

NAFEMS

Online-Magazin

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

Mit Stellenmarkt

**Kompensation faserverbundspezifischer Fertigungs-
deformationen im Werkzeug – Ein semi-analytischer
Simulationsansatz**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

**Mikroskalensimulation des Herstellungsprozesses von
Faserverbundwerkstoffen zur Analyse chemisch und
thermisch induzierter Eigenspannungen**

Faserinstitut Bremen

**Adaptive Finite-Elemente-Methode von
anisotropen 3D-Verbundstrukturen**

TU Chemnitz

**CFD-Simulation zur Optimierung einer Mikropumpe
mit Tesla-Ventilen**

Festo AG & Co. KG / TU Dresden

**Theoretische Grundlagen der CFD-Technologie für
CAD-basierte Strömungssimulationen im Product
Lifecycle Management (PLM)-Prozess**

Mentor Graphics

sowie

Neuigkeiten

Stellenmarkt

Veranstungskalender

Schulungen u.v.m.

Seite 10 - 11



NAFEMS DEUTSCHSPRACHIGE

KONFERENZ '12

8. – 9. MAI | BAMBERG, DEUTSCHLAND

BERECHNUNG UND SIMULATION – ANWENDUNGEN, ENTWICKLUNGEN, TRENDS

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

Sehr geehrte Leserin,
sehr geehrter Leser,

Das NAFEMS Magazin es hat sich zur Aufgabe gesetzt, Hersteller und Nutzer von Simulationssoftware näher zusammenzubringen und eine Plattform zu bilden für den Austausch von neuen Ideen, Erkenntnissen und Informationen. Über Erfahrungen hinsichtlich Sicherheit und Zuverlässigkeit der jeweiligen Methoden und Verfahren oder auch spezieller Werkzeuge wird aktuell berichtet. Die steigende Zahl von Eintragungen in die Verteilerliste sowie positive Resonanz der Leserschaft machen deutlich, dass das Magazin auch im 7. Erscheinungsjahr nichts an Attraktivität eingebüßt hat.

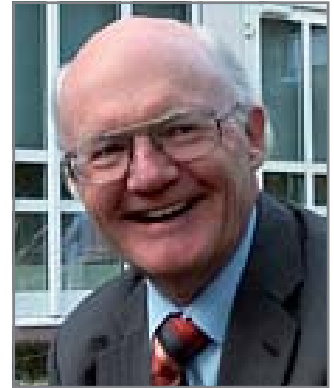
Simulation besteht im Wesentlichen aus drei Bestandteilen: Der Modellbildung, also der Beschreibung wesentlicher Seiten der Realität mit mathematischen Hilfsmitteln, dann der Umsetzung des Modells in numerische Gleichungssysteme und deren Lösung sowie schließlich der Interpretation der Ergebnisse und deren Prüfung hinsichtlich ihrer Relevanz in Bezug auf die Realität. Ich habe den Eindruck, dass der numerischen Umsetzung und der Gleichungslösung hinreichend Aufmerksamkeit geschenkt wird. Dagegen werden die Aspekte Modellbildung und Interpretation der Ergebnisse weniger intensiv behandelt. Das liegt sicher auch an der fehlenden Abstraktionsfähigkeit dieser Aufgaben. Um den Bezug zur praktischen Anwendung zu bewahren, ist aber die detaillierte Auseinandersetzung mit diesen Aspekten unerlässlich. Eine noch so gute und effiziente numerische Lösung eines unzureichenden Modells ergibt keine brauchbaren Resultate.

Das vorliegende Heft 20 enthält in seinem wissenschaftlichen Teil fünf Beiträge, welche auf Vorträgen bei NAFEMS-Seminaren in diesem Jahr beruhen. Aus dem Seminar Fortschritte in der Simulation von Composites wird einerseits das chemische und thermische Verhalten der Matrix beim Aushärten mikromechanisch untersucht, zum anderen wird ein semianalytisches Vorgehen zur Vorhersage von aushärtungsbedingten Verformungen vorgestellt, durch das die Werkzeuggeometrie entsprechend angepasst werden kann. Weiterhin wird über effizientere FEM-Netze durch eine Anpassung an die vorliegende Spannungsverteilung und deren Vorteile gegenüber Standard-Netzen berichtet. Das diesjährige CFD-Seminar legte den Schwerpunkt auf die Integration von Strömungsberechnungen in den Produktionsentwicklungsprozess. Für die Optimierung einer Mikropumpe mit Tesla-Ventilen wird besonders der Einfluss der Ventilgeometrie untersucht. Zudem werden Vor- und Nachteile von CAD-basierten Netzen für die CFD-Berechnung insbesondere in strukturnahen Bereichen diskutiert.

Ich wünsche Ihnen, dass Sie aus der Lektüre dieser Artikel viele neue Erkenntnisse gewinnen, die Sie nutzbringend anwenden können. Bitte beachten Sie auch die aktuellen Nachrichten über Kurse und Seminare sowie die Stellen- und Werbeanzeigen.

Mit freundlichen Grüßen

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



*Prof. Dr.-Ing.
Klaus Rohwer*

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



www.altair.com



www.simulia.com/de



www.esi-group.com



www.intes.de



www.mscsoftware.com



Leading MBS Technology
for Technology Leaders

www.simpack.com

Über NAFEMS

NAFEMS ist eine not-for-profit Organisation zur Förderung der sicheren und zuverlässigen Anwendung von Simulationsmethoden wie FEM und CFD.

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

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

Mitglieder des internationalen NAFEMS Councils

C. Stavrinidis (Chairman), ESA, NL
 M. Zehn (Vice Chairman), (TU Berlin / Femcos mbH), D
 R. L. Dreisbach (The Boeing Company), USA
 D. Ellis, Idac Ltd., UK
 G. Miccoli, Imamoter, I
 S. Morrison, Lusas Ltd., UK
 P. Newton, GBE, UK
 M.-C. Oghly, Flowmaster, F
 A. Ptchelintsev, Nokia, FI
 A. Puri, Selex Sensors & Airborne Systems, UK
 J. Wood, Strathclyde University, UK

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

Mitglieder des deutschen NAFEMS Steering Committees

Dr.-Ing. W. Dirschmid (Consultant), Chairman
 Dr.-Ing. A. Gill (Ansys Germany GmbH)
 Dr.-Ing. R. Helfrich (Intes GmbH)
 Dipl.-Ing. G. Müller (Consultant, ehemals Siemens AG)
 Dr.-Ing. G. Müller (CADFEM GmbH)
 Dipl.-Ing. W. Moretti (Schindler Elevator Ltd)
 Dipl.-Ing. F. A. Muggli (Sulzer Innotec)
 Dipl.-Ing. F. J. H. Peeters (Abaqus Europe BV)
 Dipl.-Ing. A. Pfaff (MSC.Software GmbH)
 Prof. Dr.-Ing. K. Rohwer (DLR)
 Dr. A. Svobodnik (Konzept-X)
 Prof. Dr.-Ing. habil. M. Zehn (TU Berlin / Femcos mbH)

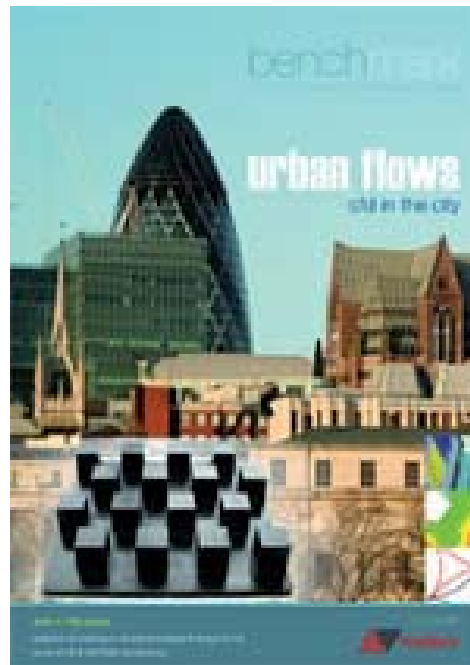
Mitglied bei NAFEMS?

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

NAFEMS Mitglieder erhalten unter anderem:

- Benchmark (Internationales FEM-Magazin)
- Literatur
- Freie Seminarplätze
- Ermäßigungen für Trainingskurse, Kongresse und Literatur
- Zugriff auf passwortgeschützten Webbereich mit Kontaktmöglichkeiten und Informationen
- Kontakt zu über 1.000 Organisationen weltweit

Werden auch Sie Mitglied !



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

- Adaptive Re-meshing in Structural Analysis - Part 2
 - Atmospheric Modeling
 - Design for Ice
 - Icons of CFD: Prof. Suhas Patankar
 - NAFEMS Conferences 2012
- ... sowie regelmäßige Rubriken und Features:
- The CAE Guy
 - CAE News

Die nächste Ausgabe erscheint im Januar 2012.

Jetzt abonnieren – für Mitglieder natürlich frei!

www.nafems.org

Impressum

Editor-in-Chief

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

Redaktioneller Beirat

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

Redaktion

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

Gestaltung / Layout / Anzeigen

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

Bezugspreis / Aboservice

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

Anzeigenpreise

Preisliste vom 01.01.2011

Verteilung / Bezug

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

Copyright © 2011, Werbos GbR.

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

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

Vorwort des Editor-in-Chief.....2
Sponsoren3
NAFEMS / Mitgliedschaft.....4
NAFEMS DACH Aktuell
Die nächsten Trainingskurse7
Werden Sie NAFEMS Trainer7
Schreiben Sie ein Buch - Invitation 2 Tender7
Literatur / e-Library7
e-Learning7
Trainingskurs: Einführung in die praktische Anwendung der FEM.....8
Trainingskurs: Introduction to CFD Analysis: Theory & Applications.....9
NAFEMS deutschsprachige Konferenz 2012..... 10 - 11
Weitere NAFEMS Konferenzen 2012 12
NAFEMS Mitgliedschaft - Details 13
Stellenanzeigen (s.u.) 14 - 20
Neuigkeiten.....21 - 30
Veranstaltungskalender 31

Fachbeiträge zu Composites

Kompensation faserverbundspezifischer Fertigungsdeformationen
im Werkzeug – Ein semi-analytischer Simulationsansatz32 - 42
E. Kappel, D. Stefaniak, C. Hühne (DLR e.V.)

Mikroskalensimulation des Herstellungsprozesses von
Faserverbundwerkstoffen zur Analyse chemisch und thermisch
induzierter Eigenspannungen43 - 57
C. Brauner, T. B. Block, C. Hoffmeister, A. S. Herrmann
(Faserinstitut Bremen e.V.)

Adaptive Finite-Elemente-Methode von anisotropen
3D-Verbundstrukturen58 - 67
M. Weise, H. Schmidt, M. Klärner, M. Kausch, L. Kroll
(Technische Universität Chemnitz)

Fachbeiträge zu Strömungsberechnungen (CFD)

CFD-Simulation zur Optimierung einer Mikropumpe
mit Tesla-Ventilen68 - 75
R. Schadwill, E. Bürk, M. Giousouf (Festo AG & Co. KG);
F. Rüdiger (Technische Universität Dresden)

Theoretische Grundlagen der CFD-Technologie für CAD-basierte
Strömungssimulationen im Product Lifecycle Management (PLM)-
Prozess76 - 86
I. Weinhold (Mentor Graphics GmbH)

Rückmeldeformular 87

Stellenanzeigen

ANSYS Germany GmbH..... 14
FE-Design GmbH.....20
Germanischer Lloyd SE 15
NAFEMS20
P+Z Engineering GmbH..... 16
Simpack GmbH.....17 - 18
Kompetenzzentrum Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsges.mbH 19

Werbeanzeigen

CADFEM GmbH.....23
Ceetron AS.....25
Mentor Graphics GmbH27
NAFEMS 6, 12



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

Instituto Tecnologico de Aragon

Creating Awareness | Delivering Education | Stimulating Standards



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

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

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

**Get Involved.
Join NAFEMS Today.**

www.nafems.org

Die nächsten NAFEMS Trainingskurse

Einführung in die praktische Anwendung der FEM

Wiesbaden, D

23. - 25. Jan. 2012

Bamberg, D - im Rahmen der deutschsprachigen NAFEMS Konferenz

07. - 09. Mai 2012

Inhalte und Infos auf Seite 8

Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications

Bamberg, D - im Rahmen der deutschsprachigen NAFEMS Konferenz

08. - 09. Mai 2012

Inhalte und Infos auf Seite 9

Werden Sie NAFEMS Trainer

NAFEMS wird das Angebot an Trainingskursen regional und international ausbauen und sucht Ingenieure aus Industrie und Hochschule, die gerne (nebenbei) als Referenten arbeiten möchten: Bei Interesse senden Sie bitte eine e-mail an info@nafems.de

www.nafems.org/tutors

Schreiben Sie ein Buch – Invitation 2 Tender

NAFEMS publiziert regelmäßig Fachbücher - werden Sie Autor!

www.nafems.org/publications/tender/

Literatur

Über 200 Fachpublikationen im Berechnungsumfeld.

www.nafems.org/publications

e-Library

Literatur für Mitglieder zunächst im Versuch zum Download.

www.nafems.org/publications/e-library

Höchst effektiv

www.nafems.org/e-learning

e-Learning

Die NAFEMS e-Learning Trainingskurse ermöglichen eine schnelle, höchst effektive und kostengünstige Einführung in die entsprechenden Fachthemen. Sie dienen vor allem dazu, Grundlagen zu vermitteln, die wichtig für die sichere und zuverlässige Anwendung kommerzieller Softwareprogramme sind.

- **Basic FE Analysis**

Nächster Termin:

12. Januar (4 Wochen)

Der e-Learning-Kurs eignet sich für Konstrukteure, die sich FEM-Grundlagen aneignen möchten. Er kann auch als Basis für den 3-tägigen NAFEMS Trainingskurs „Einführung in die praktische Anwendung der FEM“ dienen.

- **Essentials of Fluid Mechanics for CFD**

Nächster Termin:

29. November (4 Wochen)

- **Practical Introduction to CFD**

Nächster Termin:

24. Januar (4 Wochen)

- **Dynamic FE Analysis**

Nächster Termin:

siehe Web

- **Composite FE Analysis**

Nächster Termin:

siehe Web

- **Fatigue & Fracture Mechanics in FE Analysis**

Nächster Termin:

siehe Web

- **Structural Optimization in FE Analysis**

Nächster Termin:

17. Januar (4 Wochen)

- **Non-Linear Analysis**

Nächster Termin: siehe Web

Referenten

Tony Abbey, Kamran Fouladi.

Beide haben über langjährige Erfahrung in der praktischen Anwendung.

Werden Sie NAFEMS Trainer

NAFEMS wird das Angebot an Trainingskursen regional und international ausbauen und sucht Ingenieure aus Industrie und Hochschule, die gerne (nebenbei) als Referenten arbeiten möchten:

- FEM, CFD, MBS etc. – Grundlagen und Advanced
- Classroom und/oder e-learning
- Deutsch und/oder Englisch

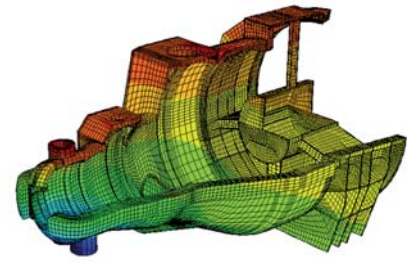
Kontakt und Informationen

Wenn Sie Interesse haben, als Referent zu arbeiten, senden Sie bitte eine e-mail an

info@nafems.de.

3-tägiger NAFEMS Trainingskurs FEM

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



23. - 25. Januar 2012 in Wiesbaden / 07. - 09. Mai in Bamberg / auch als Inhouse-Kurs buchbar

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

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

Inhalte

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

Referent



Dr. sc. techn. ETH/SIA
Yasar Deger

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

Kurssprache

Deutsch

Inhouse-Kurs

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

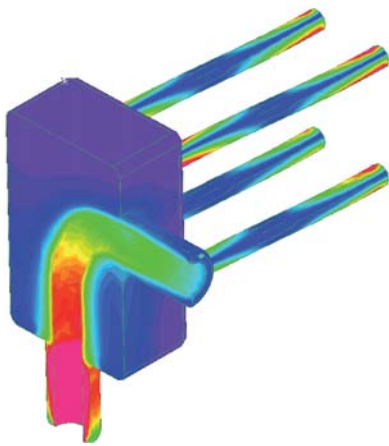
www.nafems.org/events/

2-tägiger NAFEMS Trainingskurs CFD

Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications

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

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



Inhalte

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

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

Kursprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

Inhouse-Kurs

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

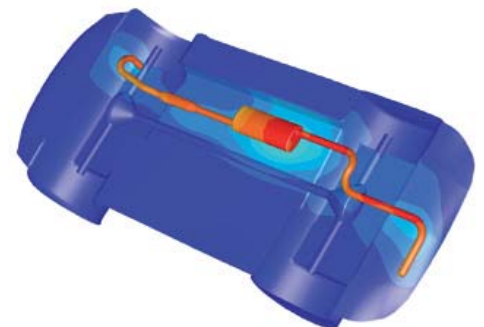
www.nafems.org/events/

Referent



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.
Uwe Janoske

Herr Janoske hat langjährige, breitgefächerte Erfahrung in der Praxis auf dem Gebiet der Strömungsberechnung. An der Bergischen Universität Wuppertal vertritt er das Fachgebiet für Strömungsmechanik und ist über zahlreiche Forschungsprojekte und Industriekooperationen in unterschiedlichsten Anwendungen der Strömungsberechnung aktiv.





NAFEMS DEUTSCHSPRACHIGE KONFERENZ 12

8. – 9. MAI | BAMBERG, DEUTSCHLAND

BERECHNUNG UND SIMULATION – ANWENDUNGEN, ENTWICKLUNGEN, TRENDS

Call for Papers / Ankündigung

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

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

Die Finite-Element-Methode ermöglicht es, beispielsweise die Lebensdauer dynamisch beanspruchter Bauteile zu prognostizieren, aber auch das Crashverhalten komplexer Fahrzeugstrukturen. In Verbindung mit immer schnelleren Rechnern können verlässliche Aussagen zu Strömungsphänome-

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

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

Im industriellen Umfeld muss die Simulationstechnologie in die Arbeitsprozesse integriert werden. Die Arbeitsabläufe müssen so gestaltet sein, dass die für die Berechnungen benötigten Informationen (Geometrie, Belastungen, Material usw.) aktuell und zeitgerecht verfügbar sind. Eine wesentliche Vorausset-

zung dafür sind sorgfältig festgelegte Prozesse, die die Schnittstellen zu CAD, zu den Analyse- bzw. Auswerteverfahren und den Testergebnissen berücksichtigen. Eine besondere Bedeutung kommt dabei dem Datenmanagement zu.

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

Keynote-Vorträge

Wir freuen uns über die Zusage für Keynote-Vorträge von Herrn **Dr.-Ing. Ralph Sundermeier, Volkswagen AG**, und von **Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Wriggers, Universität Hannover**.

Erwünschte Beiträge

Beiträge, die interessante oder beachtenswerte industrielle Anwendungen, Weiterentwicklungen in der Technologie oder Theorie, zur Sicherung der Ergebnisqualität, zur Verbesserung des Datenmanagements

und der Systemintegration sowie zur Verbesserung der Aus- und Weiterbildung auf diesem Gebiet beinhalten, werden zu folgenden Themenkreisen erbeten:

- Strukturmechanik
 - Lineare und nichtlineare Statik
 - Lineare und nichtlineare Dynamik
 - Betriebsfestigkeit
 - Hochgeschwindigkeitsbelastungen
 - Mehrkörperdynamik
 - Berechnungen zu Verbindungstechniken
- Strömungsmechanik
 - Inkompressible und kompressible Strömungen
 - Mehrphasenströmungen
 - Turbomaschinenströmungen
 - Strömungstechnische Optimierung
 - Validierung numerischer Modelle
 - Tribologie
- Elektrotechnik
 - Berechnung elektromagnetischer Felder
 - EMV
 - Energiespeicher
- Akustik
- Multiphysik
 - Co-Simulation
 - Systemintegration
- Werkstoffe
 - Einbindung von Verbundwerkstoffen und Nanomaterialien in die Strukturberechnung
 - Materialmodelle
- Stochastik
- Optimierung
- Schnittstellen im CAE-Prozess
 - CAD-CAE-Kopplung
 - Simulationsverfahren im Prozess des PLM, Datenmanagement (SDM)
 - Verifikation mit Test, Validierung zur Qualitätssicherung
 - Datenformate (STEP, ...)
- Simulation von Fertigungsprozessen (Urformen, Umformen, Verbinden, ...)
- Aus- und Weiterbildung
- High Performance Computing (HPC)



Welcome Kongresshotel Bamberg

Einreichung von Abstracts

Wir freuen uns auf Ihren 1/2-seitigen, deutschsprachigen Titel + Abstract per e-mail an info@nafems.de bis zum

1. Februar 2012

Extended Abstract

Nach Festlegung der Agenda erhalten Sie eine entsprechende Bestätigung. Für den Tagungsband benötigen wir ein „Extended Abstract“ von typischerweise 2 - 4 Seiten in deutscher Sprache. Bitte übersenden Sie uns dieses bitte bis

13. April 2012

Vortragsdauer

Die Vortragsdauer beträgt voraussichtlich 25 Minuten inklusive Diskussion.

Begleitende Trainingskurse

Geplant sind „Advanced Kurse“ durch Experten im zeitlichen Umfeld der Konferenz sowie Basis-Trainingskurse zu CFD und FEM parallel zur Konferenz. Alle Kurse können unabhängig von der Konferenzteilnahme gebucht werden.

Ausstellung / Sponsoring

Bitte fordern Sie Informationen zu den Ausstellungs- und Sponsoringmöglichkeiten an.

Veranstaltungsort / Hotel

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

Teilnahmegebühren

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

Tagungssprache

Deutsch und Englisch

Konferenzwebseite

www.nafems.org/dach2012

Bitte informieren Sie interessierte Kolleginnen und Kollegen.

Weitere NAFEMS Konferenzen 2012



NAFEMS NORDIC
CONFERENCE **'12**
22 – 23 MAY | **GOTHENBURG, SWEDEN**
ENGINEERING SIMULATION: BEST PRACTICES, NEW DEVELOPMENTS, FUTURE TRENDS

www.nafems.org/nordic2012



NAFEMS UK
CONFERENCE **'12**
30 – 31 MAY | **LINCOLNSHIRE, UK**
ENGINEERING SIMULATION: REALISING THE POTENTIAL

www.nafems.org/uk2012



NAFEMS FRANCE
CONFERENCE **'12**
5-6 JUIIN | **PARIS, FRANCE**
SIMULATION NUMÉRIQUE: MOTEUR DE PERFORMANCE

www.nafems.org/france2012

ONE
ASSOCIATION
1 0 0 0 MEMBER
ORGANISATIONS

ONE
VISION
3 0 0 TECHNICAL
GROUP PARTICIPANTS

ONE
COMMUNITY
O V E R 3 0 0 0
EVENT ATTENDEES

ONE
NAFEMS
THE INTERNATIONAL
ASSOCIATION FOR
THE ENGINEERING
ANALYSIS COMMUNITY



www.nafems.org



Membership to suit you

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

Site membership

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

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

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

Corporate membership

Tailored membership for large companies with multiple locations

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

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

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

Small company membership

Cost-effective membership for small to medium sized enterprises

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

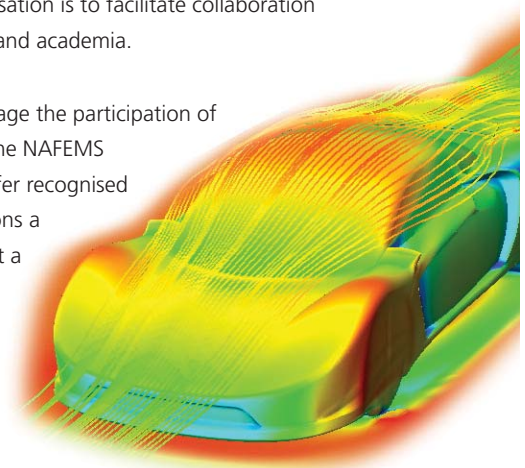
Small Company Membership is tailored to the specific needs of small to medium sized enterprises, and can also be appropriate in areas without a NAFEMS Regional Group.

Academic membership

Offering the benefits of site membership to recognised academic institutions

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

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



www.nafems.org/one

ANSYS**DE****... Herausfordernd**

Wir machen Dich
mitverantwortlich
für unseren Erfolg.

... Modern

Bei uns gestaltest Du
deinen Arbeitsplatz
als Teil des Teams.

... Sicher

Als Marktführer
blicken wir mit Dir
in eine erfolgreiche
Zukunft.

... Angenehm

Du wirst dich
wohl fühlen.

Versprochen!**Aktuell suchen wir:**

- Customer & Sales Support Engineers
für die Bereiche Elektromagnetik & CFD
- Account Manager / Sales Representatives
& Genies aus allen Bereichen

Bewirb dich jetzt:

- jobs-germany@ansys.com

Mehr Info unter:

- www.ansys.com

Realize Your Product Promise™

GL Group



Der Germanische Lloyd ist eine international erfolgreiche Unternehmensgruppe für die Bereiche Prüfung, Zertifizierung und Beratung. Unser Dienstleistungsportfolio umfasst Angebote für die maritime Branche sowie die Industrie mit den Schwerpunkten in den Segmenten Öl, Gas und Renewables. Durch das Angebot und die Entwicklung von technischen high-end Lösungen nehmen wir eine Spitzenposition im globalen Wettbewerb ein und sind für unsere Kunden ein kompetenter Partner für exzellente Qualität und Sicherheit. Mit einem expandierenden Netzwerk von weltweit mehr als 7.000 Mitarbeitern in 80 Ländern bieten wir vielfältige Möglichkeiten für Ihre individuelle Karriereplanung in einem dynamischen Unternehmensumfeld!

Sachverständiger für Maschinenbau und FEM (m/w)

Stellenbeschreibung:

- Aufstellung der FEM Simulationsmodelle
- Prüfung maschinenbaulicher Strukturen von Windenergieanlagen
- Durchführung computergestützter Modellanalysen (CAE)
- Durchführung von Festigkeitsberechnungen
- Erstellung von Prüfgutachten
- Kommunikation mit den Herstellern sowie Zulieferern von Windenergieanlagen
- Prüfung der Herstellerdokumentation
- Inspektion von Bauteilen für Windenergieanlagen in Herstellerbetrieben

Qualifikationen:

- Erfolgreich abgeschlossenes Studium des Maschinenbaus oder vergleichbare Qualifikation
- Berufserfahrung in Festigkeitsberechnungen mittels Finite-Elemente-Methode (FEM)
- Vertiefte Kenntnisse in einem der Bereiche Maschinenbau, Fertigungstechnik, Material und/ oder Windenergie
- Teamfähigkeit und Flexibilität
- Sicheres Auftreten
- Hohe Eigenverantwortlichkeit
- Sehr gute Englisch-Kenntnisse
- Gute MS-Office-Kenntnisse

Es erwarten Sie vielseitige, herausfordernde Aufgaben in einem dynamisch wachsenden Unternehmen mit hervorragenden Perspektiven. Selbstverständlich fördern wir Ihre Entwicklung und bieten Ihnen umfangreiche soziale Leistungen.

Interessiert? Dann bewerben Sie sich online! Ihr Ansprechpartner ist Frau Iris von Breymann. Weitere spannende Stellenanzeigen finden Sie unter Stellenangebote Renewables.

Bauingenieur für Stahlbaustrukturen im Bereich Windenergieanlagen (m/w)

Stellenbeschreibung:

- Durchführung von bautechnischen Prüfungen und Analysen
- Begutachtung der bautechnischen Komponenten (Stahlbau) von Windenergieanlagen onshore und offshore

Qualifikationen:

- Dipl.-Ingenieur der Fachrichtung konstruktives Bauingenieurwesen oder ähnliche Qualifikation
- Berufserfahrung im Bereich Bautechnik, idealerweise Stahlbau und Windenergie
- Vorzugsweise Erfahrung mit Berechnungssoftware (RStab, RFEM, ANSYS)
- Die Zusatzqualifikation zum Schweißfachingenieur ist wünschenswert
- Gute fachbezogene Englisch- und MS-Office-Kenntnisse
- In hohem Maße eigenverantwortliche Arbeitsweise
- Sicheres Auftreten gegenüber Kunden
- Teamfähigkeit und Flexibilität

Germanischer Lloyd SE
www.gl-group.com
Tel.: +49 40 36149 3010
careers@gl-group.com



Extreme
Belastbarkeit

Technische Berechnung & Simulation

P+Z Engineering GmbH ist ein führender Anbieter für Entwicklungsdienstleistungen. Seit über 40 Jahren begleiten und unterstützen wir unsere Kunden in unseren Kompetenzbereichen Konstruktion, Technische Berechnung & Simulation, Erprobung & Versuch, Elektrik & Elektronik sowie Projekt- & Qualitätsmanagement.

P+Z Engineering ist mit zweihundert Ingenieuren im Kompetenzbereich **Technische Berechnung & Simulation** einer der größten Anbieter von CAE-Dienstleistungen in der virtuellen Produktentwicklung und bietet seinen Mitarbeitern seit drei Jahrzehnten erstklassige Entwicklungsmöglichkeiten auf diesem Gebiet.

Um unsere Aktivitäten an unseren Standorten in München, Ingolstadt, Stuttgart, Köln, Bremen, Wolfsburg und Augsburg weiter auszubauen und unsere technologische Entwicklung weiter voran zu treiben, suchen wir:

- **Berechnungsingenieure – Experte Crash Berechnung (m/w)**
- **Entwicklungsingenieure Simulation Strukturmechanik (m/w)**
- **Berechnungsingenieure Fahrwerk / Fahrdynamik (m/w)**
- **Berechnungsingenieure Mehrkörpersimulation (m/w)**
- **Berechnungsingenieure CFD / Thermische Analysen / Klimatisierung (m/w)**
- **Berechnungsingenieure „Fatigue & Damage Tolerance“ (m/w)**
- **Berechnungsingenieure NVH (m/w)**
- **Team-/ Gruppenleiter NVH und Festigkeit (m/w)**

Haben wir Ihr Interesse geweckt? Dann senden Sie uns bitte Ihre Unterlagen mit Angabe Ihres bevorzugten Standortes, Ihres Themenschwerpunktes und folgender Referenznummer M-400-400 via E-Mail an karriere@puz.de.

Weitere Stellenangebote finden Sie unter: www.puz.de/karriereportal/

Weitere Informationen zur Stelle, unserem Unternehmen und Ihren Entwicklungsmöglichkeiten erhalten Sie bei unserem HR-Team (Tel.: +49 (0)89 / 3 18 57-501) oder unter www.puz.de



P+Z Engineering GmbH · Anton-Ditt-Bogen 3 · 80939 München
Tel.: + 49(0)89/318 57- 501 · Fax: + 49(0)89/318 57- 355 · karriere@puz.de · www.puz.de
We are a key member of the ARRK global network.



Leading MBS Technology
for Technology Leaders

SIMPACK

Stellenangebot

AUTOMOTIVE

Die SIMPACK AG ist ein international tätiges und stark expandierendes Unternehmen im Bereich Mehrkörperdynamik. Für unsere Kunden aus der Fahrzeugtechnik, Windenergie und dem allgemeinen Maschinenbau entwickeln und vermarkten wir die weltweit führende Mehrkörper-Simulationssoftware SIMPACK. Mit SIMPACK wird das Bewegungsverhalten und die Belastung von mechanischen und mechatronischen Systemen simuliert. SIMPACK wird weltweit von Premiumherstellern eingesetzt.

Arbeiten Sie dort wo andere Urlaub machen. Die SIMPACK AG liegt im Herzen des Fünf-Seen-Land, südwestlich von München. Zum weiteren Ausbau unseres technologischen Vorsprungs haben wir folgende Vollzeitpositionen ab sofort zu besetzen:

Projekt- und Supportingenieur (m/w) — Automotive mit Universitäts- oder vergleichbarem Abschluss

Allgemein:

Die Stelle wird als Vollzeitstelle (40h/Woche) angeboten und ist ab sofort zu besetzen.

Tätigkeiten:

- Konzeption, Erstellung und Dokumentation von SIMPACK Simulationsmodellen und Analyseprozessen in dem Bereich Fahrzeugsimulationen
- Durchführung von anspruchsvollen Simulationsprojekten im Auftrag unserer Kunden, v.a. im Bereich Fahrzeugsimulation,

aber auch im allgemeinen Maschinenbau, Windenergie und Antriebstechnik

- Qualifizierter technischer Support unserer Kunden
- Durchführung von Anwendertrainings

Qualifikationen:

- Abgeschlossenes Hochschulstudium im Bereich Maschinen- / Fahrzeugbau oder Mechatronik oder Techno-Mathematik
- Freude an Modellierung und Simulation im Bereich der Technischen Mechanik
- Idealerweise Kenntnisse im Bereich Kraftfahrzeugfahrzeugsdynamik, Motormechanik und / oder Maschinendynamik
- Idealerweise Kenntnisse in der Anwendung von Software zur Mehrkörpersimulation (SIMPACK, ADAMS, VL-Motion),

FE-Programmen (z.B. ABAQUS, ANSYS, NASTRAN), CAD Programmen (CATIA) und MATLAB® und Simulink®

- Idealerweise Programmierkenntnisse (Vorzugsweise Fortran, C / C++) und / oder Kenntnisse in Scriptsprachen (z.B. QT Script)
- Gute bis sehr gute Kenntnisse in Englisch
- Deutsch auf Muttersprachenniveau
- Offenes und präzises Kommunikationsverhalten

Wir bieten:

- Kundenorientiertes Arbeiten
- Ein technologisch spannendes und abwechslungsreiches Betätigungsfeld
- Gute Atmosphäre, angenehmes und leistungsorientiertes Klima
- Herausfordernde Projekte im Auftrag unserer innovativen Kunden

im deutschsprachigen Raum sowie europa- und weltweit

- Sorgfältige Einarbeitung und Vorbereitung auf Ihre Aufgaben
- Hohe Eigenverantwortung in einem dynamischen Unternehmen
- Leistungsgerechtes Gehalt

Wenn dieses Profil auf Sie zutrifft, senden Sie bitte Ihre kompletten Bewerbungsunterlagen in elektronischer Form an Herrn Jan Zeman: jan.zeman@SIMPACK.de.

Wir freuen uns, Sie kennen zu lernen.

SIMPACK AG, Friedrichshafener Straße 1, D-82205 Gilching (bei München), Tel.: +49 (0)8105 77266-0, Fax: +49 (0)8105 77266-11, info@SIMPACK.de, www.SIMPACK.com



Leading MBS Technology
for Technology Leaders

SIMPACK

Stellenangebot

ENGINE

Die SIMPACK AG ist ein international tätiges und stark expandierendes Unternehmen im Bereich Mehrkörperdynamik. Für unsere Kunden aus der Fahrzeugtechnik, Windenergie und dem allgemeinen Maschinenbau entwickeln und vermarkten wir die weltweit führende Mehrkörper-Simulationssoftware SIMPACK. Mit SIMPACK wird das Bewegungsverhalten und die Belastung von mechanischen und mechatronischen Systemen simuliert. SIMPACK wird weltweit von Premiumherstellern eingesetzt.

Arbeiten Sie dort wo andere Urlaub machen. Die SIMPACK AG liegt im Herzen des Fünf-Seen-Land, südwestlich von München. Zum weiteren Ausbau unseres technologischen Vorsprungs haben wir folgende Vollzeitpositionen ab sofort zu besetzen:

Projekt- und Supportingenieur (m/w) — Engine mit Universitäts- oder vergleichbarem Abschluss

Allgemein:

Die Stelle wird als Vollzeitstelle (40h/Woche) angeboten und ist ab sofort zu besetzen.

Tätigkeiten:

- Konzeption, Erstellung und Dokumentation von SIMPACK Simulationsmodellen und Analyseprozessen in dem Bereich Motorsimulationen in der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie
- Durchführung von anspruchsvollen Simulationsprojekten im Auftrag unserer Kunden, v.a. im Bereich Motorsimulation bei

- Automobil- und Nutzfahrzeugen, aber auch im allgemeinen Maschinenbau, Windenergie und Antriebstechnik
- Qualifizierter technischer Support unserer Kunden
- Durchführung von Anwendertrainings

Qualifikationen:

- Abgeschlossenes Hochschulstudium im Bereich Maschinen-/Fahrzeugbau oder Mechatronik oder Techno-Mathematik
- Freude an Modellierung und Simulation im Bereich der Technischen Mechanik
- Idealerweise Kenntnisse im Bereich Kraftfahrzeugdynamik, Motormechanik und / oder Maschinendynamik
- Idealerweise Kenntnisse in der Anwendung von Software zur Mehrkörpersimulation (SIMPACK, ADAMS, VL-Motion),

- FE-Programmen (z.B. ABAQUS, ANSYS, NASTRAN), CAD Programmen (CATIA) und MATLAB® und Simulink®
- Idealerweise Programmierkenntnisse (Vorzugsweise Fortran, C / C++) und/oder Kenntnisse in Scriptsprachen (z.B. QT Script)
- Gute bis sehr gute Kenntnisse in Englisch
- Deutsch auf Muttersprachenniveau
- Offenes und präzises Kommunikationsverhalten

Wir bieten:

- Kundenorientiertes Arbeiten
- Ein technologisch spannendes und abwechslungsreiches Betätigungsfeld
- Gute Atmosphäre, angenehmes und leistungsorientiertes Klima
- Herausfordernde Projekte im Auftrag unserer innovativen Kunden

- im deutschsprachigen Raum sowie europa- und weltweit
- Sorgfältige Einarbeitung und Vorbereitung auf Ihre Aufgaben
- Hohe Eigenverantwortung in einem dynamischen Unternehmen
- Leistungsgerechtes Gehalt

Wenn dieses Profil auf Sie zutrifft, senden Sie bitte Ihre kompletten Bewerbungsunterlagen in elektronischer Form an Herrn Axel Dewes: axel.dewes@SIMPACK.de.

Wir freuen uns, Sie kennen zu lernen.

SIMPACK AG, Friedrichshafener Straße 1, D-82205 Gilching (bei München), Tel.: +49 (0)8105 77266-0, Fax: +49 (0)8105 77266-11, info@SIMPACK.de, www.SIMPACK.com

virtual vehicle

KARRIERE IN DER FORSCHUNG

Der Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten am VIRTUAL VEHICLE liegt auf der Entwicklung neuer Technologien, Methoden und Werkzeuge einzelner CAE-Disziplinen, der virtuellen Produktentstehung, der multidisziplinären Optimierung sowie der gekoppelten Simulation. Angewandte Forschung sowie geförderte Forschungsprojekte mit Brückenfunktion zwischen Universität und industrieller Vorentwicklung stehen dabei im Mittelpunkt. Die Verknüpfung der am VIRTUAL VEHICLE gebündelten Kompetenzen bildet eine einzigartige Forschungsplattform.

Wir suchen engagierte Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen:

Jobs in Südbayern (München & Ingolstadt)

Entwicklungsingenieur/in im Bereich Gesamtfahrzeugsimulation

Jobs in Österreich (Graz)

Prüfstandsingenieur/-in thermische Messtechnik

Gruppenleitung Mobile Air Conditioning

Versuchingenieur/in - Prüfstandsmessungen

Senior/Lead Engineer „NVH Motor/Antriebsstrang“

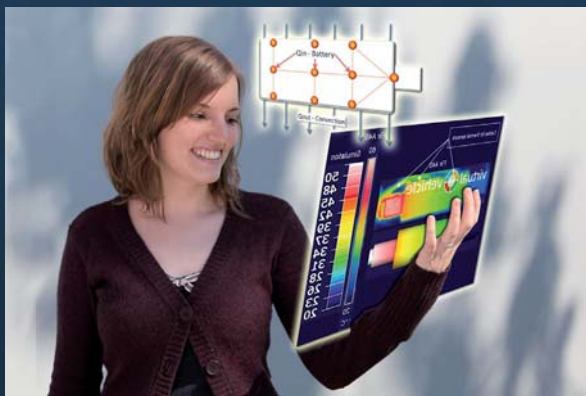
Junior Researcher „Strukturmechanik, NVH“

Junior Researcher „Reibungsreduktion - Simulation/Messung im Fachgebiet Tribologie“

Junior Researcher „LKW-Vorbeifahrtsgeräusch-Simulation“

Senior/Lead Engineer Vehicle Dynamics/Mechatronics

Lead Researcher „Vehicle Safety“



Kompetenzzentrum – Das Virtuelle Fahrzeug
Forschungsgesellschaft mbH

Human Resources

Inffeldgasse 21/A

8010 Graz

AUSTRIA

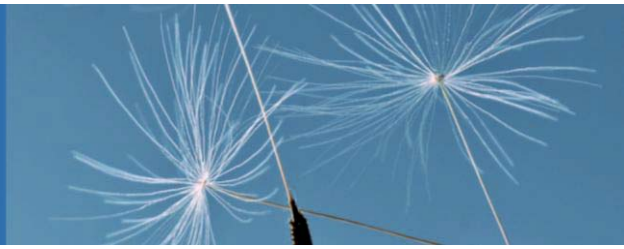
hr@v2c2.at

www.v2c2.at



the optimization company

Natürlich optimiert.



Heben Sie ab und kommen Sie weiter – mit **FE-DESIGN**.

Wir, die Optimierungsspezialisten im CAE-Umfeld, bieten Ihnen spannende Aufgaben aus allen Bereichen des Ingenieurwesens. Bei uns finden Sie den richtigen Platz zur Entfaltung Ihres Potentials, egal ob in **Karlsruhe, München, Hamburg, Sofia** oder **Chicago**. Unterstützen Sie uns in der Technologieberatung großer Automobilhersteller und Engineering-Unternehmen aus vielen anderen Branchen im Bereich der Simulation und Optimierung.

Suchen Sie abwechslungsreichen Themenstellungen und neue Herausforderungen? Wir bieten Ihnen ausgezeichnete und individuelle Entwicklungsmöglichkeiten.

Projektleiter – CAE und Optimierung (m/w)

Projektingenieur – CAE und Optimierung (m/w)

Projektingenieur – CFD und Optimierung (m/w)

Alle Informationen zu den ausgeschriebenen Stellen finden Sie unter www.fe-design.de oder kontaktieren Sie uns direkt unter info@fe-design.de. Wir freuen uns auf Sie.

NAFEMS
Course
Tutors
Required

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

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

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

ALTAIR ENGINEERING

HyperWorks Partner Alliance erweitert das Softwareangebot

Altair Engineering, Inc. kündigte die Unterzeichnung von vier neuen Vereinbarungen mit weiteren Softwarepartnern der HyperWorks Partner Alliance (HWP) an. Die Engineering Software Research & Development, Inc. (ESRD) plant noch im Dezember 2011 die Veröffentlichung ihres Spannungsanalyse-Werkzeuges „StressCheck“. Die Key to Metals AG wird ihre umfassende Metalldatenbank im Januar 2012 veröffentlichen. Ontronix wird seine Software OntoSpace zum Management von Komplexität und ThermoAnalytics seine Software RadTherm für thermische Simulationen und Wärmeübertragung Ende des ersten Quartals 2012 zur Verfügung stellen. HyperWorks Kunden können dann über die Webseite www.hyperworksalliance.com auf diese Anwendungen zugreifen. Bis Ende 2011 werden der HWP über 100 neue Kunden beigetreten sein. Damit wird die Zahl der Kunden, die seit der Einführung des Partnerprogramms in 2008 über das flexible Lizenzierungssystem Altairs auf die Produkte der HWP zugreifen, erstmals die Gesamtanzahl von 500 deutlich überschreiten. Altair Kunden haben über die sogenannten HyperWorks Units Zugriff auf die komplette Suite der HyperWorks Produkte sowie auf eine ständig wachsende Anzahl an Partneranwendungen. Dank dieses Lizenzierungssystems steht den Altair Kunden das größte und umfassendste Angebot an CAE Anwendungen zur Verfügung - ohne zusätzliche Kosten oder eine langfristige Bindung.

Perkins wählt solidThinking Inspired für Strukturoptimierung

Altair Engineering, Inc., kündigte an, dass der internationale Motorenhersteller Perkins solidThinking Inspired eingesetzt hat, um das Design industrieller Motorkomponenten zu optimieren. „Perkins ist für zuverlässige und langlebige Industriemotoren bekannt“, sagte Martin Dirker, Engineering Team

Leader bei Perkins Engines. „Wir haben nach einem erschwinglichen Werkzeug für die Optimierung unserer Motoraufhängung gesucht, um das gewünschte Steifigkeitsniveau zu erreichen und gleichzeitig die gesamte Iterationszeit beim Design zu verkürzen.“ Perkins hat 2011 in die dreidimensionale Konzeptdesignsoftware solidThinking Inspired investiert, um damit seine Entwürfe in kürzester Zeit visualisieren, untersuchen und beurteilen zu können.

Altair ProductDesign und Studio X-GENE entwickeln gemeinsam ein elektrisches Konzeptfahrzeug

Altair Engineering Inc., gab die erfolgreiche Zusammenarbeit von Altair ProductDesign, seiner Abteilung für Produktentwicklung, mit dem taiwanesischen Automobil-Design-Beratungsunternehmen Studio X-GENE bekannt. Ziel der Zusammenarbeit war die Entwicklung eines neuen elektrischen Konzeptfahrzeuges AVANT GT. Beim AVANT GT handelt es sich um eine rein elektrische Sportlimousine, welche auf der Auto Shanghai 2011 erstmals präsentiert wurde. Das AVANT GT Projekt wurde von Studio X-GENE mit seinen Partnern Delta Electronics, Wistron und Qisda ins Leben gerufen, um die vorhandene Fachkompetenz und Erfahrung im Bau einer Elektrofahrzeugplattform unter Beweis zu stellen. Altair ProductDesign wurde in das Projekt eingebunden, um die Fahrzeugentwicklung voranzutreiben. Altairs Verantwortung lag hierbei im simulationsgetriebenen Designansatz zur Auslegung des Fahrzeuges im Bereich Crash, Betriebsfestigkeit, Schwingungsanalyse, Fahrdynamik und Luftwiderstandsuntersuchungen mittels CFD. Altair unterstützte weiterhin Studio X-GENE in der grundlegenden Konzeptphase.

www.altair.de

ANSYS

Aktuelle Neuigkeiten siehe „CADFEM“

www.ansys-germany.com

ANSYS USER CLUB

Neuer Internetauftritt und neue Veranstaltungsstruktur

Der deutsche ANSYS User Club e. V. wurde 1988 in Würzburg als AUC gegründet und ist seit 1998 ein eingetragener Verein. Traditionell lädt dieser seit 1991 zu einem Workshop ein, bei dem Teilnehmer über ANSYS diskutieren und Wünsche zur Weiterentwicklung formulieren. In diesem Jahr wurde nun die Struktur der Veranstaltung geändert sowie eine neue Internetseite erstellt (www.auc-ev.de). Die Veranstaltung gliedert sich nun in folgende Teile: Firmenbesichtigung, Impulsvorträge als Grundlage der Anwenderdiskussion, Mitgliederversammlung mit Informationen über die Arbeit des Vorstandes und Vereinsdaten, Vorträge zu Neuigkeiten der ANSYS-Produkte und Sammlung von Entwicklungswünschen, die an ANSYS weitergegeben werden. Die Workshops haben sich als wichtige Diskussionsplattform für die kleinen und großen Probleme der Anwender entwickelt. Die zwanglose Atmosphäre spricht immer wieder neue Anwender an und die Teilnehmerzahl liegt im Mittel bei 45 Teilnehmern. Die neu gestaltete Internetseite beinhaltet die Rubrik „ANSYS Geschichte und Dienstleistungen“ sowie einen geschützten Mitgliederbereich mit aktuellen Informationen, der Entwicklungswunschliste, Anwenderinformationen mit Präsentationen zu Neuerungen der ANSYS-Produkte, Veranstaltungshinweise, Beiträge von Mitgliedern und Interessantes aus Foren zu den Themen Strukturmechanik, Strömungsmechanik, Magnet- und elektrische Felder und Akustik. Weiterhin gibt es Links zu den verschiedenen Foren zur ANSYS-Anwendung, zu Software rund um ANSYS, eine Literaturliste, Zugangsbeschreibung zur IMA Materialdatenbank, Stellenangebote sowie eine Bildergalerie und Kurioses.

www.auc-ev.de

AUTODESK

Nachhaltige Produktentwicklung in Autodesk Inventor

Granta Design kündigt die Vollversion seiner Software Eco Material Adviser an, die Ende des Jahres zur Verfügung steht. Diese baut auf den in Autodesk Inventor 2012 integrierten Modulen zur nachhaltigen Produktentwicklung auf und ist für Inventor Anwender kostenlos. Mit dem Eco Materials Adviser in Autodesk Inventor können Konstrukteure die Umweltverträglichkeit eines geplanten Produkts beurteilen und nachhaltige Entwicklungsentscheidungen treffen. Mit der ab Ende des Jahres bei Granta Design erhältlichen Komplettversion können nun auch größere Baugruppen analysiert werden. Zudem steht eine umfangreiche Materialdatenbank zur Verfügung, mit deren Hilfe die Materialauswahl im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit genau untersucht werden kann. Mit dem Eco Materials Adviser in Autodesk Inventor kann die ökologische Auswirkung einer Komponente oder einer Baugruppe bereits während der Entwicklungsphase analysiert werden. So zeigt das leicht ablesbare „Dashboard“ Schlüsselindikatoren wie Energieverbrauch, toxische Substanzen, CO₂-Fußabdruck, Wasserverbrauch und Materialkosten an. Jeder Inventor Anwender ist somit in der Lage interaktiv zu überprüfen, wie sich Änderungen in der Materialauswahl und am Entwurf der digitalen Prototypen auf die Nachhaltigkeit auswirken.

www.autodesk.de

BETA CAE SYSTEMS

Neue Versionen von µETA 6.7.1 und ANSA 13.2.0

BETA CAE Systems S.A. gab die Verfügbarkeit der Version µETA v6.7.1 sowie der Version ANSA v13.2.0 bekannt.

www.beta-cae.gr

CADFEM

Simulationen als Erfolgsrezepte

Mit über 1.000 Teilnehmern auf der „ANSYS Conference & 29. CADFEM Users´ Meeting“ konnten die Veranstalter, die CADFEM GmbH und ANSYS Germany, in diesem Jahr einen zweistelligen Zuwachs gegenüber dem Vorjahr verbuchen. Viele der Gäste aus Industrie, Forschung und Hochschule – darunter erfahrene Simulationsspezialisten, aber auch Interessierte, die den Einstieg in die Technologie planen – waren begeistert von der Fülle an Informationen, die während der Veranstaltung vermittelt wurden. Während der Anwenderkonferenz, die vom 19. bis 21. Oktober 2011 im Internationalen Congresscenter Stuttgart stattfand, präsentierten viele Firmenvertreter von markt-führenden Unternehmen wie sie Simulationslösungen als ihr Erfolgsrezept verwenden und sich nach und nach ein wachsendes Nutzenpotenzial erschließen. In mehr als 200 Vorträgen sowie 26 halbtägigen Kompaktseminaren wurden die aktuellen Möglichkeiten und auch zukünftige Entwicklungstrends der Simulationstechnologien dargestellt. Neben den bisherigen Hauptanwendungen der numerischen Simulation – nämlich der Strukturmechanik, der Strömungsmechanik und der Elektromechanik & Hochfrequenztechnik – rücken Multiphysik & Systemsimulation immer mehr ins Zentrum des Anwenderinteresses. Schon während des Eröffnungsplenums betonte James E. Cashman, der CEO von ANSYS, dass die Strategie von ANSYS gemäß der Devise „Engineering the System“ ausgerichtet ist, um damit die Nutzung von virtuellen Prototypen noch effizienter zu realisieren. Anschließend berichteten Simulationsspezialisten der BMW Group und der Kolbenschmidt Pierburg AG über die Kleinserienfertigung von Elektromotoren für den elektrischen Antrieb des BMW ActiveE beziehungsweise über die erfolgreiche Produktentwicklung durch Einsatz numerischer Simulation und dem damit verbundenen Kosten/Nutzen-Verhältnis. Die folgenden

Fachvorträge und Industriesessions beschäftigten sich unter anderem mit den Anwendungsbereichen der Elektromobilität & Batterieentwicklung, des Werkzeugmaschinenbaus, der Windkraft und der Elektronik, aber auch der Biomechanik & Medizin sowie des Bauwesens & Green Buildings. In einem der Abschlussvorträge visualisierte Prof. Ruder vom Institut für Astronomie und Astrophysik der Uni Tübingen relativistische Effekte, die Albert Einstein sicher auch gerne gesehen hätte. Ergänzend dazu konnte im Ausstellungsbereich der Konferenz mit einem „Einstein-Fahrrad“ in annähernder Lichtgeschwindigkeit virtuell durch Tübingen gefahren werden. Eine reale Probefahrt konnte dagegen mit den Elektro-Sportwagen Tesla Roadster unternommen werden, der in weniger als 4 Sekunden auf 100 km/h beschleunigen kann. Außerdem stand ein Opel Ampera zur Begutachtung bereit. Weitere Fahrzeuge präsentierten vier Studententeams, die sich am Wettbewerb Formula Student beteiligt hatten. All diese Fahrzeuge, die in der Ausstellung zu sehen waren, wurden mit Hilfe der ANSYS Software entwickelt und optimiert. Insgesamt beteiligten sich über 30 ausstellende Firmen, darunter die Hauptsponsoren HP, Intel, Fujitsu, EnginSoft und NVIDIA.

C.A.V.E. – Kollaborationslösung für große ANSYS Result-Dateien

Hochgenaue Simulation basieren auf immer komplexeren Modellen, die in der Folge große Result-Dateien nach sich ziehen. Die Lösung VCollab bietet die Möglichkeit, ANSYS Result-Dateien für die Visualisierung signifikant zu verkleinern. Durch die Einbindung in die ANSYS Workbench (C.A.V.E. – Compression And Visualization Engine) ist eine nahtlose Integration der Kollaborationslösung VCollab in den ANSYS Simulationsprozess sichergestellt.

www.cadfem.de

CD-ADAPCO

STAR-Cast v1.10

STAR-Cast bietet ein umfassendes und intuitives Verfahren zur Durchführung mehrphasiger Gießsimulation - flüssig, fest und gasförmig - darunter gekoppelter Wärmetransport, hohe Auflösung der Füllung, freie Oberflächenfragmentierung, Bewegung eingeschlossener Gasblasen in der Schmelze und natürliche Konvektion in Schmelze und Gas. Die neueste STAR-Cast-Version enthält Erweiterungen für Hochdruckguss, Formschalen für Feinguss, Auslaufvorhersagen für Feinguss und eine Werkstoff-Datenbank.

Batterie-Simulations-Team

CD-adapco führt ein mit dem Department of Energy mitfinanziertes Simulations-Projektteam an, um Pionierarbeit bei Techniken für Lithium-Ionen-Batterie-Modellierung zu leisten und die hergestellte Technologie mit den Prototyp-Batterien der industriellen Partnerschaftsunternehmen zu validieren.

Für Elektromaschinen: SPEED

Im Juni 2011 erwarb CD-adapco die Elektromaschinensoftware SPEED. Die Version von 2011 ist mit über 350 Verbesserungen erhältlich.

www.cd-adapco.com

CEETRON

GLview Express 3D Viewer für iPad and iPhone

GLview Express ist ein unabhängiger, interaktiver standalone 3D Viewer für die Präsentation und Weitergabe von 3D Modellen und Ergebnissen aus FEM- und CFD-Berechnungen. Das Produkt ermöglicht volle 3D Interaktivität und bietet eine High Performance Grafik. CAE-Modelle können einfach per E-mail, Dropbox oder im iCloud auf das iPad oder das iPhone hochgeladen werden. Laden Sie die kostenlose Version von GLview Express aus dem App-Store herunter.

www.ceetron.com



Gebrauch: anrff.com / Foto: libana - Fotolia

Berufsbegleitend zum Master of Engineering

Applied Computational Mechanics

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

HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN FH
INGOLSTADT



esocaet

europaean school of
computer aided engineering
technology

COMSOL**Cmsol Multiphysics 4.2a auf Anwenderkonferenz vorgestellt**

Cmsol hat auf seiner fünften jährlichen Europäischen Anwenderkonferenz mit der Version 4.2a ein umfassendes Update seiner marktführenden Modellierungs- und Simulationsumgebung Cmsol Multiphysics vorgestellt. Mit Version 4.2a erschienen zwei neue Produkte, das Particle Tracing Modul und der LiveLink für Creo Parametric, sowie zahlreiche andere neue Funktionen, die den Anwendern von Cmsol Multiphysics und seiner Zusatzmodule eine leistungsfähigere Modellierung bieten.

Neues Geomechanics Modul

Die Cmsol Multiphysics GmbH kündigte die Veröffentlichung des Geomechanics Moduls an. Mit dem neuen Erweiterungsmodul können Anwender von Cmsol Multiphysics die leistungsstarke Simulationsumgebung sowohl für geotechnische Anwendungen als auch im Bauwesen nutzen, z. B. für Untersuchungen von Hangstabilität, Versagensvorhersagen im Tunnelbau, Haltestrukturen und Erdarbeiten. Das Geomechanics Modul bietet passende Anwendungen zur Untersuchung von Plastizität, Deformation und Versagen von Erdreich und Gestein sowie deren Wechselwirkungen mit Beton- oder anderen von Menschen geschaffenen Strukturen. Das Modul umfasst eine Vielzahl an Materialmodellen, baut auf dem Structural Mechanics Zusatzmodul von Cmsol Multiphysics auf und kann nahtlos mit allen anderen Cmsol Modulen kombiniert werden.

www.comsol.de

DASSAULT SYSTÈMES**Abaqus 6.11-3**

Aus Gründen der Synchronisation mit Entwicklungszyklen anderer DS-Produkte wird das nächste Maintenance Release Abaqus 6.11-3 für Mitte Januar 2012 erwartet.

Erfolgreiche Simulia Konferenz

Die deutsche Simulia-Konferenz fand am 19. und 20. September in Bamberg statt. Die gelungene Veranstaltung bot den über 150 Teilnehmern in rund 35 hochwertigen Anwendervorträgen und mit einer begleitenden Fachausstellung einen guten Überblick über aktuelle Anwendungen der Simulia-Produkte. Umrahmt von einem festlichen Abendessen konnten die Teilnehmer während der beiden Tage wertvolle Erfahrungen mit anderen Fachbesuchern und Simulia-Mitarbeitern austauschen.

www.3ds.com

DYNAMORE**Erfolgreiches LS-DYNA Forum 2011**

Das LS-DYNA Forum stand in diesem Jahr im Zeichen des 10-jährigen DYNAMore Firmenjubiläums. So fand am 12. Oktober ein integriertes Entwicklerforum statt, bei dem Programmentwickler von LS-DYNA und LS-OPT ihre neusten Arbeiten vorstellten und für Diskussion und Anregungen zur Verfügung standen. Bei einer Festveranstaltung am Abend des 12. Oktober durfte DYNAMore 220 Gäste begrüßen. Am nächsten Tag besuchten dann fast 300 Teilnehmer das LS-DYNA Forum, bei dem zahlreiche Fachvorträge zu Themen wie Fahrzeugsicherheit, Materialversagen, Composites, Prozess- und Datenmanagement, Metallumformung, etc. großen Anklang fanden. DYNAMore bedankt sich herzlich bei allen Vortragenden, Teilnehmern, Ausstellern und bei den Firmen Siemens PLM Software, transtec, Panasas und T-Systems als Sponsoren des Forums. Die Vorträge des Entwicklerforums stehen zum Download unter <http://www.dynamore.de/dokumente/papers-1/eforum11> zur Verfügung. Die Vorträge des LS-DYNA Forums folgen Anfang Dezember.

www.dynamore.de

ESI GROUP**Auszeichnung bei NUMISHEET 2011 Konferenz in Korea**

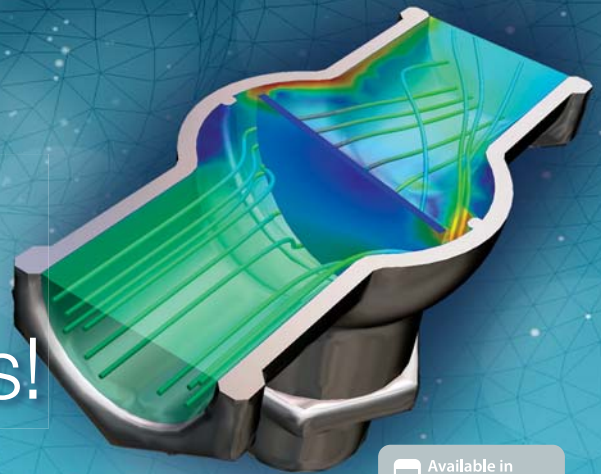
ESI Group gab bekannt, dass anlässlich der NUMISHEET 2011 Konferenz der Ingenieur Jan Novy für seine jüngsten Simulationsergebnisse ausgezeichnet wurde. Novy benutzte die PAM-STAMP 2G Sheet Metal Forming Simulation Suite von ESI. Wissenschaftler, Ingenieure und industrielle Anwender der numerischen Simulation von Blechumformungsprozessen trafen sich im Juni zum achten Mal seit 1989 auf der NUMISHEET-Konferenz in Seoul, Korea. Im Mittelpunkt der Veranstaltung standen in diesem Jahr die Herausforderungen beim Einsatz von Leichtbaumaterialien und hochfesten Werkstoffen, die angesichts der Bemühungen von Unternehmen, zu grünen Technologien zu wechseln, zunehmend an Bedeutung gewinnen. Jan Novy, in der Tschechischen Republik ansässiger ESI-Experte auf dem Gebiet der Blechumformung, erzielte die besten Ergebnisse bei der NUMISHEET Benchmark-Studie, in der die Genauigkeit von Simulationen im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen geprüft wurde. Sein Vortrag mit dem Titel „Simulation der Zipfelformung bei Prozessen des Abstreckziehens.“ belegte den ersten Platz unter insgesamt 10 Teilnehmern. Für die Simulation benutzte Jan Novy mit dem Vegter-Materialmodell ein äußerst genaues Modell, das von Tata Steel in Holland entwickelt wurde, um den Bedürfnissen der globalen Autoindustrie bezüglich eines verbesserten Materialmodells zur Simulation von Blechumformungsprozessen nachzukommen. Um den Abstreckziehprozess besser vorherzusagen, benutzte Jan Novy außerdem das neu entwickelte Through Thickness Stress Element (TTS) von PAM-STAMP 2G. Zusammen mit dem Vegter-Modell ermöglichte TTS eine genaue Vorhersage der Rückfederung nach dem Abstreckziehen.

Virtual Performance Solution 2011

Die neueste Version der Virtual Performance Solution wurde entwickelt, um den wichtigsten industriellen

ceetron
understanding by visualization

Excellent 3D visualization – at your fingertips!



Available in
App Store

Herausforderungen von heute zu begegnen. Wie berücksichtigt man die neuen Sicherheits- und Emissionsstandards für den Straßen-, Schienen- und Luftverkehr und reduziert gleichzeitig das Gewicht? Wie lässt sich der Einfluss neuer Materialien und Fertigungsprozesse auf Produktleistung und -verhalten vorhersehen? Wie kann man widersprüchliche Anforderungen in Einklang bringen und innovative Änderungen an immer komplexeren Produkten vornehmen und dabei gleichzeitig Entwicklungskosten und -dauer drastisch senken? Virtual Performance Solution 2011 ist prädestiniert für numerische Simulationen über unterschiedliche Anwendungsgebiete: Crash-, Aufprall- und Insassensicherheit, Passagierkomfort, lineare und nichtlineare Statik und Dynamik, Stabilität und thermisches Verhalten, Geräusch- und Schwingungsanalyse (Noise, Vibration, Harshness, NVH), und seit Neuestem auch Innenakustik. Zu den neu implementierten Erweiterungen zählt ein Glasmodell, um den Kopfaufprall auf die Windschutzscheibe eines Fahrzeugs zu simulieren, wie er vom Europäischen Programm zur Bewertung von Neufahrzeugen (EURO-NCAP) gefordert wird. Dieses neue Modell wurde von der Volkswagen AG umgehend eingesetzt.

Übernahme von IC.IDO

ESI Group gab die Übernahme der IC.IDO GmbH bekannt, dem führenden europäischen Anbieter immersiver Virtual Reality Lösungen. IC.IDO („ich sehe, ich mache“) ist ein in Deutschland beheimatetes Unternehmen mit Geschäftsaktivitäten und Kunden in Europa sowie in den USA. Das Unternehmen ist spezialisiert auf die Entwicklung kollaborativer Lösungen zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen und wendet sich vorrangig an Industrien, in denen hochwertige Produkte über mehrere Standorte entwickelt bzw. gefertigt werden. Die angebotenen virtuellen Technologien ermöglichen es den Kunden, Produktinformationen übersichtlich darzustellen, in Echtzeit zu manipulieren und auszutauschen und so herstellungs- und wartungsbezogene Aufgabenstellungen in einer immersiven und verteilten Umgebung zu lösen.

www.esi-group.com

EXA

PowerFLOW 4.3c auf Cray Supercomputern

Exa Corporation hat Version PowerFLOW 4.3c angekündigt, welche die Cray XE6 Supercomputer unterstützt.

www.exa.com

FE-DESIGN

FE-DESIGN gründet Niederlassung in Chicago, USA

FE-DESIGN GmbH gab die Gründung ihres neuen Tochterunternehmens FE-DESIGN Optimization, Inc. in Chicago, USA bekannt. Damit folgt das Unternehmen seinem konsequenten globalen Wachstumskurs. Das neue Büro wird sich ab sofort um den Softwarevertrieb in Nordamerika kümmern sowie allen dortigen Kunden Schulungen, kompetente Beratung und technischen Support rund um die beiden Produkte TOSCA Structure und TOSCA Fluid anbieten.

Release TOSCA Fluid Version 2.2.0 mit Schnittstelle zu CCM+
Druckverlustoptimierung von geführten Strömungen ist für die Industrie eine häufig zu lösende Aufgabe. Herkömmliche Verfahren

zur automatischen Optimierung sind typischerweise sehr aufwendig und in ihrem Potenzial zum Auffinden wirklich neuer Lösungen oftmals deutlich eingeschränkt. Mit TOSCA Fluid wird die Optimierung direkt während der CFD-Analyse durchgeführt und es wird nur ein einziger CFD-Solver-Lauf für die gesamte Topologieoptimierung benötigt – eine wirtschaftliche Optimierung für groß angelegte Kanalströmungsanwendungen ist so erstmals möglich. „Auf vielfachen Kundenwunsch hin haben wir eine Schnittstelle zu CCM+ entwickelt und stellen TOSCA Fluid nun einem noch breiteren Markt zur Verfügung“, sagt Dr. Markus Stephan, Produktmanager TOSCA Fluid. Die neue Version des modularen Tools für die Topologieoptimierung von Kanalströmungsproblemen bietet die volle Unterstützung des STAR-CCM+ CFD-Solvers in den Versionen 5 und 6. Diese wichtige funktionale Ergänzung ermöglicht auch Anwendern der CFD-Technologie CCM+, die Optimierungsstrategien von TOSCA Fluid einzusetzen. Durch den Einsatz von TOSCA Fluid in einer frühen Entwicklungsphase können kostengünstig und zuverlässig mögliche Produktpotenziale erkannt und gezielt ausgebaut sowie mögliche Schwachstellen im Vorfeld identifiziert und eliminiert werden. Neben naheliegenden Anwendungen wie Druckverlustverringerung für Motoren-, Abgas- und Klimasysteme erschließen sich gerade auch über die mit einer Verbesserung von ineffizienten Strömungsstrukturen einhergehenden Phänomene wie Geräuschreduktion, Strömungsvergleichmäßigung oder eine verringerte Ablagerungsneigung weitergehende Anwendungen, z. B. aus der Energietechnik, Verfahrenstechnik, Anlagentechnik und Medizintechnik.

www.fe-design.de

FRIENDSHIP SYSTEMS

Friendship-Framework V2.3

Friendship Systems hat die Verfügbarkeit der Version 2.3 der Software Friendship-Framework bekannt gegeben.

www.friendship-systems.com

GRANTA DESIGN

GRANTA MI Version: Kontrolle über Materialinformationen

Granta Design Ltd. hat die neueste Version von GRANTA MI veröffentlicht. Die Version 5 von GRANTA MI ermöglicht Fertigungsunternehmen mehr Kontrolle über grundlegende Materialinformationen und unterstützt die Entscheidungsfindung. GRANTA MI wurde in Zusammenarbeit mit branchenführenden Unternehmen wie Boeing, Emerson Electric, Eurocopter, GE, Honeywell, NASA, Rolls-Royce und TRW Automotive entwickelt. Neben Erweiterungen der grundlegenden Möglichkeiten im Materialdaten-Management bietet das Release neue Werkzeuge für Materialsubstitution – ein Hauptanliegen vieler Hersteller. Darüber hinaus gibt es neue Tools für die Verordnungen bei der Verwendung gefährlicher Stoffe, eine erweiterte Unterstützung von Design-Software und Datenbanken, die Verbundmaterialien, Kunststoffe, Stähle und spezielle Legierungen für die Automobilindustrie und Luft- und Raumfahrt abdecken.

CES Selector 2012

Granta Design Ltd. hat die Veröffentlichung einer neuen Version von CES Selector bekannt gegeben. Diese Softwareumgebung unterstützt Fertigungsunternehmen bei der Materialsubstitution aus Kosten-, Performance-, Beschaffungs- oder Umweltverträglichkeitsgründen. CES Selector 2012 bietet neue Möglichkeiten im Bereich Eco Design in frühen Entwicklungsphasen sowie für Verbundwerkstoff- und Stahlanwendungen. CES Selector ist eine PC-basierende Softwareanwendung, die umfassende Daten zu Materialeigenschaften mit leistungsstarken Analysewerkzeugen kombiniert. Diese wurden gemeinsam von der Universität Cambridge und Granta entwickelt. Der Fokus in dieser Version wurde auf neue Funktionen gelegt, die es erlauben, verschiedene Materialkennwerte schnell und einfach zu vergleichen. Technische, wirtschaftliche und umweltrelevante Eigenschaften können mit vom Anwender definier-

ten Referenzmaterialien verglichen und die wichtigsten Unterschiede hervorgehoben werden. Dadurch ist es nun wesentlich einfacher, Ersatzwerkstoffe zu identifizieren und zu bewerten.

www.grantadesign.com

IBM

IBM – nächste Generation von Supercomputern

IBM hat die nächste Generation des Supercomputers Blue Gene angekündigt. Der neue Blue Gene/Q wird eine ultra-skalierbare Rechenplattform bieten, die auch sehr umfangreiche Aufgabenstellungen schneller, energieeffizienter und zuverlässiger lösen kann als je zuvor möglich. Der Supercomputer wird voraussichtlich in der Lage sein, mit höherer Genauigkeit als bisher beispielsweise den Weg eines Hurrikans vorherzusagen, den Meeresboden nach Öl abzusuchen oder Gensequenzen zu dekodieren. Der Blue Gene/Q-Supercomputer arbeitet ungefähr bis zu zehnmal schneller als vorherige Systeme und repräsentiert die dritte Generation der Blue Gene-Supercomputer-Familie. In dem Computer kommt eine 16-Multi-Processing-Kern-Technologie zum Einsatz. Zudem bietet er eine skalierbare Spitzenleistung von voraussichtlich bis zu 100 Petaflop/s, was einen massiven Sprung nach vorne im Parallel-Computing-Bereich darstellt. Blue Gene/Q ist eine Plattform für hochkomplexe Projekte in einem breiten Spektrum an Anwendungsgebieten in Forschung und Technik.

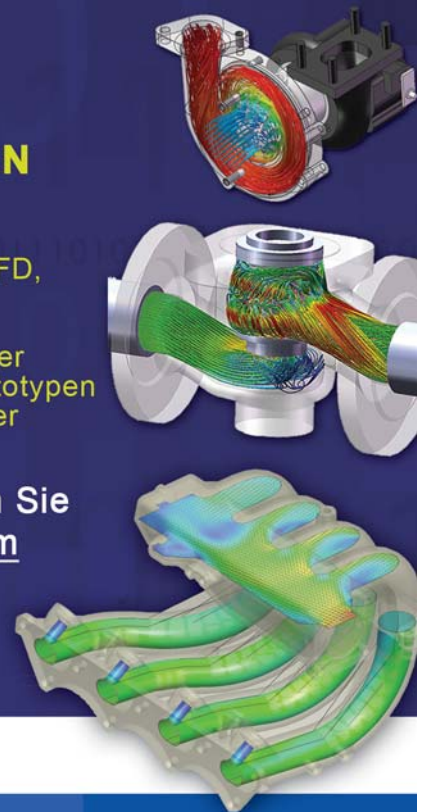
Neue IBM Einstiegsserver

IBM hat eine Reihe neuer Einstiegsserver angekündigt, die interessante Rechenleistung zu günstigen Konditionen ermöglichen. Die neuen System x Rack- und Tower-Server zeichnen sich durch hohe Effizienz, Leistungsstärke und Zuverlässigkeit aus und decken somit die Bedürfnisse wachsender kleiner und mittelständischer Unternehmen. IBM System x3100 M4 heißt der neueste Zuwachs der IBM x86-Tower-Server-

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

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

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



www.mentor.com/mechanical

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

**Mentor
Graphics**

Familie. Es handelt sich hierbei um ein kompaktes, leises, Single-Socket-System. Dank neuem Intel Xeon-Prozessor der E3-1200-Serie verfügt der Server über eine bis zu 30 Prozent höhere Leistungsfähigkeit im Vergleich zu früheren Modellen. Der IBM System x3100 M4 wurde entwickelt, um auch Kleinunternehmen hohe Zuverlässigkeit und Leistung zu einem erschwinglichen Einstiegspreis anbieten zu können.

www.ibm.com

KOMPETENZZENTRUM VIF

Entwicklungspartner mit Gesamtfahrzeugverständnis

Sieben Milliarden Menschen bevölkern die Erde, und der Bedarf der Menschheit an individueller Mobilität wächst. Entscheidende Fragen, mit welchen Fahrzeugen und Antriebskonzepten dieser Bedarf an Mobilität nachhaltig, effizient und umwelt-schonend erfüllt werden kann, sind

größtenteils ungeklärt. Das Virtual Vehicle hat das vorrangige Ziel und vor allem die Kompetenz als einzigartiger Entwicklungspartner mit Gesamtfahrzeugverständnis gemeinsam mit der internationalen Fahrzeugindustrie Antworten auf diese entscheidenden Zukunftsfragen zu liefern. Die Expertise des Grazer Forschungs- und Entwicklungszentrums umfasst aufbauend auf der Entwicklung der Komponenten von zukünftigen Fahrzeugkonzepten und dem Leichtbau besonders die effiziente Gesamtfahrzeugentwicklung - von reinen E-Fahrzeugen über Hybrid- und Wasserstofflösungen bis natürlich hin zu Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmotoren. Beispiele der Forschungsschwerpunkte des K2 Zentrums Virtual Vehicle sind: Leisbare Mobilitätskonzepte, eine möglichst effiziente Fahrzeugentwicklung und integrierte Sicherheit.

www.v2c2.at

LMS

LMS kauft Samtech

Der Entwicklungspartner für Automobilbau und Luftfahrt LMS mit Hauptsitz im belgischen Leuven hat im August mit 60 Prozent die Kontrollmehrheit an dem europäischen Anbieter von Softwarelösungen für CAE und Strukturanalysen Samtech übernommen. „Kein anderer Anbieter liefert vergleichbare Softwareprodukte und technische Dienstleistungen für die Produktinnovation bei Hightech-Unternehmen aus den Bereichen Mechanik und Mechatronik“, sagt Dr. Urbain Vandeurzen, Vorstandsvorsitzender und CEO von LMS. Für LMS sei der Zukauf ein strategisch logischer Schritt gewesen. „Samtech und LMS ergänzen sich hervorragend. Das wird die Stellung von Samtech auf dem Gebiet der Strukturanalyse, mit linearer und nicht-linearer CAE-Simulation, der Strukturoptimierung und der gekoppelten Berechnungen unterschiedlicher physikalischer Art

erheblich stärken“, erklärt CEO Eric Carnoy. Samtech hinzugerechnet, erwirtschaftete LMS mit seinen Projekten im Jahr 2011 einen Umsatz von rund 175 Millionen Euro und beschäftigt 1150 Mitarbeiter in über 40 Zweigstellen in Europa, Nord- und Südamerika sowie Asien.

www.lmsgermany.com

MSC.SOFTWARE

SimManager 2012 für effektives Simulationsdaten- und Prozessmanagement

Die MSC Software Corporation hat SimManager 2012 angekündigt. Die neue Version besitzt noch effektivere Funktionen für die CAE-Prozessautomatisierung und automatische Simulations-Berichterstellung. Ingenieure können so noch mehr CAE-Analysen effizient durchführen und ihre Arbeit besser strukturieren. Dies bringt im Vergleich zu manuellen Simulationsverfahren erhebliche Beschleunigung und Kapazitätserweiterung mit sich. Planmäßig wird die neue Version Ende November verfügbar. SimManager 2012 stellt für verschiedene Industrien CAE-Standardworkflows bereit. Im Automobilbereich können zum Beispiel Crash-, NVH-, Insassensicherheit- oder Fußgängersicherheit automatisiert werden. Diese Prozessautomatisierung steigert erheblich den gesamten CAE-Durchsatz und verkürzt viele Designzyklen. So können CAE-Berechnungsteams wesentlich mehr Projekte in deutlich kürzerer Zeit verwirklichen. In der Luft- und Raumfahrt werden CAE-Standardworkflows wie Global-Local-Analysen, Triebwerksberechnungen, Detailbauteilanalysen, Subkomponent- oder Komponentenanalysen in automatische Prozesse eingebunden. So können die Analysen konsistent über sogenannte „Best-Practices“ durchgeführt und im Anschluß Reports automatisch erzeugt werden. Das führt zu erheblichen Einsparungen von Entwicklungszeit und -kosten und gibt Freiraum für neue Innovationen. Auch andere Branchen wie die

Konsumgüterindustrie, der Schiffbau oder die Verpackungsindustrie setzen SimManager ein, um physikalische Tests zu minimieren und durch virtuelle Versuche zu ersetzen und zu verfeinern.

SimXpert 2012 für multidisziplinäre Simulationen

Die MSC Software Corporation präsentierte die neue Version von SimXpert 2012. Mit dieser Version können Ingenieure unterschiedlichste multidisziplinäre Simulationen in einer integrierten Benutzerumgebung ausführen. SimXpert 2012 enthält neue Tools, die Einarbeitung und Modellaufbereitung verkürzen. Die Version soll im Dezember verfügbar sein.

Adams 2012 für Mehrkörper-simulationen

Die MSC Software Corporation gab die Markteinführung von Adams 2012 bekannt. In der neuen Version wurde die Benutzeroberfläche komplett überarbeitet und ein neuer Modellbrowser für die vereinfachte Modellbearbeitung eingeführt. Flexible Körper können nun automatisch in der Adams/View Oberfläche generiert werden, um effizient Modelle mit hoher Wiedergabetreue zu unterstützen. Zudem ist ein neues innovatives Reifenmodell verfügbar, das die große Auswahl an Standardmanövern und Fahrbahnprofilformaten für die Gesamtfahrzeugsimulation abrundet.

MSC Nastran 2012 für realitätsnahe Simulationen

Die MSC Software Corporation präsentierte MSC Nastran 2012. Die neue Version vereint die bisher getrennten Softwarepakete MSC Nastran und MD Nastran in einer Lösung. Dank des vereinfachten Produktangebots steht den Anwendern künftig eine einzige Plattform für Nastran Berechnungen zur Verfügung. MSC Software bündelt damit die Produktentwicklung und kann effektiver an der Verbesserung der Software arbeiten.

Marc 2011 für nichtlineare Strukturberechnungen und Multiphysics-Analysen

Die MSC Software Corporation präsentierte die neue Version des Finite Elemente (FE)-Programmes Marc. Mit dieser benutzerfreundlicheren und schnelleren Version können jetzt auch Ingenieure mit weniger Berechnungserfahrung nichtlineare Analysen sofort produktiv einsetzen. Gleichzeitig hält die Version 2011 für bereits erfahrene Marc-Anwender zahlreiche neue Funktionalitäten bereit, beispielsweise für die Berechnung von Rissfortschritt, Bruchmechanik oder Composites.

Übernahme von Akustik-simulationsspezialist

Free Field Technologies (FFT)

Die MSC Software Corporation gab die Übernahme von Free Field Technologies (FFT) bekannt. FFT ist ein global agierendes Unternehmen mit Hauptsitz in Belgien und mit der Softwarefamilie Actran Spezialist für Akustiksimulation und die Berechnung von Schwingungs- und Geräuschdämpfung in Fahrzeugen (Noise, Vibration, Harshness - NVH). Die Lösungen von FFT werden im Fahrzeugbau, der Luft- und Raumfahrt, im Konsumgüterbereich und vielen weiteren Industriezweigen eingesetzt. Die Software von FFT wird mit den bereits bestehenden NVH-Lösungen von MSC Nastran verknüpft. MSC Software kann so eine umfassende Lösung für Akustik- und NVH-Berechnungen anbieten.

www.mssoftware.com

NEC DEUTSCHLAND

Neuer Geschäftsführer

Michael Stückmann (47) hat am 1. September die Geschäftsführung der NEC Deutschland GmbH übernommen. Er berichtet direkt an Naoki Iizuka, President & CEO der NEC Europe Ltd. in London. Michael Stückmann leitet in seiner neuen Position die Aktivitäten der Tochtergesellschaft des japanischen Technologiekonzerns Nippon Elec-

tric Company (NEC) in Deutschland, Österreich und in der Schweiz. Er bringt mehr als 19 Jahre Management- und Vertriebserfahrung bei internationalen Konzernen der ITK-Branche mit. Michael Stückmann kommt von der ZTE Deutschland GmbH; bei dem chinesischen Hersteller von Telekommunikationstechnik und Netzwerklösungen war er als Chief Operating Officer (COO) für die Restrukturierung des Infrastruktursegments sowie für den Ausbau der Beziehungen mit Kunden wie Vodafone und Deutsche Telekom verantwortlich. Zuvor hatte Michael Stückmann die Italtel Deutschland GmbH gegründet. Bei diesem Spin-Off der Telekom Italia (unter Beteiligung von Cisco Systems) steuerte er als Country Manager und COO den Auf- und Ausbau des Unternehmens in Deutschland und Zentraleuropa. Seine Berufslaufbahn hatte Michael Stückmann vor 19 Jahren im Vertrieb der NCR GmbH begonnen und war später in Deutschland, Eindhoven und Paris im Management von Philips tätig.

www.nec.com/de

NVIDIA

NVIDIA Maximus revolutioniert Design-Workflow

Designer und Ingenieure suchen bereits seit langem nach einer Workstation-Lösung, die eine simultane Verarbeitung komplexer Analysen und Visualisierung ermöglicht. Mit der neuen Maximus-Technologie von NVIDIA ist dies nun möglich. NVIDIA Maximus ermöglicht durch die Kombination der professionellen 3D-Grafikleistung der NVIDIA-Quadro-GPUs und der massiv-parallelen Rechenleistung des Prozessors NVIDIA Tesla C2075 die simultane Durchführung interaktiver grafik- und rechenintensiver Verarbeitungen. Designer bei BMW mussten bisher beispielsweise für das Rendering ihrer Modelle und Arbeitsergebnisse auf Server-Farmen zugreifen. Mit NVIDIA Maximus können sie dafür jetzt die Desktop-Power nutzen. Die Rendering-Zeit, die eine NVIDIA-Maximus-basierte Workstation für eine spezielle Aufgabe benötigt, war

bisher nur mit 120 CPU-Kernen auf einem Shared-Cluster realisierbar.

www.nvidia.com

SCIENCE + COMPUTING

Erfreuliches Geschäftsjahr

Die science + computing ag kann auf ein erfreuliches Geschäftsjahr 2010/11 zurückblicken: Das Unternehmen steigerte seinen Umsatz und sein Ergebnis. Auch neue Mitarbeiter konnten eingestellt werden. Dennoch sucht das Tübinger Unternehmen weiterhin an allen vier Standorten Personal. Als Mitglied der französischen Bull-Gruppe entwickelt sich science + computing weiter erfolgreich: Der Umsatz nahm im abgelaufenen Geschäftsjahr um 7,4% auf 26,66 Mio. Euro (Vorjahr 24,82 Mio. Euro) zu. Die Belegschaft wuchs dabei von 250 auf 258 Mitarbeiter. Nach dem Abschwung 2009 hat die Automobilindustrie 2010 wieder in IT investiert. Im Kerngeschäft IT-Dienstleistungen konnte science + computing bei Stammkunden wie Daimler mehrjährige Serviceverträge abschließen. Auch für deutsche Unternehmen mit Außenstellen in Indien oder China leistet science + computing jetzt von Deutschland aus IT-Dienstleistungen. Des Weiteren wurde das Unternehmen für Kosteneinsparungsprojekte mit Hilfe von Outsourcing oder Standardisierungen beauftragt. Neben der Automobilindustrie konnte science + computing auch wieder in der Mikroelektronikindustrie wachsen und arbeitet seit diesem Jahr neu unter anderem für Lantiq und Intel Mobile Communications. In der Zusammenarbeit mit dem Mutterkonzern Bull hat s+c verschiedentlich eine wichtige Rolle gespielt: beispielsweise bei einem HPC-Projekt für eine spanische Bank zusammen mit Bull Spanien oder bei der Verwirklichung eines der leistungsfähigsten Höchstleistungscomputer in Europa mit über 1600 vernetzten Rechnern bei der RWTH Aachen zusammen mit Bull Deutschland. „Für das aktuelle Geschäftsjahr sind wir vorsichtig optimistisch“, so Dr. Ingrid Zech, im Vorstand für die Finanzen verant-

wortlich. „Wir rechnen im 2. Halbjahr 2011 mit einem Wachstum von mindestens 5%.“ Wichtig dafür ist es aber, weiter qualifiziertes Personal zu finden. So gibt es momentan an allen vier Standorten unbesetzte Stellen.

www.science-computing.de

SIEMENS PLM SOFTWARE

Übernahme von Vistagy Inc.

Durch die Übernahme von Vistagy Inc. mit Sitz in Waltham, Massachusetts, USA, erweitert Siemens sein Industriesoftware-Portfolio mit einem der führenden Anbieter von spezieller Software für das Design und die Fertigung moderner Verbundwerkstoffe. Eine entsprechende Vereinbarung wurde Anfang November unterzeichnet. Mit dieser Akquisition kann Industry Automation, eine Division des Siemens-Sektors Industry, seine weltweit führende Position bei Industriesoftware weiter ausbauen. Über den Kaufpreis für Vistagy wurde Stillschweigen vereinbart. Die Übernahme steht unter dem Vorbehalt der zuständigen Behörden, das Closing der Transaktion soll noch in diesem Kalenderjahr erfolgen.

Neues Solid Edge Internet-Portal

Siemens PLM Software hat Zuge der Präsentation seiner aktuellen Softwareversion Solid Edge ST4 ein neues Internet-Portal für Zulieferteile für die Solid Edge Software vorgestellt. Das Online-Portal ermöglicht den Zugang zu unzähligen 3D CAD-Modellen von Kaufteilen und Baugruppen im nativen Solid Edge Format. Durch den neuen Online-Katalog sparen Nutzer Zeit, die zuvor für die manuelle Modellierung von Kauf-, Zuliefer- oder Katalogteilen benötigt wurde. Ermöglicht wurde das Solid Edge Internet-Portal durch die Partnerschaft mit der CADENAS GmbH, um Solid Edge Kunden bei der Optimierung der Produktivität in der Konstruktion, der Produktqualität sowie einer schnellen Markteinführung ihre Produkte zu unterstützen.

NX 8 mit Erweiterungen und Fokus auf CAE-Funktionalität

Siemens PLM Software stellte eine neue Version von NX vor. NX ist die integrierte Lösung für Computer-Aided Design (CAD), Manufacturing (CAM) und Engineering (CAE). NX 8 wurde im CAE-Bereich umfangreich erweitert. Das betrifft auch die vielfach eingesetzte Software NX Nastran für anspruchsvollste Simulationsaufgaben. Die heute vorgestellten Neuerungen in NX CAE untermauern die führende Position unter den Simulationslösungen für die Produktentwicklung. Darüber hinaus stellt Siemens PLM Software neue Funktionen im gesamten Portfolio der Konstruktions- und Fertigungsmodulen von NX vor. Damit verfolgt das Unternehmen weiter seine High-Definition-PLM (HD-PLM)-Vision und erweitert sein Angebot im Bereich digitalen Fertigung, insbesondere für den Maschinenbau. „NX 8 ist eine bedeutende Weiterentwicklung eines der weltweit führenden integrierten Systeme für die Produktentwicklung“, erklärt Jim Rusk, Vice President Product Engineering Software bei Siemens PLM Software. „Unsere unübertroffene CAE-Lösung erlaubt es Anwendern jetzt noch besser, Probleme bereits in der virtuellen Welt zu erkennen und zu beheben – noch bevor sie zu realen Schwierigkeiten werden. Die Fähigkeit, Produkteigenschaften zu optimieren sowie die umfassenden NX-Erweiterungen für Konstruktion und Fertigung versetzen unsere Kunden in die Lage, schneller und kostengünstiger zu entwickeln und fundiertere Entscheidungen zu treffen. Bessere Produkte sind das Ergebnis.“

Neue Version Femap 10.3

Siemens PLM Software brachte eine neue Version von Femap auf den Markt. Dabei handelt es sich um den führenden Pre- und Postprozessor für die Finite-Elemente-Analyse (FEA) unter Windows-Betriebssystemen. Mit den Erweiterungen von

Femap 10.3 können Anwender einfacher und deutlich schneller mit Modellen arbeiten, denen eine komplexe Geometrie zu Grunde liegt. Außerdem bietet die Benutzeroberfläche mit neuen Funktionen besseren Support für NX Nastran, der umfangreichen FEA-Anwendung von Siemens PLM Software.

www.siemens.com/plm

SILICON GRAPHICS

Übernahme von Open CFD

SGI hat die Übernahme von Open CFD Ltd. (open source CFD) bekannt gegeben.

www.sgi.com

TECOSIM

„Top 100“-Gütesiegel

Der CAE-Ingenieurdienstleister TECOSIM Technische Simulation GmbH mit Hauptsitz in Rüsselsheim gehört zu den 100 innovativsten Mittelständlern Deutschlands 2011. So das Ergebnis der Wirtschaftsuniversität Wien, die nach einer strengen Vorauswahl das Innovationsverhalten von insgesamt 272 mittelständischen Unternehmen in Deutschland über mehrere Monate prüfte. Die 100 besten, darunter TECOSIM, tragen für ein Jahr das Gütesiegel „Top-Innovator“. Im Ostseebad Warnemünde überreicht Lothar Späth der Geschäftsleitung von TECOSIM das Gütesiegel. Die Ingenieurgesellschaft mit sechs Standorten in Deutschland hat sich auf Computer Aided Engineering (CAE) spezialisiert, die rechnergestützte Entwicklung und Optimierung von Bauteilen und Strukturen. Bei der Entwicklung neuer, effizienter Methoden und Lösungen ist nicht nur die Kompetenz und Erfahrung der Mitarbeiter gefragt, sondern auch ihre Kreativität und der Mut zu ungewöhnlichen Ideen. TECOSIM fördert diesen Ideenreichtum und honoriert

den Einsatz der Ingenieure. Das im Unternehmen herrschende Innovationsklima basiert auf drei Eckpfeilern: TECOSIM bietet seinen Mitarbeitern Zeit, Raum und finanzielle Mittel für die Entwicklung innovativer Ideen und deren Umsetzung. Jedem der 230 Mitarbeiter in Deutschland steht beispielsweise ein festes Kontingent an Stunden pro Jahr für fachliche Weiterbildungen und Schulungen zur Persönlichkeitsentwicklung zur Verfügung. Die Büroräume wie auch die Hard- und Software-Landschaft können jederzeit – auch außerhalb der Arbeitszeiten – genutzt werden. Und jeder Einzelne hat Zugriff auf das Intranet „TECOSIM-Portal“ und kann sich dort über Projekte und Lösungsansätze austauschen. Wie erfolgreich TECOSIM mit diesem Innovationsklima ist, zeigen unter anderem zahlreiche Forschungsprojekte, die das Unternehmen mit großem Erfolg gemeinsam mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen umsetzt und die teilweise mit nationalen und europäischen Fördermitteln unterstützt werden.

www.tecosim.de

TRANSTEC

Workstation mit SSD-Cache

transtec nimmt die neue Lynx Graphics Workstation mit SSD-Caching ins Portfolio. Gegenüber herkömmlichen Cache-Technologien wird der Zugriff auf Dateien durch den SSD-Cache deutlich beschleunigt. Bildbearbeitungsprogramme und andere datenintensive Prozesse starten und laufen schneller. Die Lynx Workstation 1900T basiert auf dem Intel Chipsatz X79 und unterstützt die neuesten Intel Prozessoren Core i7-3960X und i7-3930K. Je nach Konfiguration sind bis zu 15 Megabyte Cache- und 64 Gigabyte Arbeitsspeicher möglich. transtec ermöglicht kleinen und mittleren Unternehmen preisgünstig in die neueste Cache-Technologie einzusteigen.

www.transtec.de

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

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

2011

NAFEMS e-Learning Kurs: Essentials of Fluid Mechanics for CFD	29.11. (4 Wo)	Internet	www.nafems.org/e-learning	NAFEMS
Euromold	30.11.-03.12.	Frankfurt, D	www.euromold.com	Demat

2012

NAFEMS e-Learning Kurs: Basic FE Analysis	12.01. (4 Wo)	Internet	www.nafems.org/e-learning	NAFEMS
NAFEMS e-Learning Kurs: Structural Optimization in FE Analysis	17.01. (4 Wo)	Internet	www.nafems.org/e-learning	NAFEMS
NAFEMS Trainingskurs: Einführung in die praktische Anwendung der FEM	23.-25.01.	Wiesbaden, D	www.nafems.org	NAFEMS
NAFEMS e-Learning Kurs: Practical Introduction to CFD	24.01. (4 Wo)	Internet	www.nafems.org/e-learning	NAFEMS
Impetus Users Meeting und Technologietag: Kunststoffe Prüfen und Simulieren	15.-16.02.	Schladming, A	www.4a.co.at	4a Engineering
CAE Grand Challenge	03.-04.04.	Hanau, D	www.carhs.de	carhs.training
ANSYS Conference & 7. CADFEM Austria Users' Meeting	26.-27.04.	Wien, A	www.usersmeeting.at	CADFEM Austria
PERMAS Users Conference 2012	26.-27.04.	Heidelberg, D	www.intes.de	Intes
Nastran User Meeting	08.-09.05.	München, D	www.mscsoftware.com	MSC.Software
Adams User Meeting	09.-10.05.	München, D	www.mscsoftware.com	MSC.Software
NAFEMS Trainingskurs: Einführung in die praktische Anwendung der FEM	07.-09.05.	Bamberg, D	www.nafems.org	NAFEMS
NAFEMS Trainingskurs: Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications	08.-09.05.	Bamberg, D	www.nafems.org	NAFEMS

NAFEMS deutschsprachige Konferenz 2012
Berechnung und Simulation – Anwendungen, Entwicklungen, Trends
 08.-09.05. Bamberg, D www.nafems.org/dach202



NAFEMS NORDIC Conference 2012	Engineering Simulation: Best Practices, New Developments, Future Trends			
	22.-23.05	Gothenburg, S	www.nafems.org/nordic2012	NAFEMS
NAFEMS UK Conference 2012	Engineering Simulation: Realising the Potential			
	30.-31.05.	Lincolnshire, UK	www.nafems.org/uk2012	NAFEMS
International Conference on Multibody System Dynamics - IMSD 2012	29.05.-01.06.	Stuttgart, D	www.imsd2012.uni-stuttgart.de	Universität Stuttgart
NAFEMS France Conference 2012	Simulation Numérique: Moteur de Performance			
	05.-06.06.	Paris, F	www.nafems.org/france2012	NAFEMS
ANSYS Conference & 17. Schweizer CADFEM Users' Meeting	21.-22.06	Zürich, CH	www.usersmeeting.ch	CADFEM Schweiz
LS-DYNA Forum	09.-10.10.	Ulm, D	www.dynamore.de	DYNAmore
NAFEMS European Conference on Multi-Physics	October	n.n.	www.nafems.org	NAFEMS
simvec	20.-21.11.	Baden-Baden, D	www.simvec.de	vdi Wissensforum

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

Kompensation faserverbundspezifischer Fertigungsdeformationen im Werkzeug

– Ein semi-analytischer Simulationsansatz

Erik Kappel, Daniel Stefaniak, Christian Hühne

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 38108 Braunschweig, Deutschland

Die Nachfrage nach leistungsfähigen Faserverbundstrukturen über die Grenzen hochpreisiger Anwendungen hinaus resultiert in einem erhöhten Kostendruck und damit einer gesteigerten Nachfrage nach verlässlichen und gleichzeitig kosteneffizienten Konstruktions- und Simulationsstrategien. Die Herstellung von Faserverbundstrukturen wird begleitet von fertigungsbedingten Deformationen bedingt durch die Anisotropie des Werkstoffs sowie durch die typischen Fertigungsverfahren, bei denen das Bauteil unter hohem Druck und unter hohen Temperaturen aushärtet. Fertigungsdeformationen lassen sich in Spring-In und Warpage Verformungen klassifizieren, wobei Spring-In Verformungen der Richtungsabhängigkeit der mechanischen, thermischen und chemischen Kenngrößen zuzuordnen sind. Warpage Verformungen werden durch eine Bauteil-Werkzeug Interaktion hervorgerufen, welche während des Aushärtens einseitig Spannungen in das Bauteil einbringt. Diese Interaktion wird direkt durch die thermische Ausdehnung des Werkzeugs beeinflusst.

Fertigungsbedingte, geometrische Abweichungen vom Konstruktionsmodell sind unerwünscht und führen zur Verletzung geometrischer Toleranzen und damit zu hohem Ausschuss. Geometrische Kompensation des Werkzeugs ist notwendig, um dem entgegen zu wirken. Aktuell basiert diese Kompensation ausschließlich auf Erfahrungswerten in einem iterativen Prozess. Zwangsläufig ist dieser Prozess daher zeitaufwändig und damit gleichzeitig kostenintensiv.

Um auftretende Deformationen bereits im Designprozess des Werkzeugs berücksichtigen zu können, wurde ein praktikabler, semi-analytischer Simulationsansatz entwickelt. Verformungen kleiner, einfacher Probekörper dienen als Input für die Berechnung äquivalenter Simulationsparameter unter Berücksichtigung des entwickelten analytischen Modells. Auf diese Weise gelingt der Transfer von auf Verformungen auf Probekörperebene hin zu Verformungen auf Bauteilebene, ohne dabei aufwändige und damit kostenintensive Prototypen fertigen zu müssen. Im Rahmen dieses Manuskripts erfolgt eine Vorstellung des Ansatzes mit dem Fokus auf die Berechnung kompensierender Werkzeuggeometrien

1. Einleitung

Die Herstellung von Faserverbundstrukturen wird von fertigungsinduzierten Deformationen begleitet. Diese lassen sich auf die orthotropen Materialeigenschaften, sowie auf die typischen Fertigungsrandbedingungen im Autoklav zurückführen. Dort härtet das Bauteil unter hohen Temperaturen bei gleichzeitig hohem Druck am Ende des Prozesses aus.

Typischerweise schwanken die auftretenden Deformationen um einen Mittelwert D_{mean} , wobei dieser von der Bauteilgeometrie, sowie dem verwendeten Verbundmaterial abhängig ist. Abbildung 1 zeigt dies schematisch am Beispiel des Querschnitts eines C-Profiles.

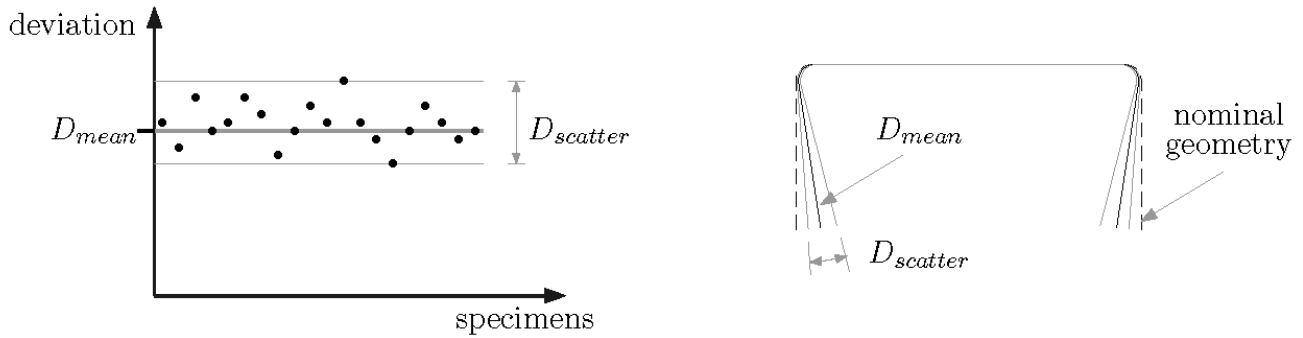


Abb. 1: Schwankungen in den messbaren Deformationen am Beispiel eines C-Profiles

Fertigungsinduzierte Deformationen in der Faserverbundherstellung sind Gegenstand einer Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen. Dabei wurden sowohl numerische als auch experimentelle Ansätze verfolgt. Tabelle 1 zeigt einen Auszug der untersuchten Einflussgrößen, welche nachweislich einen Einfluss auf die Bauteilqualität und besonders auf die Formtreue des Bauteils nach der Fertigung haben. Aufgrund der Vielzahl der beeinflussenden Effekte ist eine Simulation unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen äußerst komplex. Verfügbare Ansätze bilden lediglich einzelne, beziehungsweise einige wenige Effekte ab, wobei üblicherweise sehr feine Volumenelementnetze verwendet werden und ein dementsprechend hoher Rechenaufwand erforderlich ist.

Tab. 1: Untersuchte Einflüsse auf die Bauteilgeometrie innerhalb der Fertigung

Einflussgrößen	Referenzen
Wärmekapazität des Werkzeugs	Ruiz and Trochu [1]
Wärmeverteilung im Werkzeug	Wiersma et al. [2]
Werkzeuggeometrie (radii)	Huang et al. [3]
Laminataufbau	Sarrazin et al. [4]
Bauteil-Werkstück Interaktion	Twigg et al. [5]
Schwankungen der Halbzeugeigenschaften	Fernlund [6]
Vakuumaufbau (Abreißgewebe, Trennmittel)	Fernlund et al. [7]
Aushärtegrad	Radford et al. [8]
Feuchtegehalt	Jain et al. [9]
Faservolumengehalt	Radford et al. [10]
Porengehalt	Radford et al. [10]
Aushärtezyklus	Sprowitz [11]
Reinharzschichten durch Thermoplastpartikel	Stefaniak et al., Kappel et al. [13],[12]
Oberflächenrauheit des Werkzeugs	Stefaniak et al., Kappel et al. [13],[12]
Thermische Werkzeugausdehnung	Wiersma et al. [2]

Existierende Modelle berücksichtigen unter Anderem den Aushärtegrad, die Einlagerung bzw. Generierung von Eigenspannungen sowie die chemische Schwindung. Die Berechnung geometrischer Deformationen resultiert dabei stets aus den zuvor genannten Einzeleffekten. Die Güte der Vorhersage hängt somit direkt von der Qualität der konstitutiven Modelle innerhalb der Simulation ab. Intensive wissenschaftliche Untersuchungen am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ergeben, dass sich die auftretenden Verformungen im wesentlichen auf zwei geometrische Phänomene zurückführen lassen (Vgl. [12],[13]). Dabei handelt es sich um Spring-In und Warpage, wobei Spring-In Winkeländerungen im Querschnitt winkliger Profile beschreibt und Warpage die fertigungsbedingte Wölbung ebener Bauteile aufgrund Form-Werkzeug Interaktion. Es sei angemerkt, dass in der Literatur verschiedene Synonyme für die genannten Phänomene verwendet werden. So sind die Begriffe Spring-Back, Spring-Forward zu finden. Die Ursachen beider Phänomene sind grundlegend verschieden. Während Spring-In Verformungen den stark richtungsabhängigen Eigenschaften des Verbundmaterials zuzuordnen sind, werden Warpage-Verformungen durch Bauteil-Werkzeug Interaktionen hervorgerufen.

Im Zusammenhang mit dem Werkzeug Designprozess stellt die geometrisch exakte Gestalt des Bauteils nach der Fertigung das wichtigste Ziel dar. Besonders für großflächige Strukturen, wie zum Beispiel Flügelschalen,

sind existierende Simulationsansätze aufgrund ihres hohen Rechenaufwands effizient nicht oder nur sehr bedingt einsetzbar. Im Werkzeugdesign besteht ein Bedarf an praktikablen, einfach anzuwendenden Vorgehen, welche sich auf die Abbildung der üblichen faserverbundspezifischen Fertigungsdeformationen fokussieren.

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnis verfolgt die neu entwickelte Simulationsstrategie das Ziel, unter Verwendung von Schalenelementen innerhalb der FEA, die auftretenden Verformungen abzubilden. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen deuten an, dass sich die gemessenen Fertigungsabweichungen aus den Anteilen durch Spring-In und Warpage-Verformungen zusammensetzen. Obwohl beide Effekte parallel denkbar sind, dominiert zumeist ein Effekt, was direkt von der Gestalt des betrachteten Bauteils abhängig ist. Typische Profile wie zum Beispiel ein C-Profil wird stets überwiegend durch Spring-In-Deformationen beeinflusst, während ebene bzw. leicht gekrümmte Schalen hauptsächlich durch den Warpage-Effekt beeinflusst werden. Die Betrachtung typischer Luftfahrt Strukturen, wie Spante, Stringer und Rippen zeigt, dass diese Geometrien eine Kombination aus ebenen, einfach gekrümmten und doppelt gekrümmten Bereichen sind. Abbildung 2 verdeutlicht dies exemplarisch.

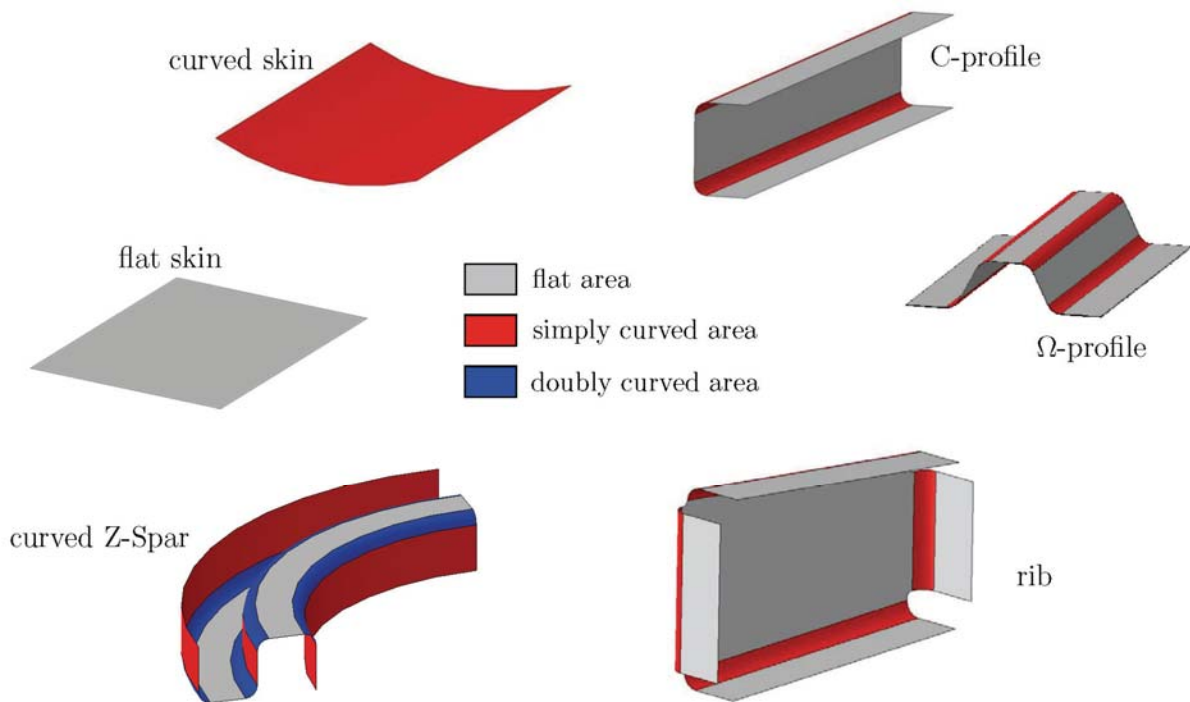


Abb. 2: Rückführung komplexer Geometrien auf ebene, einfach- und doppelt gekrümmte Bereiche

Die daraus abgeleitete, grundlegende Annahme des neu entwickelten Simulationsansatzes geht davon aus, dass sich fertigungsbedingte Deformationen eines komplexen Bauteils durch die Superposition der Spring-In und Warpage Verformungen abbilden lässt.

Entsprechend des zugrundeliegenden analytischen Modells dienen gemessene Verformungen auf Probenebene als Eingangsgrößen für die Berechnung entsprechender Simulationsparameter innerhalb der FEM. Mit Bezug zu Abbildung 2 sind mindestens zwei Probekörpergeometrien erforderlich um typische Deformationen abbilden zu können, wobei im Rahmen dieses Manuskripts doppelt gekrümmte Bereiche vorerst unberücksichtigt bleiben. Zum Einen dient ein gleichschenkeliges L-Profil als Probengeometrie um Winkeländerungen im Querschnitt (Spring-In) zu erfassen. Zum Anderen dient ein ebenes Laminat zur Beschreibung der Warpage-Eigenschaften des betrachteten Bauteils.

Als eine wesentliche Erkenntnis des, seitens des DLR durchgeführten Testprogramms ist festzuhalten, dass die Fertigungsrandbedingungen der Probekörper identisch bzw. möglichst analog zu denen des geplanten Bauteils sein müssen. Dies ist eine Konsequenz aus der Vielzahl, bereits in Tabelle 1 angedeuteten Einflussgrößen auf die Bauteilformtreue. Wesentliche Größen sind dabei das Werkzeugmaterial, Werkzeugradial, Male- oder Female-Werkzeugkonzept, Prozessdruck und Prozesstemperatur sowie der Laminat- und Vakuumaufbau. Diese Einschränkung ist notwendig, weil verschiedene Prepreg-Werkzeugmaterial-Kombinationen zu unterschiedlichen Verformungen führen. Darüber hinaus ist dieses Vorgehen naheliegend, da in vielen Fällen sowohl das Werkzeugmaterial, der Prozesszyklus wie auch das Verbundmaterial bekannt bzw. vom Kunden vorgegeben

sind. Das Ziel ist es dann unter Verwendung dieser Eingangsgrößen ein Bauteil entsprechend der Sollkontur zu fertigen.

Im Bezug zu den zu beobachteten Schwankungen der Bauteilabweichungen sei angemerkt, dass sowohl existierende detaillierte numerische Modelle als auch der neu entwickelte Ansatz von Haus aus diese nicht abbilden. Um dies im Rahmen der Analyse zu erfassen, müssen Rechnungen mit probabilistischen Verteilungen der Input-Parameter durchgeführt werden, welches bei den existierenden Modell zu enormen Rechenaufwand führt. Die Schwankungen $D_{scatter}$, welche in Abbildung 1 schematisch angedeutet sind, sind in der Regel um eine Größenordnung kleiner als der Mittelwert D_{mean} . Daraus abgeleitet ergibt sich das Ziel, basierend auf der entwickelten Methode den Mittelwert der auftretenden Verformungen zu eliminieren. Messergebnisse der Verformungen an gefertigten Probekörpern zeigen ähnliche Schwankungen. Zu Berechnung des Mittelwerts werden daher mindestens fünf Probekörper einer Geometrie in einem Zyklus gefertigt.

2. Theoretische Grundlagen

Wie zuvor beschrieben besteht die Vielzahl typischer Verbundstrukturen aus einfachen Sub-Geometrien. Der entwickelte Ansatz greift dabei auf einen L-Profil-Probekörper sowie ein ebenes Laminat zurück und unterscheidet dabei zwischen den Messgrößen φ_{mes} und w , wobei φ_{mes} die Spring-In-Verformung und w die Warpage-Verformung abbildet. Beide Messgrößen dienen als Eingangsparameter für die im folgenden vorgestellte Berechnung äquivalenter Übertragungsparameter.

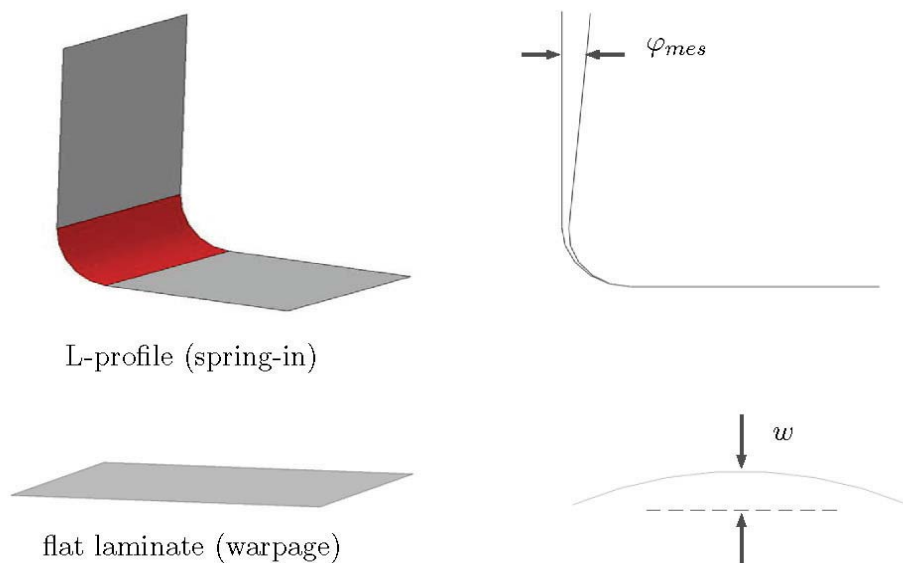


Abb. 3: Verwendete Probekörpergeometrien des und deren Verformungsmaße φ_{mes} und w

Die Übertragung gemessener Verformungen auf Probekörperlevel in entsprechende Deformationen auf Bauteillevel erfordert eine geeignete analytische Übertragungsfunktion, welche im Folgenden vorgestellt wird. Innerhalb der FEA erfolgt aus Handhabungsgründen eine Modellierung mittels äquivalenter thermischer Lasten und entsprechender äquivalenter thermischer Dehnungen.

Sowohl Spring-In als auch Warpage Deformationen können als Krümmungsänderungen interpretiert werden, so dass für die Modellierung lediglich ein einziges grundlegendes Modell notwendig ist. Mit der Zielsetzung einer praktikablen Methode und der damit verbundenen Schalenmodellmodellierung ist es wesentlich, dass Krümmungen über In-Plane Eigenschaften erzeugt werden müssen. Aus diesem Grund werden dem Laminat im Bereich 1, entsprechend Abbildung 4, modifizierte Ausdehnungsparameter zugewiesen. Diese Parameter dienen im weiteren Verlauf des Transfers von gemessenen Verformungen zu äquivalenten Ausdehnungsparametern.

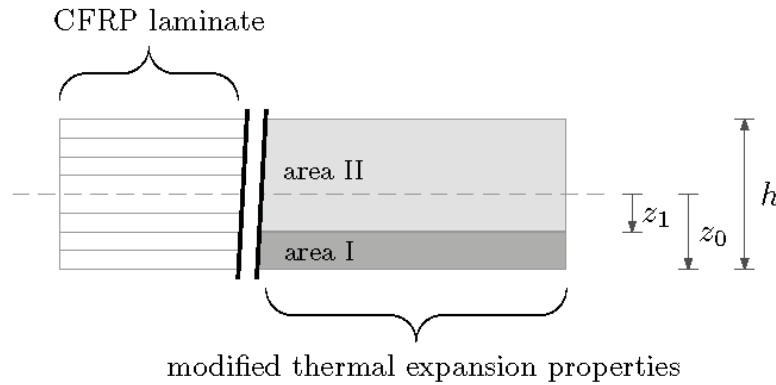


Abb. 4: Modellierungsstrategie zur Abbildung von Spring-In und Warpage Deformationen

Das von Reddy [14] dargestellte resultierende Moment \underline{M}^{th} aufgrund thermischer Last ΔT wird durch einen weiteren Summand erweitert, welcher die modifizierten Ausdehnungsparameter des Bereichs 1 enthält.

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix}^{th} = \underbrace{\left\{ \sum_{k=1}^n [\underline{\underline{Q}}]_k \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}_k \cdot \frac{1}{2} (z_k^2 - z_{k-1}^2) \right\}}_{\text{layup specific fraction}} + \underbrace{[\underline{\underline{Q}}]_1 \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_y^* \\ 0 \end{Bmatrix}_1 \cdot \frac{1}{2} (z_1^2 - z_0^2)}_{\text{artificial thermal fraction}} \quad (1)$$

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit erfolgt die Vorstellung der Parameterberechnung mit Gültigkeit für isotrope Materialien, symmetrische Laminats und homogen orthotrope Materialien. Letzteres stellt den Anwendungsfall dar, sofern mit homogenisierten Steifigkeiten des Laminats gerechnet wird.

Aufgrund dieser Vereinfachung ergibt sich der lagenaufbauspezifische Anteil des Moments aufgrund thermischer Belastung zu null. Wie angedeutet entsprechen Spring-In und Warpage-Verformungen Krümmungsänderungen. Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsgeometrie erfolgt die Herleitung für beide Effekte leicht abgewandelt, da zum Einen gekrümmte und zum Anderen ebene Bereiche betrachtet werden.

1.1 Ebene Bereiche

Entsprechend der klassischen Laminattheorie (CLT) lassen sich Lasten und Verformungsgrößen wie folgt in Beziehung setzen:

$$\begin{Bmatrix} \underline{\underline{\varepsilon}}_0 \\ \underline{\underline{\kappa}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \underline{\underline{A}} & \underline{\underline{B}} \\ \underline{\underline{B}} & \underline{\underline{D}} \end{Bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \underline{\underline{N}} \\ \underline{\underline{M}} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Trotz der einseitigen Modifikation der thermischen Ausdehnungsparameter ergibt sich keine Änderung der globalen mechanischen Materialeigenschaften. Daher existiert keine Kopplung von Dehnungen und Krümmungen so dass sich die Kopplungsmatrix $\underline{\underline{B}}$ zu null ergibt. Doppelte Integration der dadurch vereinfachten Gleichung 2 erlaubt die Berechnung der Verformungen w_x und w_y auf Basis der Krümmungen κ_x und κ_y .

$$\begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det(\underline{\underline{D}})} \cdot \begin{Bmatrix} D_{22} & -D_{12} \\ -D_{12} & D_{11} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \end{Bmatrix} \longrightarrow \begin{cases} w_x(x) = \int_0^x \int_0^x -\kappa_x d\xi d\xi \\ w_y(y) = \int_0^y \int_0^y -\kappa_y d\zeta d\zeta \end{cases} \quad (3)$$

Ausgehend von Gleichung 3 werden zwei Ausdehnungsparameter berechnet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird im Folgenden nur ein äquivalenter Parameter α_{flat}^* angegeben. Dies erfolgt mit der Annahme, dass

keine Krümmung um die y-Achse auftritt und somit der Parameter $\kappa_y = 0$ entspricht. Diese Annahme ist zutreffend wenn beispielsweise streifenförmige Probekörper hergestellt werden, deren Länge um ein Vielfaches größer ist als deren Breite und die 0° Orientierung der x-Koordinate entspricht.

$$\alpha_{\text{flat}}^* = \frac{1}{3\Delta T} \cdot \frac{h^3}{(z_1^2 - z_0^2)} \cdot \frac{w}{L^2} \quad (4)$$

Die Gleichung 4 beschreibt den äquivalenten Ausdehnungsparameter eines ebenen Panels der Dicke h. Die Verformung $w(x=L)$ entspricht der gemessenen Verformung, wobei der Faktor $(z_1^2 - z_0^2)$ unmittelbar von dem gewählten Dickenanteil des Bereichs 1, entsprechend Abbildung 4, abhängt.

1.2 Gekrümmte Bereiche

Einfach gekrümmte Bereiche werden über die Winkeländerung im Querschnitt beschrieben. Gleichung 5 beschreibt diesen Zusammenhang. Die vektoriellen Größen aus Gleichung 2 reduzieren sich dabei auf eine skalare Betrachtung in der Ebene.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ d\varphi/ds \end{Bmatrix} = \frac{1}{\Lambda} \begin{Bmatrix} D_{11} & -B_{11} \\ -B_{11} & A_{11} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad \text{with} \quad \begin{cases} \Lambda = A_{11}D_{11} - B_{11}^2 \\ ds = R \cdot d\varphi_{\text{area}} \end{cases} \quad (5)$$

Unter dieser Voraussetzung und unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen hinsichtlich der Materialeigenschaften liefert die Integration entlang der Bogenlänge mit konstantem Radius ($R=R_0$) eine Winkeländerung $\Delta\varphi$, wobei der Winkel φ_{area} dem eingeschlossenen Winkel des betrachteten Radius entspricht.

$$\varphi(\alpha) = \int_0^{\varphi_{\text{area}}} \frac{A_{11}}{\Lambda} \cdot M_t R_0 d\zeta = \frac{A_{11}}{\Lambda} \cdot M_t R_0 \varphi_{\text{area}} \quad (6)$$

Aufgrund der Berechnung in der Ebene wird lediglich ein Moment aufgrund thermischer Last betrachtet, das in Gleichung 7 dargestellt ist.

$$M_t = \Delta T \begin{bmatrix} \bar{Q} \\ \underline{\underline{Q}} \end{bmatrix}_1 \cdot \begin{bmatrix} \alpha^* \end{bmatrix}_1 \cdot \frac{1}{2} (z_1^2 - z_0^2) \quad (7)$$

Umformen liefert schließlich den äquivalenten Parameter der thermischen Ausdehnung in tangentialer Richtung.

$$\alpha_{\text{angle}}^* = \frac{1}{6R_0\Delta T} \cdot \frac{h^3}{(z_1^2 - z_0^2)} \cdot \frac{\varphi_{\text{mes}}}{\varphi_{\text{area}}} \quad (8)$$

Die Eingangsgröße φ_{mes} entspricht dabei dem gemessenen Winkel aus der Probekörpervermessung. Im Abschnitt 4 wird die Verwendung dieser Gleichung demonstriert.

3. Experimentelle Untersuchungen und die Deformationsvermessung

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Ursachen von Spring-In und Warpage Verformungen benennen und deren Betrag quantifizieren zu können. Dabei wurde der Einfluss typischer Parameter, wie zum Beispiel von Werkzeuggraden, Lagenaufbau und Werkzeugmaterial untersucht. Abbildung 5 zeigt das CAD Modell eines der verwendeten Werkzeuge, welches die Fertigung sieben verschiedener Probekörper ermöglicht, wobei vier Male- (R_{Mi}) und drei Female-Radien (R_{Fi}) abgebildet werden können. Um den Einfluss verschiedener Werkzeugmaterialien und damit unterschiedlicher Werkzeugausdehnungen zu untersuchen wurde jeweils eine Variante aus Aluminium und eine aus Invar (Ni36) hergestellt. Während Aluminium einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\sim 20 \cdot 10^{-6} 1/K$ hat, verfügt Invar über einen deutlich geringeren Ausdehnungskoeffizienten von lediglich $\sim 1.5 \cdot 10^{-6} 1/K$. Diese geringe thermische Ausdehnung liegt in etwa in dem Bereich der In-Plane Ausdehnungseigenschaften eines typischen Laminats, so dass davon ausgegangen wird, dass das Invar-Werkzeug keine Beeinflussung bedingt durch thermische Inkompatibilität auf das Bauteil ausübt. In wie weit diese Eigenschaften den Spring-In-Effekt, der überwiegend von den Materialeigenschaften in Laminat-Dickenrichtung dominiert ist, ist Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen.

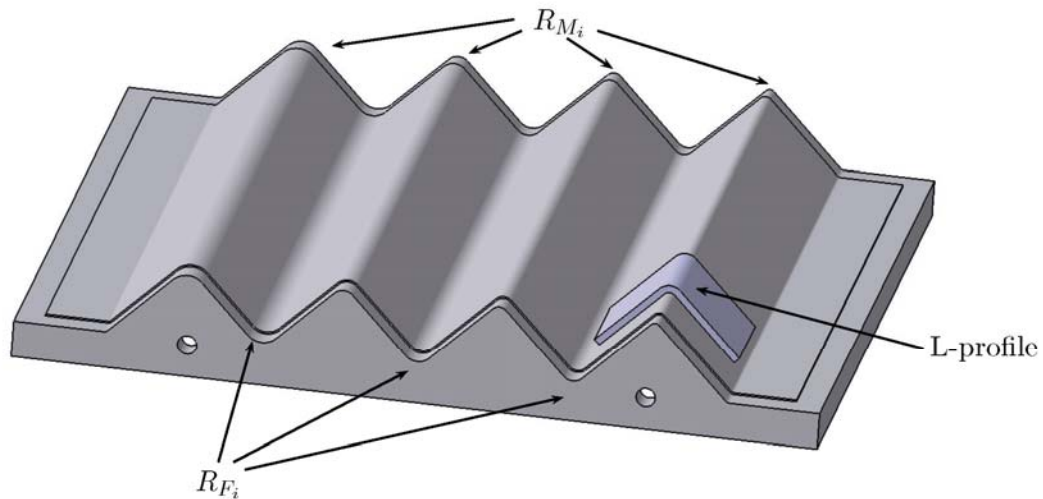


Abb. 5: Werkzeug für die Herstellung der L-Profil Probekörper

Im Rahmen des vorgestellten Vorgehens dienen Verformungsmessungen als Eingangsgröße für das entwickelte analytische Modell, was in hohen Genauigkeitsanforderungen an die Messergebnisse resultiert. Aus diesem Grund wurden sämtliche Messungen mit dem optischen Messsystem ATOS [15] der Firma GOM vorgenommen und ausgewertet. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Auswertung für einen Winkelprobekörper, wobei der Messwinkel dem Winkel der dargestellten Ebenen entspricht.

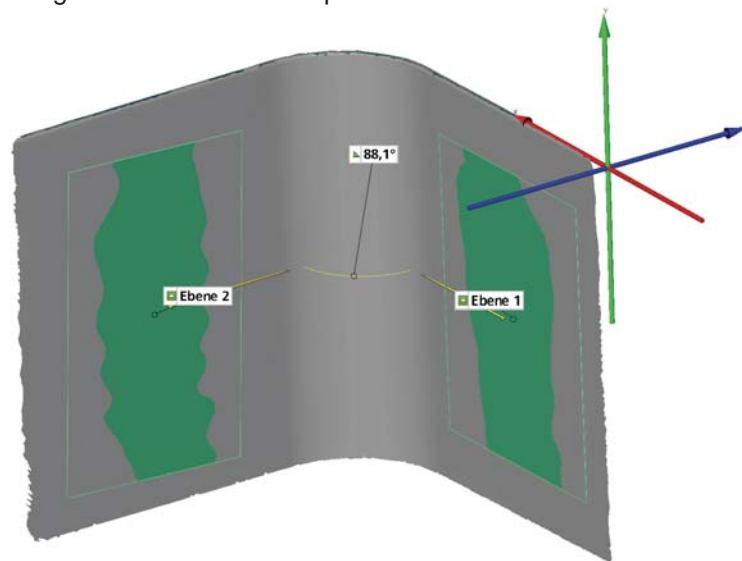


Abb. 6: Winkelvermessung unter Verwendung der GOM Inspect Software

Analog zu den bereits erwähnten Schwankungen auf Bauteilebene weisen die hergestellten Probekörper ebenfalls leichte Schwankungen zwischen den Einzelproben auf, obwohl sie gleichzeitig innerhalb eines Autoklavgangs hergestellt wurden. Die Berechnung einer durchschnittlichen Verformung basiert daher auf dem Mittelwert von mindestens fünf Probekörpern. An dieser Stelle sei angemerkt, dass dies ein erster Schritt in Richtung einer statistischen Betrachtung ist. Zur Verbesserung der statistischen Grundlage sind weitere Proben notwendig. Die Berechnung der äquivalenten Ausdehnungsparameter entsprechend des vorgestellten analytischen Modells greift anschließend auf die berechneten Mittelwerte zurück. Die Verwendung der maximalen bzw. minimalen gemessenen Deformation und der entsprechenden äquivalenten Parameter erlaubt es, zu erwartende Schwankungen auf Bauteilebene zu berechnen.

2 Anwendung auf eine generische Rippenstruktur

Zur Veranschaulichung des entwickelten Ansatzes wird dieser für die Berechnung der kompensierenden Werkzeugoberfläche einer generischen Rippenstruktur eingesetzt. Die Bauteilverformung, sowie eine kompensierende Werkzeuggeometrie bilden das Ergebnis der Berechnung. Ein Auszug aus den experimentellen Untersuchungen, tabellarisch dargestellt in Abbildung 7, dient als Input für die Parameterberechnung. Zur Vereinfachung und aufgrund der Geometrie des betrachteten Bauteils, welches durch seine Gestalt überwiegend Spring-In-Deformationen unterliegt, wird sich auf die Berechnung dieses Effekts beschränkt. Abbildung 7 zeigt die Geometrie der betrachteten Rippenstruktur.

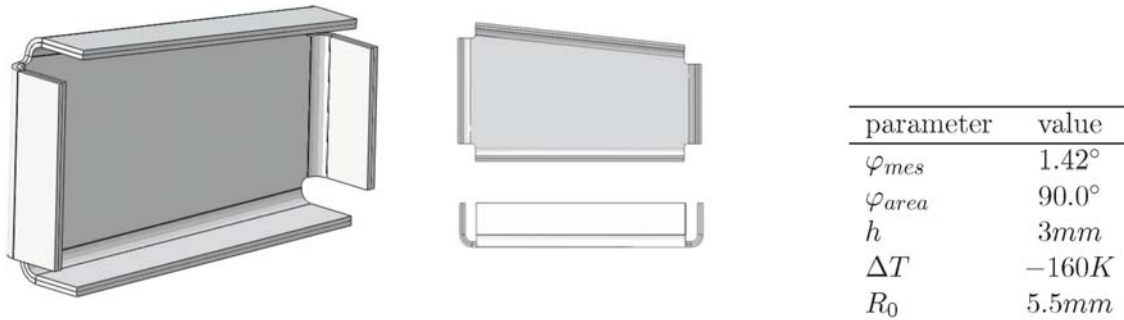


Abb. 7: Geometrie und entsprechende Parameter der generischen Rippenstruktur

Unter Verwendung der Gleichung 8 ergibt sich anhand der vorgegeben Größen der äquivalente thermische Ausdehnungsparameter in tangentialer Richtung der Radienbereiche zu $\alpha_{angle}^* = 3.788 \cdot 10^{-5} 1/K$.

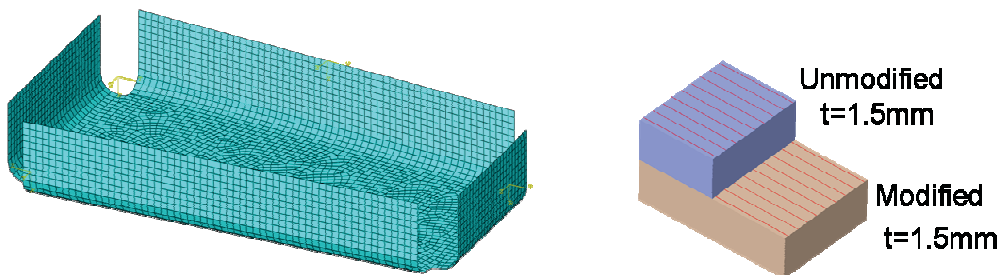


Abb. 8: Mittelflächenmodell sowie der zugehörige "Ply Stack Plot" in ABAQUS

Basierend auf einem Schalenmodell in ABAQUS, welches der Mittelfläche der generischen Rippenstruktur entspricht, wurden orthotrope äquivalente Ausdehnungsparameter in tangentialer Richtung der Radienbereiche vorgegeben. Die Zuweisung entsprechender Orientierungen erfolgte dabei über zylindrische Koordinatensysteme, die dem jeweilige gekrümmten Radienbereich zugeordnet sind. Diese Bereiche sind in Abbildung 9 rot dargestellt.

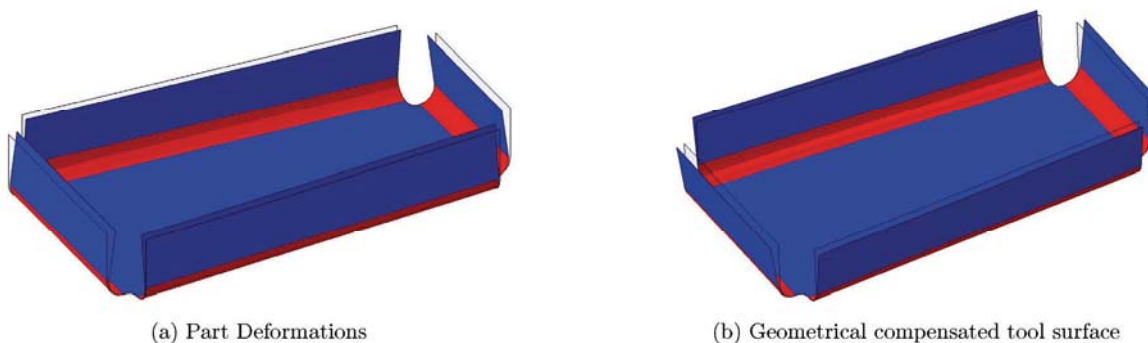


Abb. 9: Areas of application of the presented approach

Mit Bezug zu üblichen Prozesszyklen der Faserverbundherstellung in der Luftfahrt sind die äquivalenten Ausdehnungsparameter auf eine Temperaturdifferenz $\Delta T = -160\text{K}$ bezogen. Dies entspricht der Differenz von der Aushärtetemperatur von 180°C auf die Raumtemperatur 20°C . Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung der verformten Bauteilgeometrie, wobei diese in Abbildung 9a gezeigt ist. Die unverformte Geometrie ist dabei transparent dargestellt.

Die berechneten Verformungen entsprechen der Summe einer Reihe wirkender Anteile, die vor allem durch den anisotropen chemischen Schwund sowie die anisotrope thermische Dehnung geprägt sind. Als zweite Anwendung erfolgt die Berechnung der entsprechend kompensierten Oberfläche. Abbildung 9b zeigt die berechnete verformte Geometrie. Der Export der Knotenkoordinaten des verformten FE Netzes in eine übliche CAD Umgebung erlaubt die Adaption der Ausgangsgeometrie entsprechend der berechneten Deformationen. Abbildung 10 zeigt eine derart generierte, vereinfachte Werkzeuggeometrie mit einer kompensierenden Außenkontur.

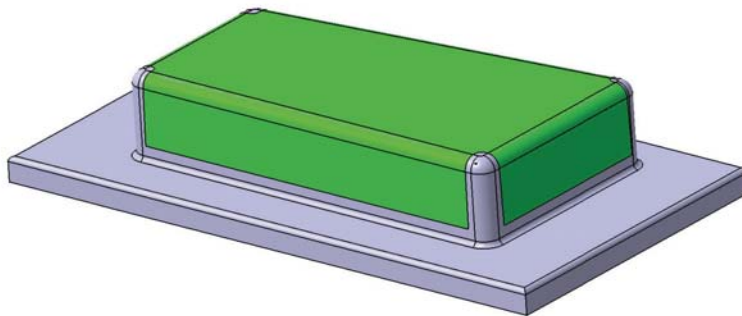


Abb. 10: Spring-In kompensiertes Male-Werkzeug abgeleitet vom verformten FE-Netz

4 Zusammenfassung

Die Anwendung des entwickelten Ansatzes mit der Fokussierung auf das Werkzeugdesign wurde demonstriert. Eine kompensierende Werkzeugoberfläche wurde berechnet, welche im Prozess auftretende, ungewollte Verformungen vorhält. Die Linearität dieses Vorhaltens ist numerisch untersucht und bestätigt worden. Die Effekte, welche durch das Vorhalten und damit die Änderung der Werkzeuggeometrie eingebracht werden, liegen im Bereich von unter 0.05° relativer Abweichung.

Ein weiterer Aspekt, der innerhalb dieses Manuskript unberücksichtigt bleibt, ist die Berechnung von eingebrachten Spannungen aufgrund der Montage. Ausgangspunkt ist hierbei die Geometrie des verformten Bauteils. Nach der Zuweisung der mechanischen Materialparameter und entsprechender Randbedingungen können Spannungen aufgrund des mechanischen „Zwingers“ in die Einbauposition der Struktur berechnet werden. Sind besonders detaillierte Spannungsanalysen gewünscht kann, basierend auf dem verformten Schalenelementennetz, ein beliebig feines Volumenelementennetz generiert werden.

5 Schlussfolgerung und Bewertung

Eine wesentliche Thematik im Zusammenhang mit der Herstellung von leistungsfähigen Faserverbundstrukturen ist es, das konstruierte Bauteil in engen geometrischen Toleranzen fertigen zu können. Aus der Sicht des Werkzeugdesigns stellt dies sogar die wohl wichtigste Anforderung dar. Aufgrund der komplexen mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften der Faser und der Matrix in Kombination mit den verbreiteten Fertigungsverfahren, bei denen das Bauteil unter hohem Druck und unter hohen Temperaturen am Ende des Prozesses entsteht, existiert eine Vielzahl von Parametern, die den Herstellungsprozess begleiten aber auch beeinflussen. Existierende numerische Modelle auf Mikroebene sind für die Simulation realer Bauteilgrößen aufgrund der notwendigen sehr feinen FE Netze nicht effizient anwendbar. Darüber hinaus hängen die simulierten Deformationen direkt von den innerhalb des Materialmodells verankerten konstitutiven Modellen ab, die wiederum eine Reihe von Eingangsparametern benötigen. Vereinfachungen an verschiedenen Stellen führen so unweigerlich zu einer Abweichung zwischen Simulation und Realität.

Aus den genannten Gründen ist ein semi-analytischer Ansatz entwickelt worden, der unter Verwendung konventioneller Schalenelemente die Berechnung von Bauteilverformungen aufgrund von Warpage und Spring-In Einflüssen ermöglicht. Entsprechend des zugrundeliegenden analytischen Modells, dient die Vermessung kleiner, einfacher Probekörper als Eingangsgröße, welche die Berechnung äquivalenter Parameter für die FE Simulation ermöglichen. Am Beispiel einer generischen Rippenstruktur wurde dargestellt, wie sich unter Verwendung dieses Ansatzes sowohl die Geometrie des verformten Bauteils als auch die Geometrie eine kompensierende Oberfläche berechnen lässt. Abbildung 11 zeigt ein Flussdiagramm des entwickelten, experimentell gestützten Simulationsvorgehens.

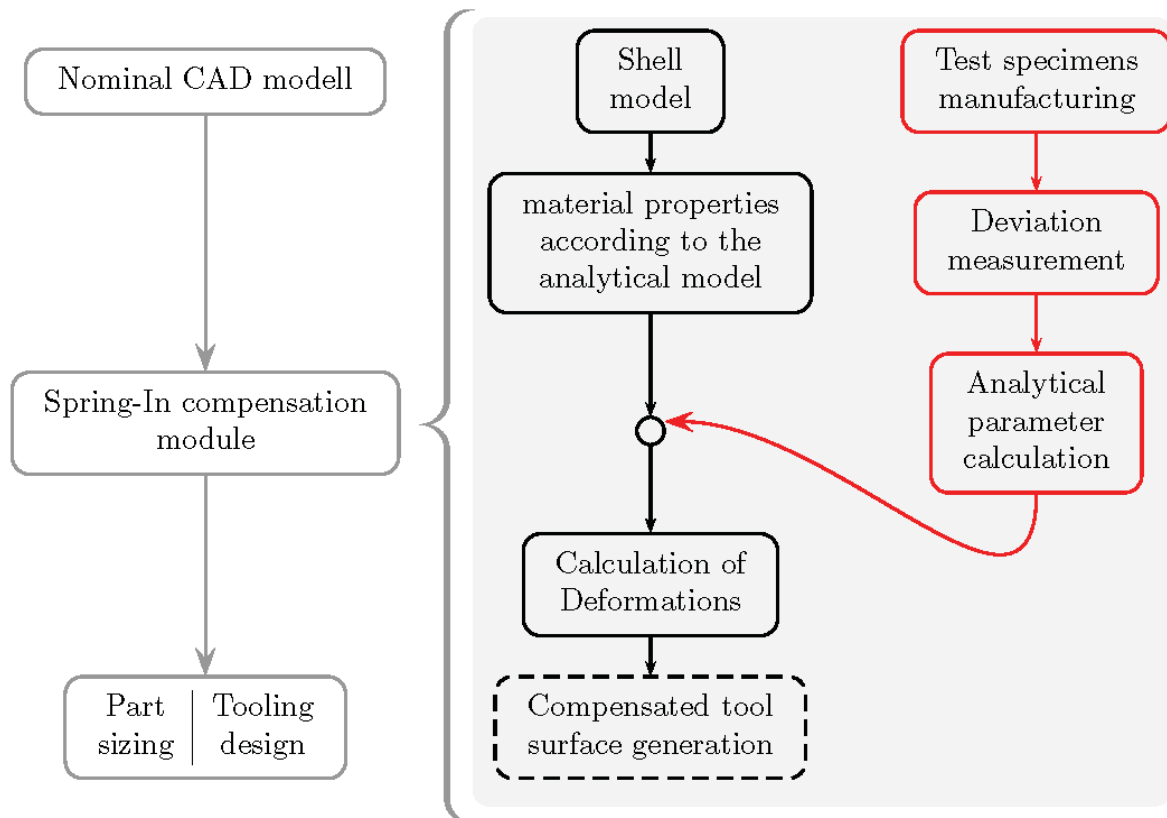


Abb. 11: Flussdiagramm des semi-analytischen Simulationsansatzes

Trotz erster viel versprechender experimenteller Ergebnisse verbleiben offene Fragen, deren Beantwortung weitere detaillierte, wissenschaftliche Untersuchungen erfordern. Zur Validierung der Anwendbarkeit ist die Fertigung weiterer verschiedenartiger Testbauteile erforderlich. Eine wesentliche Fragestellung ist die Anwendbarkeit auf doppelt gekrümmte Strukturen, sowie auf Strukturen mit verzweigten Querschnitten, wie zum Beispiel T-Stringer-Geometrien. Die Untersuchung von Schwankungen in den Bauteilverformungen mittels des vorgestellten Ansatzes ist ebenfalls Thema laufender Untersuchungen seitens des DLR.

6 Literatur

- [1] E.Ruiz and F.Trochu. Numerical analysis of cure temperature and internal stresses in thin and thick RTM parts. *Composites: Part A*,2005,36,806-826
- [2] H.W.Wiersma, L.J.B.Peters and R.Akkerman. Prediction of spring forward in continuous fibre/polymer L-shaped parts *Composites: Part A*, Vol. 29, 1998, pp.1333
- [3] C.K. Huang and S.Y. Yang. Warping in advanced composites tools with varying angles and radii. *Composites: Part A*, Vol. 28A, 1997, pp.891-893
- [4] H.Sarrazin and B.Kim and S.-H.Ahn and G.S. Springer. Effects of Processing Temperature and Layup on Springback *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, 1995, pp. 1278
- [5] G.Twigg,A.Poursartip,G.Fernlund. An experimental method for quantifying tool-part shear interaction during composites processing. *Composite Science and Technology*, Vol. 63, 2004, pp1985-2002
- [6] G.Fernlund. Risk reduction in composites processing using prototype data, process simulation, and Bayesian statistics *Composites: Part A*, Vol. 41, 2010, pp 295-303
- [7] G.Twigg,A.Poursatip,G.Fernlund. Tool-part interaction in composites processing. Part I - experimental. Investigation and analytical model. *Composites: Part A*, Vol. 35, 2004, pp. 121-133
- [8] D.Radford and R.Diefendorf. Shape Instabilities in composite resulting from Laminate Anisotropy *Journal of Reinforced Plastics an Composites*, 1993, 12, 58
- [9] L.K.Jain, B.G.Lutton,Y.-W.Mai and R.Paton. Stresses and Deformations Induced during Manufacturing. Part I: Theoretical analysis of composite cylinders and shells. *Journal of Composite Materials*,1997,31(3),672-695
- [10] D.Radford. Volume Fraction Gradient Induced Warpage in Curved Composite Laminates. *Composite Engineering*, 1995, 5, 923
- [11] T.Spröwitz,J.Tessmer,T.Wille. Process Simulation in Fiber-Composite Manufacturing – Spring-In. *Nafems Seminar: Simulating Composite Materials and Structures 2007*
- [12] E.Kappel, D.Stefaniak, T.Spröwitz, C.Hühne. A semi-analytical simulation strategy and its application to warpage of autoclave-processed CFRP parts. *submitted article*,2011
- [13] D.Stefaniak, E.Kappel, T.Spröwitz, C.Hühne. Experimental identification of parameters inducing warpage of autoclave processed CFRP parts *submitted article*,2011
- [14] J.N.Reddy. Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells - Theory and Analysis. *CRC Press*. Second Edition, 2004
- [15] gom - Optical Measuring Techniques. ATOS - High resolution, optical 3D scanner. <http://www.gom.com>

Mikroskalensimulation des Herstellungsprozesses von Faserverbundwerkstoffen zur Analyse chemisch und thermisch induzierter Eigenspannungen

Christian Brauner, Tim B. Block, Axel S. Herrmann

Faserinstitut Bremen e.V., Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen, Germany

Während des Herstellungsprozesses treten Eigenspannungen in Folge chemisch bedingter Schwindungen und thermischen Schrumpfes auf. Um die Wirkung prozessinduzierter Spannungen auf ein unidirektionales Verbundmaterial aus Carbonfaser und Epoxidharz (G1157/RTM 6) zu analysieren, wird eine mikromechanisch implizite Finite-Elemente-Analyse mit der Software Samcef/Mecano, durchgeführt. In dieser Studie werden Auswirkungen des Herstellungsprozesses auf der Mikroebene diskutiert, die sich mit dem nichtlinearen Werkstoffverhalten der Polymermatrix befassen.

1 Einleitung

Aufgrund der vielen Vorteile von leistungsfähigen kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen gegenüber herkömmlichen metallischen Werkstoffen ist deren Einsatz im Flugzeugbau weit verbreitet. Eine Besonderheit dieser Verbundmaterialien besteht darin, dass die resultierenden Eigenschaften durch die Wahl unterschiedlicher Fasern bzw. Textilien und Matrices konstruiert und durch den Herstellungsprozess selbst beeinflusst werden. Als Matrixmaterial werden häufig Epoxidharze verwendet. In der Regel werden Harzsysteme mit einer Aushärtungstemperatur von ca. 180°C gewählt, um Glasübergangstemperaturen oberhalb von 160°C zu erreichen, welches den Anforderungen des Flugzeugbaus entspricht. Diese Harzsysteme haben jedoch den Nachteil, dass die hohen Aushärtetemperaturen thermische Eigenspannungen induzieren. Inhomogene Materialeigenschaften spielen während der Aushärtung von CFK-Materialien eine wichtige Rolle im Hinblick auf Spannungen und Verformungen, welche aus der Summe von chemischer Schwindung der Matrix und dem anisotropen thermischen Schrumpf bestehen. Resultierende Materialeigenschaften des Verbundes werden durch die Eigenspannungen beeinflusst. Zum Beispiel können herstellungsbedingte Fehler auf der Mikroebene zu Faser-Matrix-Ablösungen oder kleinen Matrixrissen führen. Diese sind kaum messbar, machen sich jedoch in reduzierten Steifigkeiten oder Festigkeiten bemerkbar (Fig. 1).

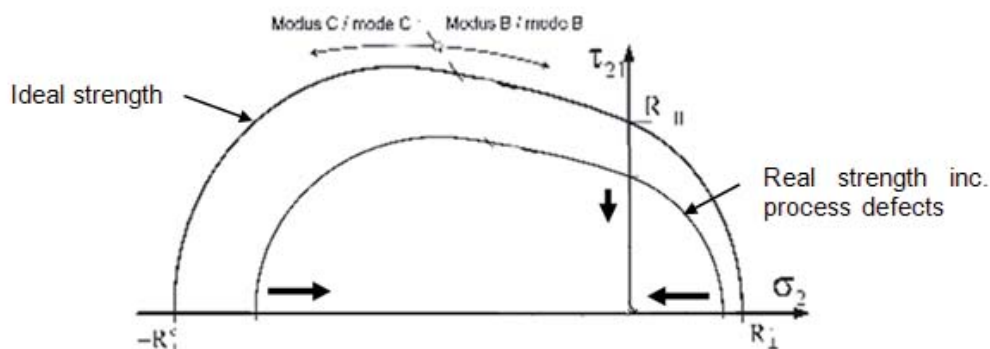


Fig. 1 Einfluss von Prozessfehlern auf die Werkstofffestigkeit [6]

Die Überlagerung von Eigenspannungen mit mechanischen Belastungsspannungen kann zu kritischen Situationen führen. Eigenspannungen können das Versagensverhalten verändern [6]. Mit Versagenshypthesen wie dem Puck-Kriterium kann ein komplexer Spannungszustand zusammengefasst und durch einen Anstrengungsvektor dargestellt werden. Im Allgemeinen beginnt der Anstrengungsvektor im Ursprung des Koordinatensystems und gibt Versagen bei Berührung der Bruchkurve an. Für den Fall der überlagerten Eigenspannungen startet der Anstrengungsvektor nicht mehr im Ursprung. Durch Vernachlässigung prozessabhängiger Spannungen kann die Anstrengung seinen Wert erheblich ändern und die Versagensart bzw. der Versagensmodus wechseln. Fig. 2 zeigt dieses exemplarisch, wobei die Versagensart von Modus B in den kritischen Modus C wechselt.

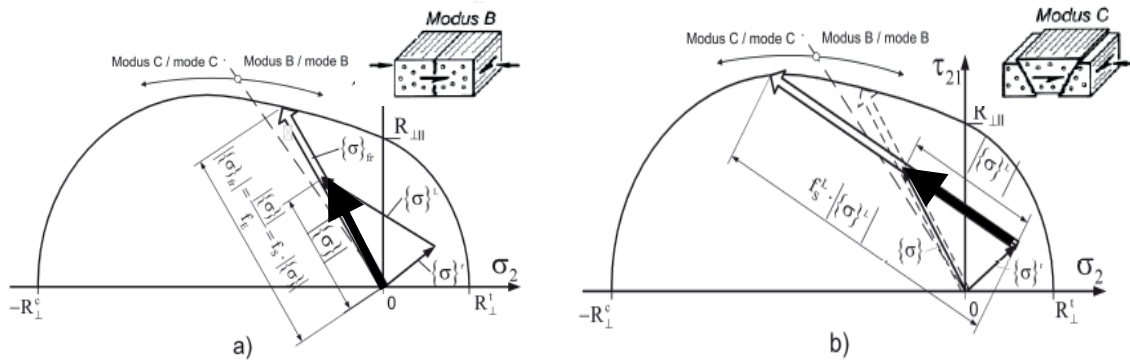


Fig. 2: Einfluss der Eigenspannungen auf das Versagensverhalten [6]. (a) ohne Eigenspannungen, (b) mit Eigenspannungen (schwarzer Pfeil=Anstrengungsvektor)

Dies unterstreicht die Notwendigkeit von zuverlässigen Methoden zur Berechnung von prozessabhängigen Eigenspannungen.

In den letzten Jahrzehnten haben viele Wissenschaftler die Entwicklung von prozessbedingten Spannungen auf der makro- und mikroskopischen Ebene untersucht [4, 5, 11, 12, 13, 14]. Die Validierung von prozessbedingten Spannungen auf der Makroebene ist allerdings nicht trivial. Tatsächlich stehen weder zerstörungsfreie noch zerstörende Messmethoden zur Verfügung, welche in der Lage sind, Eigenspannungen direkt im Prozess zu messen. Die Entwicklung von prozessbedingten Verformungen wurde weitestgehend verstanden und modelliert [4, 5, 14]. Spannungen hingegen werden von nichtlinearen Effekten wie Viskoelastizität, mikroskopischen Fließens, Mikrodegradation, temperatur- und aushärtungsabhängigen Ingenieurskonstanten beeinflusst. Die Frage nach der Wahl von Mikro- oder Makroansätzen kann durch die auftretenden physikalischen Effekte geklärt werden. Hobbiebrunken et al. [17] haben gezeigt, dass sich duroplastische Harze thermomechanisch komplex verhalten und Fließvorgänge und Degradation in Abhängigkeit von der Temperatur die maximale mikroskopische Spannung deutlich beeinflussen. Eine Analyse der Entwicklung von Eigenspannungen auf der mikromechanischen Ebene kann ein wichtiges Instrument sein, um die Effekte homogenisierter Eigenspannungen auf der Makroebene zu interpretieren und zu überprüfen.

In der Literatur können zwei allgemeine Ansätze der Mikromodellierung von Faser und Matrix innerhalb von Verbundwerkstoffen gefunden werden. Der erste Ansatz geht von einer regelmäßigen geometrischen Verteilung von Faser und Matrix mit quadratischen oder hexagonalen Elementarzellen aus, der zweite benutzt größere Einheitszellen mit zufälliger Faseranordnung. Der erste Ansatz hat den Vorteil, dass viele analytische Lösungen auf ihm beruhen. Zum Beispiel hat Puck [13] eine Methode veröffentlicht, um die Belastungsvergrößerung in der Matrix bei externen Lasten zu ermitteln. Diese Ansätze können nicht die wirkliche Topologie der Struktur repräsentieren. Mit geometrischen Vereinfachungen, wie beispielsweise einer Elementarzelle, können aber effiziente analytische mikromechanische Gleichungen abgeleitet werden.

In dieser Studie werden die Auswirkungen der kombinierten reaktionsbedingten Schwindung und des thermischen Schrumpfes auf der Mikroebene in einer gekoppelten Simulation dargestellt. Dafür wird ein aushärtekinetischer Ansatz für die Aushärtung über eine benutzerdefinierte Subroutine in eine implizite Finite-Elemente-Analyse implementiert. Unter Verwendung dieser Aushärtekinetik in Kopplung mit der aushärtegradabhängigen Entwicklung der Ingenieurskonstanten und Veränderungen in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten wird die Aushärtung des Harzes simuliert. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf nichtlineare Effekte im Harz. Es werden Experimente durchgeführt, um den Einfluss der Temperatur auf den E-Modul, das plastische Fließen und das Versagen zu charakterisieren. Im zweiten Teil dieser Arbeit werden diese Effekte schrittweise in ein Finite-Elemente-Modell integriert und die Ergebnisse dargestellt.

2 Materialcharakterisierung

Dieses Kapitel behandelt die Charakterisierung des thermo-mechanischen Verhaltens von Epoxidharz in Abhängigkeit von der Aushärtereaktion und der Temperatur. Schwerpunkte sind die Entwicklung des Elastizitätsmoduls des Harzes in Abhängigkeit vom Aushärtegrade, die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls und dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der Gesamtbetrag der reaktionsbedingten Schwindung und das thermomechanische Verhalten, bzw. das nichtlineare temperaturabhängige Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Das folgende Kapitel ist in der Weise strukturiert, dass die einzelnen physikalischen Effekte getrennt experimentell analysiert werden. Die Charakterisierung der Effekte endet mit konstitutiven Gleichungen und Parametern für die numerische Analyse.

Tabelle 2-1: Fasereigenschaften

Elastizitätsmodul in Faserrichtung	$E_{f1} = 210000 \text{ MPa}$
Elastizitätsmodul in Querrichtung	$E_{f2} = 28240 \text{ MPa}$
Schubmodul	$G_f = 50600 \text{ MPa}$
Querkontraktionszahl	$\nu_{f12} = 0,225$
Wärmeausdehnungskoeffizient in Faserrichtung	$\alpha_{f1} = -0,045 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
Wärmeausdehnungskoeffizient quer zur Faserrichtung	$\alpha_{f2} = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
Festigkeit in Faserrichtung	$R_f = 3430 \text{ MPa}$
Faserdurchmesser	$d_f = 7 \mu\text{m}$

Die vorliegende Studie konzentriert sich auf das Epoxidharz RTM 6, welches von der Firma Hexcel Composites (UK) geliefert wird. Das Harz ist für die Herstellung von Flugzeugverbundstrukturen mit dem Harzinjektionsverfahren (RTM) bestimmt. Die zu erwartenden Betriebstemperaturen von Endprodukten liegen in Bereich von -60°C bis 160°C . Der empfohlene Aushärtezyklus für dieses Harz ist 160°C für 75 min, gefolgt durch eine Nachhärtung bei 180°C für zwei Stunden, was zu einer erwartenden Glasübergangstemperatur von ca. 183°C im ausgehärteten Material führt. Alternativ sind fünf verschiedene Aushärtungszyklen möglich und vom Lieferanten genehmigt. In dieser Studie wird Zyklus 5 verwendet. Empfohlen wird eine Aushärtungstemperatur von 180°C für 120 min, was zu einer Glasübergangstemperatur von 196°C und einer Aushärtung um etwa 96% führt. Die folgenden Harzeigenschaften sind für das ausgehärtete Material dem Datenblatt entnommen.

Tabelle 2-2: Matrixeigenschaften (ausgehärtet)

Elastizitätsmodul	$E_m = 2890 \text{ MPa}$
Schubmodul	$G_m = 1070 \text{ MPa}$
Querkontraktionszahl	$\nu_m = 0,35$
Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_m = 65 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
Festigkeit	$R_m = 75 \text{ MPa}$

2.1 Aushärtungskinetik

Die Aushärtung von duroplastischen Harzsystemen lässt sich im Allgemeinen durch phänomenologische Ansätze oder mechanistische Modelle beschreiben. Mechanistische Modelle beginnen den Aushärtungsprozess auf atomistischer Ebene mit wachsenden Makromolekülen zu beschreiben. Phänomenologische Ansätze beruhen auf der mathematischen Beschreibung des Aushärtungsprozesses durch experimentelle Untersuchungen mit Hilfe der Differential Scanning Calorimetrie (DSC). Mit dieser Methode wird der exotherme Wärmefluss während der Aushärtung gemessen und unter der Annahme interpretiert, dass dieser Wärmefluss sich proportional zum Aushärtung verhält. Die Reaktionskinetik wird verwendet, um eine Reaktion von n-ter Ordnung mit p als Maß des Umsatzes(Aushärtegrad) zu beschreiben. Die Temperaturabhängigkeit wird durch die Arrhenius Geschwindigkeitskonstante k_i beschrieben:

$$\frac{dp}{dt} = k_1 \cdot p^n \quad k_i = a_i \cdot e^{\left(\frac{S_i}{RT}\right)} \quad i=1\dots3. \quad (1)$$

Der Arrheniusterm basiert auf Material- und Prozessparametern mit der thermischen Aktivierungsenergie der Reaktion S_i , der universellen Gaskonstante R und der absoluten Temperatur T . In der Literatur ist die Anzahl der Reaktionsmodelle für verschiedene Harzsysteme vielfältig. In der Regel muss das Modell in der Lage sein, die verschiedenen Aushärtungssituationen, insbesondere unter Berücksichtigung der Variation der Temperatur, zu behandeln.

Kamal und Sourour entwickelten folgenden kinetischen Ansatz [3].

$$\frac{dp}{dt} = (k_1 + k_2 \cdot p^m) \cdot (p_{max} - p)^n \quad (2)$$

Die Entwicklung des Aushärtegrades, unter Verwendung des Ansatzes von Kamal/Sourour stimmt mit den experimentellen Messungen in einem Temperaturbereich von 160°C bis 180°C überein, siehe Fig. 3.

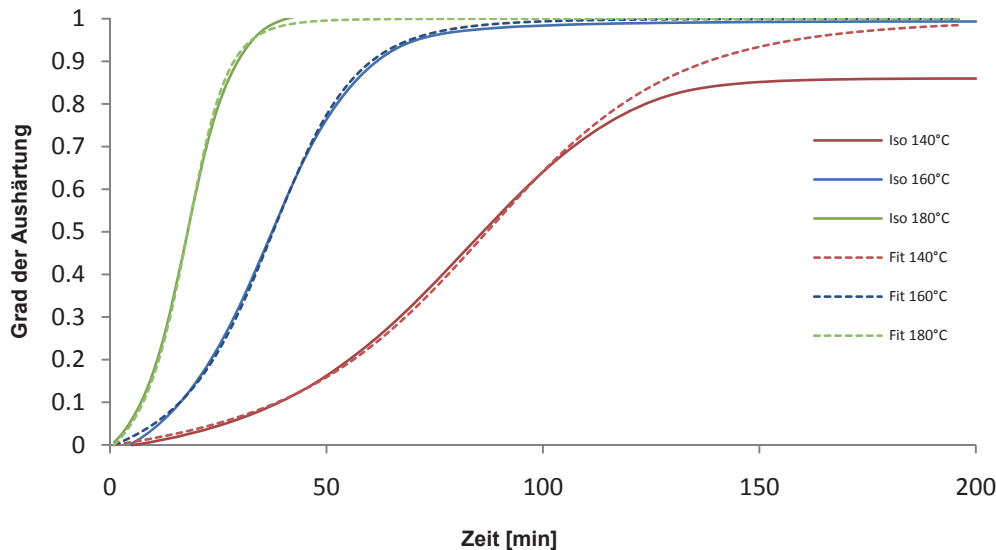


Fig. 3: DSC Ergebnisse unter verschiedenen isothermen Aushärungsbedingungen

Ryan und Dutta [14] erweiterten das Modell und variierten die Variablen m und n in Abhängigkeit von der Temperatur. Dies könnte dazu beitragen die Genauigkeit des Ansatzes zu erhöhen, jedoch wird in dieser Studie der einfache Ansatz nach Kamal/Sourour verwendet, da sich die Werte für die isotherme Aushärtungstemperatur von 180°C als ausreichend erweisen.

2.2 Reaktionsschwindung des Harzes

Die chemisch induzierte Volumenschwindung steht in direkter Beziehung zum Aushärungsgrad und stellt einen Hauptgrund für die Entstehung von Eigenspannungen dar. Um die Entwicklung der Eigenspannungen zu verstehen, ist es wichtig, den Betrag der gesamten chemischen Schwindung zu kennen und in Zusammenhang mit dem Aushärtungsverhalten zu setzen. Es stehen zwei Ansätze zur Verfügung um Schwindungen zu messen. Bei der Volumendilatometrie wird die Änderung einer geometrischen Länge gemessen; bei der nicht volumendilatometrischen Methoden wird die Schwindung durch äquivalente Variablen abgeleitet, z.B. die Wölbung einer zweischichtigen Platte, Kräfte, Signale von optischen Sensoren usw. In Gegenüberstellung dieser zwei Methoden kann festgestellt werden, dass die beiden unterschiedlichen Ansätze zu verschiedenen Ergebnissen führen, aufgrund der Tatsache, dass die nicht volumendilatometrische Verfahren problematisch sind, da der Kontakt zwischen Epoxidharz und einer festen Oberfläche zu unerwünschten Einflüssen führen. Zur Volumendilatometrie können in der Literatur verschiedene Aussagen über die Abhängigkeit der chemischen Schwindung auf den Aushärungsgrad gefunden werden. Holst stellt ein lineares Verhalten fest (volumendilatometrischen Messung), während Liu ein bi-lineares Verhalten definiert (nicht volumendilatometrische Messung) [18, 19].

Mit einem TMA (Thermo Mechanical Analysis) Versuchsaufbau wurde ein einfacher Test durchgeführt. Gekapselte DSC-Tiegel wurden mit Harz gefüllt und in einem TMA Kompressions-Versuchsaufbau platziert. Unter Aufbringung einer kleinen Vorspannkraft wurde die Verschiebung des Deckels während der isothermen Aushärtung bei 150°C gemessen. Mit Hilfe des analytischen Ansatzes von Kamal/Sourour wurden die Ergebnisse über den Aushärungsgrad in Fig 4. dargestellt.

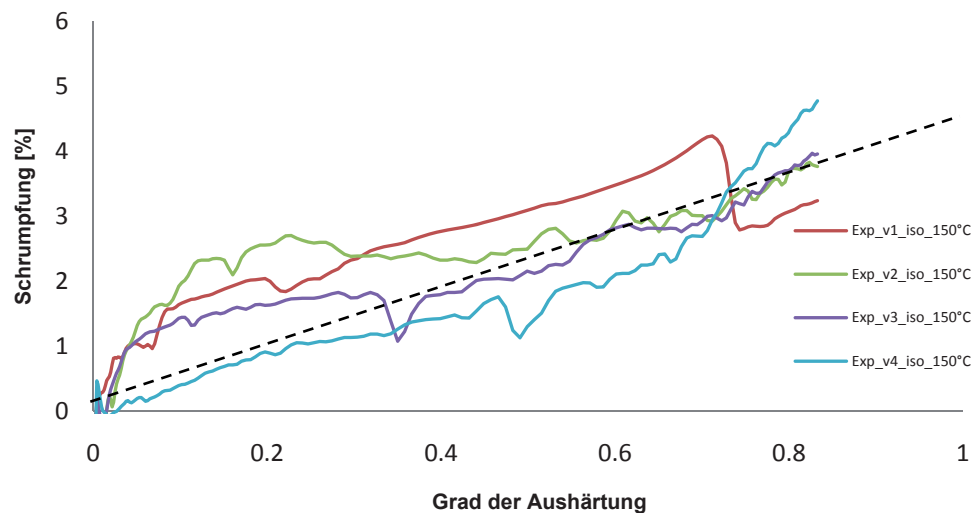


Fig. 4: Harzschwindung über Aushärtegrad, gemessen mit TMA-Versuchsaufbau

Fehlerquellen wie Reibung zwischen dem Deckel und Tiegel, Überlauf des Harzes, Vorspannkraft haben einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis, welches in der großen Streuung der Messwerte sichtbar ist. Dennoch ist ein klarer Trend erkennbar, so dass die Schwindung des Harzes idealisiert als lineare Funktion über den Aushärtegrad angenommen werden kann. Der Gesamtbetrag der chemischen Schwindung V_{sh} liegt bei 4,8%.

Mit diesen Aussagen kann die Schwindung durch Verwendung von inkrementellen Dehnungen für isotropes Material formuliert und in die Analyse integriert werden. Die gesamte Volumenschwindung V_{sh} wird mit dem Inkrement der Aushärtung multipliziert. Die inkrementelle Volumenschwindung dV kann im Falle einer isotropen Schwindung mit folgender Formulierung erweitert werden, um die Dehnungsinkremente der Schwindung in Normalenrichtung zu erhalten

$$dV = V_{sh} \cdot dp \quad (3)$$

$$d\varepsilon_{sh} = (1 - dV)^{\frac{1}{3}} - 1 \quad (4)$$

Diese chemische Schwindungsdehnungsinkremente kann für die Berechnung der gesamten Dehnung wie folgt genutzt werden.

$$d\varepsilon_{ge} = d\varepsilon_{el} + d\varepsilon_{th} + d\varepsilon_{sh} \quad (5)$$

2.3 Mechanisches Verhalten des Harzes während des Aushärtungsprozesses

Das konstitutive Modell des Harzes muss das mechanische Verhalten in den verschiedenen Phasen der Aushärtung darstellen. Es ist sinnvoll, die Änderungen der Harzeigenschaften in drei Phasen zu unterteilen. Zuerst weist es ein rein viskoses Verhalten auf, das Harz liegt als Flüssigkeit vor und kann keine Eigenspannungen entwickeln. Zweitens tritt nach dem Erreichen des Gelpunkts ein viskoelastisches Verhalten auf, in dem Spannungen erzeugt werden, jedoch zu einem gewissen Grad relaxieren. Drittens weist es nachdem Erreichen des Vitrifikationspunkts (Übergang gel zu fest) ein linearelastisches Verhalten auf. Ein detailliertes Materialmodell muss diese drei Phasen berücksichtigen. In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Modelle entwickelt, welche z.B. den Elastizitätsmodul des Epoxidharzes direkt mit dem Aushärtegrad koppeln [Bogetti und Gillespie [3]]. In der Literatur sind weiter Konzepte, mit sowohl linearen, inkrementell linearen [Johnston [5]] oder nicht-linearen Ansätzen [White und Hahn [18, 19] Msallem et al. [17]] zu finden. Daher ist die Frage nach Abhängigkeit des Harz E-Moduls vom Aushärtegrad entscheidend. Zur Beantwortung dieser Frage wurden rheologische Messungen mit einem Plattenrheometer durchgeführt. Bei einer Frequenz von 1 Hz und einer Amplitude von 1% Dehnung wurde die Entwicklung des Schubmoduls bei isothermer Aushärtung beobachtet. Die Experimente wurden bei Temperaturen von 120°C, 150°C, 180°C und 200 °C durchgeführt. Zur Bestimmung des Gelpunktes wurde der Schnittpunkt des Speichermoduls und des Verlustmoduls verwendet.

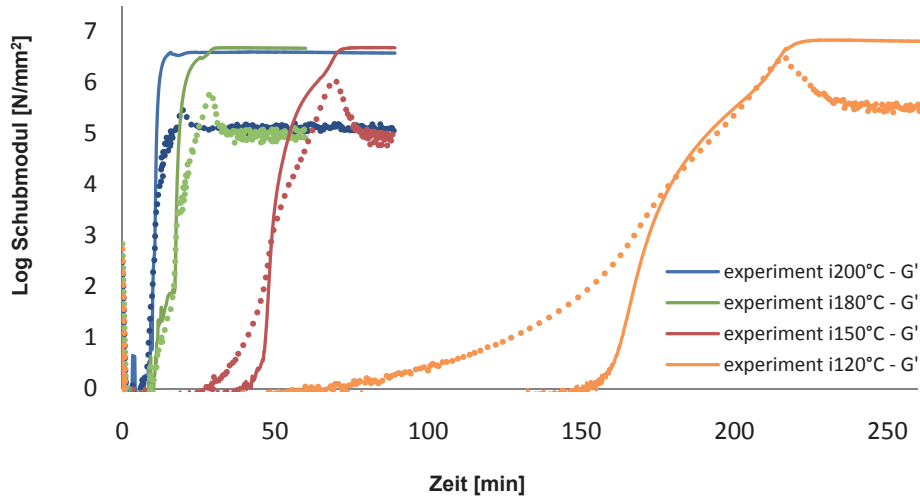


Fig. 5: Entwicklung des Speichermoduls (durchgezogene Linie) / Verlustmoduls (gestrichelte Linie) bei verschiedenen isothermen Aushärtungstemperaturen

Als erstes Ergebnis kann der Speichermodulverlauf über die Zeit aufgetragen und analysiert werden. Folgende Aussage kann getroffen werden: Die Entwicklung des Epoxidharz E-Moduls ist nichtlinear bezogen auf den Aushärtegrad (Fig. 6.). Wenn die experimentellen Kurven gegen den Aushärtegrad aufgetragen werden, zeigt sich, dass mindestens ein inkrementeller Ansatz gewählt werden muss, welcher Gelpunkt und Vitrifikationspunkt berücksichtigt. Die Entwicklung des Harzmoduls kann durch folgende Funktion idealisiert werden:

$$T^{**} = \frac{1}{\left(1 - \frac{T_g - T_{gel}}{T - T_{gel}}\right)} \quad (6)$$

$$G = \left[\frac{1}{\left(\frac{1-\eta}{1+c(T^{**}-1)^\zeta + \eta}\right)} \right] \eta * G_\infty \quad (7)$$

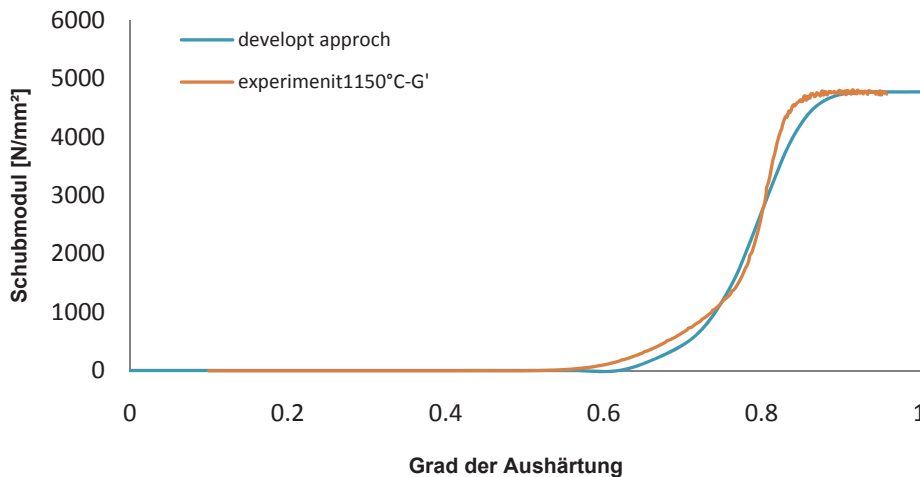


Fig. 6: Vergleich von Experiment und entwickelten Ansatz

G_∞ beschreibt dabei den Schubmodul des vollständig ausgehärteten Materials, η definiert den Modul im flüssigen Zustand und c und ζ sind Anpassungsparameter der experimentellen Daten. Der Vorteil dieser Formulierung ist die genauere Abbildung der experimentell ermittelten Schubmodulverläufe (Fig. 6). Vergleicht man die vorgeschlagene Formulierung in Bezug auf die numerischen Stabilität mit den früher diskutierten Formulierungen, so ist die vorgeschlagene Formulierung numerisch stabiler, da beim Lösen keine Unstetigkeitsstellen passiert werden müssen (z.B. viskos zu fest), wie beispielweise in den inkrementellen Formulierungen von Johnston/Svanberg [5].

2.4 Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls und der thermischen Ausdehnung

Das Verhalten von duroplastischen Polymeren hängt selbst im ausgehärteten Zustand deutlich von der Temperatur ab. Deshalb stellt sich die Frage, wie sich der Elastizitätsmodul und der thermische Ausdehnungskoeffizient (CTE) des ausgehärteten Harzes gegenüber der Temperatur verhält. Zur Beantwortung dieser Frage ist ein Experiment mit einer dynamisch mechanischen Thermoanalyse (DTMA) in einem Drei-Punkt-Biegeversuch durchgeführt worden. Eine rechteckige Platte mit den Abmessungen 35mm*10mm*2mm wurde bei einer Anregungsfrequenz von 1 Hz bei der Heizrampe von 3 K/min von 25°C bis 230°C getestet.

Fig. 7 zeigt den Speichermodul über den Temperaturbereich. Man kann beobachten, dass sich der Biegemodul bis zu einer Temperatur von 180°C nahezu linear verändert. Ähnliche Ergebnisse können in der Literatur gefunden werden [5,17]. Oberhalb von 180°C ist die Glasübergangstemperatur erreicht und der Speichermodul sinkt rapide. Die gemessenen Glasübergangstemperaturen der DTMA Ergebnisse liegen im Durchschnitt bei etwa 210°C.

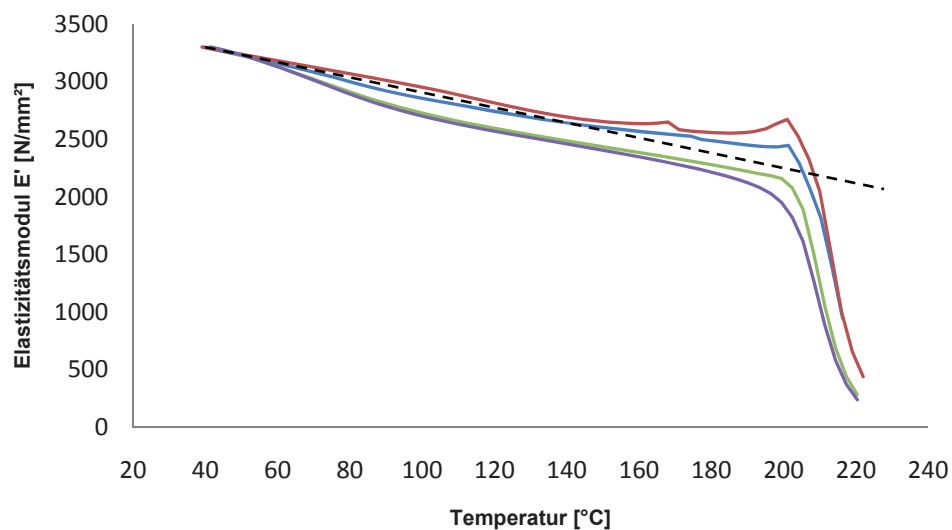


Fig. 7: Speichermodul in Abhängigkeit von der Temperatur

Im Durchschnitt lag der Elastizitätsmodul bei Raumtemperatur bei 3248 N/mm² und bei der Temperatur von 180°C bei 2399 N/mm². Folgende lineare Formulierung kann für das ausgehärtete Material die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls unterhalb der Glastemperatur wiedergeben

$$E_{(T)} = E_{(0^{\circ}C)} - a_E \cdot T = 3500 - 5.9 \cdot T \text{ [MPa, } ^{\circ}\text{C]} . \quad (8)$$

Ähnlich wie bei der Untersuchung der thermischen Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls kann beim Ausdehnungskoeffizienten (CTE) vorgegangen werden. Der CTE ist ein sensibler Parameter bei der Darstellung thermisch induzierter Spannungen. Aussagen über die Art der Temperaturabhängigkeit des CTE sind mit Hilfe der thermo mechanischen Analyse (TMA) zu treffen. Hierzu wurde eine rechteckige ausgehärtete Harzprobe mit den Abmessungen 10mm*10mm*2mm im Kompressionsaufbau platziert und mit einer Rampe von 3 K/min von 40°C bis 220°C aufgeheizt.

In Fig. 8 ist der gemessene Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) für ausgehärtetes RTM 6 dargestellt. Zunächst ist ersichtlich, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) von der Temperatur abhängig ist. Der durchschnittliche Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) liegt bei Raumtemperatur bei $53,5 \cdot 10^{-6}/K$ und bei 180°C bei $69,4 \cdot 10^{-6}/K$. Es ist zu beobachten, dass beim Erreichen der Glasübergangstemperatur der Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) deutlich zunimmt.

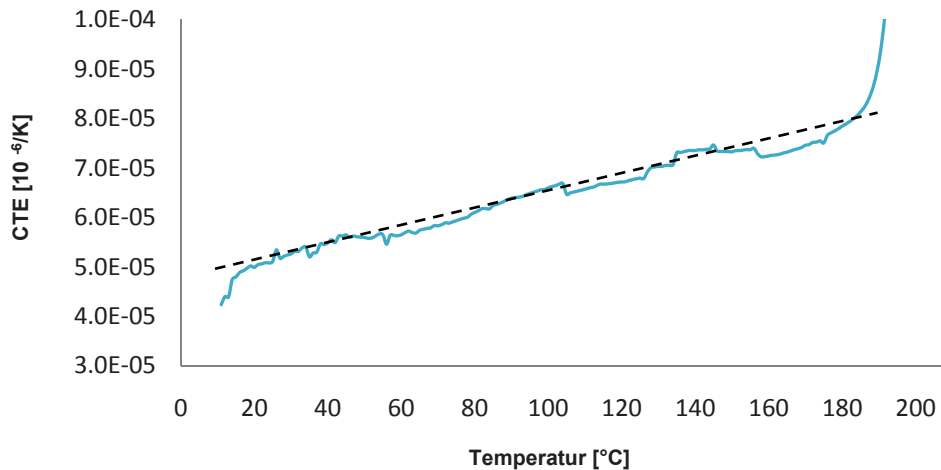


Fig. 8: Abhängigkeit des Wärmeausdehnungskoeffizienten von der Temperatur

In der Literatur wurden Beispiele von Johnston [5] und Hobbiebrunken [17] veröffentlicht, welche eine lineare Approximation der Temperaturabhängigkeit für Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) vorschlagen. Dies ist für ausgehärtete Harze (bei Temperaturen von RT bis 170°C) ausreichend. Folgende lineare Approximation kann gefunden werden (gestrichelte Linie in Fig. 8):

$$\alpha_{(T)} = \alpha_{(25^{\circ}\text{C})} + a_A \cdot \frac{T}{\Delta T} = 5.2e^{-5} + 1.70e^{-7} \cdot \frac{T}{180}. \quad (9)$$

2.5 Thermisch mechanisches Verhalten des Harzes

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Epoxidharz in Abhängigkeit unterschiedlicher Temperaturen wurde von Hobbiebrunken et. al.[17] experimentell untersucht. Dieser führte Zugversuche bei den Temperaturen von 120°C, 150°C und 180°C durch. Die experimentellen Spannungs-Dehnungs-Kurven zeigen, dass der Elastizitätsmodul, die Fließ- und Bruchgrenze sowie die Art des Bruchs stark von der Temperatur abhängen. Das Harz verhält sich bei höheren Temperaturen duktiler. Hobbiebrunken et al.[17] veröffentlichten, dass die Fließspannung von 26 MPa bei Raumtemperatur (RT) bis auf 13 MPa bei 180°C sinkt. Die Bruchspannung verhält sich ähnlich, so ändert sich der Wert von 87 MPa bei RT auf 39,2 MPa bei 180°C. Um dieses nichtlineare Werkstoffverhalten zu berücksichtigen, muss zunächst eine temperaturabhängige Fließbedingung definiert werden. Diese Fließbedingung kann auf Fließkriterien wie v. Mises, Tresca, Drucker/Prager aufbauen. In dieser Studie werden das v. Mises Fließkriterium verwendet, jedoch muss bedacht werden, dass das v. Mises Kriterium den hydrostatischen Spannungszustand vernachlässigt und nicht für duktile Polymere gilt. RTM 6-Harz versagt bei RT spröde. Deshalb ist das v. Mises Kriterium ausreichend, kann aber zu einer Überschätzung der Fließgrenze führen. Die v. Mises Spannung ist wie folgt definiert:

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_x\sigma_z - \sigma_z\sigma_y + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}. \quad (10)$$

Mit einem linearen Verschiebungsfaktor definierten Hobbiebrunken et al.[17] temperaturabhängige Fließ- und Bruchbedingungen.

$$\sigma_{Y(T)} = 53.4 - 0.091 \cdot T \text{ [MPa, } ^{\circ}\text{C]} \quad (11)$$

$$\sigma_{F(T)} = 80 - 0.28 \cdot T \text{ [MPa, } ^{\circ}\text{C]}. \quad (12)$$

Mit diesen Kriterien lässt sich bestimmen, bei welcher Belastung Fließen oder Degradation auftritt.

$$\sigma_{(\varepsilon, T)} = \begin{cases} \mathbf{E}_{(T)} \boldsymbol{\varepsilon}^{el} & \text{if } \sigma < \sigma_{Y(T)} < \sigma_{F(T)} \\ \sigma_Y + \beta \varepsilon^{pl} & \text{if } \sigma_{Y(T)} < \sigma < \sigma_{F(T)} \\ \approx 0 & \text{if } \sigma_{Y(T)} < \sigma_{F(T)} < \sigma \end{cases}. \quad (13)$$

Das Material verhält sich im Falle eines Spannungszustandes unterhalb der Streckgrenze linear. Bei einem Spannungszustand, der höher als die Fließgrenze, aber niedriger als die Bruchspannung ist, verhält sich das Material nach einem bi-linear-elastischen Ansatz. Im Falle eines Spannungszustandes, welcher größer als die Bruchspannung ist, tritt Versagen auf und die Steifigkeit wird degradiert.

3 Anwendungsfall

3.1 FE Modell

Ziel der Modellierung ist die Diskussion der prozessbedingten Eigenspannungen mit Hilfe einer Faser-Matrix Einheitszelle. Typischerweise wird ein Gewebe aus Filamenten hergestellt, die wiederum aus mehreren tausend Fasern und Matrix - Einheitszellen bestehen. Einheitszellenmodelle idealisieren die Anordnung der Fasern. In der Regel werden zwei Idealisierungen mit quadratischen oder sechseckigen Packungen verwendet. Diese geometrische Idealisierung bestimmt den maximalen theoretischen Faservolumengehalt, welcher für die quadratische Packung bei rund 78% und im Falle einer hexagonalen Packung bei rund 90% liegt. In Fig. 9 ist ein Schlibbild eines Verbundmaterials gezeigt. Es ist offensichtlich, dass eine zufällige Verteilung von Faser und Matrix existiert. Beim Vergleich dieser beiden Packungsarten wurde in einer Vorstudie festgestellt, dass eine quadratische Packungsstruktur zu höheren thermischen Eigenspannungen von rund 32% führt. Daher wird für diese Studie die quadratische Idealisierung der Einheitszelle ausgewählt.

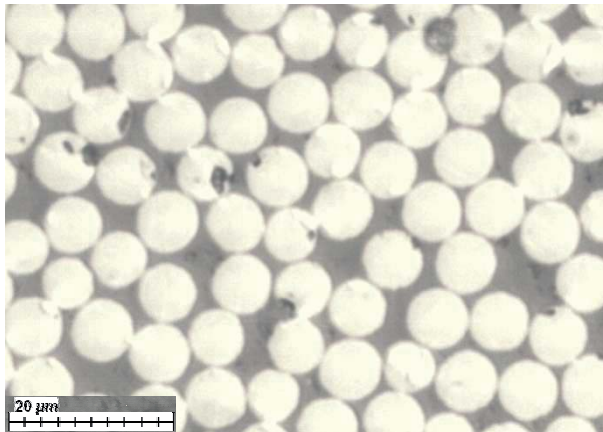


Fig. 9 Schlibbild eines CFK-Verbundmaterials

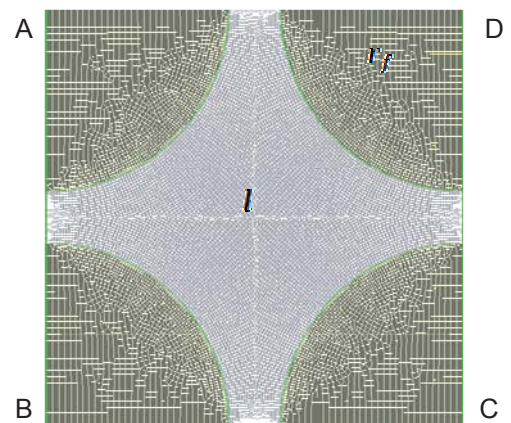


Fig. 10: FE-Netz des Elementarzellenmodells

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Software Samcef / Mecano und den Pre- und Postprozessor Samcef Field wurde ein parametrisches 2D-Modell der Einheitszelle erstellt. Das Material des Schlibbildes wurde zur Bestimmung des experimentellen Faservolumengehaltes eingesetzt. Der Faservolumengehalt betrug im Durchschnitt $V_f = 0,602$. Bei der Analyse des Bildes wurde ein Faserdurchmesser von $d_f = 7 \mu\text{m}$ gemessen, was zu einer effektiven Länge der Einheitszelle von $l = 8 \mu\text{m}$ führt.

$$l = \sqrt{\frac{r_f^2 \cdot \pi}{V_f}} = 8,00 \mu\text{m}. \quad (14)$$

Mit dieser Topologie wurde ein 2D-Modell mit der Idealisierung des ebenen Dehnungszustandes aufgebaut, welches aus 13938 quadratischen Elementen besteht (Fig. 10). Folgende Randbedingungen wurden angewandt [17]. Der linke Rand (AB) ist in Richtung 1 befestigt und der untere Rand (BC) in Richtung 2. Die Bewegung des rechten Randes (CD) ist, durch Anbindung an einen Punkt, auf eine gleichförmige Bewegung in Richtung 1 beschränkt. Der obere Rand (AD) ist in der gleichen Weise eingeschränkt, um eine einheitliche Bewegung in Richtung 2 zu erhalten. Das Referenzmaterial, welches für das Schlibbild verwendet wurde, weist einen Temperaturverlauf auf, wie in Fig. 11 dargestellt. Während des Prozesses wurde diese Temperatur mit einem Thermoelement aufgezeichnet. Dieses Temperaturprofil wurde als Temperaturrandbedingung auf das FE-Modell angewandt. Als Referenztemperatur wurde die Raumtemperatur von 36°C definiert.

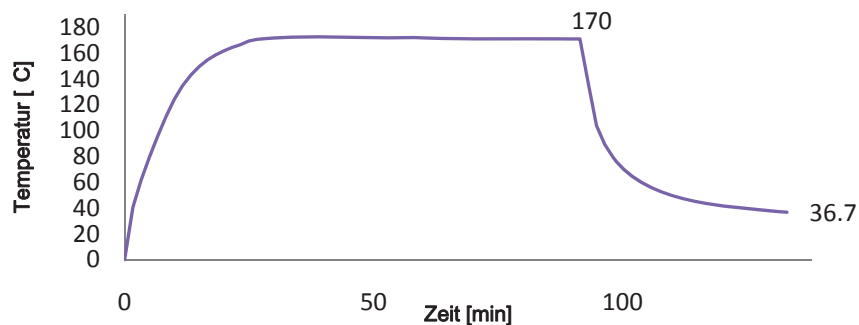


Fig. 11: Temperaturrandbedingungen

3.2 Ergebnisse der Prozesssimulation

Die Ergebnisse der gekoppelten thermomechanischen Analyse sind zunächst die Entwicklung des Aushärtegrades und die Entwicklung der Glasübergangstemperatur über die Prozesszeit.

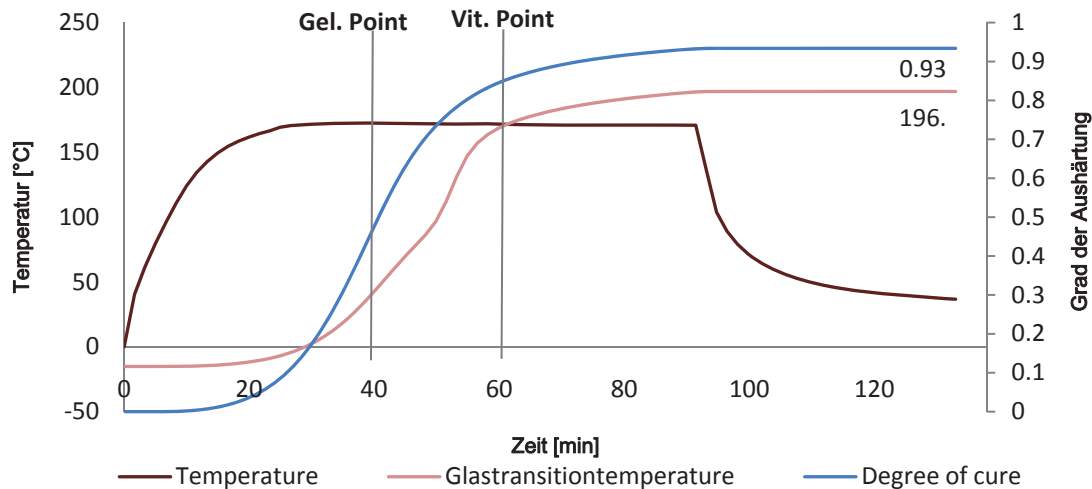


Fig. 12: Simulationsergebnisse der Glasübergangstemperatur und des Aushärtegrades über die Prozesszeit

In der Analyse ist der reaktionskinetische Aushärteansatz von Kamal/Sourour integriert [3]. Die verwendeten kinetischen Aushärteparameter wurden durch DSC Experimente ermittelt. Fig. 12 zeigt die Entwicklung des Aushärtegrades, welcher am Prozessende einen Aushärtegrad von 0,93 erreicht. Für die Einheitszelle wurde eine gleichmäßige Temperatur definiert, deshalb ist nur eine Temperaturkurve dargestellt. Ähnlich wie beim Aushärtegrad wird die Glasübergangstemperatur nach der DiBenedetto-Gleichung berechnet[20]. Die Entwicklung der Glasübergangstemperatur, mit einer Endtemperatur von 193°C, ist in Fig. 12 dargestellt. Mit Hilfe dieser Kurven können zwei wichtige Phasenänderungen identifiziert werden, der Gel-Punkt und der Vitrifikationsspunkt. Wie bereits im vorigen Kapitel dargestellt, werden diese Punkte zur Identifizierung des Materialzustandes, flüssig und viskos sowie viskos-fest, verwendet. Fig. 13 stellt die Entwicklung des Elastizitäts- und Schubmoduls während der Aushärtung dar, gekoppelt an die Glasübergangstemperatur mit Hilfe der Gleichungen 6-7.

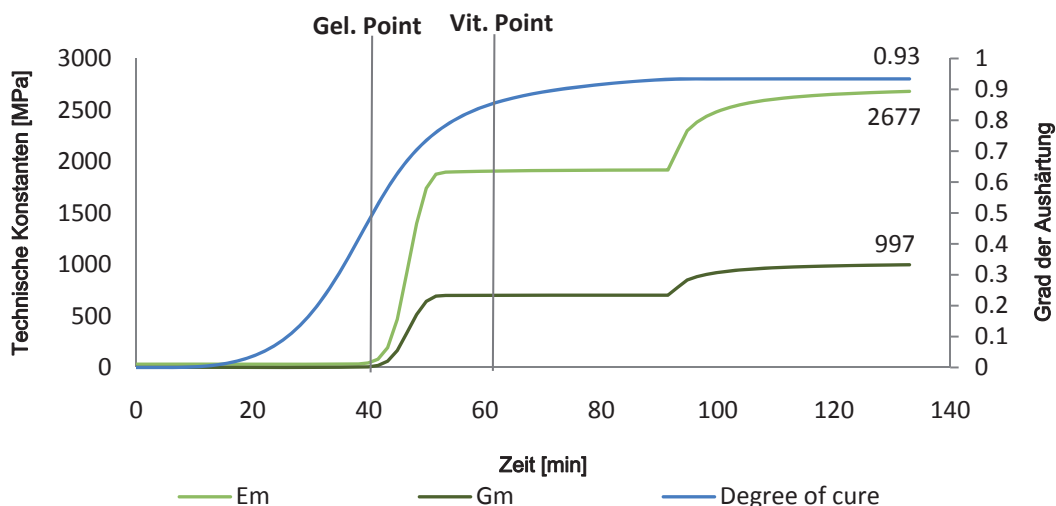


Fig. 13: Simulationsergebnisse der Entwicklung von Elastizitäts- und Schubmodul über die Zeit

Fig. 13 zeigt die Entwicklung der Ingenieurskonstanten über die Prozesszeit. Erkennbar ist sowohl der Anstieg des Elastizitätsmoduls und Schubmoduls sowie die Temperaturabhängigkeit der Module. Hieraus ergeben sich ein Elastizitätsmodul von 2677 MPa sowie ein Schubmodul von 997 MPa im ausgehärteten Zustand bei Raumtemperatur.

Bezogen auf die Abhängigkeit der Module kann der thermische Ausdehnungskoeffizient (CTE) und der chemisch induzierte Schwindungskoeffizient (CSC) berechnet und dargestellt werden. Im ausgehärteten Zustand ergibt sich ein Wert für den CTE von 55,5 e-6 1/K. Die Abhängigkeit des CTE auf Aushärtungsgrad und Temperatur ist deutlich zu beobachten.

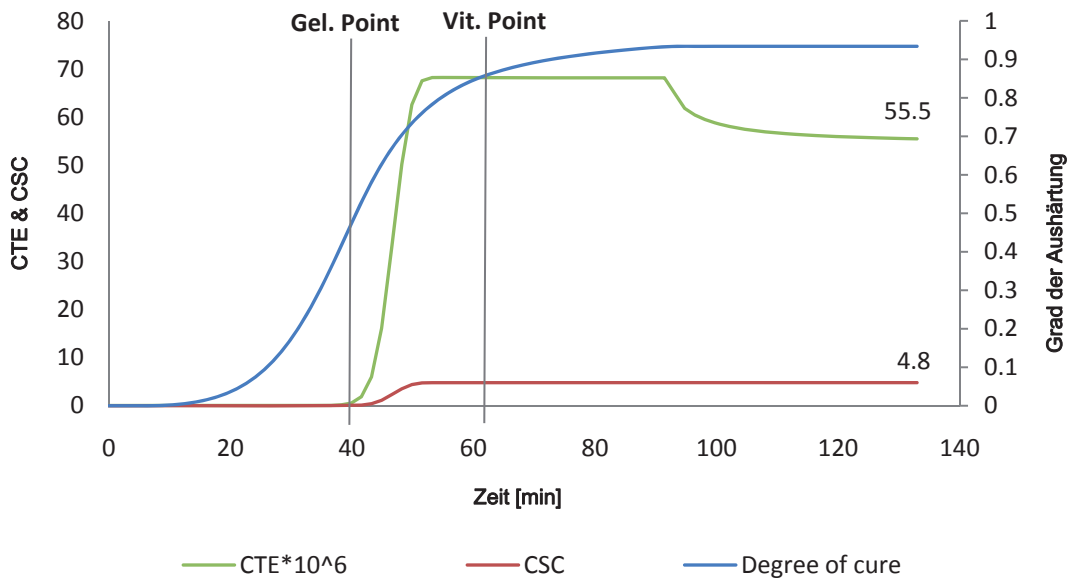


Fig. 14: Simulationsergebnisse der Entwicklung von CTE und CSC über die Zeit

Die lokalen Eigenschaften der Matrix können über die globale Verschiebung der Einheitszelle auf den Verbundwerkstoff abgeleitet werden. Fig. 15 stellt die skalare Verschiebung in Richtung 1 dar, am Punkt C gemessen. Die Summe chemisch induzierter Schwindung und thermisch induzierter Schrumpfung führt zur resultierenden Gesamtverschiebung. Die Beiträge der chemischen Schwindung und thermisch induzierten Schrumpfung zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE) und des chemisch induzierten Schwindungskoeffizienten (CSC) kann während der verschiedenen Phasen des Prozesses abgeleitet und mit analytischen mikromechanischen Ansätzen verglichen werden.

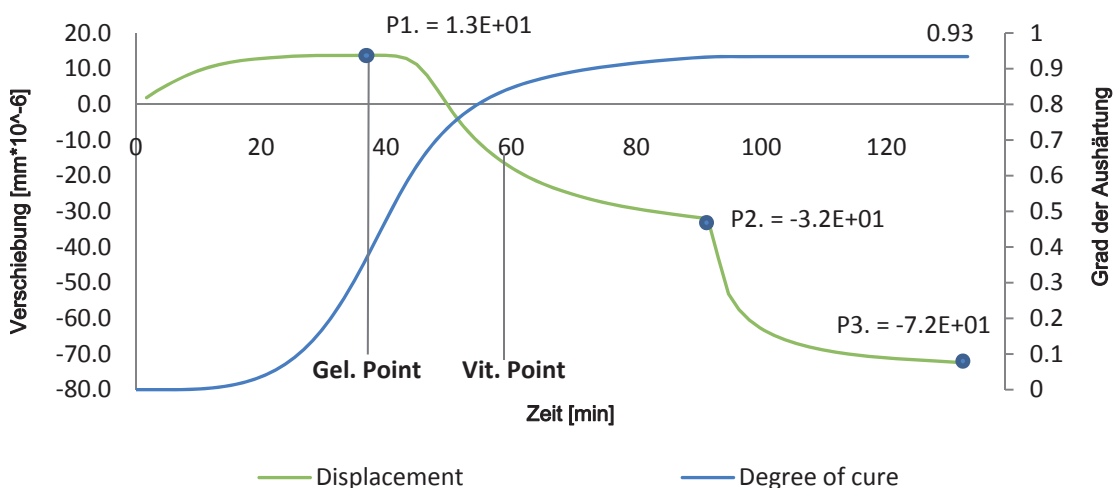


Fig. 15: Simulationsergebnisse der skalaren Verschiebung in Richtung 1 über die Zeit

Für den CTE ist folgende analytische Mischungsregel verfügbar [13] :

$$\alpha_{22} = \varphi \alpha_{F_{\perp}} + (1 - \varphi) \alpha_M + \varphi (1 - \varphi) (\alpha_M - \alpha_{F_{\parallel}}) * \frac{E_{F_{\parallel}} v_M - E_M v_F}{\varphi E_{F_{\parallel}} + (1 - \varphi) E_M} = 36.3 * 10^{-6} 1/K$$

$$\alpha_{22} = \frac{\Delta l}{l_0 * \Delta T} = \frac{(3.20 - 7.25)}{8.0 * (170 - 36)} = 36.4 * 10^{-6} 1/K. \tag{15}$$

Der Vergleich der Ergebnisse aus der FE-Analyse zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen dem analytischen Ansatz und den Ergebnissen der Einheitszelle.

3.3 Auswirkungen von Nichtlinearitäten der Matrix auf die Bildung von Eigenspannungen

Im experimentellen Teil dieser Arbeit wurde gezeigt, dass das Matrixverhalten thermomechanisch komplex ist. Effekte wie die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls und des CTE, nichtlineares temperaturabhängiges Spannungs-Dehnungs-Verhalten, Mikrofließen, Mikrodegradation und viskoelastische Relaxationseffekte werden nun diskutiert, indem den Materialgesetzen des FE-Modells stufenweise mehr dieser Effekte hinzugefügt werden. Daher wird in diesem Kapitel als Referenz zuerst eine lineare Analyse durchgeführt. In dieser Analyse werden keine Temperaturabhängigkeiten berücksichtigt. Die Materialparameter werden Tabelle 2-1 entnommen. Als Temperaturdifferenz werden die maximale Prozesstemperatur (170°C) und die Raumtemperatur (36°C) gewählt. In einem zweiten Schritt erfolgt eine transiente Analyse des gesamten Aushärtungsprozesses, wodurch die Wirkung der Reaktionsschwindung mit berücksichtigt wird. Im dritten Schritt wird der Temperaturabhängigkeit der Elastizitätsmodul und der CTE hinzugefügt, dies erfolgt durch Anwendung der Gleichungen 8 und 9. In einer vierten Analyse wird die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit (Gl. 10-13) dem Modell hinzugefügt und die Effekte Mikrofließen und Mikrodegradation abgebildet. Im fünften und letzten Schritt wird das Materialmodell um den Relaxationsterm erweitert.

Tabelle 3-1:

	Studie 1 thermische Schrumpfung	Studie 2 thermische chemische Schwindung	Studie 3 thermische chemische Schwindung temperaturabhä- ngige Eigenschaften	Studie 4 thermische chemische Schwindung temperaturabhä- ngige Eigenschaften Mikrofließen + Degradation	Studie 5 thermische chemische Schwindung temperaturabhä- ngige Eigenschaften Mikrofließen + Degradation Relaxation
max. globale Verschiebung	$28,2 \cdot 10^{-6}$	$68,9 \cdot 10^{-6}$	$72,4 \cdot 10^{-6}$	$72,5 \cdot 10^{-6}$	$7,17 \cdot 10^{-6}$
res. globales CTE	$36,4 \cdot 10^{-6}/K$	$33,9 \cdot 10^{-6}/K$	$38,0 \cdot 10^{-6}/K$	$38,5 \cdot 10^{-6}/K$	$3,80 \cdot 10^{-6}/K$
max. lokale Dehnungen	2,92%	7,25 %	7,25 %	10,56 %	7,3%
max. lokale v. Mises Spannung	64,4 MPa	220,4 MPa	178,2 MPa	110,4 MPa	95 MPa
max. lokale erste Hauptspannung	38,8 MPa	233 MPa	243 MPa	111 MPa	89 MPa

Bei der Betrachtung der Ergebnisse in der Tabelle 3.1 und ihrer Darstellung in Fig. 16 ist die Bildung von Eigenspannungen und der Einfluss von Nichtlinearitäten ersichtlich. Zur Auswertung wird die v. Mises Spannung angezeigt. Dieses Kriterium vernachlässigt den Einfluss des hydrostatischen Spannungszustandes und setzt voraus, dass das Fließverhalten hiervon unabhängig ist. Daher wird ebenfalls die erste Hauptspannung angezeigt. Es ist sichtbar, dass die Summe der thermischen Schrumpfs und des chemischen Schwindung zu einem höheren Spannungszustand führt; der Wert für die v. Mises Spannung liegt bei 220 MPa (Studie 2). Dieser Wert erreicht bzw. überschreitet die Fließ- und Bruchgrenze des Harzes bei weitem, was die Notwendigkeit einer Erweiterung des Materialgesetzes in Form von temperaturabhängigen Materialeigenschaften demonstriert. Beim Hinzufügen dieses Effektes (Studie 3) sinkt die maximale v. Mises Spannung leicht auf 178 MPa, jedoch sind die Werte immer noch sehr hoch und außerhalb der Reichweite des Hookeschen Gesetzes. Studie 4 fügt dem Modell die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung hinzu. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Abnahme der Eigenspannungen auf bis zu 110 MPa. Das Maximum der Spannung ändert sich von einer punkweisen Verteilung in eine eher flächige Verteilung.

Im letzten Schritt wird die Spannungsrelaxation in das Modell aufgenommen. Der Effekt der Relaxation ist bei hohen Temperaturen signifikanter als bei Raumtemperatur, daher ist die Wirkung der chemisch induzierten Spannung auf den ebenen Spannungszustand geringer. Im Vergleich zu der vorangegangenen Studie 4. ist die v. Mises Spannung gleichmäßiger verteilt.

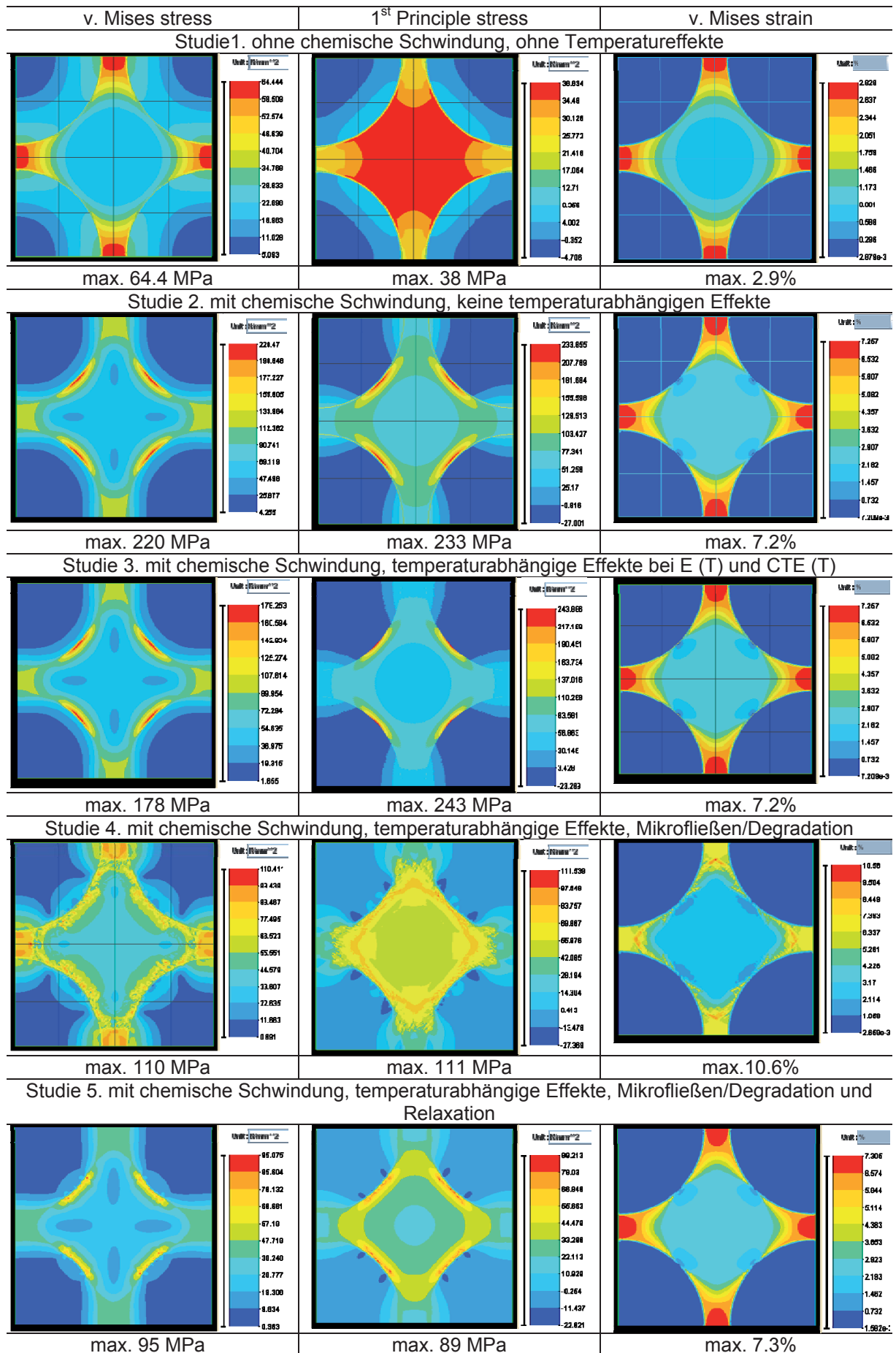


Fig. 16: Ergebnisse der Parameterstudie zum Einfluss von Nichtlinearitäten der Matrix

Unter Anwendung der Information von temperaturabhängigen Fließ- und Degradationsfunktionen (Gleichung 11.12.) können die betroffenen Bereiche angezeigt werden. Mikroskopisches Fließen erfolgt an Positionen mit hohen Belastungen. Dieses Fließen führt zu einer Umverteilung der Spannungen in der Matrix, was wiederum zu größeren Bereichen führt, in denen Fließen auftritt (vgl. Studie 3). Die Umverteilung verringert die gesamte Steifigkeit der Matrix, jedoch können mikroskopische Schäden nicht vermieden werden. Diese treten in der Nähe der Faser-Matrix-Grenzfläche. Im FE-Modell wurde die Faser-Matrix-Grenzfläche als ideal verbunden angenommen und modelliert. Deshalb kann an dieser Stelle keine Aussage über Matrix oder Grenzflächenversagen getroffen werden.

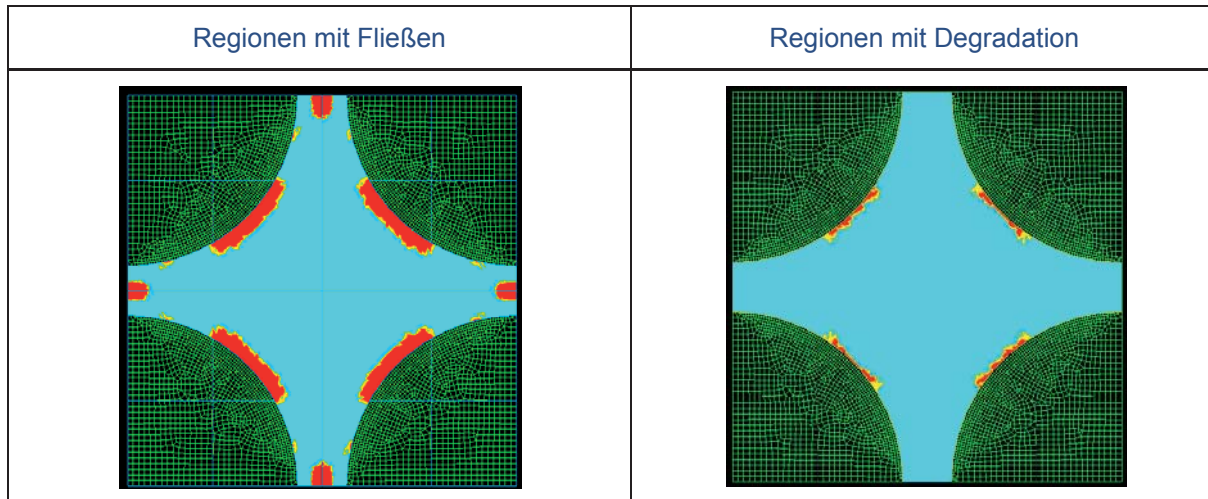


Fig. 17: Ergebnisse der Studie 5 – Fließen und Versagen der Matrix

4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden prozessabhängige Eigenspannungen von Verbundwerkstoffen analysiert. Dazu wurde eine Prozesssimulation mit einer quadratischen Einheitszelle durchgeführt und die Auswirkungen chemischer Schwindung und thermisch induzierten Schrumpfs dargestellt. Experimentell wurde die Polymermatrix untersucht und das thermomechanische Verhalten charakterisiert. Temperaturabhängige Effekte wie Fließen, Degradation und Relaxation wurden in die Prozesssimulation schrittweise implementiert und die Ergebnisse in einer Parameterstudie gegenübergestellt. Die folgenden Aussagen können aus der Analyse abgeleitet werden:

- Die Analyse prozessabhängiger Eigenspannungen unter ausschließlicher Verwendung thermischen Schrumpfs ist nicht ausreichend und führt zu überhöhten maximalen Spannungen und veränderten Spannungsverteilungen bzw. Spannungsmaxima
- Die Superposition chemischer Schwindung und thermischen Schrumpfs führt im Falle eines linearen Matrixverhaltens zu unrealistisch hohen Spannungswerten. In Wirklichkeit verhält sich das Polymer thermomechanisch komplex: Es tritt Fließen und Degradation auf. Durch diese Effekte erfolgt eine Umverteilung von Spannungen.
- Während des Prozesses tritt Mikrodegradation auf und beschädigt die Faser-Matrix-grenzfläche. Dies verschlechtert die resultierende Festigkeit insbesondere in Richtung quer zur Faser.

Es wurde gezeigt, dass während des Herstellungsprozesses Spannungen induziert werden, die auf chemischer Schwindung und thermischer Schrumpfung basieren, und mit Hilfe eines mikromechanischen Modells analysiert werden können. Eine Anwendung der in dieser Studie erzielten Ergebnisse ist eine genauere Annäherung an homogenisierten Eigenschaften, Festigkeiten und Eigenspannungen.

Insgesamt können diese Entwicklungen und ihre vollständige Integration in handelsübliche Softwarepakete wie MECANO / SAMCEF Ingenieuren ein erweitertes Analyse- und Simulations-Tool zur Berechnung induzierter Verformungen und Eigenspannungen bieten.

5 Danksagungen

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des nationalen Luftfahrt Forschungsprogramms IV (LuFo IV) und im Rahmen des Projekts „FACT / Vitech“.

6 Referenzen

- [1] Bih-Cherng Chern, Tess J. Moon, John R. Howell and Wiling Tan, (2002) New Experimental Data for Enthalpy of Reaction and Temperature- and Degree-of-Cure-Dependent, *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, Vol. 36, No. 17/2002
- [2] Huang, Xiaogang, Gillespie, John W., Bogetti, Travis, (2000), Process induced stress for woven fabric thick section composite structures *Composite Structures* 49
- [3] Partridge, Ivana, Karkanas, Panagiotis. (2000) Cure Modelling and Monitoring of Epoxy/Amine Resin Systems / 1. Cure Kinetics Modeling, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 77,
- [4] Svanberg, J. Magnus / Holmberg J. Anders, (2004) Prediction of shape distortions Part I. FE-implementation of a path dependent constitutive model, *Composites: Part A* 35
- [5] A. A. Johnston, (1996) An integrate model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composites structures, PhD thesis The University of British Columbia
- [6] VDI-2014, Part 3 Beuth Verlag 2006
- [7] Nima Zobeiry (2006), Viscoelastic constitutive models for evaluation of residual stress in thermoset composite during cure, PhD thesis, University of British Columbia
- [8] Partridge, Ivana / Skordos, A. (2001) Modelling the Cure of a Commercial Epoxy Resin for Applications in Resin Transfer Moulding, *Polym. Eng. Sci.* 41; 2001:
- [9] J.M. Balvers, H.E.N. Bersee, and A. Beukers (2008), Determination of Cure Dependent Properties for Curing Simulation of Thick-Walled Composites, 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA 2008-2035
- [10] Y. Abou Msallem, F. Jacquemin, N. Boyard, A. Poitou, D. Delaunay, S. Chatel (2010), Material characterization and residual stresses simulation during the manufacturing process of epoxy matrix composites, *Composites: Part A* 41
- [11] S.R. White and H.T. Hahn, (1992), Process Modeling of Composite Materials: Residual Stress Development during Cure. Part I. Model Formulation, *Journal of Composite Materials* 1992; 26;
- [12] H. Thomas Hahn (1976), Residual Stresses in Polymer Matrix Composite Laminates, *Journal of Composite Materials*; 10;
- [13] H. Schürmann, (2005), *Konstruieren mit Faser-Kunststoff Verbunden*, second Edition Springer Verlag, Berlin
- [14] S. Wijskamp (2005), Shape Distorsions in Composite Forming, PhD thesis, University Twente, Netherlands
- [15] H. Puroi, A Stieglitz, P. Woizeschke, A. S. Herrmann (2010), Beschleunigte Prozesskette für die Herstellung von CFK-Spanen in hoher Stückzahl, Proceedings of the 2010 German Congress on Aeronautics and Astronautics, Hamburg, Germany
- [16] M. Zocher, S. Grooves, D. Allen (1997). A Three Dimensional Finite Element Formulation for Thermoviscoelastic Media. *International Journal for numerical Methods in Engineering* 40,
- [17] T. Hobbiebrunken, B. Fiedler, M. Hojo, S. Ochiai, K. Schulte, Microscopic yielding of CF/epoxy composite and the effect on the formation of thermal residual stresses, (2005), *Composite Science and technology* 65 (2005) 1626-1635
- [18] M. Holst, Reaktionsschwindung von Epoxidharz Systemen, (2001), Dissertation University Darmstadt
- [19] S.C. Liu, Residual Stress Characterization For Laminated Composites, (1996), PhD Thesis, University of Florida
- [20] D. Dykemann, Minimizing uncertainties in cure modeling in composites, (2008), PhD Thesis, University of Columbia

Adaptive Finite-Elemente-Methode von anisotropen 3D-Verbundstrukturen

Michael Weise¹, Hansjörg Schmidt¹, Matthias Klärner², Arnd Meyer¹, Martin Kausch², Lothar Kroll²

1: Fakultät für Mathematik, Professur Numerische Analysis

2: Fakultät für Maschinenbau, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Technische Universität Chemnitz, Deutschland

1 Einleitung

Die Methode der finiten Elemente (FEM) ist ein bekanntes und weit verbreitetes Verfahren zur Simulation mechanischer Probleme. Eine hohe Genauigkeit bei der Berechnung lokaler Spannungsspitzen erfordert allerdings eine sehr feine Vernetzung, welche derzeit noch zu hohem numerischen Aufwand und langen Berechnungszeiten führt. Eine wichtige Erweiterung dieser Methode ist das Konzept der adaptiven Simulation. Mit der adaptiven FEM wird ausgehend von einem groben Ausgangsnetz eine iterative Verfeinerung an Stellen mit einem hohen Spannungsgradienten vorgenommen. Das Verfahren erkennt selbstständig kritische Bereiche und verfeinert gezielt das Netz an Störstellen. Dabei ist keine Vorhersage dieser kritischen Bereiche durch den Anwender notwendig. Daraus resultiert zudem eine hochgenaue Berechnung selbst bei einer geringen Anzahl von Elementen im Vergleich zur konventionellen FEM.

Bei der numerischen Berechnung von komplexen Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffen (FKV) muss deren spezielles anisotropes Materialverhalten in Betracht gezogen werden. Dazu wurde der an der Professur Numerische Analysis der TU Chemnitz entwickelte adaptive FEM-Code um das Materialgesetz für linear-elastisches, transversal isotropes Material erweitert.

Für die Verifizierung der erarbeiteten Methode wurde ein faserverstärktes Kettenglied einer Leichtbau- Förderkette näher untersucht. Die Simulationsergebnisse der erweiterten Methode wurden sowohl mit denjenigen aus einem kommerziellen FEM-Paket als auch mit experimentellen Ergebnissen verifiziert.

2 Adaptive FEM

2.1 Überblick

Bei der adaptiven FEM besteht jeder Iterationsschritt aus drei Teilschritten:

- Berechnung einer Näherungslösung
- Lokale Fehlerschätzung
- Lokale Netzverfeinerung (von Elementen mit großem Beitrag zum Gesamtfehler)

Aus der Verfeinerung von Elementen mit großem Fehler folgt ein lösungsorientiertes Netz. Dadurch können Spannungsverteilungen mit einer hohen Auflösung an den interessanten Störstellen berechnet werden, während Stellen mit einem „glattem“ Spannungsfeld weniger hoch aufgelöst werden, um Rechenleistung zu sparen. Dies führt zu einer hochgenauen und verlässlicheren Spannungsvorhersage im Vergleich mit der klassischen FEM, welche stets das Risiko eines lokal zu groben oder zu feinen Netzes birgt. Da Versagenskriterien oft auf der Auswertung von Spannungen basieren, ist das beanspruchungsangepasste Netz ein besonderer Vorteil der neuen Methode.

Ein weiterer Vorteil der adaptiven Netzanpassung ist die sich während der Iteration entwickelnde Hierarchie der Elemente, welche zur Konstruktion eines guten Vorkonditionierers genutzt werden kann. Die Kombination eines derartigen Vorkonditionierers mit einem iterativen Verfahren zur Lösung des FEM-Systems, wie dem Verfahren der konjugierten Gradienten, ergibt einen sog. schnellen Löser. Damit kann die resultierende Reihe von Berechnungsproblemen erheblich zeiteffizienter gelöst werden, als ein einzelnes FEM-Problem ohne lösungsorientiertes Netz mit vergleichbarer Genauigkeit. Im Allgemeinen liefert die adaptive FEM genauere Ergebnisse unter gleichzeitiger Reduzierung des Zeitaufwandes für FE-Berechnungen und ist vor allem für numerischen Analy-

sen bei wirklichkeitsnahen Versagensvorhersagen, Sensitivitätsanalysen oder der Berechnung vieler Lastschritte besonders geeignet.

Ein geringer Nachteil ist auf die Notwendigkeit der hierarchischen Datenstrukturen zurückzuführen, welche einen zusätzlichen Aufwand bei der Implementierung nach sich zieht. Dies ist der wesentliche Grund dafür, dass die adaptive FEM bisher nur in einigen Forschungsgruppen zum Einsatz kommt und noch nicht ihren Weg in kommerzielle FEM-Pakete gefunden hat. Weitere detaillierte Informationen über adaptive FEM-Verfahren sind einschlägiger Literatur zu entnehmen (z. B. [1]-[4]).

2.2 Merkmale der neuen Implementierung

In den vergangenen Jahren wurden an verschiedenen Forschungseinrichtungen effiziente Implementierungen der adaptiven FEM entwickelt, unter anderem auch an der Professur Numerische Analysis der TU Chemnitz. Die Basis bildet eine hierarchische Datenstruktur. Für jedes unterteilte Element ist bekannt, welche Elemente seine „Söhne“ sind, das gleiche gilt für Flächen und Kanten.

Das vorkonditionierte Verfahren der konjugierten Gradienten (preconditioned conjugate gradient method, PCGM) wird verwendet, um das FEM-System iterativ zu lösen. Es handelt sich um ein sog. matrixfreies Verfahren, d. h. die Steifigkeitsmatrix wird nicht assembliert, sondern nur eine Matrix-Vektor-Multiplikationsroutine wird benötigt. Die Multiplikation der Steifigkeitsmatrix mit einem beliebigen Vektor wird elementweise durchgeführt, für jedes Element wird der zugehörige Anteil des Eingabevektors mit der Elementsteifigkeitsmatrix multipliziert und das Ergebnis auf die zugehörigen Stellen des Ausgabevektors addiert, welcher vorher mit Nullen initialisiert wurde. Es kommen Vorkonditionierer, welche die hierarchische Struktur ausnutzen, zum Einsatz, ähnlich wie beim Multigrid-Verfahren. Konkret wurden ein Yserentant-Vorkonditionierer für 2D-Berechnungen und ein Bramble-Pasciak-Xu-Vorkonditionierer für 3D implementiert (siehe [5]-[6]). Da die Hierarchie automatisch während der Netzverfeinerung entsteht, ist der Löser sehr gut auf das generelle Vorgehen abgestimmt.

Für den Fehlerschätzer wurde ein residuenbasierter Ansatz umgesetzt. Für jedes Element wird ein Fehleranzeiger aus der Summe des Elementresiduums und eines Kantensprungterms (in 2D, Flächensprungterm in 3D), skaliert mit dem kleinsten Eigenwert des Materialtensors im Element, berechnet.

$$\eta_T^2 = \frac{1}{\lambda_{\min}(C)} \left(h_T^2 \|r_T\|_T^2 + \sum_{E \subset \partial T} h_T \|r_E\|_E^2 \right) \quad (1)$$

mit

$$r_T = \operatorname{div} \sigma(u_h) + q \cdot p \quad (2)$$

und

$$r_E = \begin{cases} \frac{1}{2} [\sigma(u_h) \cdot n] & \text{für innere Kanten/Flächen} \\ \sigma(u_h) \cdot n - g & \text{für Neumann-Kanten/Flächen} \\ 0 & \text{für Dirichlet-Kanten/Flächen.} \end{cases} \quad (3)$$

Die Datenstruktur enthält Geometrieinformationen für Kanten und Flächen. Während der Verfeinerung werden diese Informationen genutzt um jeden neu erstellten Knoten an seine korrekte Position zu projizieren, siehe Abb. 1 für ein vereinfachtes Beispiel. Mit dieser Funktion ist es möglich, mit einem sehr groben Netz zu starten und die Geometrie trotzdem in späteren Schritten gut zu approximieren. Ein sehr feines Startnetz ist darüber hinaus auch nicht gewünscht, da erst Verfeinerungen die gewollte hierarchische Struktur erzeugen.

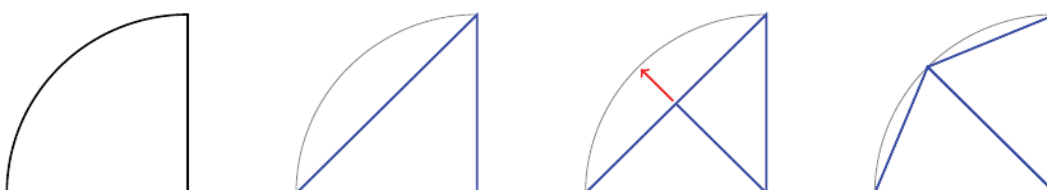


Abb. 1: Beispiel für Geometrie erhaltende Netzverfeinerung. Von links nach rechts: gegebene Geometrie, grobes Netz, verfeinertes Netz (unkorrigiert), verfeinertes Netz (korrigiert).

Der Wert für die Lösung auf den neuen Knoten wird aus den Lösungswerten der Vaterknoten interpoliert. Dies bildet eine gute Startlösung für die PCGM-Iteration im nächsten adaptiven Schritt, was zu einem Kaskadeneffekt führt. Hieraus resultiert eine schnelle Konvergenz, die PCGM-Iteration konvergiert nach nur wenigen Schritten.

Die Implementierung unterstützt in ihrer aktuellen Form 2D- und 3D-Probleme sowie eine Parallelrechner-Version. Dabei existieren Programmmodule für die Poisson-Gleichung, lineare Elastizität, nichtlineare Elastizität bei großen Deformationen, Piezoelektrizität und weitere spezielle Probleme.

2.3 Transversal isotropes Material

Zur numerischen Berechnung komplexer Bauteile aus FKV wurde der Code entsprechend modifiziert. Im Vordergrund steht dabei eine unidirektionale FKV-Schicht, die mit der bekannten Homogenisierungstechnik als Kontinuum mit transversal isotropem Materialverhalten betrachtet wird (eine spezielle Form der Orthotropie). Das Material ist gekennzeichnet durch eine Richtung mit abweichendem Verhalten von dem der transversalen Ebene, welches isotrop ist. Im Anwendungsfall zeigt die Faserrichtung ein wesentlich steiferes Verhalten als die quasi-isotrope Ebene orthogonal zu ihr.

Betrachtet wird ein linear-elastisches Materialverhalten, bei dem eine Elastizitätsmatrix aus einem Tensor vierter Stufe abgeleitet werden kann. Der transversal isotrope Materialtensor besitzt im Vergleich zum isotropen mehr unabhängige Komponenten, um das richtungsabhängige Verhalten zu modellieren. Dazu werden fünf unabhängige Materialparameter benötigt, im Unterschied zu zwei Parametern im isotropen Fall. In der Regel wird die Elastizitätsmatrix in einem Koordinatensystem bezogen auf die Faserrichtung angegeben und muss mit einer speziellen Transformationsmatrix multipliziert werden, um sie durch eine Rotation in das beliebige globale Koordinatensystem zu überführen. Nach dieser Transformation enthält die transversal isotrope Elastizitätsmatrix mehr Nicht-Null-Einträge als die isotrope. In [5] wurde eine direkte Formel für die transversal isotrope Elastizitätsmatrix ohne Notwendigkeit einer weiteren Rotation hergeleitet. Diese Veröffentlichung enthält außerdem die reduzierten Matrizen für den ebenen Spannungs- und den ebenen Verzerrungszustand und analysiert den kleinsten Eigenwert des Materialtensors, welcher für die Skalierung des Fehlerschätzers benötigt wird.

Im faserangepassten Koordinatensystem $a = (a_1, a_2, a_3)^T$ kann die Elastizitätsmatrix als

$$C = \lambda \hat{e}\hat{e}^T + \mu \text{diag}(\hat{d}) + \alpha(\hat{a}\hat{e}^T + \hat{e}\hat{a}^T) + 2(\mu_a - \mu) \left(\sum_{i=1}^3 d_i d_i^T \right) + \beta \hat{a}\hat{a}^T \quad (4)$$

mit den Definitionen

$$\begin{aligned} \hat{e} &= (1, 1, 1, 0, 0, 0)^T, \\ \hat{d} &= (2, 2, 2, 1, 1, 1)^T, \\ \hat{a} &= (a_1^2, a_2^2, a_3^2, a_1 a_2, a_2 a_3, a_1 a_3)^T, \\ d_1 &= \left(\sqrt{2} a_1, 0, 0, \frac{\sqrt{2}}{2} a_2, 0, 0 \right)^T, \\ d_2 &= \left(0, \sqrt{2} a_2, 0, 0, \frac{\sqrt{2}}{2} a_1, 0 \right)^T, \\ d_3 &= \left(0, 0, \sqrt{2} a_3, 0, 0, \frac{\sqrt{2}}{2} a_1 \right)^T \end{aligned} \quad (5)$$

formuliert werden. Damit gilt

$$t = Ce, \quad t = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13})^T, \quad e = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{13})^T. \quad (6)$$

Es wird darauf hingewiesen, dass die Reihenfolge der jeweils letzten drei Einträge der Vektoren t und e in der Literatur nicht einheitlich ist, was im isotropen Fall für die Matrix keine Rolle spielt, aber im anisotropen Fall zu Fehlern führen kann. Bei einer Vertauschung müssen die zugehörigen Einträge der Matrix ebenfalls getauscht werden. Die ersten beiden Terme aus (4) ergeben die isotrope Elastizitätsmatrix

$$C_{iso} = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu & 0 & 0 \\ & \text{symmetrisch} & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{pmatrix} \quad (7)$$

während die drei zusätzlichen Terme das richtungsabhängige Verhalten des FKV einbringen. Für $a = (1,0,0)^T$ nimmt die transversal isotrope Matrix die Form

$$C = \begin{pmatrix} \lambda + 2\alpha + \beta + 4\mu_a + 2\mu & \lambda + \alpha & \lambda + \alpha & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu_a & 0 & 0 \\ & \text{symmetrisch} & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu_a \end{pmatrix} \quad (8)$$

an. Die fünf Konstanten dieser Formulierung lassen sich aus den gebräuchlichen Ingenieurskonstanten gemäß

$$\begin{aligned} \lambda &= E_b \left(v_{bb} + \frac{E_b v_{ab}^2}{E_a} \right) / D, \\ \mu &= G_{bb} = \frac{E_b}{2(1+v_{bb})}, \\ \mu_a &= G_{ab}, \\ \alpha &= E_b \left(v_{ab} \left(1 + v_{bb} - \frac{E_b v_{ab}}{E_a} \right) - v_{bb} \right) / D, \\ \beta &= \left(E_a (1 - v_{bb}^2) - E_b \left(v_{bb} + \frac{E_b v_{ab}^2}{E_a} \right) - 2E_b \left(v_{ab} \left(1 + v_{bb} - \frac{E_b v_{ab}}{E_a} \right) - v_{bb} \right) \right) / D \\ &\quad - 4G_{ab} + \frac{E_b}{1+v_{bb}}, \end{aligned} \quad (9)$$

berechnen, wobei sich der Index a auf die Faserrichtung und der Index b auf die transversale isotrope Ebene beziehen. Bei den Querdehnzahlen v_{ij} bezeichnet der erste Index die Belastungsrichtung und der zweite Index die Kontraktionsrichtung, die Reihenfolge der Indizierung ist in der Literatur nicht einheitlich.

Bei der erarbeiteten Implementierung wird die Faserrichtung punktweise durch eine Subroutine ausgewertet. Dadurch ist prinzipiell die Simulation beliebiger 3D-Faserverläufe möglich. Gebiete mit lokal stark schwankenden Faserverläufen oder sehr dünnen Schichten würden allerdings überall eine sehr feine Vernetzung erfordern und lassen sich daher in der Praxis mit diesem Ansatz nur schwer simulieren. Für die 3D-Simulation können weitere Homogenisierungstechniken genutzt werden, um durch eine Mittelung wieder größere Elemente verwenden zu können. Für die 2D-Simulation sind solche Ansätze ohnehin notwendig, wodurch dem sich über die Plattendicke ändernden Schichtenaufbau Rechnung getragen wird.

Für die Simulation von FKV-Laminaten benötigt wird eine gemittelte Elastizitätsmatrix benötigt, welche die Einflüsse aller Schichten beinhaltet. In der Praxis wird hier oft die klassische Laminattheorie (CLT) herangezogen. Bei Platten mit einem unsymmetrischen Schichtaufbau tritt eine Kopplung zwischen reinem Platten- und Scheibenanteil auf, die Probleme können nicht separat voneinander gelöst werden. Die Entwicklung eines guten Vorkonditionierers für ein derartiges gekoppeltes Scheiben- und Plattenelement steht derzeit im Vordergrund unserer Forschungsarbeiten.

3 Anwendungsbeispiel: Faserverstärkte Kettenglieder

3.1 Leichtbau-Fördersysteme mit FKV-Gleitketten

In der technischen Logistik haben Stetigförderer mit umlaufenden Zug- und Tragmitteln aus Kunststoff einen immer größeren Marktanteil. An diese Kunststoff-Gleitketten werden hohe Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Gleiteigenschaften gestellt. Die Einsatzmöglichkeiten sind dabei seitens der ertragbaren Zugkraft und der damit verbundenen maximalen Förderlänge begrenzt. *Abb. 2*

zeigt die Komponenten einer Gleitkette bestehend aus einzelnen Kunststoffgliedern als Zugelemente, raumbeweglichen Gelenken und Tragplatten, welche sich im Förderer auf den Gleitschienen abstützen. Die häufigsten Versagensbilder im Einsatzfall entstehen in den Zugelementen (vgl. *Abb. 3*).

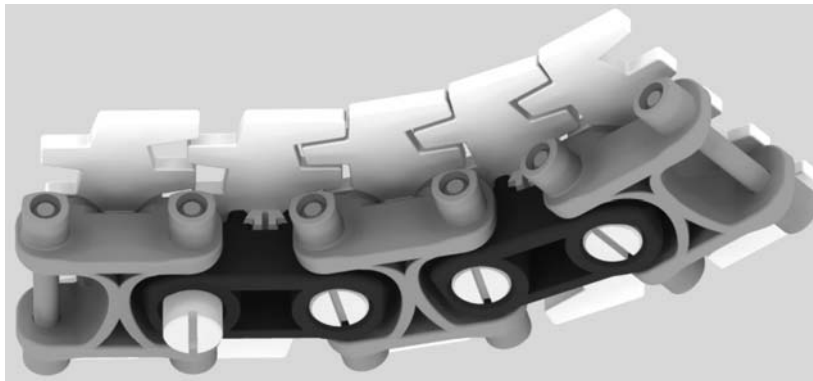


Abb. 2: Modell einer Kunststoffgleitkette [9]



Abb. 3: Typische Bruchbilder an Zugelementen von Gleitketten [10]

Neuartige Faser-Kunststoff-Verbunde mit thermoplastischer Matrix erlauben, lokale textile Versteifungen in die Bauelemente einzubringen und gleichzeitig die Vorteile der Großserienfertigung von thermoplastischen Kunststoffen beizubehalten [8]. Um dem Versagen der Kunststoffgleitketten entgegenzuwirken und damit die ertragbare Zugkraft, die Steifigkeit sowie die maximale Förderlänge zu erhöhen sollen in die Zugelemente lokale Verstärkungen aus thermoplastischen FKV-Schlaufen eingebracht werden. Dafür wurden bereits verschiedene Konstruktionsvarianten zur Gestaltung der Verstärkung durch orthotrope Einleger basierend auf den Erfahrungen mit bestehenden Kettensystemen, auch im Mehrkomponentenspritzguss, erstellt (siehe *Abb. 4*). Grundlegende Untersuchungen zur Optimierung der Einlegergeometrie und zur technologischen Entwicklung erfolgen an einer abgeleiteten vereinfachten Kettenlasche. *Abb. 4* zeigt eine rundstirnige FKV-Schlaufe mit anisotropen Materialeigenschaften umhüllt von einer isotropen thermoplastischen Komponente.

Die Optimierung der Schlaufengeometrie erfolgt mit Hilfe der FEM. Geometrische Nichtlinearitäten, Kontaktstellen zu den Lasteinleitungselementen sowie Materialübergänge induzieren lokale Spannungsüberhöhungen mit teilweise sehr hohen Spannungsspitzen. Daher ist die adaptive FEM das Mittel der Wahl für die Ermittlung der wirkenden Spannungen mit hoher Genauigkeit. Durch die erstmalige Berücksichtigung des orthotropen elastischen Materialverhaltens in der entwickelten adaptiven FEM konnten präzise Aussagen zu den Spannungsverhältnissen bei dem gewählten heterogenen und lokal orthotropen Demonstrator vorgenommen werden. Durch die erstmalige Berücksichtigung des orthotropen elastischen Materialverhaltens in der entwickelten adaptiven

FEM mit Netzanpassung an lokale Spannungsgradienten sowie die iterative Lösung sowohl des elastischen als auch des Kontaktproblems konnten präzise Aussagen zu den Spannungsverhältnissen bei dem gewählten heterogenen und lokal orthotropen Demonstrator vorgenommen werden.

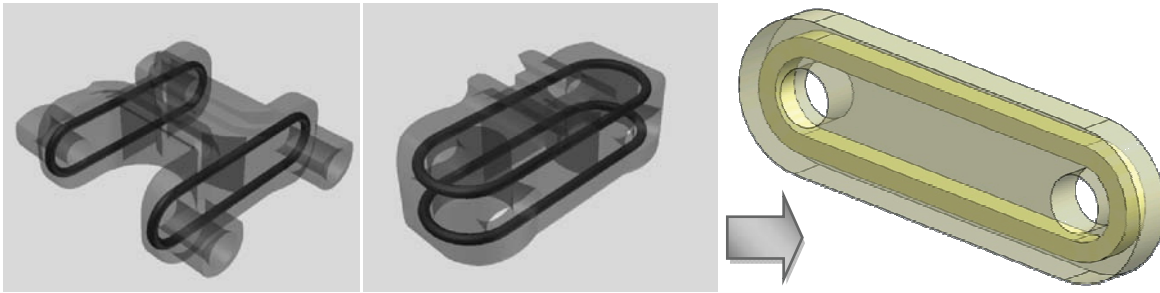


Abb. 4: Konstruktive Varianten der Verstärkung der Zugelemente durch FKV [10] und der abgeleiteter Demonstrator „Kettenlasche“

3.2 Ergebnisse der Simulation

Die FE-Berechnungen erfolgten am Modell einer Kettenlasche aus Abb. 4, das über Stahlbolzen in den Öffnungen auf Zug belastet wird. Die Bolzen werden voneinander weg gezogen, die Kettenlasche wird dadurch gestreckt.

3.2.1 Adaptive FEM

Das zu Grunde liegende Problem besitzt drei Symmetrieebenen, weshalb es ausreicht nur ein Achtel des Modells zu betrachten. Der Bolzen wird als ideal starr und unbeweglich modelliert, die Verbindung zum Bolzen als reibungslose Kontaktfläche. Die freigeschnittene Symmetrieebene zwischen den beiden Bolzen erhält eine inhomogene Dirichlet-Randbedingung, um die Zugbeanspruchung aufzubringen.

Das Ausgangsnetz ist sehr grob gewählt (siehe Abb. 5). Es besteht lediglich aus 132 Elementen mit 261 Knoten. Die Verwendung eines feineren Startnetzes ist nicht sinnvoll. Für erste Untersuchungen wurden trilineare Hexaederelemente verwendet; triquadratische Hexaederelemente stehen ebenfalls zur Verfügung.

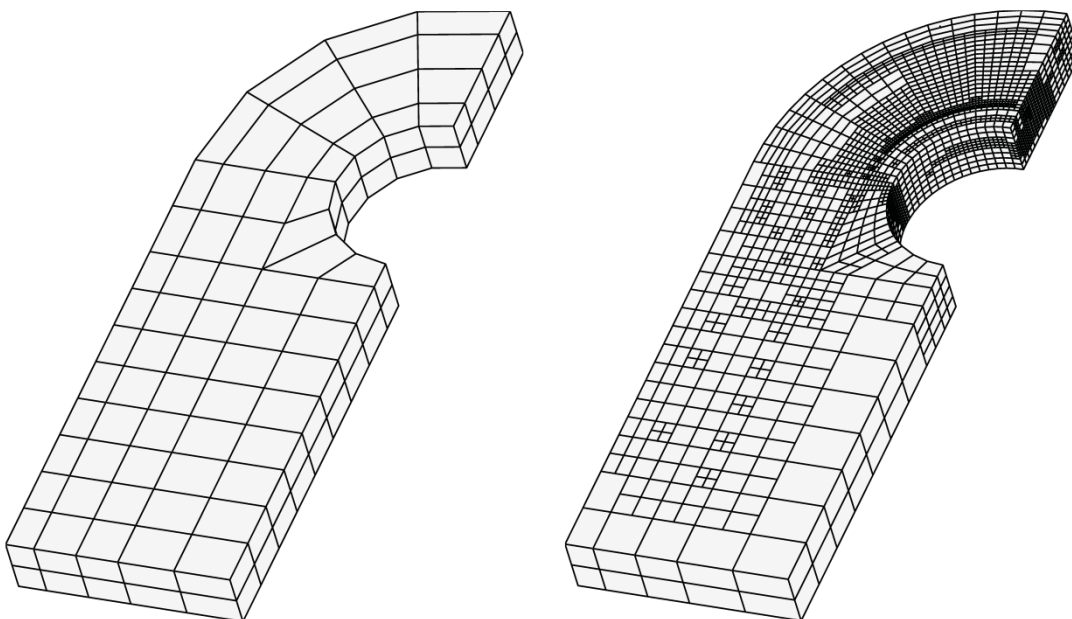


Abb. 5: Grobes Startnetz, verfeinertes Netz nach 13 Schritten

3.2.2 Kommerzielle FEM (Abaqus)

Analog zum Modell der adaptiven FEM wurde das Modell der Kettenlasche unter Berücksichtigung der drei Symmetrieebenen aus klassischen linearen Hexaederelementen aufgebaut. Die Symmetriebedingungen wurden ebenso durch Dirichlet-Randbedingungen abgebildet und stellen somit die ortsfeste Lagerung der Kettenlasche (Abb. 6) dar. Der Bolzen zur Lasteinleitung wurde als starr angenommen, über reibungsfreien Kontakt mit der Schlaufe in Verbindung gebracht und mittels Verschiebungsrandbedingungen in fünf Freiheitsgraden fixiert sowie in Längsrichtung der Schlaufe bewegt.

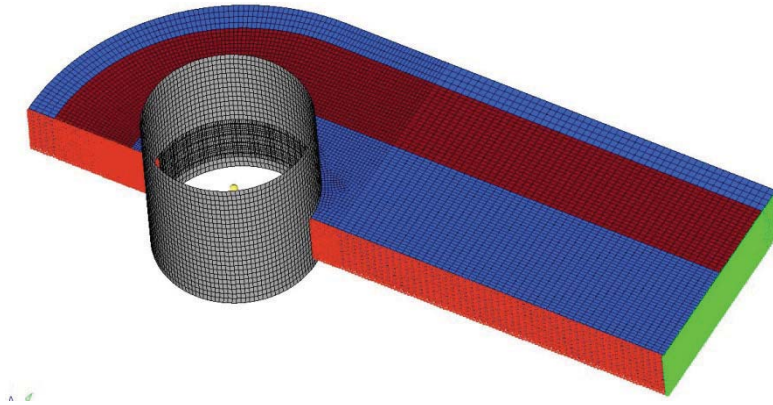


Abb. 6: FE-Modell der Kettenlasche in Abaqus

3.3 Vergleich

Zum Vergleich der Modelle der adaptiven FEM und der kommerziellen Software Abaqus wurden annähernd gleiche Element- und Knotenanzahlen gewählt (vgl. Tab. 1). Die elastisch-starren Kontaktbedingungen wurden in beiden Modellen als reibungsfrei definiert, um Unterschiede der Kontaktberechnungen zu vermeiden. Bei einer ebenso vergleichbaren Anzahl von Iterationen kommt das adaptive Modell durch die effiziente Nutzung der entstehenden Hierarchien ca. fünfmal schneller zur Lösung.

Tab. 1: Vergleich der Modelle und Lösungsgeschwindigkeiten in der adaptiven und kommerziellen FEM

	Adaptive FEM	Abaqus
Knoten	14827	17136
Elemente	10884	14442
Kontakt	elastisch-starr, reibungsfrei	elastisch-starr, reibungsfrei
Anzahl der Iterationen	13 (Vernetzung und Kontakt)	15 (Kontakt)
CPU Zeit	< 1 min.	ca. 5 min.

Mit beiden Modellen wurden vergleichbare Verschiebungsfelder und Spannungsverteilungen ermittelt. Abb. 7 zeigt die Verschiebungskomponente in Längsrichtung der Lasche, hervorgerufen durch eine Bolzenverschiebung um 0,25 mm Längsrichtung. Die Extremwerte der Verschiebungen entsprechen in beiden Fällen erwartungsgemäß den vorgegebenen Randbedingungen. Die Ausprägung der Verschiebungsfelder ist trotz der unterschiedlichen Vernetzung sehr gut vergleichbar.

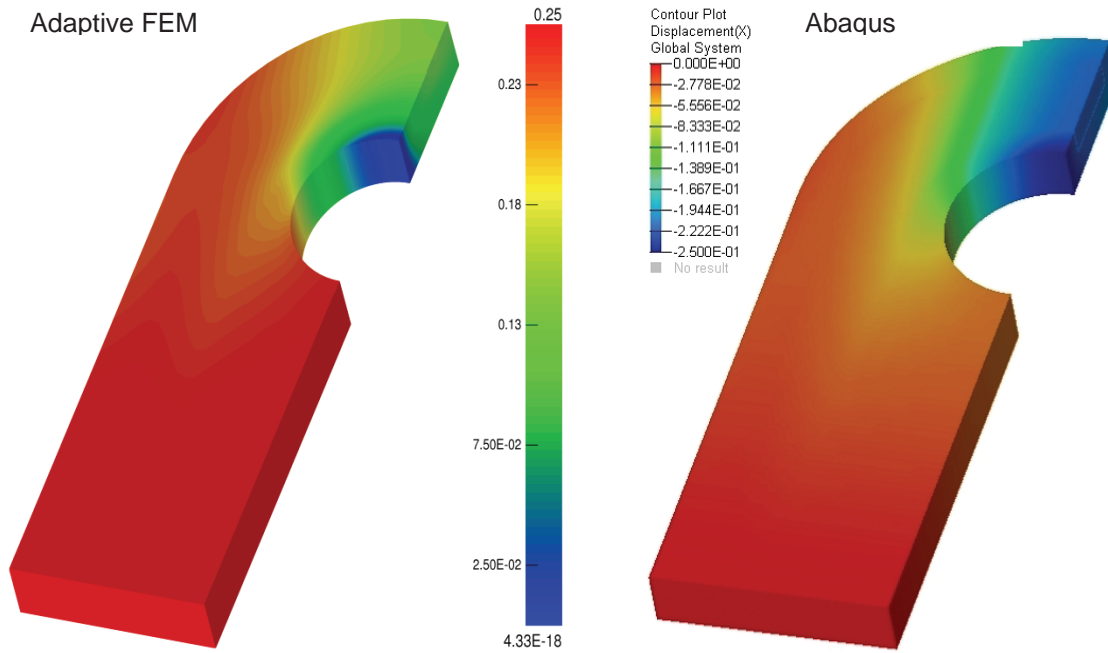


Abb. 7: Verschiebung in Längsrichtung der Schlaufe: adaptive FEM vs. Abaqus

Gemäß Abb. 8 werden mit beiden FE-Systemen analoge Verteilungen der Normalspannungen in Längsrichtung ermittelt. Die lokalen Spannungsüberhöhungen an den oft versagenskritischen Materialübergängen Einleger-Hüllkomponente in der Nähe der Lasteinleitungselemente bzw. an den Kontaktflächen zwischen Bolzen und Schlaufe sind in beiden Fällen gut erkennbar. Quantitativ sind die Extremwerte sowohl seitens der Druck- als auch der Zugspannungen durch die lokale Netzverfeinerung höher, aber noch in der gleichen Größenordnung. Dies ist ein Indiz für die erwartete höhere Ergebnisgenauigkeit im Bereich lokaler Spannungsüberhöhungen der adaptiven FEM.

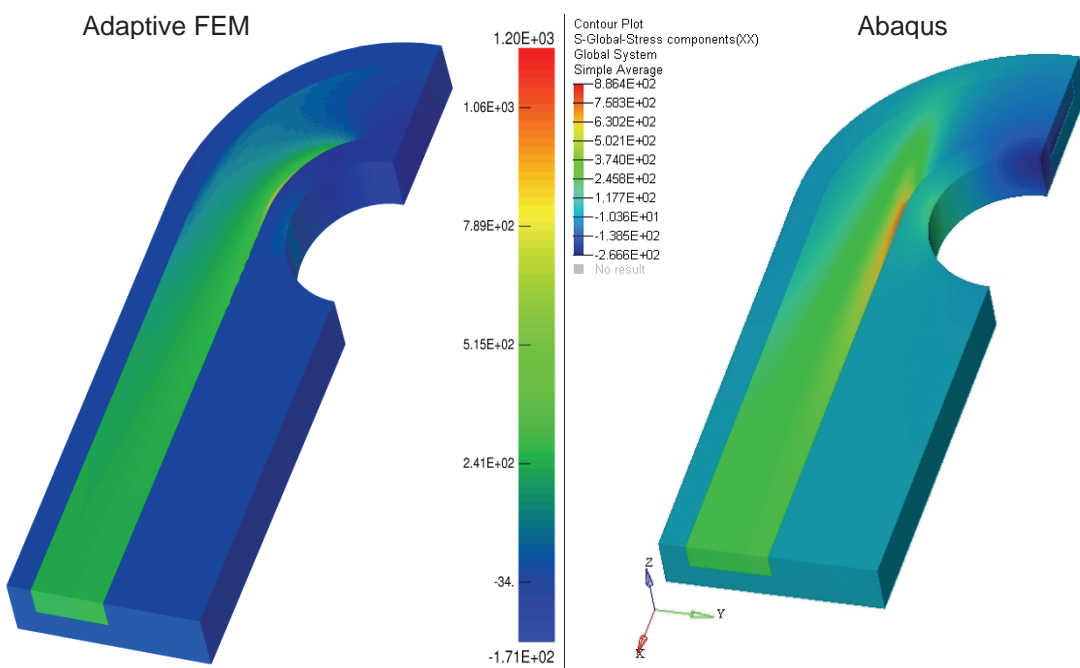


Abb. 8: Normalspannung in Längsrichtung der Schlaufe: adaptive FEM vs. Abaqus

3.4 Experimentelle Verifikation

Die Simulationsergebnisse wurden anhand von Zugversuchen verifiziert. Dafür wurden Schlaufen aus glasfaserverstärktem Polypropylen mittels zweier Stahlbolzen fixiert und in Längsrichtung weggesteuert auf Zug belastet. Dabei wurden drei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Konsolidierung durchgeführt. Die Kraft-Verschiebungs-Kurven zeigen gleiche Anstiege bei allen Proben untereinander sowie im Vergleich zu den Ergebnissen beider Berechnungsmethoden (Abb. 9). Im Detail bestätigen beide Simulationen exakt linear-elastisches Verhalten unter Zugbeanspruchung. Die sehr geringen Abweichungen bei sehr großen Deformationen sind mit dem Kontakt zwischen Einleger und Bolzen und der damit verbundenen Nichtlinearität zu begründen.

Darüber hinaus zeigen die ausgewählten Versuche ein unterschiedliches Setzungsverhalten zu Beginn der Messungen, deren Ursachen in herstellungsbedingten Ausformschrägen an der Innenseite der Schlaufen und Unterschieden in der Konsolidierung der Einleger zu suchen sind. Das Versagen der Schlaufen erfolgte jeweils auf dem weitgehend gleichen Kraftniveau zwischen 3,5 kN und 4 kN.

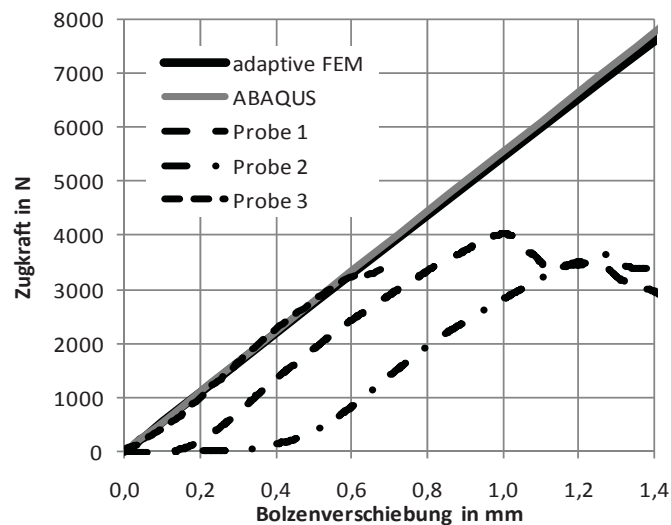


Abb. 9: Kraft-Verschiebungs-Kurven aus Zugversuchen und beiden Simulationen

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Materialgesetz für linear-elastisches, transversal isotropes Material wurde erfolgreich in ein bestehendes adaptives FEM-Programm integriert. Dadurch konnte erstmals eine Simulation eines hochbelasteten und lokal faserverstärkten Bauteils mittels adaptiver FEM durchgeführt werden. Erste Ergebnisse wurden durch den Vergleich mit kommerzieller FEM-Software und durch Experimente bestätigt.

In weiterführenden Arbeiten soll unter Verwendung des optischen Messsystems GOM-ARAMIS ein 3D-Verschiebungsfeld aufgezeichnet und für einen detaillierten Vergleich zwischen adaptiver FEM-Simulation und experimentellen Ergebnissen genutzt werden. Ferner wird ein schneller Löser für ein gekoppeltes Scheiben-Platten-Element entwickelt, der die Simulation dünnwandiger transversal isotroper Strukturen erlaubt. Darüber hinaus werden die hochgenauen Berechnungsergebnisse durch die Einbindung von physikalisch begründeten Versagenskriterien zur exakten Vorhersage von Bauteilversagen herangezogen.

5 Danksagungen

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®). Das Projekt wird gefördert von der Europäischen Union aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln des Freistaats Sachsen.



Europa fördert Sachsen.
EFRE
 Europäischer Fonds für
 regionale Entwicklung



STAATSMINISTERIUM
 FÜR WISSENSCHAFT
 UND KUNST



Freistaat
SACHSEN

6 Literatur

- [1] Ainsworth, M.; Oden, J.; A Posteriori Error Estimation in Finite Element Analysis, Pure and Appl. Math., Wiley-Interscience Publ. New York- Chichester-et al, 2000.
- [2] Bangerth, W.; Rannacher, R.; Adaptive Finite Element Methods for Differential Equations, Lectures in Math. ETH Zürich, Birkhäuser Verlag 2003.
- [3] Stein, E. (Ed.); Error-controlled Adaptive Finite Elements in Solid Mechanics, Wiley & Sons, Chichester 2003.
- [4] Verfürth, R.; A Review of a posteriori Error Estimation and Adaptive Mesh Refinement Techniques, Wiley-Teubner, Chichester, Stuttgart 1996.
- [5] Yserentant, H.; Two preconditioners based on the multilevel splitting of finite element spaces, Numer. Math. 58, 163-184, 1990.
- [6] Bramble, J. H.; Pasciak, J. E.; Xu, J.; Parallel Multilevel Preconditioners, Math. Comp. 55, 191, 1-22, 1990.
- [7] Weise, M.; Meyer, A.; Grundgleichungen für transversal isotropes Materialverhalten, Chemnitz Scientific Computing Preprints, (2010), Nr. 3
- [8] Klärner, M.; Bayreuther, V.; Kuprin, C.; Czech, A.; Kausch, M.; Kroll, L.; Wielage, B.; Nestler, D.; Wagner, M.: Ressourcenschonende Verbundstrukturen und Technologien durch Ultraleichtbau. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD. Chemnitz: 2010, S. 325-348.
- [9] Nendel, K.; Richter, F.; Weise, S.; Schreiter, M.; Schumann, A.; Stryhal, Z.; Kupfer, H.: Entwicklung energieeffizienter Zug- und Tragmittel durch die Verwendung von Verbundbauweisen und Beschichtungen. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD. Chemnitz: 2010, S. 597-617.
- [10] Nendel, K.; Kroll, L.; Sumpf, J.; Schreiter, M.; Weise, S.; Klärner, M.; Kausch, M.; Optimierung von Kunststoffketten durch textile Verstärkungsstrukturen, DGM - 18. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Chemnitz: 2011, S. 505 - 510.

CFD-Simulation zur Optimierung einer Mikropumpe mit Tesla-Ventilen

Robert Schadwill, Erwin Bürk, Metin Giousouf
Festo AG & Co. KG, Esslingen am Neckar, Deutschland

Frank Rüdiger
TU Dresden, Deutschland

Um Mikropumpen mit Tesla-Ventilen erfolgreich in der Mikrosystemtechnik einzusetzen, wird eine systematische Methode für die Designoptimierung benötigt. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen der ANSYS Workbench Parameterstudien an einem derartigen System durchgeführt. Mit Hilfe der stationären CFD-Simulation wurde insbesondere der Einfluss der Ventilgeometrie auf das Diodenverhalten des Aufbaus untersucht. Anhand dieses Anwendungsbeispiels konnte eine systematische Vorgehensweise für eine effiziente Designstudie aufgestellt und erprobt werden. Erste Hinweise zur Verbesserung der Konstruktion und damit zur Erhöhung der Leistungsgrenzen von Mikropumpen mit Tesla-Ventilen konnten formuliert werden.

Einleitung

Die Mikrosystemtechnik hat sich in der jüngeren Vergangenheit zu einer Schlüsseltechnologie für zahlreiche Innovationen entwickelt. Wesentliche Vorteile der Mikrosystemtechnik sind Kostenreduktion und eine erhöhte Zuverlässigkeit infolge der sinkenden Anzahl von Schnittstellen durch Mikrointegration von Komponenten. Weitere positive Effekte, die bei der Miniaturisierung auftreten, sind die Abnahme des Gewichts und des Energieverbrauchs. Damit erschließen sich vielfältige Anwendungsbereiche, wie beispielsweise in der chemischen Analyse, der medizinischen Diagnostik oder der Kühlung von mikroelektronischen Bauteilen. Insbesondere bei Laboranwendungen können kleinste Dosiermengen für die Bioanalytik zum Einsatz kommen, wodurch z. B. in der Arzneierstellung Kosten gesenkt werden. Wesentlicher Bestandteil derartiger Systeme für Fluidhandling sind u. a. Mikropumpen (siehe Abb. 1). Für das Erzeugen des Pumpeffekts benötigt man neben einem Aktor und einer Pumpkammer auch Mikroventile. Von Vorteil sind dabei Tesla-Ventile, die sich aufgrund des Fehlens beweglicher Teile als robust, zuverlässig und leicht zu reinigen erweisen.

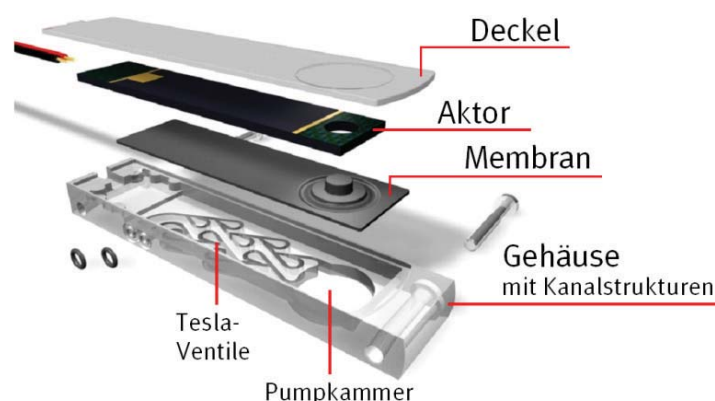


Abb. 1: Mikropumpe mit Tesla Ventilen – Explosionsdarstellung mit den wesentlichen Bauelementen

Obwohl Mikropumpen mit Tesla-Ventilen seit einiger Zeit bekannt sind [1], gibt es dazu nur wenige systematische Untersuchungen. Hier setzt die vorliegende Arbeit an, in der CFD-Simulationen mit parametrisierten Modellen durchgeführt wurden. Dabei kam ANSYS CFX 13.0 zum Einsatz. Die ANSYS-Workbench stellt Möglichkeiten zur Verfügung, geometrische und/oder physikalische Parameter anwenderfreundlich zu definieren und CFD-Berechnungen automatisiert durchzuführen. Mit einer Parameterstudie wurden Ansätze zur Erhöhung der Leis-

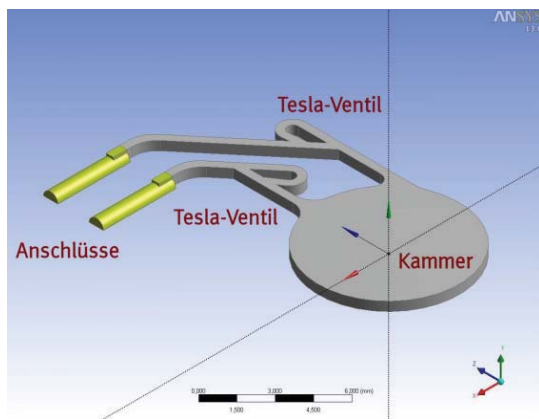
tungsgrenzen mikrofluidischer Pumpen mit Tesla-Ventilen herausgearbeitet. Der Schwerpunkt der Analyse lag auf der Verbesserung der Ventilgeometrie und damit auf einer Erhöhung der Fördermenge der Pumpe. Es wurde wie folgt vorgegangen:

- Zu Beginn wurde die Geometrie des Ventils analysiert. Parameter, welche für die Verbesserung der Konstruktion wesentlich sind, wurden identifiziert.
- Es folgte die Zusammenstellung verschiedener Ventilkonfigurationen.
- Mit Hilfe der CFD-Simulation wurden dann die Kennwerte der einzelnen Konfigurationen numerisch berechnet und miteinander verglichen. Günstige Parameterwerte konnten so bestimmt werden.

1 Geometrische Parameter der Konstruktion

Mikropumpen bestehen typischerweise aus einer Kammer, deren Volumen durch die periodische Auf- und Abwärtsbewegung eines Kolbens bzw. einer Membran verkleinert und vergrößert wird, sowie aus Ventilen in Zu- und Ablauf, siehe Abb. 2. In der Regel kommen Ventile ohne bewegliche Teile zum Einsatz, die einfach zu fertigen und nicht störanfällig sind. Diese „fluidischen Dioden“ basieren auf einem von der Strömungsrichtung abhängigen Widerstand. Ein typischer Vertreter dieser Ventilgattung ist das Tesla-Ventil [5].

Schematischer Aufbau



Geometrische Parameter der Konstruktion

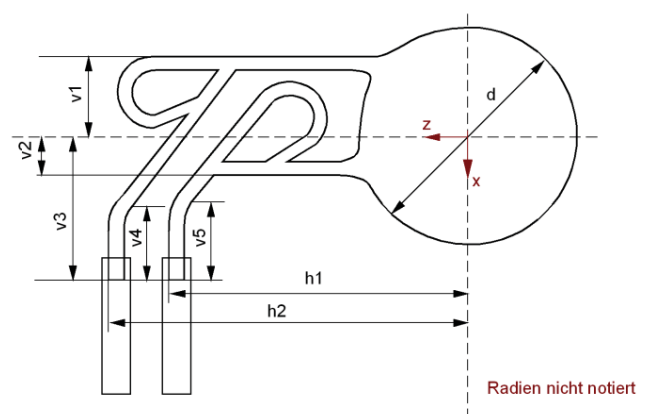
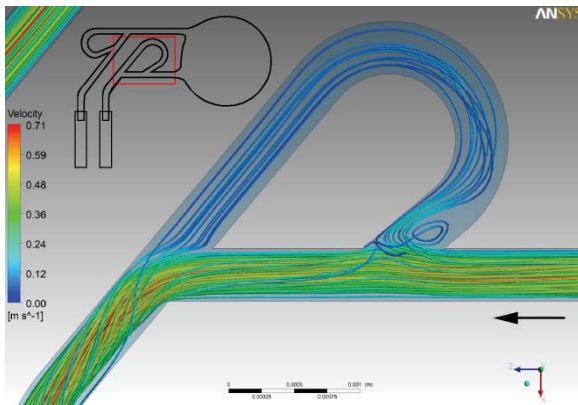


Abb. 2: Mikropumpe mit Tesla Ventilen – schematischer Aufbau und wichtige geometrische Parameter der Konstruktion

Die Funktionsweise eines Tesla-Ventils lässt sich am besten anhand eines Strömungsbildes (siehe Abb. 3) erläutern – dargestellt ist der Stromlinienverlauf im Ventil bei stationärer Durchströmung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Geometrie dem Fluid bei Vorwärtsbewegung nur wenig Widerstand entgegensetzt, während es bei der Rückströmung durch die Vergabelung und Zusammenführung der Strömung sowie die starke Strömungsumlenkung zu einem erhöhten Energieverlust kommt. Über einen Pumpzyklus entsteht so ein Netto-durchfluss in Vorwärtsrichtung. Die Vorwärtsrichtung wird aus diesem Grund auch Pumprichtung genannt, die Rückwärtsrichtung wird hingegen als Saugrichtung bezeichnet.

Strömung vorwärts



Strömung rückwärts

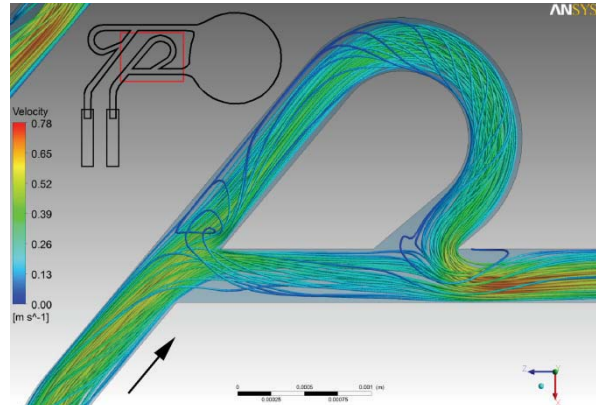


Abb. 3: Strömungsgeschwindigkeit u entlang der Stromlinien

Die Wirksamkeit des Ventils wird hierbei durch das Verhältnis der Druckverluste Δp_{vor} und $\Delta p_{rück}$ für die beiden Strömungsrichtungen, der sogenannten Diodizität Di , bestimmt:

$$Di = \frac{\Delta p_{rück}}{\Delta p_{vor}} .$$

Diese charakterisiert die Leistungsfähigkeit der fluidischen Diode. Betrachtet man den Aufbau des Tesla-Ventils, so ist dessen Geometrie durch sechs Parameter vollständig bestimmt (siehe Abb. 4):

- Kanalhöhe h und Kanalbreite b ,
- Länge l und Innenradius r der Schleife sowie
- Winkel α und β der Schleife.

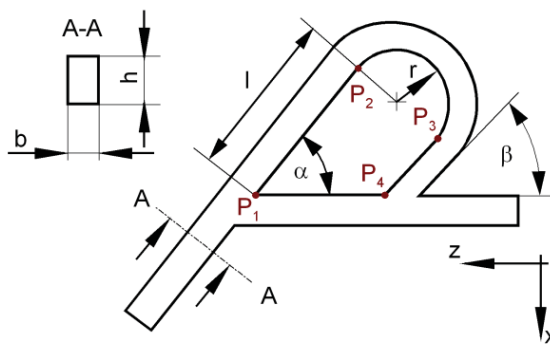


Abb. 4: Tesla Ventil – schematischer Aufbau und wichtige geometrische Parameter der Konstruktion

Die identifizierten geometrischen Parameter legen die folgende Konstruktionsmethode für die Mikropumpe nahe:

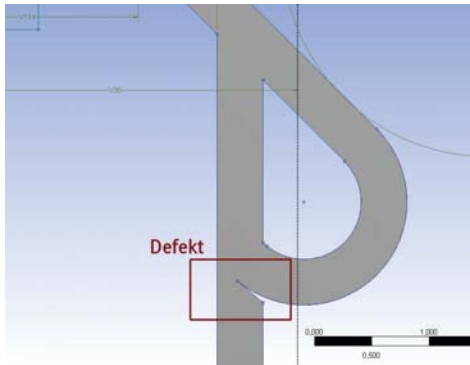
- Zu- und Abströmkanäle der Kammer: Ausgehend von dem im Zentrum der Kammer verankerten Koordinatensystem wird der Abstand der waagerechten Kanalachsen von der z -Achse festgelegt.
- Anschlüsse: Ausgehend vom Koordinatenursprung wird der Abstand der Anschlüsse von den Achsen definiert.
- Innere Wand des Ventils: Ausgehend von Punkt P_1 wird unter dem Winkel α die Strecke P_1P_2 mit der Länge l abgetragen. Ausgehend von P_2 wird dann ein Kreis mit dem Radius r tangential zur Strecke P_1P_2 gezeichnet. Der Winkel β und die Tangentenbeziehung zum Kreissegment bestimmen die Punkte P_3 und P_4 . Dabei kennzeichnet P_4 den Punkt, an dem die Strecke P_3P_4 auf das zur z -Achse parallele Kanalstück trifft.
- Äußere Wand des Ventils: Der äußere Kanalrand wird versetzt zur Polylinie $P_1P_2P_3P_4$ gezeichnet – der Abstand entspricht der Kanalbreite b .
- Zum Schluss werden die zylinderförmigen Ein- bzw. Ausgangsabschnitte mit der Länge L als Parameter hinzugefügt, um die vollständige Pumpenkonstruktion zu erhalten.

Bestimmte Parametervariationen führen zu Defekten der Geometrie. Die Wertebereiche der Parameter sind dadurch und durch die äußeren Abmessungen (d. h. den Einbauraum) eingeschränkt, Abb. 5. Als Bedingung für die fehlerfreie Geometrierzeugung sind vor allem folgende Ungleichungen zu berücksichtigen:

$$\beta \geq \alpha - 2 \cdot \arctan\left(\frac{r}{l}\right) \quad \text{und} \quad r \leq \frac{l \cdot \sin\alpha - b \cdot \cos\beta}{\cos\alpha + \cos\beta}$$

– zu beachten ist, dass die beiden Ungleichungen voneinander abhängen.

Defekte Geometrie



Einschränkung des Parameterbereichs

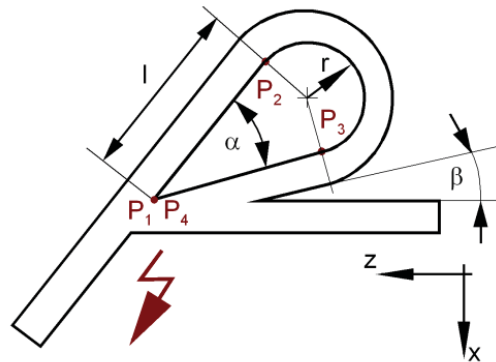


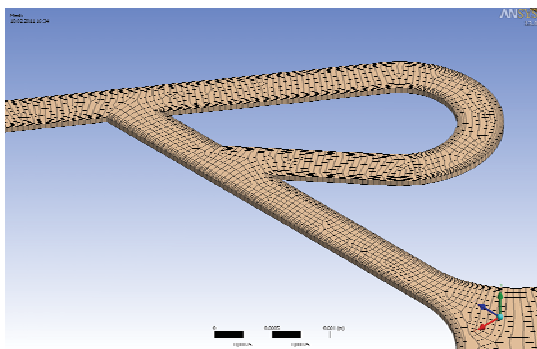
Abb. 5: Beispiel für eine defekte Geometrie
Beispiel für die Einschränkung des Parameterbereichs (Punkte P1 und P4 fallen zusammen)

2 Numerische Modellierung der Strömung

2.1 Auswahl und Erzeugung des Rechnetzes

Bei der in der Tiefe (d. h. in y-Richtung) gleichbleibenden Geometrie bietet sich eine strukturierte Vernetzung durch das Extrudieren einer Zellschicht mithilfe der im ANSYS Tetra Mesher angebotenen „Sweep“-Methode an (siehe Abb. 6 rechts). Die Zellschicht selbst wurde in der z,x-Ebene durch eine unstrukturierte Vernetzung erzeugt. Dieses Vorgehen gewährleistet eine hohe geometrische Flexibilität, durch die das Vernetzen der verschiedenen Ventilkonturen und damit das Durchführen der Parameterstudien erst ermöglicht wurden. Im Bereich der zylinderförmigen Ein- bzw. Ausgangsabschnitte wurde das Rechnetetz mittels „Patch Conforming“-Methode (Tetraedernetz) erzeugt. An den Übergängen zwischen den beiden Abschnitten wird die numerische Lösung vom einen auf das andere Netz interpoliert (siehe Abb. 6 rechts).

Modellierung als ebene Strömung (2D)



Modellierung als räumliche Strömung (3D)
Symmetrie führt zu Halbmodell (in der Tiefe)

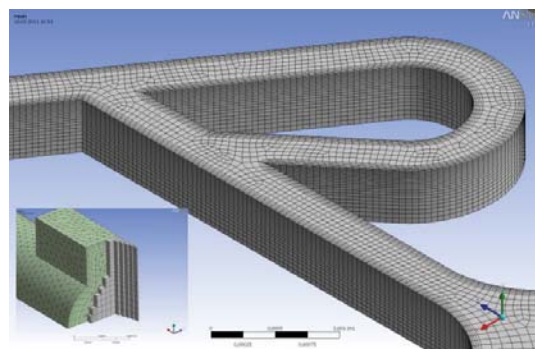


Abb. 6: Gestalt des Rechnetetzes im Bereich des Tesla-Ventils und am Übergang zwischen den Teilnetzen

Im Hinblick auf das Konvergenzverhalten der numerischen Lösung wurde eine Netzstudie durchgeführt. Für die veränderten Zellweiten wurden lokale Qualitätsmerkmale, wie z. B. der Expansionsfaktor, das Seitenlängenverhältnis, die Orthogonalität und der maximale Eckwinkel sowie die Schiefe („Skewness“) möglichst konstant belassen, wobei im Sinne der Rechengenauigkeit auf eine hohe Netzqualität geachtet wurde. Somit sind die erstellten Rechnetze vergleichbar. Aus Abb. 7 geht hervor, dass sich der numerisch berechnete Massenstrom \dot{m} ab einer Netzgröße von ca. 450 000 Kontrollvolumina nur noch um weniger als 1 Prozent ändert. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wurde für die Parameterstudie ein Rechnetze dieser Größe gewählt.

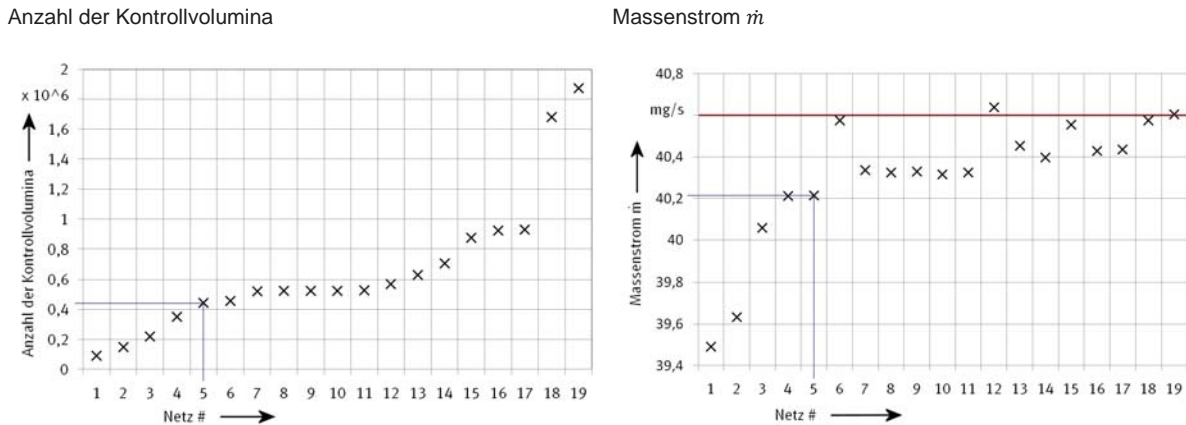


Abb. 7: Konvergenzverhalten bei Variation der Netzgröße (sukzessive Netzverfeinerung)

In einem weiteren Schritt wurde geprüft, ob eine Einsparung von Rechenzeit durch die zweidimensionale Betrachtung unter Verwendung von nur 18.000 Elementen (d. h. Kontrollvolumina) zulässig ist (siehe Abb. 6 links). Wie Tab. 1 zeigt, sind die Abweichungen zwischen der ebenen (2D) und der räumlichen (3D) Beschreibung von der Reynolds-Zahl Re_d abhängig. Diese Tatsache ist maßgeblich dem veränderten Anteil der Wandreibung geschuldet, was sich in der unterschiedlichen Berechnung und damit in unterschiedlichen Werten für den hydraulischen Durchmesser d_h zeigt: Bei der 2D-Betrachtung ist dieser generell größer. Damit führt die Beziehung $l_h = 0,06 \cdot Re_d \cdot d_h$ [6] zu einer entsprechend veränderten Einlauflänge l_h . Je größer die Reynolds-Zahl Re_d wird, desto stärker fällt diese Abweichung ins Gewicht. Für die Reynolds-Zahl $Re_d = 475$ (d. h. für die gemittelte Geschwindigkeit $u = 0,32 \text{ m/s}$ am Ein-/Auslass) beträgt die Abweichung in der Diodizität Di schon über 10 Prozent. Dabei können sich die Fehleranteile, die für die beiden Strömungsrichtungen entstehen, gegenseitig aufheben oder aber verstärken. So beträgt z. B. die Abweichung für die Druckdifferenz $\Delta p_{rück}$ ca. 31 Prozent. Die zweidimensionale Betrachtung ist damit nicht für die Durchführung der Parameterstudie geeignet; für die weiteren Berechnungen wurde eine dreidimensionale Modellierung gewählt.

Geschwindigkeit u in m/s		Einlassdruck in Pa		Maximalwerte		Abweichung in %	
		vor	rück	Geschw. u in m/s	Diodizität Di	Geschwindigkeit u	Diodizität Di
0,16	2D	550,7	578,6	0,50	1,051	+31,8	-0,5
	3D	484,6	511,7	0,38	1,056		
0,24	2D	941,9	1080,5	0,80	1,147	+42,3	+4,1
	3D	812,0	894,5	0,56	1,102		
0,32	2D	1415,4	1799,4	1,18	1,271	+58,6	+10,7
	3D	1192,9	1369,6	0,74	1,148		

Tab. 1: Vergleich bei ebener (2D) und räumlicher (3D) Modellierung der Strömung

2.2 Physikalische Modellierung der Strömung

Die Modellierung als Einphasenströmung geht davon aus, dass der Strömungskanal von Beginn an mit Wasser gefüllt ist. Damit sind keine ausgedehnten freien Oberflächen vorhanden, die entsprechende Spannungen und Kräfte zur Folge hätten. Das verwendete Stoffmodell „Water“ ist den Materialgruppen „Constant Property Liquids“ und „Water Data“ zugeordnet. Ausgehend von den Standardbedingungen $p = 1,01325 \text{ bar}$ und $T = 25 \text{ °C}$ wird eine konstante Dichte $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ sowie eine konstante dynamische Viskosität $\eta = 8,9 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ festgelegt. Aufgrund der geringen Druckunterschiede Δp ist eine inkompressible Beschreibung der Strömung gerechtfertigt.

Für die untersuchten physikalischen Randbedingungen ergeben sich in allen Pumpen- bzw. Ventilgeometrien Reynolds-Zahlen Re zwischen 250 und 500 – zur Bestimmung dieser Werte wurden die numerisch berechneten maximalen Strömungsgeschwindigkeiten sowie der jeweilige hydraulische Durchmesser herangezogen. Dies lässt darauf schließen, dass in dem untersuchten Betriebsbereich die Voraussetzungen für eine laminare Strömung gegeben sind.

Es wurde eine isotherme Beschreibung der Strömung gewählt. Um dies zu rechtfertigen, wurde die Temperaturänderung dT innerhalb der Strömung mit Hilfe der Beziehung $dT = dp / (c_p \cdot \rho)$ abgeschätzt. Dieser Zusammenhang ist für die ebene Spaltströmung gültig [3].

Da in Mikropumpen nur sehr kleine Druckdifferenzen auftreten und die Wärmekapazität von Wasser mit $c_p = 4282 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ vergleichsweise groß ist, sind die Temperaturschwankungen und die damit einhergehenden Verlustleistungen vernachlässigbar klein. Die Berechnung einer zusätzlichen Gleichung für die Energiebilanz entfällt somit, was die benötigte Rechenzeit sowie die benötigte Rechenleistung weiter reduziert.

Auch die Volumenkräfte infolge der Erdbeschleunigung blieben bei der vorliegenden Modellierung unberücksichtigt – die Druckdifferenzen infolge der Auftriebskraft würden bei liegendem Einbau zwischen Ober- und Unterseite der Pumpe nur ca. 10Pa und damit lediglich 2 Prozent der betrachteten minimalen Druckdifferenz $\Delta p = 500\text{Pa}$ zwischen Ein- und Auslass betragen.

Stationäre Untersuchungen können einen geeigneten Ausgangspunkt für die Verbesserung der Pumpengeometrie darstellen [2] oder [4]. In diesem Zusammenhang wird eine spezielle Ähnlichkeitskennzahl, die Roshko-Zahl Ro_d , eingeführt. Sie setzt die mechanische Trägheitskraft zur Zähigkeitskraft ins Verhältnis und stellt somit auch das Produkt aus Reynolds-Zahl Re_d und Strouhal-Zahl Sr dar. Sie ist durch

$$Ro_d = \frac{f \cdot d_c^2}{\nu} = Re_d \cdot Sr$$

definiert – die Frequenz f der Pumpe, eine charakteristische Länge d_c sowie die kinematische Zähigkeit ν der Flüssigkeit gehen an dieser Stelle ein. Kleine Roshko-Zahlen Ro_d treten auf, wenn der Einfluss der Strömungsdynamik durch mechanische Trägheitskräfte infolge der angelegten Frequenz des Kolbens bzw. der Membran gegenüber den viskosen Kräften klein ist. Ist dies der Fall, können stationäre Berechnungen sinnvolle Ergebnisse für das komplette Pumpsystem liefern.

Zum Diskretisieren der konvektiven Flüsse wurde das in ANSYS CFX Version 13 implementierte „High-Resolution“-Schema verwendet. Dabei wird automatisch zwischen einem Verfahren erster und einem Verfahren zweiter Ordnung gewechselt. Das „Upwind“-Verfahren (d. h. das Verfahren erster Ordnung) wird nur dort verwendet, wo die numerische Diffusion zur Glättung der Lösung bzw. Vermeidung von Überschwingern benötigt wird. Desweiteren wurden Studien zur Wahl der Pseudozeit und des Abbruchresiduums durchgeführt. Die Pseudozeit, die für das implizite Lösungsverfahren der stationären CFD-Simulation benötigt wird, wurde auf 0,1 s gesetzt. Als Residuum wurde der Wert 10^{-5} gewählt.

3 Vorgehen in der ANSYS Workbench

Die ANSYS Workbench bietet mit ihrem Graphical User Interface (GUI) eine übersichtliche Darstellung der Projektstruktur. Ein wesentlicher Aspekt ist der leichte Zugriff auf einen Parametersatz. Durch den modularen Aufbau können zudem verschiedene Berechnungen gut realisiert und miteinander kombiniert werden. Dies ermöglicht die effiziente Durchführung von Parameterstudien. In Abb. 6 ist die Projektstruktur der vorliegenden Aufgabe abgebildet: Nachdem in Modul A die Geometrie erstellt und an Modul B weitergegeben wird, erfolgt an dieser Stelle die Netzerstellung. In Modul C und D sind die numerischen Berechnungen mit verschiedenen Randbedingungen realisiert. Dabei ist Modul C für die Vorwärts- und Modul D für die Rückwärtsströmung zuständig – zur Bestimmung der Diodizität Di sind nach Definition die Druckverluste Δp_{vor} und $\Delta p_{rück}$ für die beiden Strömungsrichtungen zu bestimmen.

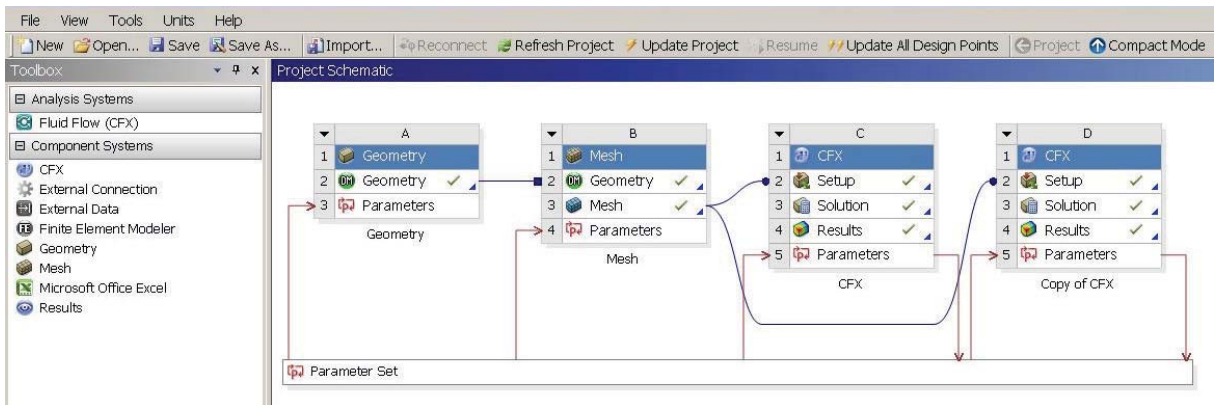


Abb. 6: Projektstruktur zur Analyse der Diodizität D_i

Wie in Abb. 7 zu sehen ist, können für jedes Modul Parameter separat definiert werden, beispielsweise die geometrischen Abmessungen bei der Modellgenerierung, die Zellweiten bei der Netzerstellung oder aber die als Randbedingung vorgegebenen Massenströme. Nachdem die Lösung einer speziellen Aufgabenstellung berechnet wurde, werden die Ergebnisse dann ebenfalls automatisiert abgespeichert, gekennzeichnet durch die grau hinterlegten Felder.

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Geometry (A1)			
4	P1	Kanalbreite		
5	P2	Hoehe		
6	P3	Innenradius		
7	P4	Laenge		
8	P5	Winkel_1		
9	P6	Winkel_2		
10	P7	Zyl.durchmesser		
11	P8	Zyllaenge		
12	CFX (C1)			
13	P9	MF		kg s ⁻¹
14	Copy of CFX (D1)			
15	P16	MF		kg s ⁻¹
*	New input parameter	New name	New expression	
17	Output Parameters			
18	CFX (C1)			
19	P10	Accumulated Time Step		
20	P11	massIN		kg s ⁻¹
21	P12	massOUT		kg s ⁻¹
22	P13	pIN		Pa
23	P14	pOUT		Pa
24	P15	vMAX		m s ⁻¹
25	Copy of CFX (D1)			
26	P22	vMAX		m s ⁻¹
27	P21	pOUT		Pa
28	P20	pIN		Pa
29	P19	massOUT		kg s ⁻¹
30	P18	massIN		kg s ⁻¹
31	P17	Accumulated Time Step		
*	New output parameter		New expression	
33	Charts			

Abb. 7: Masken für die Parameterdefinition

Auch der „Table of Design Points“ zeigt eine Übersicht aller in der Studie berücksichtigten Ein- und Ausgabeparameter. Jede Zeile, d. h. jeder „Design Point“ (DP), repräsentiert eine numerische Berechnung – DP 1 ist gekennzeichnet, da er noch nicht aktualisiert bzw. berechnet wurde, siehe Abb. 8.

Zusätzlich zu den in Abschnitt 2 gelisteten geometrischen Details wurde durch Variation der Zylinderlänge der Einfluss der Kanallänge L untersucht.

Table of Design Points																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Name	P43 - Innenradius	P44 - Laenge	P42 - Kanalbreite	P9 - MF	P16 - MF	P34 - Kanalhoehe	P35 - Alpha	P36 - Beta	P37 - D_Zyl	P38 - L_Zyl	P24 - mIN	P25 - mOUT	P26 - pIN	P27 - pOUT	P28 - vMAX	Exp
2					kg s ⁻¹	kg s ⁻¹						kg s ⁻¹	kg s ⁻¹	Pa	Pa	m s ⁻¹	
3	Current	0,5	2	0,4	9,5493E-06	9,5493E-06	0,5	55	40	0,8	4	9,549...	-9,5493E-06	1080,4	-0,011118	0,80266	
4	DP 1	0,6	2	0,4	9,5493E-06	9,5493E-06	0,5	55	40	0,8	4						
*																	

Abb. 8: Parameterliste der Designpunkte

4 Zusammenfassung und Ausblick

Um Mikropumpen mit Tesla-Ventilen erfolgreich in der Mikrosystemtechnik einzusetzen, wird eine systematische Methode für die Designoptimierung benötigt. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen der ANSYS

Workbench Parameterstudien an einem derartigen System durchgeführt. Mit Hilfe der stationären CFD-Simulation wurde insbesondere der Einfluss der Ventilgeometrie auf das Diodenverhalten des Aufbaus untersucht. Anhand dieses Anwendungsbeispiels konnte eine systematische Vorgehensweise für eine effiziente Designstudie aufgestellt und erprobt werden. Erste Hinweise zur Verbesserung der Konstruktion und damit zur Erhöhung der Leistungsgrenzen von Mikropumpen mit Tesla-Ventilen konnten formuliert werden. So zeigt sich z. B. bei Variation der beiden Schleifenwinkel eine deutliche Abhängigkeit der Diodizität Di und damit der Leistungsfähigkeit der Tesla-Ventile von den gewählten Winkelpaaren (α, β) , siehe Abb. 9.

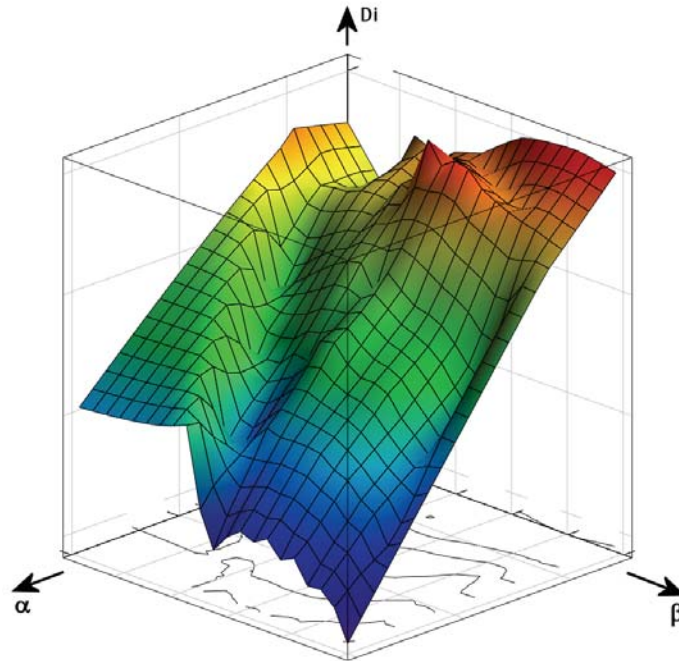


Abb. 9: Diodizität Di in Abhängigkeit von den beiden Winkeln α und β : $Di = Di(\alpha, \beta)$

In einem nächsten Schritt soll nun ein Optimierungsalgorithmus in den Ablauf zur Gestaltoptimierung eingebunden werden. An dieser Stelle bietet sich der Design Explorer der ANSYS Workbench an. Nachdem die Ventilgeometrie optimiert wurde, sollen zur Leistungssteigerung des kompletten Pumpsystems instationäre Untersuchungen durchgeführt werden: Unter Verwendung eines bewegten Rechennetzes („Moving Mesh“-Anwendung) kann im Speziellen der Einfluss der Aktorfrequenz auf die Förderrate untersucht werden.

5 Literatur

- [1] Bardell, R.; Sharma, N.; Forster, F.; Afromowitz, M.; Penney, R.J.:
“Designing high-performance micropumps based on no-moving-parts valves Proc.”,
ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Dallas (Texas), 1997
- [2] Gamboa, A.R.; Morris, C.J.; Forster, F.K.:
“Improvements in Fixed-Valve Micropump Performance Through Shape Optimization of Valves”,
Journal of Fluids Engineering Vol.127, p. 339-346, 2005
- [3] Helduser, S.:
„Hydraulik und Pneumatik (Fluidtechnische Antriebe und Steuerungen)“,
Vorlesungsskript, Institut für Fluidtechnik der TU Dresden, 2009
- [4] Morris, C.J.; Forster, F.K.:
“Low-order modelling of resonance for fixed-valve micro pumps based on first principles”,
Journal of Microelectromechanical Systems Vol. 12, No.3, p. 325-334, 2003
- [5] Tesla, N.:
“Valvular Conduit”,
U.S. Patent No. 1,329,559, 1920
- [6] Zierep, J.; Bühler, K.:
„Grundzüge der Strömungslehre”,
Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010

Theoretische Grundlagen der CFD-Technologie für CAD-basierte Strömungssimulationen im Product Lifecycle Management (PLM)-Prozess

Dr. Ivo Weinhold

Mentor Graphics GmbH, Frankfurt am Main, Germany

Dieser Beitrag stellt die Grundlagen eines Verfahrens zur automatischen, CAD-Daten-basierten Netzgenerierung vor, diskutiert dessen Vor- und Nachteile bei der Anwendung für Strömungssimulationen im industriellen Produktentwicklungsprozess und erläutert die daraus resultierenden Probleme für die physikalische Modellierung, speziell im wandnahen Bereich. Es werden Lösungsansätze für diese Problematiken aufgezeigt und anhand von ausgewählten Validierungsbeispielen erläutert, mit welcher Ergebnisqualität bei der Anwendung der vorgestellten Verfahren für Strömungssimulationsprojekte gerechnet werden kann.

Einführung

Die mit dem flächendeckenden Übergang von der zeichnungsorientierten (2D-) zur modellorientierten (3D-) Konstruktion entstandene Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen, vollständigen und genauen 3D-Produktmodellen legte es nahe, diese Modelle auch für physikalisch-technische Simulationen zu nutzen. Damit verstärkte sich der Trend zur durchgängigen digitalen Produktentwicklung, denn immer mehr Bereiche konnten darin einbezogen werden. Die konsequente Weiterführung dieser Strategie führte zu dem heute im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit stehenden Konzept des Product Lifecycle Management (PLM), alle produktbezogenen Daten, die in den Phasen der Entwicklung, der Nutzung und der Verwertung eines Produktes entstehen, durchgängig und über alle Änderungen hinweg konsistent zu nutzen und zu verwalten. Die nahtlose Einbeziehung von Simulationen von physikalischen Funktionen und Strukturverhalten in den Produktentwicklungsprozeß hat sich als ein wichtiges Element des Product Lifecycle Management-Konzeptes bereits fest etabliert. Das umfaßt die klassische Festigkeitsberechnung mittels Finiten Elementen ebenso wie umfangreichere Akustik-, Crash-, Beleuchtungs- und natürlich auch Strömungssimulationen.

Kernvoraussetzung für den Erfolg von Strömungssimulationen als integraler Bestandteil eines Product-Lifecycle-Management-Konzeptes ist eine hohe Effizienz der Simulationsprojekte, um validierte, aussagefähige Berechnungsergebnisse rechtzeitig und in guter Qualität für Entscheidungen zum nächsten Schritt im Produktentwicklungsprozeß verfügbar zu haben. Der bestimmende Zeitfaktor für solche Projekte ist beim heutigen Stand der CFD-Technologie mit Abstand der Aufwand, der für die Aufbereitung der CAD-Geometrie und die nachfolgende Erzeugung eines für CFD-Simulationen geeigneten, qualitativ hochwertigen Berechnungsnetzes investiert werden muß. Deshalb steht die Automatisierung dieses Teils des Simulationsprozesses seit geraumer Zeit im Fokus von neuen Entwicklungen von CFD-Technologie.

Dieser Beitrag stellt die Grundlagen eines Verfahrens zur automatischen, CAD-Daten-basierten Netzgenerierung vor, diskutiert dessen Vor- und Nachteile bei der Anwendung für Strömungssimulationen im industriellen Produktentwicklungsprozeß und erläutert die daraus resultierenden Probleme für die physikalische Modellierung, speziell im wandnahen Bereich. Es werden Lösungsansätze für diese Problematiken aufgezeigt und anhand von akademischen und industriellen Validierungsbeispielen erläutert, mit welcher Ergebnisqualität bei der Anwendung der vorgestellten Verfahren für Strömungssimulationsprojekte gerechnet werden kann.

1 Umgang mit der Geometrie

1.1 Bereitstellung der CAD-Geometrie

Der zentrale Kern des PLM-Konzeptes ist, daß die geometrischen Produktdaten in allen Entwicklungsstufen und Detaillierungsgraden als dreidimensionales Produktmodell erzeugt und verwaltet werden. Das erfolgt in der Regel unter Nutzung eines im jeweiligen PLM-System eingebundenen 3D-CAD-Systems. Das entstehende Produktmodell bildet den Ausgangspunkt für weitere PLM-Elemente wie virtuelle Funktionstests, physikalische Simulationen, Zeichnungsableitung, Stückliste, Fertigungsplanung und –steuerung, Dokumentation, Marketing und vieles mehr. Die Vorteile dieses Konzeptes sind offensichtlich, jedoch ist damit auch eine Reihe von Herausforderungen im Detail verbunden. Sicherlich ist es bei dieser Vielfalt an potentiellen Nutzungsmöglichkeiten für die Geometriedaten außerordentlich schwierig, die jeweils optimalen Anforderungen an die CAD-technischen Eigenschaften der CAD-Geometrie im produktiven Alltag zu realisieren. Das betrifft Konstruktionsrichtlinien, CAD-Funktionalitäten und technische Limitierungen in CAD-Systemen wie interne mathematische Genauigkeiten und Toleranzen ebenso wie die individuelle Qualifikation und Sorgfalt des Konstrukteurs und die daraus resultierende handwerkliche Qualität der Geometrie. Im Kontext einer produktiven PLM-Implementierung müssen dafür Prioritäten gesetzt werden, die jedoch in der Regel nicht von den speziellen Anforderungen, die Strömungssimulationen an die Geometrie stellen, dominiert werden. Die Folge ist, daß trotz (oder auch wegen) der Erzeugung, Bereitstellung und Verwaltung der Produktdaten in einem PLM-System teilweise erheblicher Aufwand für die Aufbereitung der Geometrie für Strömungssimulationen investiert werden muß. Dieser Aufwand kann so groß werden, daß er den dominierenden Anteil am Gesamtaufwand für CFD-Simulationen darstellt.

1.2 Bereitstellung des Strömungsraumes

Das Ziel ist dabei immer, ein 3D-Bauteil oder eine Baugruppe als Geometriereferenz für die anschließende Vernetzung zu erhalten. Diese Geometrie muß den zu untersuchenden Strömungsraum für Umströmungen, Durchströmungen oder eine Kombination aus beidem repräsentieren. Dafür stehen sowohl in den CAD-Systemen als auch in Preprozessoren leistungsfähige Funktionen für Boolesche Operationen zur Verfügung. Die wichtigste und zugleich herausforderndste technische Voraussetzung für diese Operationen sind auf dem jeweiligen mathematischen Toleranzniveau vollständig geschlossene geometrische Kavitäten. Diese Voraussetzung ist in der Regel zunächst nicht erfüllt. Die Ursachen dafür sind vielfältig und reichen von CAD-technischen Qualitätsproblemen und Geometriefehlern wie die ungenaue Positionierung von Bauteilen in Baugruppen, nachlässigem Umgang mit Toleranzen oder Geometrie Problemen nach mehrfacher Konvertierung über Systemgrenzen oder über Generationen von CAD-Systemen hinweg bis hin zu beabsichtigten Modellierungsvereinfachungen wie fehlenden Dichtelementen, nicht ausmodellierten Schweißverbindungen oder realen Gegebenheiten wie Spalten in Blechteilkonstruktionen oder Kunststoffgehäusen. In jedem Fall ist mehr oder weniger Nacharbeit notwendig, um die benötigten „mathematisch“ geschlossenen Strömungsräume herzustellen. Das kann idealerweise mit den dafür vorgesehenen Modellierfunktionen direkt im Original-CAD-System erfolgen, wobei eine zusätzliche, risikobehaftete Datenkonvertierung entfällt. Aber auch zahlreiche Spezialprogramme und natürlich die Preprozessoren der CFD-Pakete selbst bieten oft leistungsfähige Funktionen zur Geometriebearbeitung an.

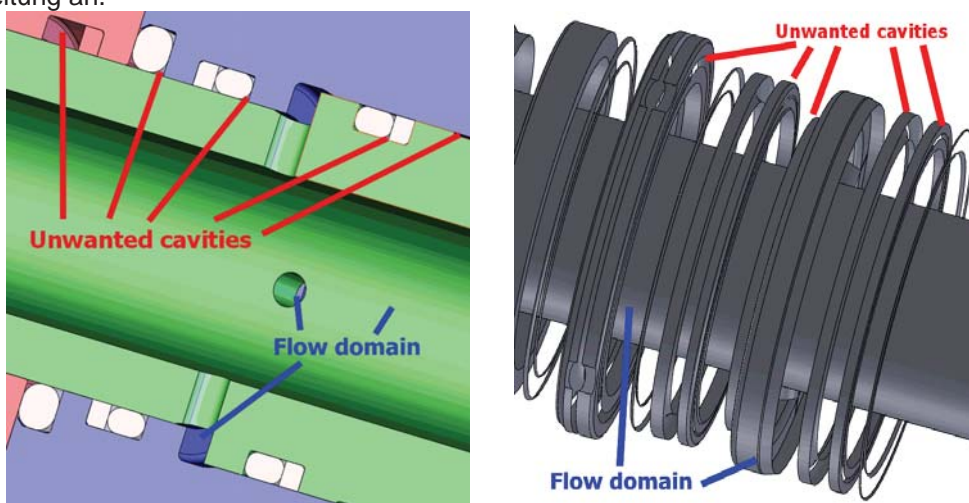


Abb. 1: Neben dem gewünschten Strömungsraum können CAD-Modelle zahlreiche weitere Hohlräume enthalten. Diese unerwünschten Volumen müssen sorgfältig entfernt werden.

Der nächste Schritt ist dann die Erzeugung des Strömungsraumes durch Boolesche Operationen. Auch hier liegt oft das Problem im Detail. Originale CAD-Modelle weisen fast immer neben dem eigentlichen Strömungsraum zahlreiche weitere Hohlräume auf, die mit einfachen Kavitätsoperationen ebenso dem Strömungsraum zugeordnet werden würden. Abbildung 1 erläutert diese Problematik, die insbesondere bei sehr komplexen Durchströmungsräumen schwer zu erkennen ist. Es ist sehr wichtig, solche Modelle sorgfältig zu bereinigen, um eine hohe Netzqualität zu sichern und nachfolgende Konvergenzprobleme der Gleichungslöser zu vermeiden. Hilfreich sind dabei spezielle Funktionen im CFD-Preprozessor, die diese Bereinigung automatisch übernehmen (Abbildung 2).

1.3 Lösungsansätze für die Zukunft

Der enorme Zeit- und Ressourcenaufwand, der in die Geometrieaufbereitung fließt, hat dazu geführt, daß die Sensibilität sowohl der Anwender in der Industrie als auch der Softwarehersteller für diese Problematik steigt. Auf Anwenderseite setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, daß „simulationsgerechte“ Best-Practice-Richtlinien in der Konstruktion erheblich zur Effizienzsteigerung von CFD-Projekten ohne signifikanten Mehraufwand beitragen können. Auf Seiten der Softwarehersteller wird intensiv daran gearbeitet, den Geometrieaufbereitungsprozeß durch spezielle Funktionen zu vereinfachen und mittelfristig schrittweise zu automatisieren. Wegen der enormen Komplexität dieser Aufgabe müssen dafür sicher unkonventionelle Wege beschritten werden und echte Innovationen entstehen.

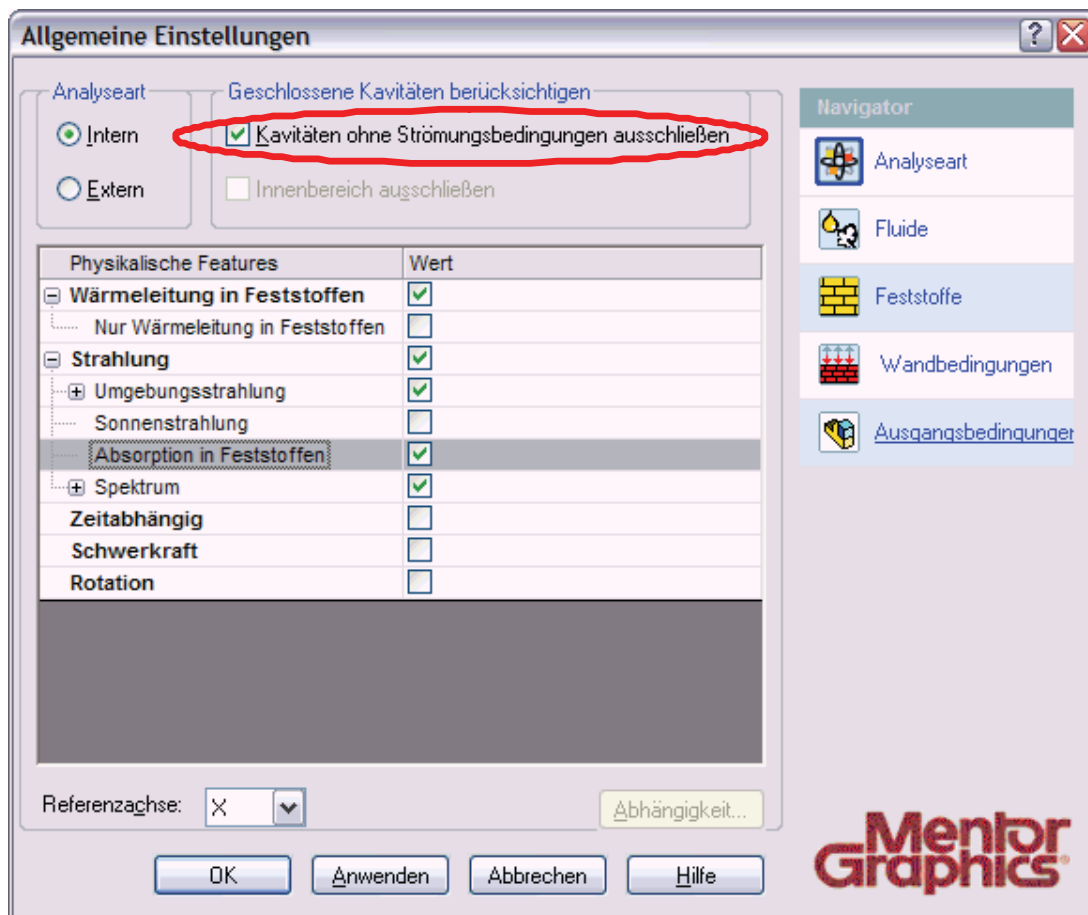


Abb. 2: CFD-Preprozessorfunktionen können Probleme mit unerwünschter Geometrie automatisch beheben

2 Erzeugung des Berechnungsnetzes

Für Strömungssimulationen werden heute überwiegend Berechnungsmethoden eingesetzt, die auf numerischen Diskretisierungsverfahren beruhen. Diese Verfahren benötigen bekanntermaßen ein Berechnungsnetz, das bestimmten Kriterien bezüglich Elementgröße und Form sowie Dichte und Verteilung im Berechnungsraum genügen muß. Der Berechnungsraum wird dabei in der Regel durch 3D-CAD-Geometrie als Bauteil oder Baugruppe abgebildet und wie in Abschnitt 2 beschrieben aus dem Produktmodell innerhalb eines PLM-Systems abgeleitet. Dieser Prozeß bietet die große Chance, den Strömungsraum sehr realitätsnah in voller Komplexität und ohne künstliche Vereinfachungen, die früher durch die begrenzte Leistungsfähigkeit der Computer und eingeschränkte Funktionalität der CFD-Preprozessoren aufgezwungen wurden, zu erhalten. Einerseits reduziert sich dadurch das Risiko erheblich, durch physikalisch unzulässige Vereinfachungen nutzlose Simulationsergebnisse zu produzieren. Außerdem wird der manuelle Aufwand für die Geometrievereinfachung zusätzlich zur Aufbereitung gespart. Andererseits entstehen jedoch erhöhte Anforderungen an den Netzgenerierungsprozeß, der aufgrund der geometrischen Komplexität des Strömungsraumes in der Realität ohne spezielle, CAD-orientierte, automatische Vernetzungstechnologie nicht mehr praktikabel durchführbar ist. In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen eines automatischen Vernetzungsverfahrens für die Generierung qualitativ hochwertiger CFD-Netze mit beliebig komplexer 3D-CAD-Geometrie vorgestellt und diskutiert.

2.1 Automatische Vernetzung komplexer CAD-Geometrie

Wie oben ausgeführt, ist die Ausgangssituation ein 3D-CAD-Geometriemodell, das innerhalb einer PLM-Umgebung entstanden ist. Es ist nun naheliegend, diesen Umstand zu nutzen und die detaillierten Geometrieeinformationen, die über den CAD-Kernel zum Geometriemodell verfügbar sind, für eine automatische Vernetzungsmethode zu nutzen. Dafür muß der Vernetzer allerdings in das CAD-System eingebunden sein, um den direkten Zugriff auf das CAD-Modell und die Kernel-Funktionen auf Hauptspeicherebene zu ermöglichen. In der praktischen Realisierung ist der Vernetzer ein Bestandteil eines direkt in CAD-Systeme integrierten CFD-Programmsystems, das neben der Nutzung von CAD-GUI-Elementen für Benutzerfreundlichkeit die genannten Vorteile des direkten CAD-Kernel-Zugriffs auch für andere Abschnitte des CFD-Simulationsprozesses wie Definition der physikalischen Aufgabe oder Ergebnisvisualisierung direkt am CAD-Modell erlaubt.

Ein weiterer Aspekt der Überlegungen betrifft die Art und Form der Netzzellen. Wie an anderer Stelle bereits mehrfach ausgeführt (u. a. in [3]), ist die Hexaederform (sechs Seitenflächen) mit rechten Winkeln und in strukturierter Anordnung für Finite-Volumen-Verfahren die klar bevorzugte Netzart. Die Gründe dafür sind vielfältig, zum Beispiel [1]:

- Minimaler Local Truncation Error (LTE)
- Robustheit des Lösers
- Einfachheit, Geschwindigkeit und Robustheit des Netzgenerierungsverfahrens
- Implementierung von effizienten Algorithmen zur lokalen Netzverfeinerung, z. B. Octree-Verfahren

Verfahren zur hochwertigen Vernetzung komplexer Geometrie sollten deshalb ausschließlich Hexaedernetze mit unverformten Zellen, sogenannte Kartesische Netze, erzeugen.

2.2 Erzeugung kartesischer Netze für komplexe Geometrie

Die hier vorgestellte Methode ist ein mehrstufiges Verfahren, das in ähnlicher Form als „Immersed Boundary-Methode“ kürzlich wieder ins Zentrum der Aufmerksamkeit von CFD-Softwareentwicklern gerückt ist [6]. Vorteile dieses Verfahrens sind, daß zum einen kein Oberflächennetz für eine exakte Erfassung der Geometrie notwendig ist, und zum anderen das Netz nicht durch Zelldeformationen konturkonform gestaltet werden muß. Typische assoziierte Problemfelder sind jedoch Größenunterschiede in der Geometrie von mehreren Größenordnungen (dünne Wände und schmale Kanäle) und natürlich die Handhabung der für die Qualität von CFD-Simulationen oft entscheidenden wandnahen Physik. Diese Problematiken erfordern spezielle Lösungen, wobei auch hierfür das CAD-System mit seinem Geometrie-Kernel vorteilhaft genutzt werden kann.

2.2.1 Generierung des Basisnetzes

Die erste Stufe des Verfahrens beginnt mit der automatischen Erstellung eines zum globalen Koordinatensystem parallelen rechteckigen Berechnungsraumes, der den Maximalabmessungen des Berechnungsgebietes in den drei Koordinatenrichtungen entspricht. Dieser Berechnungsraum wird regelmäßig mit Zellen gefüllt, die gemäß berechneter Vernetzungsparameter verteilt werden (Abbildung 3).

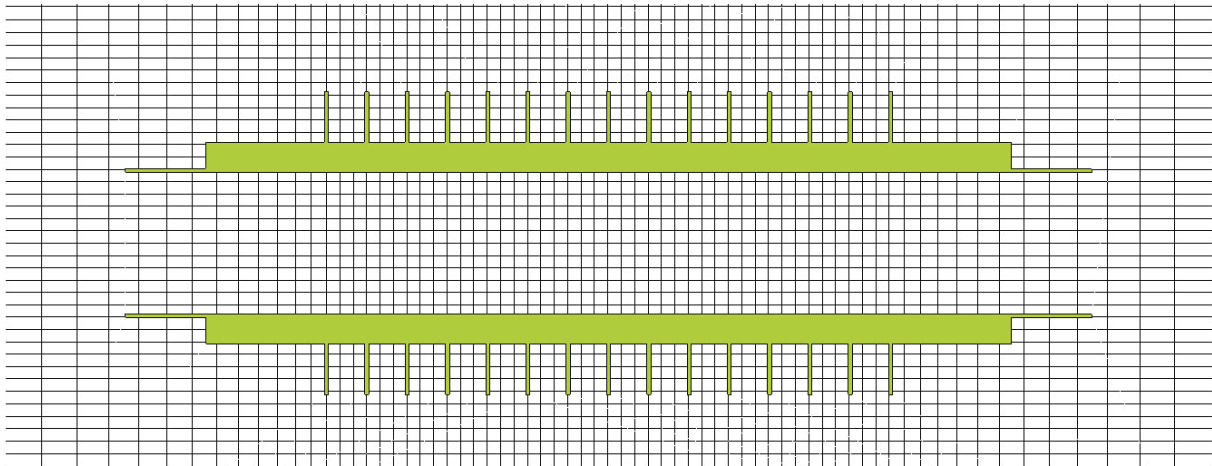


Abb. 3: Basisnetz

Im nächsten Schritt wird mit Hilfe der analytischen Beschreibung der Geometrie des Strömungsraumes, die über CAD-Kernel-Funktionen direkt zugänglich ist, die Geometrie mit dem Basisnetz verschnitten und jeder Zelle im Berechnungsraum das Attribut „Solid“, „Fluid“, oder „Partial“ zugeordnet (Abbildung 4). „Partial“ bezeichnet Zellen mit mehr als einem Teilvolumen, die sowohl einen oder mehrere Solid- als auch Fluidbereiche beinhalten können. Die interne Kontur der Teilvolumen sowie deren Größe kann dabei sehr genau aus der erwähnten analytischen Geometriebeschreibung über den CAD-Kernel gewonnen werden. Es erfolgt also keine einfache lineare Approximation der Teilbereichsgrenzen innerhalb einer Partial-Zelle, sondern die tatsächliche, komplexe Kontur wird sowohl für Volumen- und Massenberechnungen als auch für Flächenberechnungen herangezogen. Diese Technologie führt im Gegensatz zu Stair-Step- und Cut-Cell-Verfahren zu einem sehr kleinen geometrischen Approximationsfehler auch bei vergleichsweise geringer Netzauflösung (Abbildung 5) und bewahrt gleichzeitig alle oben beschriebenen Vorteile, die sich aus der rechtwinkligen Hexaederform der Zelle ergeben.

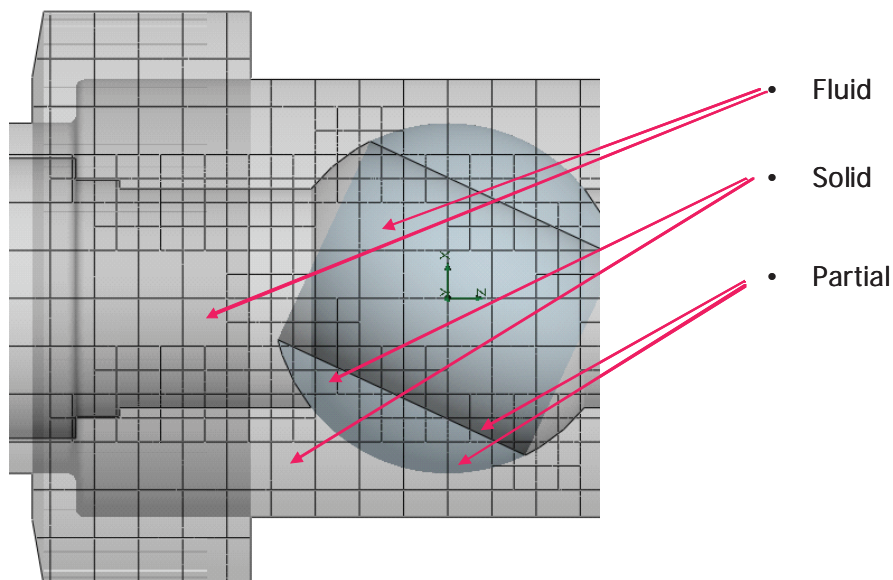


Abb. 4: Zelltypen

Es ist jedoch auch klar, daß die zugrundeliegenden physikalischen Modelle besonders für den wandnahen Bereich sowie die Lösertechnologie mit diesen speziellen Zelltypen korrekt umgehen können muß. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 4 näher erläutert.

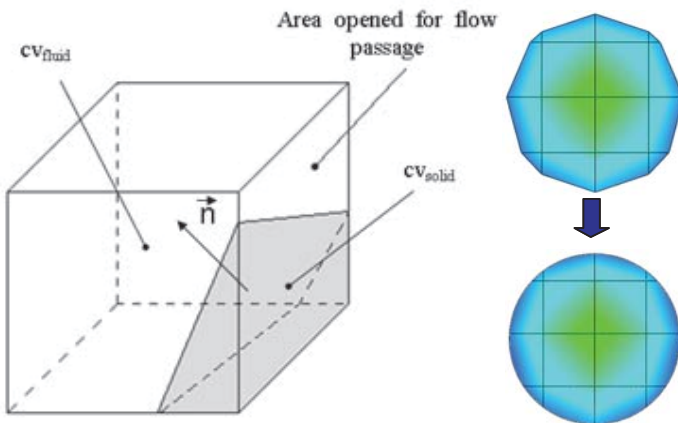


Abb. 5: „Partial“-Zelle mit internen Teilvolumen

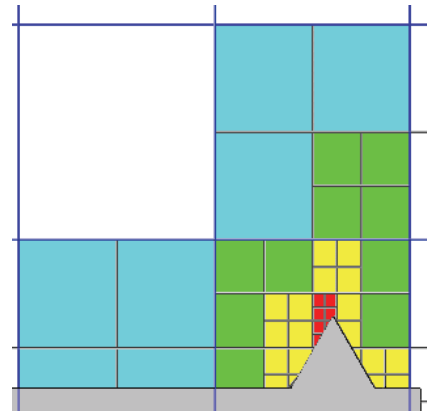


Abb. 6: Netzverfeinerung mit einem Octree-Verfahren

2.2.2 Lokale Netzverfeinerung nach geometrischen Kriterien

Im nächsten Schritt wird das Basisnetz automatisch nach einer Octree-Methode lokal verfeinert, um den Anforderungen des zugrundeliegenden Diskretisierungsverfahrens zu genügen (Abbildung 6). Dabei werden folgende Verfeinerungskriterien berücksichtigt, die typischerweise besonders wichtig für die korrekte Auflösung von Strömungsphänomenen sind:

- Toleranz, Krümmung, kleine Geometriedetails (Abbildung 7)
- Verfeinerungskriterien in lokalen Bereichen wie Flächen und Kanten und an Materialgrenzen (z. B. Fluid/Solid, Solid/Solid)
- sehr enge Strömungskanäle und deren Ein- und Ausströmbereiche (Narrow-Channel-Refinement) (Abbildung 8)

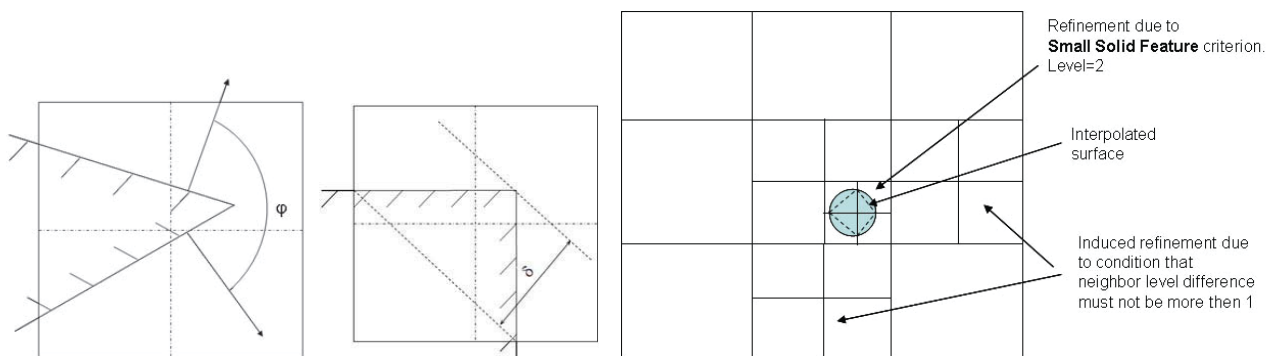


Abb. 7: Verfeinerungskriterien: Toleranz, Krümmung, kleine Geometriedetails [1]

Alle Kriterien werden je nach lokaler Situation einzeln oder in Kombination angewendet und sind parametrisiert. Die Parameter werden vorzugsweise automatisch berechnet, können jedoch auch teilweise oder vollständig manuell definiert werden. Alle lokalen Netzverfeinerungen basieren wiederum auf den analytischen Geometrieinformationen, die der CAD-Kernel zur Verfügung stellt, um den Diskretisierungsfehler zu minimieren. Das Ergebnis dieses Schrittes ist das Initial Mesh, das als Ausgangspunkt für die nachfolgende Berechnung genutzt wird.

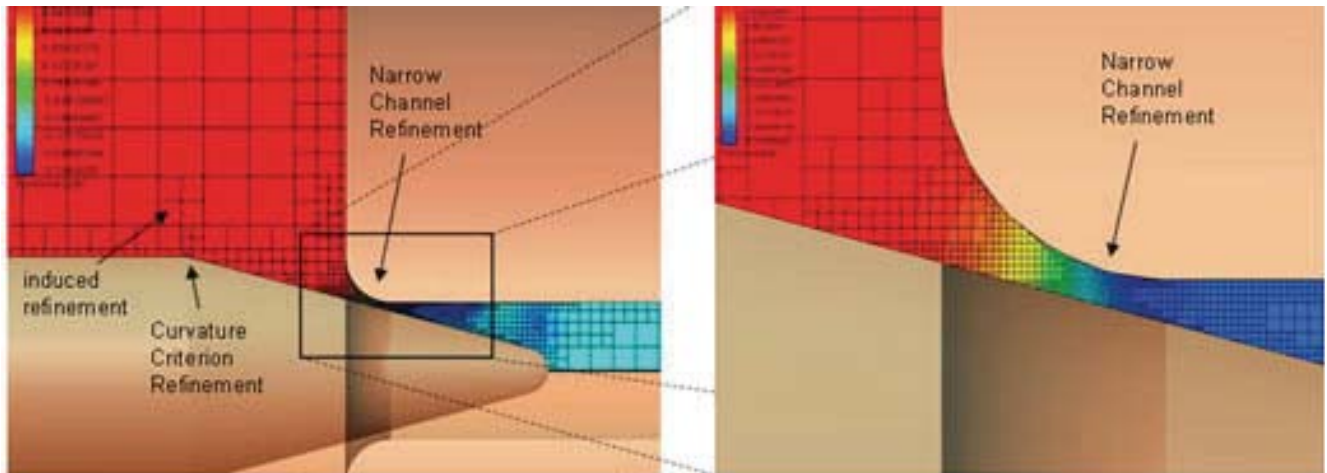


Abb. 8: Narrow-Channel-Refinement

2.2.3 Lokale Netzverfeinerung nach physikalischen Kriterien

Aufbauend auf dem Initial Mesh kann es für die korrekte Abbildung bestimmter physikalischer Situationen wie beispielsweise Druckstößen von Vorteil sein, einen weiteren Schritt der lokalen Netzverfeinerung anzuschließen. Dafür wird während des Berechnungslaufes das physikalische Ergebnisfeld analysiert und gemäß eingestellter Vorgaben nach dem Verlauf der Gradienten der jeweiligen physikalischen Größe das Netz verfeinert bzw. entfeinert. Auch hierfür werden wieder die analytischen Geometrieinformationen aus dem CAD-Kernel herangezogen. Da die Octree-Methode prinzipbedingt die latente Gefahr einer extensiven Erhöhung der Zellenanzahl während des automatischen lösungsbasierten Netzverfeinerung beinhaltet, wird das Verfahren durch einen gradientengesteuerten Begrenzungsalgorithmus für die Gesamtnetzgröße begleitet. Besondere Aufmerksamkeit erfordert die lösungsbasierte Netzverfeinerung bei zeitabhängigen Simulationen, da hier die zeitliche Verlagerung der Lösungsgradienten die Berechnung einer geeigneten automatischen Verfeinerungsstrategie erschwert. Für diese Aufgaben kommt ein ergänzender, historienbasierter Algorithmus zum Einsatz, der eine Verfeinerung in einem erweiterten, potentiell in Frage kommenden Bereich ermöglicht (Abbildung 9).

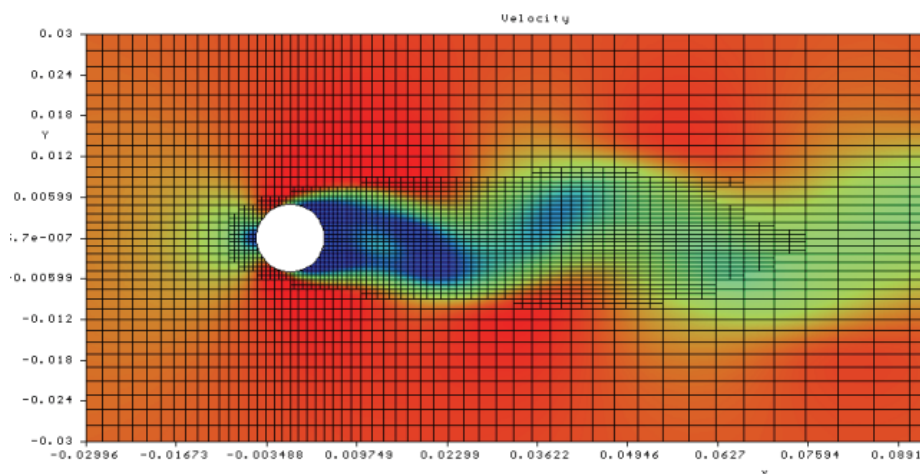


Abb. 9: Lösungsbasierte Netzverfeinerung mit historienbasiertem Algorithmus

2.2.4 Umgang mit großen Geometrieunterschieden

Prinzipbedingt haben Verfahren für kartesische Netze mit lokaler Octree-Verfeinerung einen entscheidenden Nachteil, wenn sehr große Geometrieunterschiede (mehrere Größenordnungen) in einem Modell zu handhaben sind. Um die Geometrie korrekt durch das Netz abzubilden, wäre mit klassischen Ansätzen eine sehr tiefe Verfeinerung über viele Stufen notwendig, was zu extensiv großen Zellzahlen führen würde, die für die physikalische Lösung absolut unnötig wären und zu inakzeptablen Rechenzeiten und Ressourcenanforderungen führen

würden. Deshalb müssen für diese Situationen spezielle Lösungen eingeführt werden. Es liegt nun nahe, den in Abschnitt 2.2.1 eingeführten Zelltyp „Partial“ und die damit verbundene Kontrollvolumen-Technologie dafür zu nutzen. Wiederum basierend auf den analytischen Geometrieinformationen aus dem CAD-Kernel kann dieser Zelltyp mehrere Volumenbereiche, die sowohl „Fluid“ also auch „Solid“ mit jeweils eigenen Eigenschaften sein können, beinhalten. In diesen Bereichen kommen dann speziell entwickelte analytische Ansätze für die physikalische Modellierung zum Einsatz. Somit ist es möglich, beispielsweise angeströmte Stapel dünner Platten einschließlich gekoppelter Wärmeübertragung mit wenigen Zellen korrekt zu simulieren (Abbildung 10). Ein klassisches kartesisches Netz würde dafür wegen der tiefen Verfeinerung sehr viel mehr Zellen benötigen.

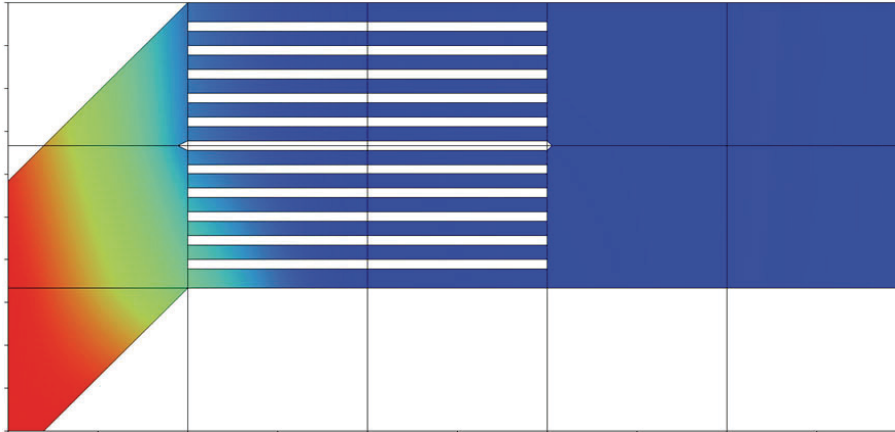


Fig. 10: „Partial“-Zellen können mehrere Teilvolumen mit verschiedenen Eigenschaften enthalten

Auf der Grundlage der vorgestellten Vernetzungstechnologie ist es nun möglich, qualitativ sehr hochwertige CFD-Netze auch für extrem komplexe CAD-Geometrie praxisgerecht und vollautomatisch zu erzeugen. Diese Technologie ist essentiell notwendig, um den Anforderungen an die Effizienz von Strömungssimulationen im Produktentwicklungsprozeß gerecht werden zu können.

3 Modellierung der wandnahen Physik

Die im Abschnitt 2 erläuterten Vorteile von lokal verfeinerten, nicht konturkonformen kartesischen Netzen für Strömungssimulationen mit sehr komplexer CAD-Geometrie sind offensichtlich und einfach nachvollziehbar. Nicht zuletzt deshalb ist in letzter Zeit ein Trend in der CFD-Softwareentwicklung in Richtung dieser Netzarten zu beobachten. Wie bereits erwähnt, ist jedoch das entscheidende Erfolgskriterium, ob es gelingt, für diese „untypischen“ Netze geeignete physikalische Modelle, vor allem für den wandnahen Bereich, zu finden. Dabei sollen keine wesentlichen Einschränkungen für die Bandbreite typischer CFD-Simulationsanwendungen im Ingenieursbereich zugelassen werden, und selbstverständlich müssen auch die Ergebnisqualität und der Ressourcenverbrauch den heute erwarteten hohen Ansprüchen der Industrie genügen. Die größte Herausforderung für die physikalische Modellierung besteht hier zweifelsohne im wandnahen Raum einschließlich Turbulenzmodellierung, da in anderen Bereichen eine Implementierung vorhandener Modelle eher erleichtert wird.

Eine Lösung für diese skizzierten Aufgaben besteht in der Anwendung einer neuartigen, zweistufigen Wandansatzfunktion, die auf dem in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten und als „Partial“ bezeichneten Zelltyp mit einer beliebigen Anzahl an Solver-Kontrollvolumina aufbaut. Diese Ansatzfunktion ist in [2] ausführlich dokumentiert und kann hier aufgrund ihrer Komplexität nur im Überblick erläutert werden. Das Ziel ist einerseits, die physikalische Situation in der Grenzschicht direkt zu berechnen und Randbedingungen für die Navier-Stokes-Lösung direkt bereitzustellen, sowie andererseits diese Berechnung unabhängig von der lokalen Netzsituation an der Wand durchzuführen. Es soll so die von anderen Wandansatzfunktionen bekannte strenge Kopplung von Form und Größe der wandnahen Zellschichten an die lokale physikalische Grenzschichtsituation aufgehoben werden, um den sonst stets erforderlichen, manuellen Iterationsprozeß für die schrittweise Anpassung von Zellgröße und Zellform an die physikalischen Anforderungen der Wandansatzmodelle (y^+ -Anpassung) zu vermeiden. Dies wird als ein entscheidender Aspekt für erfolgreiche Strömungssimulationen in einem PLM-Kontext gesehen, da die im Gegensatz zu traditionellen CFD-Simulationsprozessen in diesem Umfeld herrschenden extrem hohen Effizienzanforderungen sonst nicht erfüllt werden können.

Die zum Einsatz kommenden neuartigen Wandansatzfunktionen basieren auf van Driests universellen Wandprofilen zur Beschreibung turbulenter Grenzschichten [7] und wurden als zweistufiger Ansatz entwickelt („Two-Scale Wall Function, 2SWF“) [2]:

1. Der Massenschwerpunkt des Fluidanteils einer wandnahen Zelle liegt innerhalb der Grenzschicht („Thick Boundary Layer“)
2. Der Massenschwerpunkt des Fluidanteils einer wandnahen Zelle liegt außerhalb der Grenzschicht („Thin Boundary Layer“) (Abbildung 11)

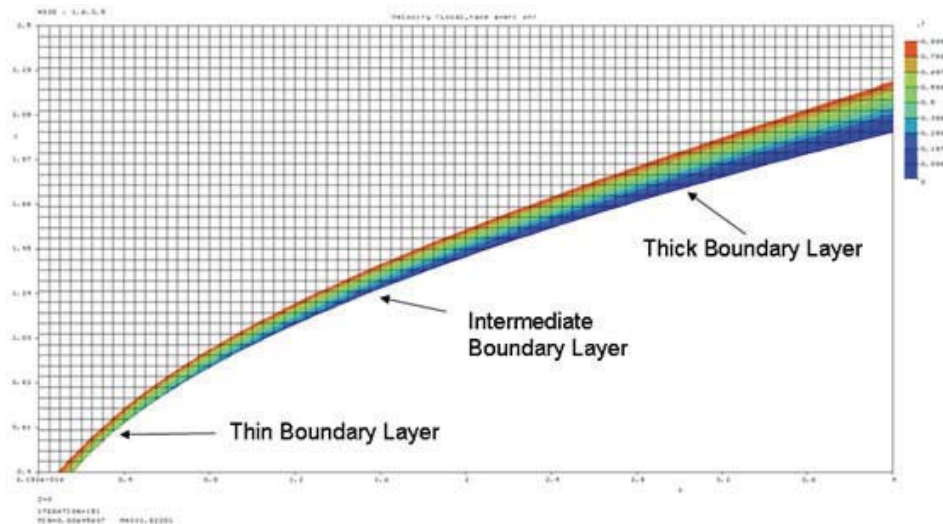


Abb. 11: Strömungsfeld mit „Thin“, „Intermediate“ und „Thick Boundary Layer“ [1]

Dadurch wird die Berechnung der physikalischen Grenzschichtsituation quasi „netzunabhängig“, da es für das Verfahren unerheblich ist, welcher Fluidanteil in welchen wandnahen Zellen sich tatsächlich im Bereich der Grenzschicht befindet. Wird diese Funktion in Lösungsverfahren für Netze nach der „Immersed Boundary“-Methode implementiert, ergeben sich zwei wichtige Vorteile:

- Es wird eine hohe Qualität der Simulationsergebnisse auch mit vergleichsweise geringer Netzichte im wandnahen Bereich erzielt, und
- sowohl die Netzgenerierung als auch die Konfiguration und Parametrisierung der physikalischen Modelle kann vollautomatisch erfolgen.

Beide Aspekte leisten einen wesentlichen Beitrag dazu, um Strömungssimulationen mit komplexer CAD-Geometrie in einem PLM-Umfeld praktikabel und ökonomisch sinnvoll durchführen zu können.

4 Validierungsbeispiele

Sowohl die im Abschnitt 2 vorgestellte Vernetzungstechnologie als auch das im Abschnitt 3 kurz zusammengefaßte Verfahren zur Modellierung wandnaher Physik befindet sich seit 1999 im industriellen Einsatz. Für diesen Abschnitt wurden stellvertretend zwei interessante Fallbeispiele mit Praxisbezug ausgewählt. Zahlreiche weitere Validierungsfälle zu nahezu allen Aspekten von CFD-Anwendungen im Ingenieursbereich, darunter viele Validierungs-Klassiker, können [9] entnommen werden.

4.1 Raketentriebwerk „Vulcain“ für die Ariane 5-Rakete

Frey [10] hat in einer Dissertation an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität Stuttgart Strömungsprobleme in Raketendüsen bei Überexpansion untersucht. Für diese Arbeiten kam auch ein Strömungssimulationsverfahren zum Einsatz, das die oben beschriebenen Technologien zur Netzgenerierung und Model-

lierung der wandnahen Physik nutzt. Dabei konnte ein sehr hohes Qualitätsniveau der Simulationsergebnisse bestätigt werden [1], unter anderem für

- die genaue Berechnung der Machscheibengröße und Position an der Auslaßebene des Verlängerungsbeereichs und
- die Berechnung der integralen Parameter spezifische Masse und spezifischer Impuls mit einer Abweichung innerhalb von 0,1% (Abbildung 12).

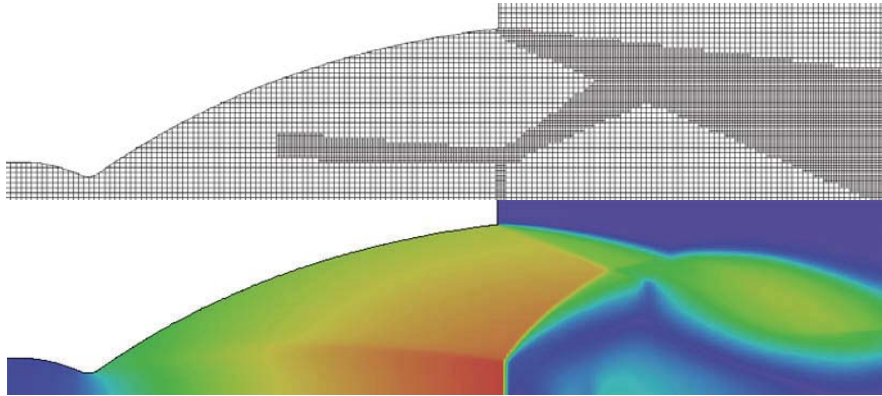


Abb. 12: Verteilung der Mach-Zahl und geeignetes lokal verfeinertes Netz [1]

4.2 Umströmung der „Progress-M“-Raumsonde

Der Konferenzbeitrag einer russischen Forschergruppe [11] beschreibt die kombinierte Untersuchung der Umströmung des Frontteils einer „Progress-M“-Raumsonde mit experimentellen Methoden und zwei numerischen Simulationsverfahren. Ein Verfahren, basierend auf den Navier-Stokes-Gleichungen, nutzte die oben beschriebenen Technologien zur Netzgenerierung und Modellierung der wandnahen Physik. Das andere Verfahren basierte auf der Direct Simulation Monte Carlo-Methode. Beide Simulationsverfahren zeigten eine sehr gute Übereinstimmung sowohl untereinander als auch mit den experimentellen Ergebnissen [1] (Abbildung 13).

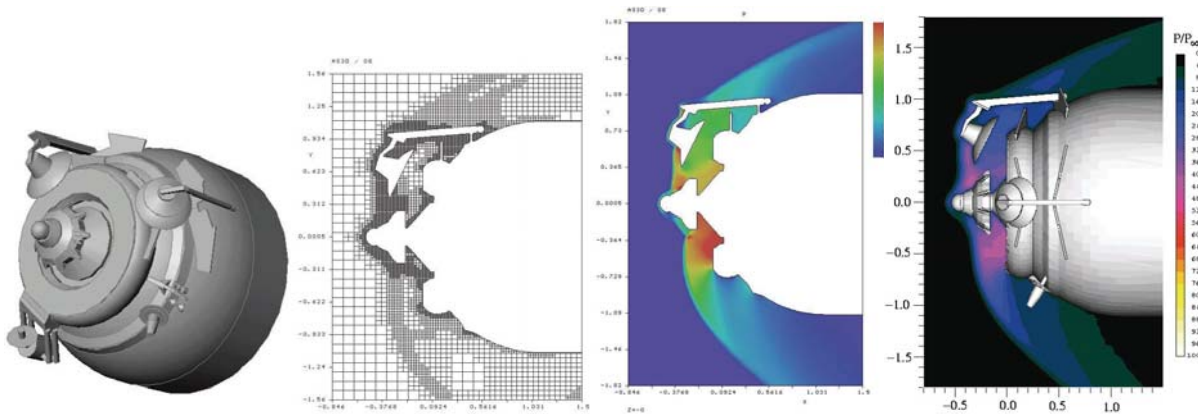


Abb. 13: Modellgeometrie, lokal verfeinertes Netz und berechnete Druckfelder [1]

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden, ausgehend von einer aktuellen Standortbestimmung, drei wesentliche Aspekte für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg von Strömungssimulationen im Kontext einer PLM-Umgebung diskutiert. Zunächst wurden die Besonderheiten im Umgang mit der Ausgangsgeometrie aufgezeigt und damit zusammenhängende spezifische Problemfelder diskutiert sowie Lösungsansätze aufgezeigt. Heute kann die fachgerechte Vorbereitung der Ausgangsgeometrie der dominierende Zeitfaktor für Strömungssimulationen in der Industrie sein, wobei es noch an geeigneten automatischen Hilfsmitteln dafür mangelt. Deshalb wird diesem

Aspekt künftig sowohl von den Berechnungsingenieuren als auch von den Softwareherstellern größere Aufmerksamkeit gewidmet werden müssen.

Weiterhin wurde ein Netzgenerierungsverfahren nach der „Immersed Boundary“-Methode vorgestellt und erläutert. Dieses Verfahren ist aufgrund seiner Automatisierungseigenschaften für komplexe, nicht vereinfachte Geometrie für die Erzeugung von Netzen für qualitativ hochwertige CFD-Ergebnisse in einem PLM-Kontext besonders geeignet.

Dieses Vernetzungsverfahren muß jedoch mit geeigneten Methoden zur physikalischen Simulation der wandnahen Physik verbunden werden, um für praktische Aufgaben in der Industrie eingesetzt werden zu können. Dafür wurde ein neuartiges, zweistufiges Verfahren zur Modellierung von wandnaher Physik zusammenfassend erläutert.

Abschließend wurde auf zwei Arbeiten verwiesen, die Validierungsfälle für die vorgestellten Technologien enthalten. Diese Arbeiten zeigen das Potential der Methode, qualitativ hochwertige Ergebnisse auch für anspruchsvolle Aufgabenstellungen zu erzielen.

6 Literatur

- [1] N. N.: Advanced Immersed Boundary Cartesian Meshing Technology in FloEFD™. Mentor Graphics Corporation, 2011
- [2] N. N.: Enhanced Turbulence Modeling in FloEFD™. Mentor Graphics Corporation, 2011
- [3] N. N.: How to Choose an Effective Grid System for CFD Meshing. Mentor Graphics Corporation, 2011
- [4] Parry, J; Weinhold, I.: CAD-Embedded CFD – A Conceptual and Technological Challenge. NAFEMS UK Conference, 2010
- [5] Weinhold, I.: The Five Myths of Computational Fluid Dynamics. NAFEMS BENCHMARK Magazine, April 2008, pp. 28-29
- [6] Lanfrit, M; Reese, H.; Hemmer, H.-P.: Die Immersed Boundary Methode. NAFEMS Magazin 12, 1/2009, pp. 64-73
- [7] Van Driest, E. R.: On Turbulent Flow Near a Wall. Journal of the Aeronautical Science, Vol. 23, No. 10, 1956, p.1007
- [8] Kalitzin, G.; Iaccarino, G.: Turbulence Modeling in an Immersed-Boundary RANS method, Center for Turbulence Research Annual Research Briefs, Stanford University, 2002, pp. 415 – 426
- [9] N. N.: FloEFD™ 10 Technical Reference. Mentor Graphics Corporation, 2011
- [10] Frey, M.: Behandlung von Strömungsproblemen in Raketendüsen bei Überexpansion. Dissertation, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, 2001
- [11] Krylov, A. N.; Kotov, V. M.; Tokarev, V. A.; Shcherbakov, N. A.; Khokhlov, A. V.; Ivanov, M. S.; Vaschenkov, P. V.; Kashkovsky, A. V.; Markelov G. N.: Numerical Modeling and Experimental Data Analysis of the Flow Near Spacecraft “Progress-M” Nose After the Head Fairings Jettisoning. ESA SP Vol. 487, 2002, pp. 307-314

Bitte per Post oder Fax senden:

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

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

e-mail: info@nafems.de

Adresse für Fensterkuvert



NAFEMS GmbH
Osterham 23

D-83233 Bernau am Chiemsee
Germany

Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (3/2011)

Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft | <input type="checkbox"/> Anzeigenmarkt |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“ | <input type="checkbox"/> Registered Analyst Zertifizierung |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare | <input type="checkbox"/> EU-Projekte |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse | <input type="checkbox"/> Internationale Arbeitsgruppen |

Bitte nehmen Sie mich in Ihren Verteiler auf.

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

Ich möchte folgendes zum NAFEMS Magazin anregen:

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

Absender

Firma: _____

Abt.: _____

Titel, Vor-/Nachname: _____

Straße: _____

PLZ-Ort: _____

Tel.: _____

Fax: _____

e-mail: _____

Bitte senden Sie das NAFEMS Magazin auch an:

Firma: _____

Abt.: _____

Titel, Vor-/Nachname: _____

Straße: _____

PLZ-Ort: _____

Tel.: _____

Fax: _____

e-mail: _____

NAFEMS

Online-Magazin

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

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

www.nafems.org