 3D-Hardware

**1+1=3**

**Ihre Software +  
unsere Workstation  
+ Upgradegarantie  
bis 2010!**

Aufrüsten  
auf **12**  
**Opteron**  
"Istanbul"  
CPU-Kerne in  
nur 10 Minuten!  
Biosupdate ...  
Prozessor raus  
... Prozessor  
rein, fertig.\*

\*laut AMD Roadmap, Stand April 2008, ist die Socket-F Plattform im zweiten Halbjahr 2009 aufrüstbar auf 2 AMD Opteron "Istanbul" Prozessoren mit je 6 Kernen.

### Schneider PULSARON CAD Station

Wenn Sie heute in eine PULSARON Workstation von Schneider Digital investieren, brauchen Sie für ein Leistungs-Upgrade nur den Prozessor auszutauschen. Das garantiert AMD bis 2010 mit seinem Prozessor-Sockel F. Software-Installation und Neuregistrierung entfallen – der Betriebsausfall beträgt lediglich Minuten. **Bei einem PULSARON-Upgrade investieren Sie nur in die Komponente, die die Leistungssteigerung bringt.** Das ist maximaler Investitionsschutz, wie es ihn bisher noch nicht gab.

**Rechnen Sie mit: 0 8025 - 9930 - 0 = Ihr Vorteil!**



Tel.: + 49 (8025) 9930-0  
[www.schneider-digital.de](http://www.schneider-digital.de) · e-mail: [info@schneider-digital.de](mailto:info@schneider-digital.de)

Partner von:



ausgewählten Querschnitten sowie die Verringerung strömungsinduzierter Geräuschbildung. Das zugrundeliegende Optimierungsverfahren wurde ursprünglich von der Daimler AG entwickelt und konzipiert.

## 2. Konferenz für Angewandte Optimierung in der virtuellen Produktentwicklung

FE-DESIGN GmbH veranstaltete am 03. und 04. Juni 2008 die „2. Konferenz für Angewandte Optimierung in der virtuellen Produktentwicklung“ im Akademie Hotel in Karlsruhe-Rüppurr. An zwei Tagen trafen sich über 120 Vertreter aus der Automobilbranche, zahlreicher Zulieferfirmen sowie Repräsentanten aus den Bereichen Maschinenbau, Werkzeugbau sowie der Consumer-Industrie, um gemeinsam die aktuellen Entwicklungen und Trends rund um das Thema Prozessautomatisierung und Optimierung in der Simulation zu diskutieren sowie Ideen und Erfahrungen auszutauschen.

### Neue Generation von TOSCA Structure

FE-DESIGN stellt eine neue Generation der Optimierungslösung TOSCA Structure vor. Die seit vielen Jahren in der Industrie eingesetzte Optimierungssoftware von FE-DESIGN zeichnet sich durch zahlreiche Erweiterungen im Bereich nichtlinearer, thermischer und akustischer Aufgabenstellungen, unter Berücksichtigung praxisnaher Fertigungsbedingungen, aus. Die neuen Funktionen sind solverabhängig in Verbindung mit Abaqus, ANSYS, NASTRAN, Marc und Permas nutzbar.

[www.fe-design.de](http://www.fe-design.de)

### Ingenieurbüro Huß- und Feickert

#### Neue Version AutoFENA 1.3.0

Das Ingenieurbüro Huß & Feickert hat nach intensiven Tests die neuste Softwareversion 1.3.0 von AutoFENA 3D für den Vertrieb freigegeben. AutoFENA 3D ist ein Programm zum automatisierten Durchführen des FKM-Nachweises in ANSYS.

Der Nachweis wird für alle aus der Analyse vorhandenen Nachweispunkte (Knoten) automatisch berechnet. Dabei erhält der Benutzer eine 3D-Visualisierung des Auslastungsgrades über die gesamte Oberfläche des untersuchten Bauteils. Damit entfällt das Auswählen des versagenskritischsten Punktes und weitestgehend die manuelle Dateneingabe mit den damit verbundenen Unsicherheiten. Durch die vollflächige Ergebnisdarstellung des Auslastungsgrades, des maßgebenden Lastfalles und weiterer Größen ergibt sich zudem eine wesentlich leichtere Ergebnisinterpretation. Die neue Version unterstützt jetzt neben dem bereits implementierten statischen und Dauerfestigkeitsnachweis den Betriebsfestigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie. Es wurden beide Miner-Verfahren (elementar und konsequent) aus der Richtlinie umgesetzt. Der Anwender muss, im Vergleich zum Dauerfestigkeitsnachweis, lediglich zusätzlich das gewünschte Verfahren, die Zyklenzahl und ein Spannungskollektiv festlegen. Die dazu nötigen Spannungskollektive werden in der Datenbank des Programms gespeichert und können über den neuen Kollektiveditor bearbeitet werden. Ferner wurde die Materialdatenbank von AutoFENA 3D grundlegend überarbeitet. Die Werkstoffe aus der Richtlinie wurden, mit Ausnahme der Aluminiumwerkstoffe, vollständig in die neue Datenbank des Programms übernommen. Die Kenngrößen der FKM-Richtlinie werden den Werkstoffen nun über eine einzige Gruppenzuordnung zugewiesen und die Bearbeitung der Werkstoffe im Materialeditor wurde vereinfacht.

[www.ihf-ffm.de](http://www.ihf-ffm.de)

### Intes

#### PERMAS Version 12

Die PERMAS Version 12 ist das Ergebnis von etwa 24 Monaten Entwicklungsarbeit seit der Lieferung der Vorgängerversion 11. Unter anderem enthält die Version 12 ein neues innovatives Werkzeug zur

Modellierung der Schraubenvorspannung, das auch Details wie die Aufweitung der Bohrung und die Verdrillung des Schafts berücksichtigt. Ebenfalls neu ist die hoch-effiziente Möglichkeit, Bremsenquietschen zu simulieren, bei der eine statische Reibkontaktanalyse mit einer komplexen Eigenwertanalyse verbunden wird, und eine bisher nicht erreichte Genauigkeit der Ergebnisse und extrem kurze Rechenzeiten erreicht. Des Weiteren wurde die integrierte Topologie-Optimierung mit erweiterten Fertigungsrandbedingungen versehen, die symmetrische Ergebnisse erzeugt sowie minimale und maximale Wandstärken berücksichtigt. Außerdem wurde mit VisPER Version 1 eine Software zur Verbesserung des Pre- und Postprozessings für PERMAS fertig gestellt, die spezifische Modellergänzungen zur Optimierung, Fluid-Struktur-Akustik und Kontaktanalyse deutlich erleichtert und die Überprüfung bestehender Modelle mit einer integrierten Ergebnisauswertung verbindet.

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

### LMS

#### LMS Virtual.Lab Motion Quick Start

LMS bringt LMS Virtual.Lab Motion Quick Start auf den Markt. Mit diesem Serviceprogramm lässt sich die Software zur Simulation des dynamischen Bewegungsverhaltens aus der Produktpalette von LMS einfach und reibungslos einsetzen. Das Konzept von Quick Start beruht auf Schulung und fachlicher Anleitung. Bei ihren ersten Schritten mit LMS Virtual.Lab Motion können Anwender unter Anleitung durch erfahrene Ingenieure von LMS mit Quick Start ihre ersten Modelle erstellen und validieren. Das Quick Start Programm ermöglicht auf eine umfangreiche Auswahl an individuell zugeschnittenen Simulationstemplates zur Automatisierung der Simulationsprozesse zuzugreifen und das dynamische Verhalten verschiedener Konstruktionsvarianten rasch zu

analysieren. Benutzer können mit LMS Virtual.Lab Motion Quick Start im Handumdrehen produktiv arbeiten. Mit LMS Virtual.Lab Motion simulieren Entwickler und Konstrukteure das realistische, dynamische Bewegungsverhalten ihrer mechanischen Konstruktion und können somit die Produktqualität optimieren, lange bevor Prototypen gebaut werden. Potenzielle Schwachstellen in der Konstruktion können mit LMS Virtual.Lab Motion leicht lokalisiert und Problemursachen rasch ermittelt werden. Bereits ab der ersten Entwicklungsphase durchleuchtet LMS Virtual.Lab Motion wesentliche Produkteigenschaften und analysiert verschiedene Konstruktionsmöglichkeiten im Vergleich zu Prototypentests weitaus schneller und kostengünstiger.

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

### Moldflow

#### Autodesk schließt Übernahme von Moldflow ab

-> siehe Autodesk

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

### MSC.Software

#### Neue Version 2008 der Engineering Analysis Produkte und MD-Technologien

MSC.Software gab die Veröffentlichung der Version 2008 seiner gesamten Engineering Analysis Suite sowie seiner Multidisziplinären (MD) Technologien bekannt. Die Engineering Analysis Suite umfasst MSC Nastran, Marc, Dytran, Adams und Easy 5. Die MD Technologien, die die Kernkomponenten von MSC SimEnterprise darstellen, beinhalten MD Nastran und MD Adams. Das gleichzeitige Ankündigung beider neuer Versionen unterstreicht den Übergang von einzelnen Simulationstools zu multidisziplinären (MD) Analysen. Die MD-Lösungen ergänzen die Kerntechnologien, d. h. Engineering Analyse Produkte, durch eine verbesserte Integration der Solver. So werden Analysen genau-

COMSOL  
MULTIPHYSICS® 

# Multiphysik-Simulation

Nutzen Sie COMSOL® für beliebige Multiphysik-Simulationen: modellieren Sie Strukturmechanik, Strömungsdynamik und Wärmetransport in einem Simulationsmodell.

Schnell, flexibel und benutzerfreundlich.

## Kostenfreie CD!

 Mit 250 aktuellen Fachbeiträgen zur Multiphysik-Simulation  
[www.comsol.de/conf\\_cd](http://www.comsol.de/conf_cd)



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

 COMSOL

COMSOL AND COMSOL MULTIPHYSICS ARE REGISTERED TRADEMARKS OF COMSOL AB.

er und der Abstand zwischen Simulation und physikalischen Tests verringert.

### **Neue Version SimManager R3 für Simulationsdaten- und Prozessmanagement**

MSC.Software kündigte die neue Version SimManagers R3 an. SimManager ist die weltweit einzige, bewährte und skalierbare Lösung für Simulationsdaten- und Prozessmanagement. Version R3 beinhaltet deutliche Verbesserungen der Leistung und Skalierbarkeit und ermöglicht damit eine Steigerung der Simulationseffizienz durch konsistentere und zuverlässigere Simulationen für Arbeitsgruppen in allen Abteilungen.

### **MSC.Software kündigt integrierte Simulationslösung für Produkte von PTC an**

MSC.Software kündigte eine integrierte Simulationslösung für PTC-Produkte im Rahmen der neuen Version SimEnterprise R3 an. Durch die integrierte Simulationstechnologie von MSC.Software haben PTC-Nutzer nun die Möglichkeit, optimierte CAE-Verfahren zu automatisieren sowie Analysedaten gemeinsam zu nutzen und wiederzuverwenden. Auf diese Weise soll die Effizienz der virtuellen Produktentwicklung stark verbessert werden.

### **Neue Versionen SimXpert und SimDesigner von MSC.Software für effizientere Simulationen**

MSC.Software gab heute die baldige Markteinführung der neuen Versionen R3 von SimXpert und SimDesigner bekannt.

### **MSC.Software übernimmt MacNeal Group und entwickelt Simulationsmethoden weiter**

MSC.Software gab die Akquisition der MacNeal Group bekannt. Dr. Richard MacNeal, Gründer der MacNeal Group, gilt als einer der Wegbereiter des CAE-Marktes und als führende Kapazität auf dem Gebiet der Finite-Element-Technologie. Diese Akquisition maximiert die Synergien zwischen beiden Unternehmen rund um die Nastran-Technologie

und deren Weiterentwicklung. Mit der MacNeal Group verfügt MSC.Software nun über die einzigartige „Part and Assembly Analysis“ (PAA) Methode, die die Möglichkeiten von MD Nastran für komplexe Systemsimulationen weiter verbessert.

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

## **NAFEMS**

### **NAFEMS World Congress 2009 – Call for Papers**

Der zweijährliche NAFEMS World Congress wird von 16. - 19. Juni 2009 auf Kreta, Griechenland, stattfinden. Der weltweit größte, unabhängige Kongress im Bereich Engineering Simulation hat das Thema „The Analysis Advantage: Perspectives on Engineering Simulation for Today and Beyond – Case Studies, Best Practices, Breakthrough Technologies, Future Advances“. Ein Call for Papers ist verfügbar - Vorträge können bis 6. Oktober 2008 eingereicht werden. Erwartet werden Beiträge aus allen Industriebereichen und Anwendungsgebieten (FEM, CFD, MBS, Multiphysik, SDM, Stochastik, Optimierung, Moulding, ...). Eine vollständige Liste von Vortragsthemen sowie weitere Informationen ist unter [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress) zu finden. Neben einem umfangreichen Vortragsprogramm (erwartet werden mehr als 150 Vorträge) sind Workshops, Kurse, Round Table Discussion on Business Drivers, Mini-Symposien (Composite), Fenet/Autosim EU-Projekt-Follow-ups und vieles mehr geplant. Eine begleitende Ausstellung von Hard- und Softwareanbietern sowie Dienstleistungsunternehmen rundet die Veranstaltung ab. Der Kongress ist offen für Mitglieder und Nichtmitglieder.

### **Call for Papers: Zusammenwirken von Simulation, Experiment und Messung: Neue Anforderungen und neue Möglichkeiten in der Strukturdynamik**

Von 12. - 13. November 2008 findet in Wiesbaden das NAFEMS Semi-

nar zum Thema „Zusammenwirken von Simulation, Experiment und Messung: Neue Anforderungen und neue Möglichkeiten in der Strukturdynamik“ statt. Die Einreichung von Abstracts ist bis 1. September möglich. Aktuelle Entwicklungen sowie Trends in der Theorie, Software und Hardware sollen aufgezeigt, sowie interessante Anwendungen vorgestellt werden. Folgende Themenschwerpunkte im Mittelpunkt: Integration von Experiment, Messung und Simulation; Strukturdynamische Analysen im Zeit- und Frequenzbereich; Modellierung, Modellvereinfachung, Ermittlung von Lasten, Randbedingungen und anderer Parameter; Modalanalyse, dynamische Sensitivitätsuntersuchungen; Multiphysics-Simulationen in Verbindung mit Experimenten und Messungen; neue und bewährte Methoden und Verfahren zur Lösungsstrukturdynamischer Aufgabenstellungen; Modellverifikation und -validierung, Bewertung der Ergebnisqualität, Model-Updating; Strukturdynamik für extreme Einsatzanforderungen (Katastrophen, Unfälle, Anschläge, ...); Simulation im Rahmen virtueller Produktentwicklung sowie Trainings- und Testsysteme; Anwendungsbeispiele; Möglichkeiten verfügbarer Soft- und Hardware. Genügend Zeit für die Diskussion und den Austausch unter den Teilnehmern ist eingeplant. Das Seminar soll als breit gefächertes Forum dienen, welches den Teilnehmern neue interdisziplinäre Horizonte erschließt. Fachliche Leiter des Seminars sind Prof. Dr. Manfred Zehn (Universität Berlin / Femcos mbH) und Dr. Yasar Deger (Hochschule für Technik Rapperswil). Beide sind Mitglieder des deutschen NAFEMS Steering Committees.

### **Deutschsprachige NAFEMS Webpage vollständige implementiert**

Die deutschsprachige Webpage, die unter der Domain [www.nafems.de](http://www.nafems.de) zu erreichen war, wurde vollständig in die Domain [www.nafems.org](http://www.nafems.org), dem internationalen Auftritt von NAFEMS, implementiert. Durch Umschalten der Sprache auf „Deutsch“ (bzw. einer anderen Sprache) erhält man

sfür den deutschsprachigen Raum gefilterte Informationen in deutscher Sprache.

[www.nafems.org](http://www.nafems.org)

## nCode

### nCode Software Release 5.0

Das neue nCode Software Release 5.0 der ICE-flow Produktfamilie steht zur Verfügung. Viele neue Technologien, Funktionalitäten und Verbesserungen in den Programmen ICE-flow Glyphworks, ICE-flow Design-Life und ICE-flow Automation wurden implementiert. Eine Testversion von ICE-flow 5.0 ist kostenfrei erhältlich.

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

## Realtime Technology

### Die visuelle Verbindung zwischen Engineering und Design

In Zusammenarbeit mit der Visenso GmbH, einem der führenden Anbieter von Virtual Reality-Software für die Analyse von Berechnungsergebnissen, hat die RTT AG das CFD-Modul RTT RealFluid entwickelt, das die Funktionalitäten von RTT DeltaGen erheblich erweitert. RTT RealFluid erlaubt die fotorealistische Visualisierung von Strömungssimulationsdaten und damit die Darstellung von physischen Vorgängen im Kontext des Fahrzeug- oder Produktdesigns. Designer können ab sofort in bislang unerreichter Qualität Strömungssimulationen im Exterieur und Interieur von Fahrzeugen, Flugzeugen und Schiffen visualisieren. Designer können eng mit Ingenieuren und Aerodynamikspezialisten zusammenarbeiten und die Veränderungen am Fahrzeug- und Flugzeugmodell noch genauer analysieren.

[www.rtt.ag](http://www.rtt.ag)

## Samtech

### ISAMI im CæSAM Multi-Disciplinary Framework bei Airbus

Airbus bindet die Plattform ISAMI („Improved Structure Analysis Multi-

disciplinary Integration“) in das CæSAM Multi-Disciplinary Framework ein.

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

## Siemens PLM Software

### Saab Aerosystems setzt Team-

center MRO für Kundendienst ein  
Siemens PLM Software gibt bekannt, dass sich Saab Aerosystems für Teamcenter MRO von Siemens PLM Software entschieden hat. Saab ergänzt mit der Lösung für Wartung, Reparatur und Instandsetzung (MRO, „Maintenance, Repair and Overhaul“) seine bereits bestehende Teamcenter-Installation, um Produktdaten für den Kundendienst wieder verwenden zu können. Saab Aerosystems, ein Geschäftsbereich der Saab Gruppe, hat bereits vor vier Jahren für das Produktdatenmanagement des Militärflugzeugs ‚JAS Saab 39 Gripen‘ in die Teamcenter-Software investiert. Ziel war es, die Entwicklungszeit und die jährlichen Betriebskosten zu senken. Mit der Anschaffung von Teamcenter MRO gewinnt die ursprüngliche Investition zusätzlich an Wert für Saab. Die Zahl der lizenzierten Teamcenter-Anwender im Unternehmen erhöht sich jetzt auf 2.200.

### Siemens PLM Software bringt NX 6-Software auf den Markt

Siemens PLM Software hat die neue Version NX 6 seiner Software für die digitale Produktentwicklung vorgestellt. Neu sind eine Reihe von Features, die auf der kürzlich vorgestellten Synchronous-Technologie von Siemens PLM Software basieren. Die Markteinführung von NX 6 war für Ende Juni 2008 geplant. „NX 6 setzt die neuen Maßstäbe in Sachen Konstruktionsproduktivität, die wir im April bei der Vorstellung der Synchronous-Technologie angekündigt haben, in die Praxis um“, erklärt Joan Hirsch, Vice President NX Product Development bei Siemens PLM Software. „Wir haben die Synchronous-Technologie in NX integriert und liefern damit gravierende Verbesserungen in den Bereichen Konstruktion, Simulation und Fertigungs-

planung. Mit dem neuen Release werden wir die starke Marktposition von NX weiter verbessern.“ „Mit der Implementierung von NX erreichen wir Produktivitätssteigerungen, die unsere Erwartungen bei Weitem übertreffen. Insgesamt beobachten wir eine 20prozentige Effizienzsteigerung bei CAD-Workflows“, so Keigo Fukushi, General Manager, Process Information Management Department, R&D Engineering Management Division bei Nissan Motor Co., Ltd. „Wir sind davon überzeugt, dass sich das NX-Team voll dafür einsetzt, dass wir unsere langfristigen Ziele in der Produktentwicklung erreichen können.“

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

## Visenso

### VISENSO und IMSYS bündeln Kompetenzen

Um auch dem Mittelstand einen schnellen und umfassenden Einstieg in die VR-Technologie zu ermöglichen, haben die VISENSO GmbH, und der Spezialist für den Aufbau immersiver Umgebungen, die IMSYS GmbH & Co. KG aus Leonberg, jetzt eine Kooperation geschlossen: Mit eng aufeinander abgestimmten Komponenten soll der Weg in die Virtuelle Realität für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) frei werden.

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

Bitte senden Sie Pressemitteilungen an:  
[magazin@nafems.de](mailto:magazin@nafems.de).

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

**2008**

Numisheet	01.-05.09.	Interlaken, CH	<a href="http://www.numisheet2008.org">www.numisheet2008.org</a>	ETH Zürich
Fisita World Automotive Congress	14.-19.09.	München, D	<a href="http://www.fisita.2008.com">www.fisita.2008.com</a>	Fisita und VDI
Deutschsprachige Abaqus-Benutzerkonferenz	22.-23.09.	Bad Homburg	<a href="http://www.simulia.com">www.simulia.com</a>	Abaqus Deutschland GmbH
LS-Dyna Anwenderforum	30.09.-01.10.	Bamberg, D	<a href="http://www.dynamore.de">www.dynamore.de</a>	DYNAMore GmbH
EHTC - European HyperWorks Technology Conference	30.09.-01.10.	Strasbourg, F	<a href="http://www.altair.de">www.altair.de</a>	Altair Engineering
<b>NAFEMS Trainingskurs FEM Basic 1:</b> Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre	06.-07.10.	Wiesbaden, D	<a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a> *	NAFEMS GmbH
ANSYS Conference & 26. CADFEM Users´ Meeting	22. - 24.10.	Darmstadt, D	<a href="http://www.usersmeeting.com">www.usersmeeting.com</a>	CADFEM GmbH
<b>NAFEMS North America Regional Summit</b>	29.-31.10.	Hampton, USA	<a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a>	NAFEMS Ltd.
<b>NAFEMS Trainingskurs FEM Basic 2:</b> Praxisorientierte Grundlagen für FEM-Analysen	10.-11.11.	Wiesbaden, D	<a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a> *	NAFEMS GmbH
<b>NAFEMS Trainingskurs CFD Basic 2:</b> Practical CFD Analysis (in English)	10.-11.11.	Wiesbaden, D	<a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a> *	NAFEMS GmbH
<b>NAFEMS Seminar: Zusammenwirken von Simulation, Experiment und Messung: Neue Anforderungen und neue Möglichkeiten in der Strukturdynamik</b>	12.-13.11.	Wiesbaden, D	<a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a> *	NAFEMS GmbH
<b>NAFEMS NORDIC Regional Summit</b>	17.-18.11.	Göteborg, S	<a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a>	NAFEMS Ltd.
Comsol Anwenderkonferenz	04.-06.11.	Hannover, D	<a href="http://www.comsol.de">www.comsol.de</a>	Comsol Multiphysics GmbH
PTC World Conference	11.-12.11.	Darmstadt, D	<a href="http://www.ptcworld.org/Germany">www.ptcworld.org/Germany</a>	PTC
VDI Tagung: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau	26.-27.11.	Baden-Baden, D	<a href="http://www.vdi.de">www.vdi.de</a>	VDI Verein Deutscher Ingenieure
Messe: Euromold	03.-06.12.	Frankfurt, D	<a href="http://www.euromold.com">www.euromold.com</a>	Demat GmbH

**2009**

Europäische LS-DYNA Conference	14.-15.05.	Salzburg, A	<a href="http://www.dynamore.de">www.dynamore.de</a>	DYNAMore GmbH
<b>NAFEMS World Congress 2009</b>	<b>16.-19.06.</b>	<b>Crete, GR</b>	<b><a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a></b>	<b>NAFEMS Ltd.</b>

\* Bitte Sprache auf „Deutsch“ wechseln, um umfangreichere und gefilterte Informationen für den deutschsprachigen Raum in deutscher Sprache zu erhalten.

Suchen Sie Berechnungsingenieure?

Suchen Sie eine neue Herausforderung?

Schalten Sie ein/e

## **Stellenanzeige \* / Stellengesuch**

im NAFEMS online-Magazin.

Sprechen Sie die richtige Zielgruppe an – ohne Streuverluste!  
Natürlich vertraulich und auf Wunsch auch unter Chiffre!

NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH  
Osterham 23  
D-83233 Bernau am Chiemsee  
Tel. +49 (0) 80 51 – 96 59 3 49  
Fax +49 (0) 80 51 – 96 74 3 37  
e-mail: info@nafems.de

\* Die Schaltung von Stellenanzeigen ist NAFEMS Mitgliedern vorbehalten.

---

Bitte beachten Sie die Stellenanzeigen folgender  
Unternehmen auf den nachfolgenden Seiten:

- ANSYS Germany GmbH
- DYNAmore GmbH
- Intec GmbH
- LISA Dräxlmaier GmbH

THE WORLD OF SIMULATION

**ANSYS**<sup>®</sup>

Mit über 1.700 Mitarbeitern ist ANSYS der weltweit führende Anbieter von CAE- und CFD-Software. Die Marken CFX, FLUENT und ICEM CFD stehen international für Kompetenz. Mehr als 100 Mitarbeiter an den Standorten Darmstadt, Otterfing und Hannover arbeiten an Lösungen für CFD-Anwender im Herzen Europas.

### Ihre Bewerbung senden Sie bitte an:

**Standorte:** Otterfing bei München,  
Hannover, Darmstadt

#### Postanschrift:

ANSYS Germany GmbH  
Frau Ulrike Mayer  
Birkenweg 14a  
64295 Darmstadt  
[jobs-germany@ansys.com](mailto:jobs-germany@ansys.com)

#### Bei Fragen, rufen Sie uns bitte an:

Ulrike Mayer  
+49 6151 3644 0  
Marion Kappelmeyer  
+49 8024 9054 32

**Innovation durch Simulation!** Ihre Leidenschaft ist CFD? – Willkommen im Team!

Wir suchen Sie als

## CFD-Ingenieur(in)

mit Interesse an aktuellen Industrieanwendungen. Zusammen mit kompetenten und engagierten Teamkollegen helfen Sie unseren Kunden, anspruchsvolle strömungstechnische Aufgaben mit ANSYS CFD Software zu lösen.

Neben fundierten Kenntnissen zur Strömungsmechanik verfügen Sie über Erfahrung in der Arbeit mit FLUENT, CFX oder einer anderen CFD-Software. Praxis im Vermitteln komplexer Sachverhalte ist für Sie von Vorteil. Gute Englischkenntnisse setzen wir voraus.

Eine sorgfältige Einarbeitung durch erfahrene Mitarbeiter erlaubt Ihnen als Berufseinsteiger(in) oder Ingenieur(in) mit Berufserfahrung einen erfolgreichen Start bei uns.

## CFD-Vertriebsingenieur(in)

Idealerweise besitzen Sie Erfahrung im Vertrieb von Ingenieursoftware für Finite-Element-Berechnungen oder Strömungssimulationen (PLM, CAE, o.ä.) und können entsprechende Erfolge vorweisen.

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

#### Sie finden bei uns:

- Entwicklungschancen in einem dynamisch wachsenden internationalen Unternehmen,
- motivierendes Arbeitsklima mit Freiraum für Initiative und Ideen,
- abwechslungsreiche Aufgaben aus führenden Unternehmen und Forschungsstätten sowie
- Erfolgsbeteiligung.

Arbeiten Sie mit uns an CFD-Lösungen, die den Kunden überzeugen!

Wir freuen uns auf Ihre vollständige und aussagekräftige Bewerbung mit Ihren Gehaltsvorstellungen und Ihrem möglichen Eintrittstermin.

[www.ansys.com](http://www.ansys.com)
[www.ansys-germany.de](http://www.ansys-germany.de)



Wir sind ein erfolgreiches, stark wachsendes Unternehmen und unterstützen als Spezialist auf dem Gebiet der numerischen Berechnung zahlreiche Firmen der Automobil-, Luft- / Raumfahrt- und Bauindustrie. Unser Produktportfolio umfasst LS-DYNA, eines der weltweit führenden Programme zur Crashberechnung, sowie weitere Softwareprodukte im CAE-Umfeld. DYNAmore ist Ansprechpartner für Anwendung, Schulung, Support, Softwareentwicklung, Beratung und Vertrieb dieser Produkte.

Zum nächstmöglichen Termin suchen wir für unser Kompetenzzentrum *Optimierung und Prozessintegration* in Ingolstadt für Software- und Methodenentwicklung im Bereich Optimierung, Prozessintegration und Simulationsdatenmanagement, einen

## CAE-Ingenieur (m/w)

### Ihre Aufgaben

- Konzeption und Planung neuer Softwarekonzepte für Optimierung und Prozessautomatisierung
- Umsetzung dieser Konzepte durch Programmierarbeiten
- Durchführung von Optimierungsprojekten im Kundenauftrag
- Eigenständige Koordination und Begleitung von Kundenanfragen

### Ihr Profil

Sie haben Ihr Studium als Bau-, Maschinenbau-, Luft- / Raumfahrt-Ingenieur oder Informatiker erfolgreich abgeschlossen und Sie haben Kenntnisse in modernen Programmier- / Entwicklungsumgebungen. Erfahrung im Umgang mit Finite-Elemente Programmen, vorzugsweise LS-DYNA oder PAM-Crash, sind wünschenswert. Zu Ihren persönlichen Stärken gehören Verantwortungsbereitschaft und Flexibilität. Gute Englischkenntnisse runden Ihr Qualifikationsprofil ab.

### Wir bieten Ihnen

- Anspruchsvolle, kreative Aufgaben im Bereich Methodenentwicklung
- Persönliche Weiterentwicklung durch komplexe Projekte mit Großkunden
- Freiraum zur Verwirklichung eigener Ideen
- Leistungsgerechte Vergütung
- Sehr angenehmes Arbeitsklima in einem jungen, innovativen Team

Haben wir Ihr Interesse geweckt?

Dann schicken Sie bitte Ihre Bewerbungsunterlagen an:

DYNAmore GmbH, Dr. Thomas Münz, Industriestr. 2, D-70565 Stuttgart  
Telefon: +49 (0)7 11 - 45 96 00 - 10, e-mail: tm@dynamore.de

Für nähere Auskünfte steht Ihnen Herr Dr. Müllerschön unter der Telefonnummer: +49 (0)7 11 - 45 96 00 - 20 gerne zur Verfügung.



DYNAmore GmbH  
Gesellschaft für FEM-  
Ingenieurdienstleistungen

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



Leading MBS Technology  
for Technology Leaders

## Sie suchen eine neue Herausforderung?

### Wir suchen Sie!

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

Mit SIMPACK werden das Bewegungsverhalten und die Belastung von mechanischen und mechatronischen Systemen simuliert.

Der Consulting Bereich von INTEC führt im Auftrag unserer Kunden Engineering Dienstleistungen durch.

Zum weiteren Ausbau unseres technologischen Vorsprungs sind baldmöglichst folgende Stellen zu besetzen:

- **Sales Assistenz (Standard Sales Aufgaben)**
- **SW Testingenieur (Entwicklung, Durchführung, Auswertung von lfd. SW- Tests)**
- **SW Entwickler (C, C++, QT, Graphik, GUI, Strukturen)**
- **Hotline, Support, Projekt Ingenieure**

Das bieten wir:

- Ein technologisch herausforderndes und abwechslungsreiches Betätigungsfeld
- Gute Atmosphäre, angenehmes und leistungsorientiertes Klima
- Herausfordernde Projekte im Auftrag unserer innovativen Kunden
- Sorgfältige Einarbeitung und Vorbereitung auf Ihre Aufgaben
- Hohe Eigenverantwortung in einem dynamischen Unternehmen
- Leistungsgerechtes Gehalt

Wir freuen uns auf Ihre Bewerbung.

**INTEC GmbH**  
**Frau Eva Gerber**  
**Eva.gerber@simpack.de**  
**Argelsrieder Feld 13**  
**82234 Wessling**  
**Tel: +49-8153-92 88- 0**  
**Fax: +49-8153-92 88-11**

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



» MOVING AHEAD THE AUTOMOTIVE FUTURE «  
DRÄXLMAIER GROUP

Moderne Bordnetzsysteme und exklusives Fahrzeuginterieur: Der Name Dräxlmaier steht für automobiler Innovationen – Leistung, die man erfahren kann. Daran arbeiten rund um den Globus über 38.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit ihrer Einsatzbereitschaft, Kooperationsfähigkeit und automobiler Passion. Menschen, die Verantwortung annehmen, Freiräume nutzen und mit ihren eigenen Ideen zum gemeinsamen Erfolg beitragen wollen. Menschen wie Sie!

## Berechnungsingenieur FEM (m/w)

Als Mitglied in unserem Entwicklungsteam führen Sie Crash-, Statik- und Dynamikberechnungen an Interieurkomponenten durch. Die Systemauslegung zur passiven Sicherheit über numerische Simulation auf Basis der Kundenanforderungen gehört ebenfalls zu Ihren Aufgaben. Auf Basis Ihrer Berechnungsergebnisse geben Sie Handlungsempfehlungen für die weitere Entwicklung des Bauteils sowohl an den Kunden als auch intern an die Projektmitglieder der Bauteil- und Verfahrensentwicklung sowie des Bereichs Verifizierung und verfolgen die Umsetzung im Projekt.

Sie verfügen über ein abgeschlossenes, technisches Studium und haben idealerweise erste Berufserfahrung als Berechnungsingenieur gesammelt. Gute Kenntnisse in Simulationsprogrammen, wie zum Beispiel LS-Dyna, Abaqus, NASTRAN und Altair HyperWorks setzen wir voraus. Sie überzeugen durch Ihre guten Englischkenntnisse und die Bereitschaft zu Dienstreisen. Ihre Stärken sehen Sie in Ihrer Team- und Kommunikationsfähigkeit, Ihrem Verhandlungsgeschick und in Ihrer guten Organisationsfähigkeit. Selbständige, zielorientierte Arbeitsweise und sicheres Auftreten runden Ihr Profil ab.

## Simulationsingenieur Moldflow (m/w)

In dieser Funktion zählen wir auf Ihr Know-how in punkto Spritzgussimulationen mit Kunststoffbauteilen des Fahrzeuginterieurs. Sie erarbeiten für die Verantwortlichen der Bauteil- und Werkzeugkonstruktion die zu beachtenden verfahrenstechnischen Vorgaben und sichern diese ab. Dabei arbeiten Sie eng mit den internen Bereichen Verfahrensentwicklung und der Konstruktion zusammen. Sie sind verantwortlich für das Weiterentwickeln der Methoden der Spritzguss-/Füllsimulation und der kompetente Ansprechpartner für unsere Kunden.

Nach Ihrem abgeschlossenen Studium mit Fachrichtung Kunststofftechnik/Maschinenbau, beziehungsweise nach Ihrer Weiterbildung zum Techniker/Meister haben Sie bereits einschlägige Berufserfahrung im Spritzguss-Bereich gesammelt. Sehr gute Kenntnisse in Simulationsanwendungen wie Moldflow oder ähnlichen Programmsystemen setzen wir voraus. Neben Erfahrung in der Standard-Spritzgusstechnik überzeugen Sie durch Kenntnisse in Mehrkomponenten- und Gasinnendruck-Spritztechnik. Auch im internationalen Geschäftsverkehr kommunizieren Sie mit Ihren guten Englischkenntnissen sicher in Wort und Schrift. Sie wissen sich auch in schwierigen Gesprächssituationen zu behaupten und meistern Ihre Aufgaben mit Begeisterung.

Sie möchten Freiräume gestalten und Verantwortung übernehmen – wenn Sie Kompetenz und Engagement mitbringen, zeigen wir Ihnen, wie wir gemeinsam erfolgreich sein können.



Ihre Bewerbung sollte neben der Kennziffer 50087036 (Berechnungsingenieur FEM), 50068543 (Simulationsingenieur Moldflow) alles Wichtige enthalten, was wir von Ihnen wissen müssen, zum Beispiel auch den nächstmöglichen Eintrittstermin und Ihre Gehaltsvorstellung.

Dräxlmaier Group, Personalwesen, Annette Stütze, Landshuter Str. 100, 84137 Vilsbiburg, Telefon 08741 47-2005, bewerbung@draexlmaier.de

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

Dräxlmaier 

# Theorie und Anwendung von nichtlinearen Konstitutivgesetzen für Verbundwerkstoffe im Rahmen von FEM Analysen

Heinz E. Pettermann

Austrian Aeronautics Research (AAR) – Kompetenznetzwerk für Luftfahrttechnologie / Verbund- und Leichtwerkstoffe am Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Technische Universität Wien, Österreich

**Verbundwerkstoffe sind in vielen Industriezweigen weit verbreitet und weitere Einsatzgebiete werden laufend erschlossen. Die effiziente Nutzung von Verbundwerkstoffen erfordert Berechnungsmethoden zur Vorhersage ihrer Eigenschaften. Für die Bauteilberechnung sind zuverlässige Konstitutivgesetze Voraussetzung, welche die Materialantwort auf alle möglichen Belastungsszenarien simulieren.**

**Zwei unterschiedliche Materialsysteme werden behandelt. Metall-Matrix-Composites mit thermoelastoplastischem Verhalten werden mit einer mikromechanischen Methode modelliert, welche auf einer inkrementellen Mean-Field Methode beruht. Zur Vorhersage der Eigenschaften von laminierten faserverstärkten Polymeren wird ein phänomenologisches Modell eingesetzt, das Thermoelastizität, Plastizität und Schädigung berücksichtigt.**

**Für beide Typen von Verbundwerkstoffen werden die Modellierungsphilosophie, der werkstoffmechanische Ansatz, die Implementierung als FEM-Konstitutivgesetz sowie Anwendungsbeispiele gezeigt.**

## 1 Einleitung

Rechnerische Materialmodellierung zielt darauf ab ein besseres Verständnis der physikalischen Mechanismen zu erlangen, welche die Eigenschaften eines Werkstoffes bestimmen. Dieses Wissen lässt sich dazu einsetzen, um Materialien zu verbessern und zu designen. Darüber hinaus können Bauteile und Strukturen, die aus derartigen Materialien bestehen, hinsichtlich ihrer Lastantworten genauer analysiert werden. Nicht zuletzt kann bei der Produktentwicklung die Anzahl der Prototypen erheblich reduziert werden, indem zielführende Entwicklungsrichtungen aufgezeigt werden.

Werkstoffmechanik ist ein interdisziplinäres Feld, welches Elemente von Mathematik, Mechanik und Werkstoffwissenschaft verbindet. Dieses Fachgebiet wurde vor etwa hundert Jahren mit den Arbeiten von Voigt und Reuss begründet und wurde laufend weiterentwickelt. In den letzten Jahren führte die Leistungssteigerung der Computer zu einem dramatischen Anwachsen der Aktivitäten auf dem Gebiet der Werkstoffmechanik. Ein anderer Auslöser für die Zunahme an Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten war die Einführung von modernen Hochleistungsmaterialien wie Composites, geschichteten Verbunden sowie zellulären Werkstoffen. Außerdem sind auch "konventionelle" Materialien, wie Metalle, Legierungen, Keramiken und Polymere, Gegenstand der werkstoffmechanischen Forschung.

Eine Aufgabe der Werkstoffmechanik ist die Vorhersage des Materialverhaltens. Dies bedeutet einerseits die Berechnung der effektiven Eigenschaften als Funktion der Zusammensetzung, was als *Homogenisierung* bezeichnet wird. Viele Methoden erlauben andererseits auch *Lokalisierung*, also die Analyse der lokalen Zustände in den individuellen Bestandteilen als Folge der (Fernfeld-)Belastung.

Für lineare Probleme können Homogenisierung und Lokalisierung unabhängig voneinander betrachtet werden. Sobald jedoch nichtlineare Effekte auftreten, können sie nicht mehr entkoppelt behandelt werden. Eine Reihe von Mechanismen mit gegenseitigen Abhängigkeiten werden aktiviert und bilden ein komplexes System, welches das effektive Verhalten determiniert. Typischer Weise können nicht alle Mechanismen erfasst werden, sodass entschieden werden muss, welche erfasst werden sollen und welche vernachlässigt werden können, ohne nennenswerte Fehler zu machen. Diese Entscheidungen sind höchst problemspezifisch und nur in Zusammenhang mit der gegenständlichen Fragestellung zu treffen. Nicht zuletzt sollen die Modelle der zum Einsatz kom-

menden individuellen Mechanismen kritisch hinterfragt werden. Alle Modelle basieren auf expliziten und impliziten Annahmen, vor allem letztere sind nicht immer unmittelbar ersichtlich.

Derartige Überlegungen ermöglichen die Beurteilung der Gültigkeit sowie die Grenzen der Anwendbarkeit eines Berechnungsmodelles, insbesondere um nicht falsche Schlüsse aus unzulänglichen Simulationen zu ziehen.

Das Verständnis sowohl der Physik des Problems als auch der Mathematik des Modelles ist erforderlich um Modellierung und Simulation erfolgreich einzusetzen. Die Vorhersage der effektiven Eigenschaften kann als erster Schritt betrachtet werden. Ein weiterer Schritt ist die Identifizierung der maßgeblichen Mechanismen sowie die Beurteilung deren Einfluss auf das Werkstoffverhalten. Die Kombination dieses Wissens mit den Betriebsanforderungen eines Bauteiles führt zum *funktionsorientierten Werkstoffdesign*. Ein derartiger Zugang weist den Weg zu geeigneten Materialien bzw. zeigt die erforderliche Entwicklungsrichtung für neue Werkstoffe und kann die Anzahl der Prototypen im Entwicklungsprozess stark reduzieren. Dieser Zugang ist nicht nur für Werkstoffe geeignet sondern kann auch direkt auf die Entwicklung von Bauteilen aus Verbundmaterialien angewendet werden.

Die Längenskala auf welcher ein Problem betrachtet wird, ist in der Werkstoffmechanik von großer Bedeutung. Jedes Material hat Eigenheiten einer Struktur, wenn es mit hinreichend hoher Auflösung betrachtet wird, und jede Struktur hat Charakteristika eines Materials bei Betrachtung "von weitem". Normalerweise ist ein Werkstoff - bei genauer Betrachtung - eine Agglomeration von Bestandteilen, z.B. von unterschiedlich orientierten Körnern in einem Polykristall, Fasern und Matrix in einem Composite, Einzellagen in einem Laminat, Zement und Zuschlagstoffen in Beton, etc. Auf der Längenskala der Bestandteile sind deren Eigenschaften mittels kontinuumsmechanischer (oder atomistischer) Materialmodelle beschrieben. Bei mikromechanischen Untersuchungen wird die Interaktion der verschiedenen Konstituenten berücksichtigt und damit das spezifische Werkstoffgesetz für die größere Längenskala konstituiert. Verbundwerkstoffe können normalerweise nicht mit Standard-Konstitutivgesetzen hinreichend erfasst werden.

Die unterschiedlichen Längenskalen werden illustrativ als *Mikro-*, *Meso-* und *Makroskala* bezeichnet. Dabei ist die Makroskala jene des Bauteiles. Auf der Mesoebene werden Subdomänen betrachtet, welche veränderliche Zusammensetzung und/oder Zustandsfelder aufweisen. Die Mikroskala ist schließlich jene, auf welcher die Interaktion der Bestandteile stattfindet. In der vorliegenden Arbeit leistet die Werkstoffmechanik den Übergang von der Mikro- zur Mesoskala (Homogenisierung) und von der Meso- zur Mikroskala (Lokalisierung). Es sei erwähnt, dass die Zuordnung und Bezeichnung der Längenskalen nicht notwendiger Weise einheitlich ist und gemäß der Problemstellung gewählt werden muss.

Betrachtungen auf noch kleinerer Ebene können auf der Nanoskala gemacht werden; dort allerdings erreicht (oder überschreitet) die Kontinuumsmodellierung ihre Gültigkeitsgrenzen, und es sollten eher molekulardynamische Methoden verwendet werden.

Eine Aufgabe der Werkstoffmechanik wird als *Längenskalenübergang* bezeichnet. Je mehr Skalen simultan involviert sind, desto komplexer und aufwendiger werden die Untersuchungen. Zur Zeit erscheint die Erfassung von mehr als drei Längenskalen (Mikro, Meso, Makro) nicht praktisch durchführbar. Da hier die Zielsetzung die Bauteilanalyse ist, stellt die Mikroskala die kleinste Betrachtungsebene dar.

Verifizierung und Validierung der theoretischen Modelle sind wichtige Aspekte im Rahmen von Modellierung und Simulation. Die Vorhersagemöglichkeiten eines Modelles können unter Verwendung von anderen Modellierungsansätzen und unter Rückgriff auf Experimente überprüft werden. Jedoch muss festgehalten werden, dass experimentelle Materialcharakterisierung in den meisten Fällen nur ein unvollständiges Bild des Werkstoffverhaltens liefert, da nur sehr einfache Lastfälle realisiert werden können. Sogar für linear elastische Eigenschaften muss beträchtlicher experimenteller Aufwand betrieben werden um alle Parameter zu bestimmen; z.B. sind zur vollständigen Beschreibung von orthotropen Materialien neun unabhängige Werte nötig. Für nichtkonservative nichtlineare Werkstoffe ist die Situation noch erheblich komplizierter. Die Materialantwort ist von der Belastungsgeschichte abhängig, da ein Lastzustand nicht uneindeutig mit einem Deformationszustand assoziiert ist.

Falls die Experimente nicht mit den rechnerischen Vorhersagen übereinstimmen, ist die Identifizierung der Gründe von höchstem Interesse. Das Anpassen einiger Parameter kann zwar eine Verbesserung für einzelne Lastfälle bringen, führt jedoch nicht zu einem verbesserten Verständnis des Werkstoffes. Außerdem birgt es die Gefahr das nichtlineare dreiachsige Verhalten unkontrolliert zu verändern.

Die effektiven Eigenschaften eines Verbundwerkstoffes werden vom Verhalten der Konstituenten bestimmt sowie von den topologischen Eigenheiten und - möglicher Weise - von Restspannungen. Deren Kombination bestimmt die Lastverteilung auf der Mikroskala und letztlich die Lastantwort des Materials.

Die behandelten analytischen (und numerischen) Methoden gestatten die Untersuchung einer Reihe unterschiedlicher Eigenschaften. Die vorliegende Arbeit ist auf Konstituenten fokussiert, welche thermoelastoplastisches Verhalten sowie Schädigung zeigen. Abgesehen vom mechanischen Verhalten können mit den Methoden auch Transporteigenschaften (z.B. Wärmeleitung, elektrische Leitung und Diffusion) sowie magnetostatische Eigenschaften behandelt werden.

Neben der korrekten Wahl der Konstitutivgesetze für die Bestandteile sind die entsprechenden Materialparameter erforderlich. Unter nicht - oder nicht genau - bekannten Materialparametern kann die Vorhersagequalität von Modellen leiden. Die Ergebnisse hinsichtlich der wirkenden Mechanismen und des Verständnisses der Physik des Werkstoffes hängen jedoch eher vom Modellierungsansatz sowie den Konstitutivgesetzen der Bestandteile ab als von den konkreten Werten der Materialparameter. Darüberhinaus ist für eine Reihe von Werkstoffen bekannt, dass sie als Bestandteil im Verbundwerkstoff andere Eigenschaften aufweisen können als in monolithischer Form.

Eine Reihe von verschiedenen Ansätzen ist in der Literatur beschrieben, welche unterschiedliche Grade an Komplexität aufweisen und für unterschiedliche Anwendungen geeignet sind. Die Entscheidung für ein bestimmtes Modell im Zuge einer Untersuchung ist typischer Weise ein Kompromiss zwischen Genauigkeit einerseits und personellem sowie CPU-Aufwand andererseits. Die geeignete Auswahl, abhängig vom Problem und der konkreten Fragestellung, ist ein Schlüssel zu erfolgreicher Modellierung und Simulation. Ansätze mit hohen Anforderungen an die Computerleistung werden zur numerischen Materialcharakterisierung mit hohem Detaillierungsgrad verwendet. Diese sind jedoch viel zu aufwendig um größere Strukturen oder gar Bauteile zu berechnen. Um letzteres durchzuführen werden weniger genaue, aber auch weniger computerressourcenfordernde Methoden eingesetzt.

Der Vorteil von analytischen Methoden ist der geringe Lösungsaufwand, und sie sind daher ideal für schnelle Vorhersagen der Materialantwort. Sie zeigen große Flexibilität hinsichtlich der Zusammensetzung der Verbundwerkstoffe sowie der Belastungsszenarien. Neben dem Einsatz zur Materialcharakterisierung sind diese geeignet, um als Konstitutivgesetz in FEM-Programme (oder andere numerische Werkzeuge) implementiert zu werden. Letztere gestatten Strukturanalysen von Verbundwerkstoffbauteilen, bei welchen an jedem Ort (d.h. Integrationspunkt) das Materialverhalten individuell als Antwort auf die lokale Belastung beschrieben werden muss. Dem geringen Berechnungsaufwand, als Folge der analytischen Formulierung, steht möglicher Weise auch eine eingeschränkte Vorhersagegenauigkeit gegenüber.

Alternativ können numerische Methoden eingesetzt werden, um verschiedene Mikrotopologien im Detail zu untersuchen. Die lokal fluktuierenden Mikrofelder werden im Detail erfasst und die Werkstoffantwort mit hoher Genauigkeit abgebildet. Entscheidend für derartige *Einheitszellenmethoden* ist die korrekte Formulierung der Randbedingungen. Diese Methoden sind sehr aufwendig und somit weniger geeignet um viele Inputvariationen zu untersuchen; und sie sind nicht als geschlossenes Konstitutivgesetz formulierbar.

In der computergestützten Werkstoffforschung erscheint die Kombination von Methoden zielführend. Die Vorteile unterschiedlicher Ansätze können genutzt und Nachteile vermieden werden, der Erfahrungszuwachs kann gesteigert und die Grenzen der einzelnen Methoden können besser beurteilt werden.

## 2 Elastoplastizität in MMCs unter großen Verzerrungen

Der folgende Abschnitt behandelt die rechnerische Simulation der elastoplastischen Eigenschaften von Bauteilen aus Metall-Matrix-Composites (MMCs) unter Berücksichtigung großer Dehnungen. Die verwendete Methode ist allgemein formuliert, sodass sie auf ein weites Spektrum von Materialien angewendet werden kann. Einschränkungen ergeben sich aus den spezifischen Konstitutivgesetzen, welche die Bestandteile beschreiben. Solange die Konstituenten ausreichend genau beschrieben werden können (d.h. die Annahmen gerechtfertigt sind), stellt die Methode den konsistenten Transfer zwischen Mikro- und Mesoskala bereit, und die Gültigkeit der Simulationen ist gewährleistet.

Hierarchische Modellierung auf der Mikro-, Meso- und Makroskala wird verwendet, wobei entsprechende Ansätze zur Homogenisierung sowie Lokalisierung zum Einsatz kommen. Der Übergang zwischen Makro und Meso wird mittels der Finite Elemente Methode geleistet. Dabei wird auf der Mesoebene ein mikromechanik-basiertes Konstitutivgesetz verwendet, welches auf einer analytischen Mean-Field Methode beruht. Dieses stellt auch den Übergang zwischen Meso und Mikro zur Verfügung, allerdings unter Verwendung von phasengemittelten Feldern. Als zweiter Ansatz wird die Einheitszellenmethode verwendet um die mesoskopischen Vorhersagen zu

verifizieren und die fluktuierenden Mikrofelder als Folge vorgeschriebener Belastungsszenarien vorherzusagen. Wie für metallische Werkstoffe üblich werden Cauchyspannungen und logarithmische Verzerrungen mit additiver Zerlegung verwendet.

Die makroskopische Bauteilantwort wird mit der Finite Elemente Methode (FEM) berechnet. Das mesoskopische Konstitutivgesetz basiert auf der *Inkrementellen Mori-Tanaka Methode* (IMT) [1], welche hinsichtlich des Matrix-tangentenoperators modifiziert wurde [2]. Es ist in ABAQUS/Standard (Abaqus Inc., Pawtucket, R.I., USA) implementiert und für sphärische Verstärkungen erweitert um große Verzerrungen der metallischen Matrix sowie des effektiven Compositeverhaltens abzubilden [3].

Als zweite Methode werden periodische Mikrofeldanalysen (PMA) basierend auf Einheitszellen von [4] verwendet. Diese werden zur Behandlung großer Verzerrungen erweitert, um die nichtlinearen Entwicklungen der Einheitszellenantworten zu simulieren [3]. Die Einheitszellen werden den dreiachsigen Lastgeschichten unterworfen, welche aus den FEM-IMT Berechnungen an ausgewählten Stellen extrahiert werden.

Die Mikrofelder in der Matrix und in den Verstärkungen sind mit beiden Methoden zugänglich.

Ein MMC-Bauteil mit 20%vol Keramikpartikelverstärkung wird bezüglich seines Verhaltens auf den unterschiedlichen Längenskalen untersucht. Die Antwort eines Zylinders unter globaler einachsiger Druckbelastung wird mittels der FEM analysiert, wobei der MMC-Werkstoff durch die IMT beschrieben wird. Das axisymmetrische FEM-Modell der oberen Hälfte sowie die Deformationen (ohne Skalierung) und die Verteilung der akkumulierten plastischen Verzerrungen der Matrixphase zeigt Abb.1. Da die Lateralverschiebungen an den Enden gesperrt wurden, kommt es zu tonnenförmiger Verformung und inhomogenen Feldern. In diesem Teil der Analyse können auch die Mesospannungen und Mesoverzerrungen und darüber hinaus die gemittelten Felder in der Matrix, den Partikeln und deren Grenzflächen ermittelt werden.

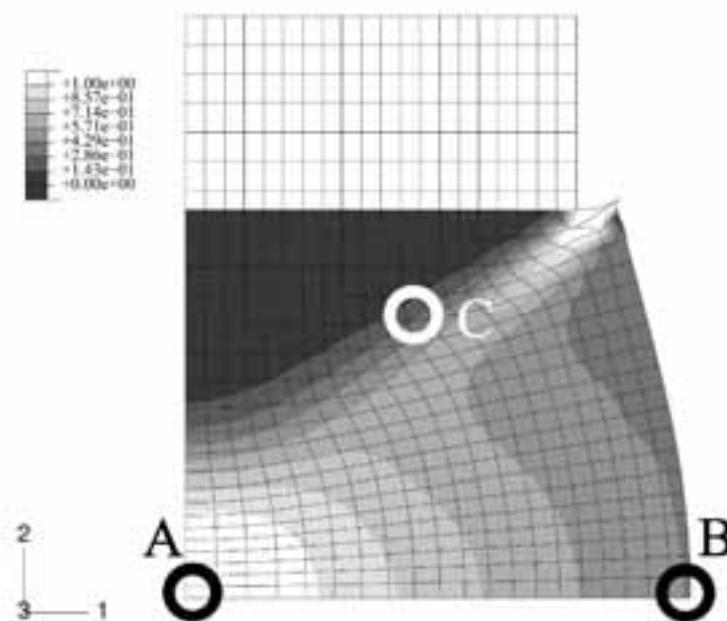


Abb. 1: Simulation eines zylindrischen MMC Bauteiles unter globaler uniaxialer Druckbelastung; undeformiertes, axisymmetrisches FEM-Netz der oberen Hälfte; nicht-skaliertes Deformationsfeld; Verteilung der akkumulierten plastischen Vergleichsverzerrung in der Matrixphase; ausgewählte Orte für nachfolgende PMA-Simulationen. [10]

Detailliertere Analysen können anschließend mit der PMA durchgeführt werden, indem mesoskopische Verzerrungstensenoren und deren zeitliche Entwicklung für ausgewählte Orte aus der FEM-IMT Analyse extrahiert werden. Diese werden als zeitabhängige Deformationsbelastungen auf die Einheitszelle aufgebracht. Abbildung 2 zeigt die Deformationszustände an den ausgewählten Orten. Der nichtlineare Mesospannungszustand für Ort B ist in Abb. 3 dargestellt, wo ebenso die Spannungsantwort der IMT-Vorhersage enthalten ist. Die Übereinstimmung ist ausgezeichnet, wobei die ausgeprägte Nichtproportionalität der Spannungs-Zeit-Geschichte zu beachten ist.

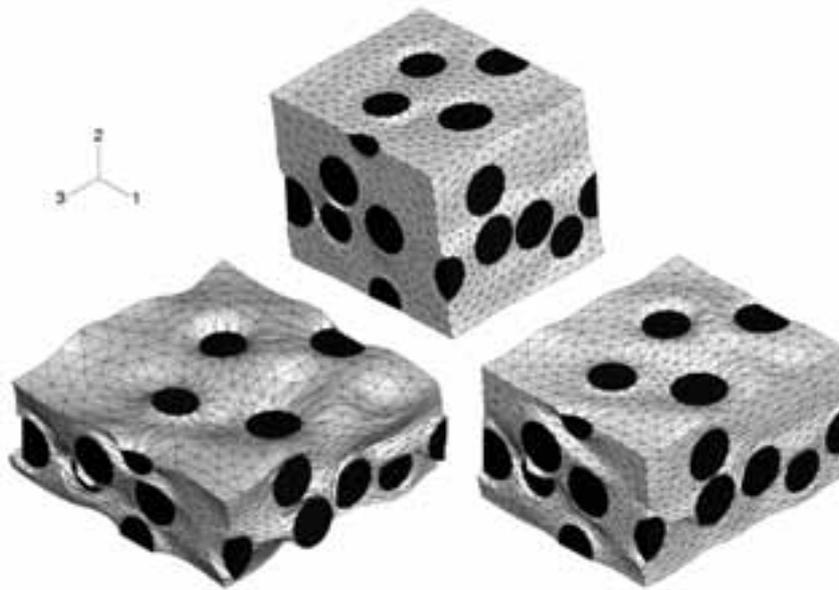


Abb. 2: Nicht-skalierte Deformationen der PMA-Einheitszellenberechnungen an ausgewählten Orten, A (links), B (rechts), C (oben), belastet durch die Meso-verzerrungsgeschichten aus der IMT-Analyse. [10]

Die IMT ist ein geeignetes Werkzeug um Analysen von MMC-Bauteilen mit akzeptablem Aufwand durchzuführen. Die Verifikation mittels der PMA zeigt ausgezeichnete Vorhersagequalität der Makrozustände und der Mesofelder. Für detaillierte Aussagen über die Mikrofelder muss die PMA eingesetzt werden, welche allerdings nicht geeignet ist um Bauteilanalysen durchzuführen.

### 3 Ply Damage in Laminated Composites

In diesem Abschnitt wird die Modellierung des nichtlinearen Verhaltens von langfaserverstärkten Schichtverbunden behandelt, im Besonderen unter Lastbedingungen, welche zu hohen Schubspannungen und Quernormalspannungen in unidirektional verstärkten Lagen führen. Üblicher Weise basiert die Modellierung des nichtlinearen Verhaltens auf schädigungsmechanischen Methoden. Dabei wird angenommen, dass die Nichtlinearitäten durch spröde, rissartige Schädigung in den Einzelschichten herrühren, welche die Steifigkeit verringern. Derartige Ansätze sagen keine bleibenden Dehnungen nach Entlastung vorher, da sie nur Elastizität und spröde Schädigung berücksichtigen. Eine Vielzahl von solchen Modellen wurde in den letzten Jahren entwickelt, die gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen liefern, insbesondere für Lastfälle welche hauptsächlich Normalspannungen in den Schichten erzeugen. Vergleiche mit Lastfällen die Schubspannungen hervorrufen ergeben jedoch weniger zufriedenstellende Vorhersagen. Darüberhinaus zeigen neuere Experimente, dass schubdominierte Belastungen beträchtliche bleibende Dehnungen verursachen. Dies bedeutet, dass Nichtlinearitäten unter Schub zumindest zu einem Teil von anderen Mechanismen als spröder Schädigung verursacht werden und daher andere Modellierungsansätze gefordert sind.

Zunächst soll das elastisch/spröde Modell vorgestellt werden, welches in [5] entwickelt wurde. Einerseits basiert es auf einer skalaren Schädigungsvariable, die in Anlehnung an das Puck-Versagenskriterium für ebenen Spannungszustand [6] berechnet wird. Auf diese Weise wird ein Maß für die Schädigung eingeführt, welches zu jedem beliebigen Belastungszustand (und seiner Geschichte) den entsprechenden Schädigungszustand vorher sagt. Andererseits wird der Effekt dieser Schädigung auf die elastischen Eigenschaften (also deren Degradation) als tensorwertige Funktion 4. Ordnung angegeben. Es sei bemerkt, dass eine skalare Funktion die Interaktion von Schädigung und Degradation in verschiedene Richtungen nicht hinreichend erfassen würde. Die Implementierung dieses Modelles auf Basis von Schichtschädigung ist in [7] beschrieben.

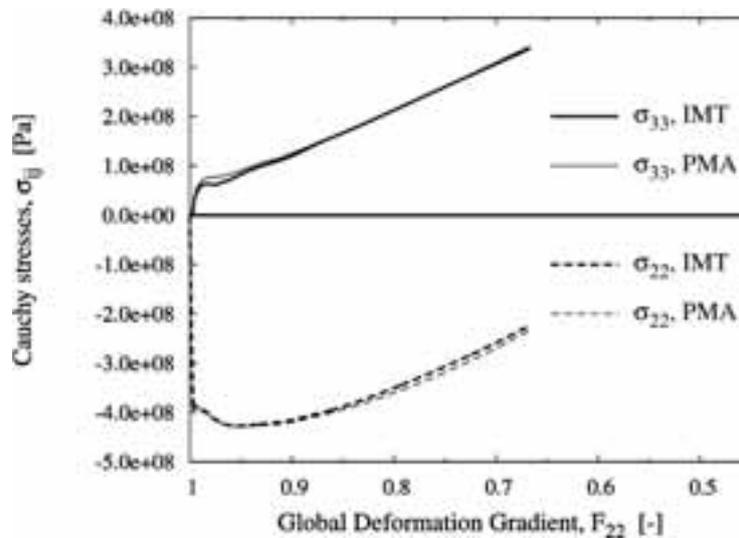


Abb. 3: IMT und PMA Simulationen der Entwicklung des mesoskopischen Cauchy Spannungstensors über der globalen Deformation. [10]

Als Anwendungsbeispiel wird der "Open Hole Compression Test" (Abb. 4) präsentiert. Die Vorhersagen betreffen das globale Kraft-Verschiebungs-Verhalten, die räumliche Verteilung der Schädigung, den Schädigungsmodus sowie den Vergleich zu experimentellen Ergebnissen aus [8]. Das Modell funktioniert gut für monotone Laststeigerung, kann aber keine bleibenden Dehnungen vorhersagen.

Daher wurde das Modell erweitert [9] um Schädigungsmechanik mit einem Plastizitätsgesetz zu kombinieren. Dies gestattet die Behandlung sowohl von Degradation aufgrund von spröden Rissen als auch von bleibenden Dehnungen durch Schubbelastungen. Es wird angenommen, dass Schädigung erst knapp vor der "Puck-First-Ply-Failure-Load" eintritt und die Nichtlinearitäten davor auf plastische Mechanismen zurückzuführen sind.

Vergleiche von Vorhersagen des erweiterten Modelles mit Experimenten zeigen eine bessere Übereinstimmung für schubdominierte Belastungen. Außerdem können bleibende Verzerrungen, die Nichtlinearitäten bei einachsigen Querdruckbelastung sowie der Einfluss von Querdruck auf das nichtlineare Schubverhalten gemäß Puck [6] erfasst werden. Das vorgeschlagene Modell ist überdies in der Lage die Unterschiede im experimentellen Schubverhalten zwischen umfangsgewickelten Rohrproben und +/-45 Laminaten zu beschreiben sofern herstellungsbedingte Restspannungszustände berücksichtigt werden.

Das vorgeschlagene Modell benötigt zusätzlich zu den "First-Ply-Failure"-Werten nur wenige Materialparameter, welche aus einfachen Standardexperimenten ermittelt werden können.

Als Beispiel wird das Spannungs-Dehnungsverhalten einer symmetrischen +/-45 Laminatprobe unter einachsiger Last untersucht, Abb. 5. Die experimentellen Daten (zur Verfügung gestellt vom PCCL, Leoben, Österreich) zeigen eine monotone Laststeigerung sowie zwei Tests mit Entlastungs- und Belastungszyklen um die Entwicklung der Restdehnungen zu erfassen. Die entsprechenden Kurven der Modellvorhersage sind mit dicker Linie eingezeichnet. Es sind nennenswerte Restdehnungen zu erkennen, welche vom Modell in guter Übereinstimmung mit den Experimenten vorhergesagt werden. Das erweiterte Modell stellt eine erhebliche Verbesserung gegenüber Ansätzen dar, die nur auf der Materialdegradation zufolge von Schädigung beruhen.

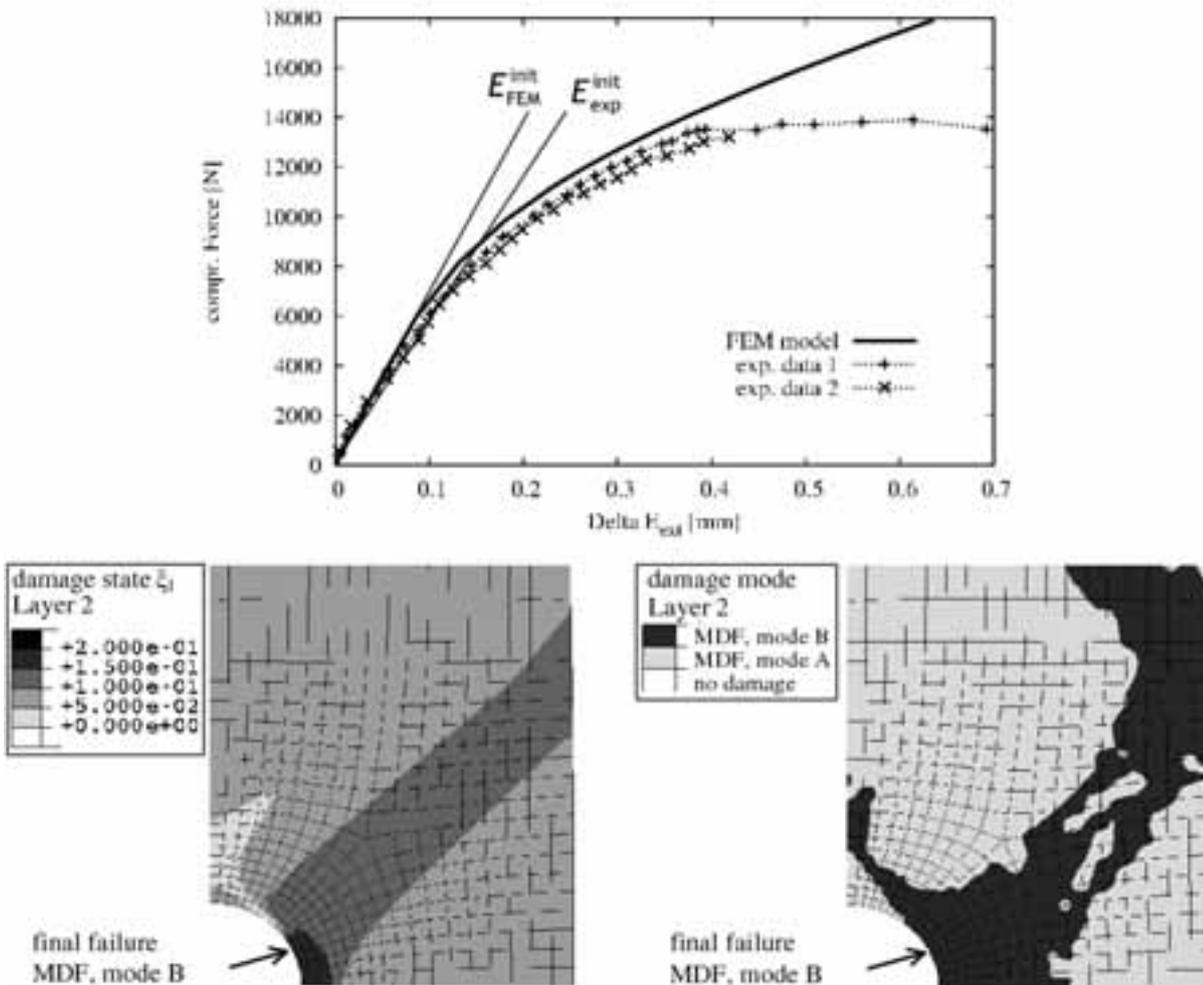


Abb. 4: Simulationen des "Open Hole Compression" Experimentes für  $[\pm 45]_{6s}$  Lagenaufbau; Kraft-Verschiebungsdiagramm des Experimentes [8] und Berechnung (oben); simulierte Schädigungsverteilung (unten links); simulierter Versagensmodus (unten rechts). [11]

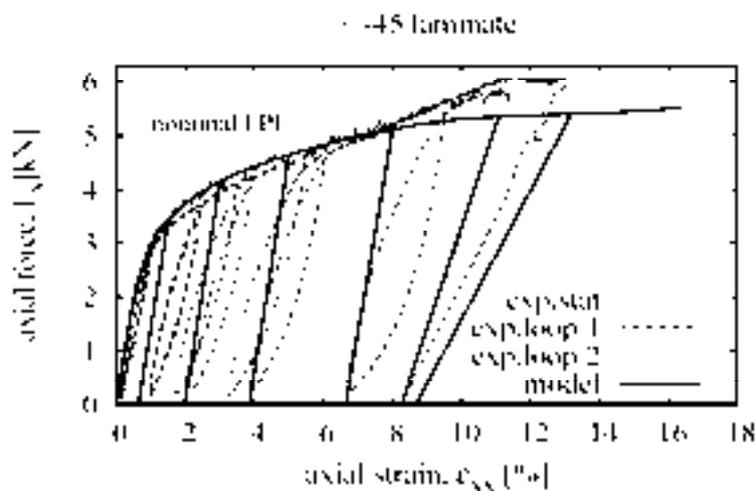


Abb. 5: Experimentelles und simuliertes Kraft-Verzerrungs-Verhalten einer Probe mit  $\pm 45$  Lagenaufbau unter einachsigem Zug (experimentelle Daten von PCCL, Leoben, Österreich).

## 4 Danksagung

Ein Teil dieser Arbeit wurde durch das Projekt *Austrian Aeronautics Research (AAR) – Kompetenznetzwerk für Luftfahrttechnologie / Verbund und Leichtwerkstoffe* des österreichischen Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit gefördert.

## 5 References

1. Pettermann H.E., Plankensteiner A.F., Böhm H.J., Rammerstorfer F.G.: *A Thermo-Elasto-Plastic Constitutive Material Law Based on an Incremental Mori-Tanaka Approach*; *Comput.Struct.* 71, 197-214, 1999.
2. Doghri I., Ouaar A.: *Homogenization of Two-Phase Elasto-Plastic Composite Materials and Structures*; *Int.J.Sol.Struct.*, 40, 1681-1712, 2003.
3. Huber C.O., Luxner M.H., Kremmer S., Nogales S., Böhm H.J., Pettermann H.E.: *Forming Simulations of MMC Components by a Micromechanics Based Hierarchical FEM Approach*; in Proceedings of "9<sup>th</sup> International Conference in Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM'07)", (Eds, César de Sá J.M.A., Santos A.D.), Porto, Portugal, June, 2007.
4. Böhm H.J., Han W., Eckschlager A.: *Multi-Inclusion Unit Cell Studies of Reinforcement Stresses and Particle Failure in Discontinuously Reinforced Ductile Matrix Composites*; *Comput.Model.Engng.Sci.*, 5, 2-20, 2004.
5. Schuecker C., Pettermann H.E.: *A continuum damage model for fiber reinforced laminates based on ply failure mechanisms*; *Compos.Struct.* (special issue ICCM-15) 76, 162-173, 2006.
6. Puck A., Schürmann H.: *Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models*; *Comp.Sci.Tech.*, 58, 1045-1067, 1998.
7. Schuecker C., Pettermann H.E.: *Constitutive ply damage modeling, FEM implementation, and analyses of laminated structures*; *Comput.Struct.* 86, 908-918, 2008.
8. Chang F.K., Lessard L.B.: *Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to compressive loadings: Part I – analysis*; *J.Comp.Mat.*, 25, 2–43, 1991.
9. Schuecker C., Pettermann H.E.: *Fiber reinforced laminates: progressive damage modeling based on failure mechanisms*; *Arch.Comput.Method.Engin.*, 15, 163-184, 2008.
10. Huber C.O.: *Numerical Simulations of Metal Matrix Composites - Tribological Behavior and Finite Strain Response on Different Length Scales*; Dissertation, TU Wien, Österreich, 2008.
11. Schuecker C.: *Mechanism Based Modeling of Damage and Failure in Fiber Reinforced Polymer Laminates*; Dissertation, TU Wien, Österreich, 2005.

## Der Autor

Univ.Doiz. Dr. DI Heinz E. Pettermann  
 Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik  
 Technische Universität Wien  
 A-1040 Wien, Gußhausstr. 27-29 / E317  
 pettermann@ilsb.tuwien.ac.at

# Simulation des Schädigungsverhaltens von thermomechanisch beanspruchten Blindnietverbindungen in CFK/Al-Strukturen

Werner Hufenbach, Maik Gude, Andreas Freund

ILK, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden, Deutschland

**Aktuelle Leichtbaukonzepte im Automobilbau setzen vorrangig auf Mischbauweise. Neben Vorteilen, den jeder Werkstoff in den hybriden Verbund einbringt, behindern vor allem die stark unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $\Delta\alpha$ -Problematik) den Einsatz endlosfaserverstärkter Kunststoffe. Speziell die thermomechanischen Beanspruchungen im Fertigungsprozess während der kataphoretischen Tauchlackierung (KTL) stellen eine Herausforderung bei der beanspruchungsgerechten Auslegung der hybriden Fügebereiche dar.**

**Eine zuverlässige Vorhersage der Werkstoffbeanspruchung insbesondere im Fügebereich unter der Anwendung werkstoffangepasster Versagenskriterien ist die Basis für den wettbewerbsfähigen Einsatz endlosfaserverstärkter Kunststoffe in hochbeanspruchten Leichtbaustrukturen. Für Blindnietverbindungen in CFK/Al-Leichtbaustrukturen wurde ein praxishohes Simulationswerkzeug entwickelt, welches das richtungsabhängige Deformations- und Versagensverhalten im Fügebereich realistisch abbildet und sich auch nachträglich in vorhandene Finite Elemente (FE)-Modelle komplexer Strukturen integrieren lässt.**

**Anhand der thermisch kompatiblen Auslegung eines CFK/Al-Schubfeld-Demonstrators wird die Anwendung des Blindniet-Submodells beispielhaft demonstriert.**

## 1 Einleitung

Der zunehmende Einsatz faserverstärkter Kunststoffe (FKV) in hochbeanspruchten Bauteilen bei gleichzeitig reduzierten Entwicklungszeiträumen erfordert eine realistische und vor allem zuverlässige Abbildung der relevanten werkstofflichen Nichtlinearitäten und des Schädigungsverhaltens in der Simulation.

Dazu sind die Entwicklung und die Implementierung von numerisch robusten Materialmodellen auf der Basis von physikalisch begründeten Versagenskriterien erforderlich, welche die richtungsabhängigen nichtlinearen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen berücksichtigen. Erst hierdurch wird eine zuverlässige Bewertung des Strukturverhaltens von FKV-Bauteilen auch im geschädigten Zustand und damit eine bessere Ausnutzung des hohen Werkstoffpotentials von faserverstärkten Kunststoffen ermöglicht.

Besondere Aufmerksamkeit gilt bei der Auslegung von hybriden Verbunden dem Fügebereich. Die Kombination teilweise stark unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten führt nicht selten zu kritischen Belastungen bis hin zu möglichem lokalem Versagen bereits im Fertigungsprozess.

Der industrielle Einsatz von FKV erfordert eine einfach zu benutzende aber dennoch realistische Formulierung des Materialverhaltens bei Belastungen, die teilweise die Festigkeiten lokal übersteigen. Da das Hauptaugenmerk auf einer einfachen Handhabbarkeit liegt, wurden zur Entwicklung des Simulationswerkzeuges nur Versagensindizes benutzt, die in dem verwendeten FE-System standardmäßig zur Verfügung stehen.

Für das FE-System ABAQUS wird auf die anwendungsorientierte Implementierung eines Blindniet-Submodells am Beispiel eines CFK/Al-Schubfeld-Demonstrators eingegangen, das richtungsabhängige nichtlineare Werkstoffdegradation berücksichtigt.

## 2 Nietverbindungen in Faserverbundwerkstoffen

Die Werkstoffbeanspruchung insbesondere im Kernnahfeld unterscheidet sich bei Faserverbundwerkstoffen (Abb. 1) deutlich von der des metallischen Fügepartners (Abb. 2). Die weitestgehend fehlende Möglichkeit der plastischen Spannungumlagerung, welche die Spannungsverteilung homogenisiert, limitiert hier die Verbindungsfestigkeit.

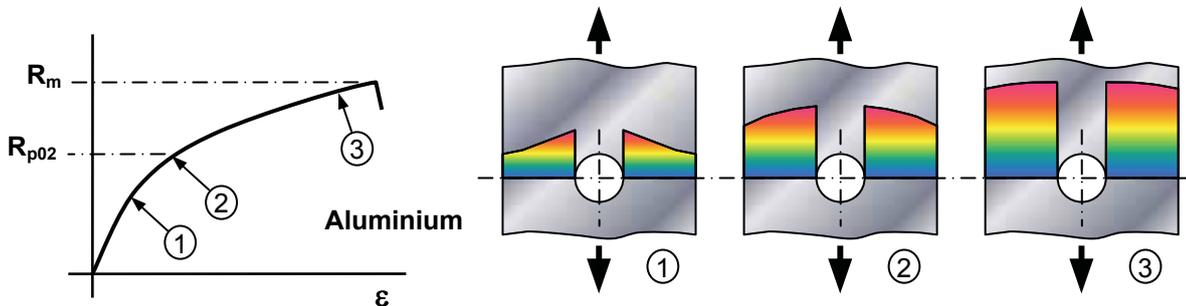


Abb. 1: Schematische Spannungsverteilung im Kernnahfeld auf drei verschiedenen Lastniveaus für den metallischen Fügepartner am Beispiel von Aluminium

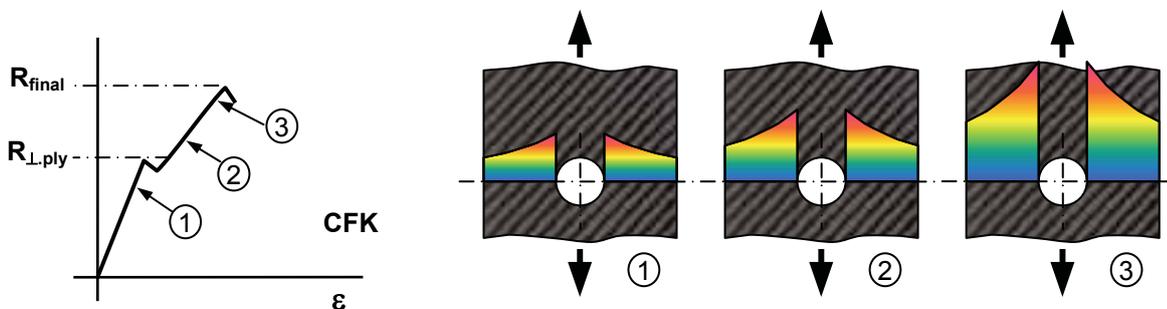


Abb. 2: Schematische Spannungsverteilung im Kernnahfeld auf drei verschiedenen Lastniveaus für CFK

Zusätzliche Belastungen entstehen durch Biegung infolge Nietverkipfung in der einschnittig ausgeführten Verbindung (Abb. 3). Die Verwendung von werkstoffangepassten Blindnieten mit vergrößertem Kopfbereich garantierte ein Verbindungsversagen infolge reiner Werkstofftrennung im CFK-Fügeteil. Nietversagen bzw. Versagen in metallischen Fügeteil trat zu keinem Zeitpunkt auf.

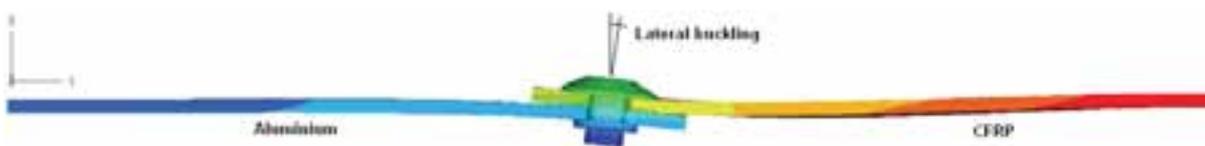


Abb. 3: Verkipfung des Nieten infolge der einschnittigen Ausführung der Verbindung

### 3 Experimentelle Charakterisierung des Verbindungsversagens

Die experimentelle Charakterisierung des Versagensverhaltens wurde an genieteten CFK/Al-Zugscherproben durchgeführt. Dabei wurde die Laminatorientierung (Hauptverstärkungsrichtung) bezüglich der Zugrichtung in 15°-Schritten von 0° bis 90° variiert, um die Richtungsabhängigkeit des Versagens- und Nachgiebigkeitsverhaltens abschätzen zu können (Abb. 4).

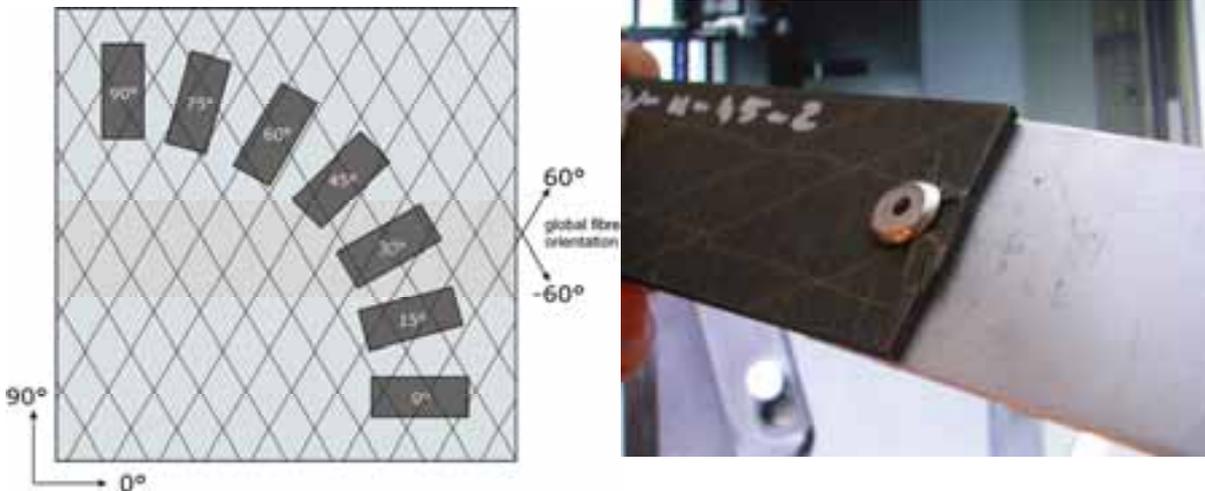


Abb. 4: Laminat- und Faserorientierungen des CFK-Fügeteils für die Untersuchung verschiedener off-axis Belastungen (links); Versagen des Faserverbundteils im Verbindungsbereich durch Werkstofftrennung, genauer Scherbruch (rechts)

Beispielhaft für das Nachgiebigkeitsverhalten sind die in Abb. 5 gezeigten Testdaten von genieteten CFK/Al-Zugscherproben mit  $[0/90]_s$  bzw.  $[+60/-60]_s$  Aufbau des Faserverbundfügeteils unter 30° Lastrichtung (off-axis Belastungswinkel  $\beta$ ). Die Kraft-Weg-Kurven zeigen das typische Verhalten eines elastisch-plastischen Materials – ein Ergebnis der fortschreitenden Werkstoffschädigung. Es ist zudem gut zu erkennen, dass sich die Steifigkeit nach dem Erreichen eines kritischen Lastniveaus, welches durch das verstärkte Auftreten von Zwischenfaserbrüchen gekennzeichnet ist, in deutlichem Maße reduziert. Im weiteren Verlauf kann die Last bis zum Erreichen der Verbindungsfestigkeit gesteigert werden. Dieser Punkt ist durch einen sprunghaften Abfall der Belastung gekennzeichnet, gefolgt von einem ausgeprägten Entfestigungsbereich.

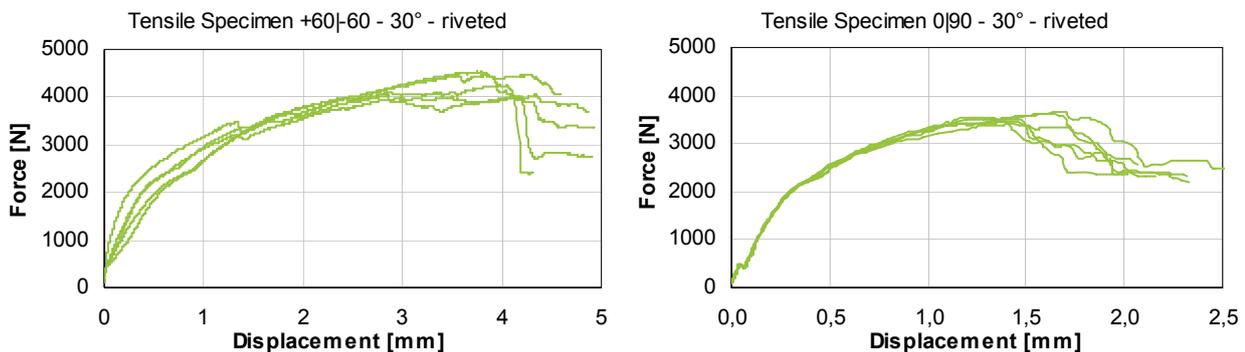


Abb. 5: Typische Kraft-Weg-Diagramme genieteter Zugscherproben für  $[+60/-60]_s$  and  $[0/90]_s$  Laminate unter 30° off-axis Belastung

Zusätzlich zu den einachsigen Zugversuchen wurden zweiachsige Versuche an speziell entwickelten Biaxial-Zugscherprobekörpern in einer eigens dafür konstruierten Aufnahme durchgeführt. Die hiermit untersuchten sogenannten Bypasslasten entstehen durch das linienförmige Nietbild im Schubfeld-Demonstrator - haben

allerdings nur vernachlässigbaren Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit im Vergleich zur Streuung der Versuchsergebnisse. Ein geringfügig versteifender Einfluss konnte jedoch festgestellt werden.

Zur Ermittlung der verschmierten Nietverbindungssteifigkeit  $C_N$  wurden die Nachgiebigkeiten der beiden Fügepartner unter der Annahme in Reihe geschalteter Steifigkeiten extrahiert (1). Die Steifigkeit des Faserverbundeils  $C_{CFK}$  kann über die Klassische Laminattheorie bei bekannten Einzelschichteigenschaften und -orientierungen abgeschätzt werden.

$$\frac{1}{C_N} = \frac{1}{C_{Pr\text{üfkörper}}} - \left( \frac{1}{C_{Al}} + \frac{1}{C_{CFK}} \right) \quad (1)$$

Das extrahierte Verhalten des Fügebereichs ist im folgenden Bild dargestellt. Die Initialsteifigkeit  $C_{1,N}$  stellt dabei den „Anfangs-Elastizitätsmodul“ des Fügebereichs dar – die Sekundärsteifigkeit  $C_{2,N}$  kennzeichnet den Tangentenmodul nach Erstversagen im Fügebereich. Für  $[0/90]_s$ -Aufbauten zeigten sich deutliche Ausreißer im Kurvenverlauf als Resultat der rein matrixdominierten Beanspruchung bei faserparalleler Belastung durch den Niet. In den  $0^\circ$ -Lagen werden hier die Nietkräfte durch Matrixschub entlang der Fasern transportiert, die  $90^\circ$ -Lagen dagegen werden quer zur Faser nur auf Zug belastet. Dies führte zu deutlich reduzierten Steifigkeiten und Festigkeiten.

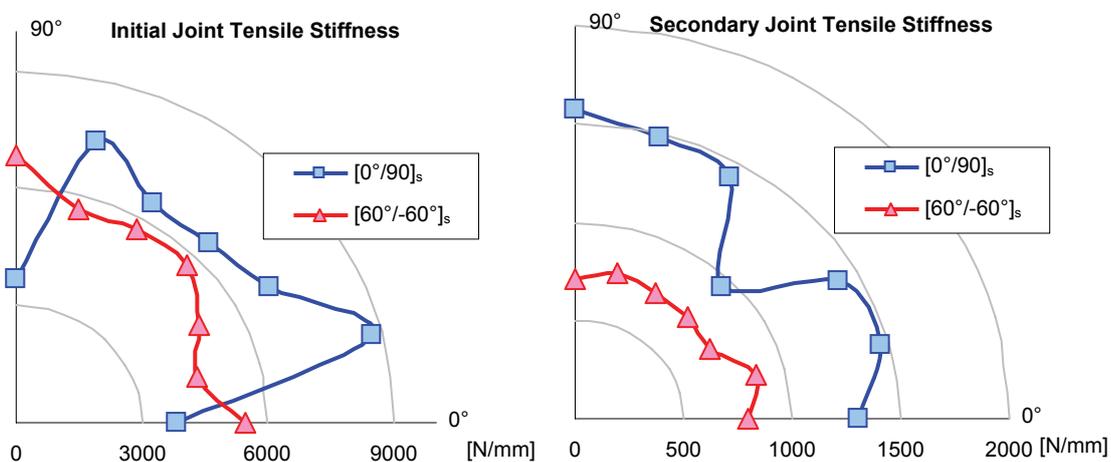


Abb. 6: Initial- and Sekundärsteifigkeit des Verbindungsbereiches für verschiedene Laminat- und Lastrichtungen

## 4 Analytische Beschreibung des Nietverhaltens

### 4.1 Stützpunkte

Die Initialversagenslast  $F_1$  ergibt sich mit Verlassen der Hookschen Gerade bei einer elastischen Verschiebung  $s_1$ . Dieser Stützpunkt lässt sich leicht aus den Versuchskurven ablesen. Der Quotient  $C_1$  aus Initialversagenslast  $F_1$  und elastischer Verschiebung  $s_1$  stellt eine gute Näherung der Initialsteifigkeit dar, da Anfangseffekte wie Nietsetzen verschmiert enthalten sind.

Die maximale Versagenslast  $F_2$  bei einer Gesamtverschiebung  $s_2$  kennzeichnet die maximale Belastungskapazität der Nietverbindung. Die Sekundärsteifigkeit  $C_2$  (Tangentensteifigkeit) ergibt sich aus dem Quotient der Laständerung  $\Delta F = F_2 - F_1$  und der Verschiebungsdifferenz  $\Delta s = s_2 - s_1$ .

Im Rahmen der umfangreichen Untersuchungen zeigte sich, dass nahezu unabhängig vom Laminataufbau und der Belastungsrichtung die Sekundärsteifigkeit etwa 1/5 der Initialsteifigkeit beträgt. Mittels dieser empirisch gestützten Annahme sollte es sich als ausreichend erweisen, den prinzipiellen Kurvenverlauf der Nachgiebigkeitsfunktion bei Kenntnis der Initialsteifigkeit verschiedener Laminat- abschätzen zu können.

Die auf diese Art erhaltene bilineare Näherung stellt lediglich eine elementare Näherung des Nachgiebigkeitsverhaltens dar. Da das Versagen zumeist in Form reiner Werkstofftrennung des Faserverbundfügeteils auftrat und sich die beiden Fügepartner im ungestörten Bereich weitestgehend linear-elastisch verhielten, kann das extrahierte Verformungsverhalten des Fügebereichs als geometrieun-abhängiges Strukturgesetz formuliert werden, welches in Form der bekannten Ramberg-Osgood-Näherung auch als Stoffgesetzes einer abstrahierten Nietverbindung gesehen werden kann. Die Ramberg-Osgood-Beziehung in der hierfür genutzten Nomenklatur sieht somit folgendermaßen aus:

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \cdot \left( \frac{\sigma}{R_{p0,2}} \right)^n \text{ modifiziert zu}$$

$$s_{R/O}(F) = \frac{F}{C_{1,N}} + s_{0,2} \cdot \left( \frac{F}{F_{p0,2,N}} \right)^{n_N} \quad \text{mit} \quad \frac{1}{C_{1,N}} = \frac{1}{C_1} - \left( \frac{1}{C_{CFRP}} + \frac{1}{C_{Al}} \right). \quad (2)$$

Als Eingangsdaten dienen lediglich zwei Stützpunkte. Die Initialsteifigkeit des Fügebereichs  $C_{1,N}$  ergibt sich aus dem Initialversagen ( $F_1, s_1$ ) und der Reihenschaltung der Steifigkeiten beider Fügepartner. Die abstrahierte Streckgrenze  $F_{p0,2,N}$  bei einer bleibenden Verformung von 0,2 % und demgemäß 0,1 mm bei 50 mm Messlänge stellt eine Analogie zur bekannten Streckgrenze  $R_{p0,2}$  isotroper duktiler Werkstoffe dar.

Die abstrahierte Nietstreckgrenze  $F_{p0,2,N}$  kann mittels folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$F_{p0,2,N} = F_1 + s_{0,2} \cdot \frac{C_{1,N} + C_{2,N}}{2} \quad \text{with} \quad C_{2,N} = C_{1,N} \cdot \frac{C_2}{C_1} \quad (3)$$

$$F_{p0,2,N} = F_1 + 0,1mm \cdot \frac{C_{1,N} + C_{1,N} \cdot \frac{C_2}{C_1}}{2}. \quad (4)$$

Der Krümmungsparameter  $n_N$  ergibt sich aus folgender Gleichung (5) unter Hinzunahme des Finalversagenspunktes ( $F_2, s_2$ ):

$$n_N = \frac{\ln\left(\frac{1}{s_{0,2}} \cdot \left(s_{2,N} - \frac{F_2}{C_{1,N}}\right)\right)}{\ln\left(\frac{F_2}{F_{p0,2}}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{1}{s_{0,2}} \cdot \left(s_2 - \frac{F_2}{C_{CFRP}} - \frac{F_2}{C_{Al}}\right)\right)}{\ln\left(\frac{F_2}{F_{p0,2}}\right)}. \quad (5)$$

Für beide untersuchten Laminat ergab sich derselbe Wert für  $n_N = [4,2...4,5]$ .

Die charakteristischen Stützpunkte für eine realistische Abbildung der Nachgiebigkeitsfunktion des abstrahierten Fügebereichs sind in *Abb. 7* dargestellt. Im Unterschied zur gepunktet dargestellten bilinearen Näherung kann der gesamte Verlauf der Testdaten in nahezu idealer Weise abgebildet werden.

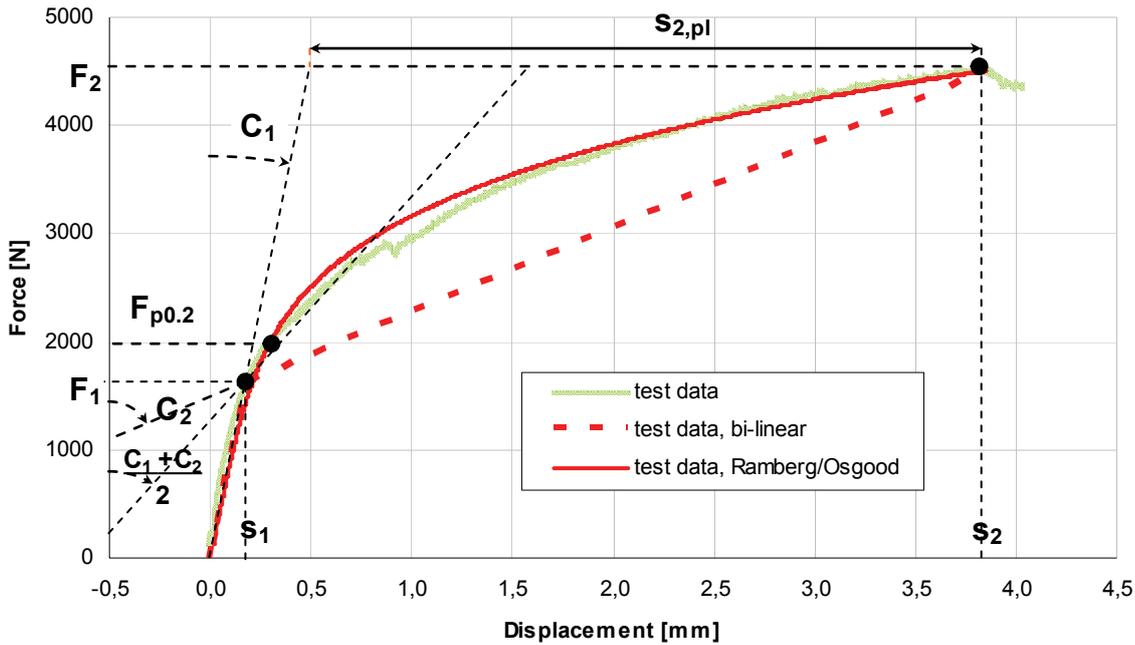


Abb. 7: Stützpunkte für die bilineare und die Ramberg/Osgood-Näherung der Testdaten

Abb. 8 zeigt die Kraft-Weg-Kurven für beide untersuchten Laminat unter einem Winkel von 30° zur Hauptverstärkungsrichtung (30° off-axis Belastung). Die verwendete Ramberg-Osgood-Näherung kann als ideal repräsentativ für die Testdaten angesehen werden.

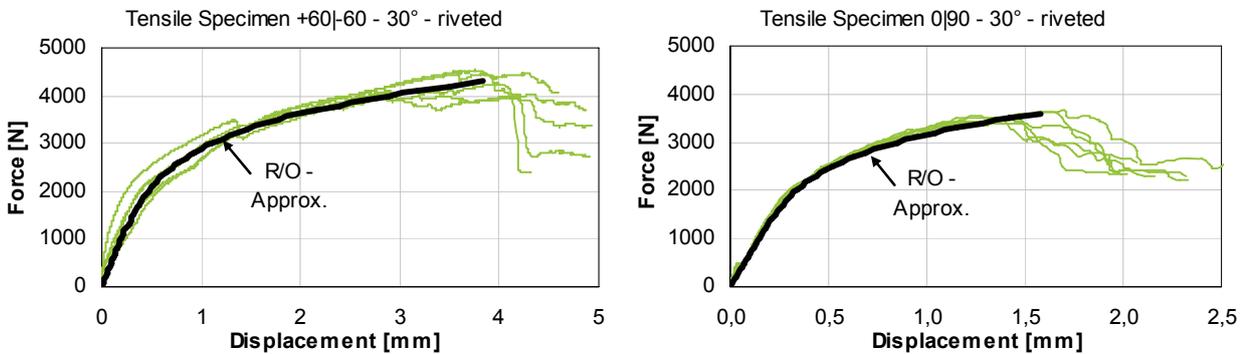


Abb. 8: Typische Kraft-Weg-Kuren genieteter Zugscherproben für [+60/-60]<sub>s</sub> and [0/90]<sub>s</sub> Laminat unter 30° off-axis Belastung im Vergleich zu den Ramberg/Osgood Näherungen

#### 4.2 Versagens-Grenzfunktion

Basierend auf den einachsigen Belastungsversuchen unter unterschiedlichen Belastungswinkeln  $\beta$  zur Hauptverstärkungsrichtung wurde eine Versagens-Grenzfunktion  $F_2(\beta)$  formuliert:

$$F_2(\beta) = \sum_{k=0}^{K-1} c_k \cdot \beta^k = c_{K-1} \cdot \beta^{K-1} + c_K \cdot \beta^K + \dots + c_1 \cdot \beta^1 + c_0 \cdot \quad (6)$$

Die Anzahl der diskreten Datenpunkte definiert hier die Ordnung des Ansatzpolynoms. Aus Gründen der Symmetrie bzgl. der 0°- und 90°-Achsen erhöht sich die Ordnung um zwei, d.h. die Versagens-Grenzfunktion ist spiegelsymmetrisch zu den Koordinatenachsen.

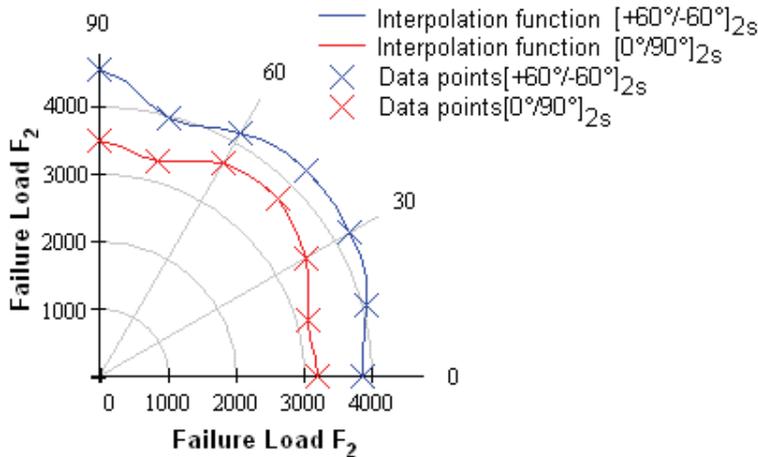


Tabelle 1: Interpolationskoeffizienten

	$[0^\circ/90^\circ]_{2s}$	$[+60^\circ/-60^\circ]_{2s}$
$c_0$	3,235730E+03	3,88416E+03
$c_1$	9,848221E+00	-2,19784E+00
$c_2$	-6,178769E+00	8,953968E-01
$c_3$	6,873856E-01	1,248377E-01
$c_4$	-3,15189E-02	-1,236297E-02
$c_5$	7,65792E-04	4,265534E-04
$c_6$	-1,035432E-05	-7,162445E-06
$c_7$	7,325506E-08	5,87898E-08
$c_8$	-2,106304E-10	-1,882825E-10

Abb. 9: Versagens-Grenzfunktionen  $F_2(\beta)$  der untersuchten Lamine mit Datenpunkten

Mit Hilfe der Versagens-Grenzfunktion und der Ramberg-Osgood-Nachgiebigkeitsfunktion ist das Nietnachgiebigkeitsverhalten bis zum Versagen eindeutig beschrieben (Abb. 10). Die beiden Achsen in der x-y-Ebene repräsentieren die Relativverschiebungen der Fügepartner bezogen auf die Hauptverstärkungsrichtung des Laminates dar, während die Versagens-Grenzfunktion die übertragende Nietkraft limitiert.

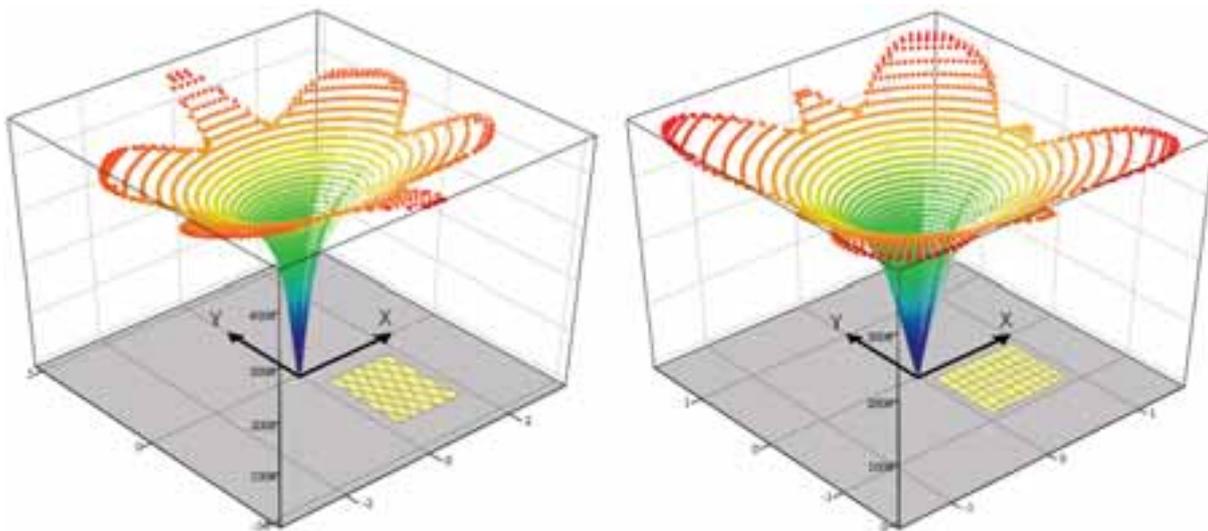


Abb. 10: Richtungs- und lastabhängiges Nietzonen-Strukturverhalten für den  $[+60/-60]_s$ -Verbund (links) und den  $[0/90]_s$ -Aufbau (rechts)

## 5 Numerische Beschreibung des Nietverhaltens

Gerade in der Vorentwicklung eines Produktes erweist es sich als zeitintensiv und damit teuer, alle potentiell in Frage kommenden Laminatfamilien experimentell zu untersuchen – zu groß ist die Auswahl an Kunststoffen und Fasern. Die letztendliche Festlegung von Materialien und Laminaten hängt von funktionellen Gegebenheiten der Gesamtstruktur ab wie Anforderung hinsichtlich Steifigkeit, Energieaufnahme bei Crash, etc. Für Blindnietverbindungen wird hier eine Methodik vorgestellt, die das Nachgiebigkeits- und Versagensverhalten realistisch abschätzen kann, aber auf zeit- und rechenintensive Detailmodelle verzichtet.

Mittels eines elementaren 2D-Modells einer CFK-Scheibe mit Kreiskerbe können die kritischen Belastungszustände im Kerbnahfeld für verschiedene Faserverbunde leicht ermittelt werden. Die Knoten in der Nietbohrung sind dabei am halben Umfang radial eingespannt, während die Last am freien Ende eingeleitet wird (Abb. 11).

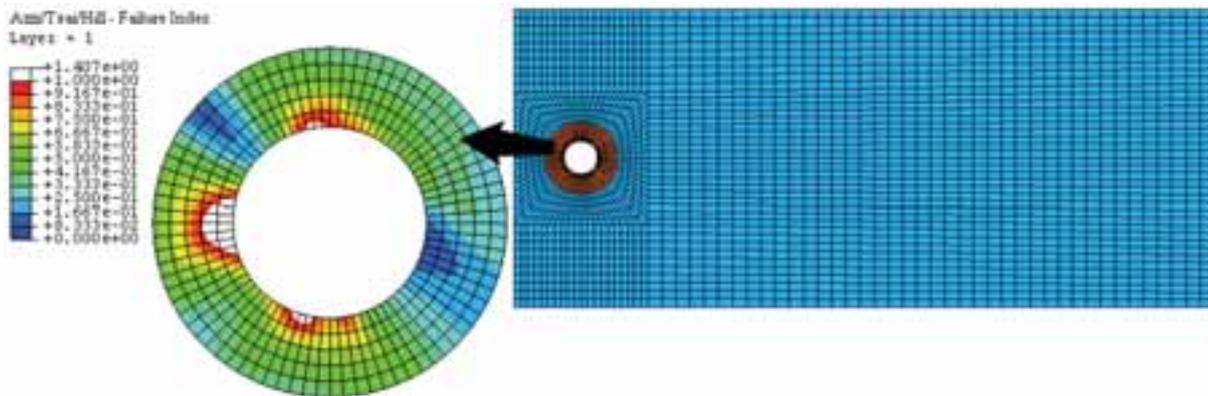


Abb. 11: 2D-Modell der gelochten CFK-Scheibe zur Ermittlung des Versagensverhaltens im Kerbnahfeld

Dieses ebene Kalibriermodell wird lediglich für die Ermittlung der beiden charakteristischen Versagenslasten Initial- und Finalversagen genutzt. Dazu ist ein Werkstoffmodell notwendig, welche eine klare Identifikation von Zwischenfaser- und Faserbruch ermöglicht. Da herkömmliche FE-Programme bislang keine geeigneten Werkstoffmodelle bereitstellen, um die relevanten versagensmodusbezogenen Nichtlinearitäten abbilden zu können, wurden Subroutinen für ein benutzerdefiniertes Materialmodell eingesetzt. Das Versagensmoduskonzept (FMC) [1] eignet sich zwar hierfür in idealer Weise, ist allerdings in keinem kommerziellen FE-Programm standardmäßig verfügbar. Im Zuge einer schnellen und einfachen Umsetzung wurde das in ABAQUS/Standard [2] enthaltene Azzi-Tsai-Hill Kriterium stattdessen genutzt, um Zwischenfaser- und Faserbrüche in jeder Schicht der zu untersuchenden Aufbauten lokalisieren zu können.

Da Zwischenfaserbruch (ZFB) eine Spannungumlagerung zur Folge hat, muss dieser Umstand im verwendeten Werkstoffmodell berücksichtigt werden. Zu diesem Zwecke wurde die Azzi-Tsai-Hill Formulierung in zwei Terme aufgespalten, die die jeweiligen Grundversagensmoden Zwischenfaser- bzw. Faserbruch beschreiben. Unter der Annahme, dass Faserbruch einen Zwischenfaserbruch nach sich zieht ergeben sich folgende Gleichungen für die Grundversagensmoden:

$$F_{||} = \frac{\sigma_{||}^2}{R_{||}^2} = 1 \quad \text{für Faserbruch und} \quad (7)$$

$$F_{\perp} = \frac{\sigma_{||}^2}{R_{||}^2} - \frac{|\sigma_{||}\sigma_{\perp}|}{R_{||}^2} + \frac{\sigma_{\perp}^2}{R_{\perp}^2} + \frac{\tau_{||\perp}^2}{R_{\perp||}^2} = 1 \quad \text{für Zwischenfaserbruch.} \quad (8)$$

Die Festigkeitswerte für  $R_{||}$  und  $R_{\perp}$  werden gemäß der lokalen Beanspruchungsrichtung (Zug oder Druck) festgelegt.

Die Erfahrung zeigt, dass sich eine geringe Anzahl von Zwischenfaserbrüchen nicht bzw. kaum auf die Nachgiebigkeit der Verbindung auswirkt. Erst eine größere Rissdichte verursacht einen sichtbaren Steifigkeitsverlust und kennzeichnet damit das Initialversagen  $F_1$ . Für die Abbildung dieses Effektes sind somit drei Materialzustände mit Hilfe der Subroutine USDFLD [2] zu beschreiben. Der erste Zustand repräsentiert den ungeschädigten Werkstoff. Wird die Zwischenfaserbruchbedingung  $F_{\perp} = 1$  erfüllt, werden sowohl die Steifigkeiten in Querrichtung als auch die Schubsteifigkeiten zu Null gesetzt. Der dritte Materialzustand ist durch die Auswirkungen des Faserbruchs gekennzeichnet – alle Steifigkeiten werden zu Null gesetzt, um numerische Instabilitäten und damit den Abbruch der Berechnung auf dem Lastniveau  $F_2$  zu provozieren

Die Ermittlung der Anfangssteifigkeit unter Berücksichtigung von Kontakt, Reibung, Nietvorspannung, Nietsetzen etc. erfolgt mit einem detaillierten 3D-Modell (Abb. 12), welches mit der Initialversagenskraft  $F_1$  belastet wird. Auf diesem Lastniveau lassen sich die Initialverschiebung  $s_1$  und daraus schließlich die Initialsteifigkeit  $C_1$  ermitteln. Unter der empirisch gestützten Annahme einer Steifigkeitsreduktion auf  $1/5$  der Initialsteifigkeit, kann die sekundäre Tangentensteifigkeit abgeschätzt werden. Aus den Gleichungen (2), (4) und (5) lässt sich dann das gesamte nichtlineare Nachgiebigkeitsverhalten ableiten.



Abb. 12: 3D-Finite Element Model der genieteten Verbindung

## 6 Implementation in kommerzielle FE-Programme

Eine effiziente Analyse komplexer Strukturen verbietet gemeinhin den Einsatz detailliert modellierter Fügebereiche. Das entwickelte mehrparametrische Nietnachgiebigkeits-Versagensmodell ermöglicht es jedoch, den Charakter der Nietverbindung in Form einer „Black Box“ einem einzigen Verbindungselement – einer Kombination aus Balkenelement und nichtlinearem Connectorelement zuweisen zu können.

Das Connectorelement CONN3D2 [2] verbindet den Endknoten des Balkenelementes mit dem zugehörigen Knoten des Faserverbundfügeteils. Durch das Balkenelement kann den lokalen geometrischen Bedingungen Rechnung getragen werden, während die Nietnachgiebigkeit über die Subroutine gesteuert wird, die das Nietverhalten richtungs- und lastabhängig beschreibt.

Unvorteilhafterweise können die Schnittlasten des Balkenelementes nicht direkt von der Subroutine gelesen werden. Mit Hilfe der Utility-Routine URDFIL [2] werden die Kräfte aus der \*.fil Datei gelesen und in einer LOGICAL FUNCTION genutzt, welche die Versagens-Grenzfunktion (6) beinhaltet.

Die Verfestigungsfunktion des Connectorelements vom Typ RADIAL-THRUST [2] ist stückweise linear als Tabelle von Kraft-Verschiebungs-Werten definiert. Eine zusätzliche FIELD-Variable dient als Schalter zum Wechsel in den Entfestigungsbereich. Die Verfestigungskurve stellt im Moment einen Mittelwert aus den untersuchten Lastrichtungen dar, allerdings ist eine komplexere Funktion über eine weitere FIELD-Variable problemlos realisierbar. Die Entfestigungskurve ist der Einfachheit halber eine pure Annahme aus einigen Testdaten.

## 7 Anwendungsbeispiel

Das Nietsubmodell wurde für die systematische Optimierung des Laminataufbaus eines thermisch kompatiblen hybriden CFK/Al-Schubfeld-Demonstrators genutzt [3], [4]. Das Schubfeld besteht aus einem Aluminium-Rahmen mit einer genieteten CFK-Platte und entspricht in seinen Dimensionen den geometrischen Verhältnissen einer PKW-Bodengruppe (Abb. 13).

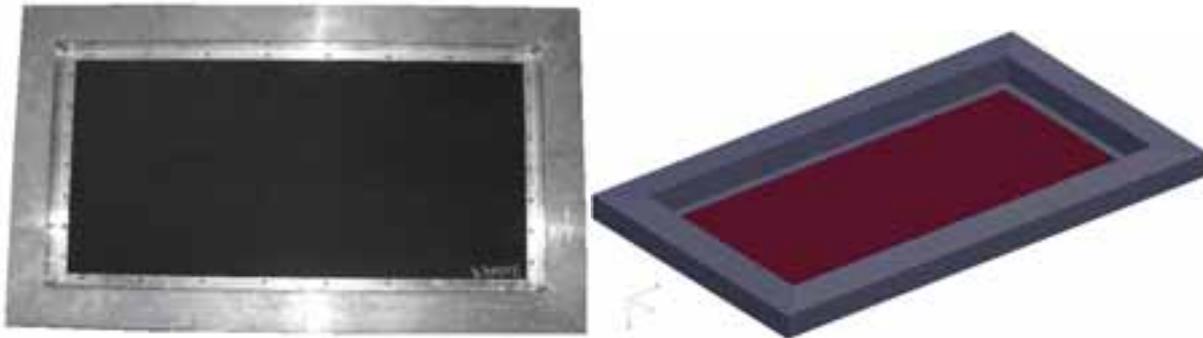


Abb. 13: Hybrides Schubfeld und das zugehörige Finite Elemente Modell (rechts)

Das genietete Schubfeld ist im KTL-Trocknungsprozess Temperaturen von bis zu 180 °C ausgesetzt, wodurch versagenskritische Beanspruchungszustände in den Fugebereichen erreicht werden können. Mit Hilfe des Submodells konnte das Strukturverhalten des Gesamtmodells mit 30 Nieten effektiv simuliert und das Schädigungsverhalten der einzelnen Fugebereiche zuverlässig vorhergesagt werden. Ein Vergleich mit den optischen Messergebnissen des ARAMIS-Systems [5] zeigt eine hervorragende Übereinstimmung des Deformationsbildes bei 100 °C mit der Simulation (Abb. 14).

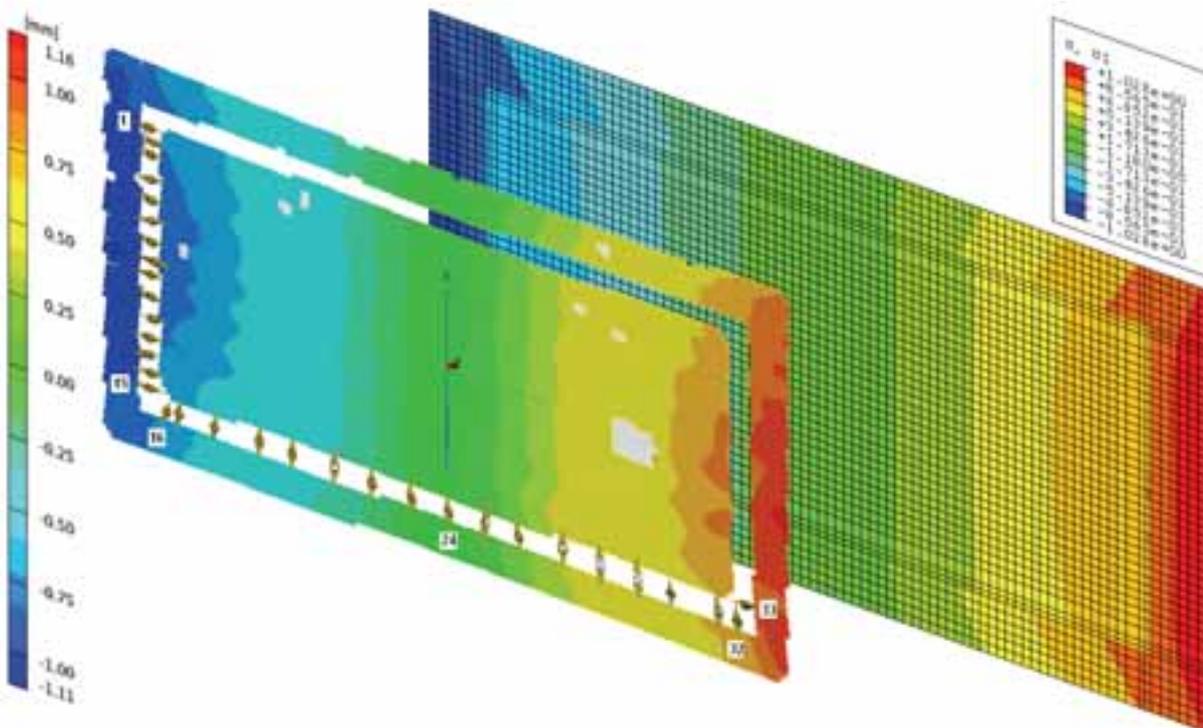
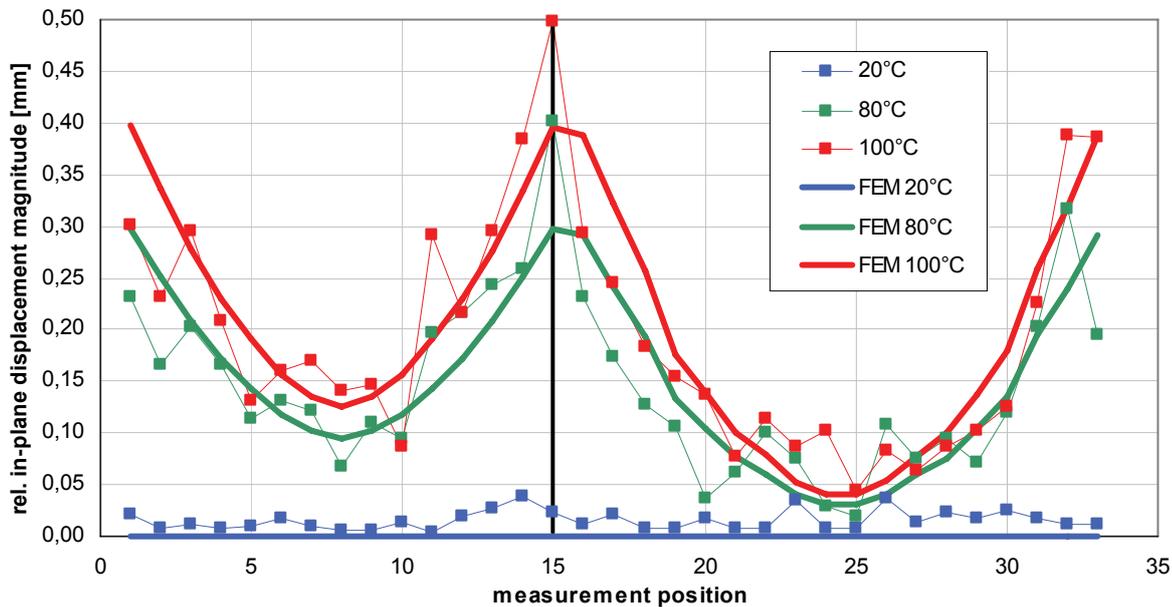


Abb. 14: Optische Vermessung (links) und Simulation (rechts) der ebenen Längsverschiebung im 1. Test bei 100 °C (Messpositionen nummeriert)

An den in *Abb. 14* gekennzeichneten Messpositionen wurden die ebenen Relativverschiebungen extrahiert und in *Abb. 15* für die Temperaturen 20 °C, 80 °C und 100 °C dargestellt. Simulation und Experiment zeigen hierbei eine sehr gute Übereinstimmung.



*Abb. 15: Vergleich der optischen Vermessung und der Simulation für die ebene Relativverschiebung an den bezeichneten Messpositionen auf verschiedenen Temperaturniveaus*

## 8 Zusammenfassung

Die entwickelte Methodik und Implementierung eines einfach zu handhabenden Nietmodells in ABAQUS ermöglicht als praxiserfahrenes Ingenieurwerkzeug sowohl eine deutliche Verkürzung des Berechnungsaufwandes bei der Auslegung hybrider Fügebereiche als auch eine erhebliche Reduzierung des notwendigen Prüfumfanges. Die Berechnungsergebnisse konnten anhand durchgeführter Belastungstests mit einem Schubfeld-Demonstrator eindrucksvoll verifiziert werden.

Darüber hinaus lässt sich das Submodell in bestehende komplexe Modelle integrieren und ist prinzipiell auch auf andere Niet-, Bolzen- oder Schraubverbindungen übertragbar.

## 9 Literatur

- [1] Cuntze, R., Freund, A.: "The predictive capability of failure mode concept-based strength criteria for multi-directional laminates", *Composites Science and Technology* 64, 2004, 343-377
- [2] ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.4 Documentation
- [3] Hufenbach, W.; Gude, M.; Freund, A.; Kläger, O.: "Simulation des Versagensverhaltens von Blindnietverbindungen in hybriden CFK/Al-Karosseriestrukturen.", *Konstruktion* 1-2/2008, VDI Verlag
- [4] Hahn, O.; Hufenbach, W.; Gude, M.; Kläger, O.: "Entwicklung eines Auslegungskonzeptes für geklebte und genietete CFK/Al-Karosseriestrukturen aus Basis experimenteller und numerischer Untersuchungen.", 11. Paderborner Symposium Fügetechnik 2004
- [5] GOM Gesellschaft für optische Messtechnik, User's Manual, 2000

## Der Autor

Dipl.-Ing. Andreas Freund  
 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik  
 An der Technischen Universität Dresden

# Unstrukturierte finite Elemente Simulationen für die Tsunami-Frühwarnung in Indonesien

Jörn Behrens

Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research

Im Rahmen der Aufbauhilfe der Bundesregierung nach dem Tsunami im Dezember 2004 für die Länder des Indischen Ozeans wird mit Partnern aus Deutschland und Indonesien das Deutsch-Indonesische Tsunami-Frühwarnsystem (GITEWS) entwickelt und in Jakarta installiert. Um innerhalb kürzester Zeit aufgrund weniger verfügbarer Messdaten ein präzises Lagebild erstellen zu können, entwickelt die Arbeitsgruppe Tsunami-Modellierung am Alfred-Wegener-Institut (AWI) die Simulations-Komponente des Tsunami-Frühwarnsystems. Dazu gehört eine sehr genaue und validierte Software zur Simulation der Tsunami-Ausbreitung und -Überflutung, wie auch eine intelligente Datenbank-Anwendung zur Auswahl vorberechneter Szenarien zur schnellen Lagebeurteilung.

Dieser Beitrag beschreibt die Simulationssoftware TsunAWI, welche die Ausbreitung und Überflutung von Tsunami-Wellen mit Hilfe der nicht-linearen Flachwasser-Theorie berechnet. Dabei ist ein kritisches Element in der Simulationskette, ein geeignetes und genaues Gitter zu generieren. Da die Ergebnisse operationell für die Frühwarnung im Katastrophenfall verwendet werden, ist eine detaillierte Evaluierung der Simulationen notwendig. Diese Ergebnisse werden anhand von Beispielen erläutert.

## 1 Einführung

Der zerstörerische Tsunami am 26. Dezember 2004 im Indischen Ozean regte eine Reihe von Aktivitäten an, mit dem Ziel, das öffentliche Bewusstsein über und die Vorbereitung auf Tsunami-Katastrophen zu stärken. Im Rahmen der 500 Mio. Euro schweren Aufbauhilfe der Bundesregierung für die Region werden etwa 45 Mio. Euro in die Entwicklung und den Aufbau eines Tsunami Frühwarnsystems für den Indischen Ozean investiert. Das Deutsch-Indonesische Tsunami Frühwarnsystem (GITEWS), das in Jakarta/Indonesien installiert wird, ist eine gemeinschaftliche Entwicklung von neun großen Forschungseinrichtungen in Deutschland sowie weiterer Partner in Indonesien [7].

Die Arbeitsgruppe Tsunami-Modellierung am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtzgemeinschaft (AWI) ist für die Entwicklung und Implementierung des Simulationssystems innerhalb des GITEWS Frühwarnsystems verantwortlich. Wegen der extrem kurzen Vorwarn- und Reaktionszeiten können dabei keine Simulationen in Echtzeit durchgeführt werden. Vielmehr basiert das System auf einer Vielzahl vorher berechneter Szenarien. Im Falle eines Erdbebens werden verschiedenartige Sensordaten mit den vorhandenen Szenarien verglichen. Das am besten passende Szenario wird dann ausgewählt und ergibt die wahrscheinliche Tsunami-Situation. Das Simulationssystem (SIM) besteht also aus verschiedenen Komponenten:

- Ein großes Repository von zuvor berechneten Tsunami Szenarien Dateien;
- Einer Simulationssoftware zur Berechnung der Szenarien – hier insbesondere TsunAWI;
- Einen Selektions-Mechanismus zur Auswahl des wahrscheinlichsten Szenarios;
- Eine kleine und schnell zugreifbare Datenbank mit Szenariendaten an indizierten Sensor-Positionen zum Vergleich mit einlaufenden Sensordaten;
- Eine Post-Prozessierungs-Einheit, mit der entsprechende Datenprodukte wie Überflutungskarten automatisch erstellt werden können.

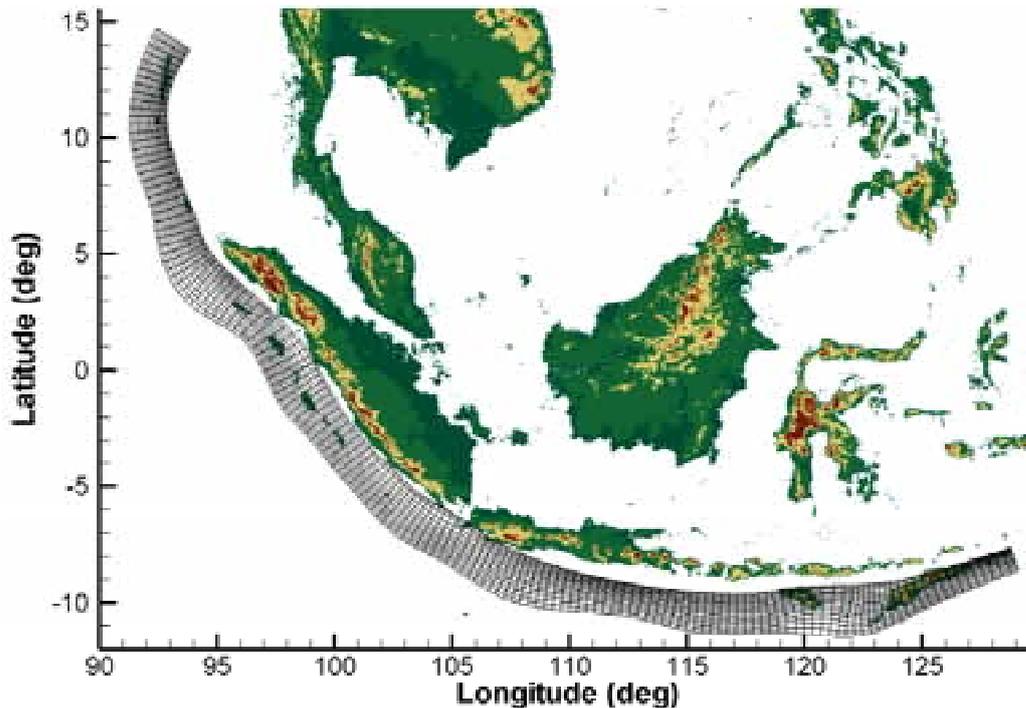


Abb. 1: Gitter mit einzelnen Platten, aus denen die Bodendeformation nach einem Erdbeben berechnet werden kann (Abbildung von A. Babeyko, GFZ Potsdam).

In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt der Darstellung auf der Szenario-generierenden Software TsunAWI. Bevor mit der Beschreibung der Hintergründe der Tsunami-Modellierung begonnen wird, sollen nun aber ein paar Fakten über die Tsunami-Entstehung im Indischen Ozean genannt werden.

### 1.1 Tsunamis im Indischen Ozean

Etwa 90% der Tsunamis in Indonesien werden durch Erdbeben verursacht, die eine Meeresboden-Anhebung verursachen [10]. In der Zeit zwischen 1600 und 1999 fanden etwa 100 Tsunamis in der Region statt, was bedeutet, dass etwa alle vier Jahre ein zerstörerischer Tsunami auftritt. Die restlichen 10% der Tsunamis sind durch Vulkan-Eruptionen (9%) oder Hangrutschungen (1%) verursacht.

Während die geologische Forschungsgemeinschaft noch über die Rolle der horizontalen Impuls-Übertragung für die Tsunami Formation debattiert [18], wird in unseren Simulationen lediglich eine vertikale Boden-Deformation als Anfangsbedingung angenommen. In der momentanen Version des Simulationssystems wird auch nur die Tsunami-Anregung durch Erdbeben berücksichtigt, da die Generierung von Tsunamis durch Vulkanausbrüche oder Rutschungen sehr viel komplexer ist und noch weitgehend der theoretischen Fundierung bedarf.

Traditionell wird die Bodenanhebung durch eine statische Bewegung einer einzelnen Erdplatte modelliert (siehe [12], [13]). Die Simulationen in diesem Artikel verwenden jedoch einen fortschrittlicheren Ansatz, bei dem 2250 Mikro-Platten (Patches) von ca. 45x15 km Größe in einem Gitter entlang des Sundagrabens nahe der Indonesischen Küste zum Indischen Ozean (Sumatra, Java, Bali) angeordnet sind (siehe Abbildung 1). Diese Patches werden jeweils durch ein 1D Erdkrustenmodell beschrieben. Größere Erdbeben werden durch mehrere dieser Patches repräsentiert, die nach gängigen Skalierungsfunktionen die Anregungsenergie verteilen.

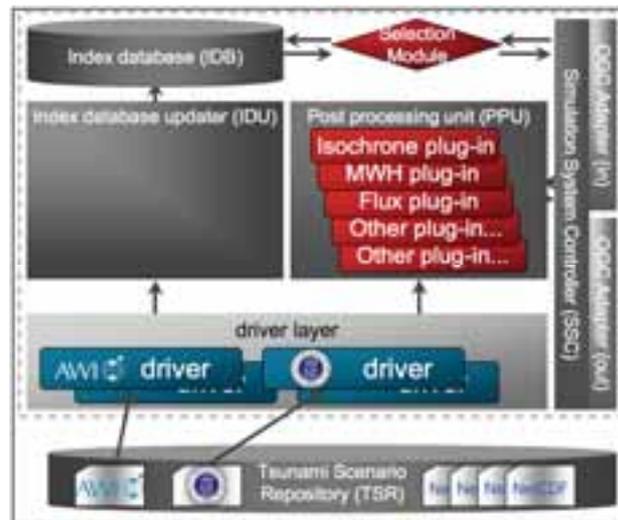


Abb. 2: Interne Struktur des GITEWS Simulations-Systems.

## 2 Die Rolle der numerischen Simulation im GITEWS Tsunami Frühwarnsystem

Anders als bisherige Tsunami Frühwarnsysteme, die im wesentlichen auf der Auswertung der seismischen (Erdbeben) Parameter für die Erstellung der Lagebeurteilung basieren (siehe [6] und [17]), wird im GITEWS System auf die gleichzeitige Auswertung von verschiedenen Messwerten gebaut. Um innerhalb weniger Minuten ein qualifiziertes Lagebild der Tsunami-Auswirkungen und der Situation im Nahfeld zu erhalten, wird das aktuellste seismische Netzwerk mit Auswertungs-Software SeisComP3 verwendet [22]. Zusätzlich werden Daten aus Wellenpegeln and der Küste sowie im tiefen Ozean (Bojen), sowie GPS-Sensoren zur Messung der Erdboden-Verschiebung in Echtzeit gesammelt.

Die so gewonnenen Daten werden mit den vorher berechneten Szenarien verglichen. Dabei wird der Vergleich durch einen gewichteten 2-Norm Ansatz für mehrfache Sensorwerte realisiert. Eine Vorwärts-Simulation in Echtzeit unter Umgehung von vorberechneten Szenarien wäre dabei im Prinzip auch möglich. Allerdings ist diese Vorgehensweise nicht unbedingt geeignet, denn die Inversion der Quelle (also der Anfangsbedingung) der Tsunami-Ausbreitung ist ein schlecht gestelltes Problem. Mit anderen Worten, ein kleiner Fehler in den Messungen kann zu großen Unterschieden bei der Quellen-Bestimmung führen. Eine Tsunami-Simulation mit diesen eventuell stark gestörten Anfangsbedingungen würde somit den Fehler weiter transportieren und sogar verstärken und somit zu weitgehend falschen Aussagen für die Tsunami-Auswirkungen führen. Daher wird hier die Strategie verfolgt, eine Reihe von kompletten Szenarien im Voraus zu berechnen und dann einen konsistenten (möglicherweise mit Messfehlern behafteten) Datensatz mit den jeweils konsistenten indizierten Szenarien-Daten zu vergleichen. Das Szenario mit der besten Übereinstimmung und weitere gut passende Szenarien werden dann zur Lagebeurteilung und Entscheidungsunterstützung herangezogen.

Das SIM besteht aus mehreren Komponenten, die in Abbildung 2 dargestellt sind. Die Schnittstellen sind durch Standard-konforme Web-Services nach Open GIS Consortium (OGC) realisiert. Ein Controller steuert die internen Datenflüsse. Die zentrale Logik stellt die Selektions-Einheit bereit. In ihr wird der Multi-Sensor Auswahl-Algorithmus implementiert. Diese Einheit arbeitet mit indizierten virtuellen Sensorwerten aus den zuvor berechneten Szenarien, welche wiederum für den schnellen Zugriff in der vergleichsweise kleinen Index-Datenbank gespeichert sind. Ein Index-Datenbank-Updater füllt die Index-Datenbank automatisch aus Roh-Daten im Szenario-Repository. Um verschiedene Szenarien-Typen und die Integration von Szenarien von Drittanbietern transparent für die internen Module des SIM zu realisieren, wird eine Software-Ebene von Szenario-Treibern (driver) eingesetzt. Schließlich ist eine Post-Processing-Einheit für die Aufbereitung der Daten – beispielsweise als Karte – verantwortlich. Diese Einheit besteht aus verschiedenen Plug-Ins, über die sich mögliche Nutzungen anpassen lassen. Die Post-Processing-Einheit kann entweder nach einem Selektionsprozess oder im Vorhinein mit entsprechenden Szenario IDs angesprochen werden.

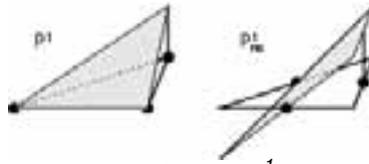


Abb. 3: Konformes  $P^1$  (links) und nicht-konformes  $P^1_{NC}$  (rechts) lineares Lagrange Element.

### 3 Beschreibung des finite Elemente Models TsunAWI

Die Basis aller Szenario-Berechnungen ist die numerische Simulationssoftware TsunAWI, die auf unstrukturierten finite Elemente Gittern basiert [2].

#### 3.1 Flachwasser Gleichungen

Wie die meisten aktuellen operationellen Tsunami Simulationsprogramme (siehe beispielsweise [9] und [20]) verwendet auch TsunAWI die nicht-linearen Flachwassergleichungen als Basis für die Modellierung der Wellenausbreitung. Diese Gleichungen sind gegeben durch

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}H) = 0, \tag{1}$$

für die Kontinuitätsgleichung (Masseerhaltung). Dabei ist  $H(\mathbf{x},t) = (\zeta(\mathbf{x},t) + h(\mathbf{x}))$  die Gesamtwassertiefe aus  $\zeta$ , der Oberflächenauslenkung (sea surface height, SSH) und  $h$  der Wassertiefe vom Boden bis zum mittleren Meeresspiegel.  $\mathbf{v}(\mathbf{x},t)$  ist die Horizontalgeschwindigkeit in Vektorform mit  $\mathbf{x}$  und  $t$  den Koordinaten in Raum und Zeit. Die Impulsgleichungen lauten

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + f \times \mathbf{v} + g \nabla \zeta + \frac{C_d \mathbf{v} |\mathbf{v}|}{\rho H} - \nabla \cdot (A_h \nabla \mathbf{v}) = 0, \tag{2}$$

wobei  $f$  der Coriolis Parameter ist,  $g$  die Gravitations-Konstante,  $C_d$  ist ein Reibungs-Koeffizient,  $A_h$  der horizontale Wirbel-Viskositäts-Koeffizient. Diese Gleichungen sind gültig im inneren eines berandeten Gebietes (des Ozeans) und eines beschränkten Zeitintervalls  $\Omega \setminus \partial\Omega \times [0, T]$ , wobei noch geeignete Randbedingungen auf dem Gebietsrand  $\partial\Omega$  angegeben werden müssen. Strahlungs-Randbedingungen werden an den offenen Ozeanrändern verwendet, und so genannte no-slip (reflektierende) oder Überflutungs-Randbedingungen gelten an den Küsten.

#### 3.2 Finite Elemente Diskretisierung

Gleichungen (1) und (2) werden nun in Anlehnung an einen Ansatz von Hanert et al. [8] diskretisiert. Die spezielle Kombination von finiten Elementen besteht aus einem konformen  $P^1$  Element für die Modellgrößen  $H$ ,  $\zeta$ , and  $h$ . Die Geschwindigkeitskomponenten werden auf einem nicht-konformen  $P^1_{NC}$  Element dargestellt, bei dem die Unbekannten auf den Kanten definiert sind (siehe Abbildung 3). Diese Kombination von Elementen hat sich als stabil und frei von numerischen Moden herausgestellt. Bezeichnen wir die Basisfunktionen auf  $P^1$ -Elementen mit  $\phi$  und diejenigen auf  $P^1_{NC}$ -Elementen mit  $\mathbf{w}$ , so kann man Gleichungen (1) mit dem üblichen Ritz-Ansatz schreiben:

$$\int_{\Omega} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial t} \phi - H \mathbf{v} \cdot \nabla \phi \right) d\Omega + \int_{\partial\Omega} H \phi \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} d\Gamma = 0, \quad \forall \phi. \tag{3}$$

Dabei haben wir partielle Integration angewendet, um die Ableitungen auf die Basisfunktionen zu überführen.  $\mathbf{n}$  bezeichnet den äußeren Normalenvektor. Analog schreibt sich Gleichung (2):

$$\int_{\Omega} \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \mathbf{w} - (\nabla \cdot (\mathbf{v}\mathbf{w})) \mathbf{v} + (f \times \mathbf{v}) \cdot \mathbf{w} + g \nabla \zeta \cdot \mathbf{w} + \frac{C_d \mathbf{v} |\mathbf{v}|}{\rho H} \cdot \mathbf{w} - (A_h \nabla \mathbf{v}) \cdot \nabla \mathbf{w} \right) d\Omega + \int_{\partial\Omega} (\mathbf{v}\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{w} d\Gamma = 0, \quad \forall \mathbf{w}. \tag{4}$$

Wieder haben wir partielle Integration verwendet, um die Ableitung von  $\mathbf{v}$  auf  $\mathbf{w}$  zu übertragen. Darüber hinaus haben wir die Argumente aus Hanert et al. verwendet, um anzunehmen, dass

$$\int_{\Omega} (\nabla \cdot A_h \nabla \mathbf{v}) \cdot \mathbf{w} \, d\Omega \approx \int_{\Omega} (A_h \nabla \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{w}) \, d\Omega. \quad (5)$$

Um nun eine berechenbare Form der Gleichungen zu erhalten, verwenden wir den üblichen Galerkin-Ansatz für die räumliche Darstellung der Größen  $H$ ,  $\zeta$ ,  $h$ , and  $\mathbf{v}$  als Linearkombinationen von Basisfunktionen. Zum Beispiel

$$\zeta(\mathbf{x}) \approx \sum_{i=1}^N \zeta_i \phi_i(\mathbf{x}), \quad \mathbf{v}(\mathbf{x}) \approx \sum_{j=1}^M \mathbf{v}_j \mathbf{w}_j(\mathbf{x}),$$

wobei  $\zeta_i$  und  $\mathbf{v}_j$  die Koeffizienten sind, während  $\phi_i$  und  $\mathbf{w}_j$  die Basisfunktionen zum  $i$ -ten Knoten bzw. zur  $j$ -ten Kante darstellen. Das Gebiet  $\Omega$  wird nun trianguliert, d.h.

$$\bar{\Omega} = \bigcup_{k=1}^L \bar{\tau}_k, \quad \tau_i \cap \tau_j = \emptyset \quad (i \neq j),$$

wobei  $\tau_k$  das Innere der Dreiecke oder Elemente des triangulierten Gitters ist (siehe Abschnitt 3.3). Diese Elemente werden eingeführt, um einen beschränkten Träger für die Basisfunktionen zu konstruieren. Wegen der nicht-konformen (d.h. nicht-stetigen) Basisfunktionen für die Geschwindigkeiten muss ein zusätzlicher Term eingeführt werden, um die Glattheit der Lösung zu erzwingen. Dieser Term agiert auf den Elementgrenzen  $\Gamma$  und ist gegeben durch

$$\int_{\Gamma} \langle \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \rangle_{\lambda} \cdot [\mathbf{w}] \, d\Gamma, \quad \Gamma = \bar{\tau}_i \cap \bar{\tau}_j, \quad (6)$$

mit  $\mathbf{n}$  dem äußeren Normalenvektor (relativ zur Elementgrenze) und

$$\begin{aligned} (\nu)_{\lambda} &= \left(\frac{1}{2} + \lambda\right) \nu|_{\tau_i} + \left(\frac{1}{2} - \lambda\right) \nu|_{\tau_j}, \quad \lambda \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right], \\ [\nu] &= \nu|_{\tau_i} - \nu|_{\tau_j}, \end{aligned}$$

das gewichtete Mittel bzw. der Sprung an der Elementgrenze. Unter Vernachlässigung der Zeitabhängigkeit (für den Moment) und unter Verwendung weiterer Vereinfachungen wie in [8], erhält man die diskrete Form der Kontinuitätsgleichung

$$\sum_{k=1}^L \int_{\tau_k} \left( \frac{\partial \zeta^h}{\partial t} \phi_l - H^h \mathbf{v}^h \cdot \nabla \phi_l \right) \, d\Omega + \sum_{j=1}^M \int_{\Gamma_j} \left( \sqrt{gH} \zeta^h \phi_l \right) \, d\Gamma = 0, \quad l = 1 : N \quad (7)$$

sowie die diskrete Impulsgleichung

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^L \int_{\tau_k} \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \mathbf{w}_j - \mathbf{v}^h \nabla \cdot (\mathbf{v}^h \mathbf{w}_j) + (f \times \mathbf{v})^h \mathbf{w}_j + g \nabla \zeta^h \mathbf{w}_j + \frac{C_d \mathbf{v}^h |\mathbf{v}^h|}{\rho H^h} \mathbf{w}_j - A_h \nabla \mathbf{v}^h \right) \cdot \nabla \mathbf{w}_j \, d\Omega + \\ + \sum_{j=1}^M \int_{\Gamma_j} \langle \mathbf{v}^h \mathbf{v}^h \cdot \mathbf{n} \rangle_{\lambda} [\mathbf{w}_j] \, d\Gamma = 0, \quad j = 1 : M. \end{aligned} \quad (8)$$

Dabei wurde der Index  $k=1:L$  für die  $L$  Elemente  $\tau_k$  des Gitters verwendet,  $j=1:M$  für die  $M$  inneren Elementgrenzen  $\Gamma_j$ ,  $l=1:N$  für die  $N$  Knoten, und das hochgestellte  $h$  bezeichnet die Galerkin-Erweiterung der zugehörigen Größen.

Die Zeitableitung in den Gleichungen wird durch ein explizites zentriertes Differenzenverfahren (leap-frog Schema) realisiert, das beispielsweise auch in [9] verwendet wird. Um numerische Effizienz zu erreichen, wenden wir mass-lumping für die entstehenden linearen Gleichungssysteme an. Auf diese Weise erhält man prognostische explizite Formeln für die Größen  $\mathbf{v}^h$  und  $\zeta^h$ .

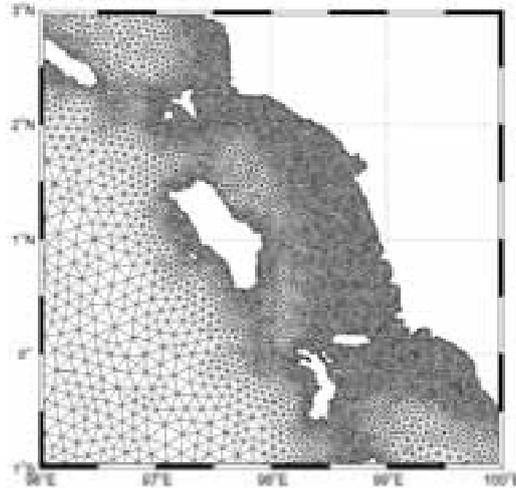


Abb. 4: Ein typisches Gitter für die Berechnung der Tsunami Wellenausbreitung. Der Ausschnitt zeigt die Insel Nias westlich von Sumatra/Indonesien.

### 3.3 Unstrukturiertes Gitter

Im vorigen Abschnitt wurde das numerische Schema für die Lösung der Flachwassergleichungen für die Wellenausbreitung hergeleitet. Ein wesentlicher Bestandteil jeder Simulation ist jedoch die Gittergenerierung, weil die topographischen Feinheiten im Ozean und an der Küste entsprechend angepasste Triangulierungen erfordern. Da das numerische Verfahren ein explizites Zeitschritt-Verfahren verwendet, müssen starke Stabilitätskriterien – insbesondere die Courant-Friedrichs-Levy (CFL) Bedingung – erfüllt werden. Diese Bedingung verlangt, dass der Zeitschritt  $\Delta t$  und/oder die Gitterweite  $\Delta x$  so eingestellt werden, dass die Courantzahl  $C$  für die Wellengeschwindigkeit  $V$  durch 1 beschränkt bleibt:

$$C = V \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1.$$

Glücklicherweise helfen die physikalischen Eigenschaften der Wellenausbreitung, um sowohl die Stabilitätsbedingung zu erfüllen, als auch eine erwünscht hohe Auflösung an der Küste zu erzielen. Denn die Wellengeschwindigkeit in linearer Theorie ist proportional zur Wassertiefe, aufgrund der folgenden Beziehung:

$$V \approx \sqrt{gH},$$

Die Courantzahl wird also etwa konstant sein, wenn die Gitterweite proportional zur Wassertiefe gewählt wird. Zusätzlich sollten schnelle Änderungen der Topographie durch eine höhere Auflösung erfasst werden. Daher ergibt sich als Kriterium für die Wahl der Zellengröße  $\Delta x$  (mit  $c_t$  und  $c_g$  zwei wählbaren Konstanten):

$$\Delta x \leq \min \left\{ c_t \sqrt{gH}, c_g \frac{h}{\nabla h} \right\}. \quad (9)$$

Die Gittergenerierung startet dann mit gegebenen Bathymetrie- (d.h. der Topographie unterhalb des Meeresspiegels) und Topographie-Daten. Üblicherweise ist ein digitales Geländemodell (digital terrain model DTM bzw. digital elevation model DEM) gegeben. Unsere Simulationen legen meist GEBCO Bathymetrie-Daten zugrunde [19]. Topographiedaten werden meist aus der Shuttle Radar Mission SRTM verwendet [16]. Als weitere Daten kommen zum Einsatz:

- Eine Küstenlinie, definiert als Polygonzug,
- Eine Grenzlinie im offenen Ozean, die das Rechengebiet definiert,
- Eine obere Geländehöhe oder Überflutungsgrenze, die das Gebiet auf dem Land begrenzt. In unseren Gittern ist dies entweder die 50 m Höhenlinie, oder die 7 km Parallele zur Küstenlinie [4].

Mit diesen Eingabewerten wird mittels einer automatischen Delaunay Triangulierungs-Software (triangle von J.R. Shewchuk [14]) ein Gitter des Gebietes erzeugt. Schließlich werden Gitterglättungs-Techniken verwendet, um die Gitterqualität zu erhöhen. Ein Ausschnitt aus einem typischen Gitter ist in Abbildung 4 dargestellt.

### 3.4 Überflutungs-Berechnung

Die Berechnung der Überflutungs-Randbedingungen folgt den Ideen von Lynett et al. [11]. Dabei werden Gitterzellen als feucht, trocken oder teilweise feucht definiert. Im expliziten Zeitschritt-Verfahren wird die Impulsgleichung mit Wassertiefen-Werten aus dem vorherigen Zeitschritt auf der rechten Seite gelöst, während die Kontinuitätsgleichung mit den soeben berechneten Geschwindigkeits-Werten aus der Impulsgleichung gelöst wird. In der Impulsgleichung muss für Zellen, die an der Grenze zwischen feuchten und trockenen Zellen liegen, der Gradiententerm extrapoliert werden. Im Prinzip müsste der Impuls auch in der Kontinuitätsgleichung extrapoliert werden, dieser Schritt wird jedoch zur Vereinfachung und unter Inkaufnahme eines leichten Masseverlustes im Überflutungsschema vernachlässigt.

Es wird also lediglich in der Kontinuitätsgleichung eine Extrapolation von Werten von  $\zeta$  in die trockenen Zellen durchgeführt. Zwei Verfahren werden dabei angewendet:

- Eine lineare Extrapolation basierend auf der finite Elemente Darstellung von  $\zeta$ ,
- Eine lineare Ausgleichs-Methode nach den kleinsten Fehlerquadraten, welche die nächsten feuchten Nachbarknoten in die Berechnung einbezieht. Dieses Verfahren ergibt leicht bessere Ergebnisse in Bezug auf die Glattheit und Genauigkeit der Lösung, ist allerdings sensitiver gegenüber Störungen in der Topographie.

Diese Überflutungs-Berechnung wurde mit Hilfe eines analytischen Testfalls validiert. Die Ergebnisse werden im nächsten Kapitel beschrieben.

## 4 Validierung von TsunAWI

Um für den operationellen Betrieb eingesetzt zu werden, muss die Tsunami Simulations-Software validiert und getestet werden. Neben den üblichen Tests auf Korrektheit und Fehlerfreiheit, wird ein Satz von zunehmend komplexen Funktionalitätstests verwendet. Diese Tests sind mit einer internationalen Gruppe von Tsunami-Wissenschaftlern abgestimmt. Einfache Tests umfassen die Überprüfung der Fluktuation der Masse, welche von TsunAWI exakt erhalten wird. Diese Eigenschaft resultiert aus dem gewählten Diskretisierungsschema (Kontinuitätsgleichung in Flussform verbunden mit strukturhaltender finite Elemente Form). Analytische Testfälle in quasi-eindimensionaler Formulierung bilden die nächste Komplexitätsstufe der Tests. Ein solches Beispiel ist die Prüfung des Verfahrens, das Zurückweichen und anschließende Überfluten eines ebenen, leicht geneigten Strandabschnitts zu zeigen. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt.

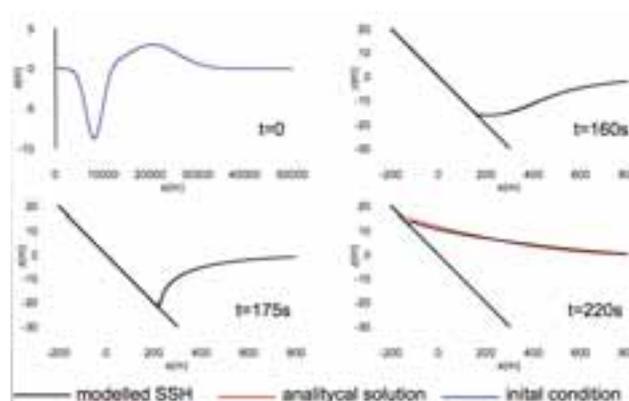


Abb. 5: Ergebnis eines analytischen Testfalls für die Berechnung des Trockenfallens und der Überflutung eines ebenen Strandabschnitts. Simuliertes (schwarz) gegen analytisches (rot) Ergebnis.

Laborexperimente bilden die nächste Stufe von Tests. Und schließlich gibt es von einigen Tsunami-Ereignissen Feldmessungen, die von der Tsunami-Simulation realitätsnah wiedergegeben werden müssen. Der Tsunami vom 26. Dezember 2004 (Großer Andamanen-Sumatra Tsunami) hat tragischerweise eine große Anzahl wertvoller Messdaten geliefert, die nun zur Modell-Evaluierung verwendet werden können [23]. Andere Tsunamis, die für Evaluierungen herangezogen werden, sind der Hokkaido Nansei-Oki Tsunami von 1993 [15], und der Java Tsunami vom 17. Juli 2006 [5]. Schließlich können auch Modellvergleiche zur Validierung von Simulationsergebnissen dienen.

All diese Tests wurden mit TsunAWI erfolgreich durchgeführt. Eine umfassende Dokumentation wird in Kürze verfügbar sein.

## 5 Beispiele für die Anwendung von TsunAWI

Eine der wichtigsten Anwendungen eines Tsunami-Ausbreitungsmodells im Rahmen von Frühwarnung ist die Bereitstellung von Ankunftszeiten. Die einfache Berechnung der Ankunftszeiten mit Hilfe linearer eindimensionaler Strahl-Verfolgungs-Verfahren mag für vorläufige Schadens-Einschätzungen noch durchführbar sein. Im Falle von komplexen Küstengeometrien und vor allem im Nahfeld (also in der Nähe des Tsunami-Herdes) ist dieser Ansatz jedoch nicht ausreichend. Daher ist die Visualisierung der Isochronen (Linien gleicher Ankunftszeit) ein effektiver Weg, die Situation zu erfassen und Unterstützung bei der Warnentscheidung der lokalen Warnzentren zu geben. Ankunftszeit-Information ist aber auch für die Vorbereitung auf eventuelle Ereignisse wichtig. Katastrophen-Manager müssen die zeitlichen Beschränkungen kennen, um ihre Hilfsmaßnahmen zu planen.

Für die vorsorgende Schadens- und Risikoerhebung sind weitere Informationen von Interessen. In den Tsunami-Szenarien, die mit TsunAWI berechnet werden, sind folgende Werte abrufbar:

- Ankunftszeit der ersten Welle;
- Meeresspiegel-Höhe (SSH,  $\zeta$ ) alle 60 Sekunden;
- Maximale SSH;
- Maximale absolute Geschwindigkeit;
- Maximale Flussdichte (für die Erhebung von Auswirkungen auf Gebäude);
- Anfangs Boden-Auslenkung.

Diese Werte liegen auf den Gitterknoten vor. Die Roh-Daten werden im NetCDF-Format gespeichert, das ein Plattform-unabhängiges selbst beschreibendes binäres Datenformat bereit stellt. Das Post-Processing-Modul des SIM bereitet diese Daten zu ESRI SHP Dateien auf, die sich für die Visualisierung und Analyse in Geo-Informationssystemen (GIS) eignen.

Grundsätzlich werden TsunAWI Ergebnisse für zwei wesentliche Zwecke genutzt:

1. Um einen Satz von Szenarien für das Tsunami Repository des SIM zu generieren,
2. Um Szenarios für die Schadenserhebung und Überflutungsstudien zu erzeugen.

Wir zeigen im Folgenden Beispiele dieser beiden Anwendungsfälle.

### 5.1 Szenarien Berechnungen und Sensitivitätsanalyse

Eine große Zahl von vorher berechneten Szenarien dient als Basis für mögliche zu erwartende Situationen im SIM Tsunami Repository. Jedes der Szenarien stellt eine mögliche Lokation und Stärke eines Tsunami-auslösenden Erdbebens mit der dazugehörigen Erdkrustenverschiebung an bekannten GPS-Stationen, sowie der entsprechenden Meeresboden-Anhebung dar. Im Nahfeld ist die exakte Kenntnis der Anregung wichtig für die präzise Einschätzung der Gefährdungssituation.

Werfen wir beispielsweise einen Blick auf Padang, der Hauptstadt der Provinz West-Sumatra mit etwas unterhalb einer Million Einwohnern. Nach gängiger Expertenmeinung ist diese Stadt von einem größeren Erdbeben mit Stärke bis zu 8,5 bedroht, weil die Kontinentalplatten dort blockiert sind [3]. Um die Verletzlichkeit Padangs zu untersuchen, muss die Sensitivität gegenüber der Erdbebenlage untersucht werden. Hierfür wird eine Reihe von Szenarien betrachtet. Es zeigt sich, dass nahe zusammen liegende Ereignisse zu sehr unterschiedlichen Auswirkungen führen können. Die spezielle Situation Padangs, in der die vorgelagerte Mentawai Inselgruppe die Tsunami Energie für Erdbeben im tiefen Ozean von Padang fernhält, diese Tsunami Energie für Erdbeben in Küstennähe aber einfängt, ergibt eine sehr hohe Sensitivität gegenüber der exakten Lage der Bruchzone (siehe Abbildung 6).

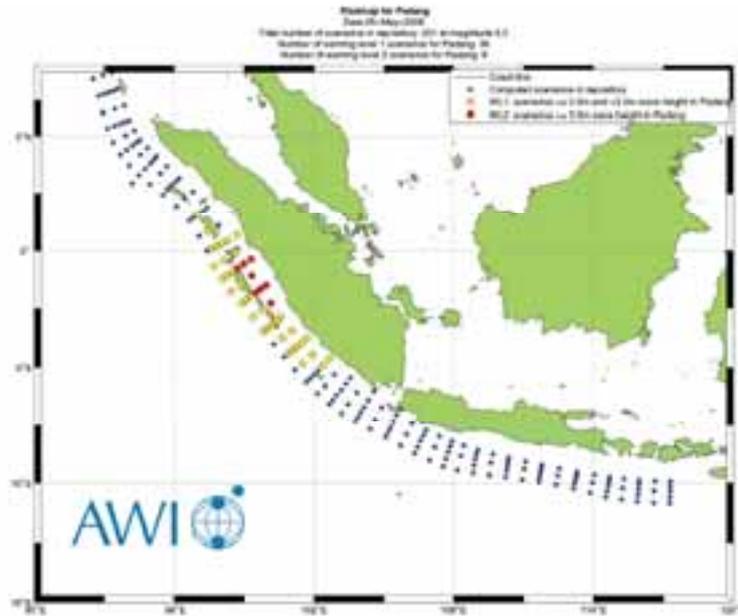


Abb. 6: Epizentren von Tsunami-Szenarien der Erdbebenstärke 8,5, die in Padang Warnstufe 1 (gelb, Wellenhöhe an der Küsten zwischen 0.5 und 3 m) und Warnstufe 2 (rot, > 3 m) auslösen.

## 5.2 Überflutungs-Berechnung für Bali

Eine der bekanntesten Touristenregionen Indonesiens liegt auf Bali. Viele Resorts und Hotels liegen direkt am Strand. Die Region um Denpasar mit einem internationalen Flughafen mit ca. 1,5 Mio Check-ins pro Jahr hat eine Bevölkerung von etwa 500.000. Große Teile des Territoriums liegen niedriger als 25 m über dem Meeresspiegel und sind daher mögliche Überflutungsregionen. Um Planungsgrundlagen für künftige Tsunami-Vorbereitungen bereit zu stellen, wurden Überflutungs-Berechnungen für die Region um Denpasar durchgeführt. Genaue Topographie und Bathymetrie Daten, speziell für den küstennahen Bereich, ist notwendig für realitätsnahe Ergebnisse. Das Gitter, das in diesen Berechnungen verwendet wird, hat eine Zellengröße von etwa 80 m in Küstennähe und an Land. Die Überflutungskarte für den schlimmsten anzunehmenden Fall ist in Abbildung 7 dargestellt. Sie zeigt zerstörerische Wasserstände von 5 m für ein Erdbeben der Stärke 8,5 etwa 150 km südwestliche von Denpasar. Zu beachten ist, dass der Flughafen besonders hohe Wasserstände zu verkraften hat, was für eventuelle zukünftige Evakuierungs- und Hilfsmaßnahmen berücksichtigt werden muss. Überflutungsgrenzen, die mehr als 3 km von der Küstenlinie entfernt im Inland liegen, lassen an einigen Stellen auch horizontale Evakuierungs-Pläne nicht ausreichend erscheinen, so dass an vertikale Evakuierungen gedacht werden muss.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde ein neues, auf unstrukturierten finite Elemente Gittern basierendes Tsunami Ausbreitungs- und Überflutungsmodell, TsunAWI, vorgestellt. Es verwendet die nicht-linearen Flachwassergleichungen und beinhaltet Coriolis Term, Bodenreibung und Viskosität als Antriebsterme. Das Diskretisierungs-Schema implementiert lineare Lagrange-Elemente, die konform sind für die Störung des Meeresspiegels und nicht-konform für die Geschwindigkeiten.

Fortschrittliche semi-automatische Gittergenerierung erlaubt die sehr genaue und lokal hohe Auflösung an der Küste bei gleichzeitiger grober Auflösung (und daher Effizienz) im tiefen Ozean. Dieser nahtlose Übergang von großer zu kleiner Gitterweite muss nicht mit künstlichen numerischen Effekten (wie Reflexionen an Gittergrenzen) erkaufte werden.

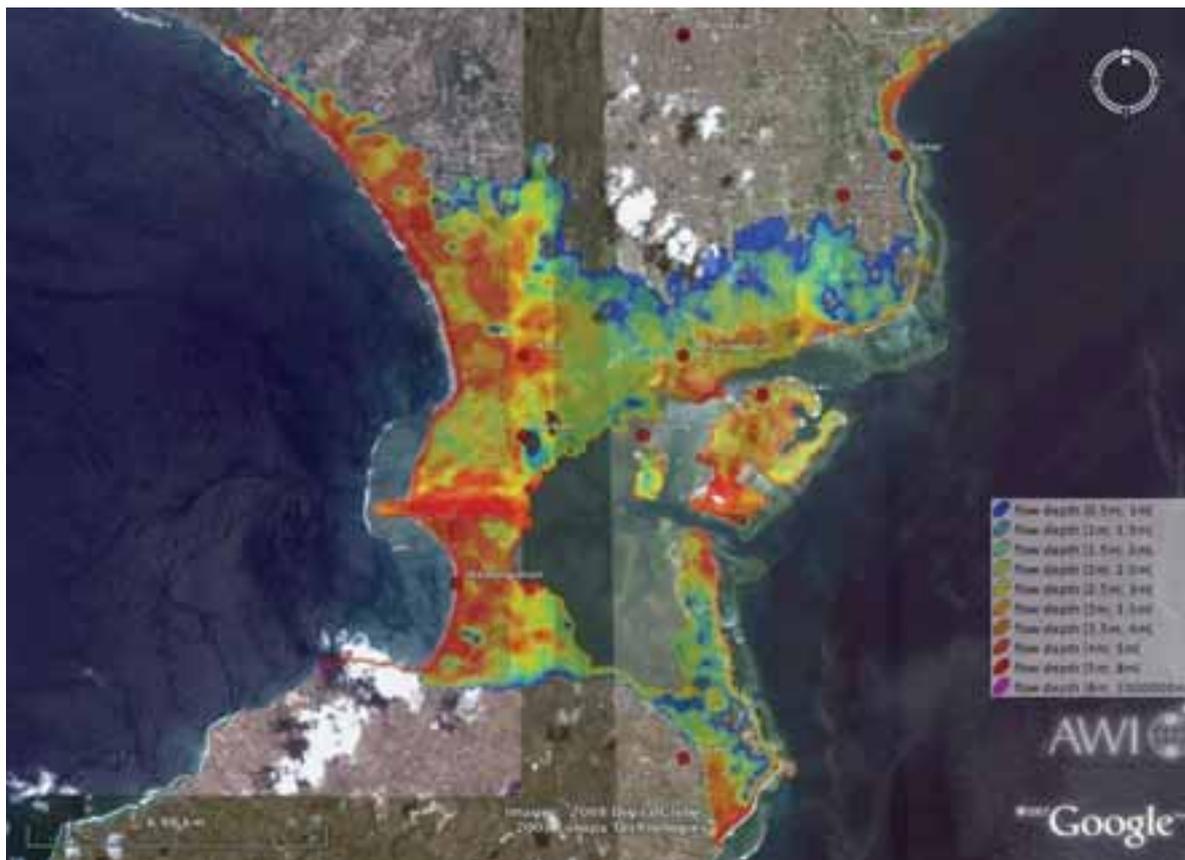


Abb. 7: Überflutungskarte für Denpasar, Bali/Indonesien.

TsunAWI ist anhand von analytischen Testfällen wie auch Modellvergleichen und realen Feld-Messungen validiert. Es hat sich als sehr genaues und nützliches Simulations-Tool für Überflutungs-Studien, Sensitivitäts-Analysen und Gefahrenerhebungen herausgestellt. Tsunami Szenarien, die mit TsunAWI erstellt wurden, sind im Simulationssystem des GITEWS Tsunami Frühwarnsystems im Einsatz, welches im November 2008 in Jakarta/Indonesien installiert wird.

Zukünftige Entwicklungen werden eine grundlegende Code-Überarbeitung betreffen, um mit gängigen Software-Entwicklungs-Standards schritt zu halten und die Wartbarkeit zu erhöhen. Parallelisierung ist ein weiterer wichtiger Entwicklungsstrang, um noch detailliertere Simulationen in noch kürzerer Zeit durchführen zu können, und um später eine Echtzeitfähigkeit zu erzielen. Weitere Tests sind ebenfalls geplant, um die Stabilität und Zuverlässigkeit der Software weiter zu erhöhen.

Der Quelltext der Software TsunAWI wird unter einer GPL-artigen Softwarelizenz freigegeben werden, die es Wissenschaftlern und Ingenieuren erlaubt, in Tsunami-gefährdeten Gebieten eigene Simulationen durchzuführen.

## 7 Danksagungen

Der Autor bedankt sich bei den Mitgliedern der Tsunami-Modellierung am Alfred-Wegener-Institut für ihre wertvollen Beiträge: Alexey Androsov, Lars Mentrup, Florian Klaschka, Sven Harig, Widodo Pranowo, und Haiyang Cui. Abbildung 7 wurde mit einem Tool zur Erzeugung von Google Earth kml-Dateien von Pascal Schmitt erzeugt. Teile der ursprünglichen Implementierung von TsunAWI stammen von Dmitry Sein und Dmitry Sidorenko. Abbildung 1 wird mit freundlicher Genehmigung von A. Babeyko wiedergegeben.

## 8 Literatur

- [1] Babeyko, A. Y. and Sobolev, S. V.: "Modeling Stress in the Subducting Slab With Complex Elasto-Visco-Plastic Rheology", EOS Trans. AGU, 2006, Vol. 87, Abstract T13C-0521.
- [2] Behrens, J., Androsof, A., Braune, S., Danilov, S., Harig, S., Schröter, J., Sein, D. V., Sidorenko, D., Startseva, O., Taguchi, E.: "TsunAWI Technical Documentation Part I: Mathematical, numerical and implementation concepts", Tsunami Project Documentation No. 004, 2007, Bremerhaven, Germany.
- [3] Borrero, J. C., Sieh, K., Chlieh, M., and Synolakis, C. E.: "Tsunami inundation modeling for western Sumatra", PNAS, 2006, Vol. 103, pp. 19673–19677.
- [4] Braune, S., Harig, S., Behrens, J., Schröter, J., and Hiller, W.: "Erzeugung eines geeigneten Finite-Elemente-Gitters für Tsunami-Simulationsrechnungen aus mehreren Datenquellen", in *Angewandte Geoinformatik 2007. Beiträge zum 19. AGIT-Symposium Salzburg* (Strobl, J. and Blaschke, T. and Griesebner, G.), Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007, pp. 85–90.
- [5] Fritz, H. M., Kongko, W., Moore, A., McAdoo, B., Goff, J., Harbitz, C., Uslu, B., Kalligeris, N., Suteja, D., Kalsum, K., Titov, V., Gusman, A., Latief, H., Santoso, E., Sujono, S., Djulkarnaen, D., Sunedar, H., and Synolakis, C. E.: "Extreme runup from the 17 July 2006 Java tsunami", *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, p. L12602 ff.
- [6] Furumoto, A. S. and Tatehata, H. and Morioko, C.: "Japanese Tsunami Warning System", *Science of Tsunami Hazards*, 1999, Vol. 17, pp. 85–105.
- [7] GITEWS Homepage: <http://www.gitews.de>.
- [8] Hanert, E., Le Roux, D. Y., Legat, V., and Deleersnijder, E.: "An efficient Eulerian finite element method for the shallow water equations", *Ocean Modelling*, 2005, Vol. 10, pp. 115–136.
- [9] Imamura, F., Yalciner, A. C., Ozyurt, G.: "Tsunami Modelling Manual", 2006.
- [10] Latief, H., Puspito, H. T., and Imamura, F.: "Tsunami Catalog and Zones in Indonesia", *Journal of Natural Disaster Science*, 2000, Vol. 22, pp. 25–43.
- [11] Lynett, P. J., Wu, T.-R. and Liu, P. L.-F.: "Modeling wave runup with depth-integrated equations", *Coastal Engineering*, 2002, Vol. 46, pp. 89–107.
- [12] Mansinha, L. and Smylie, D. E.: "The displacement fields of inclined faults", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1971, Vol. 61, pp. 1433–1440.
- [13] Okada, Y.: "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, Vol. 75, pp. 1135–1154.
- [14] Shewchuk, J. R.: "Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator", in *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering* (Lin, M. C. and Manocha, D.), Springer Verlag, 1996, Vol. 1148, pp. 203–222.
- [15] Shuto, N. and Matsutomi, H.: "Field Survey of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake Tsunami", *PAGEOPH*, 1995, Vol. 144, pp. 649–663.
- [16] Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): <http://www.dlr.de/srtm/>.
- [17] Sokolowski, T. J.: "The U.S. West Coast and Alaska Tsunami Warning Center", *Science of Tsunami Hazards*, 1999, Vol. 17, pp. 49–55.
- [18] Song, Y. T., Fu, L.-L., Zlotnicki, V., Ji, C., Hjorleifsdottir, V., Shum, C. K., and Yi, Y.: "The role of horizontal impulses of the faulting continental slope in generating the 26 December 2004 tsunami", *Ocean Modelling*, 2008, Vol. 20, pp. 362–379.
- [19] The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO): "GEBCO 1-minute global bathymetric grid", <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/grid/1mingrid.html>.
- [20] Titov, V. and Gonzalez, F. J.: "Implementation and Testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) Model", NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112, 1997, Seattle, WA, USA.
- [21] Wang, R., Martin, F. L., and Roth, F.: "Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust—FORTRAN programs EDGRN/EDCMP", *Computers & Geosciences*, 2003, Vol. 29, pp. 195–207.
- [22] Weber, B., Becker, J., Hanka, W., Heinloo, A., Hoffmann, M., Kraft, T., Pahlke, D., Reinhardt, J., Saul, J., and Thoms, H.: "SeisComp3 - automatic and interactive real time data processing", *Geophysical Research Abstracts*, 2007, Vol. 9, p. 09219.
- [23] Wijetunge, J. J.: "Tsunami on 26 December 2004: Spatial Distribution of Tsunami Height and the Extent of Inundation in Sri Lanka", *Science of Tsunami Hazards*, 2006, Vol. 24, pp. 225–239.

### Der Autor

Jörn Behrens (Joern.Behrens@awi.de)  
 Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research,  
 27570 Bremerhaven, Germany

# Berechnung komplexer Mehrphasenströmungen gekoppelt mit Wärmeübertragung in Industrieanwendungen

Djamel Lakehal

ASCOMP GmbH, Zürich, Schweiz

Dieser Bericht bietet ein breites Bild von multiskaligen, laminaren und turbulenten Gas-Flüssigkeit-Strömungen. Zuerst werden moderne Simulationsmethoden für Mehrphasenströmungen beschrieben. Der Schwerpunkt liegt bei der Eulerschen 1-Fluid-Methode mit Interface-Tracking-Strategien. Genauer wird die Level Set Technik diskutiert, welche für die diversen Strömungssimulationen in diesem Bericht verwendet wurde und sich durch die Kopplung von Mehrphasenströmung und konjugiertem Wärmeübergang auszeichnet. Dann diskutieren wir verschiedene industrielle Beispiele, welche von ASCOMP GmbH unter Benutzung der CMFD-Software TransAT behandelt wurden, in welchen sowohl die Physik wie auch die Komplexität des Setup die Eckpfeiler des Problems darstellen. Das erste Beispiel behandelt eine 3D-Simulation des Wärmehaushaltes in elektronischen Platinen (PCB). Die Herausforderungen hier sind die Repräsentation der Komponenten, Kopplung von Wärmeübertragung und Konvektion, Turbulenzbehandlung und Verwirbelungseffekte von Ventilatoren.

Das zweite Beispiel behandelt eine 3D-Zweiphasen-Strömung gekoppelt mit Wärmeübertragung in rohrförmigen Wärmetauschern. Das dritte Beispiel behandelt Slug-Formierung in Röhren, ein bekanntes Problem in Öl- und Gas-Industrie, wobei die Strömung hierbei turbulent ist. Dieses Testbeispiel soll die Vorhersage-Genauigkeit von Interface-Tracking-Methoden aufzeigen, angewandt an einer turbulenten Zweiphasen-Strömung. Schwierigkeiten und offene Punkte werden angesprochen. Das letzte Beispiel behandelt das thermohydraulische Problem der sub-channel Strömungsanalyse, wenn auch ohne Phasenübergang. Wir werden zeigen, dass die Simulation komplexer Zweiphasen-Strömungen mit Interface-Tracking Methoden heutzutage mit moderner CMFD-Software relativ schnelle Ergebnisse liefert: eine 3D Mehrphasen-Strömung gekoppelt mit Wärmeübertragung läuft auf einem Linux PC Cluster innerhalb von 24 Stunden.

## 1 Einleitung

Mehrphasenströmungen erscheinen in Umwelt und Industrie in verschiedenen Formen, oft mit Wärme- und Massenübergang zwischen den Phasen. Beispiele sind Verdunstung oder Verdampfung von Tropfen in der Natur oder in Verbrennungskammern, Kondensation in Dampfturbinen, Zerstäuber, Absorption löslicher Gase, etc. Allerdings sind Thermohydraulik von Nuklearreaktoren und Kohlenwasserstoff-Transport zwei Gebiete, wo Zweiphasen-Strömungen sehr genau untersucht werden. Computergestützte Thermohydraulik bietet eine sich steigernde hoch entwickelte Analyse der komplexen Strömung sowie des Wärme- und Massentransports während realen oder postulierten Übergängen in Leichtwasserreaktoren. Das zentrale Element dieser Entwicklung sind Systemsoftwares; diese wurden entwickelt für die primäre Analyse des Systems, wurden allerdings auch für Probleme mit Dampfbehälter angewendet zusätzlich zu spezialisierter Software (Yadigaroglu and Lakehal [1]). Rechnergestützter Kohlenwasserstoff-Transport und Separation wurde bis zum jetzigen Zeitpunkt mit einer Sorte von 1D System Software gerechnet, manchmal unter Benutzung der Zweiphasen-Formulierung, allerdings mit relativem Erfolg (Hewitt [2]). Auch wenn diesen vereinfachten Berechnungstools enorme Fortschritte verdankt werden, gibt es eine Anzahl Faktoren welche neue Entwicklungen fordern. Einige neue Simulationsbedürfnisse können nur mit modernen Techniken, kombiniert mit sorgfältig ausgearbeiteten Modellen für die zugrunde liegende Physik erfüllt werden.

Dieser Bericht soll ein breites Bild davon liefern, was für Strömungsphänomene in einer multiskaligen, mehrphasigen laminaren oder turbulenten Strömung zu erwarten sind. Zuerst werden Simulationsmethoden für Mehrphasenströmungen klassifiziert, wobei das Hauptaugenmerk auf der Eulerschen 1-Fluid-Methode liegt, besser bekannt als Interface Tracking. Speziell diskutieren wir die Level Set Technik welche zur Simulation der verschiedenen Strömungsbeispiele in diesem Bericht verwendet wurde. Schlussendlich werden ausgewählte Strö-

mungssimulationen vorgestellt wie z.B. ein Einphasen-Strömungsproblem gekoppelt mit Wärmeübertragung sowie laminare und turbulente Zweiphasen-Strömungen.

## 2 Moderne CMFD Techniken für reale Zweiphasen-Strömungen

### 2.1 Von der gemittelten Zwei-Fluid Modellierung zu Interface Tracking Methoden

Die Modellierung von Mehrphasenströmungen mit Wärmeübergang ist eine komplizierte Disziplin, weshalb dies bisher im Allgemeinen auf empirischen Betrachtungen beruht hat. Die analytische Modellierung entwickelte sich von Parametern und eindimensionalen Modellen (z.B. homogene Gleichgewichtsmodelle, phasic slip Modellen, drift-flux Modellen und 2-Fluid Modellen), zu quasi-multidimensionalen sub-channel Modellen, dann zu dreidimensionalen, rechnergestützten multi-fluid-dynamik (CMFD) Modellen, und neuerdings zu Direct Numerical Simulations (DNS) und Large-Eddy Simulations (LES). Der zentrale Punkt von CMFD ist die genaue Bestimmung der Interfacedynamik, durch welche Strömungsgebiete definiert und die Übergangsmechanismen zwischen den Phasen quantifiziert werden.

Freie Oberflächen-Strömungen sowie *interfacial flows* sind Zweiphasen-Strömungsprobleme mit typischerweise zwei nicht mischbaren Fluiden, welche sich getrennt durch ein Interface zeitlich entwickeln. *Interface tracking/capturing* Schemas sind Methoden zur Identifizierung des Interfaces im Raum. Dies geschieht nicht durch eine Verfolgung des Interfaces in einem Lagrangeschen Sinn (z.B. durch die Verfolgung von Punkten auf dem Interface), sondern durch die Entwicklung einer geeigneten Variable auf dem im Eulerschen Sinne fixierten und unveränderlichen Gitter. Diese Variable kann eine Level Set Funktion sein, ein Feld welches den Volumenanteil des einen Fluids in den Gitterzellen anzeigt, ein Phasenindikator oder eine so genannte Farbfunktion. Generell gibt es zwei Rechenmethoden um *interfacial flows* zu analysieren. Man unterscheidet *front tracking/capturing* und *interface tracking/capturing*. Die erste Methode parametrisiert explizit das Interface und folgt mit der zeitlichen Entwicklung diesen Punkten auf der Oberfläche. Beispiele sind Randintegral-Methoden für Stokes- oder Potentialströmungen, in welchen die Oberfläche im Falle einer 2D oder axialsymmetrischen Simulation durch eine Kurve darstellt und mit Kreisbogen parametrisiert und verfolgt werden kann.

Bei der *front tracking* Methode werden Markierungspunkte auf der Grenzfläche in einem Lagrangeschen Sinne verfolgt, selbst wenn das Strömungsfeld selbst auf einem fixierten Eulerschen Gitter gelöst wird. Diese Methode wird allerdings nicht in diesem Bericht behandelt. Die andere Methode, welche Gegenstand dieses Berichts ist, behandelt das Interface durch eine implizite Repräsentation. Ein Beispiel ist die Level Set Methode (Sussman et al. [3]), in welchem das Interface durch die Isofläche einer überall im Raum definierten Funktion gegeben ist. Ein anderes Beispiel ist die Volume-Of-Fluid (VOF) Methode (Hirt & Nichols [4]), in welcher die Position der Grenzfläche durch den Volumenanteil des einen Fluids in jeder Rechenzelle verfolgt wird: Zellen mit Volumenanteil null oder eins beinhalten keine Grenzfläche, Volumenanteile dazwischen bedeuten, dass die Zelle ein Interface beinhaltet. In der Literatur werden die Level Set Methode, *front tracking* Methoden mit Markierpunkten (Unverdi & Tryggvason [5]) und VOF Methoden alle als Interface Tracking Methoden (ITM) bezeichnet. Näher gehende Klassifizierung findet sich in Lakehal et al. [6].

### 2.2 Interface Tracking Methoden

Diese Methoden werden für Zweiphasen-Strömungen benutzt, wenn eine präzise Bestimmung der Interfaceposition notwendig ist, z.B. beim Aufbrechen von grossen Blasen, Tropfen oder einem Flüssigkeitsstrahl. Der Schlüssel zu diesen Methoden ist die Benutzung eines Sets von konservativen Gleichungen für ein Fluid, wobei die Fluideigenschaften variabel sind und zusätzlich Oberflächenkräfte hinzukommen, z.B. die 1-Fluid-Formulierung. Dieses Konzept ist ansprechend, denn es bietet genauere Strategien bei minimalen Modellannahmen verglichen mit der 2-Fluid-Formulierung. Im Folgenden beschreiben wir die Level Set Methode, welche (zusammen mit VOF), die wichtigste ITM darstellt. Die Level Set Methode wird auch von TransAT benutzt für die später in diesem Bericht folgenden Beispiele.

Die gekoppelten Gleichungen für die Fluidbewegung und Wärmetransfer für inkompressible Strömungsbedingungen werden in der 1-Fluid-Formulierung folgendermassen dargestellt,

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{u}) + \gamma \kappa \mathbf{n} \delta(\phi) + \mathbf{c} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p T \mathbf{u}) = \nabla \cdot \lambda (\nabla T) + Q''' \quad (3)$$

wobei  $\rho$  die Dichte ist,  $p$  ist der Druck und  $\mu$  die Viskosität. Die letzten Terme auf der rechten Seite in (2) repräsentieren die Oberflächenspannung sowie Kontaktkräfte ( $\mathbf{c}$ ), die bei Berührung Interfaces mit einer Wand auftreten;  $\mathbf{n}$  ist der Normalenvektor auf das Interface,  $\kappa$  die Krümmung des Interfaces,  $\gamma$  der Oberflächenspannungskoeffizient und  $\delta$  ist eine geglättete Dirac Delta Funktion zentriert auf dem Interface. In Gleichung (3) ist  $T$  die Temperatur,  $C_p$  die Wärmekapazität,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit und  $Q'''$  ein Volumenquellterm für Wärme.

Bei der hier angewandten Level Set Technik [3] wird die Grenzfläche zwischen zwei nicht mischbaren Fluiden durch eine stetige Funktion  $\phi$  dargestellt. Die Funktion  $\phi$  repräsentiert die Distanz zum Interface als positive Zahl auf der einen und als negative Zahl auf der anderen Seite. Auf diese Weise können beide Fluide identifiziert werden und das Interface ist definiert durch den Nulllevel der Funktion. Materialeigenschaften, Volumen- und Oberflächenkräfte in (2) hängen lokal von der Level Set Funktion ab, dessen Entwicklungsgleichung (wenn Phasenübergang vorhanden ist) gegeben ist durch [6]

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \dot{m} / \rho |\nabla \phi|, \quad (4)$$

wobei  $\dot{m}$  für die Massenübertragungsrate steht. Diese Grösse kann nun entweder direkt aus dem Energie sprung über das Interface bestimmt oder durch Wärmeübertragungs-Korrelationen modelliert werden. Materialeigenschaften wie Dichte, Viskosität, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit werden lokal aktualisiert, abhängig der Level Set Funktion unter Benutzung einer geglätteten Heaviside Funktion:

$$\rho, \mu, C_p, \kappa = \rho, \mu, C_p, \kappa|_L \cdot \Phi + \rho, \mu, C_p, \kappa|_G \cdot (1 - \Phi) \quad (5)$$

In der Praxis wird die Level Set Funktion schon nach einem einzigen Advektionsschritt von Gleichung (4) nicht mehr genau eine vorzeichenbehaftete Distanzfunktion bleiben. Um die korrekte Distanzfunktion in der Nähe des Interfaces wiederherzustellen, muss die so genannte *re-distancing* Gleichung bis zum stationären Zustand gelöst werden:

$$\frac{\partial d}{\partial \tau} = \text{sgn}(d_0) [1 - |\nabla d|]; \quad \text{mit } d_0(x, t) = \phi^n(x, t) \quad (6)$$

wobei  $\text{sgn}(x)$  die Signum Funktion ist. Ausdruck (6) wird nach jedem Advektionsschritt (4) gelöst mit Hilfe des nichtoszillierenden WENO Schemas dritter Ordnung. Details darüber, wie das Massenerhaltungsproblem dabei verhindert werden kann finden sich in [6-7]. Die Navier-Stokes und Level Set Gleichungen werden mittels eines expliziten Runge-Kutta Schemas dritter Ordnung für die Zeitintegration gelöst. Die konvektive Flüsse werden mit dem Quick Schema dritter Ordnung gelöst, beschränkt durch einen TVD Begrenzer. Für die diffusiven Flüsse wird ein zentrales Schema zweiter Ordnung benutzt.

### 2.3 Die Mehrphasen-Strömungs-Software TransAT©:

Die CMFD Software TransAT©, entwickelt von ASCOMP, ist ein multiphysikalischer, finite-Volumen Code zur Lösung der multi-Fluid Navier-Stokes Gleichungen. Der Code benutzt multiblock strukturierte Gitter und ist mittels MPI parallelisiert. Der Code benutzt ein 'collocated grid', das heisst alle Variablen sind im Zentrum der Gitterzellen definiert. Auch krummlinige Gitter können benutzt werden. Der Solver ist druckbasiert (Projektionsmethode), korrigiert mit der Karki-Patankar Technik für schwach kompressible Strömungen. Schemas hoher Ordnung für Konvektion und Zeitintegration können angewendet werden, bis hin zu monotonen Schemas dritter Ordnung im Raum.

Laminare und turbulente Mehrphasen-Strömungen werden mit *interface tracking* Techniken behandelt, d.h. die Mehrphasen-Strömung wird als ein Fluid mit variablen Materialeigenschaften behandelt, welche gemäss einer Farbfunktion ändert. Speziell kann sowohl die Level Set Methode als auch die Volume-of-Fluid Methode benutzt werden. Die Benetzungsdynamik basiert auf den physikalischen Kräften von *triple lines*, der Grenzlinie Festkörper/Gas/Flüssigkeit. Diese Kräfte treten in der Impulsgleichung als zusätzliche Quellterme auf, bieten eine physikalisch angemessene Beschreibung der Benetzungsdynamik und eliminieren Randbedingungen, in welchen ein Kontaktwinkel fixiert werden muss. Die Kraft an der Kontaktlinie wird beeinflusst durch die Oberflächenspannung zwischen den Fluiden und dem Gleichgewichts-Kontaktwinkel. Sie kann durch ähnliche Betrachtungen wie zur Herleitung von Young's Gesetz nötig, abgeleitet werden und wird als *unbalanced Young force* bezeichnet. Im Falle eines statischen Kontaktwinkels wird die Level Set Funktion in Wandnähe derart angepasst, dass der Kontaktwinkel dem vorgegebenen Gleichgewichts-Kontaktwinkel entspricht. Turbulente Mehrphasenströmungen werden mit RANS oder LES gelöst, mit zusätzlicher spezieller Behandlung der Region in der Nähe des Interfaces.

## 2.4 Die Immersed Boundaries/Surfaces Technik (IST)



Abb. 1: Repräsentation einer zylindrischen Festkörperoberfläche ( $\phi_s = 0$ ) in einem orthogonalen Gitter mittels IST.

Die *Immersed Surfaces Technology* (IST) wurde entwickelt und in TransAT eingebaut. Die Idee ist, die Level Set Technik so zu verallgemeinern, dass sie auch zur Repräsentation von festen Oberflächen verwendet werden kann. Die Level Set Funktion  $\phi_s$  ist nun die Distanzfunktion zur Oberfläche des Festkörpers. Sie ist positiv in der Ein- oder Zweiphasen-Strömung und negativ im Festkörper. Das Fluid, bzw. die zwei Fluide, und der Festkörper haben alle ihre eigenen Materialeigenschaften (Dichte, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit), welche in der 1-Fluid-Formulierung an den Interfaces schrittartig ändern.

Die Hauptvorteile dieser Methode liegen in der einfachen Gittergenerierung sowie dem Lösen des konjugierten Wärmeleitungsproblems, da die Wärmeleitung im Festkörper automatisch mit der Konvektion des Fluids verbunden ist. In der Praxis wird die CAD-Datei des Festkörpers eingelesen, von einem kartesischen Gitter umgeben und darauf die Level Set Funktion für den Festkörper berechnet (Abb. 1). Die Navier-Stokes Gleichungen müssen dahingehend verändert werden, dass die Präsenz des Festkörpers korrekt durch die Level Set Funktion für den Festkörper wiedergegeben wird. Die Behandlung der viskosen Scherkräfte an der Festkörperoberfläche ist dabei ähnlich der konventionellen Betrachtung; die Oberflächennormale wird hierbei aus dem Gradienten der Level Set Funktion berechnet.

## 2.5 Die Block Mesh Refinement Technik (BMR)

Die BMR Technik wurde in TransAT entwickelt, um Grenzschichten an mit IST eingebetteten Festkörpern besser aufzulösen. Die BMR Technik generiert automatisch Sub-Blöcke mit einem verfeinerten Gitter an den Festkörper-Oberflächen. Die Region um den Festkörper, in welcher verfeinert wird, hängt dabei von der Reynolds Zahl ab (die Grenzschicht wird in den Sub-Blöcken aufgelöst). Eine beliebige Anzahl von Sub-Blöcken kann generiert werden, wobei der Verfeinerungsfaktor 1 bis 8 Zellen pro Raumrichtung betragen kann. Je nach Problem kann diese Methode in 3D bis zu 75% an Gitterzellen einsparen im Vergleich zu einem einzelnen strukturierten Gitter mit der selben Auflösung um den Festkörper (Abb. 2).

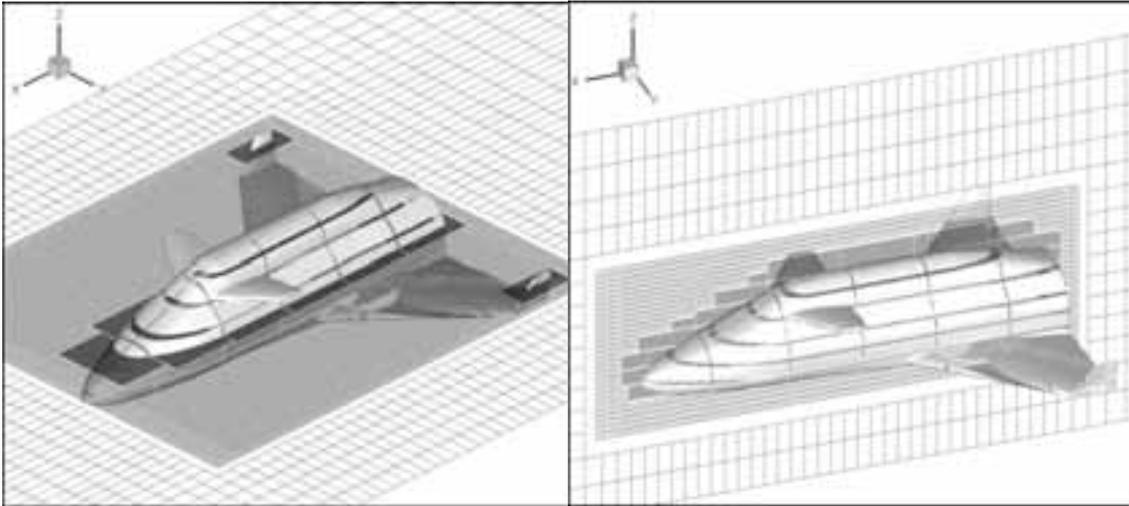


Abb. 2: BMR verfeinertes Gitter um ein Spaceshuttle.

### 3 Praktische Beispiele

#### 3.1 Kühlung elektronischer PCB Platinen

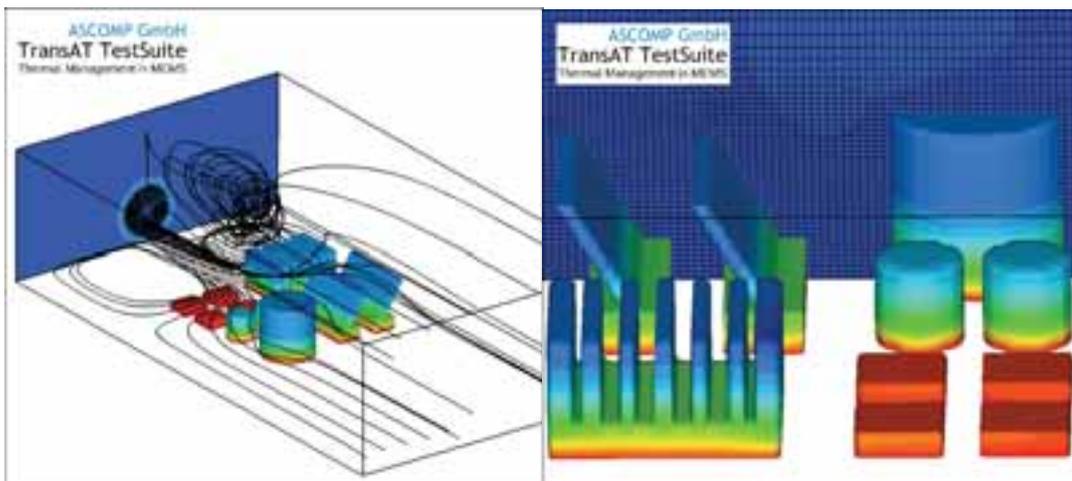


Abb. 3: Ein typisches PCB mit verschiedenen Komponenten, gekühlt durch einen Ventilator (IST Simulation)

Die Kühlung elektronischer Platinen wird typischerweise mit Ventilatoren und Konvektion oder einer Zweiphasen-Strömung mit oder ohne Phasenübergang erreicht. Das Interesse bei dieser Simulation ist zu sehen, wie die Effizienz der Kühlung durch das Design oder Parameter und Position des Ventilators verändert wird. Hierbei kann CMFD ein zuverlässiges Bild liefern, was bei verschiedenen Setups zu erwarten ist. Dank der *Immersed Surface Technique* kann das Setup für die TransAT-Simulation (Gitter, Ventilator dimensionierung, Materialeigenschaften, Randbedingungen) dieser komplexen Geometrie innerhalb einer Stunde bewältigt werden.

Die Strömungslösung in Abb. 3 zeigt die Fähigkeiten des IST Moduls, eine komplexe Geometrie auf einem kartesischen Gitter abzubilden. Die stationäre Strömung wurde mit dem  $k-\varepsilon$  Modell für Turbulenz kombiniert mit Wandfunktionen berechnet. Das Gitter umfasst 125.000 Rechenzellen. Wie schon erwähnt werden nur Schemas hoher Ordnung verwendet. Das Resultat zeigt den Effekt der Ventilator kühlung auf den Wärmetransfer von den Komponenten in die Hauptströmung. Dünne Festkörperelemente werden von mindestens drei Zellen ausgefüllt, was nötig ist um die Gleichungen zu lösen. Jedem Element der Platine kann seine eigenen thermomechanischen Eigenschaften sowie einen Volumenquellterm für Wärme zugewiesen werden.

3.2 Wärmeübergang in einem Zweiphasen-Wärmetauscher

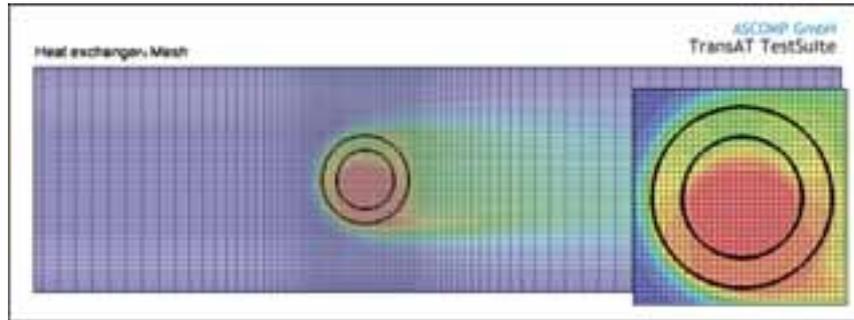


Abb. 4: Repräsentation der Röhrenoberfläche ( $\phi_s = 0$ ) in einem kartesischen Gitter mit IST.

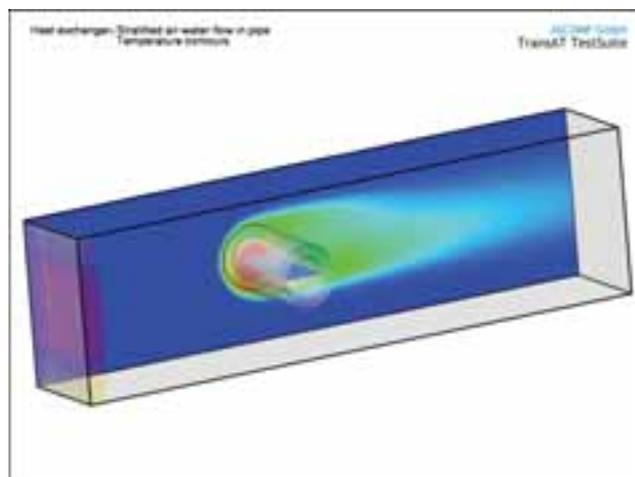


Abb. 5: 3D Repräsentation der freien Oberfläche in der Röhre sowie dem Wärmetransport.

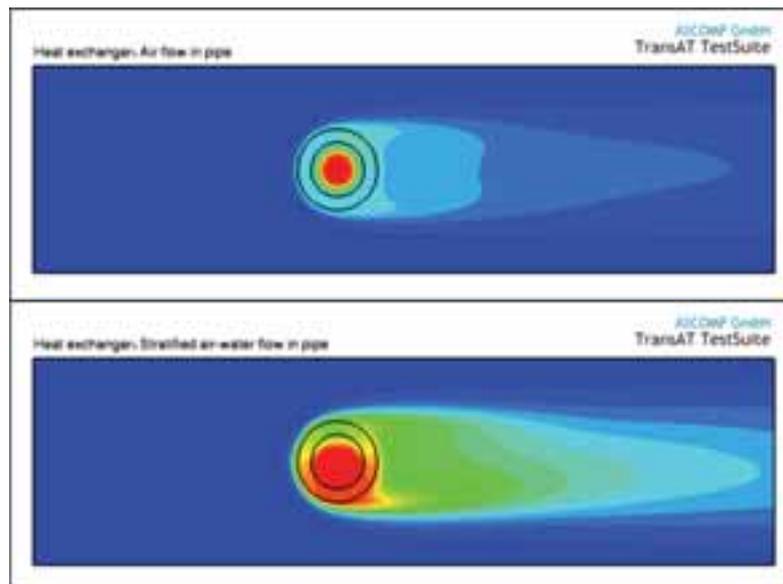


Abb. 6: Temperaturkonturen einer komplett (a) und einer teilweise (b) von einer heissen Flüssigkeit durchflossenen Röhre.

Dieses Beispiel behandelt die Kopplung der Zweiphasen-Strömung mit Wärmeübergang. Dieses Testbeispiel ist wichtig für Wärmetauscher in industriellen Maschinen sowie für Wärmepumpen in Gebäuden. Kurz gefasst wird eine einzelne oder eine Gruppe von Röhren mit finiter Wandstärke in einer freien, turbulenten Strömung platziert, welche die Luftkühlung darstellt. Innerhalb der Röhre fliesst heisses Wasser, bewegt durch Gravitation oder eine externe Pumpe. Die Röhre wird einmal komplett nur von heissem Wasser durchflossen, oder als Zweiphasen-Strömung aus Luft und heissem Wasser. Der Wärmetransport in diesem Beispiel ist dreistufig: konvektiv im Wasser, konduktiv in der Röhrenwand, konvektiv von der Röhrenoberfläche zur Aussenströmung.

Die IST Methode wurde benutzt um die Röhre in diesem Beispiel in ein Kartesisches Gitter von  $98 \times 20 \times 66$  Zellen einzubetten. Die Wand der Röhre wird durch fünf Zellen aufgelöst. Das Quick Schema wurde für die vorher besprochenen Gleichungen benutzt. Die Level Set Methode wurde benutzt um die Wasseroberfläche innerhalb der Röhre darzustellen (im Falle der nur zur Hälfte mit Wasser ausgefüllten Röhre). Die Strömung wurde stationär mit dem  $k-\epsilon$  Modell für Turbulenz berechnet, kombiniert mit Wandfunktionen für die kühlende Luftströmung (Annahme: 5% Turbulenzintensität am Einlass); das Wasser in der Röhre wird als laminare Strömung betrachtet. Die Reynolds-Zahl der Luft basiert auf dem Aussenradius der Röhre und beträgt  $Re = 7000$ .

Das Resultat der teilweise oder vollständig mit heissem Wasser durchflossenen einzelnen Röhre ist in Abb. 6 dargestellt. Es zeigt die Konturen der Temperaturverteilung. Das obere Bild zeigt, dass der Wärmetransfer von der Röhre zur umgebenden, kühlenden Strömung perfekt symmetrisch ist. Eine instationäre Simulation würde einen Rückgang dieser Symmetrie zeigen, wenn die Reynolds Zahl Wirbelablösung zulässt. Das untere Bild zeigt einen weniger symmetrischen Wärmetransport. Die Wärme wird hauptsächlich auf der unteren Seite, wo die heisse Flüssigkeit durchfliesst, durch die Wand der Röhre und in die Umgebungsströmung transportiert.

### 3.3 Slug-Formierung in Öl-Pipelines

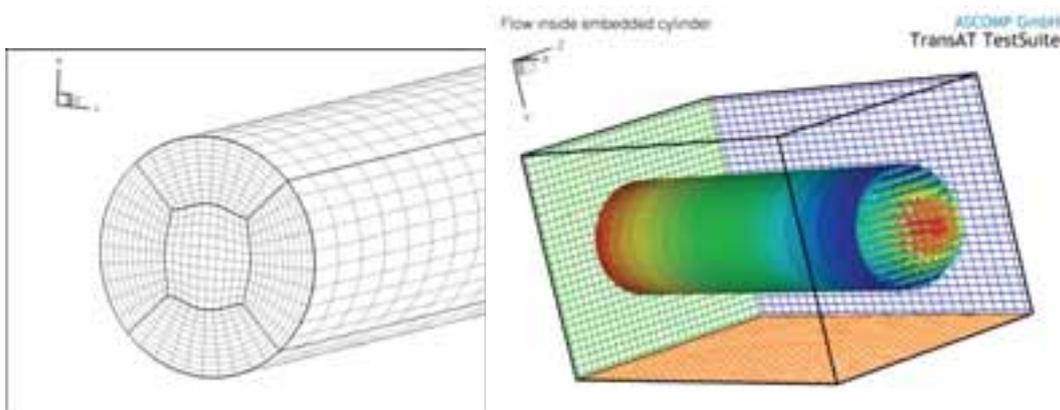


Abb. 7: (links) multi-block Rechengitter mit BFC; (rechts) IST Gitter für eine Rohrströmung.

Für diese Simulationen wurde ein 3D Rechengitter gemäss Abb. 7 verwendet. Die Länge der Röhre beträgt 6.3m, der Durchmesser ist 0.14m. Die Resultate in diesem Abschnitt wurden mit der traditionellen BFC Strategie, das heisst einem körperangepassten, krummlinigen multiblock Gitter, erzeugt (linkes Bild). Das IST Rechengitter (rechtes Bild) wird hier nicht weiter behandelt. Die parallele Simulation lief auf 12 CPUs eines Linux Clusters.

Die Simulation zeigt die Kombination der Level Set Technik und der LES Methode zur Turbulenzmodellierung (Details in [10]). Die MILES Methode [11] wurde benutzt für die diffusiven Effekte der Subgitterskalen (SGS), wobei die SGS der numerischen Diffusion überlassen wird. Die untersuchte Strömung zeigt eine Einströmung des Gases mit einem Volumenanteil von 50% und der Geschwindigkeit von 14 m/s. Abb. 8 zeigt die durch die Simulation vorausgesagte Fluid-Oberfläche zusammen den Geschwindigkeitskonturen.

Die Slug-Formierung wird ausgelöst durch die Entstehung der ersten Mode einer Kelvin-Helmholtz (KH) Instabilität. Die Zweite KH-Mode formt sich in der ersten Welle und verbindet sich später mit ihr, so dass die Welle die Decke der Röhre erreicht (slug sealing). Der Slug formiert sich etwa sechs Rohrdurchmesser entfernt des Einlasses. Die Blockierung der Röhre durch die Flüssigkeit führt zu einer grösseren Ansammlung von Flüssigkeit mit der Zeit, was anscheinend die Gas Slugs weiter isoliert. Dieser Mechanismus wiederholt sich und mehrere Slugs formen sich nacheinander in der Röhre. Abb. 8 zeigt eine spezielle Eigenschaft dieser Strömung, nämlich die Formierung von Wirbelablösungen hinter dem Slug, was sofort nach dem 'slug sealing' geschieht. Diese Beobachtung zeigt sich in den Konturen aller Geschwindigkeitskomponenten. Die Region vor dem Slug zeigt ein starkes Aufbrechen der freien Oberfläche, eine Region ausgezeichnet durch einen hohen Level an Turbulenz-Produktion. Die Strömung besitzt auch kohärente Strukturen ähnlich einer turbulenten Rohrströmung. Dies ist in Abb. 9 durch positive und negative Isoflächen der Wirbelstärke dargestellt. Es zeigt sich nochmals, dass Turbulenz stromabwärts stark aktiv ist.

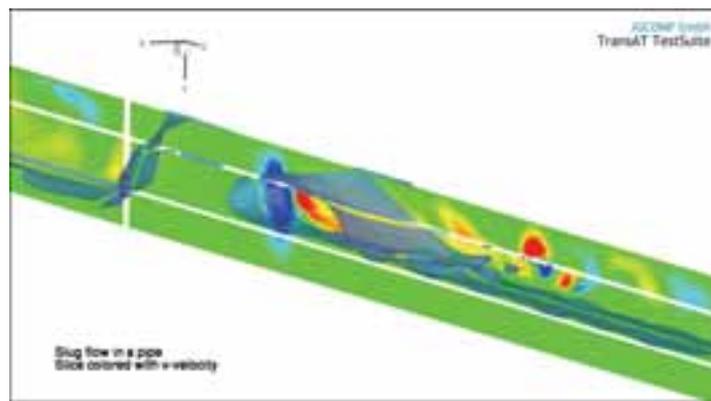


Abb. 8: Slug-Oberfläche und die darauf folgende Wirbelablösungen, dargestellt durch Konturen der Geschwindigkeit.

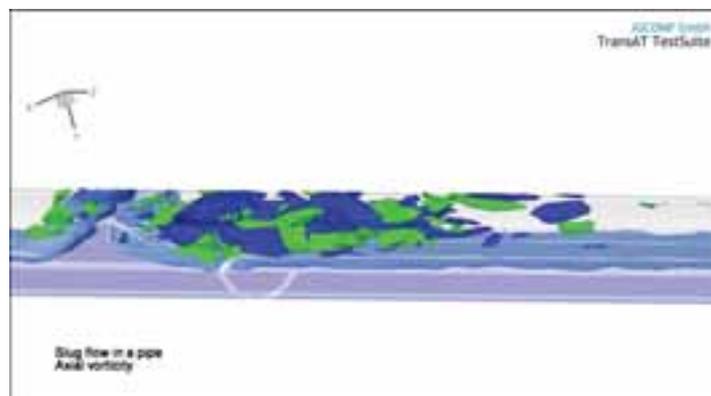


Abb. 9: Positive und negative Isoflächen der Wirbelstärke ( $x$  und  $z$  Komponenten).

### 3.4 Fuel-Bundle Sub-channel Analysis

Dieses thermohydraulische Problem ist von allen Aspekten her eine Herausforderung. Es behandelt die Simulation von Strömungscharakteristiken einer Zweiphasenströmung im hydraulischen Gleichgewicht in einem Subkanal von 2-3 Stabbündel (Referenz sind die Daten von Sadatomi et al [12]). Die Experimente benutzten Wasser und Luft bei Umgebungsdruck in einem Testkanal mit 2-3 Stabbündel. Die sechs Stäbe sind in einer rechteckigen Anordnung platziert mit sechs Subkanälen zweier Arten, was ein Bündel BWR Brennstäbe darstellt (Abb. 10). Die Strömungsdaten und der Druckabfall entlang jeder Subkanal-Achse wurden in verschiedenen Ein- und Zweiphasen-Strömungen unter hydraulischen Gleichgewichtsbedingungen erhalten. Die Dimensionen der Testanlage sind die Folgenden: Stabdurchmesser:  $d = 16$  mm; Abstand der Stabzentren:  $p = 20$  mm; Verhältnis Abstand zu Durchmesser:  $p/d = 1.25$ ; Lücke zwischen den Stäben:  $S_{11} = S_{12} = S_{22} = 4$  mm; Hydraulischer Durchmesser:  $D_h = 14.3$  mm; Fläche des Strömungsquerschnitts:  $A = 194$  mm<sup>2</sup>. Die Länge des Rechengebietes wurde reduziert auf  $L = 236$  mm und die Stablänge auf  $L_t = 160$  mm. Das Rechengitter besteht aus  $65 \times 65 \times 130$  Zellen. Die Simulation lief während 24 Stunden auf einem Linux PC Cluster parallel auf 8 Prozessoren. Als Randbedingungen wurden Einfluss am Boden und Ausfluss an der Decke des Rechengebietes gesetzt.

Zur Vorhersage des thermohydraulischen Verhaltens einer Kühlflüssigkeit in einem BWR Brennstabbündel ist es nötig, den genauen Flüssigkeitstransfer zwischen den Subkanälen zu berechnen. Wie im vorangegangenen Beispiel ist dies wieder eine komplexe Mehrphasenströmung, diesmal zusätzlich mit Wärmeübertragung (konjugiert); Phasenübergang ist äusserst wichtig, wurde aber bei der Simulation nicht aktiviert (um die Bedingungen des Experimentes wiederzugeben). Für die Turbulenzmodellierung benutzten wir wiederum die MILES Methode [11], bei der die diffusiven Effekte des Advektionsschemas die gleiche Rolle übernehmen wie ein explizites SGS Modell für LES. Zurzeit testen wir eine Methode mit Skalenseparierung, in welcher bestimmte Subskalen der Turbulenz mit Hilfe des  $k$ - $\epsilon$  Modells modelliert werden, wobei grosse Skalen (nicht fixiert durch Gittergrösse) direkt simuliert werden (eine Sorte von V-LES; oder Very Large-Eddy Simulation). Zwei Strömungssimulationen wurden gerechnet: eine laminare Strömung mit einer Wasser-Einflussgeschwindigkeit von  $U_L = 0.1$  m/s, sowie eine schwach turbulente Strömung mit  $U_L = 1$  m/s. In beiden Fällen ist der Luftanteil am Einfluss 50%. Abb. 11 (links) zeigt einen Querschnitt durch die Brennstäbe und die Strömung. Das Bild zeigt die Entwicklung der Wärmekonturen um die Brennstäbe sowie die Gas-Wasser-Oberfläche in der laminaren Simulation. Die beiden Bilder auf der rechten Seite zeigen eine Seitenansicht der Strömung zu zwei verschiedenen Zeitpunkten.

Das linke Bild in Abb. 12 zeigt die eine die Ansicht von oben auf die Brennstäbe und die Gasoberfläche, eingefärbt durch Temperaturkonturen, im Falle der turbulenten Strömung. Die beiden Bilder auf der rechten Seite zeigen eine Seitenansicht der turbulenten Strömung zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. In diesem Fall zeigt sich, dass die Gasoberfläche (eingefärbt durch Temperaturkontur) stark durch die Strömung deformiert wird, was zu einem eher zufällig verteilten Wärmetransfer an den Brennstäben führt. Diese Simulationen bilden den ersten Schritt zu einer vollen Beschreibung der Subkanal-Analyse mittels CMFD, mit Hilfe einer minimalen Anzahl von Modellen.

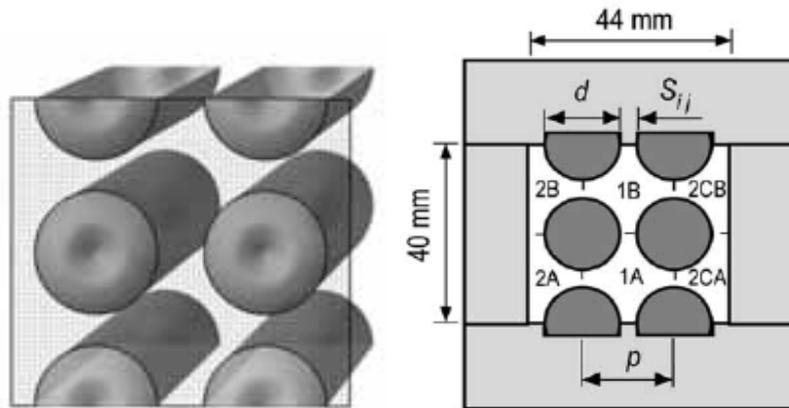


Abb. 10: IST Gitter und Querschnitt durch die Geometrie des Testkanals.

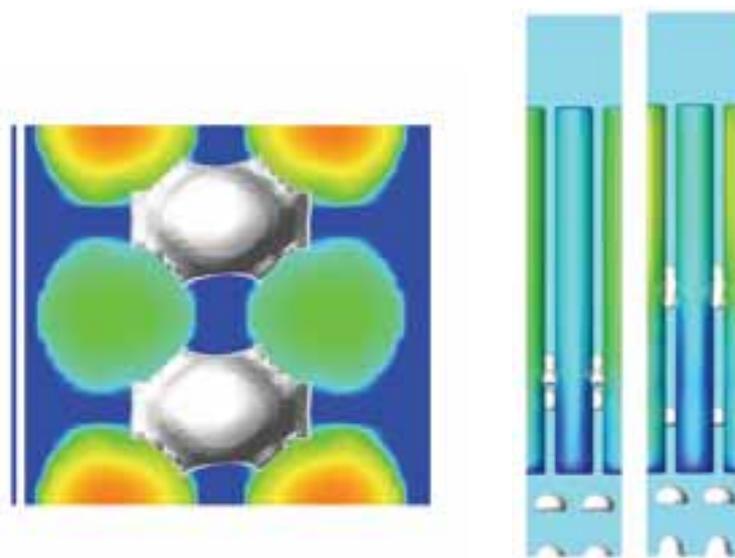


Abb. 11: Querschnitt und 3D Seitenansicht mit Temperaturkonturen und Gasoberfläche: Laminare Strömung.

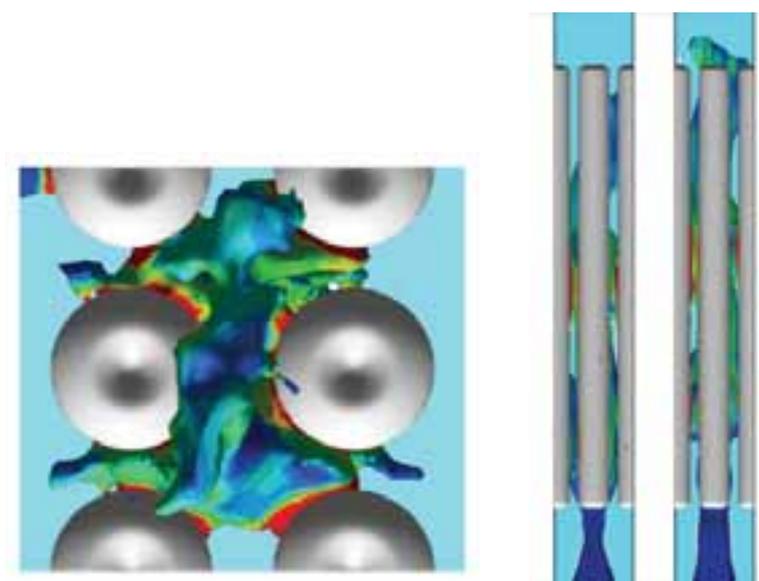


Abb. 12: 3D Drauf- und Seitenansicht der Temperaturverteilung auf der Gasoberfläche: Turbulente Strömung.

## 4 Bemerkungen

Dieser Bericht zeigt ein breites Bild von multiskaligen, laminaren und turbulenten Zweiphasen-Strömungen. Zuerst wurde die Separation von Strömungs-Längenskalen beschrieben, anschliessend folgte eine kurze Beschreibung von modernen CMFD Methoden für Mehrphasen-Strömungen. Das Augenmerk wurde auf die Eulerbasierte Interface Tracking Technik gelegt, speziell auf die Level Set Technik welche für die Beispiele in diesem Bericht verwendet wurde. Verschiedene industrielle Beispiele, welche von ASCOMP GmbH mit Hilfe der CMFD Software TransAT behandelt wurde, wurden gezeigt: Wärmemanagement in elektronischen Platinen; die 3D-Zweiphasen-Strömung gekoppelt mit Wärmeübergang in röhrenförmigen Wärmetauschern; Slug-Formierung in Röhren; Subkanal Strömungsanalyse. Die Beispiele sollten zeigen, wie gut die Vorhersagen von Interface Tracking Methoden für turbulente Zweiphasen-Strömungen funktionieren. Schwierigkeiten und offene Punkte wurden erwähnt. Schlussendlich soll bemerkt werden, dass mit, moderner CMFD Software auf einem Linux PC Cluster innerhalb von 24 Stunden gute Resultate auch für komplexe Zweiphasen-Strömungen mit Grenzflächen erhalten werden können.

## 5 Referenzen

- [1] Yadigaroglu G, Lakehal D., New trends in computational thermal hydraulics, *Nuclear Technology*, 152 (2), 2005, 239-251.
- [2] Hewitt G.F., Three-phase gas-liquid-liquid flows in the steady and transient states, *Nuclear Engineering and Design*, 235, 2005, 1303-1316
- [3] Sussman S., Smereka P., Osher S., A Level set Approach for computing incompressible two-phase flow. *J. Comp. Physics*, Vol. 114, 1994, 146-161.
- [4] Hirt, C.W., Nichols, B.D., Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comp. Phys.* 39, 1981, 201-219.
- [5] Unverdi, S.O., Tryggvason, G., A front-tracking method for viscous, incompressible, multi-fluid flows. *J. Comput. Phys.* 100, 1992, 25-42
- [6] Lakehal D., Meier M., Fulgosi M., Interface tracking for the prediction of interfacial dynamics and heat/mass transfer in multiphase flows, *Int. J. Heat & Fluid Flow*, 23, 2002, 242-257.
- [7] Takahira H., Takahashi M., Banerjee S., Numerical analysis of 3D bubble growth and detachment in a shear flow, *Proc. ICMF 04*, 30 May - 04 June, 2004, Yokohama, Japan.
- [8] Leonard B.P., A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic interpolation, *Comput. Meths. Appl. Eng.*, 19, 1979, 59-68.
- [9] Mittal R., Iaccarino G., Immersed Boundary Methods, *Ann. Rev. Fluid Mech*, 37, 2005, 239-261.
- [10] Liovic P., Lakehal D., Multi-Physics Treatment in the Vicinity of Arbitrarily Deformable Fluid-Fluid Interfaces, *J. Comp. Physics*, 222, 2007, 504-535.
- [11] Fureby C., Grienstein, F.F., "Monotonically Integrated LES of free shear flows", *AIAA Journal*, 37, 1999, 544-556.
- [12] Sadatomi M., Kawahara A., Kano K, Tanoue S., Flow characteristics in hydraulically equilibrium two-phase flows in a vertical 2-3 rod bundle channel, *J. Multiphase Flow*, 30, 2004, 1093-1119

### Der Autor

Dr Djamel Lakehal  
 General Manager  
 ASCOMP GmbH  
 Technoparkstr. 1  
 CH-8005 Zurich  
 Phone: +41 044 6327073  
 Fax : +41 044 6331662  
 www.ascomp.ch

# Das Auge im System

## Strömungssimulation optimiert Messgeräte bei VSE Volumenteknik

Dr. Mourad Lotfey, Fluent Deutschland GmbH  
Axel Vedder, VSE Volumenteknik GmbH

Volumensensoren für Flüssigkeiten, die nach dem Zahnradprinzip konstruiert sind, sind vielfältig einsetzbar, zuverlässig und hochgenau. Ihr einziges Manko: Konstruktionsbedingte Betriebsgeräusche und zum Teil hohe Druckverluste. Diese Zeiten sind nun endgültig vorbei. VSE Volumenteknik zeigt wie es geht. Das Unternehmen optimierte seine Messgeräte mit dem CFD-Tool (Computational Fluid Dynamics) FLUENT von ANSYS.



Abb. 1: Geometrie des Volumenmessgeräts

### 1. Einleitung

Strömungsmessgeräte sind wahre Tausendsassas und finden in den verschiedensten industriellen Gebieten Anwendung. Sie kommen in Flugzeugen, Schiffen, medizinischen Geräten, Automobilen, im Haushalt, bei der Energieerzeugung, in der Verfahrenstechnik und in fast allen technischen Apparaten und Anlagen zum Einsatz. Um einen reibungslosen und sicheren Betrieb zu ermöglichen müssen die Messgeräte höchste Anforderungen erfüllen, robust und zuverlässig sein und genaue Informationen liefern. Sie messen direkt oder indirekt Strömungsgrößen wie Geschwindigkeit, Druck, Temperatur, Konzentration Durchflussmenge usw. Sie basieren auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien z. B. Lasertechnik, Verdrängungs- und Auftriebswirkung, mechanischen Eigenschaften von Metallen (wie Bi-Metallic Strips) und andere.

Ein sehr bekanntes strömungstechnisches Prinzip, auf das auch VSE Volumenteknik in Neunrade setzt, ist das Verdrängerprinzip. Man denke an Zahnradpumpen bzw. Verdrängerpumpen, in denen das Medium durch in sich geschlossene Volumina (Zahnradlücke) gefördert/gedrückt wird. Auch Volumensensoren für Flüssigkeiten funktionieren so. Als Messwerk dient in diesem Fall ein im Gehäuse sehr präzise eingepasstes Zahnradpaar, das vom Fluid angetrieben wird. Ein Signalaufnehmer-System erfasst berührungslos die Drehung des Messwerks und wandelt sie in digitale Impulse um. Die innerhalb einer Messwerksdrehung um eine Zahnteilung durchgesetzte Flüssigkeitsmenge bildet das Messvolumen pro Impuls, die Ausgangsfrequenz entspricht dem Durchfluss.

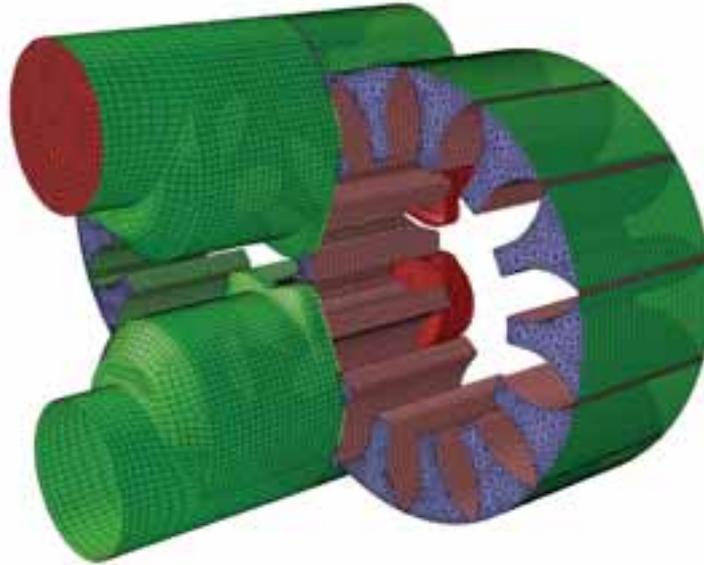


Abb. 2: Mit dem Preprozessor GAMBIT vernetzte Geometrie

## 2. CFD „sieht“ alles

Das Messprinzip hat allerdings auch Nachteile. Prinzipbedingt kann es bei hohen Durchflüssen zu starker Geräuschentwicklung und hohen Druckverlusten speziell bei hochviskosen Medien kommen. Dies stört nicht nur das Personal sondern führt zu erhöhtem Verschleiß bis hin zur Zerstörung der Lagerung. Das Problem: Die Ursachen der Geräuschentwicklung lassen sich mit traditionellen Messtechniken nur sehr begrenzt ermitteln. Was tun? Der Helfer in der Not: Die numerische Strömungssimulation. VSE Volumentechnik entschied sich für das CFD-Tool (Computational Fluid Dynamics) FLUENT von ANSYS und die Dynamic Mesh (DM) Methode. Die Herausforderung: Strömungsverhältnisse, Drücke und alle strömungsrelevanten Größen sollten komplett dreidimensional und instationär gerechnet werden.

Dazu liest der Preprozessor GAMBIT im ersten Schritt die Geometrie des Volumensensors in Form einer CAD-Datei ein. Das Strömungsvolumen wurde geometrisch generiert und ein für die Dynamic Mesh Methode geeignetes numerisches Netz erzeugt. Dieses erste Netz wird nach Simulationsanforderung in FLUENT automatisch während der Simulationsrechnung angepasst und neu generiert.

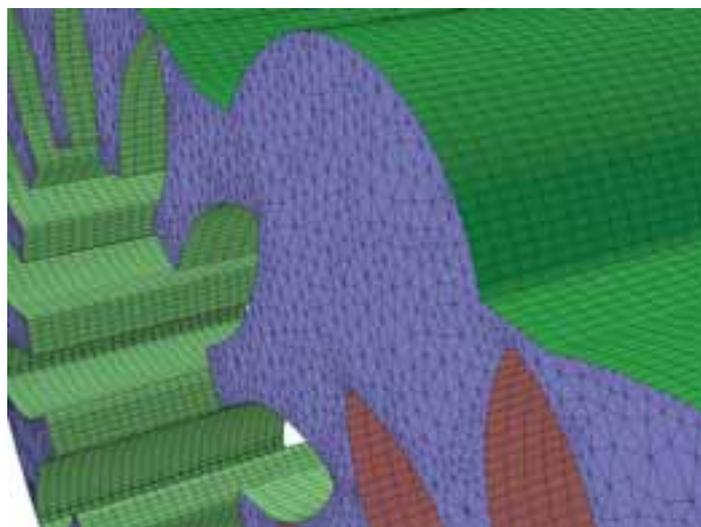


Abb. 3: Durch FLUENT Dynamic Mesh-Funktionalität generiertes Netz nach einem Zeitschritt

### 3. Das Design macht's

Bei der instationären Simulation werden bei der Berechnung der Strömungsvolumen zwischen den Zahnrädern jedes kleine Zeit- oder Winkelinkrement wiederholt bis das Zahnradpaar eine volle Umdrehung zurückgelegt hat. Während der Rotationsbewegung, wird das Volumennetz geometrisch verzerrt. Wenn die Verzerrung des Netzes nach einem Zeitschritt unter einem bestimmten Grenzwert liegt, geht das Programm zur Berechnung des nächsten Zeitschritts über. Andernfalls löscht es das Volumennetz automatisch und erzeugt ein besser angepasstes Netz im gesamten Strömungsgebiet des Volumensensors. Dies erfolgt voll automatisch während der numerischen Iterationen, ohne Eingriff des Simulationsingenieurs und in Abhängigkeit der momentanen Netzgüte. Um die Rechnung zu beschleunigen und einen stabilen Simulationsverlauf zu gewährleisten, passt die Software das Zeitinkrement laufend automatisch während der Simulation dynamisch an. Bei jedem Zeitschritt speichert sie das dazugehörige Netz- und Ergebnisfile zur späteren Auswertung ab. Somit gewinnt man verschiedene Animationen für die Zeitverläufe vieler Strömungsgrößen (z. B. Druckverlauf oder Pfadlinien).

Nach der erfolgreichen Berechnung kann der Design- oder Simulationsingenieur z. B. die Verteilung der Strömungsgrößen an verschiedenen Schnittebenen räumlich darstellen, analysieren, Abläufe oder Animation einer bestimmten Prozessgröße wiederholen und daraus Verbesserungsvorschläge ableiten.

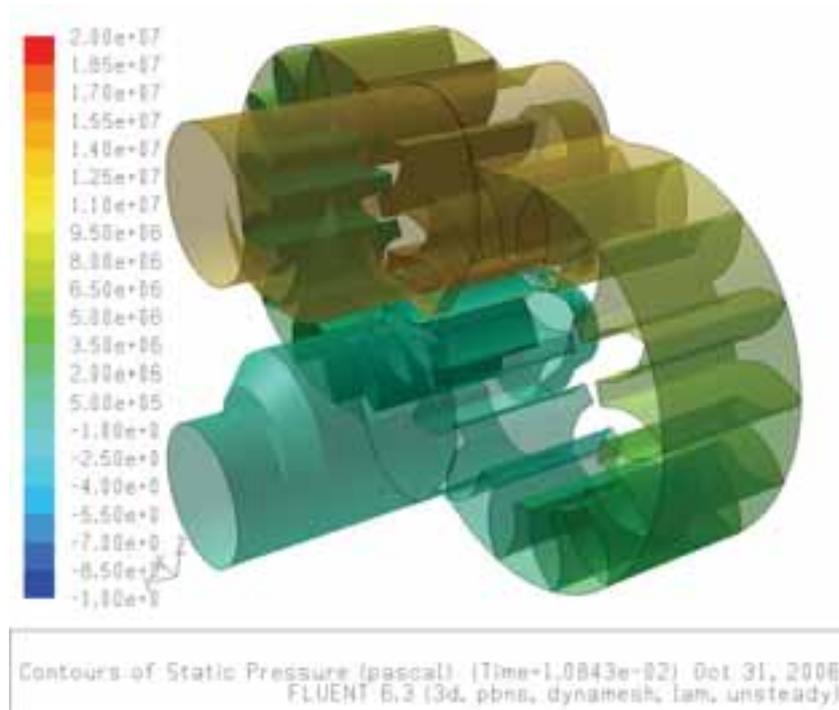


Abb. 4: Darstellung der Druckverteilung an den Modellwänden

### 4. 3D Spaziergang durchs System

Mit Hilfe von FLUENT konnte VSE Volumentechnik sein Volumenmessgerät vollständig dreidimensional, isotherm, einphasig und instationär (Dynamic Mesh) simulieren. Dabei wurde das Fluid als inkompressibel, laminar und newtonisch angenommen. Da die realen Strömungsverhältnisse trotzdem noch sehr kompliziert sind, traf man einige Annahmen, die den Simulationsaufwand auf das Notwendigste reduzieren. So blieben alle für die Strömungssimulation wenig relevanten Kräfte unberücksichtigt. Dazu gehören etwa Beschleunigungs- oder Bremseffekt des Zahnradpaars, Radmasse oder Trägheitseffekte und die Lagerreibung. Die Reibung und Leckage zwischen den Stirnflächen der Zahnrädern und der anliegenden Gehäusewand wurden ebenso vernachlässigt.

Die Simulation eröffnet den Zugang zu einmaligen detaillierten 3D-Kenntnissen hinsichtlich des Strömungsgeschehens innerhalb des Volumenmessgerätes - instationäre Verteilung der Drücke, Geschwindigkeit, Verweilzeit des Fluids sowie die viskose Erwärmung des Fluids. Das Simulationsprogramm von ANSYS generiert ebenso dreidimensionale Verläufe der Fluidelemente (Pfadlinien). Dadurch lassen sich die Rezirkulationsgebiete inner-

halb des Volumenmessgerätes erkennen. Darüber hinaus liefert die Software die räumliche Verteilung vieler Gradienten und Kräfte, z. B. Geschwindigkeits- oder Schubspannungsgradienten sowie Reibungskräfte an den Wänden.

Das Drehmoment der Zahnräder ergibt sich aus dem Produkt der Oberflächenkräfte (Druck und Reibung) und dem Hebelarm (Abstand zur Zahnradachse). Daraus lässt sich wiederum der Anteil einzelner Zahnradoberflächensegmente am gesamten Drehmoment berechnen. Die Fläche, die das größte Drehmoment verursacht, kann modifiziert oder geändert werden, um das Drehmoment bzw. den Druckverlust zu minimieren. Denn bei Geräten dieser Art spielt der Druckverlust eine wichtige Rolle. Je kleiner der Druckverlust, desto besser das Messgerät.

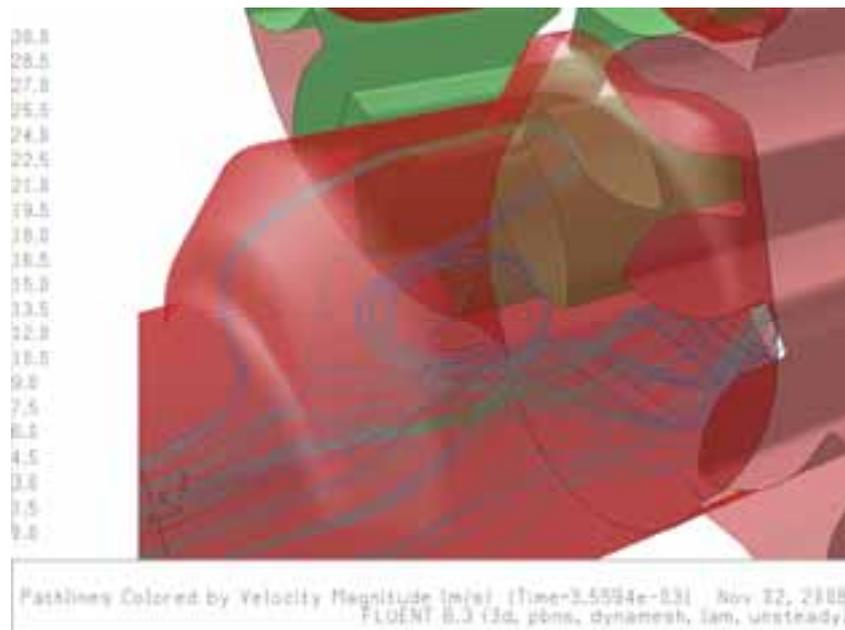


Abb. 5: Pfadlinien und Wirbelsysteme der Strömung am Auslass

## 5. Fazit

Die numerische Simulation des Strömungsgeschehens im Volumenstrommessgerät hat die Ursachen der Geräuschentwicklung eindeutig ermittelt und lokalisiert. Dank der Berechnungen konnte VSE Volumentchnik Vorschläge erarbeiten, die die Geräusche bzw. Vibrationen reduzieren und den Druckverlust minimieren. In nächster Zukunft will der Hersteller weitere Betriebseigenschaften mit der intelligenten Software weiter optimieren. Das Simulationstool ist für den Anwender ein zuverlässiges, kostengünstiges und integrierbares Auslegungstool zur Ergänzung des Designzyklus.

## Die Autoren

Dr. Mourad Lotfey  
ANSYS Germany GmbH, Otterfing  
([www.ansys-germany.com/](http://www.ansys-germany.com/))

Axel Vedder  
VSE Volumentchnik GmbH, Neuenrade

Der Artikel erschien ebenfalls in der Zeitschrift „Verfahrenstechnik“, Ausgabe 6/2008  
Vereinigte Fachverlage GmbH, [www.industrie-service.de](http://www.industrie-service.de)

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 (2/2008)

Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

NAFEMS Mitgliedschaft

NAFEMS Magazin „Benchmark“

NAFEMS Seminare

NAFEMS Trainingskurse

NAFEMS World Congress 2009

Registered Analyst Zertifizierung

EU-Projekte

Internationale Arbeitsgruppen

Bitte nehmen Sie mich in Ihren Verteiler auf.

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

Ich möchte folgendes zum NAFEMS Magazin anregen:

---



---

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

### Absender

Firma: \_\_\_\_\_

Abt.: \_\_\_\_\_

Titel, Vor-/Nachname: \_\_\_\_\_

Straße: \_\_\_\_\_

PLZ-Ort: \_\_\_\_\_

Tel.: \_\_\_\_\_

Fax: \_\_\_\_\_

e-mail: \_\_\_\_\_

### Bitte senden Sie das NAFEMS Magazin auch an:

Firma: \_\_\_\_\_

Abt.: \_\_\_\_\_

Titel, Vor-/Nachname: \_\_\_\_\_

Straße: \_\_\_\_\_

PLZ-Ort: \_\_\_\_\_

Tel.: \_\_\_\_\_

Fax: \_\_\_\_\_

e-mail: \_\_\_\_\_

# NAFEMS

---

## 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](mailto:info@nafems.de)

[www.nafems.org](http://www.nafems.org)