



Online-Magazin

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

Fachbeiträge

STRUKTURMECHANIK

Modellbildung und Simulation von Rollenlagern
G. Breslau, B. Schlecht (Technische Universität Dresden)

MATERIALMODELLIERUNG

Alterung und Quellung in polymeren Komponenten als Herausforderung für die Methode der Finiten Elemente
M. Achenbach (Ingenieur- und Sachverständigenbüro Achenbach)

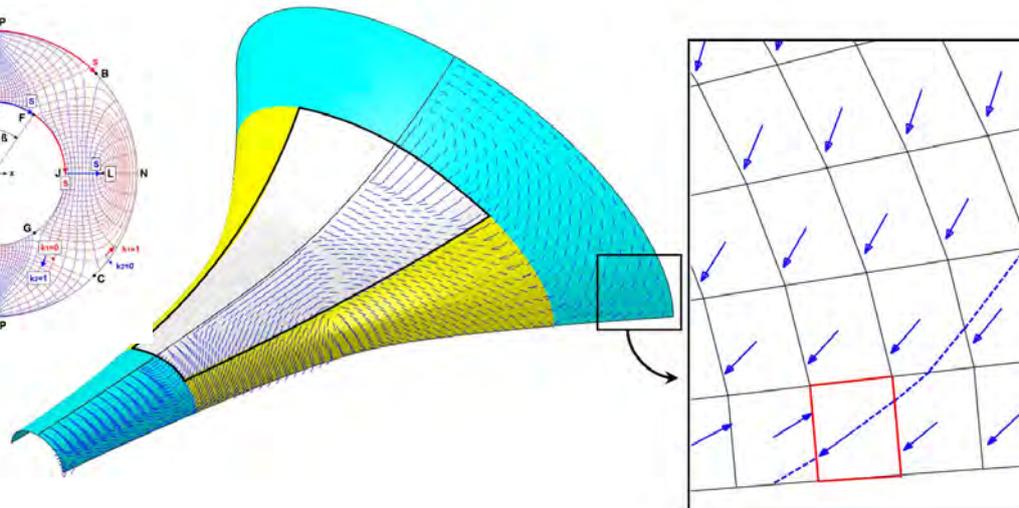
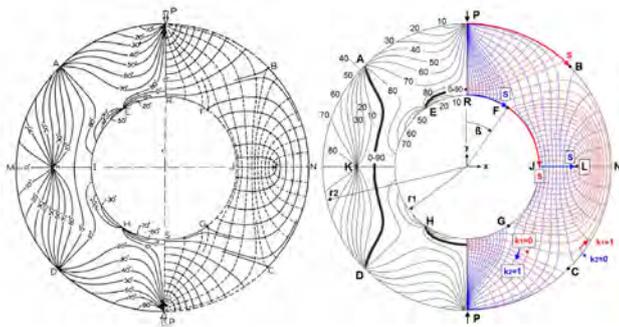
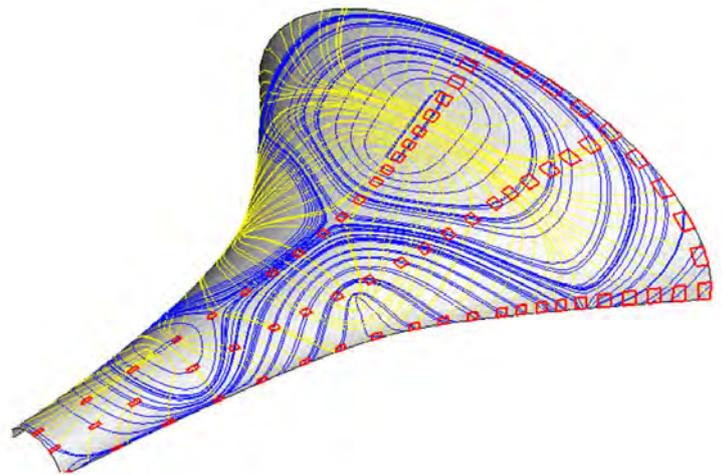
STRÖMUNGSMECHANIK

Zeitspektrale Methode für inkompressible, viskose Strömungen für industrielle Anwendungen
S. Baumbach (Volkswagen AG);
A. Stück (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR)

COMPOSITES

Die Berechnung von optimalen Faserverläufen in Composite Strukturen mit Standard-FE-Programmen
H. Moldenhauer (Dipl.-Ing. H. Moldenhauer GmbH)

NEU:
NAFEMS Studierendenwettbewerb
2019/2020



Alle bisherigen Ausgaben kostenlos zum Download unter: www.nafems.org/magazin

Sponsoren dieser Ausgabe:



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

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

es ist faszinierend zu sehen, welche rasante Entwicklung die numerische Simulation in den vergangenen Jahrzehnten genommen hat. Schon heute sind uns dadurch Werkzeuge in die Hand gegeben, um die uns frühere Forscher und Ingenieure glühend beneidet hätten. Wenn man nun die Entwicklung in die Zukunft extrapoliert, dann könnte man geradezu euphorisch werden. Allerdings ist so eine Extrapolation immer mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Zudem sollte, bei allem berechtigten Stolz über das Erreichte und bei aller Freude über die vorhandenen Möglichkeiten, nicht vergessen werden, dass die Simulation immer nur ein Abbild darstellt, das die Realität nur mehr oder weniger genau abbildet. Das ist schon dadurch bedingt, dass Eingangsgrößen wie Materialdaten und Randbedingungen selten exakt bestimmt werden können. Es wäre deshalb sinnvoll, jeder numerischen Simulation eine Angabe über die Verlässlichkeit der Aussagen beizufügen. Leider ist das höchst selten der Fall, wohl weil der Aufwand für solch eine Untersuchung relativ hoch ist. Einen kleinen Einblick in diese Problematik erhält man jedoch, wenn die Simulationsergebnisse durch Versuche validiert werden.

Das vorliegende Heft unseres Online-Magazins enthält wieder vier aktuelle Beiträge aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Zunächst werden Rollenlager in ganzheitlicher Systemsimulation untersucht. Dadurch können alle Wechselwirkungen zwischen Lager, Welle, Getriebe und der elastischen Umgebung berücksichtigt werden; für Vorspannung, Nullspiel und positiver Lagerluft werden Ergebnisse vorgestellt. Der zweite Beitrag befasst sich mit der Materialmodellierung von elastomeren Dichtungen. Sowohl das Langzeit-Relaxationsverhalten, als auch der Stoffaustausch zwischen der Dichtung und deren Umgebung und den daraus resultierenden Quellungen oder Schrumpfungen werden in dem Materialmodell berücksichtigt. Der dritte Beitrag behandelt inkompressible, viskose Strömungen. Es wird eine Alternative zum Zeitschrittverfahren entwickelt, die in gewissen Fällen schneller zu konvergenten Lösungen für instationäre Strömungsprobleme führt. Der vierte Beitrag zeigt einen Lösungsweg für die Auslegung von Faserverbundstrukturen auf, wenn spezielle Werkzeuge in den Anwendungsprogrammen fehlen. Faserverläufe werden nach den Hauptspannungslinien ausgerichtet, die mit Hilfe von orthotropen Wärmeleitfähigkeiten ermittelt werden.

Ich bin überzeugt, dass in diesem Strauß von Angeboten auch für Sie etwas Interessantes dabei ist. Beim Lesen wünsche ich Ihnen viel Spaß und erhellende Erkenntnisse.

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.beta-cae.com



www.3ds.com/products-services/simulia



www.dynamore.de



www.esi-group.com



www.intes.de



www.mscsoftware.com

Vorwort des Editor-in-Chief.....2
 Sponsoren3
 Inhalt / Impressum4

NAFEMS Events
 Übersicht: Konferenzen/Seminare, Schulungen, e-learnig Kurse5
 Seminare:
 Konstruktionsnahe CFD – Stand und zukünftige Entwicklungen6
 Multiphysikalische Simulationen in der Entwicklung von E-Motoren.....8

NAFEMS Trainings
 Verification and Validation in Engineering Simulation 12
 Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie..... 14
 Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis..... 15
 Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation..... 16
 Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung 17

NAFEMS Studierendenwettbewerb..... 18

Special NAFEMS Nordic:
 CAE in Support of Sustainability and Durability 19

Über NAFEMS
 Übersicht20
 Ziele21
 Mitglied werden22
 Mitgliedsmodelle23
 Technische Arbeitsgruppen24
 Veranstaltungen25
 PSE Zertifizierung26
 Training27
 Resource Centre28
 Publikationen.....29
 Benchmark Magazin30

Neuigkeiten35

Veranstaltungskalender44

Fachbeiträge
Strukturmechanik
 Modellbildung und Simulation von Rollenlagern46
 G. Breslau, B. Schlecht (Technische Universität Dresden)

Materialmodellierung
 Alterung und Quellung in polymeren Komponenten als
 Herausforderung für die Methode der Finiten Elemente53
 M. Achenbach (Ingenieur- und Sachverständigenbüro Achenbach)

Strömungsmechanik
 Zeitspektrale Methode für inkompressible, viskose Strömungen
 für industrielle Anwendungen 68
 S. Baumbach (Volkswagen AG);
 A. Stück (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR)

Composites
 Die Berechnung von optimalen Faserverläufen in Composite
 Strukturen mit Standard-FE-Programmen.....78
 H. Moldenhauer (Dipl.-Ing. H. Moldenhauer GmbH)

Werbeanzeigen
 ITEA3 VMAP Projekt.....31 - 34

Rückmeldeformulare.....91

Impressum

Editor-in-Chief

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

Redaktioneller Beirat

Dr. Alfred Svobodnik
 Mvoid Technologies
 Prof. Dr. Manfred Zehn
 TU Berlin

Redaktion

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

Gestaltung / Layout / Anzeigen

Werbos GbR
 Griesstr. 20
 D-85567 Grafing b. München
 Germany
 Tel. +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 01.01.2018

Verteilung / Bezug

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

Copyright © 2019, Werbos GbR.

Nachdruck – auch auszugsweise -,
 Vervielfältigung 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
 Einreichung 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.

ISSN 2311-522X

Seminare in DACH 2019 / 2020

Konferenz-/Seminartitel	Termin	Ort
Konstruktionsnahe CFD – Stand und zukünftige Entwicklungen www.nafems.org/cfd19	11.-12. Nov.	Wiesbaden
Multiphysikalische Simulationen in der Entwicklung von E-Motoren www.nafems.org/e-motor19	13.-14. Nov.	Wiesbaden
NAFEMS DACH Regionalkonferenz 2020 www.nafems.org/dach20	11.-13. Mai	Bamberg

Informationen zu allen NAFEMS Veranstaltungen finden Sie unter www.nafems.org/events

Schulungen in DACH 2019

Schulungstitel	Termin	Ort	Teilnahmegebühr
Verification and Validation in Engineering Simulation www.nafems.org/vandv19-2	06.-07. Nov.	München	1.950 / 1.560 ¹⁾
Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie www.nafems.org/fkm19-2	18.-19. Nov.	Wiesbaden	1.590 / 1.200 ¹⁾
NVH	in Planung, bei Interesse bitte melden		
Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation	auf Anfrage / Inhouse		
CFD Analysis: Theory and Applications	auf Anfrage / Inhouse		
Non-Linear Finite Element Analysis	auf Anfrage / Inhouse		

¹⁾ in Euro zzgl. ges. MwSt. je Teilnehmer (Nichtmitglied / NAFEMS Mitglied)

Eine Beschreibung der Schulungsinhalte finden Sie auf Seiten 10 - 15. Weitere Schulungen und Kurse, die web-basiert (e-learning bzw. Webinare) oder ausserhalb der deutschsprachigen Region stattfinden, finden Sie unter www.nafems.org/events.

e-Learning Kurse

E-Learning ermöglicht schnelle, höchst effektive und kostengünstige Trainings.

Folgende Themen werden regelmäßig angeboten:

- 10 Steps to Successful Explicit Dynamic Analysis
- Advanced Dynamic FEA
- Basic FEA
- Composite FEA
- CFD for Structural Designers and Analysts
- Elements of Turbulence Modeling
- Fatigue & Fracture Mechanics in FEA
- Introduction to Dynamics using FEA
- Introduction to Engineering Simulation for Non-Specialists
- Introduction to Practical CFD
- Non-Linear FEA
- Practical Modelling of Joints and Connections
- Structural Optimization in FEA

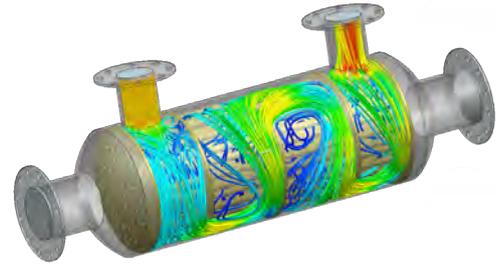
Aktuelle Termine und weitere Infos unter www.nafems.org/e-learning



Einladung und Vortragsprogramm

Seminar: Konstruktionsnahe CFD – Stand und zukünftige Entwicklungen

11. - 12. November 2019, Wiesbaden



Einladung

Konstruktion und Simulation – wie gelingt das stimmige Zusammenspiel eines optimalen Entwicklungsprozesses von CAD-Entwicklern und Simulationsexperten im Unternehmen? Zur Verkürzung von Entwicklungszeiten müssen Ergebnisse von Simulationsrechnungen in frühen Entwicklungsphasen, d. h. bereits in der Konstruktionsphase, verfügbar sein.

Ansätze sind seit langer Zeit vorhanden, kommen jedoch bisher selten zum Einsatz. Entweder war die Komplexität der Software zu groß, die numerischen Erfahrungen der Anwender (CAD-Konstrukteure) nicht ausreichend, die Akzeptanz der Software zu gering oder es fehlte das Vertrauen in die generierten Simulationsergebnisse.

Dies verändert sich mit der zunehmend verbesserten Integration von Berechnungsmethoden, der Entwicklung von Schnittstellen zwischen CAD und CFD, der direkten Verknüpfung der CFD zur CAD-Geometrie und der erleichterten Bedienbarkeit von Werkzeugen für die Strömungsberechnung (CFD-Tools). Einfache aber auch aufwändigere Strömungsberechnungen und Optimierungen direkt aus der Konstruktionsumgebung heraus durchführen zu können, kann die konstruktiven Möglichkeiten in der Vorauslegung enorm erweitern.

Wie kann man die Kompetenzen von Simulationsexperten, die für die Berechnungen zuständig sind, und Konstrukteuren, die wissen, was für Änderungen am Produkt im Detail möglich sind, gewinnbringend zusammenführen? Können konstruktionsnahe Simulations- und Optimierungsverfahren helfen, Produktentwicklungszeiten zu reduzieren und die Produktqualität zu erhöhen, um dadurch einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil zu erhalten?

Im Rahmen des Seminars werden Anwendungsgebiete, Möglichkeiten und Grenzen der konstruktionsnahen CFD insbesondere im industriellen Einsatz in unterschiedlichen Branchen und Unternehmensgrößen (Ingenieurbüro, Mittelstand, Großkonzern) diskutiert.

Wir hoffen, Ihr Interesse geweckt zu haben und freuen uns auf Ihre Teilnahme.

Ihre NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH

Organisatorisches

Technische Leitung

NAFEMS CFD Advisory Board (CAB) / NAFEMS Steering Committee für Deutschland, Österreich und der Schweiz

Tagungssprache

Deutsch (in Ausnahmen in englischer Sprache)

Veranstaltungsort / Zimmer

Hotel Oranien Wiesbaden
Platter Straße 2
D-65193 Wiesbaden
www.hotel-oranien.de

Im Tagungshotel haben wir Zimmer für Tagungsteilnehmer zu vergünstigten Preisen optioniert. Bitte buchen Sie diese selbst unter dem Stichwort „NAFEMS“.

Fachausstellung und Sponsoring

Ausstellungsfläche: 700,- Euro zzgl. ges. MwSt. Bitte fordern Sie nähere Informationen für Ausstellung und Sponsoring an.

Teilnahmegebühr

Nicht-Mitglieder: Euro 620,- *
NAFEMS-Mitglieder: frei*

* NAFEMS Mitglieder erhalten sechs „seminar credits“ pro Jahr. Für dieses Seminar werden drei credits je Teilnehmer benötigt. Falls bereits verwendet, können NAFEMS Mitglieder zu einem reduzierten Preis teilnehmen: Euro 420,- / Person*. Vortragende entrichten die reguläre Teilnahmegebühr.

Die Teilnahmegebühr beinhaltet Kaffeepausen an beiden Tagen, das Get-together am 11. Nov. und das Mittagessen am 12. Nov. Das Hotelzimmer ist nicht in der Teilnahmegebühr enthalten.

Für Studenten steht eine begrenzte Anzahl an freien Seminarplätzen zur Verfügung. Die Annahme erfolgt in der Reihenfolge der Anmeldungen und setzt die Bereitschaft zur Mithilfe bei der Organisation vor Ort voraus - bitte Immatrikulationsbescheinigung beifügen.

Informationen und Anmeldung www.nafems.org/cfd19

Vortragsprogramm

Platin-Partner



Silver-Sponsor

11. November

- 13:30 **Begrüßung und technische Einführung**
Mitglieder des NAFEMS CFD Advisory Boards
- 13:45 **Keynote-Vortrag: CFD-Integration in den Entwicklungsprozess bei MAHLE**
W. Kühnel, G. Apostolopoulos, J. Schlottke, M. Weinmann, R. Gneiting, C. Janssen, F. Brotz (Mahle Behr)
- 14:30 **Keynote-Vortrag: CFD im Produktentstehungsprozess der Pneumatik: Entwicklungs-Booster mit Simulations-Apps**
M. Hasert (Festo)
- 15:15 **Platin-Partnervortrag: CFD-Demokratisierung mit Simcenter FLOEFD**
M. Sabeur (Siemens Digital Software)
- 15:30 Kaffeepause
- 16:15 **„CFD für Designer“ von Magnetventilen beim Automobilzulieferer Pierburg**
T. Wanzek (Rheinmetall); B. Schöneberg (CFX Berlin Software)
- 16:45 **Aerodynamische Designoptimierung eines Doppелеlement-Heckflügels**
M. Schneider, D. Grimmeisen (Cascade)
- 17:15 **Einsatz von Open-Source Lösertechnologie für konstruktionsnahe CFD**
U. Heck (DHCAE)
- 17:45 **Get together: Getränke und Snacks in der Ausstellung**

12. November

- 08:15 **Invited-Speaker: Abstract Modeling Streamlines CFD Processes Improving Productivity and Engineering Collaboration (Enabling Designers to Initiate Dependable Simulations while Relieving Analysts from Tedious Routine Work)**
K. Peters (Crossover Solutions USA)
- 09:00 **Keynote-Vortrag: Neue Wege bei der Entwicklung eines direktgekühlten Batteriemoduls**
P. Dobusch (Kreisel Electric)
- 09:45 Kaffeepause
- 10:30 **Effiziente Auslegung eines Batterie-Kühlkörpers dank enger Zusammenarbeit von CFD & CAD**
P. Dobusch, K. Menzl (Kreisel Electric)
- 11:00 **CFD integrierte CAD-Lösung zur Auslegung eines HVAC Systems**
V. Jambhkar (Dassault Systèmes)
- 11:30 **Optimierter Prozessablauf in einem praxisorientierten CFD-Projekt**
R. Markl (CAE Simulation & Solutions)
- 12:00 **Vorstellung einer konstruktionsnahen Optimierungsmethode in Verbindung mit 1D-Systemsimulation**
P. Korth (Diehl Aviation)
- 12:30 Mittagspause
- 13:30 **Cloudfertige Apps für CAE/CFD Anwendungen**
S. Geller (ICON)
- 14:00 **Erst wenn Strömungssimulation leicht von der Hand geht, lässt sich ihr Potential in der Konstruktion ausschöpfen**
M. Vidal (Cadfem)
- 14:30 **Transiente Strömungsanalyse: Vermeidung des Trade-Offs zwischen hoher Rechengenauigkeit und hohen Rechenkosten**
R. Szöke-Schuller (SimScale)
- 15:00 **Wrap-up/Diskussion**
Mitglieder des NAFEMS CFD Advisory Boards
- 15:30 Ende der Veranstaltung

Einladung und Vortragsprogramm

Seminar: Multiphysikalische Simulationen in der Entwicklung von E-Motoren

13. - 14. November 2019, Wiesbaden

Einladung

Numerische Simulationsmethoden und Ingenieursverfahren, wie zum Beispiel die Methode der finiten Elemente sowie parametrische und nicht-parametrische Optimierung, sind heutzutage aus der Entwicklung elektromechanischer Produkte kaum mehr wegzudenken. Obwohl die erstmalige Erwähnung des Terminus Finite Elemente in den 50er Jahren durch Ray William Clough auf mechanische Anwendungen abzielte, wurde die Methode sehr rasch auf andere physikalische Bereiche ausgedehnt. Neben der Analyse von thermischen und strömungsmechanischen Effekten wird sie auch für die Simulation von elektromagnetischen Feldern verwendet und hier insbesondere für die Entwicklung von Elektromotoren.

In vielen klassischen mechanischen Anwendungen, z.B. in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, sind elektrische Maschinen als Systemkomponenten nicht mehr wegzudenken. Da Elektromotoren mechanische Systeme antreiben, ergibt sich zwangsläufig eine multiphysikalische bzw. multidisziplinäre Aufgabenstellung, die entsprechender Simulationsansätze bedarf. Die Einbeziehung von Elektromotoren in die Entwicklung von elektromechanischen Produkten wird somit zu einem wesentlichen Bestandteil gesamtphysikalischer Betrachtungen, die bei Systemsimulationen von elektromechanischen Produkten zu berücksichtigen sind. Selbst die komponentenbasierte Simulation der Elektromotoren selbst stellt schon eine multiphysikalische Anwendung dar, da Reibungsverluste, Wirbelstromverluste oder Vibrationen das Leistungsvermögen von Elektromotoren direkt beeinflussen. Die Anforderungen an die Simulation von physikalischen Vorgängen

in einem Elektromotor sind ähnlich anspruchsvoll oder vielleicht sogar noch komplexer als bei einem Verbrennungsmotor. Die Aufgabenstellung besteht darin, Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischen Feldern, elektromechanischen Verlustleistungen, Wärmeentwicklungen, Temperaturverteilungen, Kühlvorgängen und Schwingungen aufgrund elektromagnetischer Anregungen und mechanischer Beanspruchungen zu beschreiben, korrekt zu modellieren und mit adäquaten multiphysikalischen Simulationsansätzen zu berechnen. Die eigentliche Herausforderung ist jedoch, nicht nur einzelne Berechnungen durchzuführen, sondern die Simulationszeiten derart zu reduzieren, dass Reihenuntersuchungen und Systemoptimierungen in endlicher Zeit möglich werden, um die Robustheit der Produkte zu erhöhen. Hierbei kommen mathematische Verfahren und Techniken wie zum Beispiel der Model Order Reduction eine besondere Bedeutung zu.

Unser Seminar möchte den aktuellen Stand industrieller Anwendungen in der Simulation von Elektromotoren aufzeigen, am Markt verfügbare Softwaretools und insbesondere deren Einsatz in der Praxis demonstrieren. Wir hoffen, Ihr Interesse geweckt zu haben und freuen uns auf Ihre Teilnahme.

Ihre NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH

Organisatorisches

Technische Leitung

A. J. Svobodnik (Mvoid Technologies), E. Wang (Cadfem), F. Jurecka (Dassault Systèmes), alle Mitglieder des NAFEMS Steering Committee für Deutschland, Österreich und der Schweiz

Tagungssprache

Deutsch (in Ausnahmen in englischer Sprache)

Veranstaltungsort / Zimmer

Hotel Oranien Wiesbaden
Platter Straße 2
D-65193 Wiesbaden
www.hotel-oranien.de

Im Tagungshotel haben wir Zimmer für Tagungsteilnehmer zu vergünstigten Preisen optioniert. Bitte buchen Sie diese selbst unter dem Stichwort „NAFEMS“.

Fachausstellung und Sponsoring

Ausstellungsfläche: 700,- Euro zzgl. ges. MwSt. Bitte fordern Sie nähere Informationen für Ausstellung und Sponsoring an.

Teilnahmegebühr

Nicht-Mitglieder: Euro 620,- *
NAFEMS-Mitglieder: frei*

* NAFEMS Mitglieder erhalten sechs „seminar credits“ pro Jahr. Für dieses Seminar werden drei credits je Teilnehmer benötigt. Falls bereits verwendet, können NAFEMS Mitglieder zu einem reduzierten Preis teilnehmen: Euro 420,- / Person*. Vortragende entrichten die reguläre Teilnahmegebühr.

Die Teilnahmegebühr beinhaltet Kaffeepausen an beiden Tagen, das Get-together am 11. Nov. und das Mittagessen am 12. Nov. Das Hotelzimmer ist nicht in der Teilnahmegebühr enthalten.

Für Studenten steht eine begrenzte Anzahl an freien Seminarplätzen zur Verfügung. Die Annahme erfolgt in der Reihenfolge der Anmeldungen und setzt die Bereitschaft zur Mithilfe bei der Organisation vor Ort voraus - bitte Immatrikulationsbescheinigung beifügen.

Informationen und Anmeldung

www.nafems.org/e-motor19

Vortragsprogramm

Platin-Partner

SIEMENS
Ingenuity for life

Silver-Sponsor

 **SIMULIA**

13. November

- 13:30 **Begrüßung und technische Einführung**
A. J. Svobodnik (Mvoid), E. Wang (Cadfem),
F. Jurecka (Dassault Systèmes), alle Mitglieder des NAFEMS DACH Steering Committees
- 13:45 **Keynote-Vortrag: Elektrische Antriebe: Trends und aktuelle Forschungsfelder**
D. Gerling (Universität der Bundeswehr München)
- 14:30 **Invited Speaker: Digitaler Zwilling für elektrische Antriebe in Flugzeugen**
M. Filipenko (Siemens eAircraft)
- 15:00 **Sponsor-Vorträge**
- 15:15 Kaffeepause
- 16:00 **Robuste Optimierung der Dimensionen von Magneten eines PMSMs unter Berücksichtigung von Parameterabweichungen**
Z. Bontinck (Knorr-Bremse)
- 16:30 **Optimierungsmethoden für die ganzheitliche Entwicklung von E-Motoren**
L. Fredriksson, H. Gruber, P. Lombard, A. Dyer (Altair Engineering)
- 17:00 **Elektromagnetische Feldsimulation sich bewegender Bauteile**
L. Kielhorn, T. Rüberg, J. Zechner (TailSit)
- 17:30 **Elektromagnetische-thermische Analyse einer permanenterregten Synchronmaschine für Elektrofahrzeuge**
K. Illa, S. Holst (Siemens Industrie Software)
- 18:00 **Get together: Getränke und Snacks in der Ausstellung**

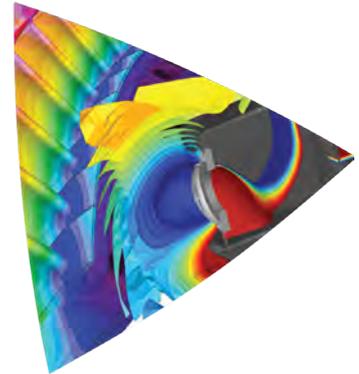
14. November

- 08:15 **Multiphysikalische Simulationen in den unterschiedlichen Entwicklungsstadien von Elektromotoren**
R. Fuger (Cadfem)
- 08:45 **Entwicklung und Optimierung eines Elektromotors für Kleinflugzeuge durch Co-Simulation einer Motordesign-Software und CFD**
J. Kott (Maccon); D. Grimmeisen (Cascade)
- 09:15 **Initiale Motor Design Optimierung unter Einbeziehung des Elektromagnetischen Verhaltens und der Mechanischen Belastung**
C. Kremers, P. Veerma, B. Funiero (Dassault Systèmes)
- 09:45 Kaffeepause
- 10:30 **Kühlungsberechnungen für die Kühlung von einem elektrischen Motor**
K. Segond (E-cooling)
- 11:00 **Multiphysikalische Simulation in der Entwicklung von E-Motoren**
C. Serhan (Merkle & Partner)
- 11:30 **Thermische Auslegung Automotiver E-Maschinen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kühlkonzepte**
J. Schneider, O. Knaus (AVL List)
- 12:00 **Wärmemanagement von elektrischen Antrieben**
T. Reimer (Dassault Systèmes)
- 12:30 Mittagspause
- 13:30 **Geräusch- und Schwingungsanalyse eines elektrischen Antriebsstrangs**
T. Reimer (Dassault Systèmes)
- 14:00 **Optimierung von elektrischen Maschinen in der Cloud**
S. Silber, W. Koppelstätter (Linz Center of Mechatronics); A. Ocklenburg (CloudSME)
- 14:30 **Modellreduktion einer E-Maschine mit Kühlkanälen**
C. Abramowski (Cadfem)
- 15:00 **Diskussion: Ziele und Grenzen der der Simulation in der E-Motorenentwicklung**
A. J. Svobodnik (Mvoid)
- 15:30 Ende der Veranstaltung

Ankündigung und Call for Papers

NAFEMS20

DACH CONFERENCE



Fachkonferenz für Modellierung, Berechnung & Simulation

11. - 13. Mai, Bamberg, Deutschland

Die 5. deutschsprachige NAFEMS Regionalkonferenz bietet Ihnen ein einzigartiges, unabhängiges, neutrales, übergreifendes und umfassendes Informations- und Networkingangebot im Bereich der numerischen Simulationsmethoden.

– Bitte reichen Sie Ihren Abstract bis 24. Januar 2020 an info@nafems.de ein –

Call for Papers

Nach den erfolgreichen Konferenzen der letzten Jahre mit jeweils über 100 Fachpräsentationen zu den Themen FEM, CFD, MKS, SDM etc. möchten wir Sie nun herzlich zur fünften deutschsprachigen NAFEMS Konferenz einladen, die vom 11. - 13. Mai in Bamberg stattfinden wird. Es erwarten Sie wieder interessante Keynote-Vorträge sowie Beiträge von Anwendern unterschiedlicher Soft- und Hardwareprodukte aus Industrie, Forschung und Hochschulen. Eine große Ausstellung begleitet die Konferenz – zuletzt mit über 30 Ausstellern.

Mit dieser Fachkonferenz bietet Ihnen 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. Die Teilnahme ist gleichsam offen für NAFEMS-Mitglieder und Nichtmitglieder, wobei NAFEMS-Mitglieder im Rahmen ihrer Mitgliedschaft gegen fünf „NAFEMS seminar credits“ kostenlos teilnehmen.

Gestalten Sie mit - reichen Sie einen Vortrag ein!

Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie mit einem Fachvortrag aktiv an der Gestaltung der Konferenz und damit zum Erfolg beitragen würden. Wir wünschen uns 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.

Ihr NAFEMS Lenkungsausschuss für Deutschland, Österreich und Schweiz

Wir freuen uns über Beiträge aus allen Industrie-, Anwendungs- und Forschungsbereichen zu folgenden Themenkreisen - jedoch nicht limitiert darauf:

Driving Design with Engineering Simulation

- Finite Element Analysis
- Computational Fluid Dynamics
- Multibody dynamics
- Discrete Element Methods
- Boundary Element Method
- Meshfree methods
- New/emerging numerical methods
- Co-simulation / code coupling
- Structure integrity, static, dynamic, high speed impact
- Fluid flow
- Acoustic
- NVH
- Electrical
- Heat transfer
- Optical
- Electromagnetic fields, EMC
- Multiphysics
- Multiscale
- Multidisciplinary analysis
- Optimisation (structures, flow, ...)
- Pre- and postprocessing
- Stochastic / probabilistic methods

Systems Modelling

- MBSE
- Systems engineering
- Standards
- FMI / FMU
- Multidisciplinary Analysis

Implementing Simulation Confidence

- Quantifying business benefits
- Generating confidence in results
- Verification and validation
- Uncertainty quantification
- Education and training
- Simulation governance
- Robust design
- Testing and qualification
- Certification by analysis
- Integrating analysis & test

Deploying your Simulation Capability

- Automation
- Democratisation
- HPC - High performance computing
- Cloud computing
- Licensing
- CAD - CAE integration
- Real time simulation
- Business case simulation projects

Effective Simulation of Materials

- Composites
- Concrete
- Metallics
- Nanomaterials
- Foam, plastics, rubber
- Soil
- Bio materials
- Crack propagation / fracture
- Damage / failure
- Delamination
- Durability / fatigue
- Phase transformation
- Plasticity / hyper elasticity / viscoelasticity
- Microstructural modelling
- Material damping
- Constitutive laws of materials

Digital Engineering

- Digital twin
- AI & machine learning
- Industry 5.0 / digital manufacturing
- Virtual reality / augmented reality
- Internet of things

Manufacturing Process Simulation

- Additive manufacturing
- Casting, cutting, drawing, forging
- Welding / heat treatment
- Composites manufacturing

ITEA3 VMAP project Interface standard for integrated virtual material modelling in manufacturing industry

Simulationsdatenmanagement SDM

- Deployment of SPDM solutions
- Digital threads and digital twins implemented in SPDM
- Business value of SPDM solutions
- Data and process integration tools
- Examples of deployment of democratised simulation applications
- SPDM strategy and requirements
- Scope of SPDM
- Data standards

Wir freuen uns auf die Einreichung Ihres Abstracts.

Ihr NAFEMS Lenkungsausschuss für Deutschland, Österreich, Schweiz

Organisatorisches

Einreichung von Abstracts

Wir freuen uns auf Ihren 1/2-seitigen, deutschsprachigen Titel + Abstract per e-mail an info@nafems.de bis zum **24. Januar 2020**. Nach Festlegung der Agenda erhalten Sie eine Bestätigung. Für den Tagungsband benötigen wir bis 1. April 2020 einen „Extended Abstract“ mit ca. 2 - 4 Seiten in deutscher Sprache.

Vortragsdauer

Die Vortragsdauer beträgt vorauss. 25 Min. inkl. Diskussion.

Veranstaltungsort / Hotel

Welcome Kongresshotel Bamberg (D)

Teilnahmegebühren

Nicht-Mitglieder: Euro 775,- / Person
 NAFEMS-Mitglieder: frei (Verwendung von 5 seminar credits)*
 NAFEMS-Mitglieder ohne sem. credits: Euro 500,- / Person
 Vortragende aus Unternehmen zur Produktion/Weiterverarbeitung von materiellen Gütern/Waren in Fabriken/Anlagen) : frei
 Proceedings, Mittagessen, Pausengetränke sind in den Teilnahmegebühren enthalten. Übernachtung ist nicht enthalten.

*** Mitgliedsgebühren für Unternehmen/Institute**

Eine Standard NAFEMS site membership kostet 1.200 Euro pro Jahr, eine Academic site membership 750 Euro pro Jahr. NAFEMS Mitglieder erhalten acht seminar credits (1 credit entspricht 1/2 Seminar-/Konferenztag) pro Jahr. Für diese Veranstaltung werden fünf seminar credits je Teilnehmer für eine kostenlose Teilnahme benötigt – es rechnet sich schnell, Mitglied zu werden. Sollten die seminar credits bereits verwendet worden sein, können NAFEMS Mitglieder zum reduzierten Preis von Euro 500,- pro Person teilnehmen.

Begleitende Ausstellung und Sponsoring

Die Konferenz wird von einer Hard-/Softwareausstellung begleitet. Bitte fordern Sie weitere Informationen an.

Tagungssprache

Deutsch (in Einzelfällen in Englisch)

Alle Preise zzgl. ges. MwSt.



Informationen und Anmeldung

www.nafems.org/dach20

NAFEMS Schulung

Dieser Kurs wurde bereits über 30 Mal in ganz Europa gehalten!

Master Course V&V: Verification and Validation in Engineering Simulation – Building Simulation Credibility in an Industrial Context

6. - 7. November 2019 in München-Ottobrun (bei IABG) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Engineering simulation plays an increasing role in industry's search for competitiveness and technology based innovation at every stage of the design, qualification and certification of products. Key decisions and product qualification/certification increasingly rely on virtual tests and digital simulation, creating a major paradigm shift in which the objective of physical tests is progressively moving from a demonstration of compliance to a reference for analysis validation. This trend in industry is shown through adoption of new terms such as 'realistic simulation' and 'virtual testing'. This situation creates new responsibility for the engineer to guarantee the required confidence level.

This new approach requires secured processes for the verification and validation of models and analyses bringing evidence of their predictive capability. In particular, programme managers now require formal evidence on "simulation fit for purpose" on which they can build confidence and take decisions. In addition, the increasing situation for extended enterprise creates new constraints to guarantee safe and robust analysis processes.

At the same time, and due to the economic pressure, V&V activities are frequently seen as an additional cost that can easily be reduced or even fully cut, thus underestimating the induced risks. In addition, V&V is not easy to implement because of the diversity of involved persons: managers, simulation experts, test specialists, software developers and quality controllers, software vendors...

The Course

Participants of this master class will:

- Learn how to implement reporting to bring visibility and confidence to all managers concerned with simulation outcomes.
- Develop their knowledge in V&V in full coherence with the level of expectation due in their industry context and applicable regulations
- Understand the fundamental concepts of V&V, the role and contents of standards, the existing methodologies for the implementation or the improvement of simulation and V&V plans
- Understand specific V&V requirements in the context of realistic simulation and virtual testing
- Understand how to build rational plans for V&V and related demonstrations
- Improve synergy between virtual and physical tests in the context of validation
- Learn how to build business cases allowing for justification of V&V plans
- Understand simulation management and process issues
- Learn how to implement reporting to bring visibility and confidence to all managers concerned with simulation outcomes.

Who Should Attend?

This master class course is designed for:

- Engineers and senior analysts in charge of simulation activities or preparing to take new responsibility in the management of simulation, especially with regard to V&V responsibility
- Managers in charge of engineering simulation teams and willing to improve their knowledge in V&V and in the relevant processes
- Program managers who need to make critical decisions based on engineering simulation results and that wish to increase their understanding and visibility of the required V&V activities

It is recommended that participants have a few years of experience in engineering simulation for the design and development of industrial products.

Program

Introduction

- Industrial context and stakes
- Simulation in the product lifecycle
- Industrial implementation of simulation

Validation, Qualification & Certification of Industrial Products

- Fundamentals on product validation, qualification and certification
- The analysis-test pyramid

- Virtual testing and realistic simulation
- Introduction to new technologies and TRL
- Regulations and certification in aeronautics
- Situation of the nuclear industry

V&V and Simulation Management

- Scope and complexity of the management of simulation
- Simulation management activities: software capability management / V&V / skills management / quality management / SPDM / CAD / CAE.....

Realistic Simulation

- Existing technology and new enhancements available to industry: HPC, cloud, open source, multi-scale, multi-physics....
- Connection with CAD/PLM
- Benefits and threats of realistic visualization
- Impact on V&V plans

V&V Fundamentals and Standards

- Fundamentals
- Verification
- Validation and uncertainty quantification
- Predictive maturity
- V&V process and responsibilities
- Standards
- Short history of standardization in V&V
- Main standards: ASME, AIAA, NASA...
- Other initiatives

Verification

- Verification of software codes
- Verification of algorithms
- Quality assurance for software: methodologies for SW development, regression tests...
- Verification of analyses
- Validation and Test/Simulation Synergy
- Validation process and constraints

- Physical and virtual testing collaboration
- Objectives and typology of physical tests
- Prerequisites for successful validation tests
- Predictive maturity
- Some industrial examples (aerospace, nuclear...)

Uncertainty Quantification

- Typology : random, epistemic uncertainties
- Selective methodologies for uncertainty quantification: Monte Carlo, Latin hypercube, response surfaces, polynomial chaos, "Lack of knowledge" theory (theory of misconceptions?), theory of evidence.....
- Sensitivity analysis, robustness (key parameters identification...)

V&V Implementation Strategies

- Setting-up V&V plans
- Implementation issues and obstacles
- Industrial justification (V&V business case)
- Costs, benefits and risk management
- Organization and skills

Course Language

Englisch

Tutors



Jean-Francois Imbert

Mr. Imbert has 40 years' experience in Structural Engineering, CAE/numerical simulation, mostly in the aeronautical and aerospace sectors where he has exercised both operational, expert and management responsibilities. Throughout his career, Jean-Francois ensured the development and implementation of innovative numerical simulation capabilities in industrial contexts, mostly in Structure Analysis. In his successive responsibilities, he accumulated a unique and broad experience in simulation management and the multiple features of V&V, including validation tests and analysis /test synergy. Furthermore he has a long practice of engineering education both in academic institutions and professional seminars..



Philippe Pasquet

With almost forty years of extensive experience in engineering simulation, Philippe Pasquet has covered the full range of technical responsibility in this domain, both with research institutes and various consulting firms and software houses: development of software, development of methods, advanced studies, team management, scientific and technical management etc. Powered by his passion for pedagogy and simulation technology, he has presented at several conferences and talks at high level towards efficient use and good practices of simulation in the industry, motivating students and engineers for those fascinating engineering simulation jobs..

Informationen und Anmeldung
www.nafems.org/vandv19-2

NAFEMS Schulung

Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie

18. - 19. November 2019, Wiesbaden / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, ist ein vom Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) entwickelter Standard für einen statischen und zyklischen Festigkeitsnachweis. Durch die breite Anwendbarkeit hat der Festigkeitsnachweis eine hohe Verbreitung im Maschinenbau und anderen Branchen gefunden. In diesem Seminar lernen Sie den richtlinienkonformen Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen sowohl für nichtgeschweißte als auch für geschweißte Bauteile kennen. Neben der Theorie des Nachweises steht dabei auch die praktische Anwendung der Richtlinie auf Basis einer FEM-Simulation im Vordergrund, bei der sich für den Anwender Fragestellungen außerhalb der eigentlichen Richtlinie ergeben. Diese werden im Seminar anhand praxisnaher Beispiele besprochen. Um die verschiedenen Aspekte im Rahmen des Seminars umfassend diskutieren zu können, wird die Berechnung der Beispiele vom Referenten programmgestützt durchgeführt.

Im Seminar wird die Vorgehensweise des rechnerischen Festigkeitsnachweises entsprechend der FKM-Richtlinie für statische und zyklische Belastungen vermittelt, sowohl für nichtgeschweißte als auch geschweißte Bauteile. Sie lernen wie der Nachweis im Zusammenspiel mit einer FEM-Analyse umzusetzen ist und welche Fallstricke zu beachten sind.

Gliederung

- Grundlegendes zur FKM-Richtlinie
- > Was leistet ein Festigkeitsnachweis?
- > Historie, Quellen und rechtlicher Status der Richtlinie
- > Anwendungsbereich und Umfang

Informationen und Anmeldung

www.nafems.org/fkm19-2

Theorie zum statischen Festigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

- > Gliederung des Nachweises
- > Spannungsarten
- > Werkstoffkennwerte
- > Konstruktionsfaktor
- > Sicherheitskonzept
- > Nachweis

Beispiel „Getriebegehäuse“ zum statischen Nachweis

- > Auswahl der Nachweispunkte für manuelle Berechnung
 - > Programmgestützte Berechnung
- Vertiefung zum statischen Nachweis - Plastische Formzahl
- > Ertragbare Dehnung
 - > Plastische Traglast
 - > Beispiele zur Berechnung der plastischen Formzahl

Theorie zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

- > Überblick zu Nachweisbereichen (Zeit-, Dauer-, Betriebsfestigkeit)
- > Gliederung des Nachweises
- > Konstruktionsfaktor
- > Mittelspannungseinfluss
- > Sicherheitskonzept

Beispielrechnung „Getriebegehäuse“ zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis

- > Auswahl der Nachweispunkte für manuelle Berechnung
 - > Ermittlung des Spannungsgradienten
 - > Programmgestützte Berechnung
- Vertiefung zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis
- > Stützwirkungskonzept
 - > Details zum Mittelspannungsfaktor
 - > Betriebsfestigkeitsfaktor
 - > Beispiel zum Betriebsfestigkeitsfaktor

Einführung in die Spannungskonzepte für die Schweißnahtbewertung

- > Nennspannungskonzept
- > Strukturspannungskonzept
- > Kerbspannungskonzept

- > Modellierung für Kerbspannungskonzept

Theorie Statischer Nachweis für geschweißte Bauteile

- > Spannungskomponenten
- > Werkstoffkennwerte
- > Temperatureinfluss
- > Konstruktionskennwerte
- > Sicherheiten
- > Nachweis

Beispiele zum statischen Nachweis geschweißter Bauteile

- > Strukturspannungsnachweis
- > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis

Theorie Ermüdungsnachweis für geschweißte Bauteile

- > Maßgebende Spannungskomponenten
 - > Werkstoffkennwerte (Temperaturkennwerte)
 - > Konstruktionskennwerte
 - > FAT-Klasse
 - > Mittelspannungseinfluss
 - > Betriebsfestigkeitskonzept
- Beispiele zum Ermüdungsnachweis geschweißter Bauteile
- > Strukturspannungsnachweis
 - > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis

Referent

Dipl.-Ing. (FH) Tim Kirchhoff, ist seit 2007 beim Ingenieurbüro Huß & Feickert im Bereich CAE-Simulation und Softwareentwicklung tätig. Als Teamleiter der Softwareentwicklung ist er verantwortlich für die Entwicklung von Programmen zum statischen und zyklischen Nachweis aufbauend auf FE-Analysen. Herr Kirchhoff arbeitet seit über 10 Jahren aktiv im Fachkreis Bauteilfestigkeit des VDMA zur Weiterentwicklung der FKM-Richtlinie mit. Zudem vertritt er das Ingenieurbüro Huß & Feickert als KMU im Redaktionskreis der FKM-Richtlinie und im Industriekreis des Fachkreises.

NAFEMS Schulung

Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

This non-linear Finite Element course is intended for delegates interested in using FE to analyse advanced non-linear problems involving material non-linearities, geometric non-linearities and contact problems.

The objectives of this Finite Element course are:

- To provide delegates with an introduction to the fundamental theory of non-linear Finite Element analysis.
- To highlight the possible difficulties that may be encountered in using FE software to analyse non-linear problems.

Who Should Attend

This non-linear FE course is aimed at engineers and scientists who want to gain an understanding of the fundamental theory of non-linear Finite Element analysis and its application to practical problems.

As this is an advanced FE course, a pre-requisite for this course is a reasonable knowledge of linear FE theory and applications. However, no prior knowledge of non-linear Finite Element theory is required. The course is independent of any FE software code.

Technical Content

- Brief Overview of Linear Finite Element analysis:
A brief overview of linear Finite Element formulation, numerical algorithms, etc. to provide a foundation for the non-linear formulation.
- General Introduction to Non-linear problems:
Classifications of non-linear problems, Comparison of linear and non-linear FE analysis, Non-linear algorithms and pro-

cedures, Difficulties in modelling non-linear problems.

- Plasticity:
Basic plasticity theory, Uniaxial and multi-axial plasticity, Work hardening, FE treatment of plasticity, Solution strategy and accuracy, Discussion of typical practical plasticity applications.
- Creep and Visco-elasticity:
Basic theory of creep, Finite Element algorithms for creep problems and time marching, Explicit and implicit time integrations, Discussion of typical practical creep applications.
- Contact Problems:
Basic theory of contact mechanics, classification of contact configurations, Hertzian and non-Hertzian contact problems, FE contact algorithms, Penalty methods and Lagrange multipliers, Difficulties in modelling contact problems, Tips and guidelines, Discussion of practical contact problems.
- Geometric Non-linearity:
Basic theory of geometric non-linearity, GNL stress-strain definitions, FE algorithms for geometric non-linearities, Arc-length and line-search methods, Solution strategy and accuracy, Discussion of typical GNL problems.
- Brief introduction to other advanced Finite Element Applications:
A brief overview of Fracture Mechanics, Fatigue Analysis, Explicit FE codes, Buckling analysis.

Tutor

Dr. Gino Duffett has over 30 years of experience in CAE software development, training, industrial implementation and usage on an international level in various sectors, mostly automotive and renewable energy. Currently a Technology Project Manager focussing on innovative simulation driven design and automatic optimization.



Over his career Gino has taught numerical modelling up to university level, developed commercial courses and provided training for software users and university programmes on aspects such as metal forming, structural analysis, simulation process methodologies and optimization and has provided courses at Business schools on mathematical modelling, ERP and multi-cultural management.

Course Language

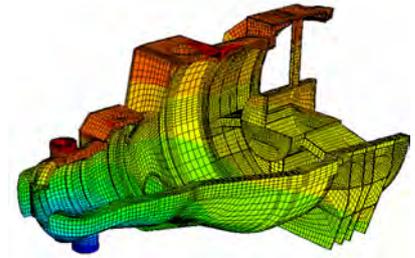
English

Inhouse-Kurs

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

NAFEMS Schulung

Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation



Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Die Schulung 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 Studienstunde 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



Prof. Dr.-Ing. Armin Huß verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Technischen Mechanik,

Technischen Schwingungslehre und der Anwendung der Finiten Elemente Methode, davon über 20 Jahre Praxis-Erfahrung als freiberuflicher Ingenieur für die Anwendung der FEM in den unterschiedlichsten Bereichen der Technik. Seit Mitte 2009 ist er als Professor für Technische Mechanik, Schwingungslehre und Finite Elemente an der Frankfurt University of Applied Sciences tätig.

Kurssprache

Deutsch

Inhouse-Kurs

Dieser Kurs wird als Inhouse-Kurs bei Ihnen vor Ort angeboten. Bitte fordern Sie nähere Informationen an - Rückmeldeformular auf der vorletzten Seite.

NAFEMS Schulung

Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

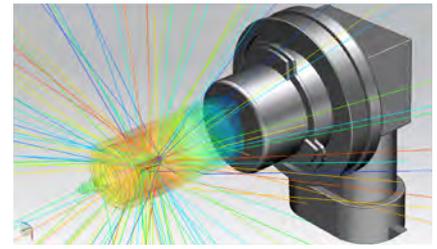
Die Schulung vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung (CFD). Neben der Funktionsweise von Programmen, die anhand zahlreicher einfacher Beispiele erläutert wird, steht die Vermittlung des gesamten Lösungsprozesses im Vordergrund. Mit Hilfe von 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



Referent



Prof. Dr.-Ing. Ganguolf Kohnen hat über 25 Jahre Erfahrung mit CAE-Anwendungen mit Schwerpunkten auf dem Gebiet

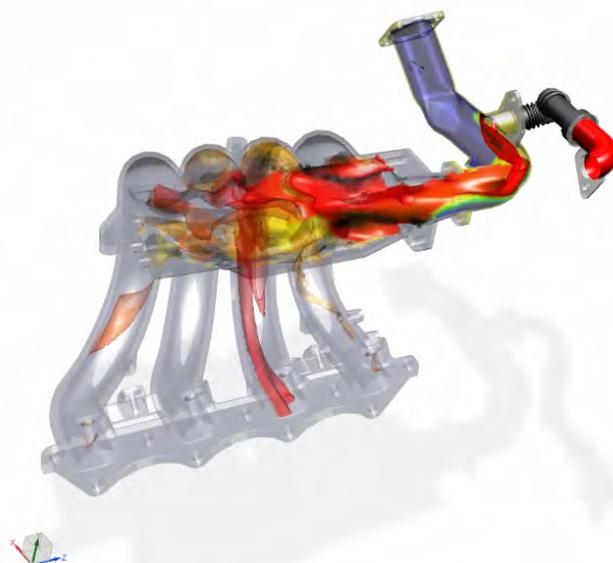
der Strömungsberechnung CFD in Lehre, Forschung und Industrie. Herr Kohnen leitet den Bereich Maschinenbau und Virtual Engineering an der Hochschule Baden-Württemberg Mosbach.

Kurssprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

Inhouse-Kurs

Dieser Kurs wird als Inhouse-Kurs bei Ihnen vor Ort angeboten. Bitte fordern Sie nähere Informationen an - Rückmeldeformular auf der vorletzten Seite.



NAFEMS Studierendenwettbewerb

NAFEMS Student Award 2020/2021

Abgabetermin: 28. Februar 2020

Auszeichnung für hervorragende studentische Arbeiten:
Berechnung und Simulation im Bereich der Ingenieurwissenschaften

1. Preis:

1.000 Euro ¹⁾ sowie die kostenlose Teilnahme mit Präsentation der Arbeit an der NAFEMS DACH Regionalkonferenz 2020 (www.nafems.org/dach20). Der Student Award wird in verschiedenen NAFEMS Regionen ausgeschrieben. Aus den Siegern der Regionen wird ein Gesamtsieger gewählt. Dieser nimmt dann kostenlos am NAFEMS World Congress 2021 teil und präsentiert die Arbeit einem internationalen Fachpublikum (www.nafems.org/congress).

2. Preis:

300 Euro ¹⁾

¹⁾ Preisgeld mit freundlicher Unterstützung der Mvoid Group (www.mvoid-group.com)

NAFEMS hat einen neuen Studierendenwettbewerb ins Leben gerufen, um begabte Studierende zu fördern und für eine weitere Tätigkeit auf dem Gebiet der Berechnung und Simulation im Bereich der Ingenieurwissenschaften zu motivieren. Damit wird gleichzeitig auch die Bedeutung der akademischen Institutionen für die Weiterentwicklung der numerischen Simulation in Lehre und Forschung gewürdigt. Die Auszeichnung richtet sich an Studierende, die Abschlussarbeiten (Bachelorarbeit, Masterarbeit, u. ä.) im Bereich Berechnung und Simulation (z. B. Strukturfestigkeit und -dynamik, Strömung, Optimierung, Elektromagnetismus, etc.) in einem Gebiet der Ingenieurwissenschaften angefertigt haben.

Teilnahmebedingungen

Senden Sie bitte zunächst eine Zusammenfassung Ihrer Arbeit (ca. 300 - 1000 Wörter) zusammen mit Ihren und den Kontaktdaten Ihres/Ihrer Betreuer/s zu. Die Einreichung muss in englischer Sprache im Textformat erfolgen. **Das Online-Formular zur Einreichung steht voraussichtlich ab Mitte Oktober 2019 unter www.nafems.org/professional-development zur Verfügung.**

- Die Einreichung muss den Regeln und Vorschriften für die Preisverleihung entsprechen.
- Die Zusammenfassung der Arbeit sollte Folgendes umfassen:
 - eine aussagekräftige Beschreibung der Zielstellung

- eine Beschreibung des verfolgten Ansatzes
- eine Beschreibung der Ergebnisse, einschließlich des gelösten Problems und einer Begründung der umgesetzten Simulationsstrategie.
- Die Zusammenfassung der Arbeit wird von unserer Jury für die Vorauswahl genutzt. Für die ausgewählten Arbeiten ist für die Preisverleihung die Vorlage der gesamten Arbeit erforderlich (vertrauliche Teile können entfernt bzw. geschwärzt werden).
- Die Arbeiten können insgesamt vertraulich behandelt werden – bitte dies ggf. unbedingt angeben!
- Die Frist für die Abgabe der Zusammenfassung endet am 28. Februar 2020

Regeln und Vorschriften

Teilnahmeberechtigung

- Die Nominierung steht allen Studierenden offen, die im Studienjahr 2019-2020 an einer Universität, Hochschule für angewandte Wissenschaften oder Berufsakademie in DACH eingeschrieben sind.
- Die eingereichte Arbeit sollte eine Einzelarbeit sein. Wenn die Arbeit Teil eines größeren, laufenden Projekts für eine Organisation ist, ist es für die Nominierung berechtigt, wenn sie wesentliche eigenständige Leistungen erbringt oder eine wesentliche Änderung/Erweiterung eines vorhandenen

Features des größeren Projekts darstellt. In diesem Fall muss der Studierende dies in der Zusammenstellung klarstellen und auch deutlich machen, welchen Beitrag er dazu geleistet hat.

- Die Arbeit muss vor dem 31.3.2020 abgeschlossen sein und in schriftlicher Form vorliegen.
- Die/der Betreuer bestätigen/t, dass der Studierende für das betreffende akademische Jahr an der angegebenen akademischen Einrichtung immatrikuliert ist.
- Die von der Jury Ausgewählten müssen auf Wunsch der Jury möglicherweise an einem Auswahlgespräch teilnehmen. Angemessene Reisekosten dafür werden erstattet.

Vergaberichtlinien

- Die eingereichte Arbeit muss in erheblichem Umfang technische Simulationstechnologien wie FEM, CFD, MKS, BEM, etc. verwenden.
- Die Zeitspanne seit der Fertigstellung der Arbeit darf ein Jahr nicht überschreiten.
- Kriterien zur Beurteilung der Arbeiten sind unter anderem das inhaltliche Niveau, der Innovationsgrad der Lösungswege, die Qualität der Darstellung der Arbeitsschritte/Ergebnisse, die Bedeutung und der Wert für das Projekt (Aufgabenstellung), etc.
- Einsendeschluss für die Arbeit ist der 31.3.2020.

Einladung

NAFEMS NORDIC Seminar: CAE in Support of Sustainability and Durability

25 - 26 November 2019, LEGO House - Home of the Brick, Billund, Denmark

The agenda will be published shortly, but there is still a chance to submit your presentation.
Please send a short abstract to info@nafems.de

We currently are experiencing an increased awareness of the impact on natural resources and our environment as a result of our way of consumption. There may be legal requirements that impose restrictions in the use of some materials as well as customers requiring that the products they buy are sustainable. As a result we see a trend where the choice of materials and production processes will be made with aspects of sustainability as important factors. CAE is for many companies a key tool in product development and can be expected to play an important role here as well.

In this seminar we are interested in contributions regarding how CAE is used product development with a particular focus on sustainability and durability. For example how simulation can be used to predict product behavior and expected life while shifting to new materials. In a slightly wider context we are also interested in how packaging is taken into consideration. Functional requirements may exist to ensure

that the product arrives to the end customer undamaged after which the packaging is usually recycled. The seminar includes keynotes, technical presentations, and exhibits.

Planned Conference format:

November 25th:

10:00 - 15:00 Presentations

15:00 - 16:00 Explore „LEGO Experience Zones“

16:00 - 19:00 Get together

November 26th:

8:30 - 15:30: Presentations

Seminar language

English

Venue

LEGO House A/S
Ole Kirks Plads 1, 7190 Billund,
Denmark

www.LEGOHouse.com

LEGO House - Home of the Brick. The building will allow LEGO fans of all ages to feel the magic of the LEGO universe and have the ultimate LEGO experience all year round.



LEGO House - Experience Zone

Exhibition/Sponsoring

The seminar will be accompanied by an exhibition of software and hardware vendors, solution providers, and consultants. There are several exhibition and sponsoring opportunities available. Please request further information.

Registration Fees

NAFEMS members: Free.

NAFEMS members can use seminar credits towards free attendance at this event. This event will charge four seminar credits per delegate.

Members without seminar credits: 3.500 DKK plus 25% Danish VAT

Non NAFEMS members: 5.000 DKK plus 25% Danish VAT

Students: Free. A limited number of students attend free of charge (first come, first serve – matriculation certificate required)

Presenters need to pay regular participation fees.

The registration fee includes conference attendance, proceedings, lunches, break refreshments and get together. Hotel accommodation is not included.



LEGO House - Home of the Brick

Informationen und Anmeldung

www.nafems.org/billund19

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.

Um die Aktivitäten von NAFEMS in den verschiedenen geografischen Regionen zu vertreten, neutral zu leiten und die nationalen Belange innerhalb der NAFEMS zu vertreten, wurden sogenannte regionale Steering Committees (Lenkungsausschüsse) gebildet.

Die Mitglieder des **NAFEMS Steering Committees für Deutschland, Österreich und Schweiz (DACH)** sind:

- W. Dirschmid (CAE Consulting), Chair
- A. Gill (Ansys Germany)
- G. Göß (Schaeffler Technologies)
- R. Helfrich (Intes)
- C. Hühne (DLR)
- C. Katz (Sofistik)
- F. Jurecka (Dassault Simulia)
- J. Krämer (Festo)
- R. Meske (Federal-Mogul Nürnberg)
- W. Moretti (Schindler Elevator)
- E. Niederauer (Siemens PLM Software)
- J. Noack (ZF Group)
- A. Pfaff (PDTEC)
- G. Rapin (Volkswagen)
- A. Starlinger (Stadler Altenrhein)
- A. J. Svobodnik (MVOID Technologies)
- E. Wang (Cadfem)
- D. Wu (IABG)
- M. Zehn (TU Berlin)
- M. Züger (pinPlus)

Zur Unterstützung des NAFEMS DACH Steering Committees im Bereich Computational Fluid Dynamics (CFD) wurde das **CFD Advisory Board (CAB)** gegründet.

Die Mitglieder sind:

- U. Janoske (Universität Wuppertal), Chair
- A. Avci (Festo)
- R. Banjac (Siemens PLM Software)
- W. Dirschmid (CAE Consulting)
- A. Gill (Ansys Germany)
- T. Grahs (Volkswagen)
- U. Heck (DHCAE)
- B. Hupertz (Ford)

- V. Kassera (CFD Consultants)
- J. Iseler (Dassault Systèmes)
- G. Kohnen (DHBW Mosbach)
- B. Marovic (Mentor Graphics (Deutschland))
- S. Rudolph (Cascade)
- R. Stauch (Hochschule Esslingen)
- M. Stephan (DHBW Mosbach)
- A. Stück (DLR)

Die technischen Bereiche bei NAFEMS werden durch spezialisierte **internationale Arbeitsgruppen (Working Groups)** koordiniert.

Folgende Gruppen sind aktuell bei NAFEMS aktiv:

- Business Impact
- Composites
- Computational Fluid Dynamics
- Computational Structural Mechanics
- Dynamics and Testing
- Education and Training
- Geotechnics
- High Performance Computing
- Manufacturing Process Simulation
- Multiphysics
- Optimisation
- Simulation Data Management
- Simulation Governance and Management
- Stochastics
- Systems Modeling & Simulation

Obgleich NAFEMS eine unabhängigen Organisation ist, arbeitet, ist eine Kooperation mit Hard- und Softwarehäusern essentiell. Um dies zu gewährleisten, wurde eine sogenannte **NAFEMS Vendor Group** gebildet, der derzeit etwa 30 Unternehmen angehören.

**Werden auch Sie
mit Ihrem Unternehmen
NAFEMS-Mitglied!**

NAFEMS hat weltweit über **1.400 Mitgliedsunternehmen und -Institutionen**.

Mitglieder erhalten unter anderem:

- Freie Seminarplätze
- Literatur und „Benchmark“ (FEM-Magazin)
- Ermäßigungen für Trainingskurse, Kongresse und Literatur
- Kostenlose Stellenanzeigen auf caejobsite.com
- Zugriff auf passwortgeschützten Webbereich mit Kontaktmöglichkeiten und Informationen
- Kontakt zu über 1.400 Organisationen weltweit

**Werden auch Sie Mitglied !
www.nafems.org/involved**

NAFEMS IS THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR THE ENGINEERING MODELLING, ANALYSIS AND SIMULATION COMMUNITY.

A not-for-profit organisation, our principal aims are to:

Improve the professional status of all persons engaged in the use of engineering simulation

Establish best practice in engineering simulation

Provide a focal point for the dissemination and exchange of information and knowledge relating to engineering simulation

Promote collaboration and communication

Act as an advocate for the deployment of simulation

Continuously improve the education and training in the use of simulation techniques

Be recognised as a valued independent authority that operates with neutrality and integrity

WE FOCUS ON THE PRACTICAL APPLICATION OF NUMERICAL ENGINEERING SIMULATION TECHNIQUES SUCH AS THE FINITE ELEMENT METHOD FOR STRUCTURAL ANALYSIS, COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS AND MULTIBODY SIMULATION.

Why Join?

More than 1300 companies worldwide are members of NAFEMS encompassing industrial practitioners, vendors and academic institutions.

Better Collaboration

BUILD LASTING BUSINESS ALLIANCES

NAFEMS events and participation in our various working groups provide outstanding opportunities to forge lasting professional contacts throughout the world of engineering simulation.

EXCHANGE KNOWLEDGE & EXPERIENCE

NAFEMS is the ultimate forum for exchange of knowledge and experience. Learn from companies who face the same challenges.

LEARN ABOUT THE RESOURCES AVAILABLE

The requirements of your organisation are unique. We can empower you with the knowledge you need to take the correct business-critical decisions on your requirements.

ENHANCE YOUR COMPANY'S VISIBILITY WORLDWIDE

NAFEMS is the only organisation that brings together the major software developers, manufacturers, consultancies, and academic institutions from across the globe. Ensure your organisation is visibly part of this global community.

Increased Productivity

OPTIMIZE THE DESIGN PROCESS

Learn about potential pitfalls and pick up time saving techniques.

MINIMISE COSTLY PHYSICAL TESTING

Increase confidence in your company's engineering simulation capabilities.

Improved Quality

BE COMMITTED TO THE HIGHEST STANDARDS

NAFEMS membership reinforces your focus on best practice.

BENCHMARK YOUR ORGANISATION'S SIMULATION PROCESS

Learn first-hand about experiences of other organisations similar to your own.

Enhanced Innovation

DEVELOP YOUR SKILLS WITH THE LATEST ENGINEERING SIMULATION TECHNIQUES

Your skills need to keep pace with the ever-advancing world of engineering simulation technology. NAFEMS is the only organisation dedicated to ensuring its members have access to the most advanced, sophisticated methods and thinking in the industry.

BE AT THE FOREFRONT

The competitive advantage provided by being at the cutting-edge of simulation technology is immeasurable. NAFEMS keeps you there.

PRODUCE BETTER-ENGINEERED PRODUCTS WITH ENHANCED CUSTOMER SATISFACTION

Customer satisfaction will always be key. NAFEMS provides you with the opportunity use the latest technology in the most efficient manner, ensuring your customers will always receive the most innovative and effective products possible.

Membership Levels

	Entry	Standard	Corporate Select	Corporate Global
	Ideal for small companies and consultancies, or smaller analysis teams. Also appropriate in areas without a NAFEMS Regional Group.	The perfect level of membership for medium-sized organisations who are looking to get maximum benefit from their involvement.	Tailored for companies who need to share the benefits of membership across several teams and locations. Choose what you need, and where you need it.	Meeting the needs of large multi-national organisations. Covers every employee at every site in your organisation. A truly all-encompassing membership option.
Sites Covered	single site	single site	multiple named sites	all sites globally
Copies of new NAFEMS Publications	1	1	multiple	multiple
Copies of Benchmark Magazine	1	3	multiple	multiple
Reduced Rates on NAFEMS Training	4	4	4	4
Discounted Attendance at all NAFEMS Events	4	4	4	4
Preferential Sponsorship rates at NAFEMS Events	4	4	4	4
Access to the PSE Competency Tracker	4	4	4	4
Discounted PSE Certification for all employees	4	4	4	4
Access to the NAFEMS Resource Centre	4	4	4	4
Members-Only Area of the NAFEMS Website	4	4	4	4
Participate in our Technical Working Groups	4	4	4	4
Use of the NAFEMS Member Logo on your Website	4	4	4	4
Free Places at NAFEMS Seminars and Conferences	0	up to 4	multiple	multiple
Company Details, Description and Links on nafems.org	8	4	4	4
Post your Press Releases and News on nafems.org	8	4	4	4
Promotion of your Events on nafems.org	8	4	4	4

THERE IS A 1 YEAR MINIMUM TERM FOR ALL MEMBERSHIPS. SIGNIFICANT DISCOUNTS ARE AVAILABLE ON LONGER TERMS. ACADEMIC INSTITUTIONS CAN TAKE ADVANTAGE OF THE BENEFITS OF OUR STANDARD MEMBERSHIP FOR THE PRICE OF ENTRY. CONTACT THE TEAM FOR FURTHER DETAILS.

Technical Working Groups

The basis of all of NAFEMS activities are co-ordinated by a number of specialist working groups, drawn primarily from our international membership. These working groups identify areas of interest to the engineering simulation community requiring the development of educational materials based on membership surveys and the committee's extensive experience.

An important feature of the publications which are subsequently produced is that each text undergoes a rigorous examination and critique by the experts sitting on the NAFEMS technical working groups which commissioned the work. These working groups draw together a potent blend of leading academic researchers, engineering practitioners and software vendors giving a unique insight and perspective into the problem area being scrutinized.

From time to time, some groups are formed on a short-term basis to address specific issues with experts drawn from the most appropriate technical areas for the duration of the project.

Technical working groups currently include:

- Analysis Management
- Composites
- Computational Fluid Dynamics
- Computational Structural Mechanics
- Dynamics and Testing
- Education and Training
- Geotechnics
- High Performance Computing

- Manufacturing Process Simulation
- Multi Body Dynamics
- Multiphysics
- Optimisation
- Simulation Data Management
- Stochastics
- Systems Modeling & Simulation

Nafems Events

NAFEMS provides our members with as many as fifty seminars, courses, workshops and open forums throughout the world each year. As the only truly independent organisation dedicated to engineering simulation, NAFEMS' events encompass the broadest and most accurate view of the technology.

World Congress

As the only truly independent, international event dedicated to engineering simulation, the biennial NAFEMS World Congress has been a fixture on the calendar of everyone involved in FEA, CFD, MBS and CAE for the last three decades. The last Congress welcomed over 600 attendees, all of whom were keenly focussed on analysis and simulation. The Congress is undoubtedly one of the most prestigious and highly focussed simulation and analysis forums available to the community, and is held in highest regard by users, software vendors and academics alike.

Conferences

Throughout the year, NAFEMS holds a number of conferences including dedicated regional and technology-specific events across the globe.

Seminar

Several seminars take place every year, focussing on current topics of interest, as well as emerging technology areas.

Webinars

NAFEMS members benefit from free places* at many of our seminars as part of membership. Our members also receive significant discounts on our World Congress and Training.

NAFEMS MEMBERS BENEFIT FROM SEMINAR CREDITS ENABLING MANY OF OUR EVENTS TO BE ATTENDED COMPLETELY INCLUSIVE OF MEMBERSHIP. MEMBERS ALSO RECEIVE SIGNIFICANT DISCOUNTS ON OUR WORLD CONGRESS AND TRAINING.

PSE

PSE (Professional Simulation Engineer) Certification allows engineers and analysts within the international simulation community to demonstrate competencies acquired throughout their professional career. Independently assessed by NAFEMS, the international association of the engineering analysis, modelling and simulation community, the certification enables individuals to gain recognition for their level of competency and experience as well as enabling industry to identify suitable and qualified personnel.

The Certification incorporates an extensive range of competencies across various analysis types. It is multi-level, supporting the philosophy of lifelong learning and continuous professional development. PSE Certification is suitable for both experienced engineers/analysts and those in the early stages of their professional career.

Providing a standard of competency for the international simulation community, successful applicants receive recognition as a Professional Simulation Engineer (PSE) at Entry, Standard or Advanced Level. As competencies are developed, PSEs will advance to the next level.



THE PSE CERTIFICATION STANDARD

PSE Certification is based on the simple concept that the 'Professional Simulation Engineer' certificate is achieved by an independent assessment of workplace competency.

The Certification requires the accumulation of competency in workplace experience in the specification, planning, execution and interpretation of numerical analysis applied to design, simulation or product verification, and adequate performance in executing these functions to a high standard. It also requires competency of an appropriate level of underpinning theoretical knowledge and sufficient product knowledge to enable the analyst to understand the context, purpose and value of his/her analysis work.

PSE Certification targets both the experienced analyst and the newcomer to simulation. The experienced simulation engineer is required to present documented and attested evidence of academic and workplace competency to become certified. An appropriately qualified newcomer to simulation is expected to follow a structured training programme under the guidance of a suitably qualified Industrial Mentor.

PSE CERTIFICATION HAS BEEN DESIGNED TO:

- Recognise and record achievement by award of a formal certification following an independent assessment of workplace competency
- Assist companies in demonstrating the competency of staff to external organisations
- Promote best practice in engineering analysis
- Increase the pool of competent engineering analysts, thereby enhancing the competitiveness of industry
- Provide a standard of competency for the international simulation community

NAFEMS Training

CLASSROOM COURSES | E-LEARNING | IN-HOUSE TRAINING

NAFEMS wealth of experience within the analysis and simulation industry uniquely places us as a provider of quality and worthwhile training.

Dedicated to promoting the best use of simulation and analysis, NAFEMS training offers classroom based courses, e-learning and bespoke training solutions.

QUALITY

NAFEMS Training offers courses taught by some of the leading figures within the analysis community who are unrivalled in their experience and expertise. Our tutors are chosen on the basis of their knowledge and practice of the technology involved. All training focuses on practical applications as background theory. We have sought the best in the industry to be able to deliver this to our attendees. Additionally, every single course that we provide is fully accredited by NAFEMS to ensure the highest quality for our members.

FLEXIBILITY

As NAFEMS Training is dedicated to providing useful and needs driven learning, we also recognise that hectic schedules and budget requirements can often stand in the way of professional development. We have established a programme of training to meet the various needs of the community, from our short based classroom courses, to e-learning to our bespoke in-house training. Through these various options, we are confident that you will find a training solution that will not only meet your needs, but fits around your budget and workload.

VARIETY

NAFEMS Training offers a wide variety of courses to meet the various needs of our members. Covering both FEA and CFD, NAFEMS Training courses range from basic to advanced levels. We offer a variety of courses suitable for those relatively new to technology, those who wish to refresh previous knowledge, or for those who wishing to develop their knowledge further. We are committed to providing training that is of real value to the end user so we constantly update our courses and add new courses to reflect the needs of our members.

NAFEMS MEMBERS RECEIVE AN EXCLUSIVE 30% DISCOUNT ON ALL COURSES OFFERED BY NAFEMS TRAINING TO FACILITATE THEIR PROFESSIONAL DEVELOPMENT AND ENSURE THEIR SKILLS ARE EVOLVING WITH INDUSTRY NEEDS.

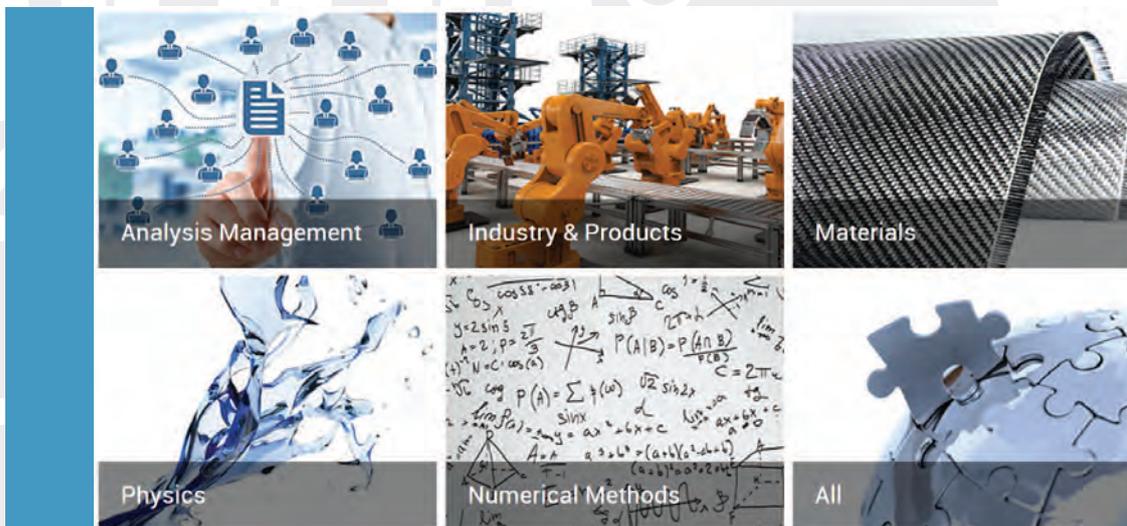
Resource Centre

The NAFEMS Resource Centre is a database which aims to collate all of the information produced by the organisation into one central, accessible location.

It's been put together by collating, categorising and tagging hundreds of presentations, books, webinar recordings, magazine articles, journals and much more. Over the past 35 years, we've gathered a wealth of information on engineering analysis, modelling and simulation. The resource centre provides our members with easy access to this valuable material.

It's simple to use. Relevant material can be found by searching by keyword, filtering by multilevel technical categories or filtering by author, organisation, or type of resource

There are currently over 1,500 resources in the centre with this number growing weekly. NAFEMS Members have access to numerous types of resource as part of their membership, including presentations from previous events, conference papers, webinar archives, and much more.



Nafems Publications

AS THE ONLY ASSOCIATION DEDICATED TO THE ENGINEERING MODELLING, ANALYSIS AND SIMULATION COMMUNITY, NAFEMS HAS PUBLISHED IN EXCESS OF 200 ANALYSIS AND SIMULATION SPECIFIC PUBLICATIONS OVER THE LAST 30 YEARS. NAFEMS IS WIDELY ACKNOWLEDGED AS THE PREMIER SOURCE FOR ANALYSIS AND SIMULATION INFORMATION, PRODUCING AN EXTENSIVE RANGE OF QUALITY AND VALUABLE PUBLICATIONS.

EVERY YEAR, NAFEMS PRODUCES APPROXIMATELY 8-10 PUBLICATIONS INCLUDING TEXTBOOKS, REPORTS, BENCHMARKS AND JOURNALS ENSURING THAT THE MOST UP-TO-DATE AND RELEVANT INFORMATION IS AVAILABLE TO OUR NAFEMS MEMBERS.

BENCH MARK

eLibrary

Published quarterly by NAFEMS, benchmark has commanded respect for being the only truly independent publication focussed specifically on analysis and simulation. With content encompassing news from all areas of engineering simulation from across the globe, articles in benchmark cover everything from FEA to CFD and incorporate all industries from aerospace to biomedical engineering.

Available to NAFEMS members, an optional e-Library subscription gives access to downloadable copies of over 150 acclaimed NAFEMS publications; including the newest releases. Updated regularly, the Corporate e-Library allows any of the available NAFEMS publications to be downloaded instantly as a PDF – ensuring that the information you need is available when you need it.

WHEN MEMBERS JOIN, THEY RECEIVE A LIBRARY OF 20 OF THEIR CHOSEN NAFEMS PUBLICATIONS. ALL NEW PUBLICATIONS ARE SENT TO MEMBERS AS AND WHEN THEY ARE PRODUCED. THEY ALSO RECEIVE COPIES OF BENCHMARK MAGAZINE EVERY QUARTER.

Internationales NAFEMS Magazin

Benchmark Magazin, Ausgabe Juli 2019

Die internationale NAFEMS Zeitschrift „Benchmark“ erschien in der Druckauflage zuletzt im Juli 2019. Download für Mitglieder und Abonnenten sowie Informationen zum Abonnement finden Sie unter:

www.nafems.org/publications/benchmark

BENCH MARK

July 2019 issue . . .

- The Application of Finite Element Based Limit Load Analysis
- Modeling Self-loosening in Bolted Joints
- Modelling of Bones
- FEA Puzzler: How Confident Are You?
- Exploring the Design Freedom of Additive Manufacturing through Simulation
- Predicting the Behaviour of Reactor Core Components
- How to Model and Assess Welded Structures with Finite Element Analysis
- FEA Based General 3D Crack Propagation Simulation
- The Evolution of Structural Integrity Assessment via FEA
- What is Simulation Governance and Management?
- ML for AM
- Weathering Simulation Challenges
- Excel for Engineers and other STEM Professionals

THE INTERNATIONAL MAGAZINE FOR ENGINEERING DESIGNERS & ANALYSTS FROM **NAFEMS**





VMAP

Interoperability of Engineering Data within Integrated CAE Workflows

- a defined international standard
- integrated import/export and translation tools
- supported by leading software vendors

The VMAP standard and import/export interface tools will provide users with a vendor-neutral methodology of transferring material and engineering data between different CAE software along the whole simulation process chain.

The VMAP project will be demonstrated by different manufacturing use cases:

- extrusion blow moulding (Rikutec)
- composite light weight vehicles (AUDI)
- injection moulding (Bosch)
- hybrid modelling of consumer products (Philips)
- composite component in aerospace (Convergent)
- additive manufacturing (Bosch)

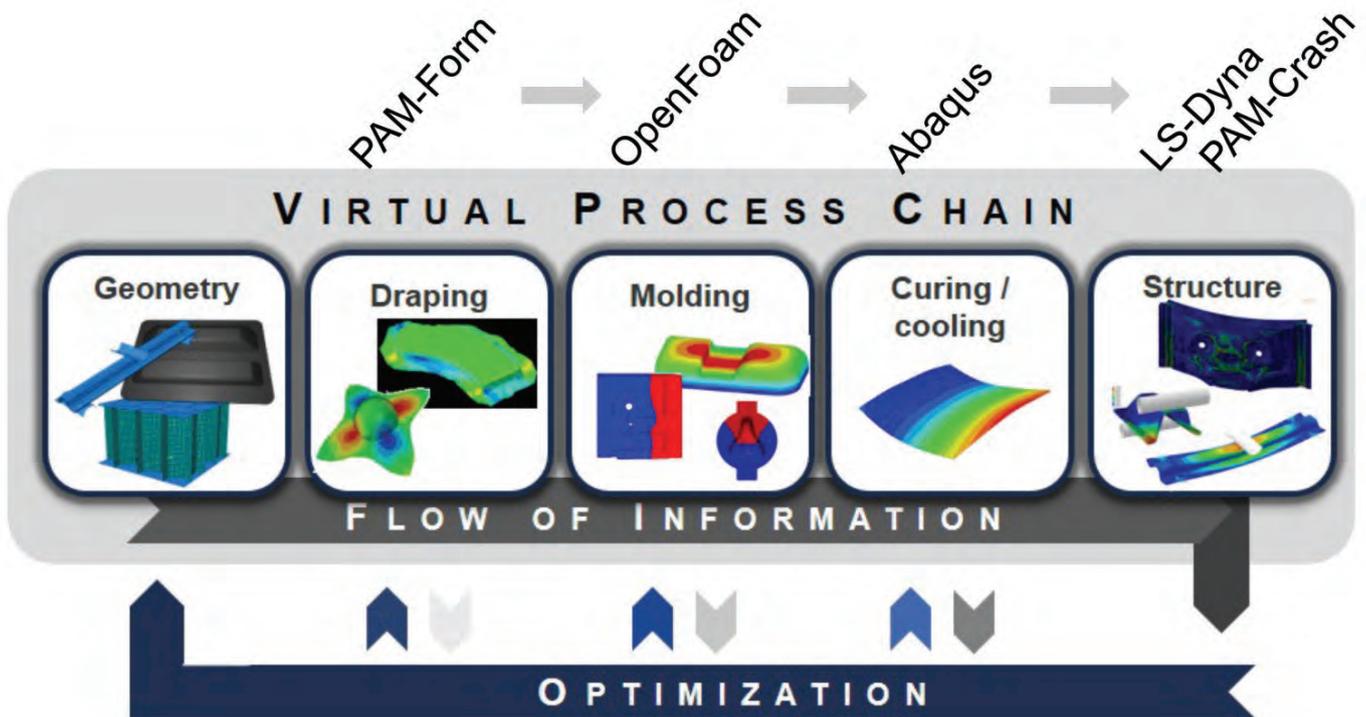
VMAP has already been directly integrated into CAE tools like MSC-Marc, MSC-Nastran, CadMould, PAM-RTM, PAM-Crash, Open-FOAM, COMPRO and RAVEN as well as independent/neutral translation tools like envyo that supports the LS-DYNA suite, Digimat, FiberMap, MpCCI and the ANSA pre-processor.

The VMAP project objectives are endorsed by Audi, Bosch, EDAG, Rikutec and Philips.



Use Case Example – Composite Lightweight Vehicle (AUDI)

Codes integrated in this workflow are: PAM-Form (draping), OpenFOAM (moulding), Abaqus (curing and cooling) and LS-Dyna resp. PAM-Crash (structural analysis).



Kärger, L.; Bernath, A.; Fritz, F.; Galkin, S.; Magagnato, D.; Oeckerath, A.; Schön, A.; Henning, F.
Development and validation of a CAE chain for unidirectional fibre reinforced composite components.
Composite Structures 132: 350–358, 2015. dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.05.047

VMAP Standards Community

The VMAP Standards Community has been established to drive the standards and software development effort during and after the initial project. We have held 2 web-meetings already but on 23 November 2019 we will hold a face-to-face meeting in Frankfurt, Germany.

We are open to all experts and entities who require successful VMAP standards and tools so please contact us without delay vmap.eu.com/community

Complex workflow?

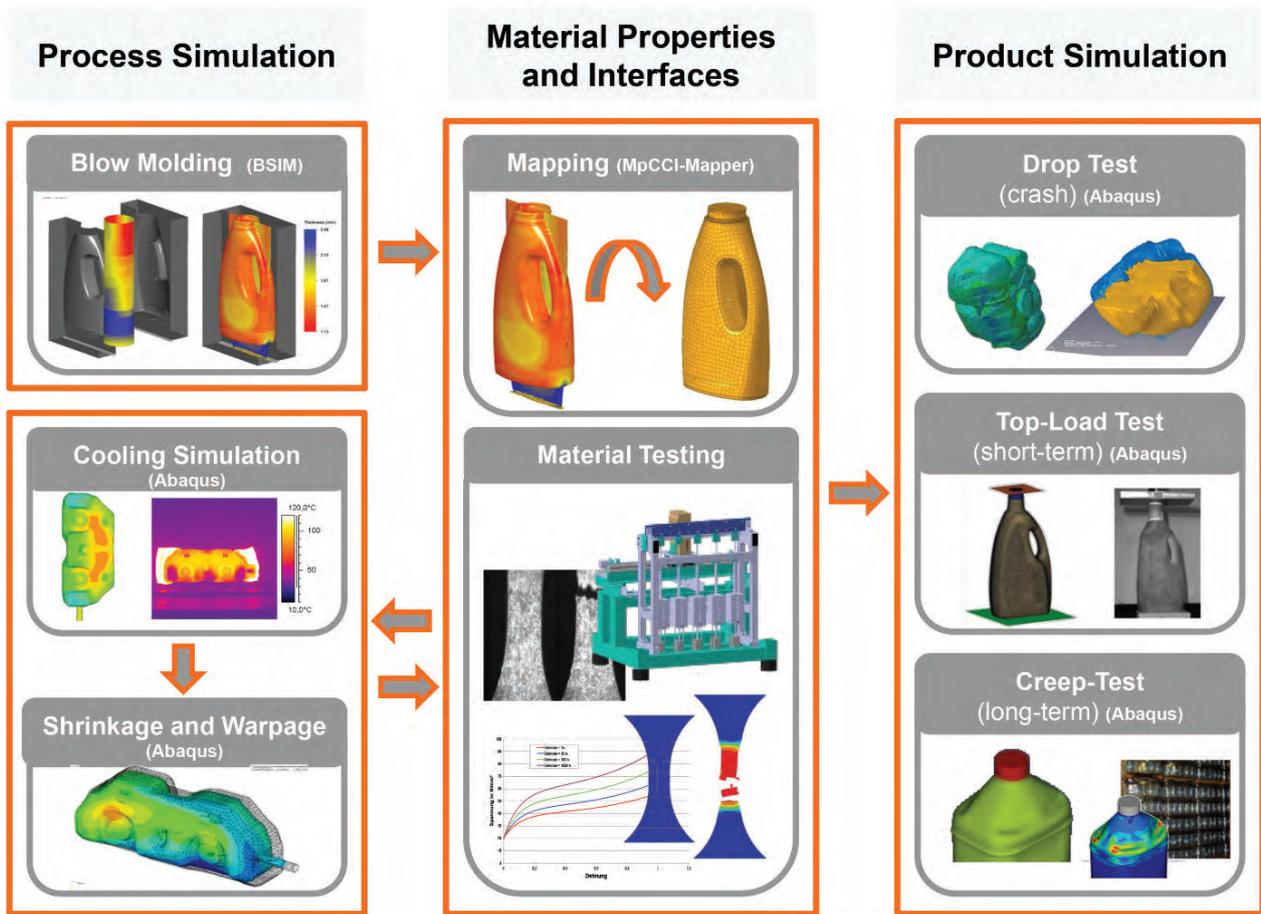
Difficult material data transfer?

The more simulation processes we look at the better the VMAP Standard will be in a shorter period. Please contact us if you would like us to examine your process and consider it in our work.

info@vmap.eu.com | www.vmap.eu.com

Use Case Example – Extrusion Blow Moulding (Rikutec)

Codes integrated in this workflow are: B-Sim (blow moulding), Abaqus (cooling & shrinkage), Abaqus resp. RADIOSS (structural performance and crash).



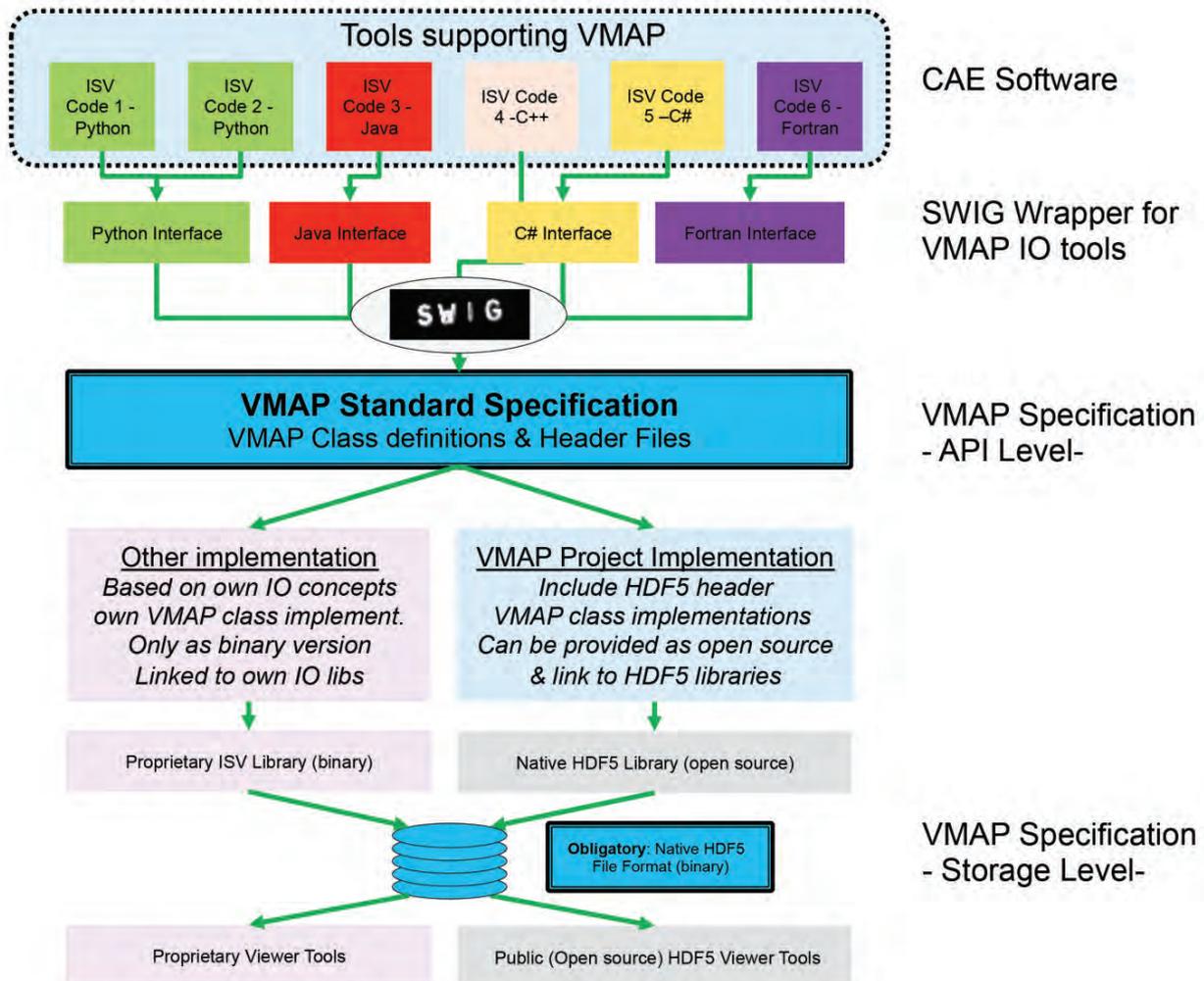
Help for Software Developers

To enable quick and efficient incorporation of the VMAP standards into any CAE software VMAP will provide a set of Input/Output software tools to write/read directly with the VMAP standard database implemented on top of [HDF5 hdfgroup.org/solutions/hdf5/](https://www.hdfgroup.org/solutions/hdf5/)

These tools will be placed in a **SWIG wrapper swig.org** that will enable CAE software written in any programming language to directly call the VMAP IO tools.

Alternatively, Independent Software Vendors may create their own IO routines for direct and efficient reading/writing to the HDF5 VMAP standard database.

Included in the tools provided for developers will be a series of small test cases that can be used to check the functionality of any implementation.



The project “VMAP: A new Interface Standard for Integrated Virtual Material Modelling in Manufacturing Industry” is organised via the [ITEA programme itea3.org/project/vmap.html](http://itea3.org/project/vmap.html) - project period is from October 2017 to September 2020.

- The Austrian part of the joint project is funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG - Project 864080).
- The Belgian part of the joint project is funded by the companies partaking.
- The Canadian part of the joint project is funded by the Scientific Research and Development Tax Credit Program (SR&ED)
- The German part of the joint project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF – Project 01|S17025 A – K).
- The Netherlands part of the joint project is funded by the Netherlands Enterprise Agency.
- The Swiss part of the joint project is funded by the companies partaking.

ITEA is the EUREKA Cluster programme supporting innovative, industry-driven, pre-competitive R&D projects in the area of Software-intensive Systems & Services (SiSS). ITEA stimulates projects in an open community of large industry, SMEs, universities, research institutes and user organisations.

ITEA is a EUREKA Cluster, the community is founded in Europe based on the EUREKA principles and is open to participants worldwide. itea3.org

ALTAIR**Altair ernennt Andrea Siudara zur neuen globalen IT-Leiterin (CIO)**

Altair, ein weltweit agierendes Technologieunternehmen, das Software- und Cloud-Lösungen für die Bereiche Produktentwicklung, High-Performance Computing (HPC) und Data Intelligence anbietet, hat bekannt gegeben, dass Andrea Siudara als Chief Information Officer in das Unternehmen eingetreten ist. Siudara wird Altairs globales IT Team leiten und in dieser Position Altairs IT Systeme, seine Unternehmens- und Verwaltungssysteme sowie die IT Unternehmensstrategie weltweit verantworten. Darüber hinaus wird sie als Mitglied des Altair Führungsteams die strategischen Unternehmensinitiativen unterstützen. Siudara bringt nahezu 20 Jahre Erfahrung in der Leitung von großen, internationalen IT Organisationen namhafter Unternehmen mit. Bis vor Kurzem war sie Global Director Sales and Marketing IT bei der Ford Motor Company. Davor hatte sie Führungspositionen bei Delphi, Dell und General Motors inne.

Altair fügt virtuelle Crashtest Dummy-Modelle hinzu

Altair, ein weltweit agierendes Technologieunternehmen, das Software- und Cloud-Lösungen für die Bereiche Produktentwicklung, High-Performance Computing (HPC) und Data Intelligence anbietet, hat die Erweiterung der Altair Partner Alliance (APA) um Finite Elemente (FE) Dummy-Modelle von Humanetics angekündigt. Die APA bietet Altair Kunden on-demand Zugriff auf ein breites Spektrum an Softwareanwendungen von über 50 Unternehmen. APA Nutzer können so aus einer zentralen Quelle eine Vielzahl an Softwarewerkzeugen nutzen, die ihnen dabei helfen, ihre Produkteinführungszeiten zu verkürzen, intelligentere Designs zu entwerfen sowie fundierte Entscheidungen früher zu treffen.

www.altair.com

ANSYS**Ansys kauft LSTC (LS-DYNA)**

- siehe auch DYNAMore/LSTC - Vor Kurzem wurde bekannt gegeben, dass LSTC an Ansys verkauft wird. Der Kauf soll in Q4 2019 abgeschlossen werden. LS-DYNA ist bereits seit über 25 Jahren als Modul von Ansys verfügbar ist. Beide Firmen arbeiten seit Jahrzehnten erfolgreich zusammen. Durch den Kauf ist die langfristige Entwicklung und Pflege von LS-DYNA gewährleistet. Mehr Information wird in Kürze folgen.

www.ansys.com

APTIV**Führende Unternehmen aus dem Automobil- und Mobilitätsbereich veröffentlichen erstmals Rahmenbedingungen zur Sicherheit von automatisierten Fahrzeugen SAE Level 3 und 4.**

Das "Safety First for Automated Driving" (SaFAD) "white paper" betont die Wichtigkeit von "safety by design" für automatisierte Fahrzeuge. Elf führende Unternehmen aus der Automobilbranche bzw. dem Bereich automatisiertes Fahren haben heute das Dokument „Safety First for Automated Driving“, (SaFAD) veröffentlicht. Das Dokument stellt den Rahmen für Entwicklung, Test und Validierung von sicheren, automatisierten Personenkraftfahrzeugen dar.

Diese 11 führenden Unternehmen: Aptiv, Audi, Baidu, BMW, Continental, Daimler, Fiat Chrysler Automobiles, HERE, Infineon, Intel und Volkswagen repräsentieren einen weiten Bereich der Industrie, und haben heute den bisher umfassendsten Bericht zur Entwicklung, Test und Betrieb von sicheren automatisierten Fahrzeugen veröffentlicht.

Das Ziel des SaFAD white paper ist es zu betonen, wie wichtig „safety by design“ zusammen mit Verifizierung und Validierung ist, wenn es darum geht als Industrie einen Standard für das automatisierte Fahren zu schaffen.

Erstmals bietet SaFAD Entwicklern und Betreibern automatisierter Fahrzeuge ein System klarer Nachvollziehbarkeit, von der grundsätzlichen Anforderung „sicherer als er durchschnittliche Fahrer“ bis zu den im Fahrzeug und Backend verwendeten Komponenten wie zum Beispiel Kameras oder Lenksysteme.

Es stellt außerdem erstmals eine Zusammenfassung der „safety by design“, Verifizierungs- und Validierungs- Methoden von Level 3 und Level 4 nach SAE (J3016) automatisierten Fahrzeugen dar.

Die Grundlage des SaFAD white papers stellen die 12 Grundprinzipien dar, welche weiter verfeinert die Eigenschaften („capabilities“) automatisierter Fahrzeuge definieren. Die Komponenten im Fahrzeug und Backend („elements“) die diese „capabilities“ ermöglichen, werden durch eine generische Architektur vernetzt.

„Safety First for Automated Driving“ kombiniert die Expertise von Schlüsselunternehmen, indem Hersteller, Zulieferer und Unternehmen der Tech-Branche Sicherheitsmethoden des Gesamtsystems automatisierter Fahrzeuge zusammenfassen.

Das Interesse an, und die Entwicklung von Technologien zum automatisierten Fahren hat in den vergangenen Jahren dramatisch zugenommen – getrieben von dem Ziel die Anzahl schweren Unfälle im Straßenverkehr zu reduzieren, den Verkehrsfluss zu optimieren, sowie der Einführung neuer Mobilitätskonzepte. Dieses schnelle Wachstum bringt eine große Bandbreite an Entwicklungsmethoden von etablierten Unternehmen und der wachsenden Zahl neuer Unternehmen.

Nach der Veröffentlichung von „Safety First for Automated Driving,“ werden Autoren und Experten der beteiligten Partner, das Ergebnis der gemeinsamen Arbeit bei Industrie – und Tech-Konferenzen weltweit während der nächsten Monate vorstellen.

www.aptiv.com

ARAS

Neu: Requirements Engineering auf der Aras-Plattform verfügbar

Aras, Anbieter einer leistungsfähigen Plattform für Industrieanwendungen, bietet ab sofort eine Applikation für das Requirements Engineering an. Diese neue Lösung läuft integriert und ergänzend zu anderen Anwendungen auf der Aras PLM-Plattform. Die Komplexität von Produkten und Systemen im Industrieumfeld nimmt weiter zu, ebenso die Anzahl an regulatorischen Vorgaben. Dadurch steigt der Bedarf an Technologien für ein effizientes Anforderungsmanagement. In diesem Zusammenhang müssen Unternehmen in der Lage sein, die Gesamtheit aller Produktkonfigurationen in jedem Abschnitt des Lebenszyklus abzubilden. Allerdings haben viele Unternehmen Probleme mit der digitalen Transformation. Der Grund: Sie arbeiten mit verschiedensten separaten Tools für das Anforderungsmanagement und starren Dokumentenblöcken. Doch eigentlich benötigen sie eine moderne Technologie, um Markteinführungen zu beschleunigen. Damit lassen sich verwandte Designartefakte unter verschiedenen Anforderungsarten zurückverfolgen. Die dazugehörigen Konfigurationen werden dabei auf einer zentralen Plattform verwaltet. Aras Requirements Engineering ermöglicht eine lückenlose Rückverfolgbarkeit innerhalb komplexer Produktkonfigurationen. Diese Funktionalität erstreckt sich auf verschiedene Designdomänen. Die dazugehörigen Anforderungsinhalte umfassen verschiedene Arten von strukturierten und wiederverwendbaren Elementen. Darüber hinaus können Beziehungen zwischen plattformgesteuerten Elementen und Strukturen aus allen Engineering-Domänen zu den Anforderungen erstellt und verwaltet werden. Mit Aras Requirements Engineering sind Unternehmen in der Lage, Anforderungselemente und -inhalte in unterschiedlichen Zusammenstellungen wiederzuverwenden. Zusätzlich ermöglicht die Lösung eine bidirektionale Rückverfolgbarkeit

zwischen individuellen Anforderungen und verschiedenen Designartefakten über alle Designbereiche und Designreifeheitsgrade hinweg.

„Isoliertes Anforderungsmanagement mit starren Dokumentenblöcken führt in eine Sackgasse. So erhalten Unternehmen keine echten rückverfolgbaren Daten oder Prozesse, die ein effizientes Arbeiten ermöglichen würden. Firmen benötigen aber genau solche Abläufe, wenn sie komplexe Produkte und Systeme entwickeln wollen“, sagt Andreas Müller, Senior Vice President EMEA bei Aras. „Mit der richtigen Technologie kommt man aus dieser Sackgasse wieder heraus.“

www.aras.com

BETA CAE Systems

Neue Versionen

Beta CAE Systems veröffentlichte kürzlich die neue Version v20.0.0 ihrer Software Suites Serie ANSA/Epilysis/META v19.1.x. sowie die Version Spdrn v1.3.0.

www.beta-cae.com

CADFEM

Simulation optimiert die Auslegung von radialen Kreiselpumpenlaufrädern

Nationale und internationale Gesetze und Richtlinien schreiben verpflichtend die Reduktion des Energieverbrauchs vor. Folglich sind innovative Ansätze in der Produktentwicklung, mit denen dieses Ziel schnell erreichbar ist, heute mehr denn je gefragt.

Der Simulationsspezialist Cadfem hat deshalb einen benutzerfreundlichen Prozess zur Auslegung von Radiallaufrädern für Kreiselpumpen entwickelt. Die Grundlage der Methode bildet das inverse Design, bei dem ausgehend von den Betriebsdaten der Pumpe eine optimierte Geometrie ermittelt wird.

Somit können auch traditionell entwi-

ckelnde Unternehmen den Schritt in Richtung einer simulationsgestützten Entwicklung gehen, und zwar kostengünstig, einfach und mit dem bestehenden Entwicklungsteam.

In diesen Workflow zum schnellen und effizienten Entwurf von Radiallaufrädern für Kreiselpumpen wurde neben der Strömungsanalyse-Software Ansys CFD auch die Software TurboDesignSuite der Firma ADT (Advanced Design Technology) integriert. Anhand weniger Eckdaten zur Auslegung – wie etwa Drehzahl, Nabendurchmesser, Volumenstrom und Förderhöhe – können Kreiselpumpenlaufräder mit hohem Wirkungsgrad automatisiert entworfen werden.

Gleichzeitig wird auch die Auswirkung von Teil- oder Überlastzuständen sowie die Kavitationsneigung analysiert. Die in den Workflow integrierte 3D-Strömungssimulation sorgt für belastbare Ergebnisse. Da der von Cadfem definierte Auslegungsprozess eine umfassende Benutzerführung beinhaltet, wird eine schnelle und einfache Anwendung ohne lange Einarbeitungszeiten ermöglicht. Als Resultat erhält der Benutzer die optimierte CAD-Geometrie, Informationen zu Wirkungsgrad und zur Förderhöhe sowie eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Strömungssimulation.

Der systematische Einsatz numerischer Simulation kann entscheidend zur Entwicklung von effizienteren Pumpen beitragen. Außerdem sind weniger physikalische Prototypen erforderlich und kürzere Entwicklungszeiten sowie eine höhere Zuverlässigkeit des Produktes erreichbar. Dies führt zu deutlichen Kosteneinsparungen, sowohl im Entwicklungsprozess als auch während des Betriebs und bei den Gewährleistungskosten.

www.cadfem.de

COMSOL

Comsol ernennt das MTC zum Comsol Certified Consultant

Das MTC bietet Technologien und Werkzeuge, welche die Einführung innovativer Fertigungsprozesse in Großbritannien und darüber hinaus vorantreiben. Die Verwendung der Comsol Multiphysics Software ermöglicht es ihnen, hochpräzise virtuelle Modelle zu erstellen, um die Leistung von Prozessen für ihre Kunden vorherzusagen und zu optimieren. Als Comsol Certified Consultant kann MTC in Branchen wie Automobil, Luft- und Raumfahrt, Lebensmittel, Elektronik und Bauwesen expandieren, die die Multiphysik-Simulation in ihre Forschung und Entwicklung, Fertigung und Produktion integrieren müssen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, sowie ihre Kosten und Markteinführungszeiten zu reduzieren. Sie bieten Lösungen für Fertigungssysteme, Schulungen, kundenspezifische Softwareanwendungen und mehr. „Mit unserem fundierten Wissen und unserer Spezialisierung auf Simulationsprozesse für die additive Fertigung wird die Ernennung zum Comsol Certified Consultant es uns ermöglichen, einen breiteren Kundenkreis zu erreichen, so dass wir durch die Bereitstellung hochwertiger Simulations- und spezialisierter Schulungsmaterialien mehr Wirkung erzielen können“, sagte Borja Lazaro Toralles, MTC Technology Manager.

Das MTC soll ein Wettbewerbsumfeld schaffen, das die Lücke schließt zwischen der universitären Forschung und der Entwicklung innovativer Fertigungslösungen im Einklang mit der Fertigungsstrategie der britischen Regierung. Das MTC ist Teil des High Value Manufacturing Catapult, das von Innovate UK unterstützt wird.

Wen Zhang, Geschäftsführerin der Comsol Ltd. (Cambridge, Großbritannien), sagte: „Wir arbeiten seit einigen Jahren eng mit dem MTC-Team bei verschiedenen Projekten zusammen und freuen uns, dass sie in die Reihe der Comsol Certified Consultants in Großbritannien

aufgenommen wurden. Mit ihrer Expertise in der Entwicklung von Fertigungsprozessen sowie in der physikalischen Modellierung mit der Comsol Multiphysics Software sind wir zuversichtlich, dass diese Anerkennung unsere Zusammenarbeit weiter stärken wird und es dem MTC ermöglicht, qualitativ hochwertige Simulationsdienstleistungen in einer Vielzahl von Branchen anzubieten.“ Erfahren Sie mehr über das MTC: www.comsol.de/certified-consultants/the-manufacturing-technology-centre

Geschäftsführerwechsel bei der Comsol Multiphysics GmbH

Dr. Thorsten Koch ist seit dem 01.07.2019 alleiniger Geschäftsführer der Comsol Multiphysics GmbH in Göttingen. Damit endet eine etwa anderthalbjährige Übergangszeit, in der Herr Koch und Herr Gerard Hegemans das Unternehmen gemeinsam geführt haben. Hegemans wechselt in den Aufsichtsrat und wird zukünftig beratend für die Europäischen Comsol-Büros tätig sein.

Dr. Koch verfügt als Physiker und langjähriger leitender Mitarbeiter über viel Erfahrung in der Simulationsbranche. Er freut sich über die übernommene Verantwortung und will die positive Geschäftsentwicklung in Deutschland und Österreich mit hervorragendem Service weiter vorantreiben.

Die verantwortungsvolle Herausforderung beschreibt Koch für ihn als besonders reizvoll: „Die Simulationswelt befindet sich durch die rasant voranschreitende Digitalisierung in einer Aufbruchsstimmung. Durch unsere innovativen Produkte kann heute jeder simulieren, nicht nur Experten. Ich freue mich, gemeinsam mit meinem Team zukunftsorientierte Lösungen für unsere Kunden bereitstellen zu können.“

www.comsol.com

DYNAMORE

Ansys kauft LSTC (LS-DYNA)

- siehe auch Ansys -

Vor Kurzem wurde bekannt gegeben, dass LSTC an Ansys verkauft wird. Der Kauf soll in Q4 2019 abgeschlossen werden. LSTC hat versichert, dass sich für Dynamore und auch für die Kunden wenig ändern wird. Verträge mit Dynamore betreffend Distribution und Entwicklung wurden langfristig verlängert. Ergänzend sei noch erwähnt, dass LS-DYNA bereits seit über 25 Jahren als Modul von Ansys verfügbar ist. Beide Firmen arbeiten seit Jahrzehnten erfolgreich zusammen. Durch den Kauf ist die langfristige Entwicklung und Pflege von LS-DYNA gewährleistet.

12. Europäische LS-DYNA Konferenz 2019: ein großer Erfolg

200 Vorträge in 8 parallelen Sessions, 8 Workshops und circa 500 Teilnehmer – beeindruckende Zahlen, die zeigen, dass die Europäische LS-DYNA Konferenz wieder ein großer Erfolg war. Veranstaltungsort war dieses Jahr die Rhein-Mosel-Halle in Koblenz, die mit ihrer Lage direkt am Rhein den perfekten Rahmen für eine gelungene Konferenz abgab.

Dass die Europäische LS-DYNA Konferenz kontinuierlich größer wird und sich wachsender Beliebtheit erfreut, belegt die steigende Zahl an Teilnehmern, Vortragenden, Ausstellern und Sponsoren. Erstmals wurden 200 Fachvorträge eingereicht, die das enorme Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten von LS-DYNA, LS-OPT sowie den dazugehörigen CAE-Prozessketten wieder eindrucksvoll unter Beweis gestellt haben.

Auch die beliebten Workshops, bei denen die Teilnehmer die Möglichkeit hatten, sich eingehend und fundiert mit speziellen Themen auseinanderzusetzen, standen erneut auf dem Programm. Abgerundet wurde die Konferenz von 12 Keynote-Präsentationen, bei denen hochklassige Vertreter aus Industrie und Forschung Einblicke in ihre Arbeiten gewährten.

In der dazugehörigen Hard- und Softwareausstellung präsentierten über 30 Aussteller ihre Produkte und Dienstleistungen. Hier bot sich den Konferenzteilnehmern auch die Möglichkeit, über aktuelle Trends und Entwicklungen zu diskutieren und bei angeregten Gesprächen Kontakte zu knüpfen und zu pflegen. Der Dank von DYNAMore gilt allen Beteiligten, die mit ihrem Engagement zum Gelingen der Konferenz beigetragen haben. Es ist der Einsatz der Vortragenden, Session-Chairmen, Aussteller und Sponsoren, der zum Erfolg der Konferenz beiträgt und ohne den die Durchführung einer solchen Veranstaltung nicht möglich wäre.

Die Proceedings der Konferenz stehen ab sofort unter www.dynalook.com zum Download zur Verfügung. Die nächsten Veranstaltungen sind die 16. Internationale LS-DYNA Konferenz, die von 31. Mai bis 2. Juni 2020 in Detroit, USA stattfinden wird und das 16. Deutsche LS-DYNA Forum vom 7.-9. Oktober 2020 in Ulm. DYNAMore freut sich auf zahlreiche Einreichungen und viele Teilnehmer. Mehr Informationen und der Call for Papers in Kürze unter www.lstc.com oder www.dynamore.de.

www.dynamore.de

FLUIDON

Fluidon veröffentlicht neue Version DSHplus 3.10

Fluidon GmbH, der erfahrene Dienstleister für Simulation und Analyse von fluidtechnisch-mechatronischen Systemen, hat heute die neue Version 3.10 seiner Simulationsumgebung DSHplus veröffentlicht. DSHplus Kunden mit Wartungsvertrag erhalten ab heute automatisch neue Lizenzschlüssel. Ebenso steht die neue Version im Downloadbereich der Fluidon Website zur Verfügung. Mit der neuen Version führt Fluidon ein neues Stoffdatenhandling ein, mit dem Anwender im Gegensatz zur bisherigen Lösung eigene Stoffdatenbeschreibungen hinterlegen können. Als neue Stoffeigenschaften

wurden außerdem der Bunsenkoeffizient (Maß für das Gaslösevermögen einer Flüssigkeit) und die Dampfdruckkurve hinzugefügt. Mit Kenntnis des Dampfdrucks und des Bunsenkoeffizienten können das druckabhängige Wachstum und der Transport von Dampf- und/oder Gasblasen in flüssigkeitsgefüllten Leitungssystemen abgebildet werden.

Von der verbesserten Modellierung profitiert vor allem die Simulation von Druckschwingungsproblemen und Druckstößen, da hierbei – abhängig vom Druckniveau – mit dem Auftreten von Gas- und/oder Dampf Kavitation zu rechnen ist. Die entsprechend erweiterten DSHplus-Leitungsmodelle wurden anhand publizierter Referenzexperimente validiert. Darüber hinaus können die praxiserprobten Leitungsmodelle von DSHplus mithilfe der ebenfalls neuen, zuschaltbaren Berücksichtigung von Fluid-Struktur-Interaktionen (FSI-Bibliothek) die mechanischen Auswirkungen von Druckschlägen bzw. Druckpulsationen auf Leitungskomponenten in der 1D-Hydrauliksimulation erfassen.

Mit der neuen Version wird außerdem der Functional Mock-up Interface (FMI) 2.0 Standard eingeführt, der damit die DSHplus-STC (Simulation-Tool-Chain) als Programmkopplung ablöst. Das FMI ist ein von den verwendeten Programmen unabhängiger Standard zur Unterstützung gekoppelter Simulationen, sowohl als Modellaustausch als auch in Co-Simulation.

www.fluidon.com

FUNCTION BAY

Neu: RecurDyn-on-Demand

FunctionBay GmbH freut sich bekanntzugeben, dass ab sofort die weltweit bekannte Software für dynamische Mehrkörpersimulation „RecurDyn“ nicht nur als Kauf-, oder Mietlizenz, sondern innerhalb von Europa auch als „RecurDyn-on-Demand“ angeboten wird. Zielanwender sind Firmen und Forschungs-

einrichtungen, die aufgrund ihres Entwicklungsschwerpunktes eher sporadisch ein High-End MKS – System zur Analyse von dynamisch bewegten Mechanismen einsetzen müssen und sich daher die Investition in einen Softwarekauf bzw. in eine längerfristige Mietlizenz aus finanzieller Hinsicht nicht lohnt. Grundsätzlich können aber auch bestehende RecurDyn – Anwender kurzfristig ihre Berechnungsmöglichkeiten bei erhöhtem Simulationsbedarf erweitern. RecurDyn-on-Demand wird sekundengenau abgerechnet, das bestehende und verbrauchte Kontingent wird automatisch angezeigt. Spezielle RecurDyn-on-Demand Schulungen werden zudem ab sofort jeden Monat zu einem Vorzugspreis angeboten. Weitere Informationen finden Sie unter: www.functionbay.org/recurdyn-on-demand.html

www.functionbay.org

INSTAL

Instal-News

Das Informations- und Expertenportal www.4innovative-engineers.com bietet interessante Informationen und einen regelmäßigen Newsletter. Schauen Sie mal vorbei.

www.4innovative-engineers.com

LSTC

Ansys kauft LSTC (LS-DYNA)

- siehe auch Ansys/DYNAMore - Vor Kurzem wurde bekannt gegeben, dass LSTC an Ansys verkauft wird. Der Kauf soll in Q4 2019 abgeschlossen werden. LS-DYNA ist bereits seit über 25 Jahren als Modul von Ansys verfügbar ist. Beide Firmen arbeiten seit Jahrzehnten erfolgreich zusammen. Durch den Kauf ist die langfristige Entwicklung und Pflege von LS-DYNA gewährleistet. Mehr Information wird in Kürze folgen.

www.lstc.com

The advertisement features a large 'e-LEARNING' title at the top. Below it is the NAFEMS logo. The central image shows a laptop on a sandy beach with a pair of sandals. The laptop screen displays a stress analysis simulation with a color-coded stress distribution. The text 'Learn Anytime, Anywhere.' is written in white on a red background at the bottom of the image.

MSC SOFTWARE

Airbus wählt MaterialCenter von MSC Software, um Entwicklungszeiten zu verkürzen

MSC Software (MSC), Anbieter von Simulationssoftware und Dienstleistungen, gibt bekannt, dass der führende Flugzeughersteller Airbus Group die Materialmanagement-Plattform MaterialCenter ausgewählt hat. Durch die Implementierung dieser durchgängigen Plattform als Teil der digitalen Transformation des Konzerns sollen die Entwicklungszeiten verkürzt werden. Airbus beabsichtigt, dass die Airbus Group und ihre Unternehmensbereiche auf ein und dieselbe Rohdatenbank für Werkstoffe zugreifen.

MaterialCenter bietet eine umfassende Lösung für die Verwaltung von Werkstoffdaten und –prozessen in der Luftfahrt. Entwickelt wurde das System als zentrale Anlaufstelle für alle werkstoffbezogenen Aktivitäten und die Organisation des gesamten Material-Workflows. MaterialCenter gewährleistet, dass Ingenieure in der Entwicklung eine einheitliche Quelle für zugelassene Werkstoffe ver-

wenden, die aus rückverfolgbaren integrierten Prozessen stammen. Dies führt zu höherer Simulationsgenauigkeit sowie geringerem Datenverlust. Langwierige manuelle Datenmanagement-Aktivitäten fallen weg.

MaterialCenter ist hoch skalierbar und perfekt geeignet für die hohe Anwenderzahl und die große Datenmenge, die Airbus bei der Entwicklung von metallischen und Verbundsystemen erzeugt und verwendet.

„Wir sind sehr stolz darauf, dass Airbus sich für MaterialCenter als globale, durchgängige Materialmanagement-Plattform entschieden hat. Wir freuen uns auf eine starke und langfristige Partnerschaft mit Airbus bei der konzernweiten Implementierung und Verwendung von MaterialCenter. So wird ein wirkungsvoller und effizienter Einsatz von Werkstoffen und Werkstoffdaten möglich, mit dem die innovative, hochwertige Produktentwicklung vorangetrieben wird“, sagt Roger A. Assaker, CEO von e-Xstream engineering und Chief Materials Strategist bei MSC Software.

MaterialCenter gehört zu der umfas-

senden 10x Materials Solution™; diese beinhaltet (virtuelle) Werkstoffentwicklung, (virtuelle) Werkstofftests, normale bis hochkomplexe (multiskalare) Materialmodellierung für alle gängigen Finite-Elemente-Programme, Fertigungseffekte (z.B. additive Fertigung, Automated Fiber Placement), Schädigungseffekte, digitale Kontinuität und materialbezogenen Digital Twin, künstliche Intelligenz, Regelkonformität und Nachhaltigkeit.

MSC Software und Cadlm bringen Künstliche Intelligenz in die CAE-Berechnung

MSC Software (MSC), Anbieter von Simulationssoftware und Dienstleistungen, erweitert seine Zusammenarbeit mit Cadlm. Beide Unternehmen wollen in einer strategischen Partnerschaft das innovative neue Softwarepaket Odyssee weiterentwickeln. Odyssee von Cadlm basiert auf maschinellem Lernen und führt parametrisches Design und Optimierung in Echtzeit durch. Die in Paris ansässige Firma Cadlm ist Vorreiter bei der Implementierung von künstlicher Intelligenz (KI) ins

CAE. MSC hat die Lösungen von CadIm global in sein Produktportfolio aufgenommen.

CadIm entwickelt prädiktive Echtzeitmodelle für die Designoptimierung anhand von CAE-Simulationen. Diese basieren auf Technologien zum maschinellen Lernen aus der Odyssee-Softwarepalette. Die Verbindung von Informationen aus CAE-Berechnungen mit mathematischen Modellen und Datamining bedeutet, dass hochkomplexe, stark nichtlineare Simulationsanwendungen wie Crash, transiente Dynamik und Strukturberechnung, CFD - aber auch Finanzwesen, Biomechanik und Rüstungsanwendungen - sehr rasch analysiert werden können.

Odyssee ist eine Plattform mit verschiedenen Möglichkeiten zum maschinellen Lernen, Datenbehandlung, Signalverarbeitung, Bildverarbeitung und -erkennung, Datenkomprimierung und -zusammenführung sowie System-Sensitivitätsanalysen. Die Funktionen werden durch Optimierung und Robustheitsindikatoren ergänzt. Die Software kann für FEM- oder CAD-Modelle genutzt werden und ist solverunabhängig. Das bedeutet, Odyssee kann mit vielen CAE-Lösungen von MSC ohne Aufwand gekoppelt und genutzt werden: vom Vorentwurf bis hin zur Optimierung und Robustheitsbewertung. Odyssee bietet eine beeindruckende Palette von Tools, welche den Entwicklern und Berechnern ein schnelles Feedback zu komplexen Design- und Optimierungsproblemen an die Hand geben. Dazu werden verschiedene Techniken eingesetzt: Lernen aus Daten, Prognosen sowie Optimierung von Designparametern; und all das in einer interaktiven Echtzeitumgebung. Die wichtigsten Module der Odyssee-Software sind:

- Engine zum maschinellen Lernen im Modul
- Optimierung und Robustheitsbewertung mit dem Modul NOVA
- Ordnungsreduzierte Modellbildung mit dem Modul Lunar

„Dem Team von CadIm lag viel daran, Odyssee mit einem etablierten, führenden CAE-Anbieter zusammenzubringen. Mithilfe der kompeten-

ten Vertriebs- und Supportorganisation von MSC werden wir den Einsatz der Odyssee-Technologie bei produzierenden Unternehmen vorantreiben, die den strategischen Schritt zu KI und Digital Twin machen wollen“, kommentiert Kambiz Kayvantash, CEO von CadIm, die Partnerschaft.

Kais Bouchiba, MSC Senior Vice President EMEA & Global A.I. / Machine Learning Strategist, ergänzt: „Wir haben CadIm wegen seiner bahnbrechenden Softwareplattform Odyssee ausgewählt, deren verschiedene Lösungen zum maschinellen Lernen zentrale Bedeutung in Echtzeit haben. Die Integration der KI-Technologie von CadIm mit den CAE-Tools von MSC ist für die Softwarelösungen beider Seiten eine Bereicherung und bringt neue Perspektiven - nicht nur in der CAE-basierten Strukturauslegung, sondern auch in digitalen Lösungen, die autonome, verbundene Systeme erzeugen. So wächst die echte mit der digitalen Welt zusammen, und in allen Prozessen ist eine Intelligenz eingebaut.“

www.mssoftware.com

PART ENGINEERING

Simulation fördert Innovationen PART Engineering gewinnt Kautex Innovationspreis 2018

Der Automobilzulieferer Kautex Textron, ansässig in Bonn, zeichnet PART Engineering mit dem Innovationspreis für das Jahr 2018 aus. Damit wird die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Simulationsspezialisten PART als Zulieferer für Struktursimulationen im Bereich der Kunststofftankentwicklung gewürdigt. Die beiden Unternehmen arbeiten hier bereits seit mehr als 15 Jahren zusammen. Im Bereich der numerischen Simulation von Tanksystemen umfassen die Dienstleistungen von PART u.a. die Festigkeits- und Deformationsanalyse. Sowohl statische als auch wechselnde Lasten unter

Berücksichtigung von Temperatur und Kraftstoffquellung können untersucht werden. Die langjährige Erfahrung des Dienstleisters in der Berechnung von Kraftstofftanks ist branchenbekannt. Eine besondere Kompetenz des Berechnungsanbieters ist die korrekte Erfassung des komplexen Werkstoffverhaltens von Kunststoffen in der Simulation. Hierdurch ist es möglich, bereits in frühen Phasen der Entwicklung Konzepte zu bewerten und faktenbasierte Go-/No-Go-Entscheidungen zu treffen. „Die Simulation wird von unseren Kunden zunehmend als strategisches Entwicklungswerkzeug erkannt. Dies eröffnet Innovationspotenziale in dem Sinne, dass die Simulation als Toolbox zur zielgerichteten Produktentwicklung verwendet wird. Vor dem Hintergrund der großen Umbrüche in der Autoindustrie, haben Unternehmen mit einer hohen Simulationskompetenz einen strategischen Vorteil.“, so PART Geschäftsführer Dr. Marcus Stojek.

www.partengineering.com

SCALE

BMBF-Förderung zur Entwicklung von intelligenten Assistenzsystemen für SDM-Produkte

Am 1. Oktober 2019 startet Scale gemeinsam mit den Partnern Sidact und dem Fraunhofer-Institut SCAI ein Forschungsprojekt zur „Virtuellen Produktentwicklung mittels intelligenter Assistenzsysteme“ (kurz: ViPriA). Das Projekt wird für die Dauer von drei Jahren vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Projektkoordinator für das Forschungsvorhaben ist Scale. Assoziierte Industriepartner sind AUDI, Porsche und Volkswagen.

Das Projekt hat die Entwicklung von intelligenten, d.h. auf Künstlicher Intelligenz (KI) und Machine Learning-Ansätzen (ML) basierenden Assistenzsystemen zur Unterstützung von Ingenieuren bei der simulationsbasierten, virtuellen Produktentwicklung zum Ziel. Mit Hilfe von

intelligenten Assistenzfunktionen sollen Berechnungsingenieure im Entwicklungsprozess bei komplexen Entscheidungen unterstützt und von Routineaufgaben entlastet werden. In der Praxis sollen Berechnungsingenieure in zwei wesentlichen Stufen des Entwicklungsprozesses unterstützt werden: (1) Zum einen durch die Entwicklung eines intelligenten Assistenzsystems, das dem Nutzer beim Erstellen einer numerischen Simulation Designvorschläge macht und Ergebnisprognosen bereitstellt. (2) Zum anderen durch die sukzessive Automatisierung der Analyse komplexer Simulationsergebnisse. Über nicht erwartetes Verhalten von Simulationen soll das System dem Nutzer Rückmeldungen geben. Die Analyse der Simulationsergebnisse beschränkt sich dabei nicht auf die Auswertung von skalaren Funktionsgrößen, sondern erkennt auch außergewöhnliches oder unerwünschtes Systemverhalten, das zudem visuell aufbereitet wird.

Kernprodukt von Scale ist ein SDM-System (Simulationsdatenmanagement) bestehend aus den Applikationen CAViT und LoCo. Das Management von Ergebnisdaten aus Versuch und Simulation erfolgt in CAViT, Simulationsmodelle sowie CAE-Prozesse werden in LoCo verwaltet. Die Applikationen sind bei mehreren deutschen Automobilherstellern im Einsatz.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden in die Entwicklung einer neuen, integrierten Produktgeneration einfließen und dem Anwender Zugriff auf neueste Technologien bei ihrer täglichen Arbeit geben. Martin Liebscher, Projektleiter von ViPriA bei Scale: „Der Einsatz von Künstlicher Intelligenz und Maschine Learning spielt im Automotive-Bereich und darüber hinaus eine immer größer werdende Rolle. Mit dem Forschungsvorhaben ViPriA wollen wir die Chance nutzen, die neue Produktgeneration mit innovativen und strategisch wichtigen Technologien auf den Weg zu bringen.“

Scale ist als Tochterunternehmen der DYNAmore Group mit Firmensitz in Ingolstadt auf technische

Entwicklungsdienstleistungen für den Fahrzeugbau spezialisiert. Das Dienstleistungsangebot umfasst insbesondere Softwareentwicklung für Prozess- und Datenmanagement sowie die Entwicklung von Finite-Elemente-Methoden und numerische Optimierung zur Funktionsauslegung von Fahrzeugkomponenten. Scale bietet Softwarelösungen und IT-Dienstleistungen für Prozess- und Datenmanagement in der Automobilindustrie und anderen Branchen. Als Tochtergesellschaft der DYNAmore hat Scale einen fundierten Background in CAE-Anwendungen und -Prozessen.

Der Erfolg unseres Unternehmens basiert auf der synergetischen Zusammenarbeit von CAE-Ingenieuren und Informatikern. Die Mehrzahl der Beschäftigten ist am Standort Dresden angestellt und profitiert vom exzellenten wissenschaftlichen Umfeld.

Im Vordergrund steht die Realisierung anspruchsvoller RichClient-Server-Applikationen, Web-Frontends und Visualisierungsanwendungen im Bereich der virtuellen Produktentwicklung. Die virtuelle Produktentwicklung (CAE, Simulation) verzeichnet weltweit in der Automobilindustrie äußerst hohe Zuwächse und gilt unumstritten als Zukunftstechnologie.

www.scale.eu

SIEMENS PLM SOFTWARE

Europäische Weltraumorganisation beauftragt Siemens und Sonaca für Entwicklung von Anwendungen für additive Fertigung

Die Europäische Weltraumorganisation (ESA) hat Siemens Digital Industries Software damit beauftragt, Applikationen für die Konstruktion von Teilen in der Luft- und Raumfahrt zu entwickeln, die in additiver Fertigung aus Metall hergestellt werden. Diese Applikationen profitieren von Siemens durchgängiger Softwarelösung für die industrielle additive Fertigung. Die Lösung kombiniert

generatives Engineering, Topologie-Optimierung, prädiktive Analytik, Prozesssimulation, Bauvorbereitung und Produktionsabwicklung.

Das Design4AM-Projekt basiert auf der engen Zusammenarbeit zwischen Siemens und Sonaca, dem Spezialisten für Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, mit finanzieller Unterstützung der ESA und des Belgian Federal Science Policy Office (Belspo). Design4AM schafft einen validierten Prozess für die Verwendung der umfassenden additiven Fertigungssoftware von Siemens, um hochoptimierte, leichtgewichtige Strukturbauteile für Raumfahrtanwendungen zu konstruieren. Dazu zählen Armaturen (strukturell mit CFK-Platten verbunden), Halterungen und Bipods für verbesserte Leistung und Kosten.

„Die Partnerschaft zwischen Siemens und Sonaca kombiniert die Leistungsfähigkeit einer führenden Softwarelösung für die additive Fertigung mit der Expertise eines führenden Luft- und Raumfahrt Herstellers“, so Pedro Romero Fernandez, Sonaca General Manager Space BU. „Mit unserem umfassenden Wissen über Luft- und Raumfahrt und den Softwaretechnologien von Siemens – wie generative Konstruktion, automatisierte Topologie-Optimierung und Simulation von Prozessen in der additiven Fertigung – werden Ingenieure in der Lage sein, hunderte von Konstruktionsoptionen in einem Bruchteil der üblichen Zeit zu erforschen. Im Anschluss können sie diese virtuell gegen eine Vielzahl von physikalischen Bedingungen testen. So finden sie die beste Konstruktionslösung für ihre Leistungsanforderungen, und der 3D-Druck ist bereits beim ersten Mal korrekt.“ Additive Fertigung ist ein wichtiges Werkzeug für die Raumfahrtindustrie. Sie erfüllt strukturelle und multidisziplinäre Anforderungen für Raumfahrtanwendungen bei einem deutlich geringeren Gewicht als Strukturen, die mit traditionellen Fertigungsmethoden hergestellt werden. Das Gewicht ist ein besonders kritischer Aspekt für Raumfahrtanwendungen. Laut Branchenberichten entspricht ein Pfund

Nutzlast den Startkosten von 10.000 US-Dollar. Additive Fertigungstechniken können dazu beitragen, nahezu jede Art von komplexer Struktur in Trägerraketen, Antrieben, Satelliten und verschiedenen Raumfahrzeugkomponenten leichter zu machen. Design4AM nutzt die Siemens Digital Innovation Platform und Sonacas Erfahrung in Raumfahrtanwendungen, Fertigungseigenschaften, im Umgang mit Materialien, bei Tests und numerischen Methoden zur Validierung der Prozesskette. Die Software-Lösungen NX und Simcenter von Siemens ermöglichen es Ingenieuren, eine Vielzahl von Konstruktionskonzepten in einem automatisierten Closed-Loop-Prozess zu untersuchen, der die Anforderungen an die technische Leistungsfähigkeit, den Herstellungsprozess und die Betriebskosten berücksichtigt. Diese Lösungen können Fertigungseinschränkungen wie thermo-mechanische Bauteilverformung, die Bauteilorientierung in der Baukammer oder die Gestaltung von Stützstrukturen berücksichtigen. Die integrierte Softwareumgebung verkürzt den Prozess der Bauteilkonzeption und -optimierung und ermöglicht die Herstellung leistungsstarker Strukturen.

„Additive Fertigung hilft der ESA, Prozesse zu optimieren und so optimale Leistung bei reduzierten Kosten zu erzielen. Im Vergleich dazu erfordern traditionelle Fertigungsmethoden mehrere Bearbeitungsschritte und Werkzeuge, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten“, so Didier Granville, RTD-Projektmanager bei Siemens in Lüttich. „Gemeinsam mit Sonaca helfen wir der ESA, die Vorteile der additiven Fertigung zu nutzen, um hochbelastbare Strukturen zu produzieren, die den extremen Kräften beim Start von Weltraumsatelliten standhalten.“

Siemens erweitert Solid Edge 2020 um Augmented Reality

Siemens Digital Industries Software hat die neueste Version der Solid Edge Software vorgestellt. Zahlreiche Verbesserungen ermöglichen es kleinen und mittleren Unterneh-

men, die Produktentwicklung und Fertigungsprozesse zu beschleunigen. Durch neue Funktionen wie Augmented Reality (AR), erweiterte Validierungs-Tools, modellbasierte Definitionen und 2D-Nesting bietet Solid Edge 2020 Technologien, wie sie in Zukunft benötigt werden. Dadurch verbessert sich die Zusammenarbeit und Design-to-Manufacturing-Prozesse lassen sich vollständig digitalisieren.

„Durch das Teilen von Konstruktionen in AR/VR mit Solid Edge 2020 wird sich unsere Arbeitsweise grundlegend verändern. Solid Edge 2020 hilft uns dabei, besser zu konstruieren und effektiver und effizienter mit unseren Kunden und Ingenieuren zu kommunizieren“, so Stefan Islinger, Informationsmanagement, IM-CAD Support bei der Krones AG.

Die neuen Augmented-Reality-Funktionen in Solid Edge 2020 ermöglichen es Anwendern, Konstruktionen auf neue Weise zu visualisieren. Außerdem sorgen sie für eine verbesserte Zusammenarbeit – sowohl intern als auch mit Lieferanten und Kunden während des Konstruktionsprozesses. Für die Durchführung der Bewegungs- und Schwingungssimulation wurden neue und leistungsfähige Validierungs-Tools integriert. Sie helfen Kunden dabei, teure Prototypen zu vermeiden.

Die Erweiterung um die modellbasierte Definition ermöglicht es Kunden, Teile, Baugruppen und Fertigungsanweisungen vollständig digital aus 3D-Modellen zu definieren. Darüber hinaus wurden 2D-Nesting-Funktionen hinzugefügt, um Schnittmuster zu optimieren, Ausschuss und Kosten zu reduzieren und Fertigungsprozesse zu beschleunigen. Zudem bietet Solid Edge 2020 Hunderte von CAD-Kernverbesserungen. Dazu gehören neue Blechfunktionen, eine um das Dreifache schnellere Leistung bei großen Baugruppen, neue Datenmigrationswerkzeuge und vieles mehr. Diese Verbesserungen erleichtern die Anwendung von Solid Edge 2020. Die Software ist einfach zu bedienen, zu implementieren und zu warten. Außerdem helfen sie dabei, alle Aspekte des Produktentwick-

lungsprozesses voranzutreiben.

„Das neue modellbasierte Definitionsangebot für Solid Edge 2020 ist genau das, was wir brauchen“, so Daniel Froehlich, PLM Business Manager, Standardization Department bei Eagle Burgmann. „Das neue Konzept wird uns nicht nur helfen, papierlos zu werden, es ist auch ein großer Schritt hin zu einer vollständig digitalen Umgebung. Durch die Verwendung unseres digitalen Modells zur Erstellung von 3D-PDFs können wir unsere Konstruktionen teilen, ohne zusätzliche Zeichnungen erstellen zu müssen.“

„Die neuesten Erweiterungen des Solid-Edge-Portfolios unterstützen kleine und mittlere Hersteller dabei, ihren gesamten Produktentwicklungsprozess von Anfang bis Ende zu digitalisieren“, erklärt John Miller, Senior Vice President, Mainstream Engineering bei Siemens Digital Industries Software. „Wir arbeiten weiterhin daran, ein fortschrittliches Portfolio an erschwinglichen und einfach zu bedienenden Tools bereitzustellen, um unseren Kunden bei ihrer digitalen Transformation zu helfen, damit sie Kosten senken und die Produktlieferung beschleunigen können.“

www.siemens.com/plm

UNIVERSITÄT ULM

Data Literacy und Data Science für den Mittelstand

Neun Universitäten und Hochschulen in Baden-Württemberg entwickeln in einem gemeinsamen Projekt neue Schulungs- und Qualifizierungsangebote zur Sammlung, Bewertung und Nutzung großer Datenmengen, die in Unternehmen anfallen. Dabei werden ganz unterschiedliche Bildungsformate eingesetzt – Online- und Präsenzelemente ergänzen sich. Die Weiterbildungsangebote richten sich speziell an mittelständische Unternehmen. Das Projekt „Data Literacy und Data Science“ wird bis Ende 2021 mit knapp einer Million Euro aus dem Europäischen Sozialfonds

gefördert. Eine weitere Million Euro steuern das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg und die Projektpartner jeweils hälftig bei.

„Große, unstrukturierte Datenmengen zu analysieren und zu bewerten, ist im digitalen Zeitalter die zentrale Voraussetzung für erfolgreiche Wissenschaft und Wirtschaft und daher eine Kernkompetenz der Beschäftigten. Die unterschiedlichen Bildungsformate, die im Verbundprojekt entstehen, werden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in die Lage versetzen, das Potential digitaler Daten für den Unternehmenserfolg zu erkennen und zu nutzen“, sagte Wissenschaftsministerin Theresia Bauer zum Projekt „Data Literacy und Data Science“.

Die neuen Weiterbildungsangebote aus dem Bereich Data Science haben ein klares Ziel: „Die Kompetenz des Mittelstands in der Erfassung und Auswertung von massiven Datenmengen soll gestärkt werden. Dadurch versetzen wir Unternehmen in die Lage, aus den gewonnenen Daten die richtigen Schlüsse zu ziehen“, so der Projektleiter, Professor Hermann Schumacher, geschäftsführender Direktor der School of Advanced Professional Studies (SAPS). Dieses Zentrum für die berufsbegleitende wissenschaftliche Weiterbildung haben Universität und Technische Hochschule Ulm gemeinsam gegründet. Neben den Ulmer Hochschulen sind Bildungseinrichtungen aus dem ganzen Land am Projekt „Data Literacy und Data Science“ beteiligt. Somit sind Präsenz- und Informationsveranstaltungen im gesamten Bundesland für Teilnehmende und alle Interessierten auf kurzem Wege erreichbar.

Die neuen Schulungs- und Qualifizierungsangebote sind auf die Bedürfnisse kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) abgestimmt: Diese Zielgruppe wünscht sich Lösungen für aktuelle Problemstellungen und nachvollziehbare Beispiele mit Bezug zum eigenen Unternehmen. Als Gründe für die derzeit noch geringe Akzeptanz von Data Science in KMU werden oft

fehlende Anwendungsbeispiele, zu hohe Kosten und mangelndes Wissen über den Nutzen von Big Data und Big Data-Analysen für das eigene Unternehmen angeführt. Diese Bedenken wollen die Projektpartner mit ihren Schulungen entkräften.

Die Weiterbildungsangebote richten sich sowohl an Entscheider, die grundlegendes Wissen im Bereich Data Science erwerben wollen, als auch an Anwender, die Daten mit vorhandenen Werkzeugen und Methoden analysieren. Zudem werden spezielle Lernformate für Experten angeboten, die mit neuartigen, datenbasierten Lösungsansätzen auf Probleme reagieren. Für diese Zielgruppen kombinieren die Weiterbildungsangebote eine theoretisch fundierte Wissensvermittlung mit starkem Anwendungsbezug. Ein gestuftes Qualifizierungskonzept umfasst Präsenz- sowie Online-Elemente in Form von Vorträgen, ein- oder mehrtägige Workshops oder ganzen Studienmodulen. Als besonderes Angebot für KMU werden so genannte Data Labs an der Technischen Hochschule Ulm aufgebaut, in denen konkrete Fallbeispiele getestet werden: Anhand von Daten aus Unternehmen können Analysten und Datenwissenschaftler den Wert der Daten herausdestillieren und eine Bewertung herbeiführen.

Das Thema Data Science ist interdisziplinär, so dass mehrere Fachbereiche eingebunden werden müssen. In den Weiterbildungsangeboten werden also nicht nur Grundlagen aus Mathematik und Informatik, sondern auch betriebswirtschaftliche Kompetenzen zur datengetriebenen Entscheidungsfindung, für digitale Geschäftsmodelle oder die digitale Transformation vermittelt. Aus dem Informatikbereich kommen Elemente wie Programmierung, Datenbanken, Data Mining, Internet-of-Things-Systemmodellierung oder das Thema „Datenwerkzeuge“ hinzu. Darüber hinaus spielen in allen Schulungs- und Qualifizierungsangeboten übergeordnete Themen wie Data Privacy, Data Compliance, Datenethik und grundlegende Datenkompetenz eine Rolle.

Neben der federführenden Universi-

tät und der Technischen Hochschule Ulm sind das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Universität Mannheim sowie die Hochschulen Furtwangen, Albstadt-Sigmaringen und Biberach, die Hochschule der Medien in Stuttgart und die Duale Hochschule Baden-Württemberg am Projekt beteiligt. Als externer Partner unterstützt die Sicos GmbH, ein Spezialist für Simulationen und Big Data. Erste Weiterbildungsangebote sollen noch in diesem Jahr starten.

<http://wissenschaftliche-weiterbildung.org/>

Die hier veröffentlichten Texte wurden nicht redaktionell redigiert sondern weitestgehend unverändert von den jeweiligen Firmen übernommen. Bitte senden Sie uns Ihre Pressemitteilungen an magazin@nafems.de.

2019

NAFEMS Virtual Conference

08.10. Internet www.nafems.org NAFEMS

RecurDyn TechnologyDays

9.-10.10. München, D www.functionbay.org FunctionBay

ESI Scilab Conference

14.10. Berlin, D www.esi-group.com ESI

ESI OpenFOAM Conference

15.-17.10. Berlin, D www.esi-group.com ESI

NAFEMS EU Conference: Simulation-Based Optimisation

15.-16.10. London, UK www.nafems.org NAFEMS

Cadferm Ansys Simulation Conference

16.-17.10 Kassel, D www.simulation-conference.com Cadferm

AVL International Simulation Conference

22.-24.10. Graz, A www.avl.com/isc19 AVL

Wissenschaftstag: Flugzeugzertifizierung der Zukunft

24.10. Braunschweig, D www.DLR.de/FA DLR

Mentor User Conference

04.11. München, D www.mentor.com Mentor

ESI Forum in Deutschland 2019

06.-07.11. Berlin, D www.esi-group.com ESI

NAFEMS Kurs:

Master Course V&V: Verification and Validation in Engineering Simulation – Building Simulation Credibility in an Industrial Context

06.-07.11. München, D www.nafems.org/vav19-2 NAFEMS

NAFEMS Seminar:

Konstruktionsnahe CFD-Berechnung

11.-12.11. Wiesbaden, D www.nafems.org/cfd19 NAFEMS

NAFEMS Seminar:

Multiphysikalische Simulationen in der Entwicklung von E-Motoren

13.-14.11. Wiesbaden, D www.nafems.org/e-motor19 NAFEMS

NAFEMS Kurs:

Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie

18.-19.11. München, D www.nafems.org/fkm19-2 NAFEMS

Dassault Systèmes User Conference

19.-21.11. Darmstadt, D www.3ds Dassault Systèmes

NAFEMS Nordic Seminar: CAE in Support of Sustainability and Durability

25.-26.11. Billund (LEGO House), DK www.nafems.org/billund19 NAFEMS

VDI-Fachtagung „Fahrzeugsicherheit“

27.-28.11. Berlin, D www.vdi-wissensforum.de vdi

IfW Fachtagung „Bearbeitung von Verbundwerkstoffen“

21.11. Stuttgart, D www.carbon-composites.eu Carbon Composites

2020

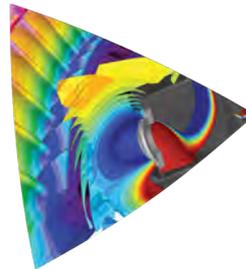
4a Technologietag: „Kunststoffe auf dem Prüfstand - Testen und Simulieren“

03.-04.03. Werfenweng, A www.4a.at 4a engineering

NAFEMS DACH Konferenz

11.-13.05. Bamberg, D www.nafems.org/dach20 NAFEMS

**NAFEMS20
DACH CONFERENCE**



Fachkonferenz für Modellierung, Berechnung & Simulation
11. - 13. Mai, Bamberg, Deutschland

Wind and Drivetrain Conference

21.04. Hamburg, D 3ds.com Dassault Systèmes

Automotive CAE Grand Challenge

21.-22.04. Hanau, D www.carhs.de Carhs

Permas Anwenderkonferenz

23.-24.04. Stuttgart www.intes.de Intes

NAFEMS Nordic Conference

26.-27.05. Göteborg, S www.nafems.org/nordic20 NAFEMS

NAFEMS UK Conference

09.-10.06. Milton Keynes, UK www.nafems.org/2020 NAFEMS

NAFEMS Americas Conference

16.-18.06. Indianapolis, USA www.nafems.org/2020 NAFEMS

NAFEMS France Conference

18.-19.11. Paris, F www.nafems.org/2020 NAFEMS

Weitere Veranstaltungen: www.nafems.org/events

Modellbildung und Simulation von Rollenlagern

Georg Breslau, Berthold Schlecht

Technische Universität Dresden - Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion

In diesem Beitrag werden die Modellbildung und Simulation eines Rollenlagers mit der Finite-Elemente-Methode vorgestellt. Die Verwendung von Ersatzsteifigkeiten in Kombination mit der Scheiben-Diskretisierung des Wälzkontaktes ermöglicht eine effiziente sowie genaue Lastverteilungs- und Nachgiebigkeitsberechnung. Insbesondere die Integration des Lagermodells in übergeordnete Baugruppen zur ganzheitlichen Systemsimulation bietet den Vorteil einer geschlossenen Analyse, bei der alle Wechselwirkungen zwischen Lager, Welle, Getriebe und der elastischen Umgebung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist der Einsatz dieser Modellierungsmethodik optimal geeignet für Systeme mit hoher Flexibilität.

Zu den praktischen Anwendungsbeispielen zählen beispielsweise integrierte Wälzlagerungen von Planetenrädern mit geringer Kranzdicke oder Lagerungen in flexiblen Gehäusekonstruktionen im Groß- und Schwermaschinenbau. Mit Hilfe des entwickelten Berechnungsmodells können die Getriebe- oder Gehäuseverformungen berechnet und gleichzeitig eine Vorhersage über die resultierende Lagerbelastung getroffen werden. Neben der Nachgiebigkeitsberechnung im Gesamtsystem können die Lagermodelle für die Pressungs- und Lebensdauerberechnung sowie zur Bestimmung des dynamischen Übertragungsverhaltens verwendet werden.

1 Motivation

Eine fortwährend zu beobachtende Entwicklung im Maschinenbau ist die kontinuierliche Zunahme der Leistung bei zugleich immer leichter und kompakter werdenden Baugruppen. Entsprechend dieser zunehmenden Leistungsdichte erfordert die Auslegung von wälzgelagerten Systemen eine detaillierte Abbildung des Nachgiebigkeits- und Steifigkeitsverhaltens der Wälzlager. In einer ganzheitlichen Systemanalyse führt die gegenseitige Beeinflussung von Zahn- und Lagerkräften durch spielbehaftete Kontaktverformungen zu nichtlinearen Systemen. Solche Problemstellungen können in der Regel nur mit numerischen Methoden gelöst werden, vorrangig kommt hierzu die Finite-Elemente-Methode (FEM) zum Einsatz [8], [9], [11]. Mit der DIN ISO 26281 [5] steht ein Normenwerk zur Verfügung, das für die Berechnung der Lagernachgiebigkeit und Pressung von Wälzlagern in den meisten Berechnungsprogrammen verwendet wird. Nach diesem Berechnungsverfahren werden die Lagerringe unter Vernachlässigung der Umfeldverformung als ideal steif angenommen. Die Außen- und Innenringe von Wälzlagern sind jedoch vergleichsweise elastische Komponenten. Eine sichere Lastübertragung der Lagerkräfte ist nur dann gewährleistet, wenn die umgebende Struktur ausreichend steif ist und die Lagerringe vollständig umschlossen sind [7]. Gerade im Hinblick auf das Problem des Lagerring-Wanderns ist die Steifigkeit des Gehäuses von entscheidender Bedeutung. Der Einsatz von Großlagern mit zunehmender Größe von Maschinen und Anlagen erschwert die Realisierung einer starren Anschlussgeometrie. Im Gegensatz zu Wälzlagergehäusen in der Automobilindustrie kann beim Bau von Groß- und Schwermaschinen aufgrund steigender Kosten und erhöhten Gewichts nicht immer eine ausreichende Gehäusesteifigkeit erreicht werden. Daher kann bei der Ermittlung der Wälzlager-Belastung nicht immer von einer idealisierten, starren Umgebungsstruktur ausgegangen werden. Als besonders anschauliches Anwendungsbeispiel ist in diesem Zusammenhang das Hauptlager einer Windkraftanlage zu nennen, das wechselnden dynamischen sowie hohen statischen Belastungen ausgesetzt ist [2].

2 Zielstellung

Ziel war es, ein recheneffizientes und vollständig parametrisiertes Lagerersatzmodell für verschiedene Simulationsumgebungen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) zu entwickeln. Aufbauend auf den Berechnungsgrundlagen der DIN ISO 26281 ermöglicht dieser Ansatz die direkte Kopplung des Lagers mit den Anschlussgeometrien zur ganzheitlichen Systembetrachtung. Das in Abb. 1 dargestellte Scheibenmodell dient zur Beschreibung der Steifigkeitsabbildung des Wälzkontaktes. Der Vorteil besteht zum einen darin, dass das Profil des Wälzkörpers durch die axiale Diskretisierung und zum anderen die veränderliche Lastverteilung bei

geneigten Lagerringen berücksichtigt werden kann. Für diesen Modellierungsansatz wird die Elastizität der beiden Wälzkontakte einer einzelnen Scheibe durch ein nichtlineares Federelement abgebildet. Die nichtlineare Kennlinie dieser Feder berücksichtigt zusätzlich das radiale Lagerspiel sowie die Rücknahme durch die Wälzkörperprofilierung.

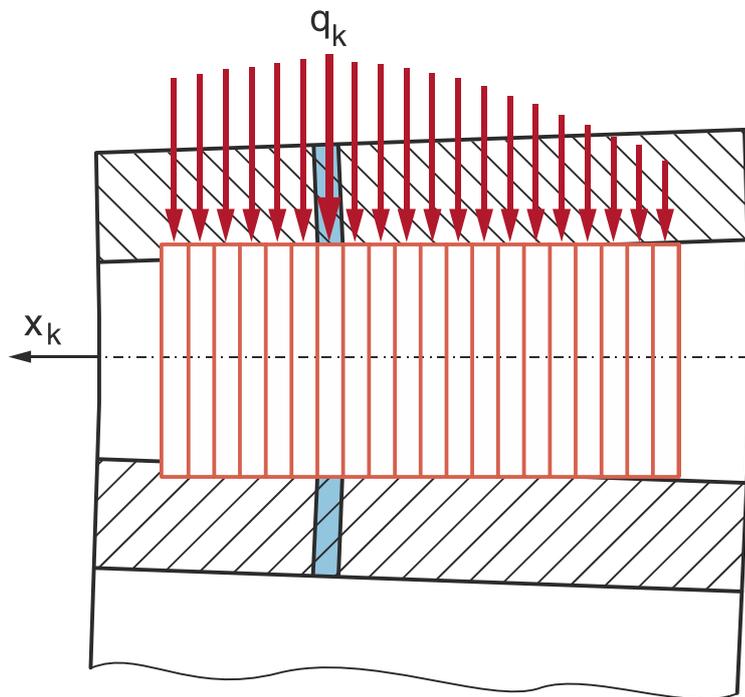


Abb. 1: Scheibenmodell des Wälzkontaktes nach [5]

3 Berechnung der Lagernachgiebigkeit

Der Kontakt zwischen Wälzkörper und Laufbahn kann vereinfacht als Linienkontakt zwischen zwei Zylindern betrachtet werden. Nach der Hertz'schen Kontakttheorie des Zylinder-Zylinder-Kontaktes können lediglich die Abplattung und Pressung berechnet werden, jedoch lässt sich damit keine lastabhängige Annäherung der Kontaktkörper δ_k bestimmen. Darüber hinaus haben experimentelle Untersuchungen gezeigt, dass die elastische Kontaktverformung δ_k unabhängig vom Krümmungs-verhältnis des Kontaktpaares [1] ist. Basierend auf den theoretischen Untersuchungen wurde folgender Zusammenhang zwischen der Belastung q und der effektiven Wälzkörperlänge L_{we} abgeleitet und in die Normberechnung übernommen.

$$q_k = C \cdot \frac{L_{we}^{\frac{8}{9}}}{n_s} \cdot \delta_k^p \quad (1)$$

Nach Gleichung (1) wird die einzelne Scheibenbelastung q_k in Abhängigkeit von der Scheibenanzahl berechnet. Der Steifigkeitsfaktor C und der Exponent p sind nach der Norm mit $C = 35948$ und $p = 10/9$ festgelegt. Es ist anzumerken, dass im Laufe des zwanzigsten Jahrhunderts auch weitere Potenzansätze zur Steifigkeitsberechnung veröffentlicht wurden [10]. Darüber hinaus zeigen aktuelle Publikationen, z.B. [1], dass dieses Problem noch immer Gegenstand der Grundlagenforschung ist. Somit stellt die Berechnung der Kontaktsteifigkeiten im Lager nach wie vor eine Unsicherheit dar. Die experimentelle Ermittlung der Lagernachgiebigkeit ist sehr aufwendig und nur unter optimalen Versuchsbedingungen möglich. Aus diesem Grund wird eine Korrektur der Nachgiebigkeitskennlinie auf Basis von FEM-Kontakt Simulationen durchgeführt. Unter Ausnutzung der Symmetrie-Randbedingungen wird die Steifigkeit mit einem FEM-Segmentmodell berechnet. Bei der Bestimmung der nichtlinearen Kontaktnachgiebigkeit werden die Anschlussflächen des Innen- und Außenrings mit einem starren multi-point constraint (MPC) versteift. Diese Modellierungsvereinfachung ist zulässig, da dieses FEM-Kontaktmodell nur zur Bestimmung der Steifigkeit der Wälzkontakte verwendet wird. Mit Hilfe einer verschiebungsgesteuerten Lastschrittanalyse werden die Reaktionskräfte zwischen den MPC-Knoten ermittelt werden.

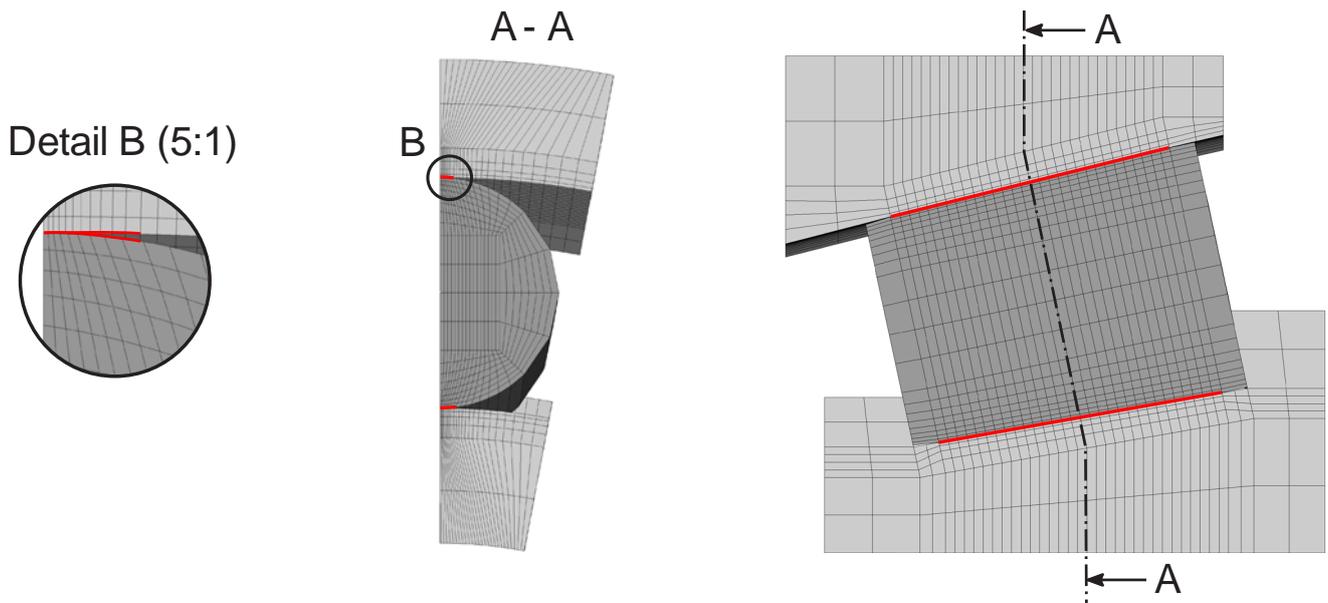


Abb. 2: FE-Kontaktmodell zur Ermittlung Nachgiebigkeitskennlinie (Halbmodell) [4]

Die Beschreibung der daraus ermittelten Steifigkeit basiert ebenfalls auf Gleichung (1), sodass nur der Steifigkeitsfaktor C und der Exponent p bestimmt werden müssen. Die Simulationsergebnisse des untersuchten Lagers (Kegelrollenlager 30206) haben gezeigt, dass die Nachgiebigkeit im Vergleich zur Norm geringer ausfällt. Dazu wurde eine Korrektur des Steifigkeitsfaktors durchgeführt $C_{korrr} = C \cdot K$. Für das hier betrachtete Kegelrollenlager wurde ein Korrekturwert von $K = 1,18$ ermittelt. Der Exponent p der Potenzfunktion, welcher den Grad der Nichtlinearität definiert, bleibt unverändert.

4 FE Modellierungsansatz

Im Folgenden werden zwei Modellierungsvarianten unterschieden. Die erste Variante berücksichtigt nur die nichtlineare Steifigkeit der einzelnen Wälzkörperscheiben. Die Knoten der Anschlussflächen der Ringgeometrie sowie die Mittelpunktsknoten der Wälzkörper werden mit separaten starren MPC's gekoppelt. Damit werden zum einen die Ringdeformation und zum anderen die Durchbiegung der Wälzkörper verhindert. Für jede Rolle wird eine Bezugsebene durch die Rotationsachse des Wälzkörpers und die Lagerhauptachse definiert. Die Verschiebungsrandbedingungen der Wälzkörper werden so gewählt, dass nur Bewegungen innerhalb dieser Bezugsebene möglich sind, d.h. radiale und axiale Verschiebungen und Neigungen. Eine zusätzliche Feder am Innenring begrenzt die axiale Verschiebung des Wälzkörpers gegenüber dem Bord. Die Abb. 3 zeigt die beschriebene Modellstruktur in der Bezugsebene des Wälzkörpers. Alle Federelemente, die zur Abbildung des Wälz- und Bordkontaktes verwendet werden, sind so ausgerichtet und konfiguriert, dass nur Druckkräfte in Normalrichtung berechnet werden. Die Wälzkörperprofilierung resultiert bei einer Lagerbelastung in einer ungleichmäßigen Lastverteilung (Abb. 3b). Die Verschiebungen und Reaktionskräfte der Lagerringe werden bezüglich des MPC-Mittelknotens definiert und ausgewertet.

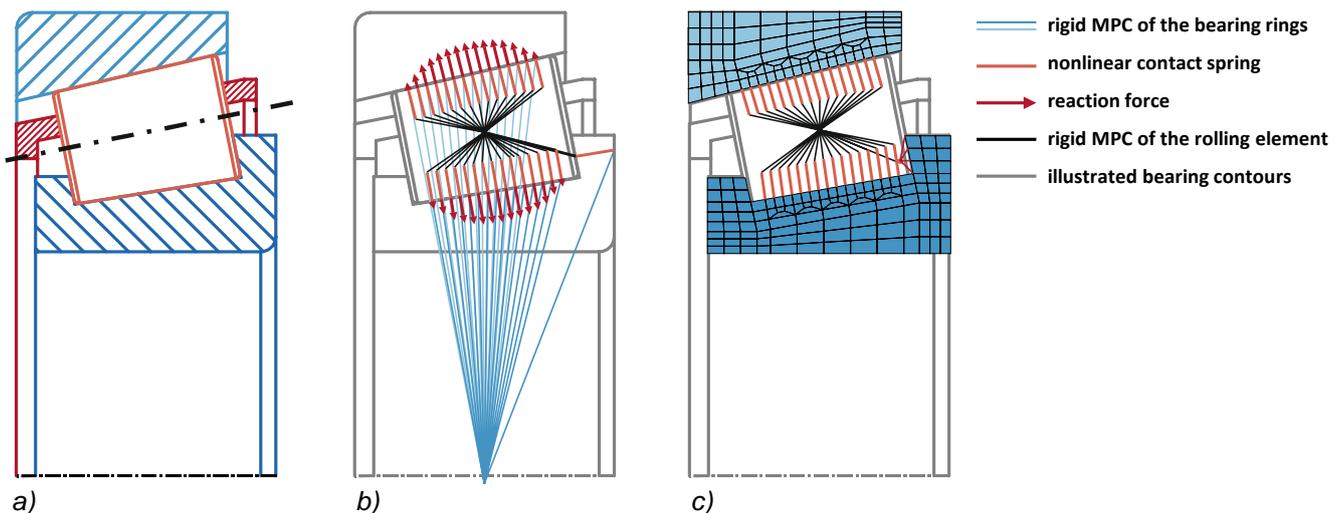


Abb. 3: FE Modellierungsansatz

- a) Skizze des Kegelrollenlagers
 b) Var.1: Federmodell mit starren Ringen
 c) Var.2: Federmodell mit elastischen Ringen

Die Variante 2 (Abb. 3c), stellt eine Erweiterung der Variante 1 dar und ist für die Implementierung in übergeordnete Modelle vorgesehen. Um eine Verformung der Lagerringe zu ermöglichen, wurden alle starren MPC's der Ringe durch 3D FE-vernetzte Lagerringgeometrien ersetzt. Dieser Ansatz erfordert jedoch eine Anpassung der Federsteifigkeit der Wälzkontakte. Die ursprüngliche Berechnung der Nachgiebigkeit beinhaltet sowohl die Kontaktabplattung als auch die Elastizität aller drei Kontaktkörper.

Damit ist die anteilige Nachgiebigkeit der Lagerringe durch die FE-Netzgeometrie doppelt berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Linienlast des Wälzkontaktes in Umfangsrichtung nur auf eine einzige Knotenreihe eingeleitet, was zu einer Verformungssingularität führt. Die Funktion nach Gleichung (1) ist folglich so anzupassen, dass die Nachgiebigkeit des FE-Netzes kompensiert wird.

Aufgrund der unterschiedlichen Lagerringdicke und Vernetzungsdichte wird für jede Scheibe eine separate Korrektur vorgenommen. Die Lagernachgiebigkeit des Netzes wird nach der FE-Einfluss-zahlenmethode bestimmt, die auch bei der Berechnung der Eingriffssteifigkeit von Verzahnungen Anwendung findet [3]. Analog zum Lagerkontaktmodell, das zur Validierung der Nachgiebigkeits-kennlinie eingesetzt wurde, werden die Anschlussflächen der Lagerringe über MPC's versteift. Ziel ist es, wie auch schon bei der Variante 1, die Steifigkeitscharakteristik dieses detaillierten Kontaktmodells nachzubilden. Aufgrund des Betriebsdruckwinkels α von Kegelrollenlagern ist zur Gewährleistung eines theoretisch schlupffreien Abrollens ein kegelförmiger Wälzkörper erforderlich. Bei einer rein radialen Belastung des Wälzlagers treten infolge des Bordkontakts innere Kräfte auf, die als Axialkraft zwischen Innen- und Außenring resultieren. Die Abb. 4 zeigt die Kontaktwinkel α_A und α_f sowie den Kegelwinkel γ des Wälzkörpers, die für die analytische Berechnung des Kräftegleichgewichts erforderlich sind. Zur Übertragung der Bordkräfte auf den elastischen Innenring sind zusätzliche flexible MPC-Elemente erforderlich. Auf eine Validierung der Nachgiebigkeit des Bordkontaktes über eine zusätzliche Steifigkeit wird an dieser Stelle verzichtet, da die Beschreibung der Kontaktverhältnisse mit einem erhöhten Aufwand verbunden ist. Weiterhin steht die radiale Lagercharakteristik im Vordergrund und der Einfluss der Bordsteifigkeit auf die axiale Lagernachgiebigkeit wird als gering eingeschätzt.

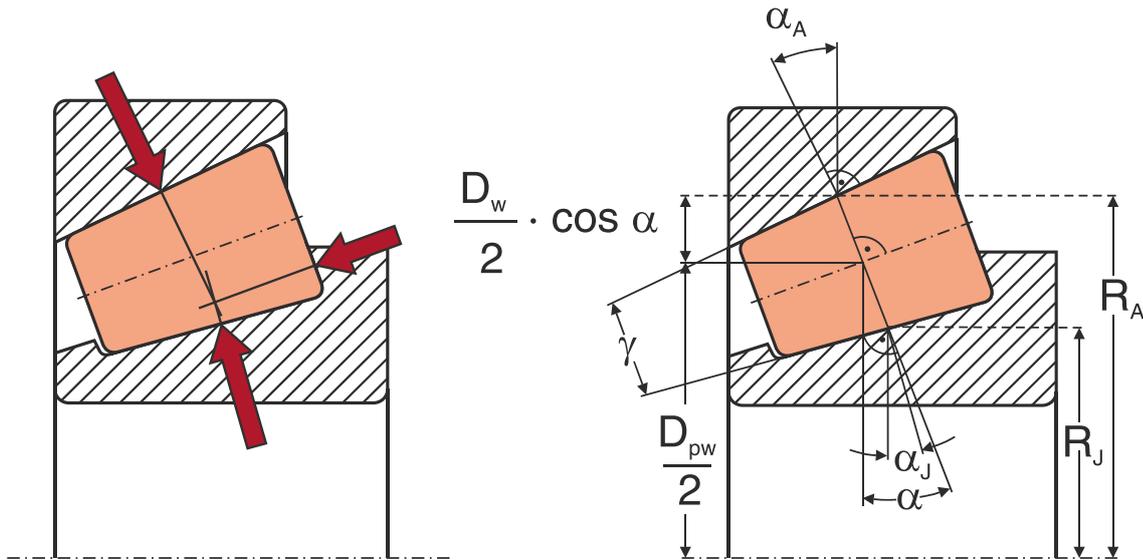


Abb. 4: Geometrische Größen und Kräfteverhältnisse des Wälzkörpers nach [7]

Die Integration und Anbindung der Lagermodelle in übergeordnete Systemmodelle erfolgt durch die Modellierung der Lagersitze als Verbundkontakt. Insbesondere besteht dadurch die Möglichkeit der Kopplung der Federmodelle an Gehäusen mit Tetraeder-Elementen.

5 Akademisches Anwendungsbeispiel

Der Einsatz von Kegelrollenlagern erfolgt für gewöhnlich paarweise und spiegelbildlich, um eine beidseitige axiale Abstützung des zu lagernden Bauteils zu gewährleisten. Bei einer solchen angestellten Lagerung wird zwischen der X- und O-Anordnung unterschieden. Angestellte Lagerungen können entweder axial vorgespannt oder mit Axialspiel montiert werden. In der Praxis trifft man jedoch häufiger auf die O-Anordnung, bei der aufgrund des größeren Abstandes der Druckmittelpunkte höhere Kipmomente aufgenommen werden können. Bei Getrieben kommt es für gewöhnlich zu einer stärkeren Erwärmung der Wellen gegenüber dem Gehäuse. Daher ist zu beachten, dass die Lagervorspannung bei der X-Anordnung ansteigt bzw. sich die axiale Lagerluft verringert, das gilt umgekehrt für die O-Anordnung. Zur Umsetzung der Lagervorspannung (negative Lagerluft) von Kegelrollenlagern im FE-Modell wurden zwei Methoden entwickelt. In beiden Ansätzen wird eine richtungsabhängige Ausdehnung der Elemente durch einen orthotropen thermischen Ausdehnungskoeffizienten realisiert. Es besteht die Möglichkeit einen Wellenabschnitt zwischen beiden Lagern in einem separaten Temperaturlastschritt mit Hilfe eines negativen Ausdehnungskoeffizienten zu verkürzen, um eine Vorspannung zu erzwingen. Ebenso kann eine Vorspannung mit einem axial verschiebbaren Lagerinnenring durch eine positive Temperaturexpansion im Bereich der Nutmutter erreicht werden. Die hierfür notwendige axiale Verschiebung des Lagerinnenrings gegenüber der Welle erfordert jedoch einen speziellen Kontakt.

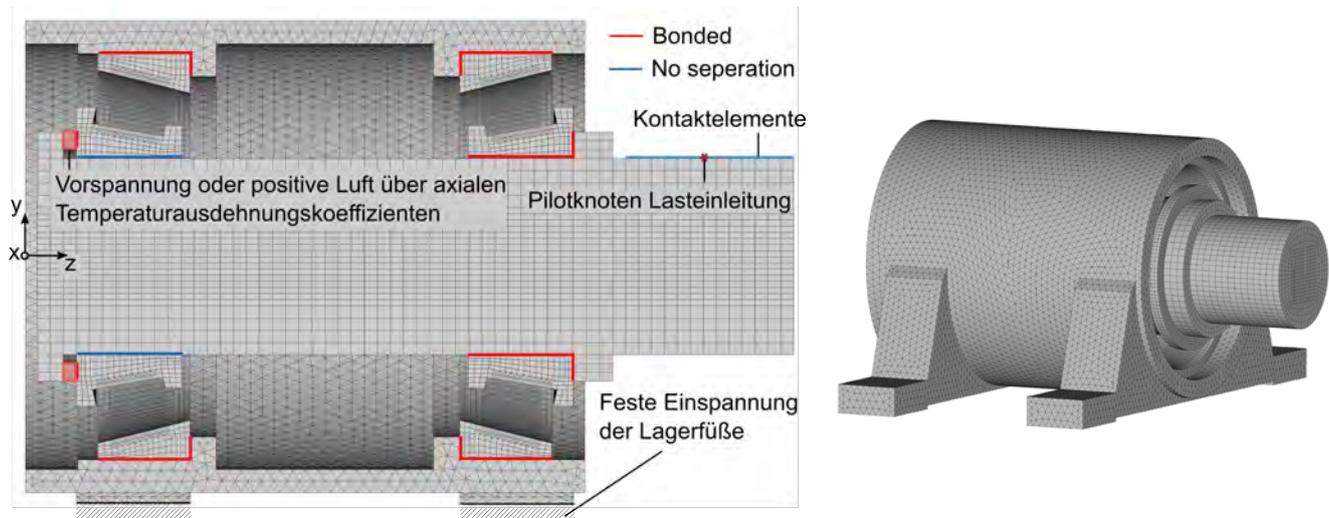


Abb. 5: Modellaufbau der exemplarischen Stützlagerung (l.: Schnittansicht; r.: isom. Ansicht) [4]

In ANSYS eignet sich hierfür die Kontakteinstellung „No Separation“, bei welcher, ebenso wie beim Verbundkontakt keine Durchdringung der Kontaktflächen stattfindet, jedoch eine Verschiebung orthogonal zur Kontakt-Normalenrichtung ermöglicht wird. In der Abb. 5 ist der Aufbau des Beispielmotors im Querschnitt dargestellt. Die Belastung erfolgt am freien Wellenende, die Vorspannung über die axiale Ausdehnung der Nutmutter und die Fesselung über den Gehäuseflansch. Die Federelemente der Lagerung sind aus Darstellungsgründen ausgeblendet.

Das Gehäuse ist absichtlich so gestaltet, dass große Steifigkeitsunterschiede am Lagersitz in Umfangsrichtung resultieren. Somit ist die Nachgiebigkeit im Bereich der Befestigung sehr gering. Demgegenüber ist das restliche Gehäuse verhältnismäßig dünnwandig und folglich elastisch gestaltet. Zur Begünstigung der Modellkonvergenz erfolgt die Simulation in drei Schritten. Die Lager sind initial so positioniert, dass ein Nullspiel vorliegt. Im ersten Schritt wird die Lagervorspannung durch die Vorgabe einer Temperatur generiert. Durch das Aufbringen einer Verschiebung am Lasteinleitungsknoten wird im zweiten Schritt ein erstes Kräftegleichgewicht berechnet. Auf Basis dieses Gleichgewichtes erfolgt im letzten Simulationsschritt die eigentliche Belastung. Durch die verschiebungsgesteuerte Simulation als Zwischenschritt kann, je nach Modell, eine deutliche Begünstigung der Gleichgewichtsberechnung erreicht werden. Die Berechnung wurde in drei Konfigurationen, mit positiver Lagerluft, Nullspiel und unter Vorspannung durchgeführt. Die Ergebnisse der Lagerlastverteilung sind in der nachfolgenden Abb. 6 zusammengefasst.

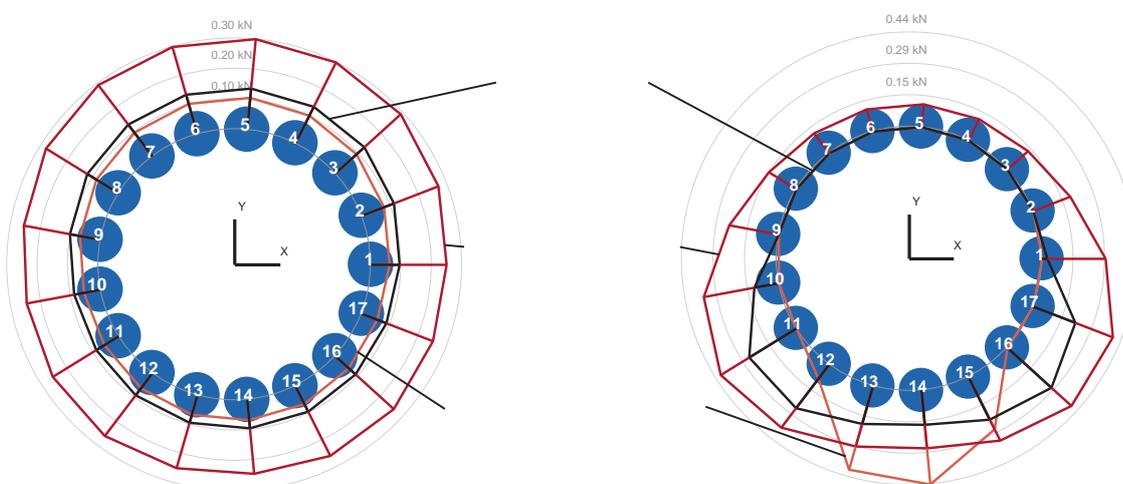


Abb. 6: Verteilung der Umfangslast bei Nullspiel, Vorspannung und positiver Lagerluft [4]

Infolge der Lageranordnung und Belastung ist die Radialkraft am Lager A gegenüber dem Lager B deutlich höher. Am Lager B wird die Lastverteilung in allen Konfigurationen durch die axiale Belastung dominiert, sodass sich die Lastzone über alle Wälzkörper ausbildet. Die Lastverteilung des Lagers A weist hingegen eine große Sensitivität bezüglich der Lagerluft auf. Bei der Konfiguration ohne Lagerspiel zeigt sich besonders deutlich der Einfluss der Gehäusesteifigkeit auf die Lastverteilung. Im Bereich der Befestigung ist die Gehäusenachgiebigkeit am geringsten und folglich die Belastung der Wälzkörper am größten. Bei negativer Lagerluft schließt die Lastzone alle Wälzkörper ein und führt außerdem zu einer Erhöhung der maximalen Wälzkörperlast. Für die Konfiguration mit positiver Lagerluft verkleinert sich die Lastzone und führt letztlich zur größten Wälzkörperbelastung. In Abhängigkeit der Lagerluft lässt sich demnach eine optimale Lastverteilung finden. Weiterhin wird neben der Lagerlastaufteilung auch die Wellenverlagerung beeinflusst. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind Verlagerungen des Lasteinleitungsknoten in axialer und radialer Richtung für alle Konfigurationen gegenübergestellt.

Tabelle 1 Verlagerung des Krafteinleitungspunktes bei Nullspiel, Vorspannung und Lagerspiel [4]

	Nullspiel $s_a = 0 \mu m$	Vorspannung $s_a = -40 \mu m$	Positive Lagerluft $s_a = 160 \mu m$
radiale Verlagerung u_y	19,8 μm	7,7 μm	79,8 μm
axiale Verlagerung u_z	17,8 μm	14,2 μm	185,9 μm

Es zeigt sich, dass bei negativer Lagerluft infolge einer Vorspannung die Verlagerungen gegenüber der Konfiguration mit Nullspiel geringer sind. Ebenso nachvollziehbar sind die großen Verlagerungen bei positiver Lagerluft. Beispielsweise wäre für den Anwendungsfall der Ritzellagerung einer Kegelradstufe eine solche Betrachtung zur Auslegung der Mikrogeometrie und Gewährleistung eines optimalen Tragbildes von Interesse. In Erweiterung zu den bisherigen Analysen wären ebenfalls Untersuchungen zum Passungsspiel vorstellbar. Die Simulationen unter Berücksichtigung des Passungsspiels erfordern jedoch höherwertige Kontaktalgorithmen, welche einen deutlich größeren Berechnungsaufwand zur Folge hätten.

6 Literatur

- [1] KUNZ, J., STUDER M.: „Kontaktmechanik: Längeneinfluss auf die Abplattung paralleler Zylinder“, Konstruktion, Juni 2017
- [2] LÜNEBORG B., GRZYBOWSKI R.: „Entwicklung und Zertifizierung von Hauptlagern für Multi-Megawatt-Windenergieanlagen“, Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, Dresden, 2015
- [3] NEUPERT, B.: „Berechnung der Zahnkräfte, Pressungen und Spannungen von Stirn- und Kegelradgetrieben“, VDI-Verlag, Reihe1, Nr.104, Düsseldorf, 1983
- [4] NOACK S.: „Modellbildung und Simulation von Kegelrollenlagern mit finiten Elementen“, TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Betreuung: BRESLAU, G., 2018
- [5] NORM DIN 26281. Wälzlager: „Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer – Berechnung der modifizierten nominellen Referenz-Lebensdauer für Wälzlager“, November 2011
- [6] Palmgren, A.: „Grundlagen der Wälzlagertechnik [Fundamentals of rolling bearing technology], 3rd edition. Franckh, Stuttgart, 1964. 264 p.
- [7] SCHLECHT, B.: „Maschinenelemente 2“, Pearson Studium, München, 2010
- [8] SCHLECHT, B., BRESLAU G.: „Zur Modellbildung und Simulation von Zylinderrollenlagern“, Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, Dresden, 2017
- [9] SEBTEINI, S., GLAMSCH, M.: „Bestimmung der Wälzlagersteifigkeit unter Berücksichtigung der Innen- und Außenringelastizität und des Passungsspiels für die Rotordynamikauslegung“, Sachstandsbericht des Vorhabens 747 I Wälzlagersteifigkeit, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt am Main, 2017
- [10] TEUTSCH, R., SAUER B.: „An Alternative Slicing Technique to Consider Pressure Concentrations in Non-Hertzian Line Contacts“, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 126, Juli 2004
- [11] VETTER S.: „FEM-Untersuchung zum Lastübertragungsverhalten von Zylinderrollenlagern bei Ringdeformation“, TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Betreuung: BRESLAU, G., 2016

Alterung und Quellung in polymeren Komponenten als Herausforderung für die Methode der Finiten Elemente

Manfred Achenbach

Ingenieur- und Sachverständigenbüro Achenbach

Polymere Bauteile werden heutzutage noch weitgehend über experimentelle Untersuchungen weiterentwickelt. Das ist oft langwierig und kostspielig. Daher besteht das Bestreben, numerische Methoden einzusetzen, um durch Simulation der Einsatzbedingungen das Optimieren zu vereinfachen.

Allerdings steht und fällt der Erfolg einer numerischen Simulation mit der richtigen Auswahl der mathematisch-physikalischen Modelle und der verwendeten Modellparameter. Sehr viel Sorgfalt ist daher für die Vorbereitung einer Analyse aufzuwenden. Dabei gestaltet sich die Bestimmung der Materialparameter zur Beschreibung des Spannungs-Deformations-Temperatur-Verhaltens von Polymeren besonders aufwendig. Häufig müssen die thermo-elastischen Eigenschaften der zu untersuchenden Elastomere in Abhängigkeit von einer Vielzahl von Parametern bekannt sein, und man hat die Aufgabe, diese Abhängigkeit zu messen. Dies ist ein mühseliges Geschäft; es erfordert viele Einzelmessungen. Jede Möglichkeit, die Zahl der Messungen zu reduzieren, ist willkommen, und hier liegt die Aufgabe der Materialbeschreibung. Diese bemüht sich, Beziehungen zwischen verschiedenen Materialfunktionen herzustellen, um so zu einer rationalen Beschreibung des physikalischen Verhaltens zu gelangen.

Zu den wichtigsten Eigenschaften der Elastomere, die als eine Unterklasse polymerer Werkstoffe gelten, gehört neben der hohen reversiblen Verformbarkeit der Glasübergang, d.h. die Beobachtung, dass ein Elastomer mit zunehmender Deformationsgeschwindigkeit steifer reagiert. Dieses bei Raumtemperatur beobachtete Versteifungsverhalten finden wir auch bei tiefen Temperaturen (Temperatur in der Nähe der Glasübergangstemperatur) und langsamer Verformung. Man spricht daher von der sogenannten Zeit-Temperatur Korrespondenz. Zu erklären ist dieses Verhalten folgendermaßen: Bei schneller Formänderung können die verknäuelten Kettenmoleküle des Elastomeren nicht schnell genug in die neue Gleichgewichtslage kommen; sie brauchen dazu mehr Zeit als im Verformungsvorgang selbst zur Verfügung steht. Daher ist die resultierende Kraft für schnelle Formänderungen immer größer als für langsame. Erhöht man allerdings die Temperatur des Elastomers, so erhöht man damit auch die Beweglichkeit der Kettenmoleküle und somit ihre Fähigkeit, schneller mit der erzwungenen Verformung ins Gleichgewicht zu kommen. Damit besteht ein grundlegender Zusammenhang zwischen der Verformungsgeschwindigkeit und der Beweglichkeit der Kettenmoleküle, sprich der Temperatur. Das Versteifungsverhalten von Elastomeren bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten ist auf diesen Zusammenhang zurückzuführen. Diese Eigenschaft ist für die Werkstoffklasse der Elastomere universell; lediglich die charakteristische Temperatur, bei welcher der Anstieg der Steifigkeit ein Maximum besitzt, ist vom Polymer-Typ abhängig. Ganz eng damit verknüpft ist auch das Dämpfungsverhalten von Polymeren, respektive Elastomeren.

Neben den genannten nichtlinearen Beziehungen zwischen dem Spannungsfeld und dem Verschiebungsfeld bzw. Verzerrungsfeld kommen noch die besonderen Wechselwirkungen zwischen den konstitutiven Elementen der Polymere (makromolekulares Netzwerk) und den Umgebungsmedien ins Spiel. Polymere sind a priori permeabel und damit offen für Diffusionsströme, die nicht nur das Volumen des polymeren Bauteils verändern, sondern auch ihre mechanischen Eigenschaften nachhaltig beeinflussen und so z.B. einen Alterungsprozess beschleunigen können.

1 Einführung und Modellbildung

Die Vorstellung, dass Gummi bzw. die meisten Kunststoffe aus einer großen Zahl von Kettenmolekülen bestehen, ist nicht neu. Sie wurde in den zwanziger und dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts durch zahlreiche Beobachtungen erhärtet und bildet heute die Grundlage der Polymerphysik und der Statistischen Theorie der Gummielastizität. Diese Vorstellung findet z.B. ihren Ausdruck in dem sogenannten Neo Hooke'schen Materialgesetz für Gummi [1], [2], [3] [4].

$$\sigma(t) = 2N(t)c(\lambda - \lambda^{-2}). \tag{1}$$

Neben dem statistisch-mechanischen Zugang zur Gummielastizität, wollen wir noch einen anderen sehr wichtigen Ansatz ansprechen, welcher aus der phänomenologischen Kontinuumsphysik bekannt ist und welcher sich durch eine große Allgemeinheit auszeichnet [5]. Dieser Ansatz hat Vorteile bei der allgemeinen Formulierung von Materialgesetzen. Dort startet man zunächst mit den universellen Bilanzgleichungen für

die Masse:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$$

den Impuls:
$$\rho \frac{dv_i}{dt} - \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} = \rho f_i$$

und die innerer Energie:
$$\rho \frac{du}{dt} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = t_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \tag{2}$$

um die Felder

$$\begin{aligned} &\text{Dichte } \rho(x_A, t) \\ &\text{Bewegung } x_i(x_A, t) \quad \text{und} \\ &\text{Temperatur } T(x_A, t) \end{aligned} \tag{3}$$

in allen materiellen Punkten "X_A" zu allen Zeiten *t* zu bestimmen, wobei $v_i := \frac{\partial x_i(x_A, t)}{\partial t}$ die Geschwindigkeit

und *f_i* die spezifische Volumenkraft darstellt. Es wird sofort offensichtlich, dass diese Gleichungen in ihrer vorliegenden Form noch nicht die passenden Feldgleichungen zur Bestimmung der gesuchten Felder von Dichte, Bewegung und Temperatur sein können, denn Sie enthalten die neuen Felder:

$$\begin{aligned} &\text{Spannungstensor } t_{ij} \\ &\text{spezifische innere Energie } u \quad \text{und den} \\ &\text{Wärmefluss } q_i. \end{aligned} \tag{4}$$

Daher muss das System der Bilanzgleichung durch Materialgleichungen ergänzt werden. Die Erfahrung zeigt, dass im Allgemeinen sowohl die Spannung als auch der Wärmefluss und die innere Energie abhängig sind von der Dichte, der Bewegung und der Temperatur und zwar in materialabhängiger Art und Weise. Für eine recht allgemeine Materialklasse, in der auch die Polymeren als Werkstoffklasse Platz finden, nimmt man an, dass die Materialgrößen *t_{ij}*, *q_i* und *u* eines materiellen Punktes "X_A" zur Zeit *t* abhängen mögen von der Geschichte der Feldgrößen *ρ*, *x_i* und *T* dieses materiellen Punktes und von der Geschichte der Bewegung und der Temperatur der unmittelbaren Umgebung. Das ist zwar noch nicht die allgemeinste, aber doch schon eine recht allgemeine Materialfunktion, welche folgendermaßen geschrieben werden kann:

$$\begin{aligned}
 t_{ij}(X_A, t) &= \mathbf{T}_{ij} \int_{s=0}^{\infty} [\rho(x_A, t-s), x_i(\dots), F_{iA}(\dots), T(\dots), g_A(\dots)] \\
 q_{ij}(X_A, t) &= \mathbf{Q}_i \int_{s=0}^{\infty} [\rho(x_A, t-s), x_i(\dots), F_{iA}(\dots), T(\dots), g_A(\dots)] \\
 u(X_A, t) &= \mathbf{U} \int_{s=0}^{\infty} [\rho(x_A, t-s), x_i(\dots), F_{iA}(\dots), T(\dots), g_A(\dots)], \quad (5)
 \end{aligned}$$

wobei $F_{iA} := \frac{\partial x_i(X_A, t)}{\partial X_A}$ den Deformationsgradienten und

$g_A := \frac{\partial T}{\partial X_A}$ den Temperaturgradienten darstellen soll.

Falls die dargestellten Materialfunktionale \mathbf{T}_{ij} , \mathbf{Q}_i und \mathbf{U} in (5) bekannt wären, so kämen wir im Prinzip in die Lage, die zusätzlichen Felder in den Bilanzgleichungen zu eliminieren und sie durch die gesuchten Felder der Dichte, der Bewegung und der Temperatur auszudrücken. Wir erhielten dann ein System explizierter Feldgleichungen, vorausgesetzt die Größe f_i sei gegeben.

Allerdings sind wir leider nicht in der komfortablen Lage, die Form der Materialfunktionale auch nur für ein einziges Material vollständig zu kennen. Daher versucht man, Einschränkungen für die Materialfunktionale zu finden, mit dem Ziel, ihre Allgemeingültigkeit soweit zu reduzieren, dass man am Ende möglichst einfache Funktionen bekommt, die nur noch von wenigen Variablen abhängen mögen. Diese können dann gemessen oder aus molekularen bzw. mesoskopischen Modellen mit Hilfe der Methoden der Statistischen Mechanik bestimmt werden.

Die Suche nach Einschränkungen der allgemeinen Materialgleichungen sowie ihre Bestimmung ist die Aufgabe der Materialtheorie. Die Werkzeuge der Materialtheorie sind universelle physikalische Prinzipien, welche sich aus Beobachtungen und einer langen Erfahrung mit Materialien unterschiedlichster Art herauskristallisiert haben. Die wichtigen Prinzipien sind:

- das Prinzip der materiellen Objektivität und
- das Entropieprinzip

Auch sind häufig von Materialien gewisse Eigenschaften a priori bekannt, die zwar keinen universellen Charakter besitzen, wohl aber von vielen Materialien geteilt werden. Beispiele hierfür können die Eigenschaften der

- Isotropie und der
- Inkompressibilität

genannt werden.

2 Offenes Thermodynamisches System

2.1 Stoffaustausch

Die bisherigen Betrachtungen gingen davon aus, dass die Materialien nur Wärme und Arbeit mit ihrer Umgebung austauschen. Polymere Werkstoffe sind jedoch in besonderem Maße permeabel und tauschen somit auch Stoffe mit ihrer Umgebung aus. M.a.W. wir müssen solche Aufgaben in denen polymere Bauteile involviert sind häufig als offene thermodynamische Systeme betrachten, die neben Wärme und Arbeit auch Stoffaustausch mit ihrer Umgebung unterhalten.

Polymere Materialien können also in flüssigen oder gasförmigen Medien aufquellen oder schrumpfen. Dabei ändern sie ihre Eigenschaften zum Teil erheblich. Obwohl gequollene Elastomere häufig in den Anwendungen anzutreffen sind, wird eine rechnerische Behandlung selten durchgeführt. So findet man in einschlägigen technischen Berechnungen und Computersimulationen kaum einen Bezug auf das Quellen von Elastomeren. Wir wollen in diesem Beitrag auch Aspekte des Stoffaustausches kurz streifen, indem gezeigt wird, wie der Effekt der Quellung bzw. Schrumpfung in strukturmechanische Berechnungen eingebettet werden kann. Dabei gehen wir zunächst auf einige grundsätzliche Dinge ein, die den Vorgang des Quellens erklären können [6, 7]. Im Anschluss daran übertragen wir das Wesentliche in ein Finite Elemente Modell und geben ein Beispiel.

Bekanntlich bestehen Elastomere aus langkettigen Molekülen, die zu einem Netzwerk verknüpft sind; wir betrachten im Folgenden ein Modellsystem, welches wichtige Eigenschaften vieler, teilweise sehr unterschiedlicher Systeme umfasst. In einem solchen System treten gelöste Moleküle des umgebenden Mediums im molekularen Netzwerk eines Polymers auf. Diese können aus Molekülen bestehen, die nur aus wenigen Atomen zusammengesetzt sind, oder selbst wieder aus kurzkettigen Molekülen bestehen, welche zwischen den langkettigen Molekülen des Netzwerkes im Verlauf eines thermodynamischen Mischungsprozesses „eingelagert“ werden.

Polymere bzw. Elastomere quellen in Medien, indem sie vorzugsweise die Komponente aufnehmen, die sich mit den Molekülen des polymeren Netzwerkes gut „verträgt“, und sie schrumpfen durch Ausstoßen von Komponenten, die eine geringere Verträglichkeit zeigen. Diese Volumenänderungen können verursacht werden durch

- eine Temperaturänderung
- unterschiedliche Netzwerkdichte
- das Anbringen einer äußeren Kraft
- oder durch Veränderung der Zusammensetzung des umgebenden Mediums.

In einem typischen Zustand besteht das gequollene Elastomer aus zwei Teilchensorten: Kettenglieder der Polymerelemente des Netzwerkes und mindestens einer Komponente des umgebenden Mediums. Die beobachteten Erscheinungen kann man in einem (T, ν) – Diagramm darstellen, wo T die Temperatur ist und ν der Schrumpfgrad (Quellgrad $q = 1/\nu$). Dieser ist definiert als Verhältnis der Zahl der Polymerglieder zur Gesamtzahl der Teilchen im polymeren Bauteil. Darum gilt $\nu = 1$, wenn das Elastomer vollständig geschrumpft ist; andernfalls ist $\nu < 1$.

Das Quellen und Schrumpfen ist das Ergebnis einer Konkurrenz dreier thermodynamischer Kräfte - zwei von ihnen sind entropisch und eine energetisch. Diese Kräfte sind:

- der osmotische Druck der gelösten Moleküle im elastomeren Netzwerk
- *eine entropisch expandierende Kraft*
- die Netzwerk-Elastizität
- *eine entropisch kontrahierende Kraft*
- die molekulare Wechselwirkung
- diese kann für das Elastomer eine energetisch kontrahierende
- oder aber auch eine energetisch expandierende Kraft sein.

Liegt eine drastische Veränderung des Volumens vor, gewinnt die expandierende Tendenz des osmotischen Drucks die Oberhand über die kontrahierenden Tendenzen. Wir erörtern im Folgenden diese Kräfte genauer und diskutieren die Gründe für ihr Auftreten.

Die gelösten Moleküle sind praktisch freie Teilchen, und als solche haben sie die Tendenz, das ganze System homogen auszufüllen. Deshalb drücken sie von innen gegen die Oberfläche der quellenden Elastomere und expandieren dieses durch teilweise Entknäuelung seiner langkettigen vernetzten Moleküle. Der Raum, der dadurch im Elastomeren geschaffen wird, wird von „passenden“ Molekülen des Mediums (Quellmittel) ausgefüllt; diese können frei in das quellende Elastomere ein- und austreten.

Die Expansion des Elastomeren bringt die langen Kettenmoleküle in den unwahrscheinlichen entknäuelten Zustand. Sie haben die Tendenz, sich zu verknäueln und erzeugen so die Netzwerkelastizität, eine entropische Kraft, die dem osmotischen Druck entgegenwirkt. Beide Kräfte sind linear abhängig von der Temperatur.

Das Netzwerk ist in der Regel energetisch in der günstigsten Lage, wenn nur Glieder des Netzwerkes nächste Nachbarpaare bilden. Es gibt dann einen Energiemalus für die Bildung eines Paares aus Kettenglied und Fremdmolekül (Molekül aus dem Medium); gelegentlich aber auch einen Bonus bei der Bildung eines ungleichen Paares. Dieser Effekt ist weitgehend unabhängig von der Temperatur, und daher bestimmt er das Verhalten bei tiefer Temperatur - wo die beiden anderen Kräfte klein sind - und führt zum Schrumpfen.

Das System aus Elastomer und Medium kann als inkompressibel angesehen werden, und das soll in der folgenden Rechnung angenommen werden. Wir werden die Quellung und das Schrumpfen erst im übernächsten Kapitel mit einem Beispiel aus der Dichtungstechnik untermauern.

2.2 Alterungsmodell

In der hyperelastischen Formulierung der Gummielastizität steckt implizit die Annahme, dass das Verformungsverhalten entropieelastisch begründet werden kann. Dabei spielt, wie gezeigt werden kann, die Zahl der effektiven Kettensegmente pro Volumeneinheit eine entscheidende Rolle. Wenn jedoch die Temperatur der Elastomere einen kritischen Wert überschreitet, wird sich das molekulare Netzwerk durch chemische Reaktionen verändern und damit geht eine Veränderung der Zahl der Kettensegmente pro Volumeneinheit einher. Diese Veränderung drückt sich in einer Änderung der Formänderungsenergiefunktion aus. Die dafür verantwortlichen chemischen Reaktionen können sowohl zu Netzwerkbrüchen als auch zur Bildung neuer Netzwerkstellen, eines so genannten zweiten Netzwerkes, führen. Dieser Prozess ist zeitabhängig und kann zu erheblichen Veränderungen im mechanischen Verhalten und zu bleibenden Verformungen führen. Es ist naheliegend, das Problem der Langzeitdichtungs-funktion mit einem Materialmodell zu untersuchen, welches sowohl den Netzwerkabbau als auch die Bildung eines neuen Netzwerkes zu beschreiben erlaubt und dies sowohl unter erhöhten Temperaturen als auch unter dem Aspekt einer Wechselwirkung mit den abgedichteten Medien.

Bei den Experimenten zur Bestimmung des Langzeit-Relaxationsverhaltens eines elastomeren Dichtungsmaterials wird ein Gummistreifen bei Raumtemperatur um einen festen Wert gedehnt und dann bei einer erhöhten aber konstanten Temperatur eine gewisse Zeitlang gehalten und dabei kontinuierlich die mechanische Spannung gemessen, die der konstanten Deformation das Gleichgewicht hält. Bei höheren Temperaturen - dem so genannten chemo-rheologischen Temperaturbereich - beobachtet man, dass die Spannung mit der Zeit abfällt. Je höher die Temperatur, umso stärker zeigt sich der Spannungsabfall. Die Experimente werden für unterschiedliche Temperaturen und Zeitintervalle ausgeführt. Gemessen wird sowohl der Spannungsabfall als auch die bleibende Verformung (Zugverformungsrest) am Ende des Relaxationsexperiments.

Die gewonnenen Daten werden analysiert, indem man z.B. Neo-Hooke'sches Materialverhalten voraussetzt. Für ein solches Materialverhalten ist die Relation zwischen Spannung $\sigma(t)$ und dem einachsigen Streckungsverhältnis $\lambda = \ell / \ell_0$, wie bereits in (1) angedeutet, wie folgt gegeben:

$$\sigma(t) = 2N(t)c(\lambda - \lambda^{-2}), \quad (6)$$

wobei c bei festgehaltener Temperatur eine Konstante darstellt. Wir haben bereits weiter oben geschlossen, dass die Spannungsabnahme eine Folge von Kettenbrüchen im molekularen Netzwerk ist, welche sich in einer Abnahme von $N(t)$ bemerkbar macht. N repräsentiert die momentane Zahl der effektiven Kettensegmente pro Volumeneinheit im molekularen Netzwerk der Elastomere und ist damit gleichbedeutend mit der Vernetzungs-

dichte. Der Zugverformungsrest (tension set) ist eine Folge des im gestreckten Zustand $\hat{\lambda}$ gebildeten neuen Netzwerkes (Bildung eines zweiten Netzwerkes). Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung, die beide Netzwerke umfasst, lässt sich somit wie folgt ausdrücken.

$$\sigma(t) = 2N_1c(\lambda - \lambda^{-2}) + 2M_1c(\lambda\hat{\lambda}^{-1} - \lambda^{-2}\hat{\lambda}^2), \quad (7)$$

wobei das Streckungsverhältnis $\hat{\lambda}$ im primären Netzwerk bei erhöhter Temperatur $T_1 \gg T_0$ eine gewisse Zeit t_1 konstant gehalten wird. N_1 sei die Netzwerkdicke des primären Netzwerkes am Ende des Experiments zur Zeit $t = t_1$ und M_1 sei die Netzwerkdicke des neu gebildeten, so genannten sekundären Netzwerkes ebenfalls zur Zeit t_1 . Der zweite Term in (7) bringt somit die Annahme zum Ausdruck, dass das neue Netzwerk im spannungsfreien Zustand gebildet wurde, wobei, wie bereits erwähnt, $\hat{\lambda}$ das Streckungsverhältnis im primären Netzwerk ist. Es wird angenommen, dass N_1 und M_1 unabhängig vom vorgegebenen Streckungsverhältnis sind.

Wenn man die momentane Spannung zur Zeit t , welche bei konstanter Dehnung $\lambda = \hat{\lambda}$ (festes Streckungsverhältnis) in einer Probe gemessen wird, auf den Anfangswert der Spannung zur Zeit $t = 0$ bezieht, so erhält man:

$$\frac{\sigma(t)}{\sigma(0)} = \frac{N(t)}{N(0)}, \quad (8)$$

wobei $N(0)$ den Anfangswert der Zahl der Netzwerkketten pro Volumeneinheit und $N(t)$ den momentanen Wert zur Zeit t repräsentiert. Ein einfaches mathematisches Modell für diesen Abbauprozess wird durch die folgende Ratengleichung beschrieben:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{N(t)}{\tau(T)} \quad (9)$$

Nach dieser Differentialgleichung ist die Zahl der Kettensegmente, die pro Zeit- und Volumeneinheit zur Zeit t durch chemische Reaktionen aufgebrochen werden, proportional der noch vorhandenen effektiven Zahl $N(t)$. Der Proportionalitätsfaktor ist die reziproke chemische Relaxationszeit τ^{-1} , die bei bekanntem Dichtungsnetzwerkstoff und abzudichtenden Medium noch von der Temperatur T in charakteristischer Weise abhängt. Diese Abhängigkeit wird durch einen Boltzmannfaktor beschrieben, der auch häufig mit dem Namen Arrhenius in Verbindung gebracht wird:

$$\tau(T) = \tau_{ref} e^{\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)}, \quad (10)$$

wobei E_A die Aktivierungsenergie des Degradationsprozesses genannt wird und R die allgemeine Gaskonstante repräsentiert. T_{ref} ist eine Referenztemperatur in Kelvin, bei welcher der Wert der Relaxationszeit τ den Zahlenwert τ_{ref} annimmt. Beide Parameter E_A und τ_{ref} können aus den Messwerten der Spannungsrelaxation gewonnen werden.

2.2.1 Physiko-Chemische Aspekte

Bisher wurde ein sehr einfaches Reaktionsschema verwendet, um die Veränderung der Netzwerkdicke kinetisch zu begründen. Im Allgemeinen sind die Reaktionsmechanismen, die sowohl zum Abbau als auch zur Umbildung bzw. Neubildung von Netzwerkstellen führen, ihrer Natur nach sehr viel komplexer. Obwohl häufig im Detail nicht bekannt ist, wie sich die chemische Reaktionskinetik auf die Veränderung der Netzwerkdicke aus-

wirkt, soll im Folgenden ein verallgemeinerter Ansatz vorgeschlagen werden, der genügend Raum für Spezialisierungen auf spezielle Vernetzungskinetiken bietet.

Der Massenerhaltungssatz für eine chemische Substanz i in einem Elastomer bei konstanter Temperatur ist gegeben mit

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\frac{\partial(J_k)_i}{\partial x_k} + r_i \quad : \quad i = 1, \dots, m, \quad (11)$$

wobei c_i die Konzentration der Substanz i und r_i die volumetrische Rate der chemischen Reaktion sowie J_i den Massenfluss aufgrund von Diffusion der Spezies i im Elastomeren darstellt.

Abgesehen von der Wärmeleitungsanalogie stellt die chemische Reaktion den interessantesten Aspekt vom Standpunkt der Finiten Elemente Implementation dar. Im Allgemeinen ist die volumetrische Rate mit der die Spezies i entsteht oder wieder verschwindet häufig proportional zu ihrer eigenen Konzentration und gewöhnlich auch proportional zur Konzentration anderer Spezies, die ebenfalls an der Reaktion beteiligt sind. Wie bereits dargestellt, kann man sich leicht vorstellen, dass die Änderungsrate der Zugspannung in einem Relaxationsexperiment von der Rate abhängt, mit der die Kettenmoleküle des Netzwerkes gebrochen werden. Im Folgenden wollen wir ein einfaches Diffusions-Reaktions-Modell von zwei „Substanzen“ A und B in einer eindimensionalen Membrane behandeln. A soll mit B reagieren können; dabei wird A mit einer konstanten Reaktionsrate $k(AB \xrightarrow{k} -A)$ reduziert. Wir nehmen dabei an, dass die Rate, mit der A verschwindet, von erster Ordnung in A und von erster Ordnung in B sei (**also** $r_A = -kC_A C_B$), und zum anderen sei angenommen, dass der Abbau von B gleich sei dem Abbau von A zuzüglich eines rein thermischen Zerfalls, welcher mit der Rate k_T auftrete und von erster Ordnung in B sei. Die beschreibenden Differentialgleichungen lassen sich dann wie folgt formulieren:

$$\text{Substanz A:} \quad \frac{\partial C_A}{\partial t} = D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} - kC_A C_B \quad (12)$$

$$\text{Substanz B:} \quad \frac{\partial C_B}{\partial t} = -k_T C_B - kC_A C_B$$

Wir bemerken hier noch, dass die Substanz B mit einem Molekül in der Kette, oder der Vernetzungsstelle selbst identifiziert werden kann. Daher kann sich Substanz B im Gegensatz zu Substanz A nicht frei durch das Netzwerk bewegen; das erklärt, warum man in (12)₂ keinen Diffusionsterm findet. Die Spezies A kann mit einem mobilen reaktiven Molekül aus der abzudichtenden Flüssigkeit identifiziert werden. Sobald ein solches Molekül auf seinem Weg durch das Elastomer auf ein reaktionsbereites Molekül der Spezies B trifft, findet eine chemische Reaktion statt. Dabei werde A verbraucht und stehe somit für keine weiteren Reaktionen mehr zur Verfügung. Die beiden Gleichungen in (12) sind durch den Term $kC_A C_B$ miteinander gekoppelt. Diese Form der Kopplung bringt zum Ausdruck, dass bei einer Reaktion, bei der A mit B reagiert sowohl ein Individuum der Spezies A als auch eine der Spezies B verbraucht wird. Unabhängig davon kann durch thermischen Zerfall, ohne dass ein Molekül der Spezies A anwesend sein muss, eine Kette des Netzwerkes gebrochen werden, indem das schwächste Glied darin durch thermische Aktivierung zerfällt. Das System (12) ist im Allgemeinen nur numerisch lösbar; jedoch lassen sich die stationären Lösungen in geschlossener Form angeben. Die Stationarität von (12) führt auf:

$$C_B = 0 \rightarrow \frac{d^2 C_A}{dx^2} = 0$$

woraus für die stationäre Lösung (ss=stationary state) folgt:

$$C_A^{(ss)}(x) = C_A^* \left(1 - \frac{x}{d_0} \right), C_B^{(ss)}(x) = 0, \tag{13}$$

wenn wir zusätzlich noch folgende Anfangs- und Randbedingungen beachten

$$C_A(x,0) = 0; \quad C_B(x,0) = N_0$$

$$C_A(0,t) = C_A^*; C_A(d_0,t) = 0$$

erhalten wir die in Abb. 1 dargestellte Lösung des Systems (12). Dabei wurde (12) zunächst in eine dimensionslose Form gebracht (siehe dimensionslose Variablen in Abb. 1).

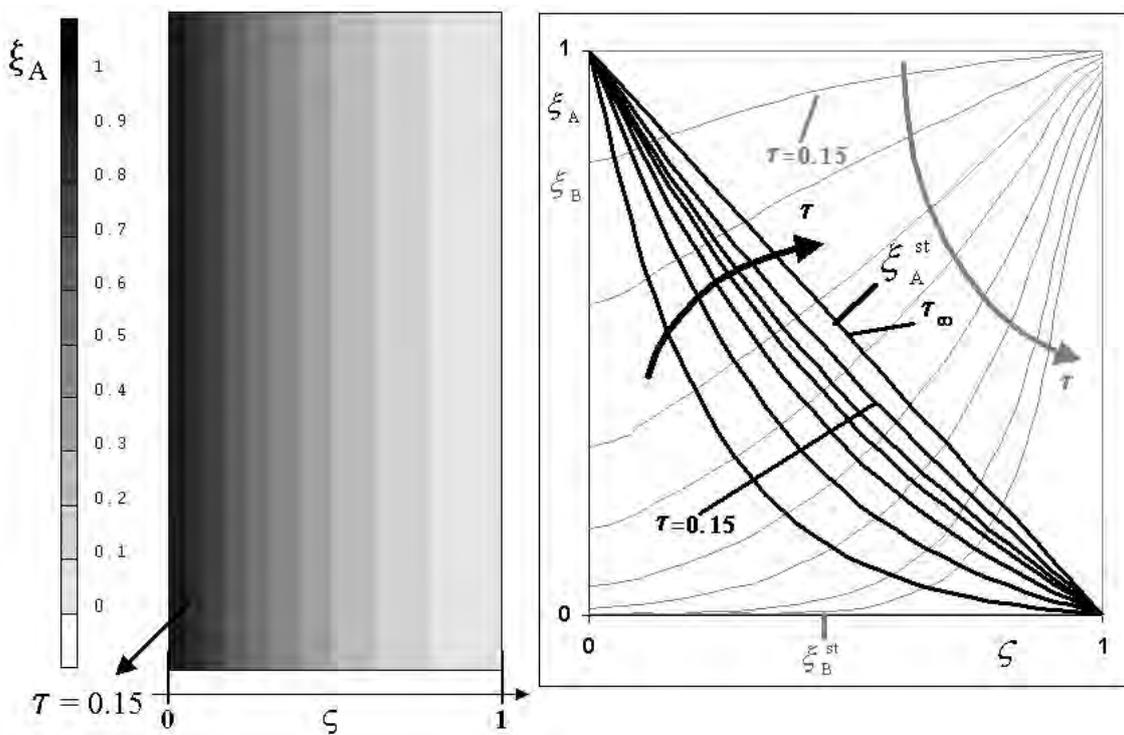


Abb. 1: Veranschaulichung der gleichzeitigen Diffusion und chemischen Reaktion erster Ordnung in einer elastomeren Membrane: ξ_A Konzentration der gelösten Substanz A; ξ_B Konzentration der Vernetzungsdichte B; ζ dimensionslose Membrandicke; τ dimensionslose Zeit.

Links: Farbkonturplot der Konzentration der Spezies A (gelöste Fremdmolekül) kurz vor Erreichen des stationären Gleichgewichts.

Rechts: Entwicklung der Konzentration von A und B (Kurvenparameter ist die dimensionslose Zeit τ). Die fett ausgeführten Kurven repräsentieren den Konzentrationsverlauf der Spezies A über der (dimensionslosen) Dicke ζ der Membrane. Die in hell-grau ausgeführten Kurven beschreiben dagegen die Entwicklung der Konzentration der Spezies B (relative Zahl der effektiven Kettensegmente).

Durch Diffusion der Spezies A bildet sich ein Konzentrationsgefälle in der Membran aus. Dadurch, dass die Konzentration von A im Bereich des linken Membranrandes immer größer ausfällt als am rechten Rand, führt die dadurch entstehende intensivere Abbaureaktion am linken Rand der Membrane zu einer stärkeren Abnahme der Vernetzungsdichte in diesem Bereich. Ein zunehmend S-förmiger Verlauf der Vernetzungsdichte in der Membran ist die Folge.

Das dargestellte Beispiel zeigt bereits an, welche Vielfalt an Simulationsmöglichkeiten unterschiedlicher Systeme mit der erweiterten Modellierung hyperelastischen Materialverhaltens sich eröffnen.

2.2.2 Mehrachsiges Alterungsmodell

Verwendet man die einachsige Beziehung (6) als Leitlinie, so kann man leicht eine dreiachsige Materialbeschreibung für „alternde“ Vulkanisate aufbauen. Wir betrachten dabei zunächst ein hyperelastisches Material bei Umgebungstemperatur T_0 in einer spannungsfreien Bezugsconfiguration. Wir wollen weiterhin annehmen, dass es einen Temperaturbereich gibt, in dem das Materialverhalten isotrop, nicht linear elastisch und inkompressibel sei. Wenn dann x_i die Lage eines infinitesimalen Volumenelementes zur Momentan-Zeit t bezeichnet, welches sich in der spannungsfreien Bezugsconfiguration an der Stelle X_A befunden hat, dann ist der Deformationsgradient mit $F_{iA} = \partial x_i / X_A$ gegeben. Daraus gewinnt man dann, wie üblich, den Cauchy-Green'schen Deformationstensor $B_{ij} = F_{iA}(F_{jA})^T$, wobei der Cauchy'sche Spannungstensor t_{ij} von diesem wie folgt abhängt.

$$t_{ij} = -p\delta_{ij} + 2W_1^0 B_{ij}, \tag{14}$$

wobei der Druck p wegen der geforderten isochoren Deformation (Inkompressibilität) auftritt und die partielle Ableitung von W mit einem Suffix „0“ versehen wurde: W_1^0 . W_2 fehlt hier gänzlich, da wir eine mögliche Abhängigkeit der Formänderungsenergie W von der zweiten Hauptinvarianten hier nicht berücksichtigen wollen. Der Materialkoeffizient W_1^0 lässt sich durch partielle Ableitung der Verformungsenergie $W^0(I_1)$ gewinnen: $W_1^0 = \partial W^0 / \partial I_1$, wobei W^0 mit dem primären Netzwerk verknüpft ist.

Bei hinreichend niedrigen Temperaturen treten praktisch keine Kettenbrüche im elastomeren Netzwerk auf. Das betrachtete Material besitzt dann zu jeder Zeit den ursprünglichen spannungsfreien Bezugszustand, und der Spannungszustand ist durch (14) vollständig determiniert. Zur Zeit $t=0$ werde die Temperatur des Elastomeren auf einen höheren Wert gesetzt, $T_1 \gg T_0$, so dass wir annehmen können, dass Kettenbrüche im molekularen Netzwerk im Zeitverlauf t auftreten werden. Damit verändert sich sowohl W^0 als auch W_1^0 .

Die Größe \dot{M} repräsentiere die Rate, mit welcher neue Netzwerkstellen zur Zeit t gebildet werden, sodass $\dot{M} dt$ als die Zahl der zusätzlichen Netzwerkstellen interpretiert werden kann, die im Zeitschritt $t+dt$ auftreten. Die Zahl der Netzwerkstellen im primären molekularen Netzwerk, die zur Zeit t noch existieren, wird mit $N(t)$ bezeichnet und stellt eine monoton abnehmende Funktion der Zeit t dar.

Wir betrachten nun eine Zwischenzeit $\hat{t} \in (0, t)$ und den darin eingenommenen Deformationszustand des zur Zeit $t=0$ verformungs- und spannungsfreien Körpers. Bezogen auf die Bildung neuer Netzwerkstellen hat ein Netzwerk, welches im Intervall $\hat{t} + d\hat{t}$ gebildet wurde, als Referenzconfiguration die zu Zeit \hat{t} aktuelle Konfiguration. Wir wollen annehmen, dass diese für das neu gebildete Netzwerk eine spannungsfreie Konfiguration sei. Bei einer nachfolgenden Deformation ist die Bewegung des neu gebildeten molekularen Netzwerkes mit der des ursprünglichen (primären) Netzwerkes der Kettenmoleküle deckungsgleich. Eine Spannung entsteht in diesem neu gebildeten Netzwerk, wenn eine Deformation relativ zur spannungsfreien Konfiguration zur Zeit \hat{t} auftritt. Zu einer späteren Zeit t hat ein Netzwerk, welches zu einer früheren Zeit \hat{t} gebildet wurde, den relativen De-

formationsgradienten $\hat{F}_{ij} = \partial x_i / \partial x_A$, wobei x_A die Lage eines infinitesimalen Volumenelementes in der zur Zeit \hat{t} aktuellen Konfiguration kennzeichnet, und x_i sei seine Lage zur Zeit t . Es wird angenommen, dass sich das neue Netzwerk ebenfalls isotrop, nichtlinear-elastisch und inkompressibel verhält. Es bleibt jetzt nur noch, den relativen Cauchy-Green Tensor $\hat{B}_{ij} = \hat{F}_{iA}(\hat{F}_{jA})^T$ zur Beschreibung der Deformation dieses Netzwerkes einzuführen. Die Materialgleichung für die Spannung des zur Zeit \hat{t} neu gebildeten Netzwerkes ist damit durch

$$\hat{t}_{ij} = -\hat{p}\delta_{ij} + 2\hat{W}_1\hat{B}_{ij} \tag{15}$$

gegeben, wobei \hat{p} durch die Forderung entsteht, dass die Deformation des neuen Netzwerkes ebenfalls isochor erfolgen soll.

\hat{I}_1 stellt die erste Invariante von \hat{B}_{ij} dar; entsprechend ist $\hat{W}_1 = d\hat{W} / d\hat{I}_1$ die Ableitung der Formänderungsenergiefunktion $\hat{W}(\mathbf{I}_1)$ des sekundären Netzwerkes. Die resultierende Gesamtspannung kann als eine Überlagerung der Spannung aus dem noch verbliebenen primären Netzwerk und den Spannungen aus dem neu gebildeten Netzwerk angesehen werden, sodass wir schreiben können:

$$\mathbf{t}_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mathbf{W}_1^0\mathbf{B}_{ij} + 2 \int_{\hat{t}=0}^t \frac{d}{d\hat{t}} \left(\frac{d\hat{W}}{d\hat{I}_1} \right)_{\hat{I}_1} \hat{B}_{ij} d\hat{t} \tag{16},$$

wobei $\mathbf{W}^0 = \frac{1}{2}\mathbf{kT}(\mathbf{I}_1 - 3)\mathbf{N}(t)$

$\hat{W} = \frac{1}{2}\mathbf{kT}(\mathbf{I}_1 - 3)\mathbf{M}(t)$ gilt.

2.2.3 Anwendung auf einen O-Ring

Im Folgenden wird eine typische O-Ring Abdichtung durch eine Finite Elemente Analyse in ihrem Langzeitverhalten genauer betrachtet. Der eingesetzte O-Ring hat ein Wasser-Glykol-Gemisch abzudichten. Dabei kommt ein HNBR-Dichtungswerkstoff zur Anwendung. Die Dichtung soll mindestens 20000 Stunden bei 95°C sicher abdichten. Man erkennt aus Abb. 2, dass die O-Ring-Abdichtung das gesteckte Ziel offenbar nicht erreicht, da nach Abschalten der Anlage eine Leckage auftritt, weil sich ein Spalt zwischen O-Ring und Dichtfläche gebildet hat. Es handelt sich hier um eine Abdichtstelle im Kühlkreislauf einer nassen Zylinderlaufbuche eines stationären Gasmotors. Obwohl im Betrieb (bei erhöhter Temperatur und einem wirksamen hydraulischen Druck von 2bar) keine Leckage während der dargestellten 20000 Stunden auftritt und am Ende eine, wenn auch geringe, Dichtkraft verbleibt, wird Undichtheit vorausgesagt, wenn das System danach abgeschaltet und damit wieder auf Umgebungsbedingungen bzgl. Temperatur und Druck zurückgesetzt wird. Bei der Analyse der Materialeigenschaften zeigt sich, dass das vorliegende HNBR-Dichtungsmaterial eine nicht zu vernachlässigende Neigung zur Ausbildung eines zweiten elastomeren Netzwerkes besitzt, wenn es mit dem abzudichtenden Medium in Berührung kommt. Dies trifft insbesondere bei erhöhten Temperaturen zu und wirkt sich aber merklich erst nach langer Dauer der Betriebsbelastung aus. Dieser Tatsache ist es geschuldet, dass das eingesetzte Dichtungsmaterial in dieser Anwendung Defizite aufweist und die gestellte Dichtungsaufgabe nicht erfüllt. Als Alternative bietet sich ein Dichtungsmaterial an, welches diese Neigung zur Nachvernetzung (Ausbildung eines zweiten elastomeren Netzwerkes im verformten Zustand) weit weniger aufweist. Dies ist bei FKM-Dichtungsmaterialien (Fluorelastomeren) zu erwarten, so dass im Folgenden eine Analyse mit einem geeigneten FKM-Material durchgeführt wurde.

Verfall der Dichtkraft und Leckage

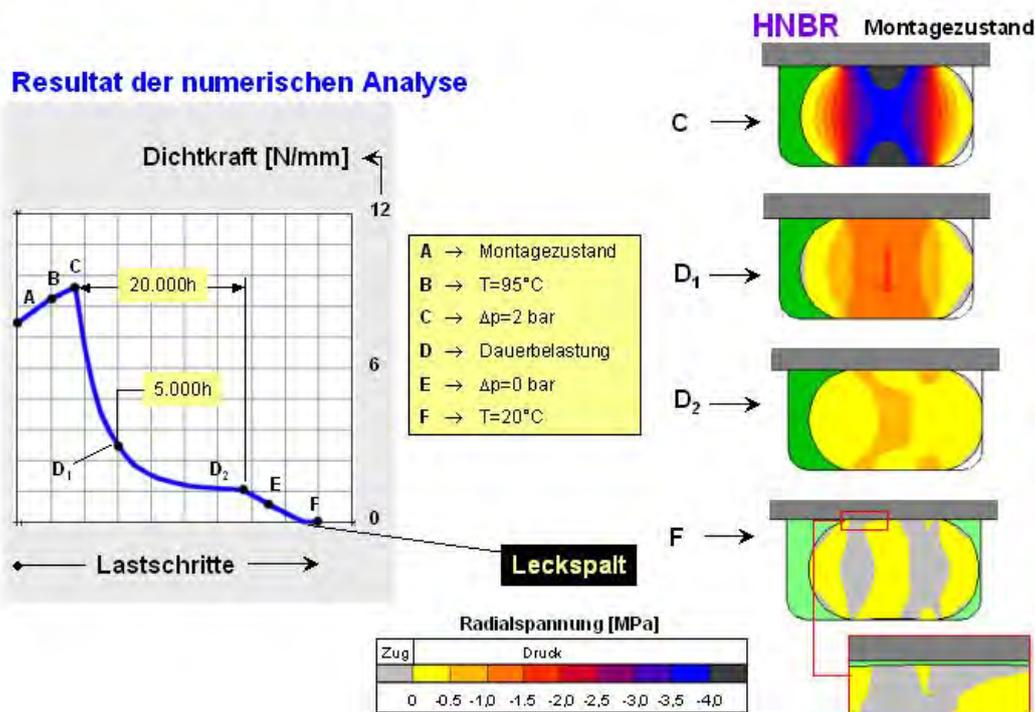


Abb. 2: Ergebnisse der Finiten Elemente Analyse einer O-Ring-Abdichtung unter Langzeitgesichtspunkten. Auf der rechten Seite sind Momentaufnahmen von Computeranimationen zu sehen, welche die Spannungsverteilung im Querschnitt des O-Ringes zu verschiedenen Zeiten anzeigen, während das Diagramm auf der linken Seite die Entwicklung der resultierenden Dichtkraft im Verlauf der aufgetragenen Lastschritte zeigt.

Abb. 3 zeigt das Ergebnis dieser Simulationsberechnung; ähnlich wie in Abb. 2 werden auf der rechten Seite Farbkonturplots der Spannungsverteilung im O-Ringquerschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten im Verlauf der Einsatzzeit von 20000 Stunden gezeigt. Aber anders als im Falle des verwendeten HNBR Dichtungswerkstoffes (siehe Abb. 2) tritt keine Leckage auf. Obwohl auch hier die Spannung im Querschnitt des O-Ringes im Verlauf der Zeit stark abfällt, bleibt nach dem Abschalten der Anlage eine, wenn auch kleine, Restdichtkraft erhalten, die eine Spaltbildung an der Dichtfläche verhindert. Die Auswertung der intermittierenden Spannungsrelaxation für den FKM Elastomeren (hier nicht gezeigt) ergab bereits den Hinweis, dass hier die Tendenz zur Nachvernetzung deutlich geringer ausgeprägt ist – im Vergleich mit dem verwendeten HNBR Werkstoff. Im Wesentlichen hat dieser Unterschied das unterschiedliche Langzeitverhalten der beiden Dichtungswerkstoffe begründet, welches in den Abbildungen von Abb. 2 und Abb. 3 zum Ausdruck kommt.

Dicht, trotz Abfall der Dichtkraft

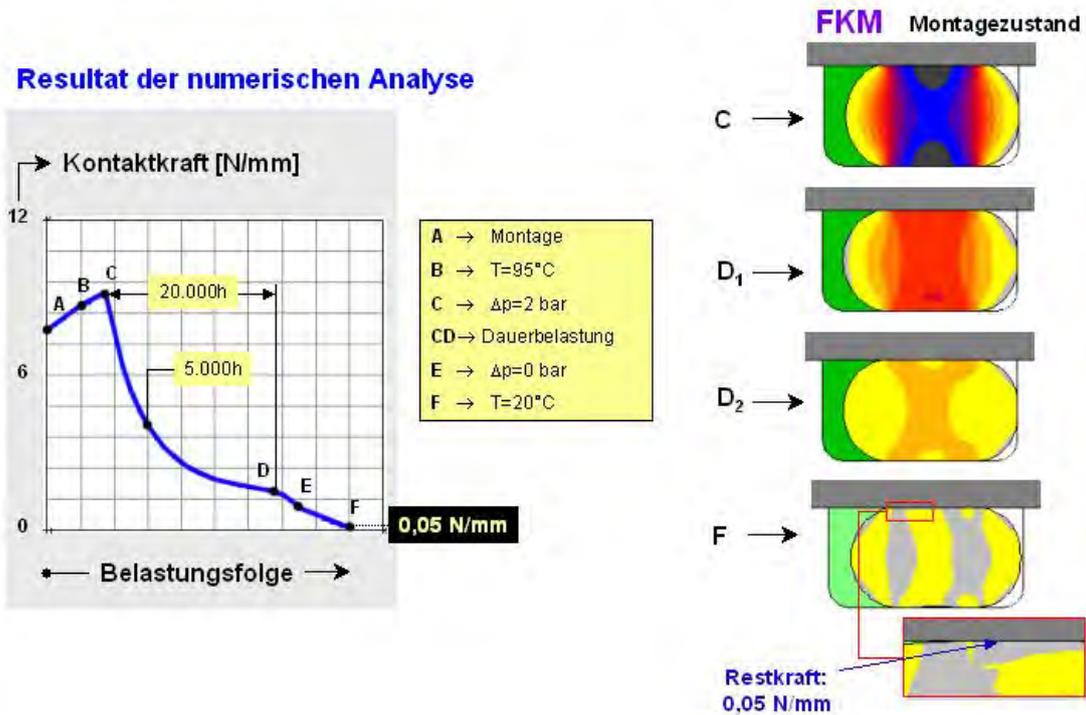


Abb. 3: Ergebnisse der Finiten Elemente Analyse einer FKM O-Ring-Abdichtung unter Langzeitgesichtspunkten. Auf der rechten Seite sind Momentaufnahmen von Computeranimationen zu sehen, welche die Spannungsverteilung im Querschnitt des O-Ringes zu verschiedenen Zeiten anzeigen; während das Diagramm auf der linken Seite die Entwicklung der resultierenden Dichtkraft im Verlauf der aufgetragenen Lastschritte (Belastungsfolge) zeigt.

2.3 Volumenquellung eines O-Rings

Ein anschauliches Beispiel für Quellen und Schrumpfen eines elastomeren Werkstoffes kann aus der Dichtungstechnik geliefert werden. Abb. 4 zeigt einen O-Ring (Halbschnitt), der ein flüssiges oder gasförmiges Medium nach außen abdichtet.

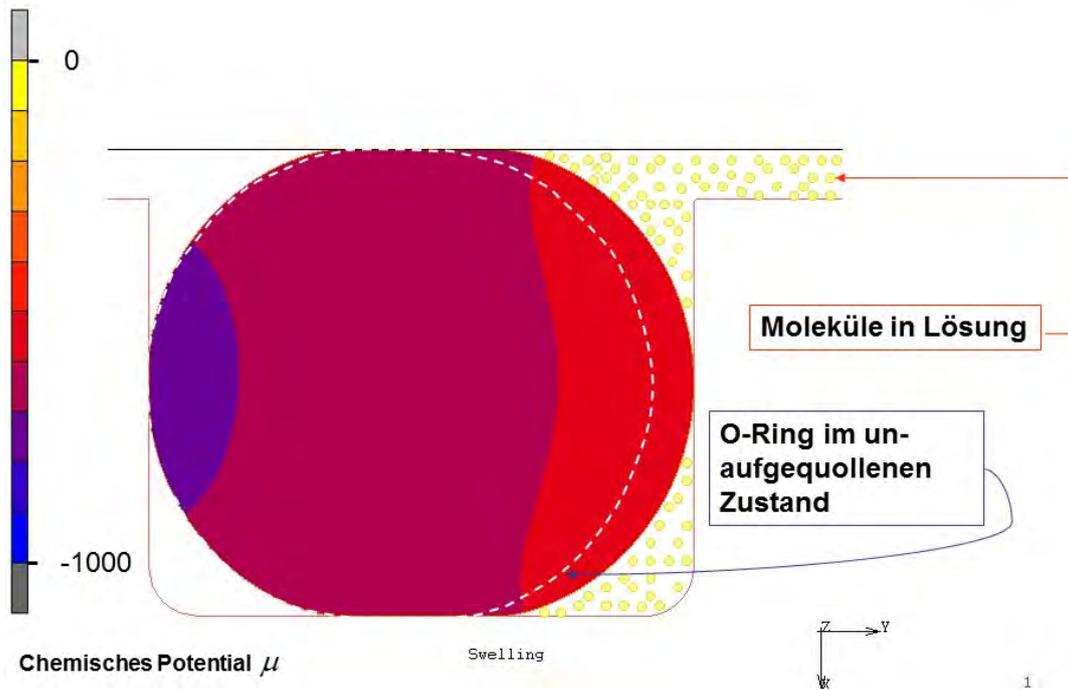


Abb. 4: Eine Abdichtung (O-Ring). Moleküle des in Kontakt stehenden Mediums lösen sich in den elastomeren Dichtungswerkstoff ein und quellen in auf; gezeigt ist das chemische Potential (Farbkontour-Plot). Erst wenn das chemische Potential im Querschnitt überall Null ist, hört der Quellvorgang auf und das chemische als auch das mechanische Gleichgewicht haben sich eingestellt.

Zunächst ergibt sich ein Gefälle in der Konzentration der gelösten Moleküle mit der Konsequenz, dass auch die dem Medium zugewandten Bereiche der Dichtung stärker quellen als die weiter entfernten Bereiche. Der Quellvorgang kommt zu seinem Ende, wenn das chemische Potential μ in der Dichtung homogen verteilt ist (siehe Abb. 5f)

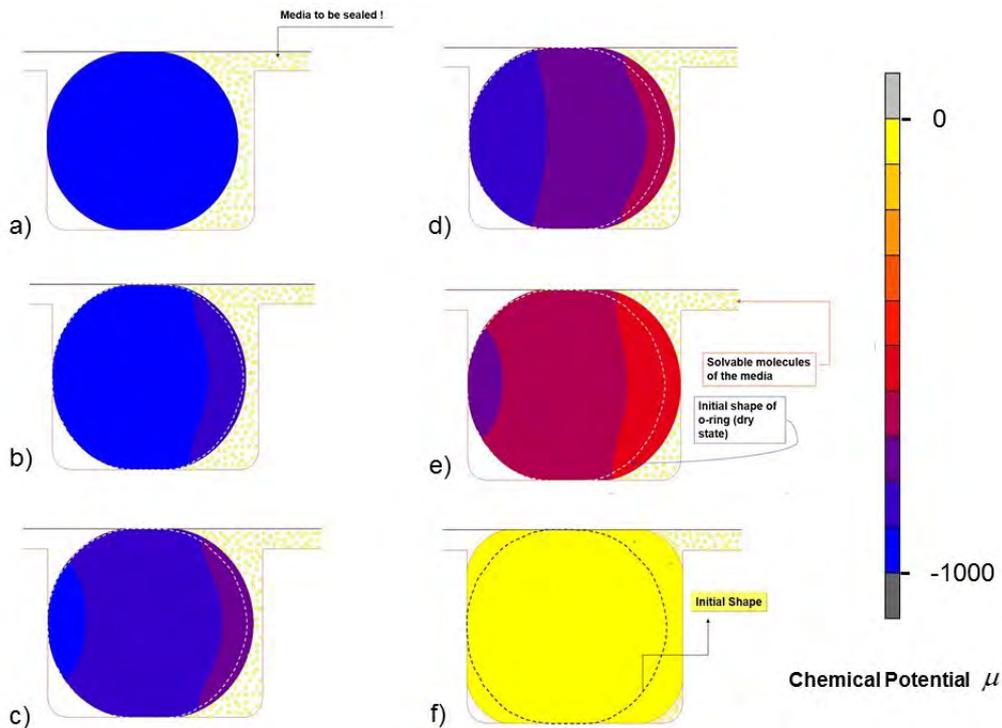


Abb. 5: Der Quellvorgang hört auf (f), wenn das chemische Potential im ganzen Querschnitt der Dichtung gleich ist (Gleichgewichtsquellung) und den Wert Null angenommen hat.

Zur Verwendung eines passenden Materialgesetzes für ein quellendes Elastomer in einer Finiten Elemente Analyse hat man zunächst die freie Energie-Funktion des Polymers um die sogenannten Mischungsbestandteile der Entropie und der Energie zu erweitern. In Abb. 6 wird ein entsprechendes physiko-chemisches Modell wiedergegeben, das ausgehend von einem Neo-Hooke'schen Materialgesetz die Mischungsentropie und die Wechselwirkungsenergie der im elastomeren Netzwerk gelösten Moleküle berücksichtigt.

Hierin ist q der Quellgrad (reziproker Schrumpfgrad), χ der Wechselwirkungsparameter; μ das chemische Potential; γ das Volumen eines gelösten Moleküls und σ_{iA} der Spannungstensor bezogen auf die unverformte Konfiguration sowie \mathbf{F} steht für den Deformationsgradienten. Die freie Energie W in Abb. 6 hat zwei Variable, nämlich \mathbf{F} (mechanisch) und q (physiko-chemisch). Gleichgewicht herrscht, wenn die Ableitung der freien Energie in Fig.6, abgeleitet nach jeweils einer der beiden Variablen, für sich verschwindet. Die dualen Größen, deren Bestimmung hierdurch möglich wird, sind der Spannungszustand (Spannungstensor) und das chemische Potential μ . In dem Ausdruck für den Cauchy'schen Spannungstensor in Abb. 6 kann man sehr schön erkennen, dass es einen kugelsymmetrischen Anteil der Spannung gibt, der durch den Quellvorgang definiert ist. Dieser Anteil wird als osmotischer Druck interpretiert und äußert sich als Druckwirkung von innen nach außen gegen die Oberfläche des Polymers.

Physiko-chemisches Modell:

Freie Energie eines quellenden Elastomeren :

$$\hat{W} \equiv \Delta \hat{\phi} = kTn_2 \left[(q-1) \ln \frac{q-1}{q} + \chi \frac{q-1}{q} \right] - \frac{\mu}{\gamma} (q-1) - \sigma_{iK} (C_{jK} - \delta_{jK}) + \frac{kTn_2}{2} (tr(\mathbf{F}^T \mathbf{F}) - 2 \ln q - 3)$$

$$I_1 = tr(\mathbf{F}^T \mathbf{F}) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2;$$

$$\sqrt{I_3} = J = q = v_2^{-1} = \frac{V}{V_0} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 + \gamma C$$

„klassisch“, aber modifiziert

Materialgleichung der Spannung:

$$t_{ij} = n_2 kT \left[q^{-1/3} \bar{B}_{ij} + \delta_{ij} \left\{ \frac{1}{n_2 \gamma} \left(\ln \frac{q-1}{q} \right) + \frac{1-n_2 \gamma}{q} + \frac{\chi}{q^2} - \frac{\mu}{kT} \right\} \right]$$

NEU !!!

„klassisch“

Osmotischer Druck!

Abb. 6: Zusammenfassung der wichtigsten Formeln zur Beschreibung der Materialeigenschaften und Zustandsänderungen von gequollenen Elastomeren

3 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass der Nutzen einer modernen Materialcharakterisierung für die Polymertechnik darin besteht, Systeme durch geeignete Modelle nachzubilden. Damit können Konzepte im Entwurfsstadium an geeigneten numerischen Modellen virtuell erprobt werden, ohne dass sofort ein Prototyp hergestellt werden muss. Der numerischen Simulationstechnik kommt daher eine wachsende Bedeutung zu, da mit ihrer Hilfe Entwicklungszeiten und -kosten eingespart werden können. Es entstehen Modelle, deren statische und dynamische Eigenschaften mit denen des nachzubildenden Systems weitgehend übereinstimmen. Auf die Frage: „... Was passiert, wenn ...?“ kann ein mit den erforderlichen Ressourcen ausgestatteter Polymerkomponentenhersteller durch numerische Untersuchungen am Modell schnell, zuverlässig und kostengünstig verbindliche Antworten finden. Wichtig dabei ist, dass der Werkstoff adäquat beschrieben wird; und dies stellt im Falle polymerer Bauteile wegen der ausgeprägten nichtlinearen Eigenschaften dieser Werkstoffklasse hohe Ansprüche an den Software-Entwickler aber auch den Software-Anwender.

Dank umfangreicher Rechner-Simulationen lassen sich wichtige Eigenschaften von Polymerbauteilen heutzutage schon lange bevor die ersten Bauteile tatsächlich hergestellt werden voraussagen. Da die ersten Prototypen somit bereits mehrere Optimierungszyklen durchlaufen haben, kann die reale Erprobung bereits mit einem seriennahen und funktionssicheren Produkt erfolgen. Das spart Zeit und Geld. Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Vorteil der Berechnung ist, dass neben dem eigentlichen Ergebnis ein tieferes Verständnis der Produkteigenschaft gewonnen werden kann. Die Berechnung ist daher häufig in der Lage, Zusammenhänge aufzuzeigen, die im Experiment oft verborgen bleiben.

Berechnung und Simulation sind deshalb heute mehr denn je wichtige, nutzbringende und somit unverzichtbare Werkzeuge im Entwicklungsprozess, die allerdings heute und wohl auch in Zukunft den realen Versuch ergänzen, aber nie vollständig ersetzen können.

Die im letzten Abschnitt gemachten Ergänzungen bieten nun die Möglichkeit innerhalb strukturmechanischer Finite Elemente Programme auch physiko-chemische Effekte wie die Quellung sowie ihre Rückwirkungen auf das mechanische Verhalten von Elastomerbauteilen im Detail zu analysieren.

4 Literatur

- [1] L.R.G. Treloar, "The Physics of Rubber Elasticity", 3rd ed., Oxford University Press, London 1975
- [2] I. Müller, Vorlesungskript: "Thermodynamics and Statistical Mechanics of Rubber", John Hopkin University, Baltimore, 1970
- [3] R.S. Rivlin, "Large Elastic Deformations" in Rheology: "Theory and Application", Vol 1, F.R. Eirich, Ed., Academic Press, New York, 1956
- [4] R.S. Rivlin, Charles Goodyear Medal Address, "The Elasticity of Rubber", Rubber Chem. Technology 65, 1992
- [5] I. Müller "Thermodynamics", Pitman, 1986
- [6] P.J. Flory, „Principles of Polymer Chemistry“, Cornell University Press, Ithaca and London, 12th, Edition 1983
- [7] A. Morro, I. Müller "A study of swelling and collapse in polyelectrolyte gels", Rheologica Acta 27, 44 (1988)

Zeitspektrale Methode für inkompressible, viskose Strömungen für industrielle Anwendungen

Sabine Baumbach
(Volkswagen AG)

Arthur Stück
(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
Institut für Softwaremethoden zur Produkt-Virtualisierung)

Während stationäre numerische Strömungssimulationen (CFD) ein fester Teil des Produktentstehungsprozesses sind, werden instationäre Strömungssimulationen nur in Ausnahmefällen durchgeführt. Durch die zunehmenden Anforderungen im Entwicklungsprozess steigt auch das Interesse an instationären Strömungssimulationen. Zeitlich aufgelöste Strömungssimulationen stellen jedoch hohe Anforderungen an Speicher- und Rechenressourcen dar, daher wird nach Alternativen für zeitlich-periodische Strömungen gesucht.

Bei zeitlich-periodischen Strömungen ist es naheliegend, in der zeitlichen Diskretisierung die Periodizität zu berücksichtigen. Ein geeigneter Ansatz für diese Strömungen ist die Time Spectral Method (TSM) oder auch die Harmonic Balance Method (HBM) [1, 2, 3]. Bei der TSM werden die Strömungsgrößen als Fourier-Polynome mit einer Grundfrequenz approximiert. Bei der TSM kann eine Periode durch eine geringe Anzahl an Kollokationspunkten aufgelöst werden. Außerdem wird direkt nach der periodischen Antwort des Systems gelöst. Bei den gängigen Zeitschrittverfahren werden im Allgemeinen kleine Zeitschritte genutzt, und es müssen mehrere Perioden berechnet werden, bevor das System eingeschwungen ist. Durch die Modellreduktion in der Zeit hat die TSM gegenüber Zeitschrittverfahren das Potential, Rechenzeit zu sparen. In der Vergangenheit wurde die TSM von unterschiedlichen Autoren [2, 4, 8] weiterentwickelt. Diese Entwicklungen basieren hauptsächlich auf kompressiblen Lösern. Bisher sind daher nur wenige Arbeiten zu inkompressiblen Strömungen bekannt [5, 6].

In der vorliegenden Arbeit wird die Herleitung und Implementierung der TSM in einen Druckkorrektur-Algorithmus untersucht und die Anwendbarkeit der Methode mittels verschiedener Strömungsprobleme nachgewiesen. Die Strömung um ein flatterndes Flügelprofil und um einen Schiffspropeller werden berechnet. Hierzu werden sowohl Zeitschrittverfahren, wie auch die TSM genutzt und die Ergebnisse beider Verfahren einander gegenübergestellt. Anhand dieser Fälle werden die Potentiale und die Grenzen der TSM für inkompressible Strömungen in der Industrie aufgezeigt.

1 Einleitung

Verschiedene zeitspektrale Methoden zur Berechnung kompressibler Strömungen sind bekannt. Am weitesten verbreitet sind die Time Linearized Frequency Domain Method (TLFDM) und die Time Spectral Method (TSM) [1, 2, 3]. Durch die Linearisierung in der Zeit ist die TLFDM sehr effizient, allerdings können Effekte wie Sekundärströmungen und Strömungsablösungen nicht ausreichend abgebildet werden [16]. Um auch nichtlineare Effekte modellieren zu können, ist die TSM entwickelt worden. Typische Anwendungen der TSM sind: die Berechnung von Turbomaschinen, die Strömung um Flügelprofile und die Analyse von Helikoptermanövern [17, 18, 19].

Bei der TSM werden die Strömungsvariablen mit Fourier-Polynomen einer Grundfrequenz approximiert. Mehrere Vielfache der Grundfrequenz, auch Harmonische genannt, können zur Approximation der Strömungsgrößen genutzt werden. Bei einer Anzahl von N Harmonischen resultiert ein System von $2N + 1$ gekoppelten Gleichungen an $2N + 1$ in der Periode äquidistant verteilten Kollokationspunkten. Durch die Diskretisierung mit TSM resultiert ein zeitspektraler Matrixoperator. Es ergibt sich ein nichtlineares System, wo die einzelnen Kollokationspunkte gekoppelt sind. Der zeitspektrale Operator reduziert die diagonale Dominanz der linearen Lösungsmatrix, und die Eigenwerte des linearen Systems erhöhen sich. Daher ist die Wahl eines geeigneten linearen Löserns und Vorkonditionierers entscheidend.

Eine Reihe von Autoren haben unterschiedliche Techniken vorgeschlagen, um die Robustheit und die Performance der zeitspektralen Navier-Stokes-Verfahren zu verbessern [4, 8]. Um das gekoppelte System zu stabilisieren, verwenden Sicot, Puigt und Montagnac [7] ein implizites Zeitschrittverfahren, während Mundis und Mavriplis [12] ein inexaktes Newton-Verfahren nutzen. Innerhalb jeder Newton-Iteration wird ein lineares System gelöst. Mundis und Mavriplis [12] untersuchen unterschiedliche Vorkonditionierer und lineare Löser, um das System effizient zu lösen. Sie legen den Fokus auf eine blockweise Vorkonditionierung des gekoppelten Systems. Die genutzten Techniken basieren jedoch auf der dichte-basierten Formulierung und können daher nicht direkt für inkompressible Strömungen genutzt werden.

Es gibt nur wenige Ansätze, wo die TSM auf inkompressible Strömungen erweitert wird. Jameson [6] entwickelt einen dichte-basierten TSM-Löser für inkompressible Strömungen mittels der Artificial Compressibility Method. Welch, Milanovic und Zaman [13] lösen statt der Navier-Stokes-Gleichungen die Wirbelstärke-Stromfunktion zeitspektral. Eine Erweiterung dieser Methode auf 3-dimensionale Strömungsprobleme ist jedoch schwierig. Luder [5] nutzt die TSM innerhalb eines Druckkorrektur-Verfahrens. Das gekoppelte System löst er über ein Block-gekoppeltes Gauß-Seidel-Verfahren. Hier zeigt sich, dass die Konvergenz abhängig ist vom Unterrelaxationsfaktor, der höchsten Frequenz und der Anzahl an Harmonischen.

Bei einem robusten Lösungsschema bietet die TSM für zeitlich-periodische Strömungen diverse Vorteile gegenüber Zeitschrittverfahren. Um einen periodischen Zustand zu erreichen, sind bei herkömmlichen Zeitschrittverfahren kleine Zeitschritt notwendig, und es müssen meist mehrere Perioden berechnet werden. Im Gegensatz dazu kann bei der TSM eine Periode über eine geringe Anzahl an Kollokationspunkten aufgelöst werden. Jeder Zeitschritt innerhalb einer Periode kann aus der Strömung an den Kollokationspunkten rekonstruiert werden. Bei Zeitschrittverfahren müssen meist mehrere Perioden berechnet werden bevor ein periodischer Zustand erreicht wird, demgegenüber löst die TSM direkt nach dem periodischen Zustand. Bei ausreichender Approximation des Strömungsproblems mit Kollokationspunkten weist die TSM zudem eine spektrale Genauigkeit in der Zeit auf.

2 Time Spectral Method

Bei der Herleitung der TSM wird von den inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen gestartet. Diese formen ein System integraler Erhaltungsgleichungen

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{W}) d\Omega = \mathbf{0}, \quad \text{Gl. 1}$$

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{u} \end{pmatrix}, \quad \text{Gl. 2}$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho \mathbf{u} \\ \rho(\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) + p\mathbf{I} - 2\mu \mathbf{S}(\mathbf{u}) \end{pmatrix}, \quad \text{Gl. 3}$$

$$\mathbf{S}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad \text{Gl. 4}$$

wo \mathbf{u} die Geschwindigkeit, ρ die Dichte, p der Druck, \mathbf{I} die Einheitsmatrix, \mathbf{S} der Deformationstensor, \mathbf{F} der Flussvektor und \mathbf{W} die Erhaltungsgrößen sind.

Die Differentialform der Erhaltungsgleichungen mit den räumlichen Residuenanteilen $\mathbf{R}(\mathbf{W})$ ist gegeben mit

$$\mathbf{V} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \mathbf{R}(\mathbf{W}) = \mathbf{0}. \quad \text{Gl. 5}$$

Die Erhaltungsgrößen und der Residuenterm werden mit Fourier-Polynomen der Grundfrequenz f approximiert

$$\widehat{\mathbf{W}}_m = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=0}^{2N} \mathbf{W}_n e^{-im2\pi fn\Delta t}, \quad \text{Gl. 6}$$

$$\hat{R}_m = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=0}^{2N} R_n e^{-im2\pi fn \Delta t}, \quad \text{Gl. 7}$$

wo m die Wellenzahl und n die Kollokationspunkte sind. Die höchste aufgelöste Harmonische ist mit N gegeben. Jede Wellenzahl korreliert mit der Frequenz $f_m = mf$. Die Rücktransformation in den Zeitraum ist nachfolgend zu sehen

$$W_n = \frac{1}{2N+1} \sum_{m=0}^{2N} \hat{W}_m e^{-im2\pi fn \Delta t}, \quad \text{Gl. 8}$$

$$R_n = \frac{1}{2N+1} \sum_{m=0}^{2N} \hat{R}_m e^{-im2\pi fn \Delta t}. \quad \text{Gl. 9}$$

In Matrixschreibweise wird die Transformation in den Frequenzraum über die Matrix ξ und die Rücktransformation in den Zeitraum über die Matrix ξ^{-1} dargestellt

$$\hat{W}_m = \xi W_n \text{ und } W_n = \xi^{-1} \hat{W}_m. \quad \text{Gl. 10}$$

Durch Einsetzen von Gl. 8 und Gl. 9 in Gl. 5 resultiert

$$\sum_{m=-N}^N \left(im2\pi fn V \hat{W}_m + \hat{R}_m(\hat{W}_m) \right) e^{im2\pi fn \Delta t} = 0. \quad \text{Gl. 11}$$

Für jede Frequenz f_m muss die Bedingung

$$im2\pi fn V \hat{W}_m + \hat{R}_m(\hat{W}_m) = 0 \quad \text{Gl. 12}$$

erfüllt sein. Eine Rücktransformation der Gl. 12 in den Zeitraum führt zu

$$\xi^{-1} i2\pi f_m n I \xi V W_n + \xi^{-1} \xi R_n(W_n) = 0, \quad \text{Gl. 13}$$

wo die einzelnen Kollokationspunkte über den zeitspektralen Operator $D_n = \xi^{-1} i2\pi f_m n I \xi$ miteinander gekoppelt sind. An jedem Kollokationspunkt wird ein Gleichungssystem der Form

$$V \sum_{m=-N}^N d_m W_{n+m} + R_n(W_n) = 0 \quad \text{Gl. 14}$$

gelöst.

Für eine ungerade Anzahl an Kollokationspunkten innerhalb einer Periode lässt sich der zeitspektrale Operator berechnen zu

$$D_n(W) = \sum_{m=-N}^N d_m W_{n+m}, \quad \text{Gl. 15}$$

$$d^m = \begin{cases} \frac{\pi}{T} (-1)^{m+1} \\ \sin\left(\frac{\pi m}{2N+1}\right), \text{ if } m \neq 0. \\ 0, \text{ if } m = 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 16}$$

3 Druck-Geschwindigkeitskopplung

3.1 SIMPLE-Algorithmus

Zur Lösung der inkompressiblen Erhaltungsgleichungen wird der SIMPLE-Algorithmus (SIMPLE: Semi-Implicit-Method for Pressure-Linked Equations) [20] genutzt. Das Geschwindigkeits- und Druckfeld werden dabei in einen Schätzer $(\)^*$ und eine Korrektur $(\)'$ zerlegt

$$\mathbf{u}^k = \mathbf{u}^{k*} + \mathbf{u}^{k'}, \quad \text{Gl. 17}$$

$$\mathbf{p}^k = \mathbf{p}^{k-1*} + \mathbf{p}^{k'}. \quad \text{Gl. 18}$$

Der hochgestellte Index $(\)^k$ gibt dabei die aktuelle Druckkorrektur-Iteration an.

Das SIMPLE-Verfahren unterteilt sich in zwei Teilschritte. Im ersten Schritt, dem Prediktor, wird ein Geschwindigkeitsfeld \mathbf{u}^{k*} auf Basis des alten Druckfeldes berechnet. Im zweiten Schritt, dem Korrektor, wird eine Druckkorrektur-Gleichung $\mathbf{p}^{k'}$ für ein neues Druckfeld gelöst. Dieses Druckfeld wird dann genutzt, um die Geschwindigkeit zu korrigieren. Im ersten Schritt wird also formal die Impulsgleichung gelöst und im zweiten eine Druckkorrektur-Gleichung. Beide Gleichungssystem sind nachfolgend im Matrixformat zu sehen.

Prediktor:

$$A_c^k \mathbf{u}_c^{k*} - \sum_l A_l^k \mathbf{u}_l^{k*} = -\nabla \mathbf{p}_c^{k-1*} + \mathbf{Q}(\mathbf{u}^{k-1}) \quad \text{Gl. 19}$$

Korrektor:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}^{k*}) = \nabla \cdot \left(\rho \frac{\sum_l A_l^k \mathbf{u}_l^{k'}}{A_c^k} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{A_c^k} (\nabla \mathbf{p}_c^{k'}) \right) \quad \text{Gl. 20}$$

Die lineare Lösungsmatrix ist mit \mathbf{A} gegeben, die Quellterme sind in \mathbf{Q} enthalten, und die diagonalen Terme für jede Zelle „c“ sind mit dem tiefstehenden Index $(\)_c$ gekennzeichnet und die Nebendiagonalterme mit dem tiefstehenden Index $(\)_l$. Bei diesem Druckkorrektur-Verfahren werden die Terme, die die Geschwindigkeitskorrektur enthalten, vernachlässigt.

3.2 TSM-Diskretisierung innerhalb des SIMPLE-Algorithmus

Durch die zeitspektrale Diskretisierung enthält die Impulsgleichung einen zusätzlichen Term. Im Prediktor wird daher ein Gleichungssystem der Form

$$A_{c,n}^k \mathbf{u}_{c,n}^{k*} - \sum_l A_{l,n}^k \mathbf{u}_{l,n}^{k*} + \mathbf{D}_n(\mathbf{u}_c^{k*}) = -\nabla \mathbf{p}_{c,n}^{k-1*} + \mathbf{Q}(\mathbf{u}_n^{k-1}) \quad \text{Gl. 21}$$

gelöst. Der zeitspektrale Operator ist mit $\mathbf{D}_n(\mathbf{u}_c^{k*})$ gegeben. Jeder Kollokationspunkt ist durch den tiefgestellten Index $(\)_n$ gekennzeichnet. Für eine Anzahl von N Harmonischen müssen $2N + 1$ lineare Gleichungssysteme gelöst werden.

Da die Druckkorrektur-Gleichung keine Zeitableitung enthält, sind die Gleichungen an den Kollokationspunkten n nicht gekoppelt. Es werden also $2N + 1$ nicht gekoppelte Druckkorrektur-Gleichungen der Form

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_n^{k*}) = \nabla \cdot \left(\frac{1}{A_{c,n}^k} (\nabla \mathbf{p}_{c,n}^{k'}) \right) \quad \text{Gl. 22}$$

gelöst.

5 Anwendungen

5.1 Strömung um ein flatterndes Profil

Um die Performance der TSM gegenüber Zeitschrittverfahren zu bewerten, wird die laminare Strömung um ein oszillierendes NACA0012-Profil berechnet. Das Profil oszilliert um ein Viertel der Sehnenlänge mit

$$\gamma = \sum_{f=1}^3 a \cdot \sin(2\pi f t). \quad \text{Gl. 23}$$

Die Amplitude a , die Reynoldszahl Re und die reduzierte Frequenz f_r für den vorliegenden Berechnungsfall sind in Tab. 1 zu finden. Die reduzierte Frequenz ist definiert über $f_r = \frac{\text{Sehnenlänge} \cdot 2\pi f}{|u|}$.

Parameter	a (Grad)	Re	f_r
Wert	5	100	9,4248

Tab. 1 Parameter für das oszillierende Profil

Die Berechnungen werden mit einem Zeitschrittverfahren zweiter Ordnung und einem festen Zeitschritt $\Delta t = 2,5 \times 10^{-4}$ s durchgeführt. Um sicherzustellen, dass ein periodischer Zustand erreicht wird, werden insgesamt zehn Perioden berechnet. Das Netz ist vollstrukturiert und besteht aus 12.950 Zellen. Es werden außerdem Berechnungen mit $N = [4, 7, 11, 20]$ Harmonischen durchgeführt. Die räumlichen Terme sind mit einem Stromaufwärts-Verfahren zweiter Ordnung diskretisiert. Die Zeit- und Netzkonvergenz wurden in vorangegangenen Studien untersucht [15].

Zum Vergleich zwischen den Berechnungen mit Zeitschrittverfahren und TSM werden der Auftriebs- und Widerstandsbeiwert analysiert. Die Koeffizienten sind definiert über

$$c_l = \frac{F_l}{\frac{\rho}{2u^2} \cdot A}, \quad \text{Gl. 24}$$

$$c_d = \frac{F_d}{\frac{\rho}{2u^2} \cdot A}, \quad \text{Gl. 25}$$

wo F_l die Auftriebskraft, F_d die Widerstandskraft und A die Wirkfläche sind.

Die Beiwerte über den Anstellwinkel auf dem mittleren und feinen Netz sind in Abb. 3 zu sehen. Bei den TSM-Berechnungen stellen die Punkte die Lösung an den Kollokationspunkten dar. Die Werte dazwischen sind aus den Fourier-Koeffizienten rekonstruiert worden.

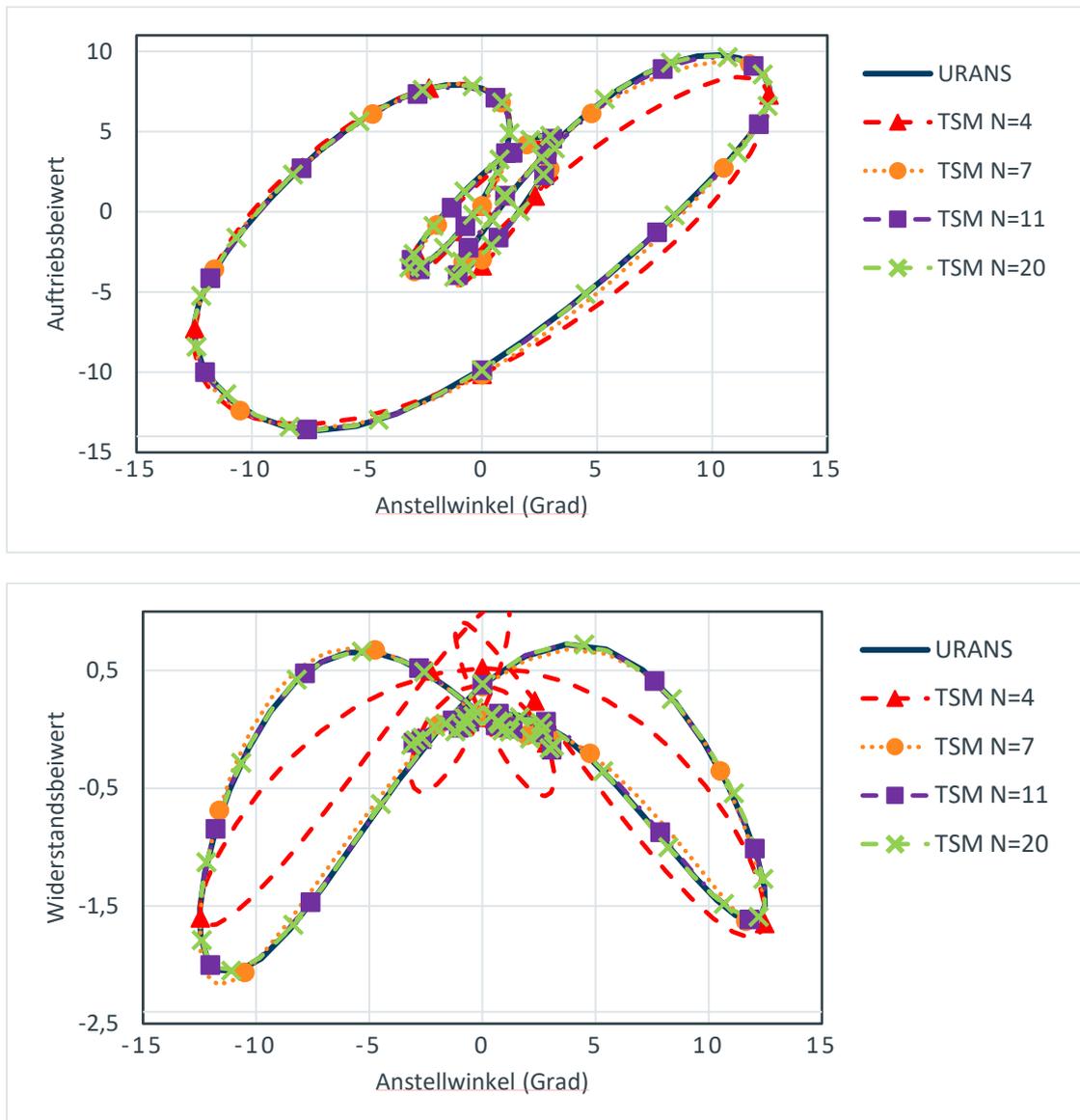


Abb. 3: Auftriebs- und Widerstandsbeiwert über Anstellwinkel

Die TSM-Ergebnisse geben den allgemeinen Verlauf der Beiwerte gut wieder. Mit zunehmender Anzahl an Harmonischen nähern sich die TSM-Ergebnisse den Ergebnissen des Zeitschrittverfahrens. Auf dem mittleren Netz reichen elf Harmonische um die instationären Koeffizienten abzubilden, während auf dem feinen Netz zwanzig Harmonische notwendig sind. Auf dem mittleren Netz sind weniger Harmonische notwendig, da Effekte höherer Wellenzahlen gedämpft werden. Die Auswertung der Rechenzeiten zeigt, dass bei mehr als zwölf Harmonischen die TSM langsamer ist als herkömmliche Zeitschrittverfahren.

5.2 Propeller in Scherströmung

Nun wird die Scherströmung um einen Propeller berechnet. Der Propeller besteht aus vier Flügeln, wie in Abb. 4 zu sehen. Die Schergeschwindigkeit am Einlass des Gebiets ist gegeben mit

$$\mathbf{u}_2(x_1) = \mathbf{u}_\infty + \frac{d\mathbf{u}_2}{dx_1} \cdot x_1 \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}}. \quad \text{Gl. 26}$$

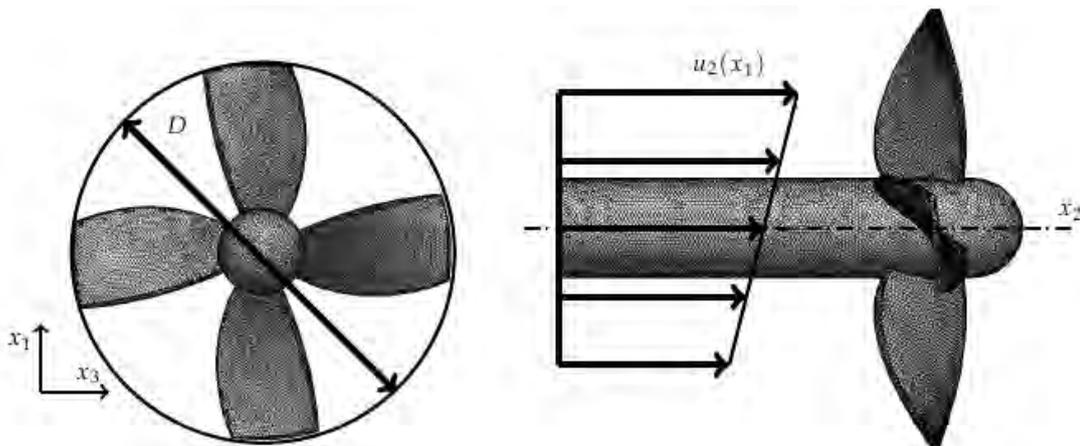


Abb. 4: Propeller in Front- und Seitansicht

Der Propeller mit Durchmesser D rotiert um die x_2 -Achse mit der Rotationsgeschwindigkeit n . Der Fortschrittsgrad ist

$$J = \frac{u_\infty}{nD} \quad \text{Gl. 27}$$

Eine Zusammenfassung aller Parameter kann Tab. 2 entnommen werden.

Parameter	J	Re	$\frac{du_2}{dx_1}$
Wert	0,768	$1,048 \times 10^6$	1,67

Tab. 2 Parameter für den Propeller in Scherströmung

Da es sich um eine vollturbulente Strömung handelt, wird das Spalart-Allmaras-Turbulenzmodell genutzt. Das Netz besteht aus 309.969 Kontrollvolumen, und es handelt sich um unstrukturiertes Polyeder-Netz mit Randschichten. Ein Zeitschrittverfahren zweiter Ordnung mit einem Zeitschritt von $\Delta t = 7 \times 10^{-6}$ s wird genutzt. Zeitspektrale Rechnungen mit $N = [1, 5, 10, 15, 20, 30]$ Harmonischen werden ebenfalls durchgeführt. Bei der Verwendung von Zeitschrittverfahren werden insgesamt 15 Perioden berechnet. Die instationären Berechnungen werden mit einer stationären Berechnung initialisiert.

Für die Analyse der Berechnungen wird der Schubbeiwert herangezogen. Dieser ist definiert zu

$$c_t = \frac{\Delta p A_0}{\rho n^2 D^4} \quad \text{Gl. 28}$$

wo Δp die Druckdifferenz auf der Fläche A_0 des Propellers ist. Durch die unsymmetrische Anströmung im Einlass oszilliert der Schubbeiwert mit der Blattfolgefrequenz. Die Blattfolgefrequenz ergibt sich als Produkt aus der Grundfrequenz und der Anzahl an Flügeln.

Der Schubbeiwert über die physikalische Zeit ist in Abb. 5 zu sehen. Außerdem ist auch der Schubbeiwert aus der stationären Berechnung eingezeichnet. Auch hier repräsentieren die Punkte bei den TSM-Berechnungen wieder die Ergebnisse an den Kollokationspunkten und die Werte dazwischen ergeben sich aus der Rekonstruktion der Fourier-Koeffizienten.

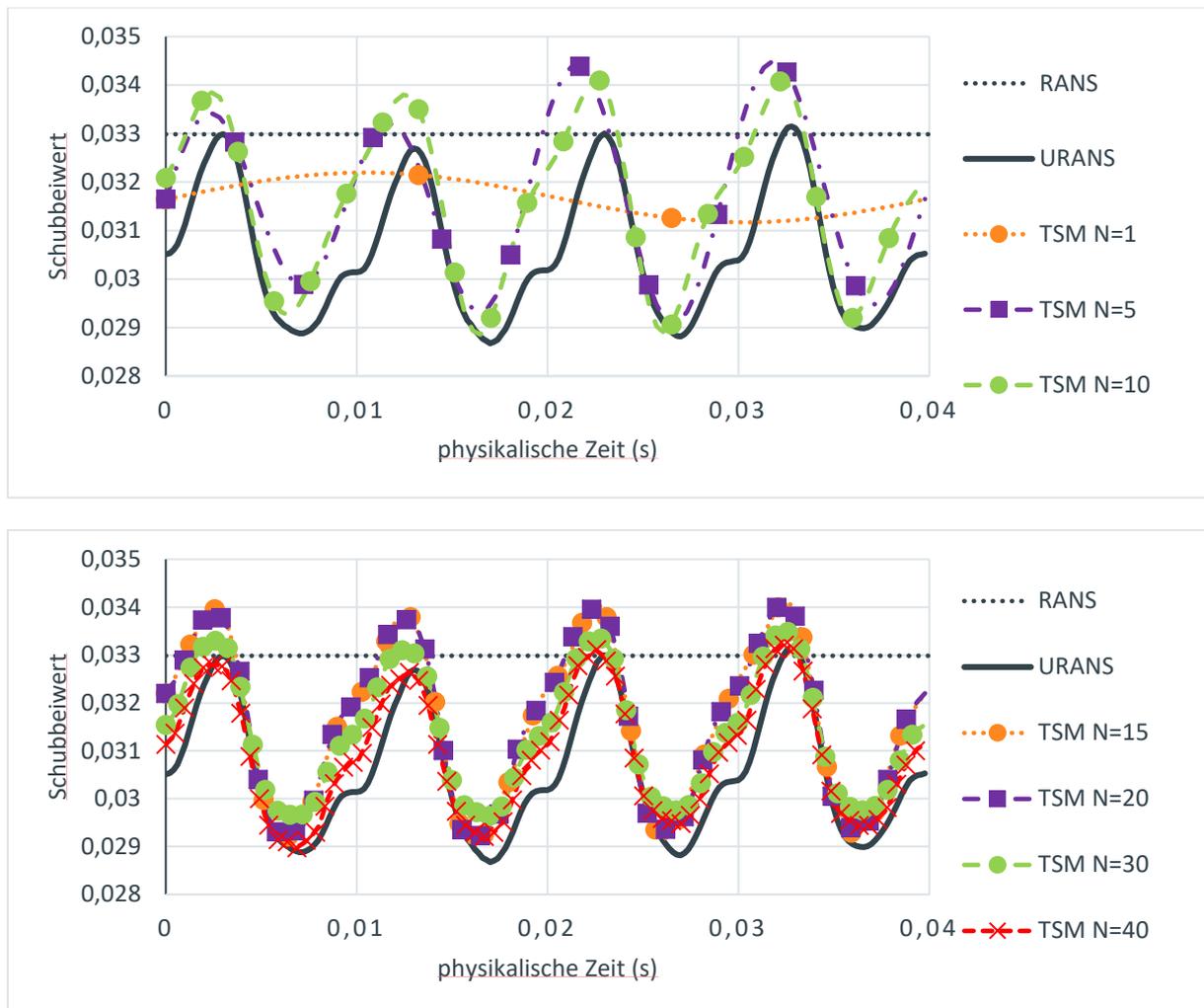


Abb. 5: Schubbeiwert über der physikalischen Zeit für den Propeller

Die Ergebnisse vom Zeitschrittverfahren und aus der TSM liegen in der gleichen Größenordnung. Dennoch ist es auch mit 40 Harmonischen nicht möglich, den instationären Schubbeiwert-Verlauf genau zu modellieren. Es zeigt sich jedoch, dass mit zunehmender Anzahl an Harmonischen die Verläufe gegen das Ergebnis aus dem Zeitschrittverfahren konvergieren. Der Break-Even der Performance von TSM gegenüber Zeitschrittverfahren ist bereits bei fünf Harmonischen erreicht. Die TSM ist hier nicht mehr effizienter als Zeitschrittverfahren und zudem ist diese Anzahl an Harmonischen nicht ausreichend um den instationären Strömungsverlauf akkurat abzubilden.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein zeitspektraler, inkompressibler Navier-Stokes-Löser vorgestellt. Das SIMPLE-Druckkorrektur-Verfahren wurde um die zeitspektrale Formulierung erweitert. Der zeitspektrale Operator, der zu einer Kopplung der Subsysteme nichtlinearer Gleichungen der einzelnen Harmonischen führt, wurde dabei besonders behandelt. Für die linearen Gleichungssysteme, die innerhalb des zeitspektralen SIMPLE-Algorithmus auftreten, wird ein iLU-vorkonditioniertes GMRES-Verfahren zum Lösen genutzt. Die Methode ist in den unstrukturierten Finite-Volumen-Code OpenFOAM implementiert worden. Die entwickelte Methode wurde genutzt, um zwei komplexe Strömungsprobleme zu untersuchen. Der zeitspektrale Ansatz wurde damit erfolgreich gegenüber herkömmlichen Zeitschrittverfahren für instationäre Navier-Stokes-Probleme verifiziert. Es wurde nachgewiesen, dass die TSM auch für komplexe industrielle Strömungsprobleme mit hohen Frequenzen geeignet ist. Bei dem oszillierenden Profil zeigt die TSM gegenüber dem Zeitschrittverfahren einen

Gewinn an Rechenzeit. Bei dem Propeller in Scherströmung zeigt sich mit zunehmender Anzahl an Harmonischen, dass die TSM-Ergebnisse gegen den instationären Schubbeiwert-Verlauf konvergieren. Da jedoch eine hohe Anzahl Harmonischer benötigt wird, muss die aktuelle TSM-Implementierung weiter verbessert werden, um mit der Performance von Zeitschrittverfahren mithalten zu können.

7 Danksagungen

Die Autoren danken der Technischen Entwicklung von Volkswagen Salzgitter für die Unterstützung. Die Arbeit wäre außerdem nicht möglich gewesen ohne die Hilfe der Methodenentwicklung von Volkswagen in Wolfsburg.

8 Literatur

- [1] Hall, K.; Thomas, J and Clark, W.: "Computation of Unsteady Nonlinear Flows in Cascades Using a Harmonic Balance Technique", *AIAA Journal*, 40(5), 2002, 879-886
- [2] McMullen, M.: "The application of non-linear frequency domain methods to the euler and navier-stokes equations", Phd-thesis, 2003
- [3] Gopinath, A.: "Efficient Fourier-Based Algorithms for Time-Periodic unsteady problems", Dissertation, 2007
- [4] Mavriplis, D. and Yang, Z.: "Time Spectral Method for Periodic and Quasi-Periodic Unsteady Computations on Unstructured Meshes", *Math. Model. Nat. Phenom.*, 6(3), 2011, 213-236
- [5] Luder III, A.: "A Block-Jacobi Time-Spectral Method for Incompressible Flow", Dissertation, 2013
- [6] A. Jameson An Assessment of Dual-Time Stepping, Time Spectral and Artificial Compressibility based Numerical Algorithms for Unsteady Flow in Applications to Flapping Wings", 19th AIAA Computational Fluid Dynamics, 2009
- [7] Sicot, F.; Puigt, G. and Montagnac, M.: "Block-Jacobi Implicit Algorithms for the Time Spectral Method", *AIAA Journal*, 46(12), 2008, 2080-3089
- [8] Rauschenberger, P.: "Multifrequential Harmonic Balance Technique", Phd-thesis, 2008
- [9] Da Ronch, A.; McCracken, J.; Badcock, K.; Widhalm, M. and Campobasso, M.: "Linear Frequency Domain and harmonic Balance Predictions of Dynamic Derivatives", *Journal of Aircraft*, 50(3), 2013, 694-707
- [10] Mundis, N. and Mavriplis, D.: "Quasi-periodic time spectral method for aeroelastic flutter analysis", 51th AIAA Aerospace Sciences Meeting, (43), 2013, 59-69
- [11] Mundis, N. and Mavriplis, D.: "Wave-number Independent Preconditioning for GMRES Time-spectral Solvers", 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015
- [12] Mundis, N. and Mavriplis, D.: "Toward an optimal Solver for the time-spectral solutions on unstructured meshes", 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016
- [13] Welch, G.; Milanovic, I. and Zaman, K.: "Application of Harmonic Balance Technique in Synthetic Jets in Cross-Flow", 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Engineering, 2005
- [14] Balay, S.; Abhyankar, S.; Adams, M.F.; Brown, J.; Brune, P.; Buschelman, K.; Dalcin, L.; Eijkhout, V.; Gropp, W.D.; Kaushik, D.; Knepley, M. G.; May, D.A.; Curfman McInnes, L.; Tran Mills, R.; Munson, T.; Rupp, K.; Sanan, P.; Smith, B.F.; Zampini, S.; Zhang, H.; and Zhang, H., PETSc Web page, <http://www.mcs.anl.gov/petsc>, 2018
- [15] Baumbach, S.: "A study of explicit and implicit treatments of the time-spectral equations to compute incompressible flows", *Applied Mathematical Modeling*, 44, 2017, 223-235
- [16] Hall, K.; Thomas, J.; Ekici, K. and Voytovich, D.: "Frequency Domain Techniques for Complex and Nonlinear Flows in Turbomachinery", 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2003
- [17] Im, D.; Choi, S.; Kwon, H.; Park, S. and Kwon, J.: "Rotor Flow Analysis using an Implicit Harmonic Balance Method", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 55, 2011, 151-157
- [18] Butsunton, N.: "Time Spectral Method for Rotorcraft Flow with Vorticity Confinement", Phd-thesis, 2008
- [19] Ekici, K.; Hall, K. and Dowell, E.: "Computationally fast harmonic balance methods for unsteady aerodynamics predictions of helicopter rotors", *Journal of computational Physics*, 227, 2008, 6206-6225
- [20] Patankar, S.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation, 1980

Die Berechnung von optimalen Faserverläufen in Composite Strukturen mit Standard-FE-Programmen

Dr.-Ing. Herbert Moldenhauer

Dipl.-Ing. H. Moldenhauer GmbH

FE-Programme berechnen standardmäßig Hauptspannungs- (HS-) Richtungen in Bauteilen bei einer vorgegebenen Belastung. Interessant sind jedoch die HS-Linien, deren Verlauf kann als Vorlage für die optimale Platzierung von C- oder Glasfasern in Composite Strukturen angesehen werden. Kommerzielle FE-Programme bzw. Postprozessoren für die Berechnung von HS-Linien sind jedoch auf dem Markt nicht vorhanden. Der Aufsatz zeigt, dass diese Aufgabe mit Standard-FE-Programmen für ebene Strukturen und 3D-Schalen über den Umweg einer ortho-tropen Wärmeleitungsberechnung lösbar ist, sofern das FE-Programm über entsprechende Berechnungsoptionen verfügt. Dies ist z.B. der Fall für ABAQUS und ANSYS. Die statische Rechnung liefert die HS-Richtungen (1,2), die darauffolgende thermische Analyse (mit der gleichen Elementtopologie) benützt diese Richtungen für die Lokalsysteme der orthotropen Wärmeleitfähigkeiten (k_1 , k_2). Sofern die Wärmeleitfähigkeiten extrem unterschiedlich gewählt werden, sind die gerechneten Isothermen praktisch identisch mit den gesuchten HS-Linien. Faserverläufe, die den lokalen HS-Linien folgen, nützen die überragenden Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der Fasern aus.

1 Einführung

In einigen Ingenieursdisziplinen (Leichtbau, Maschinenbau, Bauingenieurwesen) sind Trajektorienbilder ein geeignetes Mittel, Spannungszustände mit besonderer Aussagekraft darzustellen, [1]. Die Tangenten an die Hauptspannungstrajektorien geben die Richtung der Hauptspannungen an, damit ist die besondere Aussage der Schubspannungsfreiheit verknüpft. Speziell im Fall der Faserverbundbauteile kann daraus ein Konstruktionsprinzip abgeleitet werden, das die überragenden longitudinalen Steifigkeits- und Festigkeitswerte von Fasern optimal ausnützt, sofern die Fasern den Richtungen der Hauptspannungen folgen [2-6].

Das primäre Ziel ist deshalb die Visualisierung und Berechnung der Spannungstrajektorien (HS-Linien). Die zu lösende Aufgabe besteht darin, die aus den FE-Programmen berechneten HS-Richtungen zu integrieren, die Kurven visuell darzustellen, die Kurvenverläufe zudem numerisch aufzubereiten, sodass deren Weiterverarbeitung in numerisch gesteuerten Faser-Legemaschinen gesichert ist. Bevor diesbezüglich eine neue Methode vorgestellt wird, die diese Aufgabe mit Standard-FE-Programmen löst, soll zunächst ein herkömmliches Standard-Integrationsverfahren untersucht werden. Weitere Verfahren sind in [1] erläutert. All diesen traditionellen Verfahren ist gemeinsam, dass sie mit erheblichen Programmieraufwand verknüpft sind. Das folgende Beispiel zeigt den Aufwand bei der Berechnung von HS-Linien, der bisher zur Berechnung von HS-Linien notwendig gewesen war.

Richtungsfelder werden mathematisch durch Ableitungen von Funktionsgleichungen der Art $y'=f(x,y)$ beschrieben. Die Rechthandseite dieser Differenzialgleichung ist identisch mit den HS-Richtungen, die zu den Hauptspannungen σ_1 bzw. σ_2 gehören. Die orthotrope Wärmeleitung, die nun zweckentfremdet zur Berechnung der HS-Linien eingesetzt wird, ist in ebenen Strukturen und 3D-Schalen durch 2 Wärmeleitfähigkeiten k_1 und k_2 gekennzeichnet. Es soll nun folgende Hypothese mathematisch verifiziert werden:

Hypothese: Die Isothermen eines orthotropen stationären 2D-Wärmeleitungsproblems mit den Wärmeleitfähigkeiten k_1 und k_2 , tangieren ein beliebig vorgegebenes Richtungsfeld $y'=f(x,y)$, sofern die lokale Orientierung von k_1 dem Richtungsfeld y' folgt und senkrecht dazu perfekte Isolation besteht ($k_2=0$).

Das folgende Kapitel liefert eine mathematische Verifikation der oben aufgestellten Hypothese. Im 3. Kapitel wird dem FE-Anwender die Vorgehensweise anhand von einigen Regeln aufgezeigt und diese an Beispielen praktisch demonstriert. Dabei wird der Einfluss des Orthotropieverhältnisses k_1/k_2 sowie der Einfluss von Spannungs-Singularitäten auf den Verlauf der Isothermen untersucht.

2 Die Integration von Richtungsfeldern mithilfe der orthotropen Wärmeleitungsgleichung

Das Richtungsfeld ist durch eine gewöhnliche Differenzialgleichung erster Ordnung im kartesischen Koordinatensystem (x,y) gegeben:

$$y' = f(x, y). \quad (1)$$

Entsprechend der Hypothese im vorigen Kapitel soll nachgewiesen werden, dass die orthotrope Wärmeleitung zur Integration dieser Gleichung eingesetzt werden kann.

2.1 Das anisotrope Fouriersche Wärmeleitungsgesetz und die Wärmeleitungsgleichung

Verifikation der Hypothese: Im zweidimensionalen Fall ist das anisotrope Fouriersche Wärmeleitungsgesetz durch Gleichung (2), die stationäre Wärmebilanz ohne innere Wärmequellen durch Gleichung (3) gegeben [7]:

$$q_x = - \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2a)$$

$$q_y = - \left(k_{yx} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2b)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Werden diese Gleichungen kombiniert, so resultiert daraus die anisotrope Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0. \quad (4)$$

Ist die orthotrope (Haupt-)Wärmeleitfähigkeit k_1 entsprechend dem Richtungsfeld der Gleichung (1) orientiert (mit k_2 senkrecht auf k_1), so muss diese in das kartesische System transformiert werden. Die Transformationsgleichungen für den 2D-Wärmeleitungstensor sind analog zu einem 2D-Spannungstensor und können über trigonometrische Beziehungen mit dem Mohrschen (Spannungs-)Kreis veranschaulicht werden, Abb. 2.

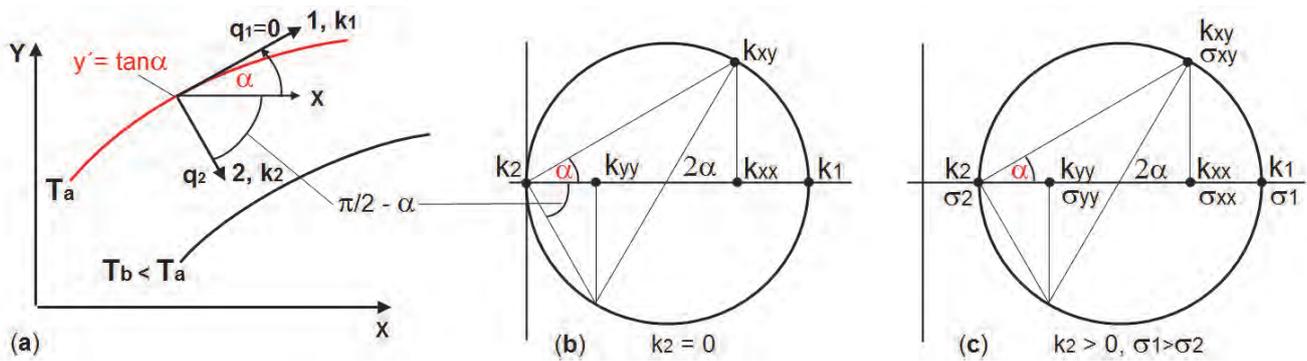


Abb. 2: Transformation zwischen lokalen und globalen Tensoren k der Wärmeleitfähigkeit: (a) Winkel α und $(\pi/2) - \alpha$ zwischen lokalem System (1,2) und der globalen x -Achse im Temperaturfeld $T(x,y)$, q =Wärmestromdichte; (b) Mohrscher Kreis für $k_1 > 0$ und $k_2 = 0$; (c) Mohrscher Kreis für $k_1 > 0$ und $k_2 > 0$ mit Analogie zum Mohrschen Spannungskreis.

$$k_{xx} = k_1 \cos^2 \alpha + k_2 \sin^2 \alpha = \frac{k_1}{1 + \tan^2 \alpha} + \frac{k_2 \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} = \frac{k_1}{1 + f^2} + \frac{k_2 f^2}{1 + f^2}, \quad (5a)$$

$$k_{xy} = k_{yx} = (k_1 - k_2) \sin \alpha \cos \alpha = (k_1 - k_2) \frac{f}{1 + f^2}, \quad (5b)$$

$$k_{yy} = k_1 \sin^2 \alpha + k_2 \cos^2 \alpha = \frac{k_1 f^2}{1 + f^2} + \frac{k_2}{1 + f^2}. \quad (5c)$$

Im Hinblick auf die Hypothese in Kap. 1 ist nur der Fall $k_1/k_2 \rightarrow \infty$ von Interesse. Die Herleitung gestaltet sich übersichtlich, wenn schon jetzt $k_1 > 0$ and $k_2 = 0$ gesetzt wird. Für diesen speziellen Fall folgt nach dem Einsetzen von Gleichung (5) in (2)

$$q_x = - \left(k_1 \frac{\partial T}{\partial x} + k_1 f \frac{\partial T}{\partial y} \right) / (1 + f^2), \quad (6a)$$

$$q_y = - \left(k_1 f \frac{\partial T}{\partial x} + k_1 f^2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) / (1 + f^2). \quad (6b)$$

In FE-Programmen wird die Wärmeleitungsgleichung (4) gelöst. Setzt man Gleichung (5) in (4) ein, zusammen mit $k_2 = 0$, so ergibt sich

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_1}{1 + f^2} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_1 f}{1 + f^2} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_1 f}{1 + f^2} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_1 f^2}{1 + f^2} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0. \quad (7)$$

Die Temperaturverteilung $T(x,y)$ der Gleichung (7) kann über die Darstellung der Isothermen erfolgen, die ihrerseits ein Richtungsfeld y_T' repräsentieren. Eine Isotherme ist durch eine konstante Temperatur C gekennzeichnet. Ihre Gleichung in impliziter Form ist durch $F(x,y) = T(x,y) - C = 0$ gegeben. Ein Richtungselement dieser Kurve hat die Steigung

$$y_T' = - \frac{\partial F / \partial x}{\partial F / \partial y} = - \frac{\partial T / \partial x}{\partial T / \partial y}. \quad (8)$$

Es stellt sich die Frage, welche Eigenschaften Gleichung (6) zeigt, wenn die Gleichungen (1) und (8) gleichgesetzt werden:

$$y' = f(x,y) = f = - \frac{\partial T / \partial x}{\partial T / \partial y} = y_T' \quad (9)$$

Einsetzen von f der Gleichung (9) in den Zähler der Gleichung (6) ergibt in ausführlicher Form

$$q_x = - \left(k_1 \frac{\partial T}{\partial x} + k_1 \left(- \frac{\partial T / \partial x}{\partial T / \partial y} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right) / (1 + f^2) = 0, \quad (10a)$$

$$q_y = - \left(k_1 \left(- \frac{\partial T / \partial x}{\partial T / \partial y} \right) \frac{\partial T}{\partial x} + k_1 \left(- \frac{\partial T / \partial x}{\partial T / \partial y} \right)^2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) / (1 + f^2) = 0 \quad (10b)$$

und zusammengefasst

$$q_x = q_y = \frac{\partial T}{\partial x} + f \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (11)$$

Für diesen Extremfall (also unter der Voraussetzung $k_1 > 0$ und $k_2 = 0$ im Lokalsystem entsprechend $y' = f(x, y)$ der HS-Richtungen) sind beide Komponenten des Wärmeflusses $\mathbf{q} = [q_x, q_y]$ stets null. Damit sind auch die Wärmestromkomponenten q_1 und q_2 parallel zu den orthotropen (Haupt-)Wärmeleitfähigkeiten (k_1, k_2) in Abb. 2a ebenfalls null. Die sich so ergebenden Isothermen widersprechen nicht ihrer Definition: Der Wärmefluss längs einer Isothermen ist null, senkrecht dazu wegen $k_2 = 0$ ebenfalls null, die Gleichsetzung der Gleichungen (1) und (8) war gerechtfertigt, um die Hypothese in Kap. 1 zu verifizieren. Wenn die Wärmeströme null sind, so ist auch ihre Divergenz in Form der Gleichungen (3) oder (4) gleich null. Letztere ist die Wärmeleitungsgleichung, die in FE-Programmen für stationäre Probleme ohne innere Wärmequellen gelöst wird. Aus dem Fourierschen Wärmeleitungsgesetz mit den Unbekannten T und \mathbf{q} ist eine Gleichung geworden für T allein, sofern die Isothermen in k_2 -Richtung voneinander perfekt isoliert sind ($k_2 = 0$). Ob nun das orthotrope Wärmeleitungsproblem der Gleichung (11) gelöst wird, welche in FE-Programmen i.A. nicht als Berechnungsoption zur Verfügung steht, oder Gleichung (7) mithilfe eines FE-Programms: In beiden Fällen ergeben sich die gleichen Isothermen, die das vorgegebene Richtungsfeld $y' = f(x, y)$ tangieren.

2.2 Temperaturreandbedingungen für die extrem orthotrope Wärmeleitung

In FE-Programmen werden die Gleichungen (4) bzw. (7) gelöst. Diese sind 2. Ordnung und benötigen Dirichlet- oder Neumann-Randbedingungen oder eine Mixtur aus diesen beiden längs der Randkontur. Nicht spezifizierte Bedingungen auf dem Rand beinhalten $\partial T / \partial \mathbf{n} = \mathbf{q} = \mathbf{0}$ (\mathbf{n} = Normalenvektor senkrecht zum Rand). Bei extremer Orthotropie mit $k_1 > 0$ und $k_2 = 0$ ist letztere Bedingung sowohl im Inneren als auch auf dem Rand entsprechend der Gleichung (11) stets erfüllt, es müssen demnach prinzipiell keine weiteren Bedingungen vorgegeben werden. Ohne Spezifikation einer Referenztemperatur ist die FE-Lösung jedoch singular. Wird an einem beliebigen Knoten eine solche Referenztemperatur T_{ref} spezifiziert, erhält man jedoch nur die triviale Lösung $T(x, y) = T_{\text{ref}}$. Es sind somit mindestens zwei unterschiedliche Temperaturen an zwei verschiedenen Knoten vorzugeben, um eine nichttriviale Lösung zu erhalten. Alle Temperaturreandbedingungen, die auf zwei bzw. mehr Knoten vorgegeben werden, liefern Isothermen, die das vorgegebene Richtungsfeld $y' = f(x, y)$ tangieren. Der Unterschied der Isothermenbilder für die 2-Knoten- bzw. Mehrknoten-Randbedingung ist in ihrer unterschiedlichen Wichtung zu sehen. Um problemgerechte Lösungen zu erhalten, muss das Richtungsfeld im Zusammenhang mit der physikalischen Aufgabenstellung gesehen werden. Im Abb. 3 ist eine Scheibe (Halbmodell) mit ellipsenförmiger Aussparung unter reiner Biegung dargestellt.

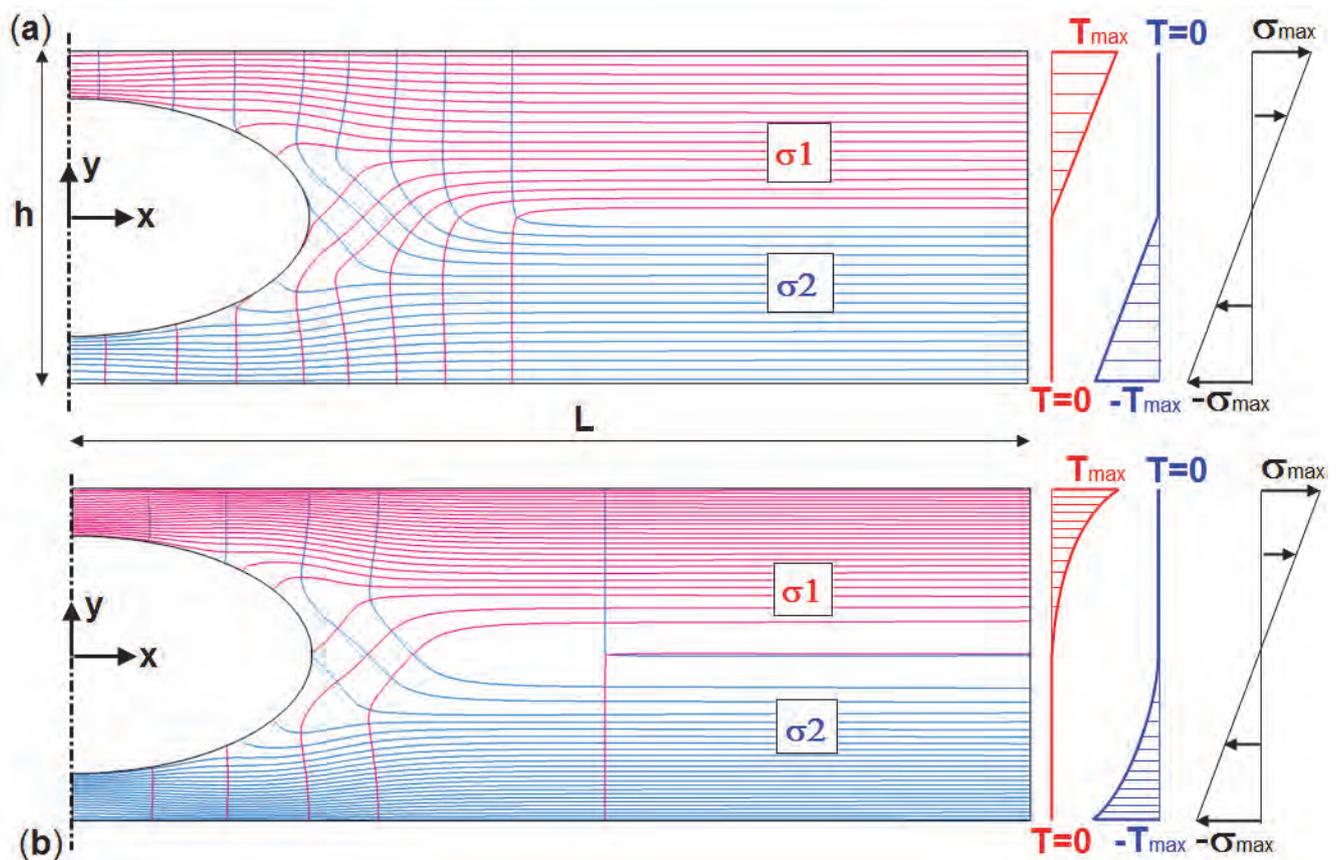


Abb. 3: FKV-Scheibe mit Loch unter Biegung: (a) Temperaturrandbedingungen für die σ_1 - bzw. σ_2 -Trajektorien, jeweils linear, ergeben eine gleichförmige Verteilung der Fasern (Isothermen); (b) parabelförmige Temperaturrandbedingungen ergeben eine gewichtete Verteilung der Fasern, die der Biegebelastung besser entsprechen.

Eine FKV-Konstruktion kann zum einen eine möglichst gleichförmige Faserplatzierung zum Ziel haben. Dies wird in einer ersten orthotropen Wärmeleitungsanalyse durch eine lineare Temperaturverteilung für $y > 0$ längs des rechten Rands erreicht (Abb. 3a). Die Isothermen als Repräsentanten der σ_1 -Trajektorien sind dann ebenfalls äquidistant verteilt. Für $y < 0$ ist explizit keine Randbedingung erforderlich, dies entspricht $\partial T / \partial \mathbf{n} = \mathbf{q} = \mathbf{0}$. In einer zweiten orthotropen Wärmeleitungsanalyse werden die σ_2 -Trajektorien berechnet. Diese erfordern eine lineare Temperaturverteilung für $y < 0$. Beide Isothermenbilder werden superponiert und ergeben die zwei Faserschichten in Abb. 3a.

Ist die Zielsetzung auf eine lastgerechte Faserplatzierung ausgerichtet, so wird durch jeweils parabelförmig vorgegebene Temperaturverteilungen für $y > 0$ (σ_1 -Trajektorie) bzw. $y < 0$ (σ_2 -Trajektorie) längs des rechten Rands eine linear gewichtete Verteilung der Isothermen erzielt, s. Abb. 3b.

Die 2-Knoten-Temperaturrandbedingung ist ebenfalls möglich. Zur Ermittlung der σ_1 -Trajektorie wird $T(L, h/2) = T_{\max}$, $T(L, 0) = 0$ gesetzt und liefert ähnliche Ergebnisse wie Abb. 3a, die Isothermen sind dann jedoch nicht exakt äquidistant am rechten Rand verteilt, s. auch Kap. 3.1.

3 Vorgehensweise und Anwendungsbeispiele

Das zu integrierende Richtungsfeld $y'=f(x,y)$ stammt in den folgenden drei strukturmechanischen Beispielen aus FE-Analysen in Form von HS-Richtungen. Zuvor soll die Vorgehensweise an Hand einiger Regeln festgelegt werden:

1. Berechnung der Richtung der größten Hauptspannung (Scheibe, Platte bzw. Schale). Falls diese vom jeweilig verwendeten FE-Programm nicht geliefert wird, können diese über die Spannungskomponenten $[\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{xy}]$ durch $y' = dy/dx = \tan \alpha_1 = \sigma_{xy} / (\sigma_{xx} - \sigma_2)$ berechnet werden, s. auch Abb. 2c. Platten und Schalen haben über die Dicke veränderliche Spannungen, das Richtungsfeld ist deshalb für jeden „Dickenintegrationspunkt“ auszuwerten.
2. Austausch der Strukturelemente durch thermische Elemente.
3. Elementweise Festlegung der lokalen 1-Richtung entsprechend der zuvor gerechneten HS-Richtung. Diese Festlegung ist abhängig vom benutzten FE-Programm (ABAQUS: *Orientation).
4. Zuordnung orthotroper Wärmeleitfähigkeiten k_1 und k_2 in diesen Lokalsystemen mit extremen Verhältnissen, z.B. $k_1/k_2 > 10^4$. (In ABAQUS ist $k_2=0$ erlaubt.)
5. Definition der thermischen Randbedingungen entsprechend Kap. 2.2.
6. $k_1/k_2 > 10^4$ liefert die HS-Trajektorien zur ersten, $k_2/k_1 > 10^4$ zur zweiten Hauptspannung. Der Betrag von k_1 bzw. k_2 und ein konstanter multiplikativer Faktor auf die Temperaturrandbedingungen haben keinen Einfluss auf die Verteilung der Trajektorien (Isothermen).

Es soll an dieser Stelle besonders betont werden, dass die Integration der HS-Richtungen zur Berechnung des realen Faserverlaufs eine eigenständige, von der Strukturberechnung unabhängige Aufgabe ist. Das HS-Richtungsfeld der isotropen Strukturberechnung wird als Materialorientierung für die Wärmeleitfähigkeiten in der thermischen Analyse übernommen. Die Randbedingungen sind in den beiden Analysen autark und haben nichts miteinander zu tun.

3.1 Beispiel 1: Einfluss des Orthotropieverhältnisses k_1/k_2 auf den Verlauf der Isothermen

Abb. 4 zeigt eine Lochscheibe unter axialem Zug. Aufgrund der doppelten Symmetrie genügt ein Viertelmodell.

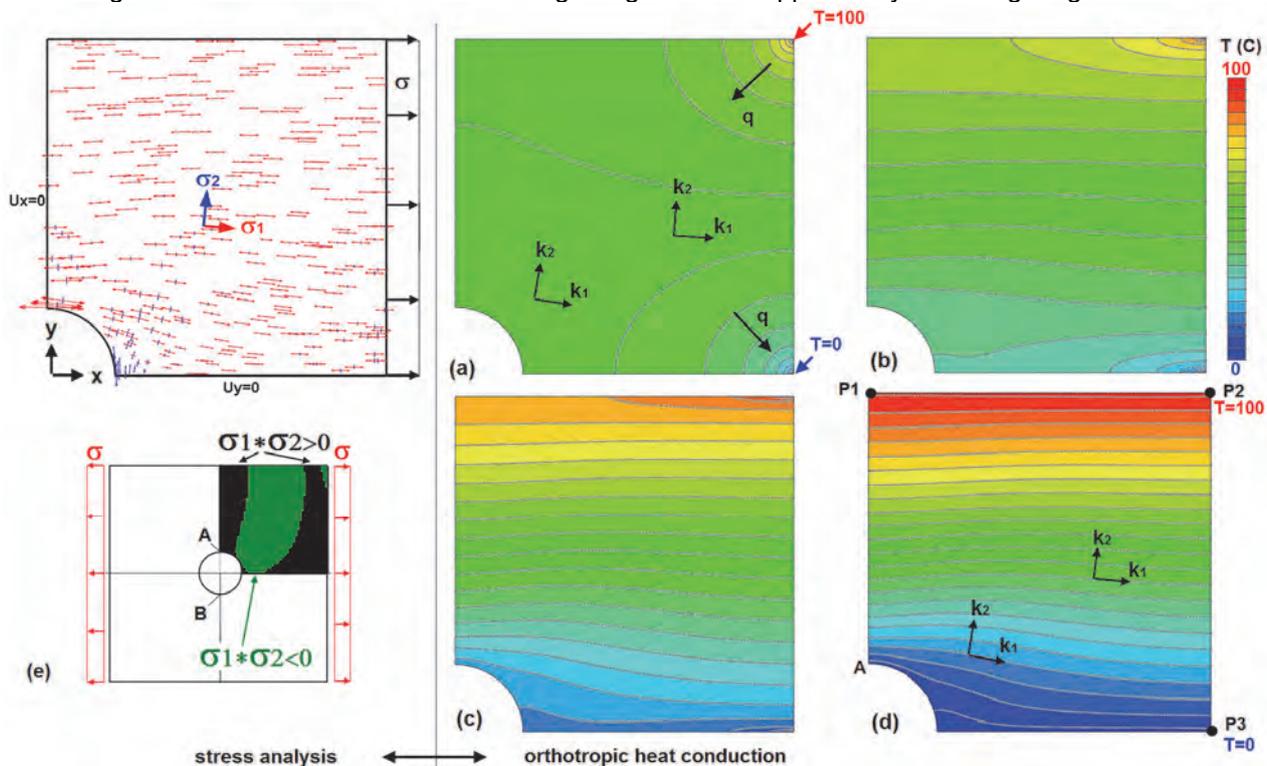


Abb. 4: Lochscheibe unter axialem Zug, Berechnung der HS-Linien (Isothermen) in Abhängigkeit der Wärmeleitungsorthotropie k_1/k_2 , die Orientierung von k_1 und k_2 entspricht den beiden HS-Richtungen von σ_1 und σ_2 : (a) $k_1/k_2=1$; (b) $k_1/k_2=16$; (c) $k_1/k_2=128$; (d) $k_1/k_2=4096$ jeweils mit vorgegebenen Temperaturen in den Punkten P2 und P3; (e) Vorzeichen der beiden Hauptspannungen, ihr Einfluss auf die optimale Faserplatzierung wird in Kap. 3.4 behandelt.

Die Aufgabe besteht darin, für einen FKV–Konstruktion die Fasern in Richtung der größten Hauptspannung zu platzieren. Die HS–Richtungen stellen das Richtungsfeld $y'=f(x,y)$ dar, das zu integrieren ist. Die Elemente des strukturmechanischen Modells werden durch Wärmeleitungselemente ersetzt, deren Wärmeleitfähigkeit k_1 parallel zu den zuvor gerechneten HS–Richtungen von σ_1 orientiert wird. Die k_2 –Richtung ist orthogonal zu k_1 . Wird nun das Verhältnis von k_1/k_2 sukzessive gesteigert, so tangieren die Isothermen zunehmend die HS–Richtung von σ_1 . Der Einfluss der 2–Knoten–Temperaturrandbedingung in den Punkten P2 und P3 (Abb. 4d) auf den Verlauf der Isothermen ist für $k_1/k_2 > 10^4$ nicht mehr wahrnehmbar. Bei solch einfachen Randbedingungen ist darauf zu achten, dass ein möglichst großer Temperaturbereich erfasst wird. Werden die beiden Temperaturen in den Punkten P1 und P2 festgelegt, so werden praktisch auf einer Isothermen unzulässigerweise zwei unterschiedliche Temperaturen spezifiziert.

Bemerkenswert ist die relativ gleichförmige Verteilung der HS–Trajektorien, obwohl nur eine sehr einfache Temperaturrandbedingung gewählt wurde. Möchte man eine exakt äquidistante Verteilung der Isothermen zwischen P3 und P2 haben, so ist die Temperatur längs dieser Strecke linear ansteigend vorzugeben. Da die Isothermen den Faserverlauf repräsentieren, wird mit dieser Vorgehensweise die konstante Kräfteinleitung längs P3P2 gleichförmig von den Fasern aufgenommen. Die maximale Beanspruchung in der Lochscheibe aus isotropem Material beträgt in den Punkten A und B in Abb. 4e ungefähr das dreifache der angelegten Spannung. Der Spannungsüberhöhungsfaktor ist jedoch, je nach dem Orthotropieverhältnis der gewählten Materialkombination, deutlich höher, [8]. Die belastungsgerechte Faserverdichtung im Punkt A wird deshalb durch den Isothermenverlauf nur qualitativ wiedergegeben.

3.2 Beispiel 2: Der Einfluss von Singularitäten auf den Verlauf der Isothermen

Bei den Spannungssingularitäten werden folgende Unterscheidungen gemacht. Ein isotroper (oder neutraler) Punkt mit unbestimmter HS–Richtung tritt auf, wenn die beiden Hauptspannungen σ_1 und σ_2 identisch sind. Sind beide Hauptspannungen null, so liegt eine klassische Singularität vor. Punkte mit konzentrierten Lasten sind weder das eine noch das andere, ihre Isoklinen („Richtungsgleiche“, s. auch Gleichung (12) mit $y'=const.$) fokussieren sich jedoch auf den Punkt der Kräfteinleitung, ähnlich wie bei einem isotropen Punkt. Es stellt sich dann die Frage, wie die Isothermen (= Spannungstrajektorien) in der Nähe dieser Punkte verlaufen? Dieser Fall kann am Beispiel einer Ringscheibe unter diametralen Einzelkräften studiert werden. Abb. 5a zeigt den Verlauf der Isoklinen und Spannungstrajektorien, die in [9] durch spannungsoptische Methoden ermittelt wurden.

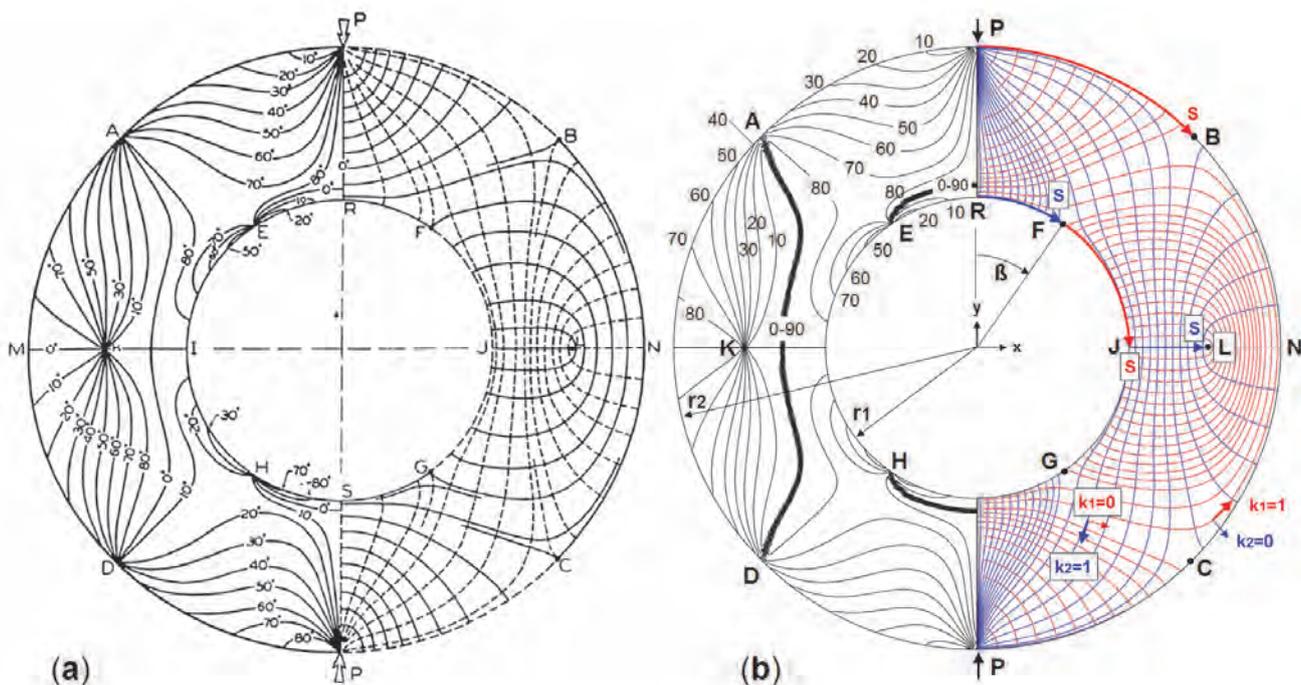


Abb. 5: Ringscheibe unter diametralen Einzelkräften, $r_2/r_1=2$: (a) Spannungsoptische Isoklinen (links) und Trajektorien (rechts) nach [9]; (b) Verifikation mit ABAQUS, Isoklinen (links), σ_1 –Trajektorien und σ_2 –Trajektorien (rechts).

Diese experimentellen Ergebnisse wurden durch eine FE–Spannungsanalyse (ABAQUS) mit nachfolgender orthotroper Wärmeleitungsberechnung zur Ermittlung der Trajektorien verifiziert, Abb. 5b. Wegen der Symmetrie genügt ein Viertel der Ringscheibe. Die Spannungsberechnung liefert die HS–Richtungen. In der nachfolgenden Wärmeleitungsberechnung dienen diese HS–Richtungen als Lokalsysteme für die Wärmeleitfähigkeiten k_1 und k_2 . Zwei dieser Systeme sind beispielhaft im 4. Quadranten der Abb. 5b eingezeichnet. Das System $k_1=1$, $k_2=0$ liefert die Isothermen als σ_1 –Trajektorien. Mit $k_1=0$, $k_2=1$ werden die σ_2 –Trajektorien ermittelt. Die Berechnung der Isoklinen ist hilfreich, um die singulären Punkte A, D, E, H, K zu lokalisieren (Abb. 5b, links). Die Isoklinen ergeben sich aus Gleichung (12), s. auch Abb. 2c.

$$y' = f(x, y) = \tan \alpha = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_2} = \text{const.} \quad (12)$$

Im Trajektorienbild (rechts) erscheinen diese Punkte mit den Bezeichnungen B, C, F, G, L und sind vom Typ 'interlocking' (B, C, F, G) bzw. 'non–interlocking' (L), die Trajektorien werden dort 'abgewiesen' bzw. 'umschlossen'. Diese Auswertung ist nützlich, da eine gleichförmige Verteilung der Isothermen (Fasern) angestrebt wird, was nur bei Kenntnis der Singularitäten gelingt. Abb. 6a zeigt dies für die σ_2 –Trajektorien (mit $\sigma_2 < \sigma_1$). Eine gleichförmige Verteilung wird durch linear ansteigende Temperaturrandbedingungen längs RF erreicht, mit Fortsetzung längs JL, wenn die Temperatur zahlenmäßig gleich der laufenden Koordinate s gesetzt wird, mit $T_1=s_1$ in den Punkten F und J.

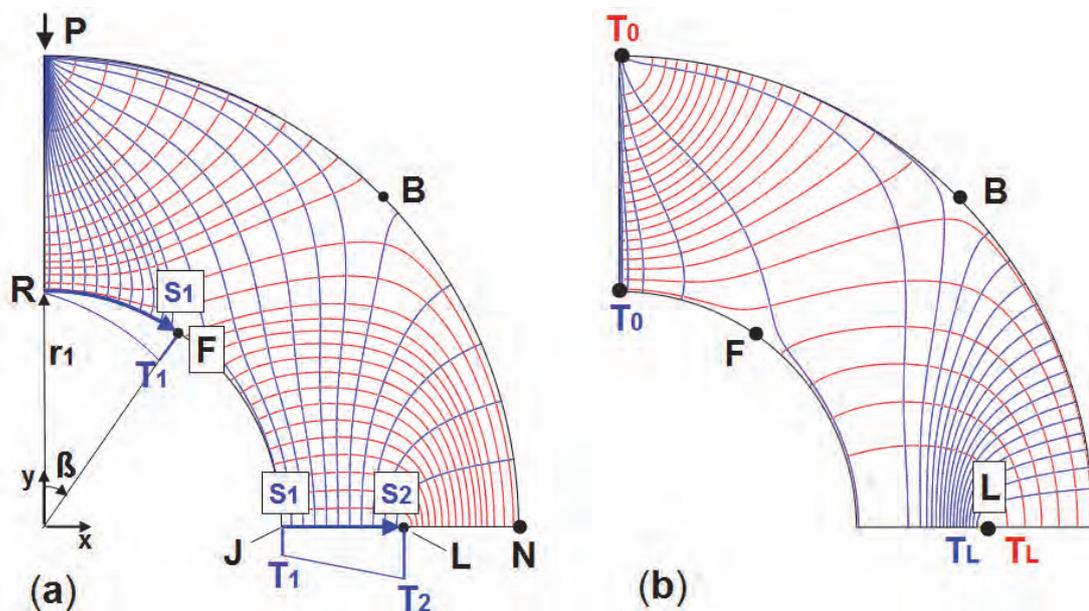


Abb. 6: Ringscheibe analog zu Abb. 5: (a) Ermittlung der σ_2 –Trajektorie durch Vorgabe einer linear veränderlichen Temperatur längs RF und JL; (b) Vereinfachte Analyse mit einer 2–Knoten–Temperaturrandbedingung, T_0 und T_L für die σ_1 –Trajektorien, T_0 und T_L für die σ_2 –Trajektorien.

Eine linear ansteigende Temperaturrandbedingung auf dem Rand durchgehend von R nach J ist inkorrekt, da die σ_2 –Trajektorie längs RF in die σ_1 –Trajektorie im Punkt F längs FJ übergeht. Das Kurvenstück FJ selbst ist Isotherme und erlaubt dort keine variable Temperaturvorgabe.

Die Existenz eines singulären Punktes auf dem lastfreien Rand einer 2D–Struktur hat stets diesen Trajektorienwechsel zur Folge. Diese Eigenschaft ist letztendlich dafür verantwortlich, dass ein gewisser Aufwand bezüglich der Festlegung von geeigneten Temperaturrandbedingungen zu treiben ist, um gleichförmig verteilte Isothermen zu erhalten. Wird nur die Temperatur längs RF definiert, so wird nur ein Teil der Struktur mit Isothermen erfasst. Es muss dann noch ein weiteres Randsegment mit Temperaturrandbedingungen beaufschlagt werden, um den Rest der Struktur zu erfassen. In Abb. 6a ist dies die Strecke JL. Bei der Berechnung der σ_1 –Trajektorien in Abb. 6a wird analog vorgegangen. Die Temperatur wird längs PB linear ansteigend definiert mit Fortsetzung längs LN.

Ein Vergleich von Abb. 5a mit 5b zeigt, dass eine bessere Übereinstimmung der σ_1 -Trajektorien bezüglich ihrer Wichtung erreicht werden kann, indem die Temperatur-Randbedingung längs PR linear ansteigend vorgegeben wird anstatt längs PB.

Bei der Lochscheibe (Abb. 4) tritt der oben erwähnte Trajektorienwechsel längs des rechten Rands P2P3 nicht auf. Dieser Rand ist frei von Singularitäten. Es genügt die Vorgabe von zwei Temperaturen in den Punkten P2 und P3. Man kann diese einfache 2-Knoten-Randbedingung (Kap. 2.2) generell für alle 2D-Scheiben und 3D-Schalen anwenden und erhält dann, je nach Anzahl der Singularitäten, entsprechend gewichtete Isothermenverteilungen. Abb. 6b zeigt diese einfache Vorgehensweise für die Ringscheibe mit ihren Singularitäten. Die dort gezeigten Isothermen sind weniger gleichförmig verteilt als in Abb. 6a, für eine schnelle Übersicht jedoch ausreichend.

Das Scheibenringproblem (Abb. 5) beinhaltet die wichtigsten Formen von Singularitäten: isotrope Punkte vom abweisenden und einschließendem Typ, sowie konzentrierte Punktlasten, die sich wie isotrope Punkte verhalten. Fehler sind in der Darstellung der Isothermen unvermeidlich, da diese sich nicht im Punkt der Singularität schneiden können. Vielmehr weichen die Isothermen dort in unmittelbarer Nähe seitlich aus, abhängig von der Netzfeinheit des Modells. Das Modell in Abb. 5b im Vergleich zu Abb. 5a ist offensichtlich fein genug, um diesen Fehler gering zu halten. Die Elementgröße ist praktisch überall gleich, längs JN wurden 60 Elemente (mit jeweils vier Knoten) verwendet. Durch weitere Netzverfeinerungen im Bereich der Singularitäten kann der Fehler beliebig klein gehalten werden.

3.3 Beispiel 3: Die Hauptspannungstrajektorien in Schalenstrukturen

In der Einleitung wurde ein herkömmliches Integrationsverfahren zur Berechnung von Hauptspannungstrajektorien in einer Schale gezeigt (Abb. 1). Nachteile ergaben sich aus der ungleichförmigen Faserplatzierung, die sich aus der separaten Berechnung einer jeden Einzelfaser ergibt. Ausgehend von einem Startpunkt (Startelement) ist es praktisch nicht möglich, diese Startpositionen vorab so auszuwählen, dass gleichförmig verteilte Faserverläufe resultieren.

Im Gegensatz dazu steht die Integration mithilfe einer orthotropen Wärmeleitungsrechnung. Schon mit einer 2-Knoten-Temperaturrandbedingung ($Q_0: T=0^\circ\text{C}$, $Q_1: T=1^\circ\text{C}$) lassen sich deutlich gleichförmigere Faserverteilungen erreichen als dies in Abb. 1a dargestellt ist. Diese in Abb. 7a gezeigte Temperaturverteilung liefert die ungefähre Lage von drei lokalen Temperaturmaxima an den Positionen P_0 , P_1 und P_2 .

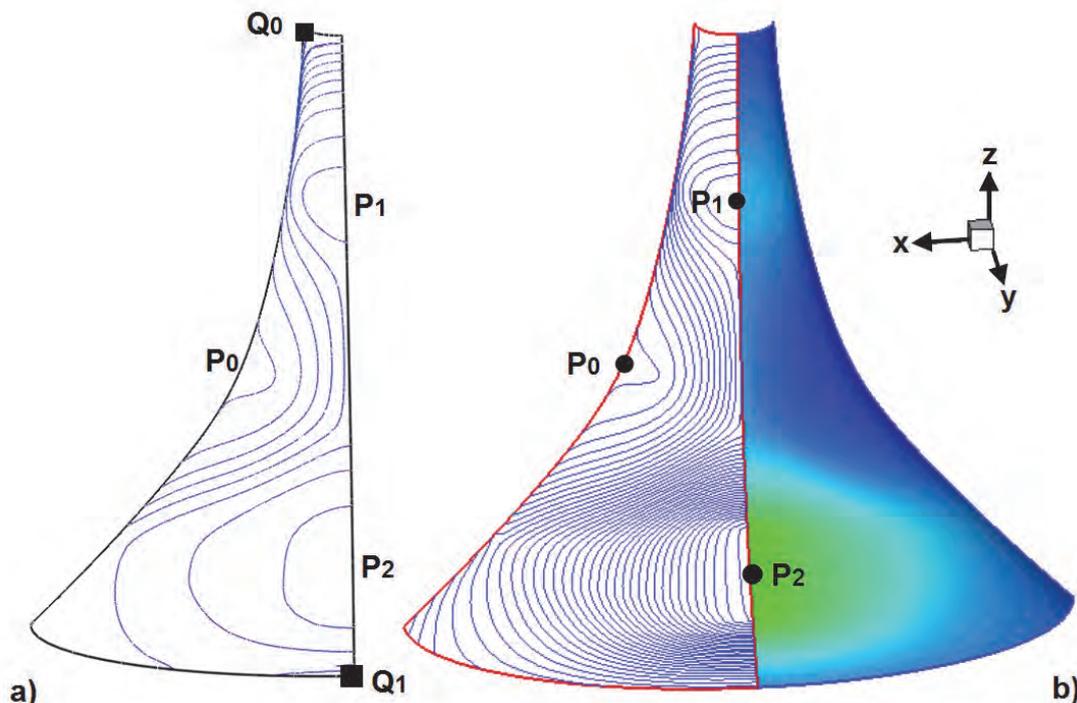


Abb. 7: Schalenstruktur analog zu Abb. 1: (a) Isothermen mit einer 2-Knoten-Temperaturrandbedingung; (b) Isothermen mit einer 3-Knoten-Temperaturrandbedingung, rechts: kontinuierliches Temperaturfeld zur Extraktion beliebig vieler Isothermen (Fasern).

Durch eine weitere Wärmeleitungsberechnung mit einer entsprechenden 3-Knoten-Temperaturrandbedingung ($P_0: T=0^\circ\text{C}$, $P_1: T=1^\circ\text{C}$, $P_2: T=2^\circ\text{C}$, Abb. 7b) wird die Gleichförmigkeit der Isothermenverteilung verbessert. Eine Spezifikation linear veränderlicher Temperaturrandbedingungen analog zum vorigen Kapitel würde eine weitere Verbesserung erbringen, erscheint aber angesichts des Ergebnisses in Abb. 7b nicht unbedingt nötig.

Ändert sich die Anzahl der dazustellenden HS-Linien, so müssen bei der Visualisierung des Temperaturfeldes nur entsprechend mehr Isothermen geplottet werden. Abb. 7b (rechte Hälfte) hebt diesen Aspekt besonders hervor: Das kontinuierliche Temperaturfeld ist bezüglich der Isothermen unendlich dicht.

3.4 Optimierung der Faserplatzierung in FKV-Konstruktionen

Um über die Visualisierung von HS-Linien hinaus eine wichtige Anwendung aufzuzeigen, wurde in der Einleitung auf die Faserplatzierung in FKV-Konstruktionen hingewiesen. Faserverläufe, die den lokalen HS-Richtungen folgen, nützen die überragenden Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der Fasern aus und resultieren in variabel geführten Kreuzverbunden. Im Hinblick auf Optimalität ist jedoch auf die Vorzeichen der Hauptspannungen zu achten.

Die Faserplatzierung in Richtung der Hauptspannungen ist nach der Netztheorie optimal [10]. Dabei wird das Mittragen der Matrix vernachlässigt, es trägt nur das Fasernetzwerk. Damit liegt man auf der sicheren Seite, mithilfe eines Faserbruchkriteriums lässt sich die Tragfähigkeit der Konstruktion berechnen. Eine Auslegung auf Zwischenfaserbruch muss den Einfluss der Matrix zusätzlich berücksichtigen. Der variable Kreuzverbund, der der lokalen σ_1 - und σ_2 -Richtung folgt, ist weiterhin optimal, jedoch nur in Gebieten mit Hauptspannungen unterschiedlichen Vorzeichens. Ist das Vorzeichen jedoch gleich, ist nach der klassischen Laminatstheorie der ausgeglichene Winkelverbund die bessere Wahl [11]. Dieser Verbund unterscheidet sich vom (rechtwinkligen) Kreuzverbund durch einen Korrekturwinkel $\pm\beta$ bezüglich der σ_1 -Richtung. Das Richtungsfeld y' für die größte Hauptspannung σ_1 ist dann durch zwei Richtungsfelder repräsentiert: $y'+\beta$ und $y'-\beta$, Abb. 8.

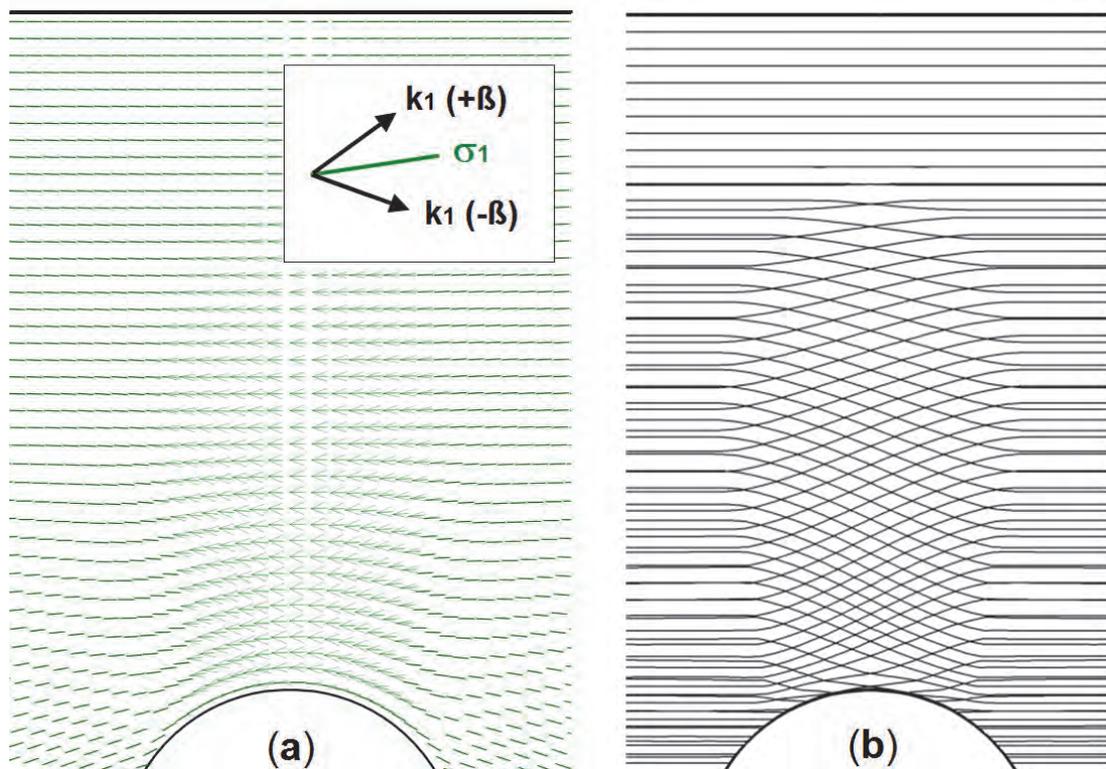


Abb. 8: Lochscheibe (Detail) analog Abb. 4e, in Gebieten mit gleichem Vorzeichen der Hauptspannungen ist der ausgeglichene Winkelverbund optimal: (a) Korrekturwinkel $\pm\beta$ bezüglich der σ_1 -Richtung; (b) Integration des modifizierten Richtungsfelds.

Beispielsweise enthält die Lochscheibe (Abb. 4e) Bereiche $\sigma_1 \cdot \sigma_2 < 0$ (Kreuzverbund ist optimal) und $\sigma_1 \cdot \sigma_2 > 0$ (Winkelverbund ist optimal). Die so modifizierten Richtungsfelder lassen sich weiterhin ohne Einschränkung mithilfe der orthotropen Wärmeleitungsrechnung integrieren. Der Korrekturwinkel β ist abhängig vom Material und dem Hauptspannungsverhältnis σ_1/σ_2 [11]. Mit diesem Hinweis soll betont werden, dass die orthotrope Wärmeleitung für die Integration beliebiger Richtungsfelder geeignet ist, auch wenn diese aus ingenieurmäßigen Gründen modifiziert werden. Für weitere Details und besondere Aspekte einer belastungsgerechten Optimierung (Schichtdickenverteilung, Lastfallspektrum, Nichtlinearität der Spannungsverteilung über die Schalendicke) wird auf [2, 12] verwiesen.

4 Diskussion

Das vorgestellte Verfahren ist geeignet, beliebige vektorielle und tensorielle 2D-Richtungsfelder mithilfe kommerzieller FE-Programme zu integrieren, sofern die FE-Programme Optionen zur Analyse orthotroper Wärmeleitung haben. Die damit berechneten Isothermen repräsentieren die Integralkurven dieser Richtungsfelder im Inneren und auf dem Rand der 2D-Struktur (Scheibe bzw. Schale). Die Vorgehensweise stützt sich auf 6 Regeln (Kap. 3), die nur den Standard Input des FE-Programms betreffen, an keiner Stelle ist zusätzlicher Programmieraufwand nötig. Als Minimum an thermischen Randbedingungen sind zwei Temperaturen an zwei unterschiedlichen Positionen vorzugeben. Die daraus sich ergebenden Isothermen können jedoch ungleichförmig verlaufen. Die Gleichförmigkeit wird erreicht, indem linear veränderliche Temperaturen längs eines Randsegments vorgegeben werden (Abb. 3a). Weist das Richtungsfeld bzw. die Differenzialgleichung $y' = f(x, y)$ Singularitäten auf dem Rand auf, so ist die Definition der Randbedingungen sorgfältig vorzunehmen (Abb. 6a). Es muss vermieden werden, dass Temperaturfunktionen auf Rändern vorgegeben werden, die selbst Trajektorien (Isothermen) darstellen. Hilfreich ist in diesem Fall eine vorausgehende Visualisierung der Isokline, Gleichung (12) und/oder eine Approximationsrechnung mit der 2-Knoten-Temperaturrandbedingung. Die Genauigkeit der Integration ist durch die Netzfeinheit der Struktur bedingt, so wie diese bei herkömmlichen Integrationsverfahren von der numerischen Schrittweite abhängt.

Im Vergleich zu herkömmlichen Integrationsverfahren ergeben sich mit dem neuen Verfahren wesentliche Verbesserungen:

- Die Integration der Richtungsfelder kann mit Standard FE-Programmen ohne zusätzlichen Programmieraufwand stattfinden.
- Es können beliebig viele HS-Linien (Isothermen) aus dem kontinuierlichen Temperaturfeld extrahiert werden.
- Da das berechnete Temperaturfeld kontinuierlich ist, kann daraus eine wichtige Information abgeleitet werden: Die Dichte der Faserverläufe (Isothermen) ist ein Maß für das lokale Faservolumen. Diese Dichte ist proportional zum Temperaturgradienten, [2] (S. 96).
- Die Methode der orthotropen Wärmeleitung kann auf lineare und nichtlineare Spannungsprobleme angewandt werden, [2], (S. 74). Wird die Methode auf Hauptschubspannungen im plastischen Bereich angewandt, so lassen sich damit Gleitlinien (slip-lines) darstellen, [2], (S. 41-44).
- Beim Einsatz von Stahlarmierung berücksichtigt der Baustatiker die Trajektorien der Hauptzugspannung. Die HS-Linien liefern einen Designvorschlag für die Armierung, [2], (S. 78).

Sofern der Verlauf der Isothermen (Trajektorien) für die Faserplatzierung in FKV-Konstruktionen genützt werden soll, müssen die visualisierten Isothermen positionsgerecht in Koordinaten umgerechnet werden. Als kommerzielle Lösung ist hierfür TECPLOT (Bellevue, WA, USA) geeignet (Abb. 7), alternativ kann auch ein Fortran-Programm eingesetzt werden, der Source-Code ist in [13] enthalten.

Wie bei allen strukturmechanischen Problemstellungen ist der Optimierungserfolg am größten, wenn ein spezieller Lastfall untersucht wird. In der Praxis ist ein solcher nicht exakt definierbar oder es liegen wechselnde Belastungen und Randbedingungen vor, entsprechend ändern sich die HS-Richtungen. Die damit einhergehende „Degradierung“ des Optimierungsverfahrens betrifft aber ebenso alternative Optimierungsstrategien. Der Optimierungsaufwand kann sich dennoch lohnen: Variable Faserverläufe sind kombinierbar mit textilen Halbzeugen und können z.B. auf Standardlaminat aufgesteckt werden (TFP, Tailored Fiber Placement). Zum Einsatz kommen TFP-Sticktechnik [6], textiles Preforming [6, 14] oder aber auch das Tapelegen [6]. Dabei soll die Schicht mit den variablen Faserverläufen die Hauptlast und das Standard-Laminat die übrigen Lastfälle abdecken. Auch bei einem Einzellastfall sollte sicherheitshalber stets ein zusätzliches Standard-Laminat den Schichtenaufbau ergänzen.

Kontakt: hm@FEM-Moldenhauer.de

5 Literatur

1. Beyer, F.R. Hauptspannungstrajektorien in der numerischen Festkörpermechanik - Ein Algorithmus zur Visualisierung der Bauteilbeanspruchung in zwei und drei Dimensionen, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Dresden, März 2015, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-178497>
2. Moldenhauer H. Die orthotrope Wärmeleitung als numerischer Integrator allgemeiner Richtungsfelder mit Anwendung zur optimalen Faserplatzierung und Kraftflussvisualisierung, Dr.-Ing. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, September 2016, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000060087>
3. Hyer, M.W.; Charette, R.F. Use of Curvilinear Fiber Format in Composite Structure Design, *AIAA Journal* **1991**, 29, pp. 1011-1015.
4. Mattheck, C. *Design in Nature*, Springer: Berlin, Germany, 1998, ISBN 3 540 62937 5.
5. Tosh, M.W.; Kelly, D.W. On the Design, Manufacture and Testing of Trajectorial Fibre Steering for Carbon Fibre Composite Laminates, *Composites Part A*, **2000**, 31, pp. 1047–1060.
6. Spickenheuer, A. Zur fertigungsgerechten Auslegung von Faser-Kunststoff-Verbundbauteilen für den extremen Leichtbau auf Basis des variabelaxialen Fadenablageverfahrens Tailored Fiber Placement, Technische Universität Dresden, Dr.-Ing. Dissertation, Juni 2014, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-147748>
7. Hahn, D.W.; Özışık M.N. Heat Conduction, 3rd ed.; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2012, ISBN 978-1-118-41128-5, p. 625.
8. Chiang, C.R. Stress Concentration Factors of Edge-Notched Orthotropic Plates, *Journal of Strain Analysis*, **1998**, 33, pp. 395-398.
9. Frocht, M.M. *Photoelasticity*, John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 1946; Volume I, pp. 209-210.
10. Schürmann, H. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2nd. ed., Springer: Berlin, Germany, 2007, ISBN 978-3-540-72189-5, S. 451-476.
11. Michaeli, W.; Huybrechts, D., Wegener, M. *Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen*, Hanser: Munich, Germany, 1994, ISBN 3-446-17659-4, S. 107-119.
12. Moldenhauer, H. Beanspruchungsgerechte Faserplatzierung in Faser-Kunststoff-Verbunden, *Konstruktion* **2017**, 69, S. 68-74.
13. DeVries, P.L. *Computerphysik*, Spektrum Akademischer Verlag: Heidelberg, Germany, 1994, ISBN 3-86025-336-0, S. 417-420.
14. Hufenbach, W. (Herausgeber), *Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus*, Dresden, 2007, ISBN 978-3-00-022109-5, S. 53ff.

Bitte per Post oder E-Mail an:
magazin@nafems.de

Adresse für Fensterkuvert



NAFEMS Deutschland,
 Österreich, Schweiz GmbH
 Griesstr. 20
 D-85567 Grafing b. München,
 Germany

Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (3/2019)

- Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:**
- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft | <input type="checkbox"/> CFD Seminar im November in Wiesbaden |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“ | <input type="checkbox"/> E-Motor Seminar im November in Wiesbaden |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare | <input type="checkbox"/> NAFEMS Nordic Seminar im November in Billund |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse | <input type="checkbox"/> V&V Master Trainingskurs im November in München |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS e-learning | <input type="checkbox"/> FKM Trainingskurs im November in Wiesbaden |
| <input type="checkbox"/> Professional Simulation Engineer PSE | <input type="checkbox"/> NAFEMS World Congress 2021 |
| <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: _____

