

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

Fachbeiträge:

Fokus Materialmodellierung

Meso-mechanische Modellierung von Faser-Metall-Laminaten

P. Middendorf (EADS Innovation Works);
 P. Linde (Airbus Deutschland GmbH);
 H. de Boer (Advanced Lightweight Engineering);
 J. Sinke (Delft University of Technology)

Seite 20

Robuste Netzgenerierung zur μ FE-Analyse mikrostrukturierter Materialien

V. Schulz, H. Andrä, K. Schmidt (Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik)

Seite 28

Über ein Materialmodell zur Abbildung von Inelastizität in Elastomeren

H. Baaser (Freudenberg Forschungsdienste KG)

Seite 31

Fokus Computational Fluid Dynamics

Lösungen für stark gekoppelte Fluid-Struktur Anwendungen

U. Heck (Dr. Heck Consulting and Engineering)

Seite 37

Topologieoptimierung für geführte Strömungen

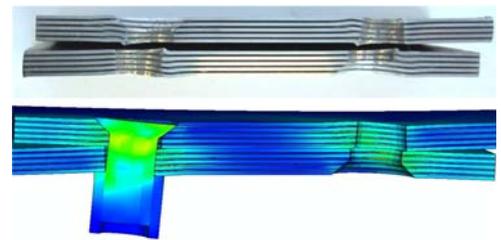
P. Häußler, J. Sauter, T. Schützle, T. Helfrich,
 P. Clausen (FE-Design GmbH)

Seite 47

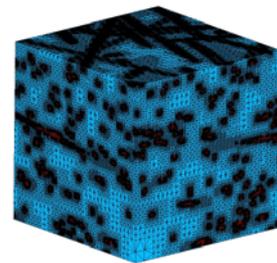
Über Struktur und Genauigkeit des CFD-Prozesses

P. Farber (IMH - Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen)

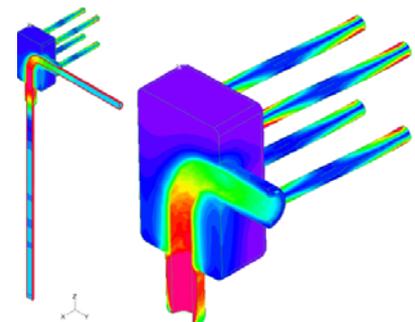
Seite 52



Vergleich des experimentellen und numerisch analysierten Versagensmodus einer gebolzten FML Probe (EADS Innovation Works)



Virtuell erzeugte Mikrostruktur eines faser-verstärkten Kunststoffs (Fraunhofer-ITWM)



Druckwelle passiert Krümmer - 3d Potenzial-Elemente (Dr. Heck Consulting and Engineering)

Trainingskurse 2007 / 2008

- Basic 1: Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre, 22.-23.10.2007, D
- NEU – Basic CFD: Praxisorientierte Grundlagen für CFD-Berechnungen, 22.-23.10.2007, D
- Basic 2: Praxisorientierte Grundlagen für FEM-Analysen, 19.-20.11.2007, D

Seminare 2007 / 2008

- FEA Modelling and Numerical Simulation, 24.-25.10.2007, DK
- Simulation von Verbunden: Material und Strukturen, 6.-7.11.2007, D
- Simulation komplexer Strömungsvorgänge (CFD), 10.-11.3.2008, D
- Konstruktionsnahe Berechnung – Potential und Herausforderung, 12.-13.3.2008, D

Mit Stellenmarkt



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

Sehr geehrte Leserin,
sehr geehrter Leser,

die numerische Simulation basiert auf Modellen, mit denen die zu untersuchenden Probleme in ihren wesentlichen Aspekten möglichst realitätsnah beschreiben werden. Um solche Modelle aufzustellen, muss zunächst die Realität genau beobachtet werden. Nun werden in jüngster Zeit heuristische Modelle immer häufiger durch grundlegende physikalische Gegebenheiten ersetzt. So werden zum Beispiel die Mikromechanik, die Moleküldynamik und sogar die Quantenmechanik bemüht, um in einem Multi-Skalenprozess das Verhalten einer zu untersuchenden Struktur zu simulieren. Damit lassen sich gewisse Phänomene realitätsnäher beschreiben. Dem Anwender sollte jedoch klar sein, dass er nicht die Realität selber berechnet, sondern immer nur ein Modell.

Wenn das Modell formuliert ist, folgt die Entwicklung und Verifikation von Methoden und Verfahren zur numerischen Simulation, die dann wiederum an der Realität überprüft und validiert werden müssen. Die Qualität der Simulation hängt nun entscheidend davon ab, dass alle drei Schritte – Modellformulierung, numerische Simulation und deren Validierung – sorgfältig und mit angemessenem Aufwand vorgenommen werden.

Für die Simulation, wie für jede wissenschaftliche Arbeit, ist die Auseinandersetzung mit Fachkollegen wichtig. Der alle zwei Jahre stattfindende NAFEMS World Congress hat sich als ein Forum herausgebildet, das diesen Austausch hervorragend stimuliert. In diesem Jahr fand der Congress in Vancouver, Kanada, statt. Beachtenswerte Erfolge auf unterschiedlichen Gebieten der numerischen Simulation wurden präsentiert. Es wurde jedoch auch deutlich, dass insbesondere die Validierung eine Aufgabe darstellt, die für jede Simulation neu gelöst werden muss. Das gilt unabhängig von dem jeweils aktuellen Anwendungsbereich.

In den Fachbeiträgen des vorliegenden Hefts 7 des Magazins spielen Verifizierung und Validierung ebenfalls eine erhebliche Rolle. Aus dem Seminar Materialmodellierung vom Dezember 2006 werden drei Beiträge veröffentlicht. Sie befassen sich mit der Simulation des Schädigungsverhaltens von Faser-Metall-Laminaten, des Mullins-Effekts und bleibender Verformungen von Elastomeren sowie mit einem automatischen Verfahren zur Netzgenerierung für komplexe Mikrostrukturen. Drei Beiträge aus dem 4. CFD-Seminar vom März 2007, das dem zuverlässigen Einsatz von CAD-basierter Software und anwendungsspezifischer Codes gewidmet war, vervollständigen diese Ausgabe.

Ich wünsche den Lesern 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.abaqus.de



www.fluent.de
www.ansys.com



www.intes.de



www.mscsoftware.com

Die nächsten NAFEMS Trainingskurse:

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

| | |
|---|-------------------------|
| Basic 1: Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre München, D | 22. - 23. Oktober 2007 |
| Praxisorientierte Grundlagen für CFD-Analysen Wiesbaden, D | 22. - 23. Oktober 2007 |
| Basic 2: Praxisorientierte Grundlagen für FEM-Analysen München, D | 19. - 20. November 2007 |

NEU

Das nächsten NAFEMS Seminare:

| | |
|---|-------------------------|
| FEA Modelling and Numerical Simulation – Advances and Practical Applications Copenhagen, DK | 24. - 25. Oktober 2007 |
| Simulation von Verbunden: Material und Strukturen Bad Kissingen, D | 06. - 07. November 2007 |
| Simulation komplexer Strömungsvorgänge (CFD) – Anwendungen und Trends Wiesbaden, D | 10. - 11. März 2008 |
| Konstruktionsnahe Berechnung – Potential und Herausforderung Wiesbaden, D | 12. - 13. März 2008 |

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

NAFEMS Literatur

NAFEMS bietet mit über 200 Publikationen eine umfangreiche Auswahl an Fachliteratur im Berechnungsumfeld an. Kürzlich erschienen sind:

- International Journal of CFD Case Studies Vol 6
- How to Use Beam, Plate and Shell Elements
- State of the Art Review in CAE Data Management
- Why Do Multi-Physics Analysis?
- An Introduction to Modelling Buckling and Collapse
- How To Manage Finite Element Analysis in the Design Process
- BENCHmark Magazin April 2007 (erscheint in Kürze), Januar 2007

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, hier einige Themen geplanter Publikationen:

- Verification and Validation
- Primer for the NAFEMS ISO9001:2000 QS
- International Journal of CFD Case Studies
- NAFEMS Turbulence Workbook
- BENCHmark Magazin



Mehr Informationen finden Sie unter

www.nafems.org/publications

Impressum

Editor in Chief

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

Redaktioneller Beirat

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

Redaktion

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

Herausgeber

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

Gestaltung / Layout / Grafik

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

Bezugspreis

Kostenlos

Verteilung / Bezug

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

Anzeigenpreise

Preisliste vom 31.10.2005

**Copyright © 2007 NAFEMS Kontakt
DACH & NORDIC, 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-
stenlosen 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 4

Impressum 5

Inhalt 5

Über NAFEMS / Mitgliedschaft 6

NAFEMS EU-Projekt Autosim 7

**Neuer NAFEMS CFD Trainingskurs im Herbst 2007:
Praxisorientierte Grundlagen für CFD-Analysen** 7

Neuigkeiten 8 - 13

Nachbericht: NAFEMS World Congress 2007 14

Veranstaltungskalender 15

Stellenanzeigen 16 - 19

Fachbeiträge

Fokus Materialmodellierung

Meso-mechanische Modellierung von Faser-Metall-Laminaten 20
P. Middendorf (EADS Innovation Works); P. Linde (Airbus
Deutschland GmbH); H. de Boer (Advanced Lightweight
Engineering); J. Sinke (Delft University of Technology)

**Robuste Netzgenerierung zur μ FE-Analyse
mikrostrukturierter Materialien** 28
V. Schulz, H. Andrä, K. Schmidt
(Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik)

**Über ein Materialmodell zur Abbildung von
Inelastizität in Elastomeren** 31
H. Baaser (Freudenberg Forschungsdienste KG)

Fokus Computational Fluid Dynamics (CFD)

Lösungen für stark gekoppelte Fluid-Struktur Anwendungen 37
U. Heck (Dr. Heck Consulting and Engineering)

Topologieoptimierung für geführte Strömungen 47
P. Häußler, J. Sauter, T. Schützle, T. Helfrich, P. Clausen
(FE-Design GmbH)

Über Struktur und Genauigkeit des CFD-Prozesses 52
P. Farber (IMH - Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen)

Rückmeldeformular 56

Werbeanzeigen

Demat GmbH 12

Dr. Heck Consulting and Engineering 8

Femlab GmbH 11

Intes GmbH 9

Schneider Digital GmbH 13

Swap Computer GmbH 10

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)
 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)
 Dr. T. Wintergerste (Sulzer Chemtech Ltd.)
 Prof. Dr.-Ing. habil. M. Zehn (Femcos mbH)

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

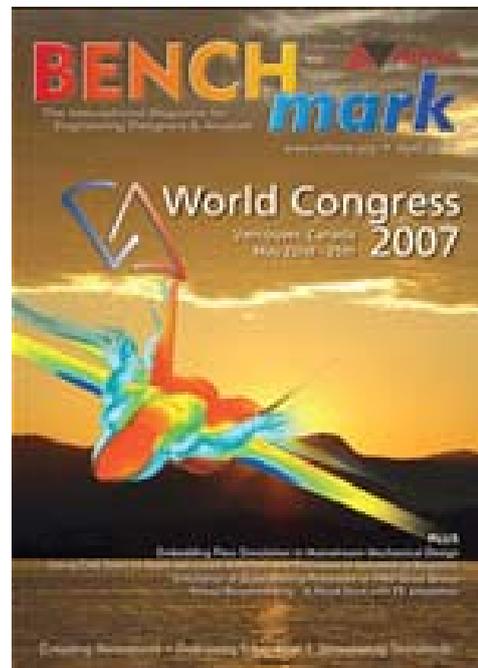
Mitglied bei NAFEMS?

NAFEMS hat über **800 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 800 Organisationen weltweit

Werden auch Sie Mitglied !



„Benchmark“
 – das internationale NAFEMS Magazin

Jetzt abonnieren
 – für NAFEMS-Mitglieder natürlich frei

Weitere Informationen erhalten Sie unter:

www.nafems.de
 (regional)

www.nafems.org
 (international)

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

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




4. Workshop im Renault Technocentre

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 Practice“ 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) und Lissabon/Portugal (Nov. 2006) und dem Mid-term Review in Graz/Österreich (Januar 2007) fand vom 5. - 6. Juli der 4. Workshop im European Technical Center bei Renault in Guyancourt, nahe Versailles, Frankreich, statt. Wiederum fanden sich fast 40 Teilnehmer zusammen, um das Projekt weiterzubringen. Und wie immer werden Präsentationen, Beiträge und Summaries in Kürze auf der website www.autosim.org veröffentlicht.

Die nächsten Workshops finden vom **15. - 16. November 2007** bei Labein in Bilbao/Spain statt.

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

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

www.autosim.org

Neuer NAFEMS CFD Trainingskurs im Herbst 2007

NEU

Praxisorientierte Grundlagen für CFD-Analysen

22. - 23. Oktober 2007, Wiesbaden

Der zweitägige Kurs vermittelt praxisorientiert und programm-unabhängig die Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung (CFD).

Neben der Funktionsweise von Programmen, die anhand zahlreicher einfacher Beispiele erläutert wird, steht die Vermittlung des gesamten Lösungsprozesses im Vordergrund. Mit Hilfe von Beispielen wird der gesamte Prozess vom realen Bauteil über das Berechnungsmodell bis zur Interpretation der Ergebnisse gezeigt und auf mögliche Fehlerquellen hingewiesen.

Der Kurs wird in einer Workshop-Atmosphäre durchgeführt, die die Teilnehmer zur Mitarbeit bzw. zum Einbringen eigener Fragestellungen einlädt.

Inhalte

- Einleitung / Übersicht
- Welche Gleichungen werden in einem CFD Programm gelöst?
- Beschreibung der Finite-Volumen Methode zur Lösung der Gleichungen anhand von Beispielen, Darstellung von Problemen / Fehlerquellen beim Lösungsprozess
- Tipps und Hinweise zur CFD-Vernetzung
- Praktische Umsetzung: Vom realen Bauteil zum Simulationsmodell
 - Vorüberlegungen
 - Annahmen / Voraussetzungen
 - Randbedingungen
 - Gittergenerierung
 - Erläuterung der Probleme am Praxisbeispiel

- Qualität
 - Überprüfung / Kontrollmöglichkeiten
 - Ergebnisbewertung
- Ausblick auf Entwicklungen / Tendenzen in der CFD-Welt (FSI, Optimierung, ..)
- Fallbeispiele / Workshop / Diskussionen

Referent

Wir freuen uns sehr, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske vom Steinbeis-Transferzentrum für Simulation in Maschinenbau und Verfahrenstechnik als Referenten zu gewinnen. Herr Janoske hat langjährige praktische Erfahrung aus der Industrie und gründete im Jahr 2002 das Steinbeis-Transferzentrum Simulation in Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

Abaqus / Dassault Systèmes

Dassault Systèmes übernimmt Icem

Icem, Softwareanbieter für Styling, Rendering und Flächenmodellierung wurde von Dassault Systèmes für voraussichtlich 51,4 Mio. Euro übernommen.

Freigabe von Abaqus Version 6.7

Dassault Systèmes hat die Freigabe der neuen Release 6.7 von Abaqus bekanntgegeben.

Dassault Systèmes gibt CAA Software Partnerschaft mit CD-adapco bekannt

Dassault Systèmes hat die Partnerschaft mit CD-adapco als neuen Component Application Architecture (CAA) Software Partner bekanntgegeben. (siehe CD-adapco)

www.abaqus.com / www.3ds.com

Altair Engineering

Bull entscheidet sich für PBS Professional

Altair Engineering, Inc. gibt bekannt, dass PBS Professional in die Bull NovaScale High-Performance Computing (HTC) Systeme integriert wurde um Kunden eine reine On-

Demand Computing Softwareumgebung zur Verfügung zu stellen. Diese Zusammenarbeit bietet eine robuste und flexible Lösung, die den Herausforderungen im Zusammenhang mit der Lizenzierung von Software auf Multicore-Systemen gerecht wird. Den Kunden wird somit ermöglicht, dass Sie nur für die tatsächlich genutzten Softwarelizenzen bezahlen.

MT Aerospace entscheidet sich für HyperWorks

Altair Engineering, Inc. gibt bekannt, dass sich die MT Aerospace AG, ein Lieferant von Komponenten und Subsystemen für Luft- und Raumfahrt sowie Systemlieferant von Antennen und Mechatronik, für die Altair Engineering HyperWorks Suite entschieden hat, um ihre Entwicklungsabläufe zu optimieren. Die Firma wird die HyperWorks Werkzeuge in den Design- und Optimierungsprozess ihrer hochentwickelten Luftfahrtkomponenten implementieren und so entscheidende Prozesse in der Entwicklung nach vorne verlagern. Darüber hinaus wird die Firma das Tool HyperMesh für Pre- und Postprocessingaufgaben und für die Modifizierung von Finite-Elemente Modellen einsetzen.

www.altair.de

Ansys mit hohen F&E-Aufwendungen – Spitzenplatz unter den CAE-Unternehmen

Ansys, Inc. hat bekanntgegeben, dass es einer Studie der Zeitschrift Baseline zufolge das CAE-Unternehmen mit den höchsten Aufwendungen im Bereich der Forschung und Entwicklung (F&E) im betrachteten IT-Sektor ist. Nach der Baseline-Studie (www.baseline-mag.com) liegt der Median bei den F&E-Aufwendungen unter den betrachteten 84 Firmen bei 15%. Im Jahr 2006 investierte Ansys über 49 Mio. US-\$ in die Forschung und Entwicklung, 17% der nicht-GAAP Einkünfte. Die Baseline-Studie klassifiziert IT-Unternehmen basierend auf den investierten Dollar-Beträgen. Die Zeitschrift ist ein praktischer Leitfaden für den Einsatz von wegweisender und innovativer Informationstechnologie. Fallstudien und andere Beiträge stellen dar, wie der Erfolg - oder der Mißerfolg - von Technologieeinsatz beim tatsächlichen Unternehmenserfolg gegenüber den Erwartungen bei Umsatz und Produktinnovation gemessen wird.

America's Cup Gewinner setzen auf Simulationstechnologie von Ansys

Ansys, Inc. meldet, dass der Gewinner des 32. America's Cup, die Alinghi, Ansys Technologie einsetzt, um Designänderungen und ihre Auswirkungen auf die Yacht zu untersuchen. Auch der andere Finalist, das Emirates Team New Zealand, nutzt die Simulationssoftware von Ansys um seine Yachten an die Spitze zu bringen.

www.ansys.com, www.fluent.de
www.cadferm.de

Werbeanzeige

Ansys / Fluent / Cadferm

Blechstrukturen: Effiziente Berechnung mit neuem Ansys SolidShell Element

Große Vorteile bei der Berechnung von Blech-Strukturen zeichnen das neue SolidShell-Element in Ansys Workbench bzw. Ansys DesignSpace aus: Es führt zu den kurzen Rechenzeiten des klassischen Schalen-Elements, erfordert jedoch wie ein Volumen-Element kaum Aufwand für die Modellaufbereitung. Damit ist dieser Weg, auch für den sporadischen Anwender, den berechnenden Konstrukteur eines Blechbearbeiters, ideal geeignet.

CD-adapco

Dassault Systèmes gibt CAA Software Partnerschaft mit CD-adapco bekannt

Dassault Systèmes hat die Partnerschaft mit CD-adapco als neuen Component Application Architecture (CAA) Software Partner bekanntgegeben. (siehe Dassault Systèmes)

Star-CAD Series V4.12**freigegeben**

CD-adapco gibt die Freigabe der Star-CAD Series V4.12 bekannt. Die Version beinhaltet Star-CAT5 - CAAV5 basierte Software für Catia V5, Star-Pro/E für Pro/Engineer Wildfire, Star-NX für NX und Star-Works für SolidWorks.

Star-CCM+ V2.08 freigegeben

CD-adapco hat die Freigabe der Release Star-CCM+ V2.08 bekanntgegeben.

www.cd-adapco.com

Dynamore**DYNAmore unterstützt passives Sicherheitskonzept des Stallardo 07**

Die DYNAmore GmbH, Distributor von LS-Dyna im deutschsprachigen Raum, unterstützt die FHT Esslingen bei der Konstruktion eines Rennfahrzeugs im Rahmen des Wettbewerbs Formula Student. Formula Student ist ein internationaler Konstruktionswettbewerb, bei dem Hochschulen und Universitäten einen kleinen Formelrennwagen konstruieren und bauen, um dann im Wettbewerb gegeneinander anzutreten. Der Wettbewerb findet seine Höhepunkte bei den weltweit stattfindenden Formula Student Events. In Deutschland findet diese Veranstaltung vom 8. – 12. August auf dem Hockenheimring statt. DYNAmore unterstützt den Rennstall Esslingen bei der Konstruktion und Optimierung der Crashbox des Stallardo 07, dem von der FHT Esslingen neu entwickelten Rennwagen.

www.dynamore.de

www.rennstall-esslingen.de

www.formulastudent.de

ESI**ESI Group stellt Pam-RTM for Catia V5 vor**

Die ESI Group stellt mit Pam-RTM for Catia V5 eine in Catia V5 integrierte Lösung vor. Die Software soll ab Juli 2007 verfügbar sein.

PERMAS

Die innovative Kraft der Simulation

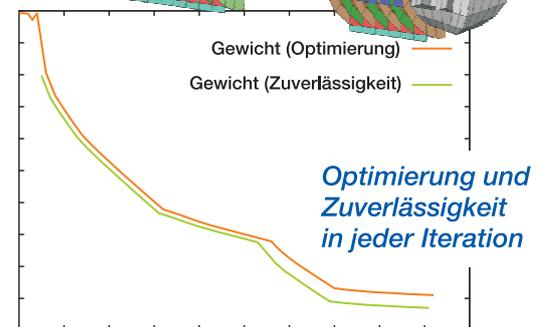
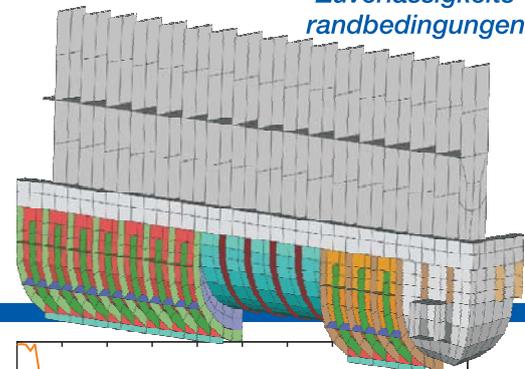


Finite Elemente für erfolgreiche Produkte:

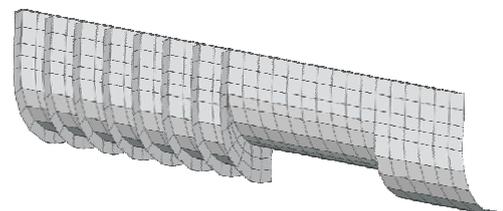
- Statik, Dynamik, Akustik, Wärmeleitung, Elektromagnetik;
- Linear und nichtlinear;
- Kurze Rechenzeit, sehr große Modelle;
- Integrierte Optimierung und Zuverlässigkeitsanalyse.

Zum Beispiel: Robustes Optimum

Robuster Entwurf = Optimum unter Zuverlässigkeitsrandbedingungen



Rippenbild der optimierten Struktur



Geringeres Gewicht + höhere Zuverlässigkeit = Robustes Optimum

Entwicklung - Beratung - Schulung - Berechnung

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

INTES

Neues Release der Software Pam-Crash 2G

Die ESI Group gibt die Freigabe des neue Releases von Pam-Crash 2G bekannt.

www.esi-group.com

Esteco

Neues Release modeFrontier 3.2.1 freigeben

Esteco hat das neue Release der Software modeFrontier 3.2.1 freigeben. Die Software verfügt unter anderem über Anbindungen an AVL, UGS NX und Madymo.

www.esteco.com

Femlab / Comsol

Comsol wird SolidWorks Solution Partner

SolidWorks Corp. und Comsol arbeiten noch enger zusammen: Comsol wurde zu einem ausgewählten Solution Partner von SolidWorks. In diesem Rahmen bietet SolidWorks seinen Kunden Zugang zu integrierten Produkten und Dienstleistungen. Comsol Multiphysics bietet eine bidirektionale Schnittstelle, die so genannte `SolidWorks Live Connection`. Damit können Bauteile in der CAD-Umgebung leicht geändert und automatisch auf die Multiphysik-Simulation übertragen werden. Ein

animiertes Beispiel für die Funktion der Schnittstelle finden Sie unter folgendem Link:

http://www.comsol.com/sw_cmph_live

Comsol News – Kundenmagazin zur Simulation in der Praxis

Die neuste Ausgabe des Kundenmagazins Comsol News enthält viele interessante Beiträge zur angewandten Mathematische Modellierung. In vielen Fachbereichen wie z. B. der Strukturmechanik, der Verfahrenstechnik, der Nanotechnologie, der Elektromagnetik oder der Mikrosystemtechnik sind Simulationen mittlerweile unverzichtbar geworden. So umfassen auch die Comsol News ein ganzes Spektrum von Beispielen, wie die Mathematische Modellierung und Simulation in der Praxis eingesetzt wird. Einige der Highlights:

- Luft- und Raumfahrt: Airbus testet das Reibrührschweißen
- Akustik-Struktur-Wechselwirkung: Sonar – Hörbare Materialeigenschaften
- Automotive: Innovationen im Motordesign
- Tipps und Tricks zur Modellierung

Die Zeitschrift ist kostenfrei erhältlich unter www.comsol.de/comsolnews oder unter info@comsol.de oder telefonisch unter +49(0)551 / 99 721 0.

www.femlab.de / www.comsol.com

Flowmaster

Flowmaster kündigt erste industriespezifische Version an

Nach der Vorstellung der industriespezifischen Version von Flowmaster V7 Aerospace R1 während der Paris Air Show 2007 gab das Unternehmen nun die Version von Flowmaster V7 für die Automobilindustrie bekannt.

www.flowmaster.com

Flomerics

Umsatzsteigerung bei Flomerics

Flomerics meldet eine Steigerung des Umsatzes um 24% und des Gewinns um 30%. EFD ist jetzt die

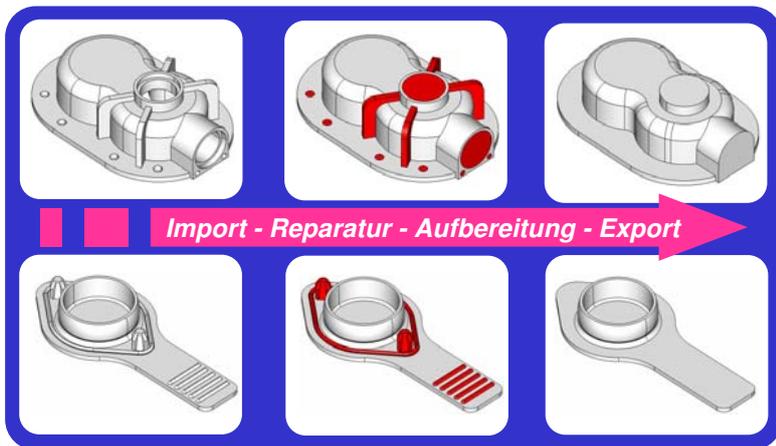
Werbeanzeige

CAD/FEM/CFD-Datenaustausch



Schneller und effektiver 3D-CAD-Datenaustausch zwischen allen gängigen CAD/FEM&CFD-Anwendungen

- CAD-Datenkonvertierung und -reparatur
- Featureentfernung und Geometrievereinfachung
- Verschmelzen von Einzelflächen
- Entfernen von Miniflächen usw.



"CADfix ist unsere zentrale Ressource für alle Modelle mit denen wir arbeiten. Die mit CADfix bereinigten Geometrien bilden die Grundlage aller unserer Vernetzungen und Simulationen"

Chris Jones, BAE SYSTEMS, Luft- und Raumfahrtindustrie

Wir zeigen Ihnen wie sie mit CADfix ihre CAD-Modelle für FEM-Berechnungen und CFD-Simulationen optimal aufbereiten können. Rufen Sie uns noch heute an!



TranscenData Europe Ltd
euinfo@transcendata.com
Tel: +44-1954-234300

SWAP Computer GmbH
albert.eckert@swap.de
Tel: +49-(0)7851-480476



www.cadfix.com www.cadfix.de www.swap.de

CFD-Software mit dem weltweit höchsten Wachstum.

www.nika.biz

Intes

Neue Website online

Anfang Mai präsentierte die Intes GmbH einen Relaunch ihres Webauftritts. Neben optischen und technischen Verbesserungen wurden zahlreiche zusätzliche Informationen aufgenommen. Insbesondere die Beschreibung der FEM-Software Permas wurde erheblich erweitert.

www.intes.de

LMS

EADS wählt LMS Virtual.Lab Acoustics

LMS gab die Entscheidung des Zentralen Forschungszentrums von EADS Deutschland (CRC-G) für LMS Virtual.Lab Acoustics als Lösung zur Simulation des vibroakustischen Verhaltens von Luft- und Raumfahrtssystemen bekannt.

LMS Virtual.Lab Landing Gear

Wie angekündigt, bringt LMS eine auf Flugzeugfahrwerke zugeschnittene Simulationslösung auf der Basis von LMS Virtual.Lab Motion auf den Markt. Mit Hilfe des neuen Produktes können Entwicklungsteams bereits vor dem Prototypenbau detaillierte Modelle von Flugzeugfahrwerken erstellen, deren Betriebsverhalten zuverlässig simulieren, verschiedene Konstruktionslösungen rasch analysieren und Flugzeugkonstruktionen optimieren.

Mira wählt LMS Test.Lab für NVH-Test von Fahrzeugen

LMS teilte mit, dass sich der Automobiltechnikspezialist Mira Ltd. für die Implementierung von LMS Test.Lab entschieden hat. Das Unternehmen führt damit Geräusch- und Schwingungstests an Fahrzeugen durch und bearbeitet Entwicklungsaufträge für Automobilhersteller weltweit.

www.lmsintl.com



COMSOL
MULTIPHYSICS

Hoch entwickelt,
leicht zu bedienen.

RF-heated semiconductor furnace

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



**Kostenfreie CD
mit über 300
Fachbeiträgen
unter:**

www.comsol.de/cd

 COMSOL

COMSOL MULTIPHYSICS IS A REGISTERED TRADEMARK OF COMSOL AB.

Werden Sie Aussteller!

EUROMOLD

**Weltmesse für Werkzeug-
und Formenbau, Design und
Produktentwicklung**

5. - 8. Dezember 2007

Messegelände
Frankfurt / Main, Germany

**“Vom Design über den Prototyp...
...bis zur Serie”**



www.euromold.com

Veranstalter: **DEMAT GmbH**
Postfach 110 611, D-60041 Frankfurt/Main, Germany
Tel.: + 49-(0) 69 - 274 003-0, Fax: + 49-(0) 69 - 274 003-40
E-mail: euromold@demat.com

MSC.Software

MSC.Software stellt neue Version von SimEnterprise R2 vor
MSC.Software Corp. gibt die Freigabe von SimEnterprise R2 bekannt, der neuesten integrierten Simulationslösung von MSC.Software. SimEnterprise R2 beinhaltet die Anwendungen SimXpert, SimDesigner sowie SimManager und bietet hoch entwickelte Funktionalitäten zur Erfassung und Nutzbarmachung von technischem Expertenwissen über die Grenzen von Disziplinen, User Communities und Unternehmensbereichen hinweg.

Newman/Haas/Lanigan Racing rast auf den 100sten Preis zu
MSC.Software Corp. teilt mit, dass Newman/Haas/Lanigan Racing (NHLR), die Champ Car World Series Champions der letzten drei Jahre, hart auf den 100^{sten} Preis zusteuern. Das ist auch der MSC.Software Adams zu verdanken, die zur Einstellung und Leistungsoptimierung von Fahrgeräten und Radaufhängungen eingesetzt wird.

Volvo entwickelt mit der Software MD Nastran LKW
MSC.Software gibt bekannt, dass Volvo 3P, die Design- und Serviceholding von Volvo Trucks, ihre Simulationsprozesse mit der multidisziplinären Simulationslösung MD Nastran standardisieren wird.

NASA-Satellitensystem Themis
MSC.Software Corp. kündigt an, dass Swales Aerospace erfolgreich MSC Nastran und Adams einsetzt, um Entwicklungstests beim Design und der Entwicklung des NASA-Satellitensystems Themis (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) Probe Bus & Probe Carrier einzusparen.

www.mscsoftware.com

Siemens A & D / UGS

Siemens schließt Übernahme ab
UGS Corp. gab den Abschluss der Übernahme des Unternehmens durch die Siemens AG zum 04. Mai

2007 bekannt. Das Unternehmen wird künftig unter dem Namen UGS PLM Software als weltweites Geschäftsgebiet des Siemens-Bereiches Automation and Drives (A&D) firmieren. Die Unternehmen gaben am 25. Januar die Vereinbarung bekannt, dass die Siemens AG die Firma UGS für 3,5 Mrd. US-Dollar übernimmt, einschließlich der Übernahme bestehender Verbindlichkeiten. Die Europäische Kommission gab nach Abschluss der üblichen kartellrechtlichen Prüfung der Transaktion nun am 27. April bekannt, dass sie der geplanten Übernahme von UGS durch die Siemens AG zustimmt.

Fischer Automotive Systems integriert Teamcenter von UGS PLM Software

UGS PLM Software, ein Geschäftsgebiet des Siemens-Bereiches Automation and Drives (A&D), gibt bekannt, dass Fischer Automotive Systems GmbH ab sofort Teamcenter-Software von UGS PLM Software einsetzen wird.

www.siemens.com/ / www.ugsplm.de

Swap Computer GmbH

CADfix Version 6.0

CADfix von Transcendata ist derzeit in der Version 6.0 verfügbar. Der Konverter mit Reparatur und Qualitätsprüfung nach VDA ermöglicht es dem Anwender, CAD-Daten aus verschiedenen Quellen zu importieren, reparieren und zu optimieren.

www.cadfix.de

Tecosim

Tecosim expandiert weiter

Die Tecosim Technische Simulation GmbH hat ihre neuen Geschäftsräume in der Rüsselsheimer Ferdinand-Stuttman-Str. 15 bezogen.

www.tecosim.de

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



Professionelle 3D-Hardware

Manche Dinge kann man nicht vergleichen ...



Evergreen

SDIG Opteron Workstation, Upgradeable
 Gehäuse doppelt schallgedämmt • USB & Firewire • 2x AMD Opteron Socket F (max. 2x QuadCore) • reg. DDR2 ECC-Speicher (max. 32GB) • SATA/SAS-Raidssysteme (Raid 0,1,5) • Festplatten mit bis zu 15.000 U/min • PCI-Express-16x Mainboard • SLI-fähig • extrem leises Hochleistungs-Netzteil • DVD-Brenner

... aber verstehen!

Bei leistungsstarken und zukunftssicheren Workstations verlassen sich professionelle Anwender auf Lösungen von Schneider Digital.

Denn hier zählen langlebige Qualität und hohes Leistungspotential.

Die Sockel F Plattform bietet die ideale Basis für **Aufrüstbarkeit** mit der schnellsten CPU **bis zum Jahr 2010**. Garantiert!



Tel.: + 49 (8025) 9930-0
www.schneider-digital.de • e-mail: info@schneider-digital.de

Distributor von:



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

Co-sponsored by



Nachbericht: NAFEMS World Congress 2007

Der 11. NAFEMS World Congress unter dem Motto „Engineering Simulation – Innovation Leads to Competitive Advantage“ fand vom 22. - 25. Mai 2007 in Vancouver, Canada, statt.

Mit über 250 Teilnehmer aus mehr als 20 Ländern war es der bislang größte und umfassendste NAFEMS World Congress. Die Teilnehmer konnten aus einem breiten Spektrum an Möglichkeiten wählen:

- Über 120 Fachpräsentationen
- 6 Keynote-Presentationen:
 - R. Dreisbach, The Boeing Company, USA
 - Prof. M. Cross, University of Wales, UK
 - T. J. Lange, Procter & Gamble, USA
 - Prof. D. J. Inman, Virginia Polytechnic Institute, USA
 - M. Westphal, Lockheed Martin, USA
 - R. Pant, Tata Motors, IND
- Trainingskurs zu „Validation and Verification“
- Workshops zu den Themen: Multiphysics, Code Coupling, Injection Moulding, Education and Training
- Round Tables
 - Vendor meet NAFEMS
 - Realistic Simulation of a Flexible Mechanism – Processes Using Different Vendor Solutions
- Special Session
 - High Performance Computing in Engineering Simulation
 - Engineering Analysis Quality, Verification and Validation
 - Exploring Benefits of NAFEMS Membership

- Hard- und Softwareausstellung mit über 20 Ausstellern und Product Showcases auf der Ausstellungsbühne

Der Congress wurde „Co-Sponsored“ von der AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) und von ASME (American Society of Mechanical Engineers).



Als Hauptsponsor konnte Simulia, als Gold Sponsor UGS/Siemens AG gewonnen werden. Weitere Sponsoren waren Altair Engineering, Ansys/Fluent, Comsol, Icon-CFD, Fraunhofer-Institut SCAI und MSC Software.



Der nächste NAFEMS World Congress findet 2009 in Europa statt. Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme als Vortragender, Teilnehmer, Aussteller oder Sponsor.

Nähere Infos folgen in Kürze unter www.nafems.org.

Principal Sponsor



Gold Sponsor



Silver Sponsors



2007

| | | | | |
|--|------------|------------------|--|----------------------------------|
| Formula Student | 08.-12.08. | Hockenheim, D | www.formulastudent.de | Formula Student |
| Abaqus Benutzerkonferenz | 17.-18.09. | Baden-Baden, D | www.abacus.de | Abaqus Deutschland GmbH |
| modeFrontier Users Meeting | 01.10. | Stuttgart, D | www.esteco.com | Esteco GmbH |
| LS-Dyna Forum 2007 | 11.-12.10. | Frankenthal, D | www.dynamore.de | Dynamore GmbH |
| UGS PLM Europe Conference | 15.-17.10. | Frankfurt, D | www.ugsplm.de | Siemens AG |
| MSC.Software VPD Conference, EMEA | 17.-18.10. | Frankfurt, D | www.msc.software.com | MSC.Software GmbH |
| NAFEMS Trainingskurs Basic 1: | | | | |
| Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre | | | | |
| | 22.-23.10. | München, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| NAFEMS Trainingskurs CFD Basic: | | | | |
| Praxisorientierte Grundlagen für CFD-Analysen | | | | |
| | 22.-23.10. | Wiesbaden, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| 1st European HyperWorks Technology Conference | 23.-24.10. | Frankfurt, D | www.altair.de | Altair Engineering GmbH |
| NAFEMS Seminar: FEA Modelling and Numerical Simulation | 24.-25.10. | Kopenhagen, DK | www.nafems.org | NAFEMS Nordic |
| NAFEMS Seminar: Simulation von Verbunden: Material und Strukturen | 06.-07.11. | Bad Kissingen, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| Star Conference | 06.-07.11. | Nürnberg, D | www.cd-adapco.com | CD-adapco |
| Product Life live 2007 | 6.-7.11. | Mainz, D | www.productlife.de | Mesago Messe Frankfurt GmbH |
| Autosim Workshop | 15.-16.11. | Bilbao, E | www.autosim.org | NAFEMS |
| NAFEMS Trainingskurs Basic 2: | | | | |
| Praxisorientierte Grundlagen für FEM-Analysen | | | | |
| | 19.-20.11. | München, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| Simpack User Meeting | November | | www.simpack.de | Intec GmbH |
| Ansys Conference & 25. Cadfem Users' Meeting 2007 | 21.-23.11. | Dresden, D | www.cadfem.de | ANSYS Germany GmbH / Cadfem GmbH |
| Euromold | 05.-08.12. | Frankfurt, D | www.euromold.com | Demat GmbH |
| 2008 | | | | |
| NAFEMS Seminar: Simulation komplexer Strömungsvorgänge (CFD) | 10.-11.03. | Wiesbaden, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| NAFEMS Seminar: Konstruktionsnahe Berechnung – Potential und Herausforderung | 12.-13.03. | Wiesbaden, D | www.nafems.de | NAFEMS DACH |
| Permas Users Conference | 03.-04.04. | Stuttgart, D | www.intes.de | Intes GmbH |

INNOVATION DURCH SIMULATION



 ANSYS®
 FLUENT®


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

CFD-Vertriebsingenieur(in)

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

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

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

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

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

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

www.fluent.de



Die FEMLAB GmbH ist die deutsche Tochtergesellschaft des weltweit expandierenden schwedischen Softwareunternehmens COMSOL AB. Mit COMSOL Multiphysics (ehemals FEMLAB) vertreiben wir eine junge und innovative Simulationssoftware, die in zahlreichen Unternehmen, Forschungsinstituten und Hochschulen für wissenschaftlich-technische Anwendungsbereiche erfolgreich eingesetzt wird.

Wir suchen für unsere neue Niederlassung Rhein-Main (in Aschaffenburg):

Eine/n Produktmanager/in

Aufgaben:

- Ausbau des süddeutschen und österreichischen Marktes für COMSOL Multiphysics (Geschäftsbereich Elektromagnetik)
- Vertrieb von COMSOL Multiphysics
- Kundenbetreuung (techn. Support, Training, Consulting)

Voraussetzungen:

- Hochschulabschluss in Natur- oder Ingenieurwissenschaft (Schwerpunkt Elektrotechnik/ Elektromagnetik)
- Gute Kenntnisse im Bereich Simulation (Numerische Methoden, CAE)
- Verkaufstalent
- Vortrags- und Präsentationsfähigkeiten
- Bereitschaft zum Reisen
- Gute Englischkenntnisse

Wir bieten:

- eine äußerst abwechslungsreiche Aufgabe in einem dynamischen und innovativem Umfeld
- leistungsgerechte Bezahlung
- persönlichen Gestaltungsfreiraum und freie Entwicklungs- und Entfaltungsmöglichkeiten
- einen sicheren Arbeitsplatz in einem jungem und aufstrebenden Unternehmen

Für telefonische Auskünfte stehen Ihnen Robert Banjac, Tel. 06021-45 11 86 10, Email: robert.banjac@femlab.de, oder Dr. Bernhard Fluche, Tel. 0551-99 721-0 gern zur Verfügung.

Bitte senden Sie Ihre Bewerbungsunterlagen an:

FEMLAB GmbH
Niederlassung Rhein-Main
Hettingerstr. 21
63739 Aschaffenburg

www.comsol.de

Industriepromotion

Auf dem Anwendungsgebiet der Blechumformsimulation ist die DYNAmore GmbH als Forschungs- und Entwicklungspartner in zwei durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekte eingebunden. Weitere Entwicklungspartner umfassen namhafte Automobilhersteller und -zulieferer. Ziel der auf drei Jahre angelegten Projekte ist zum einen die Simulationsprozesskette vom Walzen über das Blechumformen bis hin zum Crashlastfall durchgängig abzubilden und zum anderen die Umformsimulation von hochfesten Stählen zu verbessern.

Ihre Aufgabe

Vertieftes methodisches Arbeiten im Bereich der Blechumformsimulation mit Fokus auf der Prozesskette. Vorhandene und teilweise erprobte Methoden, wie zum Beispiel

- explizite Umformsimulation mit impliziter Rückfederungsberechnung
- Berücksichtigung von elastischen Werkzeugdeformationen
- thermisch-mechanisch gekoppelte Berechnung
- Mapping von Ergebnisvariablen

sind im Kontext der Prozesskette aufzuarbeiten und einer Softwareumgebung zuzuführen.

Die DYNAmore GmbH ist das Kompetenzzentrum für Beratung, Anwendung, Schulung, Support und Vertrieb der Finite-Elemente-Software LS-DYNA in Deutschland, Österreich und der Schweiz und zahlreichen anderen europäischen Ländern. Wir sind eine der ersten Adressen für Pilot- und Entwicklungsprojekte zur Simulation nichtlinearer, dynamischer Problemstellungen. Basis unseres Erfolgs sind unter anderem hochgradig qualifizierte und motivierte Mitarbeiter. www.dynamore.de

Ansprechpartner: Dr. André Haufe, Leiter Prozesssimulation, Tel. 0711 – 45 9600-17, andre.haufe@dynamore.de
Dr. Thomas Münz, Leiter Zentrale, Tel. 0711 – 45 9600-10, thomas.muenz@dynamore.de

Ihr Profil

- Universitätsabschluss im Bereich Ingenieurwissenschaften (Luft- und Raumfahrttechnik, Maschinenbau, Bauwesen)
- Kenntnisse im Bereich Finite-Elemente-Theorie
- Positive Arbeitseinstellung und zielorientierte Arbeitsweise
- Hohes Maß an Eigeninitiative und Teamorientierung

Altair steht für Kompetenz in Sachen numerischer Simulation. Wir bieten High End CAE-Softwarelösungen und Berechnungsdienstleistungen aus einer Hand. Als langjähriger Partner von Unternehmen aus der Automobil- und Zulieferindustrie sowie der Luft- und Raumfahrt kennen wir die Anforderungen des Marktes. Mit über 1.000 Mitarbeitern an 30 Standorten weltweit gehören wir zu den Führenden in der CAE-Branche.

In Deutschland beschäftigen wir ca. 100 Mitarbeiter, die von derzeit 7 Büros über 400 Kunden betreuen.

Aufgrund unseres soliden Wachstums sind wir in der Lage, ständig neuen KollegInnen interessante Aufgabenstellungen und Herausforderungen zu bieten.

Altair Engineering GmbH
Adriane Wilberscheid
Human Resources
Niederlassung München
Edisonstraße 2
85716 Unterschleißheim
Tel.: +49(0)89/379952-414
E-Mail: recruiting@altair.de

www.altair.de



Für verschiedene Standorte suchen wir qualifizierte, engagierte und kundenorientierte Mitarbeiter zur Unterstützung unseres Teams:

Key Account Manager Automotive (m/w) – München

Sie sind für den strategischen Vertrieb unserer CAE-Lösungen zuständig. Die Pflege und der aktive Ausbau der Kundenbeziehungen gehören zu Ihren Hauptaufgaben.

Technical Consultants CAE (m/w) – München, Köln und Hannover

Sie sind mit Ihrer mehrjährigen Erfahrung erster technischer Ansprechpartner unserer Kunden und beraten bei der Einführung sowie der optimalen Nutzung unserer CAE-Lösungen.

Application Engineers CAE (m/w) – München, Köln und Hannover

Sie unterstützen unsere Kunden bei technischen Fragen zu unseren Softwareprodukten, führen Trainings durch und wenden modernste Simulationsmethoden an.

RADIOSS Application Engineer (m/w) – Böblingen, München, Köln und Hannover

Sie sind technischer Ansprechpartner für unsere Kunden im Bereich Crash / Safety mit RADIOSS und unterstützen mit Ihrem Know-How aktiv unseren Vertrieb.

Project Engineer CAE (m/w) – Böblingen, Köln und Graz

Sie arbeiten bei Entwicklungs- und Berechnungsprojekten in den Bereichen Crash / passive Sicherheit oder Statik / Strukturoptimierung mit und nehmen an der Lösungsfindung im CAE-unterstützten Entwicklungsprozess aktiv teil.

Detaillierte Beschreibungen der Aufgaben und Anforderungsprofile finden Sie auf unserer Webseite unter: www.altair.de/JobList.aspx

Wir bieten Ihnen in einem profitablen Unternehmen, in dem Ihre Stärken und Interessen berücksichtigt werden, beruflich und persönlich interessante Entwicklungsmöglichkeiten. Wir freuen uns über Ihre Kontaktaufnahme und Ihre aussagekräftigen Bewerbungsunterlagen.

Freuen Sie sich auf ein motivierendes Arbeitsklima in einem dynamischen Team!

Für die Entwicklung unseres Softwaresystems PERMAS
suchen wir einen/eine

Software-Entwickler/in für FEM

Auf der Basis solider theoretischer Kenntnisse der Mechanik und der FEM sollten Erfahrungen in der Programmierung (mit Fortran oder C) vorhanden sein. Von Vorteil sind auch praktische Erfahrungen in der Anwendung der Finite-Elemente-Methode. Dazu kommt eine hohe Motivation für diese kreative Tätigkeit mit einer langjährigen Perspektive. Hier finden theoretische und programmiertechnische Begabungen ein ideales Arbeitsfeld. Beherrschung des Englischen in Wort und Schrift ist erforderlich.

Wir suchen den Bewerber/die Bewerberin, der/die sich in der Software-Entwicklung im FEM-Bereich engagieren möchte und dabei in der Lage ist, mit hohem Engagement selbständig und im Team zu arbeiten.

Kontakt:
INTES GmbH, Herr Dr. Reinhard Helfrich
Schulze-Delitzsch-Str. 16, D-70565 Stuttgart
Email: helfrich@intes.de, Web: www.intes.de

INTES

Ingenieurgesellschaft für
technische Software mbH

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

Schalten Sie ein/e

Stellenanzeige/Stellengesuch *

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

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

* Die Schaltung von Stellenanzeigen ist NAFEMS Mitgliedern vorbehalten.

Meso-mechanische Modellierung von Faser-Metall-Laminaten

Peter Middendorf (EADS Innovation Works)
Peter Linde (Airbus Deutschland GmbH)
Henk de Boer (Advanced Lightweight Engineering)
Jos Sinke (Delft University of Technology)

Faser Metall Laminate (FML) bestehen aus einer wechselnden Schichtung von dünnen Aluminiumblechen und vorimprägnierten Faserlagen (Prepregs). In modernen Flugzeug-Rumpfkongfigurationen werden FML zur gezielten Verbesserung vom Ermüdungs-, Durchbrand- und Schadenstoleranzverhalten eingesetzt. Der vorliegende Artikel befasst sich mit dem intra- und interlaminaren Schädigungsverhalten dieses hybriden Werkstoffes. Schwerpunkt der Untersuchungen ist dabei die Delaminationmodellierung sowie die versuchstechnische Validierung mittels Rissfortschrittsprüfungen. Der hierfür gewählte meso-mechanische Modellierungsansatz wird im Folgenden auch auf Nietverbindungen ausgeweitet.

Einleitung

Faser Metall Laminate bestehen aus einer wechselnden Schichtung von dünnen Metallblechen und vorimprägnierten Faserlagen (Prepregs) und gehören damit zur Klasse der hybriden Werkstoffe. Die Kombination von Aluminium mit glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) ist weithin unter dem Produktnamen Glare[®] bekannt und wird im Airbus A380 in der Rumpfoberschale verbaut. Im Vergleich mit monolithischen Aluminiumlegierungen weist das Material Verbesserungen im Bereich Ermüdungsverhalten und Schadenstoleranz auf, wohingegen bei statischer Steifigkeit und Festigkeit noch Verbesserungspotential vorhanden ist. Dies ist somit primäres Ziel des Forschungsprojektes Dialfast [1] aus dem 6. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission.

Um von den Vorteilen innovativer Faser Metall Laminate profitieren zu können, muss der Berechnungsingenieur in der Lage sein, das komplexe Versagensverhalten des Werkstoffes in einer Finite Elemente Berechnung physikalisch korrekt abbilden zu können. Dazu bedarf es zunächst geeigneter konstitutiver Beziehungen, welche die Interaktion der Einzelschichten des hybriden Materials berücksichtigen und damit das Schädigungsverhalten bis zum Versagen, d.h. auch im Nachbeulbereich, beschreiben können. Weiterhin sollen auch Verbindungselemente in die FE Analyse miteinbezogen werden. Die Berechnungen werden auf zwei Approximationsstufen durchgeführt: mittels meso-mechanischer Modelle zur Beschreibung des detaillierten Werkstoffverhaltens sowie daraus abgeleiteter makro-mechanischer Modelle für größere Strukturanalysen.

Modellierung von Faser Metall Laminaten

Allgemein

Faser Metall Laminate werden aufgrund ihrer vorteilhaften Charakteristik im Bereich Ermüdung und Brandverhalten vermehrt in der Außenhaut von Flugzeugstrukturen eingesetzt. Der Werkstoff besteht aus Aluminium-Außenlagen sowie dazwischen alternierenden Schichten von unidirektional orientierten Prepreg-Lagen und wiederum Aluminiumblechen. Typische FML-Hautdicken liegen im Bereich von 1,6 mm bis zu etwa 3,2 mm und entsprechen damit den Blechdicken von vergleichbaren monolithischen Rumpfschalen.

Generell können verschiedene Ansätze zur Modellierung von Faser Metall Laminaten gewählt werden: beim mikro-mechanischen Ansatz sind Fasern, Matrix und Interphase separat diskretisiert, auf dem meso-mechanischen Level werden diese zu Einzelschichten homogenisiert [2] und in der Makromechanik beschreibt das Materialmodell das komplette Laminat.

Da das Ziel dieser Arbeit die detaillierte Modellierung der intra- und interlaminaren Versagensmechanismen ist, wird hier der meso-mechanische Ansatz gewählt [3] [4]. Damit können zum einen verschiedene FML Konfigurationen analysiert werden, zum anderen limitiert der Approximationslevel die Anzahl der benötigten Freiheitsgra-

de. Folglich werden sowohl Aluminium- als auch Prepreg-Lagen im Folgenden als homogene Werkstoffe mit isotropen bzw. orthotropen Materialeigenschaften modelliert.

Üblicherweise ist die Klebeverbindung zwischen Aluminium und Prepreg von exzellenter Qualität, so dass die Festigkeit dieser Interphase größer ist als die der darunter liegenden harzreichen Zone [2]. Demzufolge bilden sich dort auch typischerweise Delaminationen aus, insbesondere in der harzreichen Zone zwischen zwei benachbarten Prepreglagen, was somit in der interlaminaren Modellbildung zu berücksichtigen ist. Prinzipiell kann diese Interphase unterschiedlich modelliert werden:

1. mittels einer zusätzlichen (dünnen) Lage von Kontinuumelementen
2. mittels Interphasenelementen [5] [6] [7]
3. mittels Interaktionsflächen.

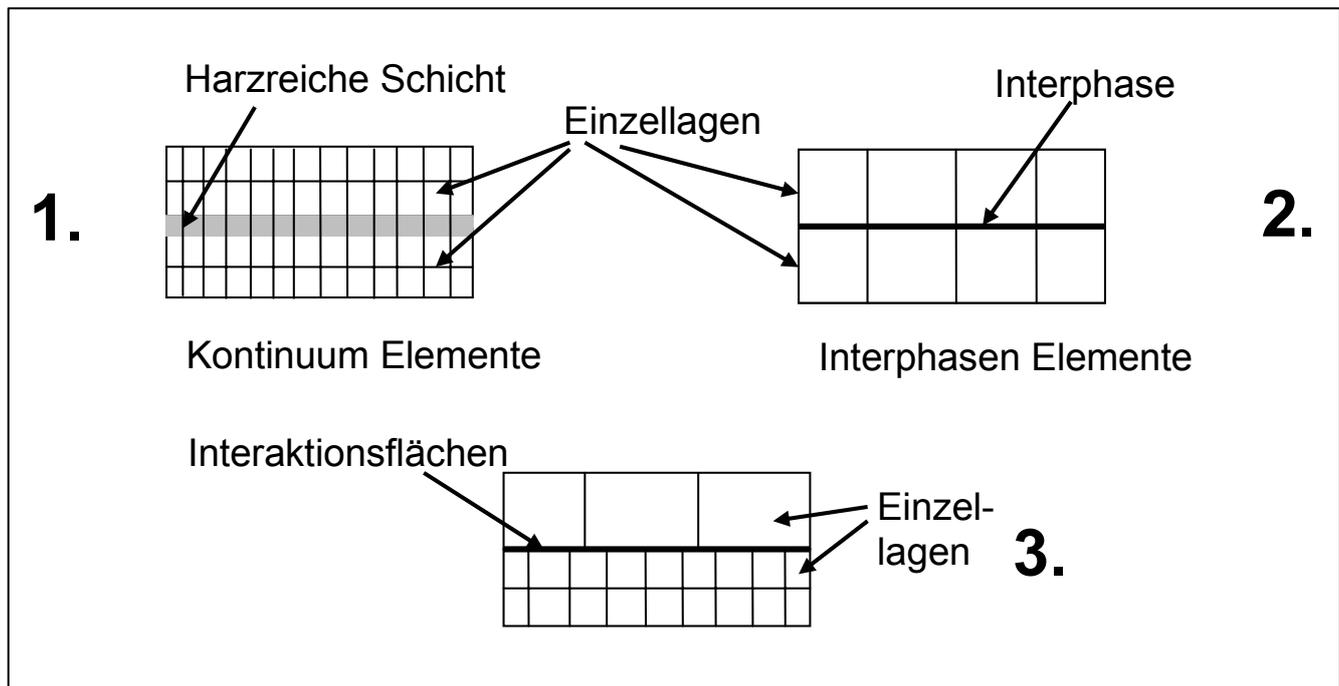


Abb. 1:
FE-basierte Ansätze zur Delaminationsmodellierung

Da der erste Ansatz zu einer hohen Anzahl benötigter Elemente führt und der zweite das Vorliegen kongruenter FE-Netze voraussetzt, wurde die Methode der Interaktionsflächen für eine Abaqus-Implementierung gewählt. Das FE Programm liefert dabei die Verschiebungen benachbarter Punkte auf den Oberflächen der Einzelschichten, diese werden dann im Weiteren mittels eines benutzerdefinierten Interaktionskriteriums ausgewertet.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Entwicklung geeigneter Schädigungsmodelle für Faser Metall Laminats und basiert auf den Erfahrungen mit Glare[®]. Zwei wesentliche Versagensmoden von FML werden dabei numerisch modelliert: Faser/Matrix Versagen (intralaminar) und Delamination (interlaminar).

Schädigungsmodellierung

Schädigung von Faser Metall Laminaten kann unterteilt werden in Schädigung des Aluminiums, intralaminare Schädigung des Prepregs und Delamination. In den Aluminiumlagen handelt es sich dabei zumeist um Plastifizierung im Druckbereich oder Rissbildung unter Zuglast. Hierfür, wie auch zur Modellierung von Aluminiumnie-

ten, wird ein so genanntes „smeared crack“ Modell verwendet. Schädigung in den Prepreglagen wird nochmals unterschieden in Faser- und Matrixversagen. Beide Versagensmodi werden mittels der Benutzerroutine Umat in Abaqus implementiert. Das Versagenskriterium für eine Delamination zwischen zwei Lagen wird im Folgenden beschrieben. Die Abaqus Implementierung erfolgt in diesem Fall mittels der Routine Uinter.

Faser/Matrix Schädigung

Faser- oder Matrixschädigung sind intralaminare Versagensmodi in einer Prepreglage des FML. Dabei ist Matrixversagen zumeist weniger kritisch, da die Lagen in Faserrichtung weiterhin lasttragend sind.

Innerhalb des Laminates kommt es somit nach dem Erstversagen einer Einzelschicht zur Spannungsumverteilung, so dass auch eine weitere Laststeigerung möglich ist [8]. Demzufolge muss sowohl die Laminatstruktur als auch der Schadensfortschritt physikalisch korrekt beschrieben werden. Bei dem hier verwendeten meso-mechanischen FE Modell werden dafür die Steifigkeitseigenschaften der betroffenen Einzelschicht entsprechend degradiert. Das Versagenskriterium ist spannungsbasiert und berücksichtigt unterschiedliche Versagensmodi für Faser und Matrix, die damit verbundene sukzessive Degradierung ist wiederum abhängig von den jeweiligen Bruchenergien der Einzelkomponenten.

Das mittels der Benutzerroutine UMAT implementierte Schädigungsmodell verwendet für Matrixversagen das folgende interaktive Versagenskriterium

$$f_m = \sqrt{\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2,\max}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12,\max}}\right)^2}, \quad (1)$$

wobei $\sigma_{2,\max}$ die Maximalspannung senkrecht zur Faserrichtung (für Zug- und Druckbelastung jeweils separat auszuwerten) und $\tau_{12,\max}$ die maximale Schubspannung ist. Versagen tritt auf, wenn f_m den Grenzwert von 1 überschreitet.

Der daraus abgeleitete Schädigungsparameter berechnet sich gemäß

$$d_m = \frac{1}{f_m} e^{(-\sigma_{2,\max} (f_m - 1) / (C_{22} G_c))}. \quad (2)$$

Die Prepreglage weist zunächst transversal isotrope Eigenschaften auf, demzufolge ergeben sich die Komponenten der Elastizitätsmatrix zu

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{E_L(1-\nu_{TT}^2)}{a}; & C_{22} &= \frac{E_T(1-\nu_{LT}\nu_{TL})}{a}; & C_{33} &= \frac{E_T(1-\nu_{LT}\nu_{TL})}{a} \\ C_{12} &= \frac{E_T(\nu_{LT} - \nu_{LT}\nu_{TT})}{a}; & C_{13} &= \frac{E_T(\nu_{LT} - \nu_{LT}\nu_{TT})}{a}; & C_{23} &= \frac{E_T(\nu_{TT} - \nu_{LT}\nu_{TL})}{a} \\ C_{66} &= G_{TT}; & C_{55} &= G_{LT}; & C_{44} &= G_{LT}, \end{aligned} \quad (3)$$

mit

$$a = 1 - 2\nu_{LT}\nu_{TL} - \nu_{TT}^2 - 2\nu_{LT}\nu_{TL}\nu_{TT}. \quad (4)$$

Der Versagensmodus in Faserrichtung wird durch ein einfaches uniaxiales Bruchkriterium beschrieben

$$f_f = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1,\max}}\right)^2} \quad (5)$$

$\sigma_{1,\max}$ ist hier der Maximalwert von Zug- oder Druckspannung in Faserrichtung. Versagen tritt auch hier beim Überschreiten des Grenzwertes $f_f > 1$ ein.

Analog zu (2) wird ein zweiter Schädigungsparameter für das Faserversagen definiert

$$d_f = \frac{1}{f_f} e^{(-\sigma_{1,\max}(f_f-1)/(C_{11} G_c))} \quad (6)$$

Die damit verbundene Degradation der einzelnen Steifigkeitswerte beeinflusst wiederum die Elastizitätsmatrix der Prepreglage. Unter der Annahme, dass

- Matrixschädigung nur E_2 , ν_{21} und ν_{23} reduziert und
- Faserschädigung nur E_1 , ν_{12} und ν_{13} reduziert,

liegt demzufolge nun ein orthotropes Materialverhalten vor.

Delamination

Interlaminare Delaminationen können sich in allen Interphasen des FML ausbreiten, d.h. zwischen Aluminium und Prepreg oder in der harzreichen Zone zwischen zwei angrenzenden Prepreglagen, was gemäß experimenteller Untersuchungen zumeist der Fall ist. Die Delaminations-Initiierung dagegen beruht in der Regel auf einem intralaminaren Matrixversagen einer Einzellage.

Zur Modellierung des Delaminationsverhaltens wird hier ein orthotroper Ansatz gewählt, der die verschiedenen Versagensmodi und deren Interaktion berücksichtigt. Eine Kontaktformulierung verhindert zudem die Penetration der beiden Delaminationsflächen im Falle einer Druckbelastung.

Das Delaminationsmodell wird über die „Surface-to-Surface“ Kontaktoption in das FE Programm Abaqus implementiert, so dass die angrenzenden Vernetzungen nicht kongruent sein müssen. Die Formulierung basiert auf relativen Verschiebungen der Kontaktflächen, wobei u_1 die Normalverschiebung der Master-Fläche und die beiden Komponenten (u_2 und u_3) die Schubkomponenten in Dickenrichtung beschreiben. Mittels der Benutzerroutine Uinter können nun die resultierenden (Zug-) Kräfte in Abhängigkeit der relativen Verschiebungen berechnet werden.

Die Versagensfunktion f beinhaltet bereits die Interaktion der einzelnen Delaminationsmodi:

$$f = \left(\left(\frac{u_1}{u_{1,\max}} \right)^\alpha + \left(\frac{u_2}{u_{2,\max}} \right)^\alpha + \left(\frac{u_3}{u_{3,\max}} \right)^\alpha \right)^{1/\alpha} \quad (7)$$

$u_{i,\max}$ sind hier die maximalen Relativverschiebungen der jeweiligen Koordinatenrichtungen. Versagen tritt wiederum bei $f > 1$ auf. Die Steifigkeit der Interphase ist gleich der Matrixsteifigkeit, die Festigkeit wird experimentell bestimmt. Daraus ergibt sich

$$u_{1,\max} = \frac{\sigma_{t,\max} \cdot t}{E} \text{ und } u_{fs} = \frac{\tau_{\max} \cdot t}{G} \quad (8)$$

mit t als Dicke der harzreichen Zone und u_{fs} als resultierende Maximalverschiebung für den Delamination-Mode II. E , G und die Maximalspannungen entsprechen jeweils den Werten des Matrixmaterials.

Die Degradation der interlaminaren Steifigkeiten im Schädigungsfall erfolgt über die Schädigungsparameter

$$d_i = \frac{1}{f} e^{(-C_{ii} u_{i,\max}^2 (f-1) / G_c)} \quad (9)$$

mit $i = 1,2,3$ und G_c als Bruchenergie pro Flächeneinheit für den jeweils relevanten Modus. Man beachte, dass für $f < 1$ die Schädigungsparameter gleich Null sind.

In matrizieller Schreibweise ergibt sich somit die Beziehung zwischen Relativverschiebungen und Zugkräften zu

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-d_1)C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & (1-d_2)C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_3)C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Es sei darauf hingewiesen, dass die Versagensfunktion f und die Schädigungsparameter d_i aufgrund des integralen Zusammenhangs

$$\int_{u_1=u_{1,\max}}^{\infty} t_1 du_1 = G_{c,I} \quad (11)$$

nicht unabhängig voneinander gewählt werden können, entsprechendes gilt für $G_{c,II}$.

Experimentelle Bestimmung der Materialparameter

Zur Bestimmung der Materialparameter werden für alle Komponenten des FML experimentelle Daten benötigt. Für das Plastizitätsmodell sowie die Steifigkeits- und Festigkeitswerte des unidirektionalen Prepregs kann dabei auf Datenblätter bzw. Literaturwerte zurückgegriffen werden [3], wohingegen für das Delaminationsmodell spezielle Rissfortschrittsprüfungen durchgeführt werden müssen. Die Testmatrix umfasst dabei unterschiedliche Versagensmodi, Risspositionen und Temperaturbereiche, ausgewertet werden jeweils die Kraft-Verformungskurven und daraus resultierend die kritischen Bruchenergien [9].



Abb. 2: FML Rissfortschrittsprüfungen zur Bestimmung der Materialparameter des Delaminationsmodells (von links nach rechts): Mode I (DCB), Mode II (ENF), Mixed Mode I/II (MMB)

Validierung

Der beschriebene meso-mechanische Modellierungsansatz sowie die Abaqus-Implementierungen mittels Umat und Uinter wurden auf verschiedenen Stufen schrittweise validiert und im Weiteren auf die Modellierung von Verbindungselementen ausgeweitet [10]. Zu diesem Zweck wurden einschrittige Nietverbindungen analysiert und getestet. In Abb. 3 sind exemplarisch die Kraft-Verformungskurven von gebolzten Proben im Vergleich mit den nichtlinearen FE-Ergebnissen dargestellt. Bei allen Konfigurationen zeigte sich eine gute Übereinstimmung von numerischen Resultaten und experimentellen Daten. Wie in Abb. 4 zu erkennen ist, umfasst dies auch den entsprechenden Versagensmodus, in diesem Fall ein Lochleibungsversagen (Nietdurchzug). Es sei angemerkt, dass im abgebildeten Validierungsbeispiel alle oben beschriebenen Schädigungstypen der FML Komponenten auftreten, d.h. Plastifizierung der Aluminiumbleche, Faser/Matrix Versagen und Delaminationen im Bereich der Nietlöcher.

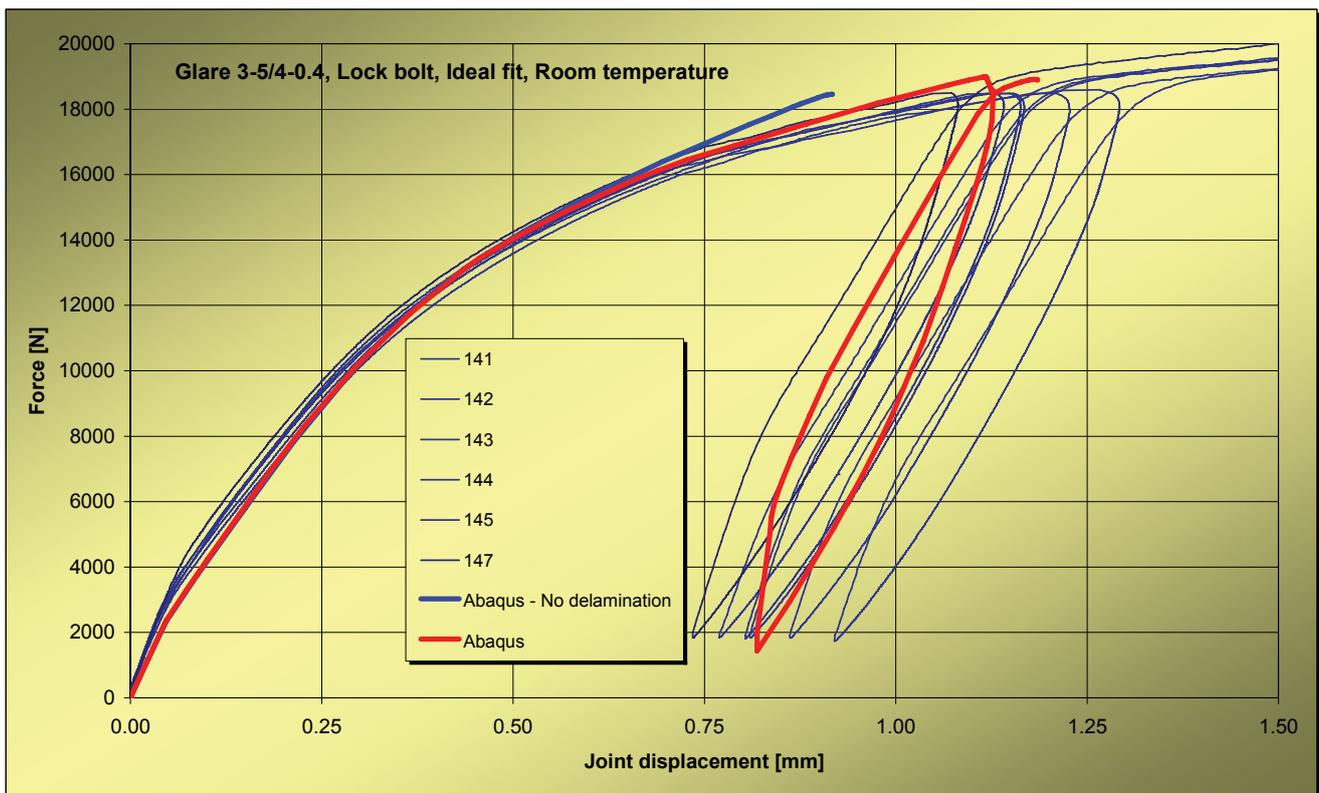


Abb. 3: Vergleich der experimentellen und numerisch analysierten Kraft-Verformungskurven von gebolzten FML Proben

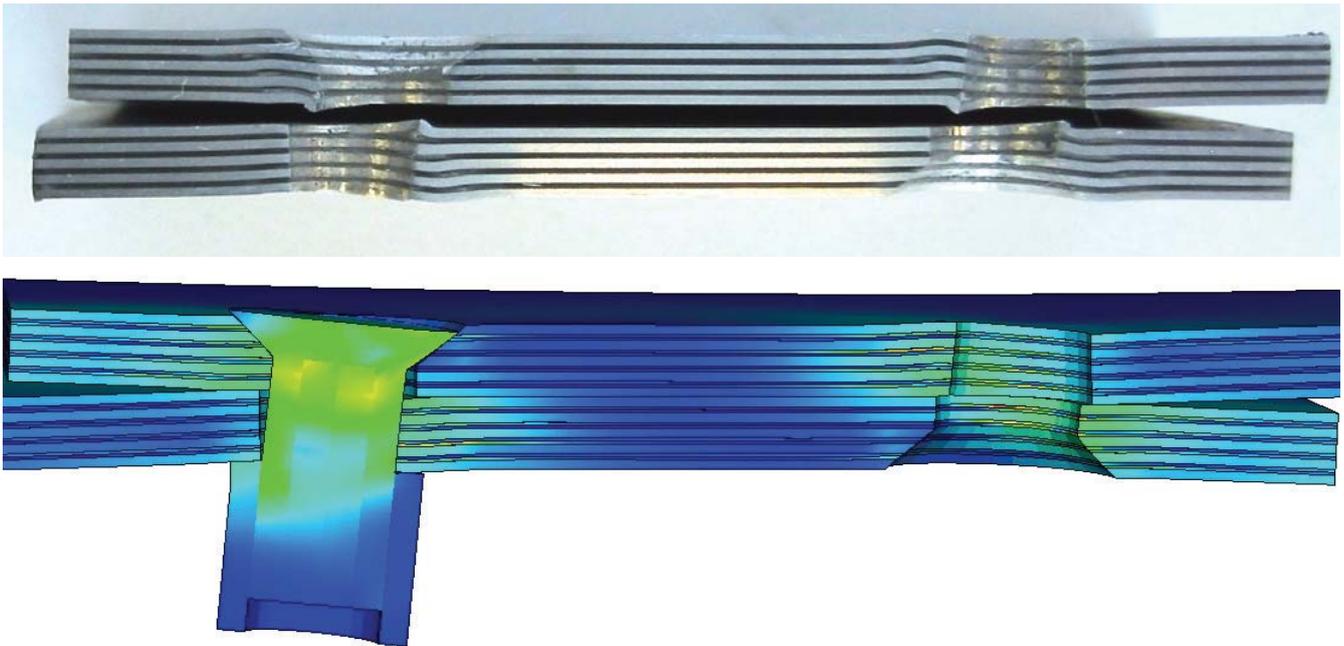


Abb. 4:
Vergleich des experimentellen und numerisch analysierten Versagensmodus einer gebolzten FML Probe

Zusammenfassung

Basierend auf den vorab präsentierten Ergebnissen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Das entwickelte meso-mechanische Materialmodell erfasst alle relevanten Schädigungsmechanismen von Faser Metall Laminaten.
- Die Modellierung interlaminarer Schädigung mittels des vorgestellten Delaminationsmodells ist dafür eine wesentliche Grundvoraussetzung.
- Das Delaminationsmodell konnte anhand von experimentellen Daten aus Rissfortschrittsprüfungen erfolgreich validiert werden.
- Das Verhalten von FML Verbindungselementen kann ebenfalls auf meso-mechanischer Ebene analysiert werden.

Da das letztliche Ziel der Untersuchungen die Entwicklung eines generischen FE-basierten Modells für hybride Laminataufbauten ist, werden zusätzlich zu Glare[®] auch neue FML Materialkombinationen sowie reine Metall Laminaten (ML) numerisch und experimentell analysiert.

Basierend auf dem somit validierten meso-mechanischen Ansatz wird in einem zweiten Schritt über Homogenisierungsverfahren ein makromechanisches Materialmodell für eine Schalenelement-Implementierung entwickelt. Dies ist von entscheidender Bedeutung, um eine nachhaltige industrielle Nutzung der Ergebnisse zu gewährleisten.

Danksagung

Diese Arbeit ist Bestandteil des EU Projektes Dialfast [1] aus dem 6. Rahmenprogramm. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung seitens der europäischen Kommission sowie für die gute technische Zusammenarbeit bei allen Dialfast Partnern.

Literatur

- [1] Dialfast – Development of Innovative and Advanced Laminates for Future Aircraft Structures, CEC 6th Framework Programme, Specific Targeted Research Project No. 502846, 2004
- [2] A. Vlot; J.W. Gunnink: Fibre Metal Laminates - An introduction, Kluwer Academic Publishers, 2001
- [3] P. Linde; J. Pleitner; H. de Boer; C. Carmone: Modelling and Simulation of Fibre Metal Laminates, Proceedings of Abaqus Users' Conference, 2004
- [4] Puck et al: Guidelines for the Determination of the Parameters in Puck's Action Plane Strength Criterion, Composites Science and Technology, Vol. 62, pp. 371-378, 2002
- [5] O. Allix; P. Ladevèze: Modelling and Computation of Delamination for Composite Laminates, Arch. Mech, Vol. 44, pp. 5-13, 1992
- [6] F. Hashagen: Numerical Analysis of Failure Mechanisms in Fibre Metal Laminates, Dissertation, Delft University of Technology, Delft, 1998
- [7] J.H.A. Schipperen: Computational Modelling of Failure in Fibre Reinforced Plastic, Dissertation, Delft University of Technology, Delft, 2001
- [8] A. Alessandrini: Delamination Behaviour of Z-pinned Laminates under Shear Loading, M.Sc. Thesis, Cranfield University, 2003
- [9] J. Sinke; H. de Boer; P. Middendorf: Testing and Modeling of Failure Behaviour in Fiber Metal Laminates, Proceedings of 25th ICAS Conference, 2006
- [10] P. Middendorf; P. Linde; H. de Boer; J. Sinke: Micro-mechanical modelling approach for Fibre Metal Laminates (FML), Proceedings of NAFEMS World Congress, Malta, 2005

Hauptautor

Dr. Peter Middendorf
 Senior Expert Structural Mechanics & Analysis
 EADS Innovation Works
 Structures Engineering, Production & Mechatronics
 81663 München
 Tel. +49-89-607-26595
 peter.middendorf@eads.net

Robuste Netzgenerierung zur μ FE-Analyse mikrostrukturierter Materialien

Dr. rer.-nat. Volker Schulz, Priv.-Doz. Dr. rer.-nat. Heiko Andrä, Dipl.-Math. Kilian Schmidt
Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Kaiserslautern

In dem folgenden Beitrag wird ein automatisches Verfahren zur FE-Netzgerzeugung für hochkomplexe Mikrostrukturen vorgestellt. Für makroskopische Bauteile und Konstruktionen existiert heute eine Reihe von Softwareprodukten zur effizienten Netzgenerierung. Die dabei verwendeten Verfahren setzen in der Regel eine 3D-CAD-Geometriebeschreibung voraus. Im Gegensatz hierzu basiert die Geometriebeschreibung im Bereich der Werkstoffentwicklung und Biomechanik von mikrostrukturierten Materialien auf 3D-CT-Bildern. Die hier vorgeschlagene Netzgenerierung ist auf den speziellen Fall der μ FE-Analyse zur numerischen Homogenisierung zugeschnitten. Vorteile der Methode liegen in der Robustheit, Geschwindigkeit und der automatischen Adaptivität an die vorliegende Geometrie.

Hintergrund

Auf Grund ihrer funktionalen Eigenschaften sind heterogene Materialien und besonders Verbundwerkstoffe weit verbreitet. Gemeinsam ist dabei den verschiedenen Klassen, wie Faserverbundwerkstoffe, Schichtverbundwerkstoffe (Laminare) oder Durchdringungsverbundwerkstoffe, dass sich die Werkstoffeigenschaften des Verbundes deutlich von denen der einzelnen Phasen bzw. Komponenten unterscheiden. Die so genannten effektiven Materialeigenschaften werden maßgeblich durch den mikroskopischen Aufbau bestimmt. Folglich muss eine a-priori Bestimmung der Materialeigenschaften die Mikrostruktur in Betracht ziehen.

Erfassung der Mikrostruktur

Zur Erfassung der 3D-Mikrostruktur von komplexen heterogenen Materialien wird heute in der Regel die Computertomographie verwendet. Eine Materialprobe wird dabei mit Röntgenstrahlen in unterschiedlichen Positionen durchstrahlt und aus der Schwächung der Röntgenstrahlen die innere Struktur der Probe rekonstruiert. Die maximale Auflösung liegt heutzutage bei ca. 5 μm , bei einem Probenvolumen von ca. 125 mm^3 .

Mikrostrukturmodellierung

In unserem Ansatz werden die 3D-Aufnahmen der Mikrostruktur nicht direkt zur μ FE-Analyse verwendet. Vielmehr wird auf der Basis der Aufnahmen ein geeignetes Geometriemodell entwickelt, mit dem sich die Mikrostruktur rekonstruieren lässt. Dieses so genannte virtuelle Materialdesign hat den Vorteil, dass gezielte Parametervariationen, beispielsweise der Porosität, möglich sind. Außerdem reicht in vielen Fällen eine Aufnahme des Werkstoffs mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) aus, um die wesentlichen Geometrieparameter zu erfassen.

Als Anwendungsbeispiele wurden ein zweiphasiger Verbundwerkstoff mit Durchdringungsgefüge, bestehend aus Metall und Keramik, sowie ein Faserverstärkter Kunststoff gewählt. Im ersten Fall wird ein die Keramikpartikel als eine Überlagerung von Ellipsoiden und Zylindern realisiert. Ausrichtung, Anzahl und Anordnung ergeben sich aus REM-Aufnahmen. Die zusätzliche Verwendung von morphologischen Filtern, wie Erosion oder Dilation, führt zu realitätsgetreuen Nachbildungen der Struktur.

Für den faserverstärkten Kunststoff wurden Fasern mit einheitlichem Durchmesser in der Matrix verteilt. Dabei wurde von einer anisotropen Anordnung in der x-y-Ebene ausge-

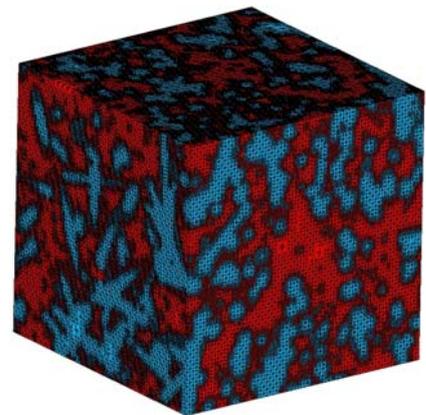


Abb. 1:
Rekonstruierte Mikrostruktur eines zweiphasigen Verbundwerkstoffs mit Durchdringungsgefüge.

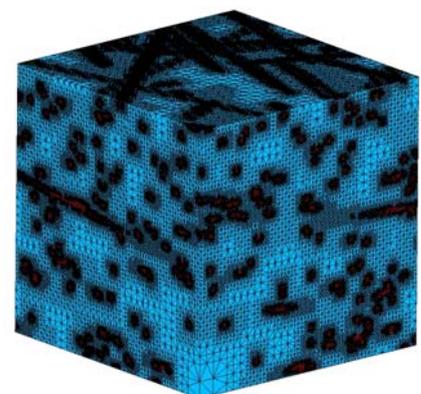


Abb.2:
Virtuell erzeugte Mikrostruktur eines faserverstärkten Kunststoffs.

gangen. Der Anteil wurde als 10 % des Gesamtvolumens gewählt.

Netzerzeugung

Beide Verfahren, die Computertomographie und das virtuelle Materialdesign, liefern 3D-Mikrostrukturen als so genannte Voxelbilder. Dabei handelt es sich um eine Darstellung auf einem kartesischen Gitter, bei dem diskreten xyz-Koordinaten die Nummer der Materialphase zugewiesen wird. Im einfachsten Fall eines zweiphasigen Materials entsteht ein binäres Bild mit Voxeln, d.h. „Volumenpixeln“, die die Werte 0 oder 1 besitzen.

Das reguläre, kartesische Voxelgitter kann direkt zur μ FE-Analyse verwendet werden. Ein direktes Vorgehen ist hierbei die Interpretation eines Voxels als Hexaeder-Element. Dabei entsteht ein regelmäßiges FE-Netz, das mindestens (im Falle von Hex8-Elementen) aus $(N_x+1) * (N_y+1) * (N_z+1)$ Knoten besteht. N_x , N_y und N_z ist dabei die Anzahl der Voxel in die jeweilige Raumdimension. Für die μ FE-Analyse darf der Bildausschnitt nicht zu klein gewählt werden, um ein repräsentatives Volumenelement (RVE) zu erhalten. Wenn es sich bei dem Bildausschnitt um ein RVE handelt, dann sind die aus der μ FE-Analyse bestimmten Materialparameter unabhängig von den in der μ FE-Analyse gewählten

Randbedingungen unabhängig. Unter der Voraussetzung, dass der Materialverbund als makroskopisch homogen angesehen werden kann, bestimmt man mit diesem Homogenisierungsverfahren die effektiven makroskopischen Materialparameter.

Bei einer Bildgröße von 150^3 Voxeln, die für das obige Gefügebeispiel verwendet wurde, erhält man ein FE-Netz mit $151^3 = 3,442,951$ Knoten.

Zur Verringerung der Knotenanzahl wurde daher ein Verfahren entwickelt, mit dem die Voxel in ein hierarchisches Tetraedernetz zerlegt werden. Dazu werden zunächst jeweils acht benachbarte Voxel zu einer Einheit zusammengefasst, wenn alle acht Voxel zum gleichen Material gehören. Dieses Verfahren wird rekursiv angewandt, mit der Bedingung, dass die so entstehenden Blöcke sich um maximal eine Hierarchieebene unterscheiden dürfen. Damit wird ein kontinuierlicher Übergang zwischen groben und feinen Bereichen des Netzes hergestellt.

Die eigentliche Netzgenerierung erfolgt dann folgendermaßen: Voxel innerhalb einer Hierarchieebene werden in fünf Tetraeder zerlegt. An den Übergängen werden spezielle Übergangselemente eingesetzt. Der Vorteil der Methode liegt darin, dass alle Übergangselemente aus der

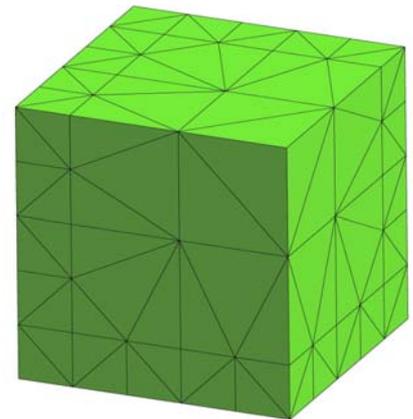


Abb. 3: Detail der robusten hierarchischen Vernetzung von Voxeln mit Tetraedern.

Nachbarschaft der Voxel vorab berechnet werden können. Ohne Berücksichtigung der Symmetrie sind hierzu 12.420 Konfigurationen zu bestimmen. Diese Konfigurationen werden in einer Lookup-Tabelle abgelegt, wodurch das Verfahren sehr effizient wird. Neben der Geschwindigkeit hat diese Methode den Vorteil, dass sie absolut robust ist und die Qualität des Netzes a priori bekannt ist. Beispielsweise ist der minimale Winkel einer Tetraederseite, der überhaupt auftreten kann 17° . Die sehr gute Netzqualität lässt sich aus den Abbildungen der minimalen und maximalen Tetraederwinkel ablesen.

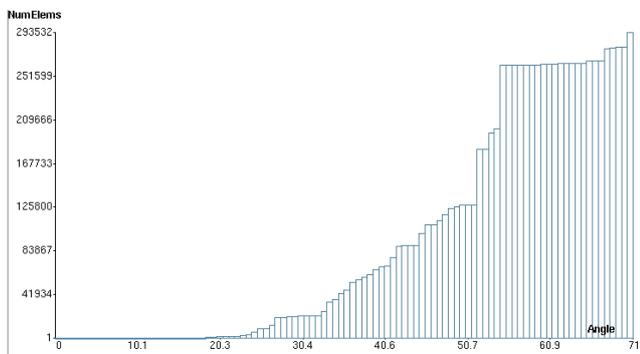


Abb. 4: Das Histogramm der minimalen Tetraederwinkel (kumulativ), die alle Größer 17° sind, zeigt die sehr gute Qualität der FE-Netze.

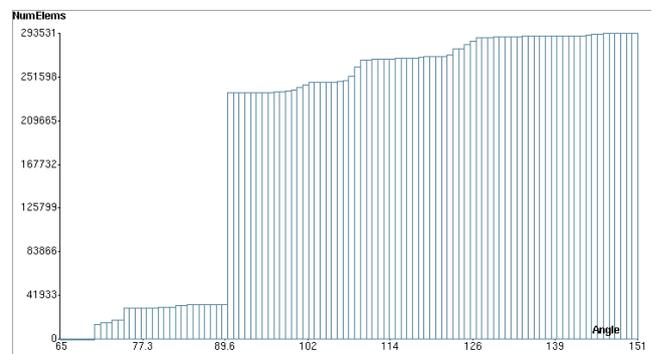


Abb. 5: Die maximalen Tetraederwinkel (kumulativ) liegen im Bereich von 70° und 151° . Die Netzqualität gilt für alle mit dem beschriebenen Verfahren erzeugten FE-Netze.

Bei der Erzeugung des hierarchischen Tetraedernetzes wird keine Interpolation der Geometrie vorgenommen. Vielmehr erfolgt nur an den Stellen eine Netzvergrößerung an denen homogenes Material vorliegt. Dadurch wird die komplizierte 3D-Struktur, insbesondere des Interfaces zwischen den Phasen, komplett erhalten.

Die Verringerung der Knotenanzahl durch die Netzvergrößerung ist daher Abhängig von der speziellen 3D-Geometrie. Im Beispiel des Metall-Keramik-Gefüges reduziert der Vergrößerungsalgorithmus die Knotenanzahl von 3.442.951 auf 2.301.343 bzw. einen Faktor von 1,5. Entscheidend für die μ FE-Analyse ist die Tatsache, dass das hierarchische Netz nur in den Gebieten vergrößert wird, in denen nur geringe Variation der Spannung erwartet werden. An den Phasengrenzen wird mit der maximalen Auflösung gearbeitet, um den Spannungsverlauf möglichst genau zu approximieren.

Im Fall des faserverstärkten Kunststoffs reduziert sich die Knotenanzahl durch die adaptive Netzvergrößerung signifikant. Die gewählte Bildgröße von 256^3 Voxeln führt auf eine Knotenanzahl von $257^3 = 16.974.593$ Knoten, die um einen Faktor 3,95 reduziert wurde. Das abgebildete Netz besteht damit nur noch aus 4.296.190 Knoten.

Die Rechenzeiten zur Erstellung des FE-Netzes liegen in den gezeigten Beispielen auf einem modernen Desktop-PC bei etwa 30 Sekunden und sind damit vernachlässigbar gegenüber einer numerischen μ FE-Analyse.

Zusammenfassung

Das beschriebene Verfahren dient der effizienten Erstellung von μ FE-Modellen, wenn die Geometriebeschreibung als Voxeldatensatz vorliegt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Werkstoffcharakterisierung durch Computertomographie erfolgt. Im Vergleich zu direkten Voxel-FE reduziert das beschriebene Verfahren die Anzahl der Freiheitsgrade (DOF). Außerdem können die mit unserem Ansatz erzeugten Netze an den Phasengrenzen je nach Anwendung geglättet werden. Bei voxelbasierten Verfahren treten dagegen Artefakte in der Lösung durch treppenförmige Interfaceflächen auf.

Literatur

- [1] W. J. Schroeder, B. Geveci, M. Malaterre: "Compatible Triangulations of Spatial Decompositions", Proceedings of the IEEE Visualization 2004, October 10-15, Austin, Texas, USA, 211-217
- [2] GeoDict, Users Guide, 2005, available from www.geodict.com
- [3] K. Schladitz, S. Peters, D. Reinel-Bitzer, A. Wiegmann, J. Ohser, „Design of acoustic trim based on geometric modeling and flow simulation for non-woven“, *Comp. Material Sciences*, 38, 2006, 56-66
- [4] V. G. Kouznetsova: "Computational homogenization for the multi-scale analysis of multi-phase materials", PhD thesis, Techn. Univ. Eindhoven, 2002.
- [5] H.J. Böhm: "A Short Introduction to Continuum Micromechanics" in "Mechanics of Microstructured Materials" (Ed. H.J. Boehm), CISM Courses and Lectures, No. 464, pp.1-40, Springer-Verlag, Wien, 2004
- [6] J. Aboudi: „Mechanics of Composite Materials – A Unified Micromechanical Approach“, Elsevier, 1991
- [7] Zohdi, T.I., Wriggers, P.: „Introduction to Computational Micromechanics“, Springer, Berlin, 2005.

Autoren

Fraunhofer-ITWM

Dr. rer.-nat. Volker Schulz
schulz@itwm.fraunhofer.de

Priv.-Doz. Dr. rer.-nat. Heiko Andrá
andrae@itwm.fraunhofer.de

Dipl.-Math. Kilian Schmidt
schmidt@itwm.fraunhofer.de

Über ein Materialmodell zur Abbildung von Inelastizität in Elastomeren

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Herbert Baaser, Freudenberg Forschungsdienste KG

Wir zeigen hier die FE-Implementierung und industrielle Anwendung eines Werkstoffmodells zur Beschreibung inelastischer Effekte in Elastomeren. Im aktuellen Entwicklungsstadium werden bei statischen Analysen als Ursache von Inelastizität die sog. Spannungserweichung (Mullins-Effekt), siehe Miehe [1995], Mullins [1949], Ogden & Roxburgh [1999], Simo [1987], und das Auftreten bleibender Deformationen identifiziert. Damit wird ein viskoses (zeitabhängiges) Verhalten solcher Materialien zunächst ausgeschlossen. Wir beschränken uns weiterhin bei dieser Betrachtung auf eine isotrope Beschreibung, wenngleich in der Literatur auch Ansätze mit Richtungsabhängigkeiten bekannt sind, siehe z. B. Diani et al. [2006] oder Ihlemann [2003] und Verweise dort.

Wie auch in Diani et al. [2006] beschrieben, werden hier diese beiden Phänomene (Auftreten des Mullins-Effekts bei Erstbelastung und eine bleibende Verformung) auch im Konstitutivgesetz voneinander getrennt behandelt. Dies ermöglicht einerseits einen modularen Aufbau einer Materialbeschreibung mit Hilfe von Benutzerschnittstellen in kommerziellen FE-Programmen, andererseits ist damit eine Parameter-Anpassung wesentlich einfacher, weil die jeweiligen Effekte eindeutig zugeordnet und identifiziert werden können.

Unter Annahme einer multiplikativen Zerlegung des Deformationsgradienten in der Form $F = F_e \cdot F_i$ in einen elastischen und einen inelastischen Anteil hat sich die Modellierung bei metallischen Werkstoffen im Rahmen finiter Deformationen seit geraumer Zeit etabliert, siehe u. a. Tsakmakis & Willuweit [2003]. Dieses Konzept wird hier in adäquater Weise auf die betrachtete Werkstoffklasse übertragen und entsprechend mit einer hyperelastischen Formulierung für den energiespeichernden Anteil von Elastomeren erweitert. Dieser hyperelastische Anteil der Materialantwort wird durch Vorgabe einer beliebigen Funktion der Formänderungsenergie(-dichte) definiert. Der Modellierung der inelastischen Anteile liegt eine Formulierung nichtlinearer, isotroper Verfestigung zugrunde. Über die erste Invariante der elastischen Deformation ist in diesem Modell zusätzlich die oben erwähnte Abbildung einer Spannungserweichung im hyperelastischen Anteil gesteuert. Die Inkompressibilität im Materialverhalten wird in diesem Modell als zusätzliche Zwangsbedingung formuliert und in der Formänderungsenergie-Funktion berücksichtigt.

Eine Parameter-Anpassung für dieses Modell wird für alle Werkstoffe durch einen Excel-Vorlage erreicht, in der mit Hilfe der dortigen „Solver“-Funktion eine Fehlerquadrat-Minimierung realisiert ist.

Die vorgestellte Modellierung ist im Finite-Elemente-System Abaqus über die Umat-Schnittstelle realisiert. Die konsistente Ableitung der Materialtangente gewährleistet die optimale Konvergenz der Gleichgewichtsiteration der nichtlinearen Problemstellung und kann somit für alle Elementtypen in der Simulation eingesetzt werden, was speziell für die industrielle Anwendung einen erheblichen Effizienzgewinn bedeutet. An einem Beispiel aus der Hydraulik-Dichtungstechnik wird die Leistungsfähigkeit der Modellierung und ihrer Implementierung aufgezeigt.

Mechanisches Modell

Die mechanische Modellierung lehnt sich weitestgehend an in der Literatur bekannte Formulierungen für ratenuabhängige Inelastizität bei großen Deformationen an, näheres kann Weber & Anand [1990] entnommen werden. In einigen Details sind allerdings Erweiterungen vorgenommen worden, um der Abbildung von Elastomeren und Thermoplasten gerecht zu werden. Wir erwähnen in diesem Zusammenhang nochmals den o.g. modularen Aufbau und damit die Flexibilität im Einbau beliebiger hyperelastischer Formulierungen. Hier wird ein erweitertes Modell mit einer Formulierung vom Yeoh-Typ gezeigt, das an Messdaten aus einaxialen Zugversuchen ange-

passt wird. Durch die Veränderung der Koeffizienten $\hat{C}_1, \hat{C}_2, \hat{C}_3$ als Funktion von $\phi_{I_{\max}} = (I_{1_{\max}} - 3)/2$, wobei $I_{1_{\max}}$ den bisher erreichten Maximalwert von I_1 über die gesamte Lastgeschichte kennzeichnet, wird eine gute Anpassung des Modells an Versuchsdaten (siehe Bild 1) von diesem Typ ermöglicht. Ein typischer Verlauf dieser Koeffizienten aus experimentellen Befunden ist in Bild 2 dargestellt und muss entsprechend durch eine Parameter-Anpassung interpoliert werden. Hervorzuheben ist dabei besonders, dass es damit gelingt, eine Spannungserweichung (Mullins-Effekt) in Abhängigkeit der Maximalbelastung abzubilden.

Weiterhin beinhaltet dieses Modell eine inkrementelle Beschreibung der isotropen, nichtlinearen Verfestigung in Anlehnung an Formulierungen aus der Metall-Plastizität. Integriert man diese Formulierung einaxial, ergibt sich

für die aktuelle Fließspannung $K = K_0 + \gamma / \beta (1 - \exp[-2 / 3 \beta s])$ als Funktion der plastischen Bogenlänge s . Für typische Kennwerte K_0, β und γ ist dies auch in Bild 3 dargestellt.

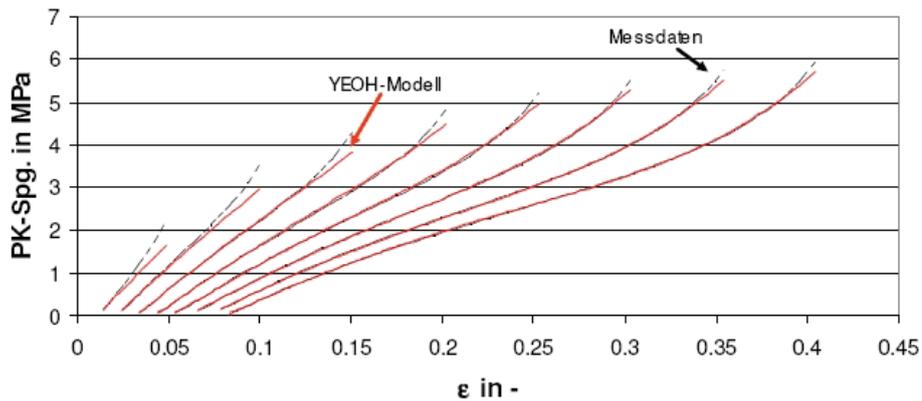


Abb. 1
Piola-Kirchhoff-Spannungs-Dehnungs-Kennlinien einer stufenweise einaxial belasteten Probe aus Polyurethan und Anpassung an Yeoh-Modell

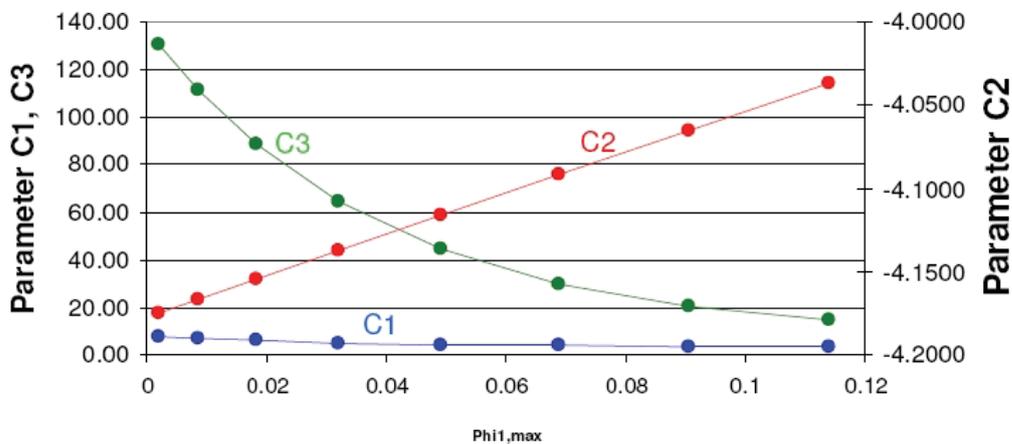


Abb. 2
Verlauf der Yeoh-Koeffizienten über der Belastung

Umsetzung und Implementierung

Eine Implementierung der hier beschriebenen Formulierung ist im Finite-Elemente-System Abaqus über die Umat-Schnittstelle in Fortran77 umgesetzt. Entsprechend der dort vorgesehenen Konvention wird in dieser Routine nach Vorgabe des aktuellen Deformationsgradienten F und der Geschichtsdaten der Cauchy-Spannungstensor σ und dessen Ableitung D bzgl. des logarithmischen Deformationsmaßes $\varepsilon = \ln(v)$ vom Links-Streck-Tensor v in der aktuellen Konfiguration berechnet und zurückgegeben. Durch die Nichtlinearitäten im Konstitutivgesetz ist auf der Ebene der Umat-Schnittstelle (Integrationspunkt einer Elementformulierung) die lokale Lösung eines Gleichungssystems als Integration im Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ nötig, siehe Weber & Anand [1990]. Wir führen diese Integration mit einem impliziten Euler-Verfahren und einem „exponential map“ im Hauptachsenraum der aktuellen Deformation durch, womit die plastische Inkompressibilität im Materialverhalten garantiert werden kann, siehe auch Baaser [2004].

Material-Charakterisierung und Parameter-Kalibrierung

Die Anpassung der das Modell beschreibenden Parameter erfolgt anhand von zyklisch durchgeführten, einaxialen Zugversuchen mit einer Excel-Auswertung. Anhand der statischen Kennlinie der Belastungskurven für verschiedene Maximallasten (Bild 1) werden zunächst die Parameter des hyperelastischen Modells durch Fehlerquadrat-Minimierung bestimmt. Die damit gleichzeitig resultierende „Einhüllende“ dieser Kurvenschar bestimmt die weiteren drei Kennwerte K_0 , β und γ des inelastischen Verfestigungsgesetzes, siehe Bild 3.

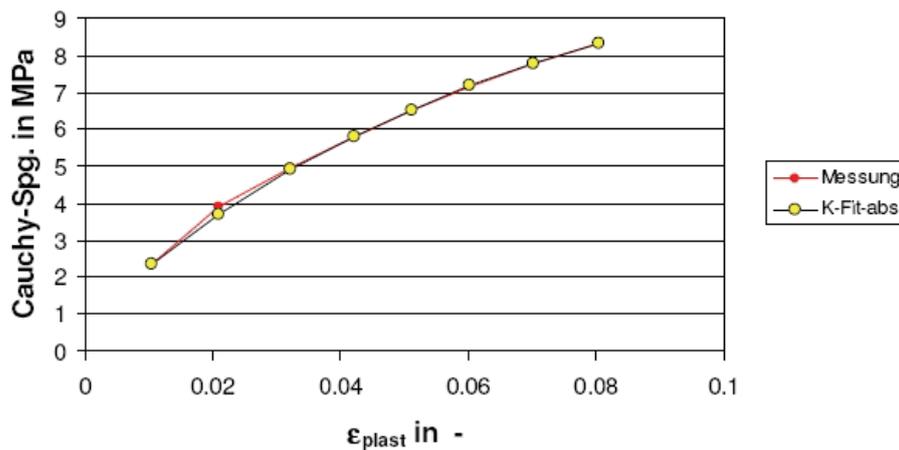


Abb. 3
Verfestigungsfunktion im Plastizitätsmodell

Anwendungsbeispiel

Wir betrachten als Anwendungsbeispiel einen Nutring als Hydraulikdichtung aus Polyurethan. Eine schematische Anordnung dieser Dichtung ist in Bild 4 dargestellt. Im Betriebszustand wird der Ring mit bis zu 20 MPa (200 bar) Druck beaufschlagt, wodurch es zu einer Spaltextrusion kommt. Die daraus resultierenden Verformungen sind von besonderem Interesse für die Konstruktion und werden durch diese Simulation näher beleuchtet.

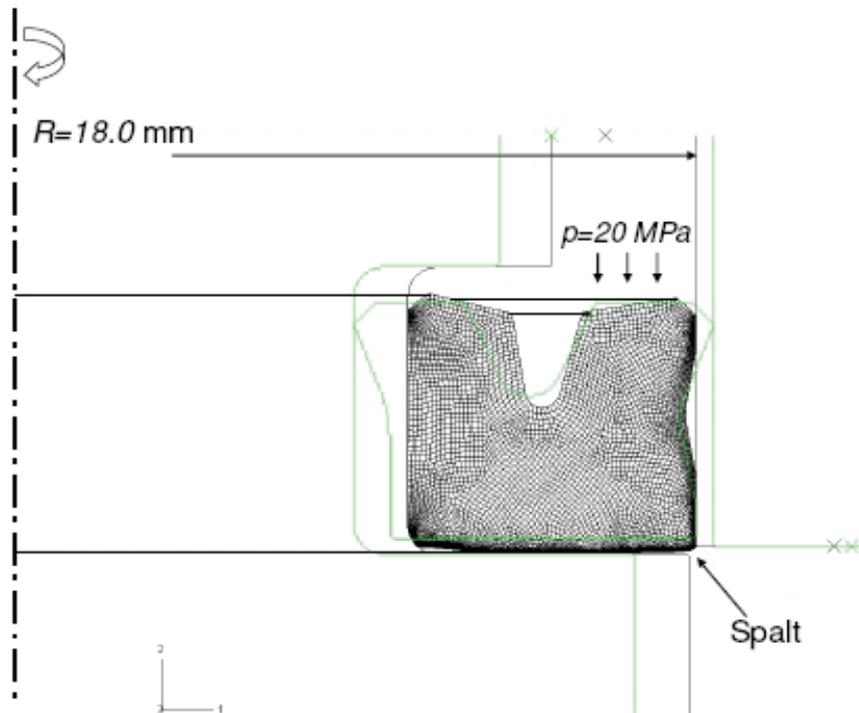


Abb. 4
Prinzip-Skizze einer Hydraulik-Dichtung (Nutring) aus PU mit FE-Netz
Ausgangszustand: hell; Montage/Einbau: dunkel

Ergebnisse

Durch eine Finite-Elemente-Analyse sind in der Simulation mit dieser Materialmodellierung die üblichen Ergebnisse und Auswertungen eines FE-Programms zugänglich. Beispielhaft stellen wir in Bild 5 die maximale Hauptdehnung im PU-Teil bei einer Druckbelastung von $p=20$ MPa dar. Ebenfalls ist in diesem Bild deutlich die Verpressung des Dichtrings und seine Extrusion in den Dichtspalt zu erkennen. Damit wird auch sichtbar, bis zu welchen lokalen Verformungen man heute mit modernen FEM-Werkzeugen bereits rechnen kann, bevor die Element- oder Material-Formulierung versagt. Gewiss muss man hier im einzelnen auch bereit sein, die Sinnhaftigkeit mancher (lokalen) Lösung zu hinterfragen.

In Bild 6 haben wir die Ausgangskontur und die Kontur des Rings nach Entlastung (Ausbau) dargestellt. Beide Konturen unterscheiden sich deutlich, was die Möglichkeiten dieser Modellierung hinsichtlich der Abbildung von bleibenden Deformationen nochmals eindrucksvoll aufzeigt.

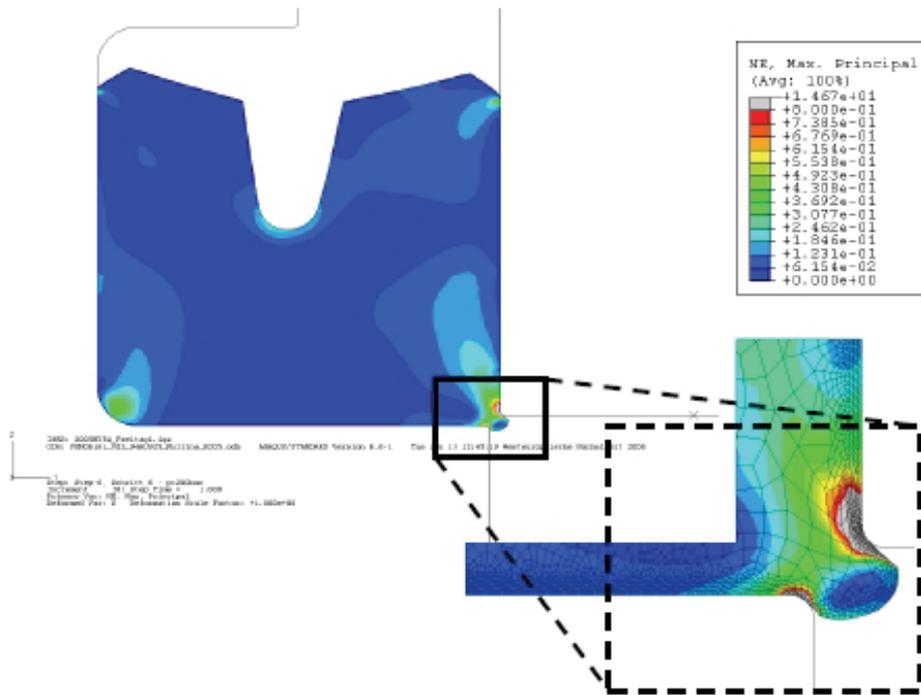


Abb. 5
Maximale Hauptdehnung bei $p = 20 \text{ MPa}$

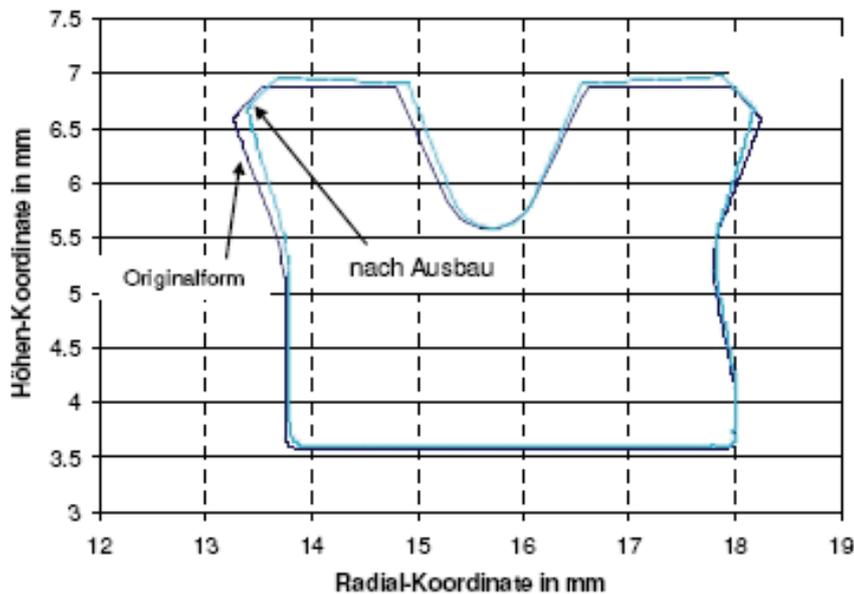


Abb. 6
Vergleich Geometrie vor / nach Einbau

Fazit

Es ist gelungen, ein Materialmodell für Dichtungswerkstoffe in das kommerzielle FE-Programmpaket Abaqus zu implementieren, das im statischen Bereich neben den typischen Nichtlinearitäten im elastischen Anteil auch noch Effekte der Spannungserweichung und auch bleibende Deformationen abbilden kann. Eine konsistente Linearisierung der Implementierung des Materialgesetzes führt zu einer optimalen Konvergenz der hochgradig nichtlinearen Lösungsprozedur. Eine Parameter-Anpassung ermöglicht damit realitätsnahe Simulationen von Dichtungsanordnungen und führt damit in der konstruktionsbegleitenden Berechnung zu einer sehr effizienten Bauteilentwicklung.

Danksagung

Die hier dargestellte Modellierung und deren Ergebnisse sind im Wesentlichen in den letzten drei Jahren innerhalb eines Grundlagen-Projekts in enger Zusammenarbeit mit den Kollegen Dr.-Ing. Oliver Häusler, Dr.-Ing. Christian Ziegler und Dipl.-Ing. Guido Hohmann entstanden. Gerade diesen Beteiligten danke ich hiermit nochmals ausdrücklich.

Literatur

Baaser, H., 2004

The Padé-Approximation for Matrix Exponentials Applied to an Integration Algorithm Preserving Plastic Incompressibility, *Comp. Mech.*, 34(3), 237-245

Diani, J., Brieu, M. & Vacherand, J.M., 2006

A damage directional constitutive model for Mullins effect with permanent set and induced anisotropy, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 25, 483-496

Ihlemann, J., 2003

Kontinuumsmechanische Nachbildung hochbelasteter technischer Gummiwerkstoffe, VDI-Bericht, Reihe 18, Nr. 288

Miehe, C., 1995

Discontinuous and continuous damage evolution in Ogden-type large-strain elastic materials, *Eur. J. Mech. A/Solids* 14 (5), 697-720

Mullins, L., 1949

Effect of stretching on the properties of rubber, *J. Rubber Res.*, 16 (12), 275-289

Ogden, R.W. & Roxburgh, D.G., 1999

A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber, *Proc. Roy. Soc. London, A* 455, 2861-2877

Simo, J.C., 1987

On a fully three-dimensional finite-strain viscoelastic damage model: Formulation and computational aspects, *Comp. Meth. Appl. Eng.* 60(2), 153-173

Tsakmakis, C. & Willuweit, A., 2003

Use of Elastic Predictor-Plastic Corrector Method for Integrating Finite Deformation Plasticity Laws, In „Deformation and Failure in Metallic Materials“, Eds. K. Hutter and H. Baaser, Springer

Weber, G. & Anand, L., 1990

Finite deformation constitutive equations, and a time integration procedure for isotropic, hyperelastic-viscoplastic solids, *Comp. Meth. Appl. Eng.* 79, 173-202

Autor

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Herbert Baaser
Freudenberg Forschungsdienste KG
- Computer Aided Engineering -
69465 Weinheim
Herbert.Baaser@Freudenberg.de

Der Autor ist in der Abteilung CAE für die Grundlagenentwicklung (Materialmodellierung, Parameter-Identifikation, CAE-Werkzeuge) verantwortlich. Er unterrichtet außerdem nebenberuflich an der TU Darmstadt, der FH Bingen und der BA Mannheim die Fächer Technische Mechanik und Numerische Methoden.

Lösungen für stark gekoppelte Fluid-Struktur Anwendungen

Dr. Ulrich Heck, Dr. Heck Consulting and Engineering

Die Modellierung und Berechnung von gekoppelten Strömungs-Struktur-Anwendungen gehört zu einer der anspruchvollsten und aufwendigsten Aufgaben im Bereich der CFD-Analysen. Insbesondere die gezielte Wahl eines geeigneten Simulationsansatzes, die Modellierung und die Kopplungsmethode entscheiden häufig über die Realisierbarkeit des Berechnungsprojektes und die Qualität der Ergebnisse. Anhand von drei Beispielen werden unterschiedliche Berechnungsansätze (wie Potenzialansatz oder Navier-Stokes Betrachtung des Fluid) und Kopplungsverfahren (wie direkte und partitionierte Kopplung) vergleichend gegenübergestellt und die jeweiligen Grenzen diskutiert.

Dieser Artikel präsentiert die gekürzte deutschsprachige Fassung des Tagungsbeitrags im Rahmen des NAFEMS Seminar: „Developments in CFD: Reliable Use of CAD-based Software Including Dedicated Codes“ März 2007 [1]. Der Autor ist Inhaber eines Ingenieurbüros für Berechnungsdienstleistungen mit den Schwerpunkten Fluid-Struktur-Kopplung, Strömungssimulation (CFD) und nichtlineare Strukturmechanik, weitere Informationen unter <http://www.dhcae.de>.

Hintergrund

Ein vergleichsweise neues Feld für Berechnungsaufgaben ist die Lösung von gekoppelten Problemen, insbesondere gekoppelten Strömungs-Struktur-Anwendungen. Für den Berechnungsingenieur ergeben sich hier interessante und spannende Tätigkeitsfelder, die ein spezielles Know-How in der Modellierung und der Lösung solcher Fragestellungen erfordern. Neben den Voraussetzungen an den Anwender, stellen Fluid-Struktur Probleme meist hohe Anforderungen an die Rechenkapazitäten. Daher ist es meist unabdingbar, technisch relevante Aufgabenstellungen zu vereinfachen, sei es bzgl. der physikalischen Modelle oder der Geometrie (z.B. ebene oder axialsymmetrische Modelle). Der Berechnungsingenieur bewegt sich hier auf dem schmalen Grat, einerseits den physikalischen Sachverhalt so abzubilden, dass alle erforderlichen Aspekte der Problemstellung hinreichend genau abgebildet werden, andererseits die Aufgabenstellung so zu modellieren, dass in angemessener Zeit eine Lösung erzielt werden kann.

Aus dem Bereich der gekoppelten Fluid-Strukturprobleme (FSI) werden in diesem Beitrag unterschiedliche Lösungsmethoden dargestellt und beispielhafte Anwendungen für diese spezifischen Verfahren präsentiert. Zur Berechnung wird das Programmsystem Adina eingesetzt [2].

Lösungsansätze gekoppelte Strömungs-Struktur-Probleme

Die drei betrachteten Ansätze sind in Abb. 1 dargestellt. Innerhalb der FSI-Analysen stellt meist das Fluid den kritischen und rechentechnisch aufwendigen Bereich dar, daher kommt dieser Modellierung und der Kopplung des Fluids mit der Struktur besondere Bedeutung zu. Als vergleichsweise einfacher Ansatz zur Fluidmodellierung kann der Potenzialansatz angesehen werden. Hierbei wird das Fluid als reibungsfrei (rotationsfrei) angenommen. Viskose Reibung oder auch Turbulenzeffekte und damit z.B. auch Wandhaftung, Strömungsablösung und andere Grenzschichtprobleme können mit dieser Modellierung nicht abgebildet werden. Aufgrund der vereinfachten Fluidmodellierung und der direkten Lösung von Struktur und Fluid ist dieser Ansatz allerdings sehr effizient für große, instationäre, stark gekoppelte Systeme, wenn z.B. der Druck oder die bewegte Fluidmasse die treibenden Kräfte darstellen.

Müssen, wie in den meisten Strömungsanwendungen üblich, viskose oder turbulente Effekte berücksichtigt werden, ist eine Navier-Stokes- oder eine daraus abgeleitete Modellierung (z.B. Reynoldsen Gleichungen) erforderlich. Ist die Fluid-Formulierung damit festgelegt, entscheidet häufig die Kopplung zwischen Fluid und Struktur über den Lösungsaufwand: Zur Lösung von gekoppelten Strömungs-Struktur-Anwendungen mit einem

Navier-Stokes Fluid werden meist die partitionierten Verfahren eingesetzt. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass der Strömungs- und der Festkörperbereich getrennt modelliert und gelöst werden, meist mit Hilfe unterschiedlicher Solver oder Programmsysteme. So wird im ersten Schritt der Strömungsraum unter der Annahme starrer Berandung berechnet, dann die Strömungskräfte auf den elastischen Bereich übertragen, im Struktursolver die Spannungen/Dehnungen und Verschiebungen bestimmt und die resultierende Geometrieänderung an den Strömungssolver zurückgegeben. Diese iterative, partitionierte Behandlung hat den entscheidenden Vorteil, dass unterschiedliche und somit sehr effiziente Lösungsmethoden für die jeweiligen Bereiche gewählt werden können. Daher sind diese Verfahren prädestiniert für große Probleme und komplexe Strömungsverhältnisse. Der Nachteil dieser Methode ist, dass starke Wechselwirkungen in Verbindung mit der Beeinflussung physikalischer Zeitskalen zwischen Struktur und Strömung nur mit großem numerischen Aufwand gelöst werden können. Hier sind meist die direkten Kopplungsverfahren, bei denen das gesamte Fluid- und Struktursystem simultan gelöst wird, effizienter. Diese Verfahren sind allerdings dadurch begrenzt, dass zur Lösung der Gleichungen auch ein gemeinsamer Solver, gewählt werden muss. Derzeit stehen für die direkte Fluid-Struktur-Berechnung in kommerziellen Programmen nur direkte Löser zur Verfügung, die zum einen bei komplexen Strömungsverhältnissen wenig effizient sind, weiterhin sind größere Probleme mit üblicherweise mehreren Millionen Zellen im Strömungsraum mit diesen Solvoren praktisch nicht lösbar.

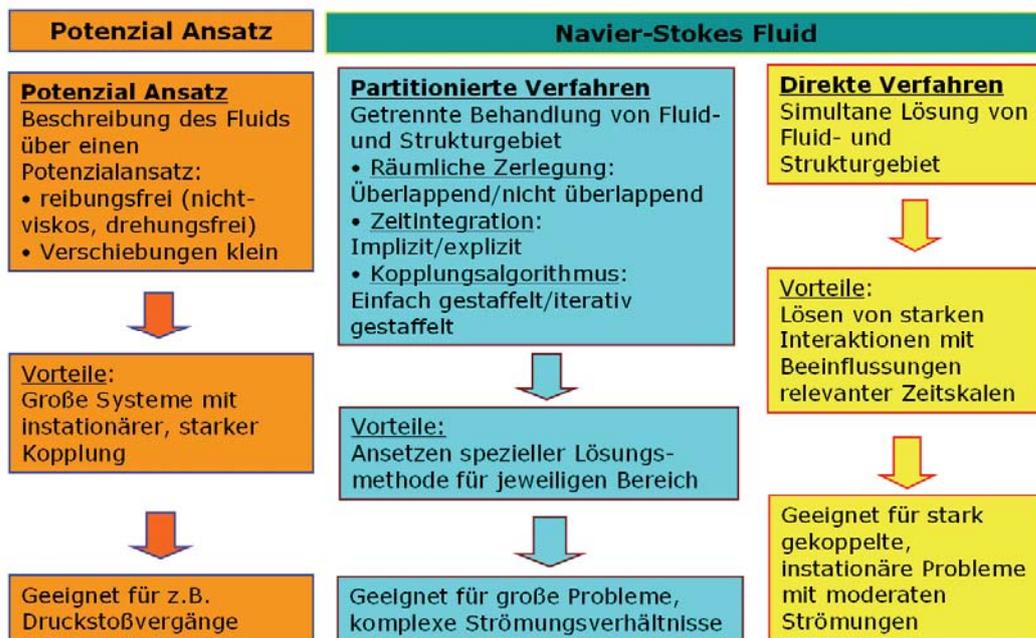


Abb. 1: Lösungsansätze für gekoppelte Strömungs-Strukturprobleme

FSI-Modellierung auf Basis eines Potenzialansatzes:

Beim Potenzialansatz wird das Fluid durch die Kontinuitäts- und eine Energieerhaltungsgleichung beschrieben [2], [3]:

$$\dot{\rho} + \nabla \cdot (\rho \nabla \phi) = 0 \quad \text{und} \quad h = \Omega(x) - \dot{\phi} - \frac{1}{2} v \cdot v$$

hier ϕ das Geschwindigkeitspotenzial ($v \equiv \nabla \phi$), mit v der Fluid Geschwindigkeit, h der spezifischen Enthalpie $h = p / \rho + e$, p der Druck, e die spezifische Energie, $\Omega(x)$ das Potenzial der Massenkräfte. Hierbei geht die Energieerhaltung für inkompressible, isotherme Strömungen in die bekannte Bernoulli-Gleichung über.

In einem ersten Schritt soll ein Benchmarkbeispiel für diese Elementformulierung dargestellt werden. Hierbei wird die aus der Fluid-Struktur-Kopplung resultierende Druckwellengeschwindigkeit berechnet werden. Ein ähnliches Beispiel wurde bereits auf der Nafems CFD-Konferenz 2006 vorgestellt und dort mit einem Navier-

Stokes Ansatz gelöst [4]. Hier wird die resultierende Druckwellengeschwindigkeit mit einem Potenzial-Ansatz berechnet. Durch eine elastische Wand wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle gegenüber der Annahme der starren Wände reduziert, so dass die exakte Wellengeschwindigkeit durch die Gleichung :

$$c_{FSI} = \sqrt{\frac{E_F}{\rho_F \left(1 + \frac{E_F d_i}{E_S s} (1 - \mu^2) \right)}}$$

gegeben ist [5]. Hierbei sind $E_{f/s}$ die Elastizitätsmodule von Fluid bzw. Wand, ρ

die Flüssigkeitsdichte, d der Rohrdurchmesser, s die Wandstärke und μ die Querkontraktionszahl. Bei hoher Wandsteifigkeit ist die Wellengeschwindigkeit im Wesentlichen durch die Flüssigkeit geprägt. Damit geht die

Gleichung in $c_F = \sqrt{\frac{E_F}{\rho_F}}$ falls $E_s s \gg E_F d_i$ über.

Jedoch kann nicht immer die Wandsteifigkeit vernachlässigt werden: In Rohrleitungssystemen muss unter Umständen diese Reduzierung der Wellengeschwindigkeit berücksichtigt werden [5], auch in medizinischen Anwendungen, wie der Blutströmung durch Arterien kommt es zu einer erheblichen Verringerung der Druckwellengeschwindigkeit.

Die Modellparameter in dem zweidimensionalen (axialsymmetrischen) Rohrmodell werden hierbei so gewählt, dass die resultierende Wellengeschwindigkeit sowohl von den Fluideigenschaften als auch den Struktureigenschaften abhängt.

| Fluid Eigenschaften | [Model Einheiten] |
|---------------------|-------------------|
| E_{fluid} | 100 |
| Dichte | 1 |

| Wand Eigenschaften | [Model Einheiten] |
|---------------------|-------------------|
| E_{solid} | 1000 |
| Poisson Ratio μ | 0.3 |

Die Länge des Rohrs beträgt 20, die Wandstärke 0.02 und der Durchmesser 0.2, alle Werte sind in den Modelleinheiten angegeben. Werden die elastischen Wände berücksichtigt, ergibt sich eine Wellengeschwindigkeit von 7.2 (c_{FSI}) für die vorgegebenen Parameter. Werden hingegen starre Wände angenommen wäre die Ausbreitungsgeschwindigkeit 10 nach der Gleichung für c_f .

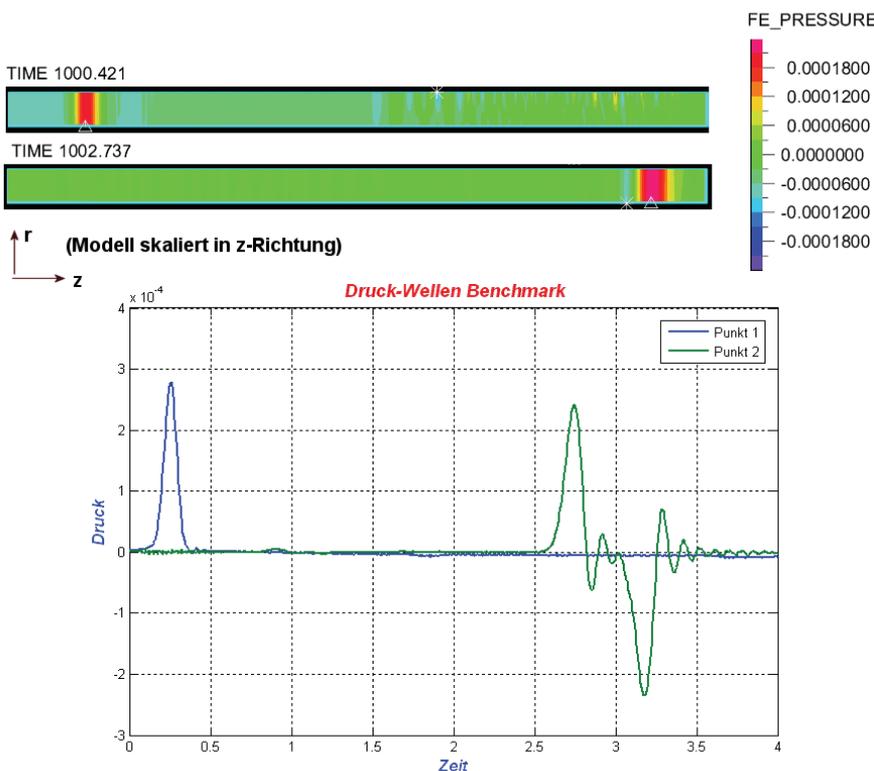


Abb. 2: Benchmarkbeispiel Potenzial-Elemente: Druckwellenausbreitung in Rohrsystemen

Die numerisch berechnete Wellengeschwindigkeit wird aus dem Zeitversatz der Welle an zwei charakteristischen Punkten im Modell bestimmt, wie in Abb. 2 dargestellt. Die Druckwelle wird durch eine Mengenflussänderung initialisiert. Nach einer Zeit von 0.25, erreicht die Welle Punkt 1 und in Modellzeit 2.75 Punkt 2. Im weiteren Verlauf wird die Welle am Auslass reflektiert und wandert als Saugwelle (Zeit 3.15 in Punkt 2) zurück. Die Laufzeit der Druckwelle von Punkt 1 zu Punkt 2 ergibt sich zu 2.5, während der Abstand zwischen den zwei Positionen 17.4 beträgt. So wird für das numerische Modell eine Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von 7 ermittelt, die der theoretischen Wellengeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Wandelastizität entspricht. Der korrekte Wert wird berechnet und die Steifigkeit der Wand, die eine Reduzierung der Wellengeschwindigkeit verursacht, wird richtig im Simulationsmodell wiedergegeben.

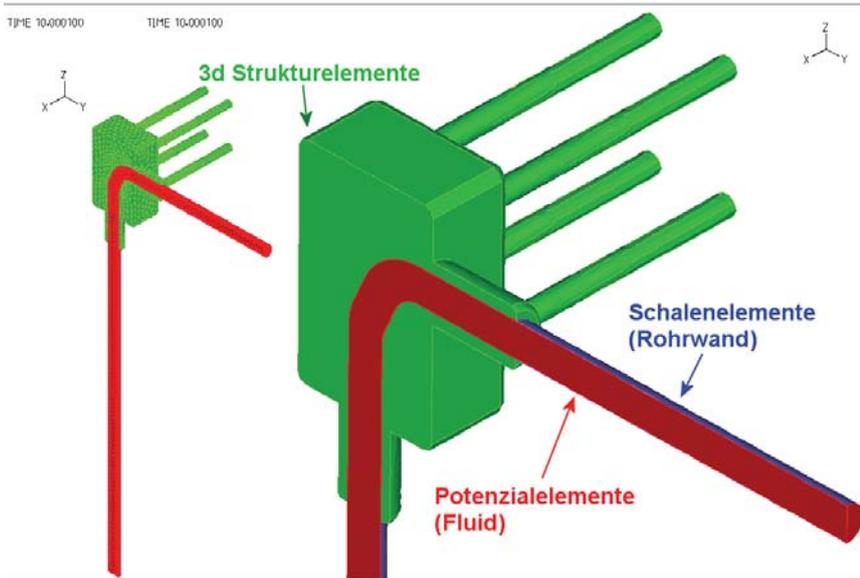


Abb. 3: Modell für 3d Potenzial-Elemente

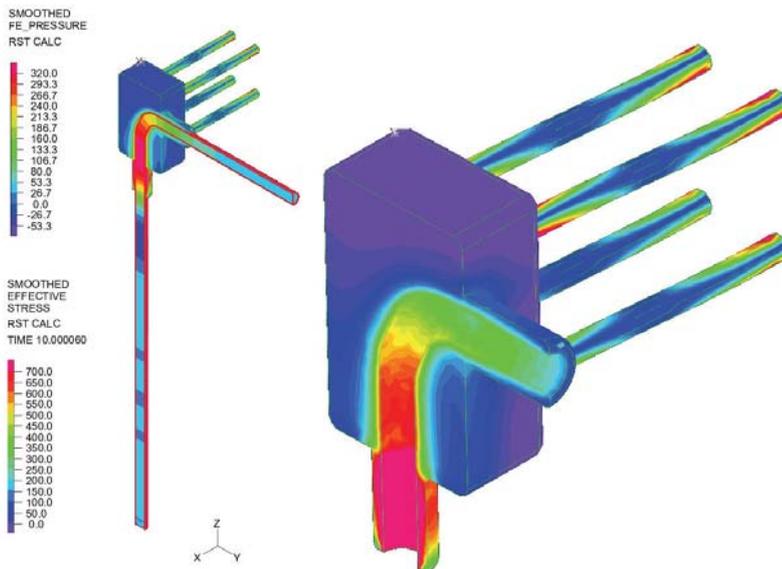


Abb. 4: Druckwelle passiert Krümmer (3d Potenzial-Elemente)

Abb. 3 zeigt ein komplexeres 3d Modell für die Analyse einer Rohrumlenkung. Auch hier können instationäre Wellenausbreitungsvorgänge und ihre Wechselwirkungen auf die Struktur berechnet werden. Durch die gekoppelte Berechnung werden die Spannungen im Bauteil und Reaktionskräfte in den Halterungen bestimmt s. Abb. 4. Weitere Einsatzgebiete der Potenzial Element Formulierung sind z.B. in der Beschreibung des dynamischen Verhaltens von Reaktoren in der Nuklear Industrie oder von Tankbehältern [3],[6] zu finden.

FSI- Modellierung auf Basis eines Navier-Stokes Fluids

Eine Navier-Stokes Modellierung des Fluids ist dann erforderlich, wenn viskose Kräfte oder Turbulenzeffekte nicht vernachlässigt werden dürfen. Dies ist i.d.R. bei Umströmungen von festen Wänden gegeben. Ist die Fluidbeschreibung durch die Wahl des Navier-Stokes Ansatzes festgelegt, entscheidet meist die Art der Kopplung zum Strukturmodell über die Effizienz der Lösung. Die geeignete Wahl der Kopplung hängt hingegen nicht selten vom Grad der gegenseitigen Strömungs-Struktur Beeinflussung ab:

Bei instationären Anwendungen kann es durch die Berücksichtigung der elastischen Struktur zu einer komplexen Interaktion kommen, die die Charakteristik der Strömung grundlegend verändert. Dies ist besonders dann gegeben, wenn z.B. das Fluid nahezu inkompressibel ist, die Struktur hingegen vergleichsweise nachgiebig. Beispiele hierzu wie Blutströmungen oder Hydrolager (Gummi-Flüssigkeitssysteme zur Schwingungsisoliation) wurden auf der NAFEMS CFD-Konferenz 2006 vorgestellt und sind im Detail in [4] beschrieben. Eine Anwendung soll hier kurz aufgegriffen werden, da hier die eingangs betrachtete Druckwellengeschwindigkeit signifikant durch elastische Wände beeinflusst wird, nämlich die arterielle Blutdruckmessung: In Arterien ist durch die sehr nachgiebige Wand die Pulswellengeschwindigkeit (im Vergleich zu starren Wänden von 1300m/s) auf 4-10 m/s reduziert. Im Gegensatz zum vorgestellten Beispiel ist in diesem Fall keine Lösung mit einem Potenzial Ansatz möglich, da im Beispiel der Blutdruckmessung das Gefäß stark komprimiert wird, so dass an der Engstelle erhebliche Druckverluste durch viskose Reibung auftreten, s. Abb. 5. In diesem Fall wird eine direkte FSI-Kopplung aufgrund der starken Beeinflussung relevanter physikalischer Zeitskalen gewählt (Details s. [4]). Ähnliche Strömungsvorgänge treten z.B. bei arteriellen Stenosen (Engstellen in Arterien durch Ablagerungen) auf.

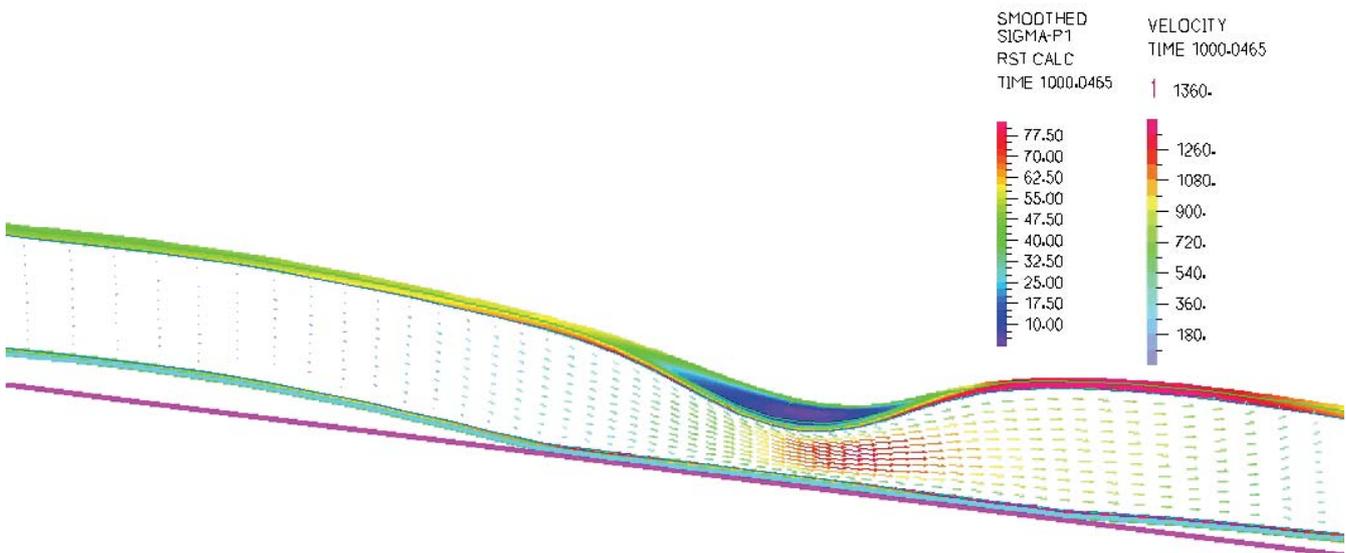


Abb. 5:
Druckwelle passiert Engstelle für Modell „Arterieller Blutdruckmessung“ (Navier-Stokes Fluid)

Eine weitere typische Anwendung für instationäre gekoppelte Strömungs-Struktur-Anwendungen sind wirbelangeregte elastische Strukturen. Gerade im Bauingenieurwesen treten diese Problemstellungen häufig auf, wobei Windlasten Brücken, Stadiendächer und andere Gebäudeteile zur Schwingung anregen können. Ein Benchmarkbeispiel für ein solches Problem ist die wirbelangeregte elastische Struktur von Wall [7]: An einem stationär angeströmten Starrkörper kommt es zur Wirbelablösung, diese regt eine elastische Struktur zur Schwingung an. Die Anordnung ist in Abb. 6 dargestellt, wobei eine zweidimensionale, ebene Anordnung zugrunde gelegt wird. Dieses Problem lässt sich sowohl mit direkten als auch einem partitionierten Ansatz lösen und wird im Bereich der Entwicklung von Kopplungsmethoden vielfach als Referenz herangezogen. Von besonderem Interesse ist hierbei die Amplitude der Schwingung als auch die Frequenz, s. Abb. 8. Die hier mit Adina ermittelte Lösung entspricht der anderer Autoren s. z.B. [8].

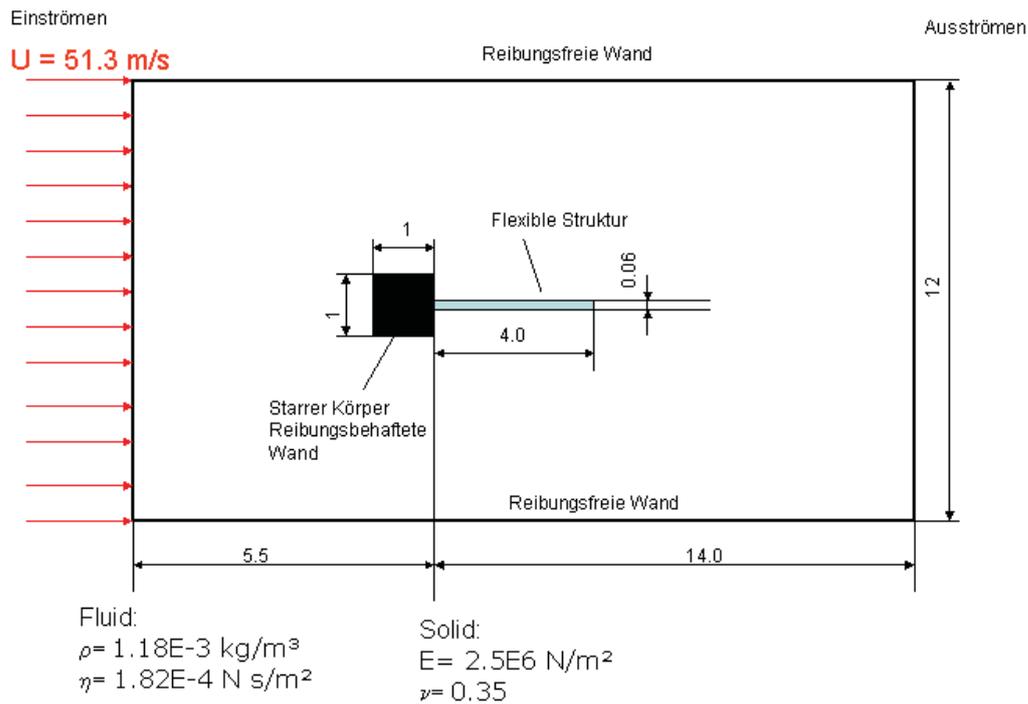


Abb. 6: Modell der wirbelangeregten elastischen Struktur

Als Ausblick wird abschließend die Erweiterung dieses Problems auf eine dreidimensionale Geometrie mit einem partitionierten Berechnungsansatz präsentiert. Diese Erweiterung erscheint sinnvoll, da reale Wirbelstrukturen in technischen Anwendungen meist eine dreidimensionale Struktur aufweisen. Die Abb. solcher Probleme gestaltet sich allerdings vergleichsweise aufwändig, da hoch aufgelöste Gitterstrukturen in einem geometrisch großen Raum erforderlich sind, um die resultierenden Geschwindigkeitsgradienten ausreichend abzubilden. Der Fluidraum wird mit $600\,000^{-1}$ Mio. Zellen vernetzt (s. Abb. 9), eine Orts- und Zeitdiskretisierung von 2. Ordnung mit einem segregierten Solver kommt zur Anwendung. Von der resultierenden Schwingung der Struktur wird über eine FFT eine Frequenz von 3,2 Zyklen/ pro Zeiteinheit ermittelt. Diese Frequenz ist nahe der Schwingungsfrequenz der ebenen Struktur, s. Abb. 10. Allerdings befindet sich das System nach ca. 40 Perioden noch nicht eingeschwungenem Zustand: Die Amplitude der Bewegung am Strukturende ist weiterhin ansteigend. Weitere Analysen, Sensitivitäts- und Gitterstudien für dieses Problem sind erforderlich.

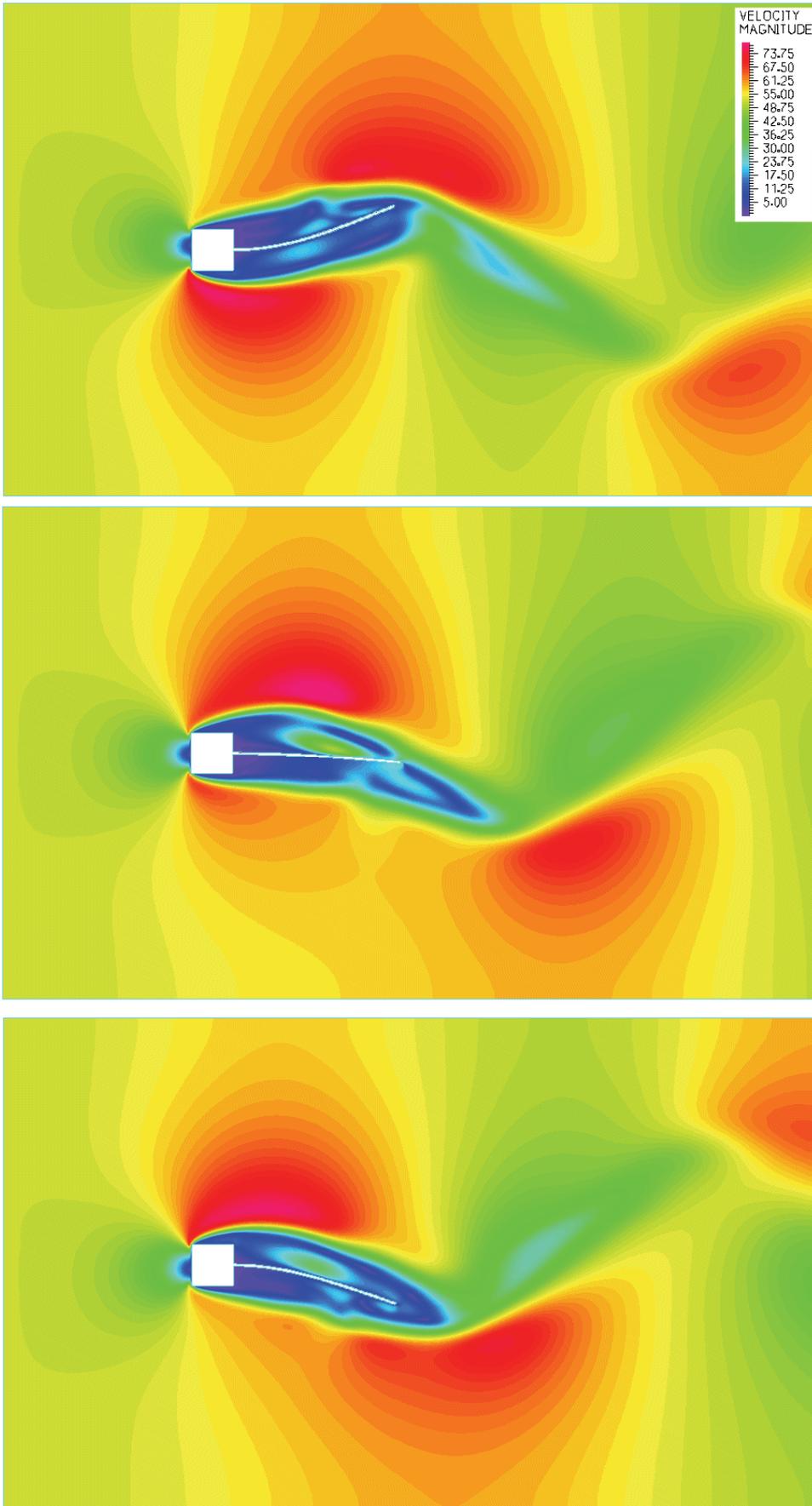


Abb. 7:
Sequenz des Geschwindigkeitsfeldes (2d)

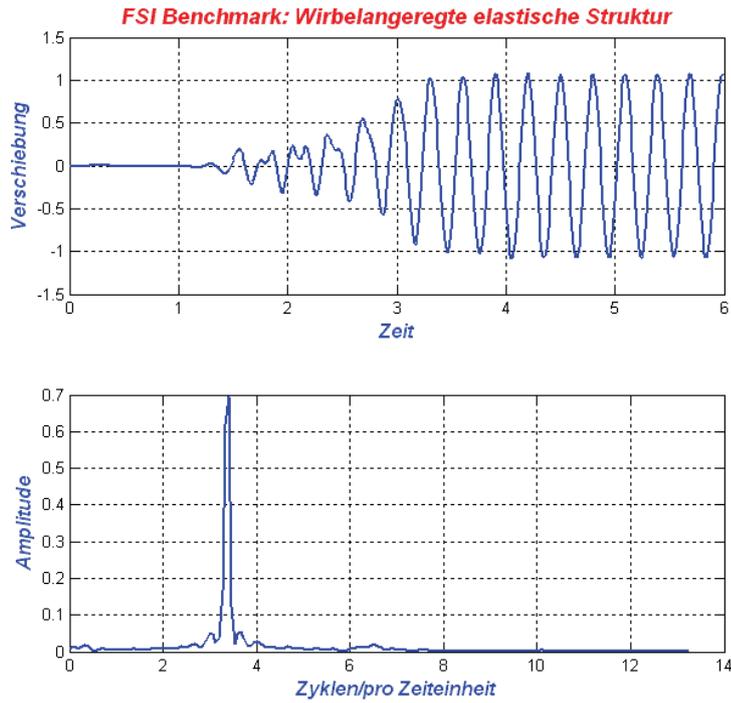


Abb. 8: Verschiebung des Strukturendes der wirbelangeregten elastischen Struktur (2d)

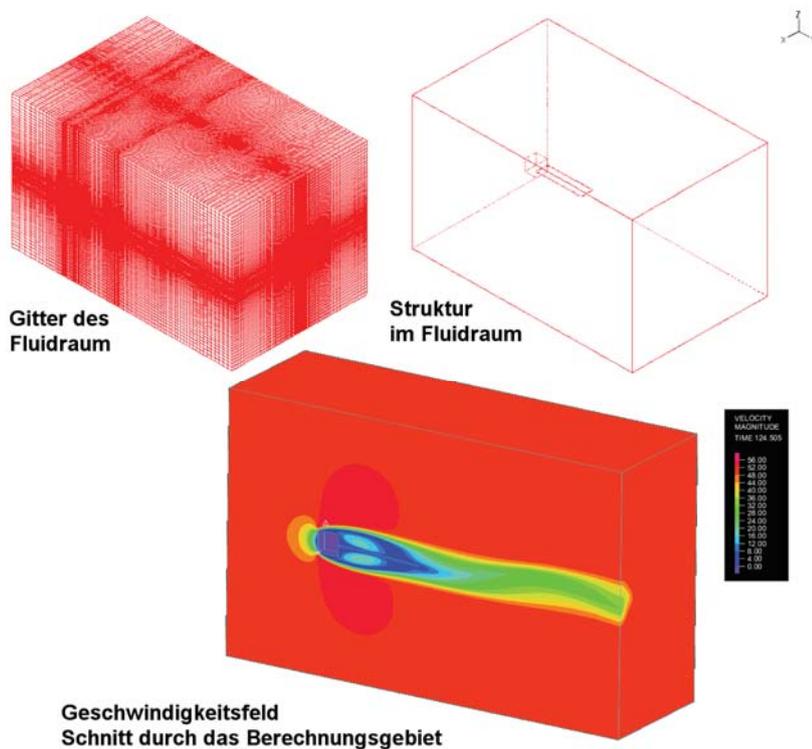


Abb. 9: Modell der Erweiterung der wirbelangeregten elastischen Struktur auf 3d

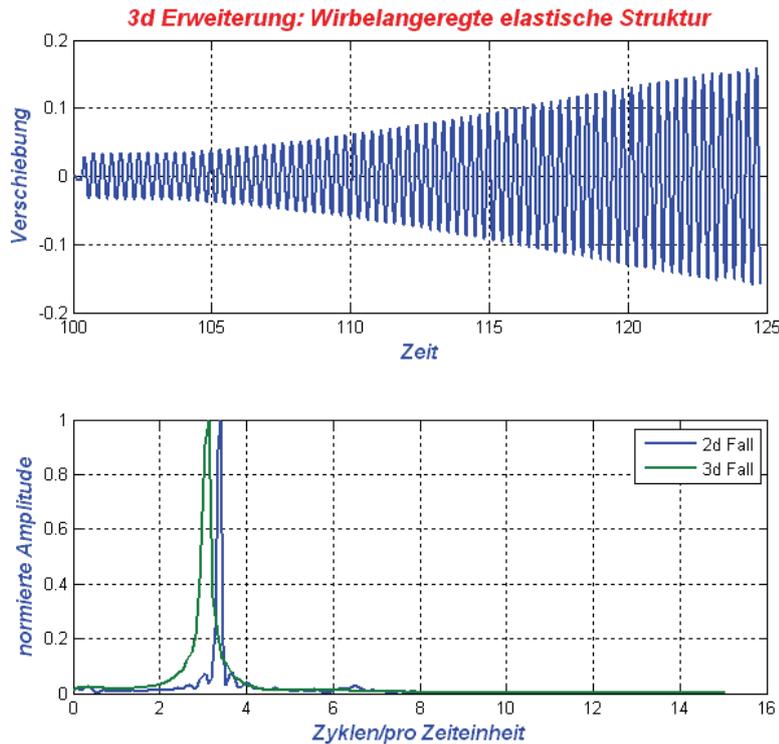


Abb. 10: Verschiebung des Strukturendes 2d und 3d Fall

Zusammenfassung

Instationäre Fluid-Struktur Anwendungen erfordern häufig spezielle, physikalisch fundierte Modellierungs- und Lösungsmethoden, um in realistischen Projektzeiten zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Wird hier eine effiziente Wahl getroffen, können auch für vergleichsweise komplexe Fragestellungen angemessene Lösungen auf Servern oder Workstationarchitekturen erzielt werden.

Hierbei werden zu einem, besondere Anforderungen an den Berechnungsingenieur gestellt, diese Modelle und Methoden in ihrem gültigen Anwendungsbereich zu kennen und in Bezug auf die Lösung gewissenhaft einzusetzen. Andererseits muss die Software ein breites Spektrum an zuverlässigen und validierten Lösungsmethoden bereitstellen.

Literatur

- [1] Heck U.
"Solutions for Highly Coupled Fluid-Structure-Interaction Problems with Adina", Nafems Seminar "Developments in CFD: Reliable Use of CAD-based Software including Dedicated Codes" March 2007, Konferenzband, ISBN 1-874376-22-0
- [2] Adina R&D "Theory and Modelling Guide, Volume III: Adina-F", November 2006
- [3] Sussmann, T, Sundqvist, "J. Fluid-Structure interaction analysis with subsonic Potential-based fluid formulation", Computers and Structures, 81 (2003) 949-962
- [4] Heck, U., "Transient Fluid Structure Interaction", Nafems Seminar "Simulation of Coupled Flow phenomena (Multifield FSI)" May 20, Deutsche Kurzfassung im Nafems-Magazin 02/06 Juli, als download verfügbar

- [5] Wagner, Walter, Regelarmaturen, Vogel Fachbuch, 1996
- [6] Stuart, R. Shipley, L. Ghose, A., Hirmath M., "Dynamic analysis of high-level waste storage tanks, and Structures", 81 (2003) 949-962
- [7] Wall, W.A., Ramm, E. "Fluid-structure interaction based upon a stabilized (ALE) finite element method", in Idelsohn, Onate and Dvorkin: 4th World Congress on Computational Mechanics- New Trends and Applications, Barelona, 1998
- [8] Steindorf, J. "Partitionierte Verfahren für Probleme der Fluid-Struktur Wechselwirkungen", Dissertation, Braunschweig, 2002

Autor

Dr. Heck Consulting and Engineering
Dr. Ulrich Heck
Friedrich-Ebert-Str. 368
47800 Krefeld
Tel. 02151 821493
Email: ulrich_heck@dhcae.de
<http://www.dhcae.de>

Topologieoptimierung für geführte Strömungen

Pascal Häußler, Jürgen Sauter, Thomas Schützle, Tobias Helfrich, Peter Clausen
FE-Design GmbH

Optimierungsmethoden spielen eine zunehmend wichtigere Rolle in modernen Produktentwicklungsprozessen. Optimierungsverfahren in der Strukturmechanik sind weit verbreitet und werden heute vielfach eingesetzt. Im Bereich der Strömungssimulation ist der Einsatz von Optimierungsverfahren noch selten. Dies liegt am Fehlen von spezifischen Optimierungsansätzen, die eine effiziente, wirtschaftliche Optimierung erlauben.

In diesem Artikel wird ein neues derzeit bei FE-Design in Karlsruhe entwickeltes Verfahren zur Topologie Optimierung von CFD Aufgaben vorgestellt. Mit diesem Verfahren für geführte Strömungen mittlerer und großer Reynoldszahlen entwickelt sich CFD von einem Analysewerkzeug zu einem Design Tool: Topologieoptimierung „erzeugt“ Designvorschläge für Strömungskanäle automatisch. Diese Entwürfe können nach der Optimierung für die weitere Verwendung im Entwicklungsprozess bereit gestellt werden. Sowohl Berechnungsexperten als auch Konstrukteure profitieren von diesem neuen Verfahren, welches die Entwicklungsprozesse für Strömungskanalkomponenten deutlich verbessern kann.

Der Artikel beginnt mit einem kurzen Rückblick über Optimierungsverfahren und ihrer Anwendungen in der Strukturmechanik. Hiernach wird ein neues effizientes Verfahren zur Topologie Optimierung geführter Strömungen abgeleitet. Dieses Verfahren minimiert das Auftreten von Rückströmungen und führt damit zu einer Verringerung von Druckverlust und Energiedissipation in Kanälen. Der Optimierungsprozess ist gekoppelt an den iterativen CFD-Solver Lösungsprozess und dadurch hoch effizient.

Optimierungsverfahren in der Strukturmechanik

Strukturoptimierung als Werkzeug zur optimalen Auslegung von Bauteilen umfasst zahlreiche Verfahren. Prinzipiell kann nach Zielfunktionen und Art der Restriktionen, nach zugrunde liegenden Berechnungsmethoden und Algorithmen oder nach der Anwendung unterschieden werden. Zwei wichtige Optimierungsverfahren sind heute die Form- oder Gestaltoptimierung sowie die Topologieoptimierung.

Topologieoptimierung

Topologieoptimierung ist ein Werkzeug zur Designfindung und wird in der Konzeptionsphase eines neuen Bauteiles eingesetzt. Ausgehend von einem zur Verfügung stehenden Bauraum sowie den Randbedingungen ermittelt das System eine Materialverteilung, die beispielsweise einen gewichtsoptimalen Designentwurf repräsentiert [1,

2]. Basierend auf dem FE-Modell werden Elemente, die nicht im Kraftfluss liegen, aus dem Bauteil entfernt. Der optimierte Entwurf erfüllt die Betriebsanforderungen zum Beispiel bezüglich Festigkeit, Steifigkeit, Lebensdauer oder Eigenfrequenzen.

Neben der Gewichtsreduktion, der Steifigkeit, der Berücksichtigung von maximalen Lagerkräften und zum Beispiel der Maximierung beziehungsweise Minimierung von Eigenfrequenzen und dynamischen Stei-

figkeiten können bei der Topologieoptimierung auch hoch dynamische Aspekte wie die Abfolge von komplexen Last-Zeit Reihen berücksichtigt werden. Weiterhin können zahlreiche geometrische Restriktionen zur Einbringung des Herstellprozesses und der Sicherstellung der Funktion des Bauteils in der Optimierung (Gießbarkeit, Stanzbarkeit, Drehbarkeit, Fixierung von Funktionsflächen, Symmetrieanforderungen, Fertigungsrestriktionen u.v.a) definiert werden.

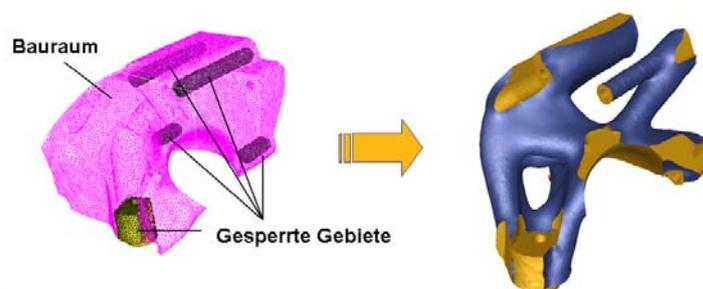


Abb. 1: Topologieoptimierung eines Motorhalters (DaimlerChrysler) [5].

Gestaltoptimierung

Anders als bei der Topologieoptimierung werden bei der Gestaltoptimierung [3] ausschließlich Modifikationen an der Bauteiloberfläche vorgenommen, um Beanspruchungsmaxima, die zum Versagen des Bauteiles führen, zu reduzieren oder um das dynamische Verhalten der Komponente zu verbessern. Die Gestaltoptimierung wird oft bei Bauteilen verwendet, die sich bereits in einem fortgeschritteneren Stadium des Konstruktionsprozesses befinden. Das Ausgangsmodell ist bereits fertigungsgerecht konstruiert und die Optimierung darf die Herstellbarkeit nicht durch Änderungen der Bauteilgestalt einschränken. Aus diesem Grund muss bei der Gestaltoptimierung die Möglichkeit vorhanden sein, eine Vielzahl verschiedener Restriktionen durch die Definition von Sperrgebieten, Knotenkoppelbedingungen, Verschiebungsbeschränkungen und vielem mehr zu berücksichtigen.

Ein Topologieoptimierungsverfahren für geführte Strömungen

Aufgabenstellung

Der in diesem Abschnitt vorgestellte Ansatz zur Topologieoptimierung wird eingesetzt, um einen Geometrievorschlagn für eine optimale Kanalstruktur in einem vorgegebenen

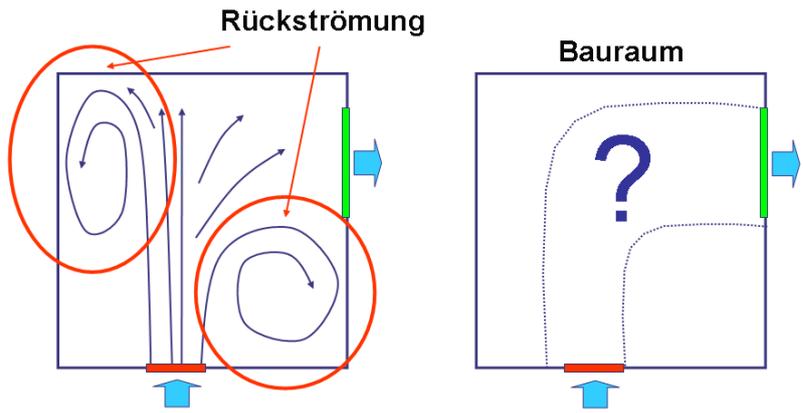


Abb. 3: Wie muss die Kanalstruktur im Designraum aussehen, um Rezirkulation zu vermeiden?

Bauraum zu ermitteln. Hier ist das Ziel, den Gesamtdruckabfall zwischen Ein- und Ausströmungsbereichen zu minimieren. Eine optimale Kanalstruktur wird so definiert, dass keinerlei Rückströmung auftritt.

Optimierungsverfahren

Das Optimierungsverfahren basiert auf Forschungsarbeiten bei DaimlerChrysler, wie sie zum Beispiel in [4] dargestellt sind. In der Topologieoptimierung wird mit sehr großen Anzahlen von Designvariablen gearbeitet, in der Regel muss jede einzelne Zelle innerhalb des Designraumes als Variable betrachtet werden. Allgemeine Optimierungsalgorithmen basierend auf Parametern und Methoden mathematischer Programmierung sind daher ungeeignet, da sie derart viele Design-

variablen nicht in sinnvoller Zeit bearbeiten können.

Übliche, erfolgreich eingesetzte, sensitivitätsbasierte Optimierungsverfahren aus der Strukturoptimierung können in Verbindung mit kommerziellen CFD Solvern nicht verwendet werden. Diese Solver berechnen heute noch nicht die notwendigen Sensitivitätsinformationen. Eine andere Klasse von Optimierungsverfahren bilden die Optimalitätskriterien-Verfahren (OC-Verfahren), die häufig keine Sensitivitäten benötigen. Obwohl diese Verfahren nur eine eingeschränkte Auswahl an Zielfunktionen im Vergleich zu sensitivitätsbasierten Verfahren liefern, sind sie in der Regel sehr schnell und effizient.

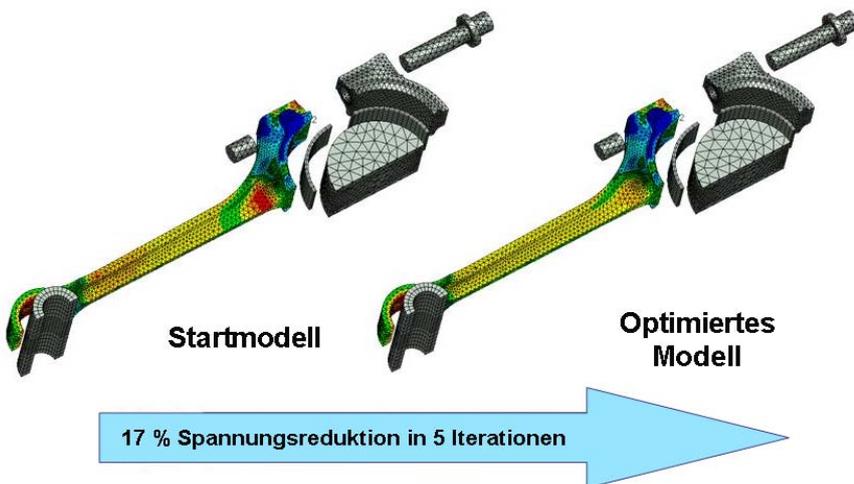


Abb. 2: Gestaltoptimierung eines Pleuels (FORD Werke AG).

Das hier vorgestellte Optimierungsverfahren für die Topologieoptimierung geführter Strömungen kann als OC-Ansatz betrachtet werden. Basierend auf spezifischen Kenntnissen über das Verhalten von Kanalströmungen wurde bei DaimlerChrysler eine „Redesign“-Formel abgeleitet, die festlegt, wie eine Kanalgeometrie verändert werden muss, um die Durchflussleistung bezüglich der Zielfunktion „Minimierung des Gesamtdruckabfalls zwischen Zu- und Abflussbereich“ zu verbessern. Dieser Ansatz ist gut geeignet für Bereiche, die von konvektivem Transport dominiert sind. Der Ansatz „verwendet“ Kenntnisse über die nachteiligen Effekte von Rückströmungen, Wirbeln und „Totwas-

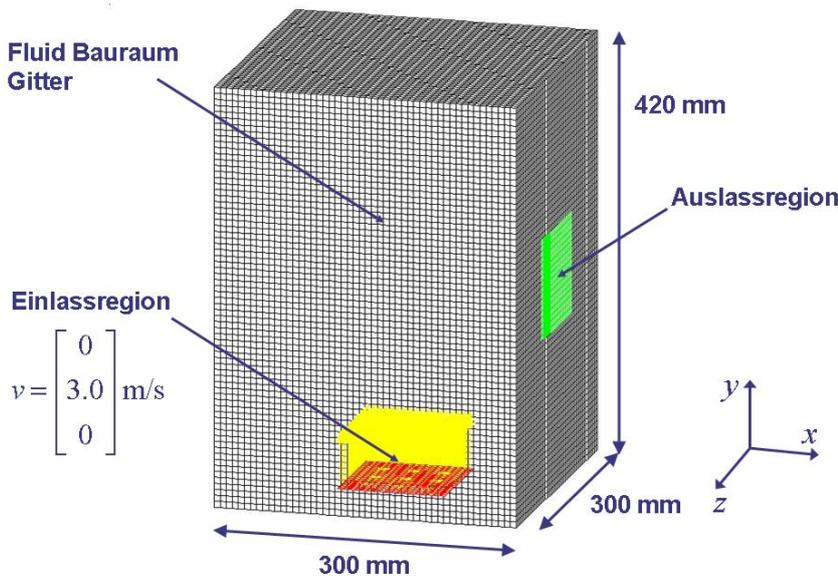


Abb. 4: Bauraum CFD Modell – einfacher 90° Bogen.

- Ein Fluid Gitter, das den Bauraum ausfüllt
- Eine Einlass- und Auslassrandbedingung
- Ein Fluid-Materialmodell

Der Optimierungsprozess arbeitet mit dem gesamten Bauraum CFD Modell. Nach 800 Iterationen des CFD Solvers in Verbindung mit dem Optimierer hat sich die Lösung stabilisiert. Die Strömung ist in großen Teilen des Bauraumes gut erkennbar zum Erliegen gekommen. Innerhalb des Strömungsführenden Bereiches, also dem entstandenen "Kanal" findet keinerlei Rückströmung mehr statt. Als Ergebnis kann nun ein Design Vorschlag für eine Kanalgeometrie abgeleitet werden. Dies kann zum Beispiel durch die Betrachtung der Isofläche des Geschwindigkeitsbetrages durchgeführt werden.

ser" Regionen auf den Druckabfall und versucht daher, derartige Phänomene im Designraum zu vermeiden. Das Strömungsgebiet wird durch die Re-Design-Regel lokal modifiziert. Rückströmungen, Wirbel und „Totwasser“ Regionen werden in einem iterativen Vorgang sukzessive beseitigt.

Das Verfahren arbeitet in Verbindung mit einem kommerziellen Standard CFD-Solver. Die Optimierung wird direkt während der CFD-Analyse durchgeführt. Über eine Schnittstelle zum CFD-Solver werden während der Laufzeit Daten ausgetauscht so dass CFD Lösung und Optimierungsaufgabe gemeinsam konvergieren. Als Folge wird nur ein einziger CFD-Solver-Lauf für die gesamte Topologieoptimierung benötigt. Durch diese effiziente Vorgehensweise wird erstmals die Topologieoptimierung für große Kanalströmungsanwendungen möglich.

Anwendungsbeispiele

Einfacher 90° Bogen

Ausgehend von einem kastenförmigen Bauraum (Design Space) soll eine Kanalform gefunden werden, die die Strömung vom Bereich des Einlasses am Boden zum Auslass an der Wand auf der rechten Seite führt.

Das CFD Modell besteht aus den folgenden Elementen:

Der Gesamtdruckverlust zwischen Ein- und Auslass wurde signifikant verbessert. Im Vergleich zu einem Kanal mit einfachen Kreisradien und quadratischem Querschnitt ist der Gesamtdruckverlust um über 50% verringert. Die Ergebnis-Zellenmenge kann nun einer Glättung und weiteren Postprocessing Schritten bis hin zum CAD Re-Import zugeführt werden.

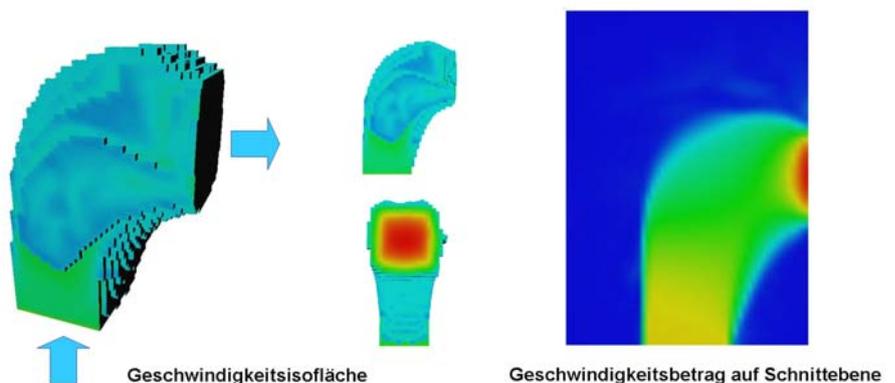


Abb. 5: Geometrievorschlag für den Kanal (links) und Geschwindigkeitsbetrag auf einer Schnittebene im Bauraum nach der Optimierung (rechts).

Drei-Kasten Bauraum

Bei diesem Beispiel wird ein Bauraum betrachtet, der aus drei miteinander verbundenen kastenförmigen Bereichen zusammengesetzt ist. Die Aufgabe ist nun, ein optimales Kanalsegment innerhalb der Boxränder zu finden, das Einlass zu Auslass führt.

Auch hier ermittelt das Optimierungsverfahren einen klar ausgeprägten Geometrie-vorschlag für einen „bionisch“ anmutenden Kanal, in dem Rückströmungen und Wirbel vollständig unterdrückt sind.

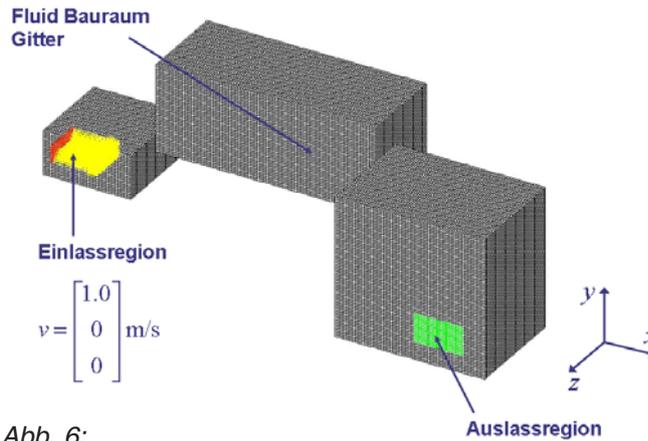


Abb. 6: Bauraum CFD Modell – Drei-Kasten Bauraum.

Verzweigung

Das Optimierungsverfahren ist auch bei mehreren Ein- und Auslassregionen einsetzbar. In diesem Beispiel wird ein kastenförmiger Bauraum verwendet, der neben einem Einlass zwei Auslassregionen aufweist. Die auf der Unterseite eintretende Strömung ist also aufzuteilen und den beiden Auslässen an der rechten Wand zuzuführen.

Die Auslassrandbedingungen sind so festgelegt, dass sich der Massenstrom gleichmäßig auf beide Auslässe verteilen soll. Als Optimierungsergebnis stellt sich eine symmetrische Kanalstruktur ein, die die Strömung rückströmungsfrei und gleichmäßig auf die beiden Auslässe verteilt. Im gesamten übrigen Bauraum ist die Strömung zum erliegen gekommen. Eine genaue Betrachtung der Geometrie zeigt leichte Abweichungen von einer exakten Symmetrie. Diese Abweichungen sind numerisch bedingt und verringern sich bei einer Verfeinerung des Gitters.

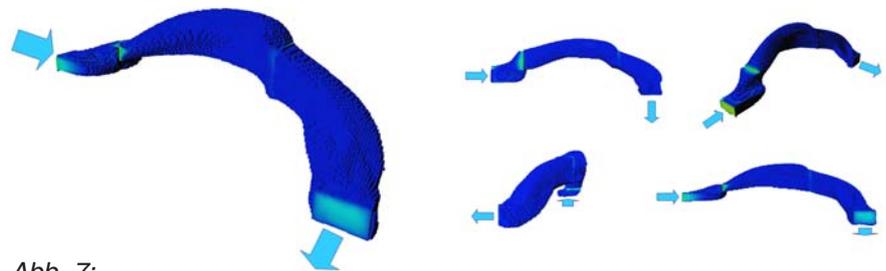


Abb. 7: Geometrie-vorschlag für den Kanal – Drei-Kasten Bauraum.

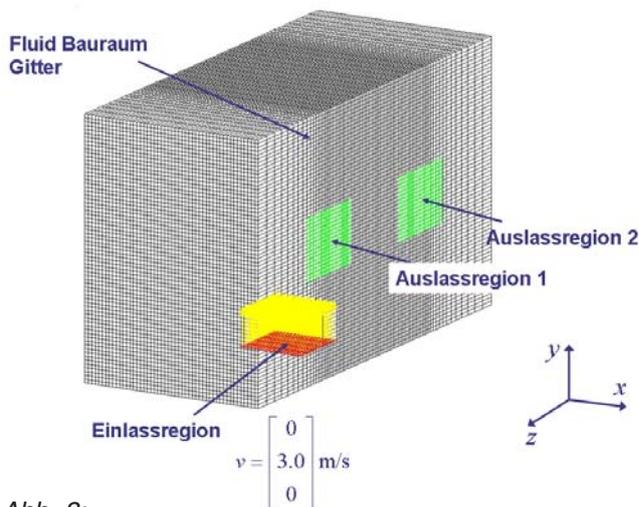


Abb. 8: Bauraum CFD Modell – Verzweigung.

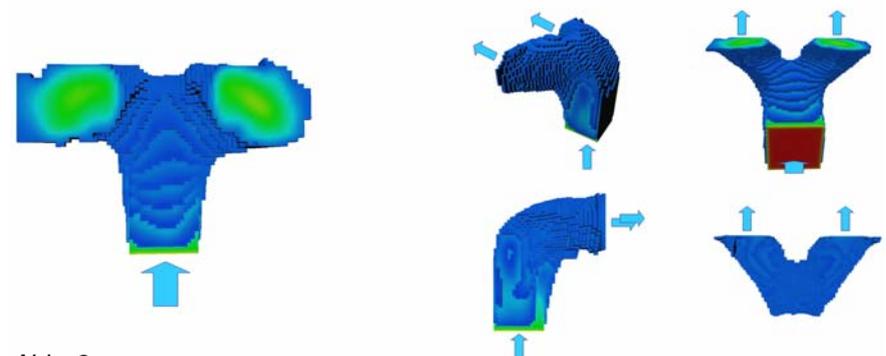


Abb. 9: Geometrie-vorschlag für den Kanal – Verzweigung.

CFD-Topologieoptimierung im Entwicklungsprozess

Das vorgestellte neue, nicht-parametrische Verfahren zur Topologieoptimierung erlaubt die Verwendung von CFD als Entwurfswerkzeug in frühen Stadien des Produktentwicklungsprozesses. Entwürfe werden nicht mehr nur validiert und in Hinblick auf ihre strömungsdynamischen Eigenschaften untersucht, sondern durch Optimierungsmethoden erzeugt und/oder verbessert. Optimierungsmethoden in Verbindung mit der CFD schaffen also neue Einsatzbereiche für die Strömungssimulation und liefern so analog zur den Strukturoptimierungsverfahren einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von physikalischen Prototypen sowie dem Auftreten von kritischen Designfehlern in späten Phasen des Entwicklungsprozesses. Damit werden erfolgreich Kosten reduziert und der Produktentwicklungsprozess beschleunigt.

Zur erfolgreichen Anwendung von Optimierungsmethoden in der CFD müssen diese nahtlos in den Entwicklungsprozess eingebunden werden. Das vorgestellte Verfahren wird in dem neuen Produkt Tosca.fluid von FE-Design verfügbar sein und durch bereitgestellte Schnittstellen effizient in vorhandene Pre-/Postprocessingumgebungen und Entwicklungsprozesse integrierbar sein.

Literatur

- [1] Bendsøe M.P., Kikuchi N.: "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, 1988, p. 197-224
- [2] Bendsøe M. P., Sigmund O.: "Topology optimization—theory, methods, and applications", Springer, Berlin Heidelberg New York 2004
- [3] Allaire G.: "Shape Optimization by the Homogenization Method", Springer Verlag New York Inc. 2002
- [4] Klimetzek F. R., Moos O.: "Bionic Optimization of Air-Guiding Systems", SAE International 2004
- [5] Clausen P. M., Pedersen C. B. W., "Non-parametric large scale structural optimization for industrial applications", III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, C.A. Mota Soares et.al. (eds.) Lisbon, Portugal, 5–8 June 2006

Autor

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Pascal Häußler
FE-Design GmbH
Karlsruhe, Deutschland
www.fe-design.de

Der Autor arbeitet als Projektmanager bei FE-Design und ist verantwortlich für die Entwicklungsaktivitäten im Bereich CFD-Optimierung.

Über Struktur und Genauigkeit des CFD-Prozesses

Peter Farber, IMH - Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen

Computational Fluid Dynamics (CFD) benutzt mathematische Modelle um die Strömung, den Transport thermischer Innerer Energie, den Transport von Komponenten eines Gemisches etc. in komplexen Geometrien vorherzusagen. Die kommerzielle Anwendung der Numerischen Strömungssimulation wächst seit Jahren kontinuierlich um ca. 15 % pro Jahr. CFD ist, neben physikalischem Experiment und Theorie, zum "Dritten Weg" für die Analyse und Optimierung von technischen Systemen geworden. Das bereits jetzt erkennbare Wachstum der Rechenleistung und des Fortschritt in den Software-Algorithmen unterstützt den Ausblick eines weiter wachsenden Marktes für CFD für viele kommende Jahre.

In diesem Beitrag wird im Hinblick auf CFD die allgemeine Struktur des "CFD-Prozesses" erläutert und die für die Simulation benötigten Datentypen abgeleitet. Besonderer Schwerpunkt wird auf die Diskussion der verschiedenen Kategorien von Genauigkeit mit Bezug auf die Eingangsdaten für die Simulationen gelegt. Zuletzt wird auf aktuelle Bestrebungen für "Best Practice" verwiesen.

Vorschlag für eine Struktur: Der "CFD-Prozess"

Die Identifizierung und Anordnung von Teilen in einem Projekt, in dem CFD-Berechnungen ausgeführt werden, erlaubt das Erkennen von Stärken und Schwächen. Dieser "Fahrplan" kann darüber hinaus als Leitlinie für die Ausbildung in Industrial CFD benutzt werden wie auch als Vorlage für technische Berichte und Publikationen. Abbildung 1 zeigt einen Vorschlag für eine solche Struktur, die als "CFD-Prozess" bezeichnet werden könnte.

Ausgehend von einem System der realen Welt, dem industriellen/technischen Prozess oder der wissenschaftlichen Forschungsaufgabe, kommunizieren normalerweise Spezialisten mit Wissen über den realen Prozess und CFD-Spezialisten während des Prozesses der Modellbildung durch Abstraktion um ein ausschließlich mathematisches Modell zu erzeugen, das Systemmodell. Für einen Teil der Modellierungsaufgaben sind der Spezialist für CFD und der für den realen Prozess ein und dieselbe Person. Einen wichtigen Einfluss besitzt die Art der Fra-

gestellung. Sie kann so einfach sein wie wissen zu wollen, in welche Richtung die Strömung geht, oder so umfangreich zu bearbeiten wie die Ermittlung von Zahlenwerten physikalischer Größen in einem kleinen Vertrauensbereich.

Für reale technische Systeme mit komplexer Physik (z.B. turbulente Mehrphasenströmungen mit chemischen Reaktionen) ist aus der Sicht des Intellekts eine der schwierigsten Aufgaben die Entscheidung über die "richtigen" physikalischen Bilanzgleichungen. Der CFD-Spezialist muss untersuchen, in welchem Umfang die normalerweise sehr komplizierten Gleichungen die Realität wiedergeben und dies mit dem konkreten realen Prozess und der Art der Fragestellung vergleichen, um die am besten geeigneten Gleichungen auszuwählen.

In allen Fällen ist die Modellbildung durch Abstraktion eine Mischung zwischen Wissenschaft und Kunst und, salopp formuliert, "was zählt, ist die Birne vor der Glotze".

Das Systemmodell kann man sich aus separaten Modulen bestehend

vorstellen, die mehr oder weniger unabhängig voneinander angeordnet werden können. Da der vorliegende Text sich an Leser wendet, die mit CFD vertraut sind, werden nur einige der Module im folgenden diskutiert.

Die sog. "design or assessment parameter", Akronym DOAP, sind die Antworten auf die Fragen nach dem Optimierungsziel des realen technischen Systems, z.B. nach dem Wärmeübergangskoeffizient an einer bestimmten Fläche eines Wärmeübertragers, und deren Abbildung im Systemmodell. In beiden Fällen bedeutet die Entscheidung über die DOAP die Identifizierung von physikalischen Größen und Orten, an denen sie im realen technischen System und analog im Systemmodell bestimmt werden. Üblicherweise werden die DOAP zusammen mit den Residuen und den globalen Bilanzen der Freiheitsgrade beobachtet, um über die Iterationskonvergenz zu entscheiden.

Das Lösungsgebiet ist die mathematische Repräsentation des Teils der realen Geometrie, in der die Bilanzgleichungen gelöst werden. An den

Grenzen des Lösungsgebietes müssen die Randbedingungen für jede zu lösende Bilanzgleichung gesetzt werden. Normalerweise, und zumindest für die Gleichungen der gewählten Turbulenzmodells, sind die Randbedingungen nicht exakt bekannt und/oder sie variieren für jede Realisation einer bestimmten Klasse von Problemen des realen technischen Systems (z.B. mehrere Maschinen eines Typs, die in verschiedene Länder geliefert wurden). Der allgemein akzeptierte Weg hier ist, dass die Ränder weit genug entfernt vom interessierenden Gebiet gelegt werden und vernünftig erscheinende Näherungswerte der Randbedingungen benutzt werden. Das interessierende Gebiet ist das um die DOAP herum. Man argumentiert, dass die näherungsweise Lösung der Bilanzgleichungen im Gebiet zwischen den Rändern des Lösungsgebietes und des interessierenden Gebietes zu akzeptablen Randbedingungen auf den Rändern des interessierenden Gebietes führt.

Das Modul Lösungsalgorithmus im Systemmodell steht für den softwarebasierten Lösungsalgorithmus für das System algebraischer Gleichungen zusammen mit den Parametern, die den Lösungsprozess kontrollieren und überwachen (z.B. die Definition der Berechnungsvorschrift für die Residuen, die Residuentoleranzen für die Entscheidung über die Iterationskonvergenz und die Unterrelaxationfaktoren).

Mit dem Systemmodell werden Simulationsexperimente durchgeführt, d.h., dass das System algebraischer Gleichungen zusammen mit den Randbedingungen näherungsweise und iterativ von den Startbedingungen ausgehend gelöst wird. Die Ergebnisse werden üblicherweise mit physikalischen Experimenten und/oder allgemeinen Erfahrungen verglichen, ein Prozess, der Validierung genannt wird. In der Regel ist die Gewinnung von Messwerten physikalischer Experimente in der industriellen Praxis durch starke Kosten- und Zeitbeschränkungen deutlich erschwert. Alternativ kann man dann den Weg

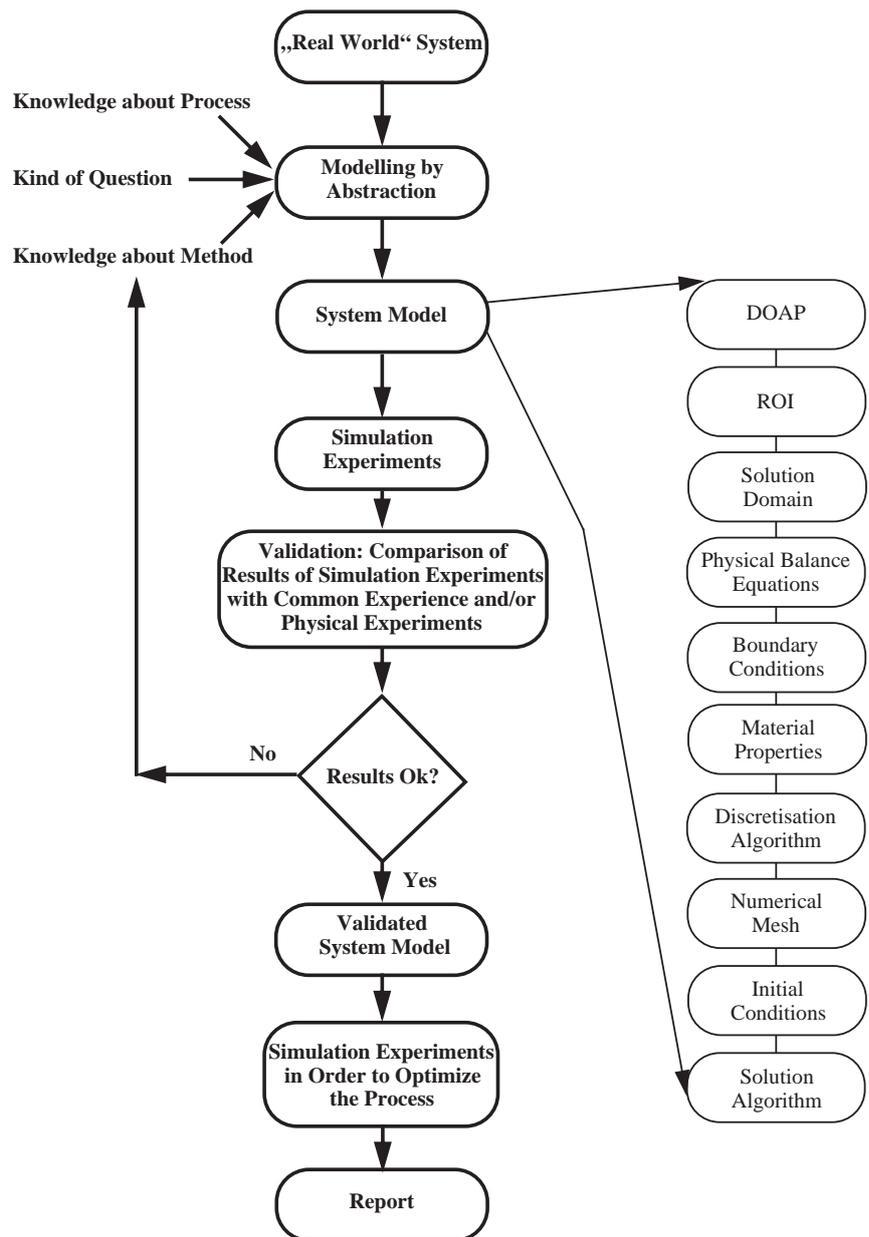


Abb. 1:
Der CFD-Prozess

der Verifikation beschreiten, das ist die Vorgehensweise, bei der untersucht wird, ob das Programm die Gleichungen richtig löst ([8]). Konkret kann dies bedeuten, dass ein vergleichbares Systemmodell mit einem anderen kommerziellen Softwarepaket näherungsweise gelöst wird. Bei deutlichen Zeit- oder Kostenbeschränkungen, wie sie in der Regel bei kleinen und mittelständischen Unternehmen anzutreffen sind, greift man zur Validierung auf die am leichtesten zu messenden physikalischen Größen, wie z. B. den

Druckverlust, zurück.

Ist man mit der Validierung des Systemmodells zufrieden, können die Simulationsexperimente zur Optimierung des Prozesses durchgeführt werden. Der CFD-Prozess endet mit einem Bericht, in dem in kurzer Form alle wichtigen Aspekte des CFD-Prozesses enthalten sein sollten.

Qualität bei der industriellen Anwendung von CFD

Die industrielle Benutzung von CFD für beliebige Aufgaben begann in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts und breitete sich von dort in alle anderen wichtigen Industrien aus. CFD ist immer noch eine unreife Technologie, die alle paar Jahre wesentliche Änderungen der physikalischen Modelle, der Lösungsalgorithmen und der front-end usability erlebt. Die Anforderungen an die Genauigkeit hängen in großem Umfang von der konkreten Analyse- und Optimierungsaufgabe ab und es existieren keine Standardvorgaben. Daher sind die Qualität bei der industriellen Anwendung von CFD und das Vertrauen in Simulationsergebnisse immer noch Gegenstand großen Interesses und werden es, nach Ansicht des Autors, noch für viele Jahre sein.

Mit Bezug zu "Qualität und Vertrauen" von CFD sind drei Organisationen an vorderster Stelle zu nennen:

- NAFEMS, <http://www.nafems.org/>
- AIAA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, <http://www.aiaa.org/>
- Ercoftac, European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion, <http://www.ercoftac.org/>

Von der AIAA ist eine Publikation verfügbar, die sich mit Verifikation und Validierung beschäftigt [1]. Die NAFEMS hat mehrere Publikationen entwickelt, die die ersten Schritte in CFD anleiten und Beiträge zur Best Practice liefern ([2] - [7] und [9] - [11]). Nicht unerwähnt sollte an dieser Stelle bleiben, dass die American Society of Mechanical Engineers (ASME) für ihr Journal of Fluids Engineering Richtlinien für den Umgang mit Numerischer Unsicherheit und experimenteller Ungenauigkeit heraus gibt (<http://journaltool.asme.org/Content/AuthorResources.cfm>). Unter Leitung der Ercoftac und an den CFD-Speziali-

sten gerichtet wurden umfassende Arbeiten durchgeführt, die weiter unten näher beschrieben werden.

Bei der Ercoftac können mit Bezug auf "Qualität und Vertrauen" in die industrielle Nutzung von CFD drei Aktivitäten identifiziert werden:

- Die Ercoftac Special Interest Group (SIG) Quality and Trust in the Industrial Application of CFD, zugänglich unter <http://www.ercoftac.org/>
- Die Ercoftac Best Practice Guidelines for Industrial Computational Fluid Dynamics (BPG ICFD), January 2000 ([8]), erhältlich unter <http://www.ercoftac.org/>
- Die QNET-CFD Knowledge Base, <http://www.qnet-cfd.net/>

Die BPG ICFD ([8]) ist das bis dato am besten ausgearbeiteste Dokument zu "Qualität und Vertrauen" für den CFD-Spezialisten. Sie sind der Ausgangspunkt für die weiteren Diskussionen. Die BPG ICFD zielen auf die Bereitstellung der 20 % an Informationen, die die die 80 % am häufigsten auftretenden Probleme adressieren. Die BPG sind beschränkt auf einphasige, kompressible und inkompressible, stationäre und instationäre, turbulente und laminare Strömungen mit und ohne Transport thermischer Innerer Energie. Die BPG behandeln nicht Verbrennung, Zweiphasenströmungen, Strömungen mit Wärmestrahlung, nichtnewtonsche Strömungen, supersonische und hypersonische Strömungen mit Verdichtungsstößen und viele andere komplexere Strömungssituationen.

Als erster Schritt in Richtung einer Richtlinie zu Best Practice ist eine Einteilung nach Fehler und Unsicherheit (error and uncertainty) vorzunehmen:

- Fehler: Eine potentielle Unzulänglichkeit, deren Ursache nicht ein Mangel an Wissen ist. - Hierzu gehören: Diskretisierungsfehler,

Iterationsfehler, Rundungsfehler in Digitalrechnern, Benutzerfehler und Softwarefehler.

- Der CFD-Spezialist hat in einigen Fällen eine vernünftige Chance die wahrscheinliche Größe des Fehlers abzuschätzen.

- Unsicherheit: Eine potentielle Unzulänglichkeit, deren Ursache ein Mangel an Wissen ist.
 - Modellunsicherheiten: Dies sind die Unsicherheiten, die auf den Unterschieden zwischen der realen Strömung und der exakten Lösung der Modellgleichungen beruhen (es werden eigentlich die falschen Gleichungen gelöst).
 - Anwendungsunsicherheiten: Sie treten auf, weil die konkret untersuchte Anwendung komplex ist und präzise Daten des realen technischen Systems, die für die Simulation benötigt werden, nicht immer verfügbar sind.

Dieser Artikel konzentriert sich auf Modell- und Anwendungsunsicherheiten. Sie werden während des Prozesses der Modellbildung durch Abstraktion eingeführt und stehen in Verbindung mit Entscheidungen von CFD-Experten. Beispiele für Modellunsicherheiten sind:

- Die Benutzung einer newtonschen Materialdefinition für eine nichtnewtonsche Strömung
- Die Vereinfachung der Zustandsgleichung eines realen Gases zu der eines idealen Gases
- Die Benutzung des "falschen" Turbulenzmodells
- Die Annahme einer inkompressiblen Strömung, wenn Kompressibilitätseffekte und starke Wärmeübertragung auftreten.

Bei einem Teil der Anwendungen werden durch den CFD-Spezialisten bewusst einfachere (oder "falsche")

Gleichungen ausgewählt. In solchen Fällen wird erwartet, dass so schneller oder anderweitig mit weniger Aufwand eine näherungsweise Lösung der Modellgleichungen erzielt wird. Der Unterschied zu den "richtigen" Gleichungen wird vor dem Hintergrund der Art der Fragestellung dann als vernachlässigbar erachtet.

Ist man unsicher, welche der Gleichungen das reale technische System am besten beschreiben, kann nur Validierung und damit letztendlich Erfahrung weiter helfen.

Beispiele für Anwendungsunsicherheiten sind:

- Geometrische Unsicherheiten, das Geometriemodell (CAD-Modell) repräsentiert nicht die Geometrie des realen technischen Systems, z. B.:
 - Änderungen der Geometrie während der Herstellung
 - Der Einfluss der Herstellungstoleranzen
 - Veränderungen der Geometrie durch Abnutzung, Korrosion und Ablagerungen
 - Durch Wartungsarbeiten verursachte Geometrieänderungen
 - Aufgrund mechanischer Belastung hervorgerufene Formänderungen
- Unsicherheiten in Verbindung mit den Randbedingungen, z. B.:
 - Turbulenzeigenschaften sind selten verfügbar
 - Probleme mit der präzisen Spezifikation von Grenzschichtprofilen auf Wänden an einem Einlass
- Unsicherheiten hinsichtlich der tabellierten Daten für die ausgewählten Materialgleichungen
- Unsicherheiten mit Bezug stationärer Strömung, Symmetrie und Periodizität, z. B.:
 - Strömungslöser können unter bestimmten Bedingungen falsche stationäre Lösungen für

in der Realität instationäre Strömungen berechnen
 - Im realen technischen Prozess können asymmetrische Strömungen erzwungen werden, wenn die Einlassbedingungen nicht wirklich perfekt symmetrisch sind

Auch hier gilt:

Ist man unsicher, welche Geometrie, oder welche Variationen einer Geometrie, das reale technische System am besten beschreiben, kann nur Validierung und damit letztendlich Erfahrung weiter helfen.

Mit Bezug zu den Anwendungsunsicherheiten kann man auch, etwas launisch formuliert, das "erste Gebot des CFD-Prozesses" aufstellen: Gehe hin und schau es Dir an.

Nach Ansicht des Autors scheinen, in Abhängigkeit der Physik des realen technischen Systems, keine einfachen Regeln verfügbar, wie verlässliche CFD Simulationen durchgeführt werden können. Und vielleicht wird es diese auch niemals geben.

References

[1] AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations, AIAA G-077-1998, 1998

[2] A. de Souza (Ed.), How to - Understand Computational Fluid Dynamics Jargon, NAFEMS Ltd., Glasgow, 2003

[3] C. T. Shaw, Why do - Computational Fluid Dynamics?, NAFEMS Ltd., Glasgow, 2002

[4] C. T. Shaw, How to - Get Started with Computational Fluid Dynamics, NAFEMS Ltd., Glasgow, 2002

[5] P. Tucker, A. Mosquera, NAFEMS Introduction to Grid & Mesh Generation for CFD, NAFEMS Ltd., Glasgow

[6] A. de Souza, How to - Plan a CFD Analysis, NAFEMS Ltd., Glasgow, 2002

[7] P. Tucker (Ed.), 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples - Laminar and Turbulent Two-Dimensional Internal Flows, NAFEMS Ltd., Glasgow, 2000

[8] M. Casey, T. Wintergerste (Eds.), ERCOFTAC Special Interest Group on „Quality and Trust in Industrial CFD“ - Best Practice Guidelines, Version 1.0, January 2000

[9] J. Smith (Ed.), Quality System Supplement to BS EN ISO 9001 Relating to Engineering Analysis in the Design and Integrity Demonstration of Engineered Products, NAFEMS Ltd., Glasgow, Issue 2.0, 1999

[10] G. A. Beattie, Management of Finite Element Analysis - Guidelines to Best Practice, NAFEMS Ltd., Glasgow, 1995

[11] J. M. Smith, NAFEMS Quality Assurance Procedures for Engineering Analysis, NAFEMS Ltd., Glasgow, 1999

Autor

Peter Farber
 IMH - Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen
 Hochschule Niederrhein,
 Reinartzstrasse 49, 47805 Krefeld
 peter.farber@hsnr.de

Prof. Farber lehrt seit 1992 an der Hochschule Niederrhein (Krefeld) im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik. Im Jahr 2005 gründete er dort das IMH - Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen und ist seither geschäftsführender Direktor des Instituts.

Bitte per Post oder Fax senden:

Tel.: +49 (0)8092-83550

Fax: +49 (0)8092-83551

e-mail: info@nafems.de

Adresse für Fensterkuvert



NAFEMS Kontakt DACH & Nordic
Schillerstr. 6

D-85567 Grafing
Germany

Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe 7

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: _____