

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

Fachbeiträge:

Fokus Elektromechanische Systeme

Vergleich verschiedener FE Berechnungsmethoden für das elektromagnetische Drehmoment von PM Maschinen

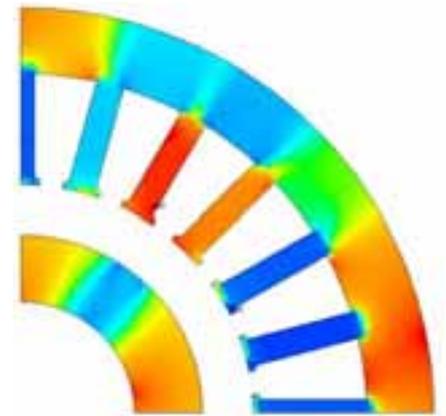
D. Gerling, G. Dajaku (Universität der Bundeswehr München) Seite 18

Modellierung und Finite Elemente Simulation von Aktuatoren aus dielektrischen Elastomeren

M. Wissler, E. Mazza (Empa) / ETH Zürich Seite 26

Simulation einer Transversalflussmaschine in Flachmagnetanordnung

J. Schüttler, B. Orlik (Universität Bremen) Seite 32



PM-Maschine
(Bild: Universität der Bundeswehr München)

Fokus Computational Fluid Dynamics (CFD)

Instationäre Fluid-Struktur-Anwendungen

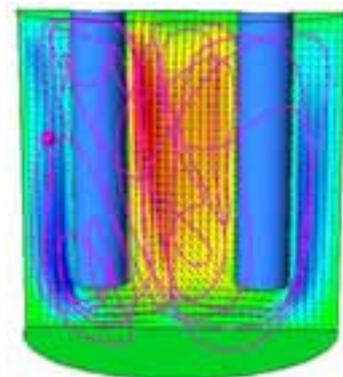
U. Heck (Dr. Heck Consulting and Engineering) Seite 36

Simulation fluidgedämpfter Strukturschwingungen mittels partitioniertem Kopplungsansatz via MpCCI

S. Schrape, A. Kühhorn, M. Golze (Universität Cottbus (BTU)) Seite 41

Simulation von gekoppelten strömungsmechanischen und elektromagnetischen Effekten am Beispiel der Prozesssimulation des Lichtbogenschweißens

A. Spille-Kohoff, P. Bartsch (CFX Berlin Software GmbH) Seite 50



Elektromagnetisches Durchmischen
(Bild: CFX Berlin Software GmbH)



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

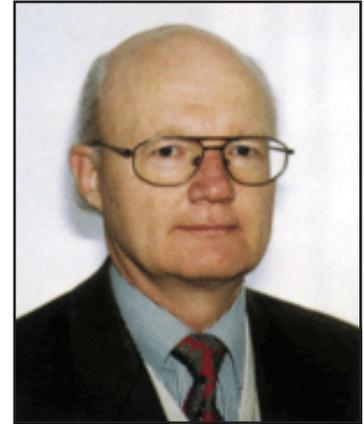
Call for Papers



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

Sehr geehrte Leserin,
sehr geehrter Leser,

Sie erhalten hiermit bereits das 4. Heft des NAFEMS Magazins. Die intensive Nachfrage nach Eintragungen in die Verteilerliste bestätigt, dass das Konzept bei Ihnen auf Interesse und Zustimmung stößt. Das wird dem Herausgeber Ansporn sein, in der eingeschlagenen Richtung voranzugehen, wobei die Anforderungen der Anwender im Vordergrund stehen. Ziel wird es weiterhin sein, den wissenschaftlichen Fortschritt im Bereich der numerischen Simulation bekannt zu machen und damit den Erfahrungsaustausch zu fördern. Das Magazin wird auch in Zukunft Wissen und Erfahrungen auf dem Gebiet der numerischen Simulation sammeln, aufbereiten und weitergeben, um dadurch die Nutzung entsprechender Werkzeuge und Verfahren effektiver, sicherer und zuverlässiger zu machen. Dafür bieten die Vorträge der NAFEMS Seminare einen wertvollen Fundus an aktuellen und anwendungsorientierten Beiträgen.



Prof. Dr.-Ing. Klaus Rohwer

Aus Platzgründen kann jeweils nur eine kleine Auswahl von Vorträgen aus jedem Seminar im Magazin veröffentlicht werden. Diese Auswahl soll Ihnen einen Eindruck vermitteln über konzeptionelle und fachliche Ausrichtung sowie über das Niveau der Seminare. Schwerpunkte der wissenschaftlichen Beiträge liegen diesmal auf Ausführungen zu Elektromagnetischen Systemen und zur Strömungs-Struktur-Kopplung. Es handelt sich um Beiträge zu den Seminaren vom Oktober 2005 und vom Mai 2006 und damit um ausgesprochen aktuelle Informationen. Aus Ihrer Erfahrung haben Sie zu dem einen oder anderen Punkt vielleicht eine andere Auffassung oder können sogar neue Lösungswege aufzeigen. Von einer Diskussion unterschiedlicher Erkenntnisse lebt die Wissenschaft. Ich würde es daher begrüßen, wenn die hier vorgelegte Auswahl Sie dazu anregte, das nächste Seminar persönlich zu besuchen oder sogar selbst einen Beitrag einzureichen. Der direkte Kontakt und der Austausch mit Kollegen, die sich mit ähnlichen Fragestellungen befassen, sind durch noch so intensives Studium der Literatur nicht zu ersetzen.

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



Call for Papers

Anmeldeschluss:
18. September 2006

Mehr Infos unter www.nafems.org/conference

Engineering Simulation:
Innovation Leads to Competitive Advantage

case studies • best practices • breakthrough technologies • visions of the future

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



www.abaqus.de



www.altair.de



www.cd-adapco.com



www.esi-group.com



www.fluent.de



www.intes.de



www.mscsoftware.com



www.ugs.com

Die nächsten NAFEMS Trainingskurse:

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

Basic 1:

Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre
Wiesbaden, D

16. - 17.10.2006

Basic 2:

Praxisorientierte Grundlagen für FEM-Analysen
Wiesbaden, D

27. - 28.11.2006

Das nächsten NAFEMS Seminare:

Integration of Structural Analysis (FEA) and CFD (Computational Fluid Dynamics) into the Product Development Process

Götheburg, S

02. - 03.11.2006

Materialmodellierung

Wiesbaden, D

05. - 06.12.2006

CFD im Wandel: Zuverlässiger Einsatz CAD-basierter Software sowie anwendungsspezifischer Codes

Wiesbaden, D

26. - 27.03.2007

Zuverlässiger Einsatz numerischer Simulationsmethoden in der Vorausberechnung

Wiesbaden, D

28. - 29.03.2007

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

NAFEMS Literatur

kürzlich erschienen:

- **How To Manage Finite Element Analysis in the Design Process**
Adams, V
April 2006, 60 Seiten
- **NAFEMS International Journal of CFD Case Studies - Volume 5**
Editor - Green, A
April 2006, 104 Seiten
- **Advanced Finite Element Contact Benchmarks**
Konter, A
April 2006, 60 Seiten
- **BENCHmark Magazin April 2006**

geplant:

NAFEMS bietet mit über 200 Publikationen eine umfangreiche Auswahl an Fachliteratur im Berechnungsumfeld an. Auch in Zukunft wird sich NAFEMS um die Weiterentwicklung und Erstellung neuer Fachliteratur für ihre Mitglieder und für den weiteren Kreis der Ingenieure bemühen.

In Kürze werden erscheinen:

- **Why Do a Multi-Physics Analysis?**
Dehning & Wolf
geplant für September 2006
- **An Introduction to Modelling Buckling and Collapse**
Falzon & Hitchings
geplant für September 2006

- **NAFEMS International Journal of CFD Case Studies**
Editor - Green
(regelmäßig)

- **BENCHmark Magazin Juli 2006, ...**

Mehr Informationen finden Sie unter

www.nafems.org/publications

Impressum

Editor in Chief

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

Redaktioneller Beirat

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

Redaktion

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

Herausgeber

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

Gestaltung / Layout / Grafik

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

Bezugspreis

Kostenlos

Verteilung / Bezug

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

Anzeigenpreise

Preisliste vom 31.10.2005

**Copyright © 2006 NAFEMS Kontakt
DACH & NORDIC, Werbos GbR.**

Nachdruck – auch auszugsweise -, Ver-
vielfältigung oder sonstige Verwertung
ist nur mit schriftlicher Genehmigung
des Verlages unter ausdrücklicher
Quellenangabe gestattet. Gekenn-
zeichnete Artikel stellen die Meinung
des Autors, nicht unbedingt die Mei-
nung der Redaktion dar. Für unverlangt
eingesandte Manuskripte und Daten-
träger sowie Fotos übernehmen wir kei-
ne Haftung. Alle Unterlagen, insbeson-
dere Bilder, Zeichnungen, Prospekte
etc. müssen frei von Rechten Dritter
sein. Mit der Einsendung erteilt der Ver-
fasser / die Firma automatisch die Ge-
nehmigung zum kostenlosen weiteren
Abdruck in allen Publikationen von
NAFEMS, wo auch das Urheberrecht
für veröffentlichte Manuskripte bleibt.

Eine Haftung für die Richtigkeit der
Veröffentlichungen kann trotz Prüfung
durch die Redaktion vom Herausgeber
nicht übernommen werden.

Vorwort des Editor in Chief 2

NAFEMS World Congress - Call for Papers 2

Sponsoren 3

NAFEMS DACH Aktuell 4

Impressum 5

Inhalt 5

Über NAFEMS / Mitgliedschaft 6

NAFEMS EU-Projekt Autosim 7

Neuigkeiten 8 - 13

Veranstaltungen 14

Stellenanzeigen 15 - 17

Fachbeiträge

Fokus Elektromechanische Systeme

**Vergleich verschiedener FE Berechnungsmethoden für
das elektromagnetische Drehmoment von PM Maschinen 18**
D. Gerling, G. Dajaku (Universität der Bundeswehr München)

**Modellierung und Finite Elemente Simulation von
Aktuatoren aus dielektrischen Elastomeren 26**
M. Wissler, E. Mazza (Empa) / ETH Zürich

**Simulation einer Transversalflussmaschine
in Flachmagnetanordnung 32**
J. Schüttler, B. Orlik (Universität Bremen)

Fokus Computational Fluid Dynamics (CFD)

Instationäre Fluid-Struktur-Anwendungen 36
U. Heck (Dr. Heck Consulting and Engineering)

**Simulation fluidgedämpfter Strukturschwingungen
mittels partitioniertem Kopplungsansatz via MpCCI 41**
S. Schrape, A. Kühhorn, M. Golze (Universität Cottbus (BTU))

**Simulation von gekoppelten strömungsmechanischen und
elektromagnetischen Effekten am Beispiel der
Prozesssimulation des Lichtbogenschweißens 50**
A. Spille-Kohoff, P. Bartsch (CFX Berlin Software GmbH)

Rückmeldeformular 58

Werbeanzeigen

Dr. Heck Consulting and Engineering 8

Intes GmbH 9

Swap Computer GmbH 10

Femlab GmbH 11

Über NAFEMS

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

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

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

Mitglieder des Internationalen NAFEMS Councils

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

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

Mitglieder des deutschen NAFEMS Steering Committees

Dr.-Ing. W. Dirschmid (Consultant), Chairman
 Dr.-Ing. Y. Deger (Hochschule Rapperswil)
 Dr.-Ing. A. Gill (Fluent Deutschland GmbH)
 Dr.-Ing. R. Helfrich (Intes GmbH)
 Dipl.-Ing. G. Müller (Siemens AG)
 Dr.-Ing. G. Müller (CADFEM GmbH)
 F. J. H. Peeters (Abaqus Europe BV)
 A. Pfaff (MSC Software GmbH)
 Prof. Dr.-Ing. K. Rohwer (DLR)
 Dr. A. Svobodnik (Harman/Becker Automotive Systems)
 Dr. T. Wintergerste (Sulzer Chemtech Ltd.)
 Prof. Dr.-Ing. habil. M. Zehn (Femcos mbH)

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

Mitglied bei NAFEMS?

NAFEMS hat über **700 Mitgliedsunternehmen und -Institutionen in 37 Ländern.**

NAFEMS Mitglieder erhalten unter anderem:

- Benchmark (Internationales FEM-Magazin)
- Literatur
- Freie Seminarplätze
- Ermäßigungen für Trainingskurse, Kongresse und Literatur
- Zugriff auf passwortgeschützten Webbereich mit Kontaktmöglichkeiten und Informationen
- Kontakt zu über 700 Organisationen weltweit

Werden auch Sie Mitglied !



„Benchmark“
 – das internationale
 NAFEMS Magazin

Jetzt abonnieren
 – für NAFEMS-Mitglieder natürlich frei

Weitere Informationen erhalten Sie unter:

www.nafems.de
 (regional)

www.nafems.org
 (international)

SIXTH FRAMEWORK PROGRAM-
ME PRIORITY [6.2]
[SUSTAINABLE SURFACE
TRANSPORT]

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



Zweiter Workshop in München sehr erfolgreich



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

Nach dem ersten Workshop im Januar diesen Jahres in Barcelona fand der zweite Workshop vom 4. - 5. Mai in Sonnenhausen in der Nähe von München statt. Über 35 Teilnehmer kamen, um teils in Plenarvorträgen, teils in parallelen Arbeitsgruppen die definierten Themen zu bearbeiten. Informationen sowie teilsweise Vorträge und Zusammenfassungen finden Sie unter www.autosim.org.

Der nächste Workshop findet vom **23. – 24. November 2006 in Lissabon, Portugal, statt** - in den Folgejahren sind pro Jahr zwei Workshops geplant.

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

Nähere Informationen unter:

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

www.autosim.org



Teilnehmer des zweiten Autosim Workshops in Sonnenhausen, München.

Abaqus / Dassault Systèmes

Abaqus for Catia V5 Version 2.3
 Dassault Systèmes kündigt die Verfügbarkeit der neuen Versions 2.3 Abaqus for Catia V5 an.
www.abaqus.com

Altair Engineering

Altair Engineering übernimmt Mecalog Gruppe und deren Radioss Technologie Suite
 Altair Engineering, Inc., gibt bekannt, dass es ein Übereinkommen zum Erwerb der Mecalog Gruppe und ihrer Radioss Computer Aided Engineering (CAE) Software Produktfamilie geschlossen hat. Mecalog, mit Hauptsitz in Antony, Frankreich ist Entwickler von transienter, nicht linearer CAE Technologie für die Simulation von sicherheitsbezogener Performance und anderer Aufprallvorgänge. Im Rahmen der Vereinbarung werden auch Mecalogs weltweiter Vertrieb, die Softwareentwick-

lung und die Supportteams durch Altair übernommen. Finanzielle Details der Vereinbarung werden nicht mitgeteilt.

Ferretti Group wählt für ihre Produktentwicklung die Altair Engineering HyperWorks Optimierungstechnologie

Altair Engineering, Inc., gibt bekannt, dass die italienische Ferretti Group, eine international bekannte Gruppe von Yachtherstellern, die Altair HyperWorks Computer-Aided Engineering (CAE) Technologie gewählt hat, um die Struktur neuer Verbundmaterialien zu optimieren. Als umfassende Lösung rationalisiert das offene und programmierbare HyperWorks Engineering Framework den gesamten Produktentwicklungsprozess. Der Einsatz der Tools führt außerdem zu einer Steigerung der Produktqualität und Produktivität, zu einer Reduzierung der Entwicklungszeit, um so als Unternehmen der Konkurrenz immer einen Schritt vor-

aus zu sein. Für die Ferretti Gruppe sind Qualität und technologische Innovation wichtige Faktoren, um ihre Produktentwicklung voranzutreiben. In den Yachten sind Leistungsstärke mit fortschrittlichem Design, Ergonomie, Form und Funktion vereint. Vom Entwurf bis zur Konstruktion überwachen mehr als 60 Spezialisten den Entwicklungsprozess jeder einzelnen Yacht, wobei für sämtliche Entwicklungs-, Planungs- und Teststadien high-end Computertechnologien zur Anwendung kommen. Mit der Implementierung der virtuellen Produktentwicklung stellt die Ferretti Gruppe sicher, dass alle ihre Yachten hinsichtlich Leistung und Technologie auf dem neuesten Stand der Technik sind.

www.altair.de

Ansys

Materialdaten für Ansys

Ansys Anwender können nun mit Hilfe einer Schnittstelle zwischen der Werkstoffdatenbank Granta MI und der Ansys Workbench Materialdaten der Firma Granta Design importieren. Auch kompatible Daten anderer Anbieter, wie etwa die Kunststoffdaten von Campus und Ides, können importiert werden.

www.ansys.com

Werbeanzeige

Dr. Heck
 Consulting and Engineering

Simulation und Optimierung
Strömungsvorgänge
Strukturmechanik
Wärmetransportprozesse

Besonderes Know-How:
Fluid-Struktur-Wechselwirkungen

Informationen und viele Anwendungsbeispiele:
www.dhcae.de

Tel: 02151/821493
 Fax: 02151/821494
 Postfach 19 02 54, 47762 Krefeld

Cadferm

Simulation von Muskelkräften im menschlichen Bewegungsapparat: Das AnyBody Modeling System

Das AnyBody Modeling System ist eine Softwarelösung für die computergestützte Bewegungsanalyse der menschlichen Körperkinematik und -kinetik. Bei definierten Lasten lassen sich Aussagen darüber treffen, welche Muskeln im menschlichen Körper in welchem Ausmaß belastet werden. Anwendungsgebiete finden sich unter anderem in der Entwicklung von Prothesen, Implantaten und Rehabilitationsgeräten und ganz allgemein für Ergonomieuntersuchungen.

Neu bei Cadfem: 3D-CAD Programm der Toyota Caelum, Inc. für die innovative Konstruktion von Kunststoffbauteilen

Eine innovative Modellierungsmethodik sowie die technologische Unterstützung verteilter Produktentwicklungsprozesse unterscheiden das 3D CAD-System Caelum XXen von anderen Systemen und prädestinieren es speziell für Konstruktionsprozesse dünnwandiger Bauteile. Caelum XXen, das z. B. bei Panasonic bereits im Einsatz ist, wurde vom CAD-Team der Cadfem GmbH ausgiebig getestet – mit einem sehr positiven Fazit.

IDAC Materialdatenbank für ANSYS Workbench

Anhand der vollständig in die Workbench-Benutzerumgebung integrierte „Engineering Material Properties Database“ haben ANSYS Anwender einen schnellen, direkten und gut strukturierten Zugriff auf eine große Auswahl an Materialien. Diese Datenbank beinhaltet vor allem statische Werkstoffkennwerte wie die Zugfestigkeit, die Streckgrenze, den E-Modul, die Dichte usw. verschiedenster Werkstoffe. Da aber die für eine Betriebsfestigkeitsrechnung notwendigen zyklischen Kennwerte (wie Nennspannungswöhlerlinien, Verfestigungsexponenten und -koeffizienten, zyklische Dehnungskoeffizienten und -Exponenten sowie zyklische Spannungs-Koeffizienten und -Exponenten) meist nicht angegeben sind, wurden diese nach dem Stand der Technik (FKM-Richtlinie 183 (FKM) und Uniform Material Law (UML)) abgeschätzt und die Datenbank um diese Kennwerte erweitert. Damit ist eine Lebensdauerabschätzung mit dem ANSYS Workbench Fatigue Modul möglich. Eine Erweiterung der Datensätze erfolgte dabei für Stahlwerkstoffe sowie für Aluminium- und Titanlegierungen.

www.cadfem.de

PERMAS

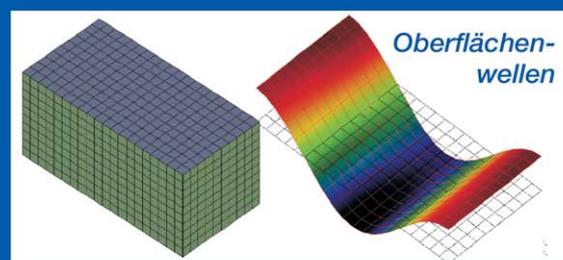
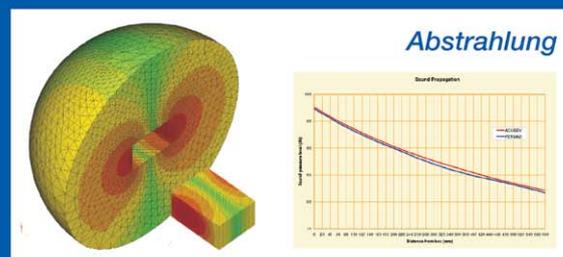
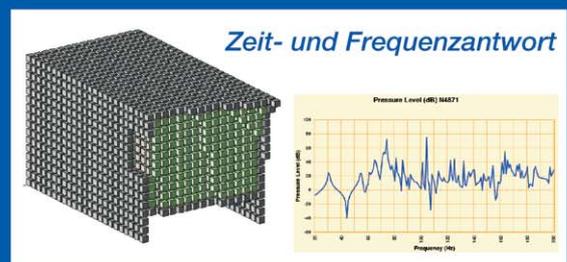
Die innovative Kraft der Simulation



Finite Elemente für erfolgreiche Produkte:

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

Zum Beispiel: Fluid-Struktur-Akustik



Entwicklung - Beratung - Schulung - Berechnung

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

INTES

CD-adapco

CD-adapco stellt die neue Version von STAR-Design V4.04 vor
 CD-adapco stellt die Freigabe von Star-Design vor. Die intuitive Benutzeroberfläche von Star-Design macht es zu einem idealen Werkzeug für jene Ingenieure, die keine Spezialisten für numerische Strömungsmechanik sind. Die Verwendung der leistungsstarken CFD-Technologie von CD-adapco (einschließlich Erzeugung von Polyeder-Gittern) macht deutlich, dass Benutzerfreundlichkeit nicht auf Kosten von Genauigkeit gehen muss. Star-Designs 3D-Festkörpermodellierer und der Geometrieimport erlauben es den Ingenieuren, die kein CAD verwenden, die Geometrie für die Simulation direkt zu erzeugen und zu verwalten.

www.cd-adapco.com

Dassault Systèmes

Abaqus for Catia V5 Version 2.3
 (siehe Abaqus)

www.3ds.com

Dynamore

Die Volkswagen Konzernforschung setzt bei der Umformsimulation auf LS-Dyna

Die Dynamore GmbH vermeldet mit der Volkswagen AG einen weiteren wichtigen Kunden aus der Automobilindustrie. LS-Dyna wird in der Volkswagen Konzernforschung für die Weiterentwicklung von innovativen Produktionsverfahren eingesetzt. Dr. Steffen Kulp, der nach detaillierten Benchmarkstudien diese Entscheidung wesentlich befürwortet, begründet den Einsatz von LS-Dyna wie folgt: „Mit LS-Dyna steht uns ein Simulationstool zur Verfügung, das im Bereich moderner und komplexer Umformprozesse, wie beispielsweise die Umformung von hochfesten Stählen oder das thermische Tiefziehen, große Vorteile bietet. Da in LS-Dyna viele numerische Verfahren nahtlos ineinander greifen und es so möglich ist, viele Details abzubilden, wurde das Programm lizenziert. Auch zur Ermittlung von Pressenkräften während des Tief-

ziehprozesses sehen wir ein hohes Potential mit LS-Dyna, die Werkzeugplanung effektiv zu begleiten. Gerade auf diesem Gebiet erwarten wir durch den Einsatz von LS-Dyna deutliche Fortschritte.

Einsatz von LS-Dyna zur Simulation von statischen Lastfällen

Die Dynamore GmbH erwartet mit der aktuellen LS-Dyna Version einen deutlichen Anstieg von Anwendungen im Bereich nichtlinearer, statischer Problemstellungen. So wurde beispielsweise mit LS-Dyna die statische und dynamische Beulfestigkeit von Kraftfahrzeugstrukturen durch die IVM Automotive AG im Auftrag der Audi AG simuliert. Speziell bei der Auslegung von Karosserieanbauteilen, wie Türen oder Klappen, muss ein Nachweis der statischen Beulfestigkeit geführt werden. Dadurch wird eine ausreichende Steifigkeit gegen Druckbelastungen gewährleistet, die zum Beispiel bei Fahrzeugpolitur oder durch Remppler mit Einkaufswägen entstehen. Bei der Audi AG sind hierfür Simulationsverfahren etabliert, die auf impliziten FEM-Schemata beruhen.

www.dynamore.de

Dynardo GmbH

Strategische Partnerschaft

Dynardo GmbH, EnginSoft S.p.A. und Estoco srl kündigen eine neue Partnerschaft an. Dadurch werden die Optimierungsprogramme mode Frontier (Esteco) und OptiSLang (Dynardo) miteinander gekoppelt.

www.dynardo.de

ESI Group

Entwicklung mit Intel

Die ESI Group und Intel kündigen eine technische Kooperation an. Die beiden Unternehmen werden gemeinsam die Lösungen der ESI Group auf Intel Xeon Prozessoren und Intel Itanium Prozessoren unter Nutzung der neuesten Technologien wie die Multi Core Technology mit Hilfe der Intel Software Tools (compilers library...) entwickeln.

www.esi-group.com

FE-Design

FE-Design liefert Version 6.0 der Optimierungssoftware Tosca aus

FE-Design gibt die Markteinführung der Version 6.0 der Optimierungssoftware Tosca für Topologie-, Gestalt- und Sickenoptimierung mit den Standard FE-Solvern Abaqus, Ansys, MSC.Nastran, MSC.Marc, NX Nastran und Permas bekannt. Die Version Tosca 6.0 enthält zahlreiche neue und einzigartige Funktionalitäten, die die Lösung komplexer und realitätsnaher Optimierungsanwendungen erlauben. Ein weiterer Schwerpunkt wurde auf die erneute Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit und die Steigerung der Performance selbst bei sehr großen Optimierungsmodellen gelegt.

www.fe-design.de

Fluent

Strömungssimulation für Ihren PLM-Prozess

Mit Fluent for Catia bietet Fluent, der Weltmarktführer für numerische Strömungssimulationen (CFD), einen direkt integrierten Strömungslöser für Dassault Systèmes Konstruktions- und PLM-Umgebung Catia V5 an. Dabei ermöglicht Fluents Rapid Flow Modeling Technologie ein hohes Maß an Automatisierung und Stabilität und gestattet so die Strömungsanalyse bereits in einem frühen Stadium des Entwurfsprozesses. So verbessert sich die Leistungsfähigkeit des neuen Entwurfs und das Produkt kann schneller zur Marktreife gelangen.

Neue Versionen von TGrid, Gambit und 3Matic verfügbar

Fluent Inc. hat die Verfügbarkeit der neuen Releases von TGrid 4.0, Gambit 2.3 und 3Matic-for-Fluent 1.0 bekanntgegeben.

Eberspächer und Fluent entwickeln CFD Technologie für Dieselpartikelfilter

Fluent und die J. Eberspächer GmbH & Co. KG, ein führender Zulieferer der Automobilindustrie, geben die gemeinsame Entwicklung eines Simulationsmoduls für Dieselp-

partikelfilter bekannt. Das neue Modul wird es Firmen wie Eberspächer ermöglichen, Partikelfilter für Personen- und Nutzfahrzeuge zu entwickeln und verbessern, die ein Optimum bei Rußbelastung und Regenerierung erreichen. Die Software ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit von Dieselpartikelfiltern über die gesamte Lebensdauer hinweg im Computer zu berechnen, noch bevor der Filter überhaupt gefertigt wird.
www.fluent.de

Flomerics

Nika wird von Flomerics übernommen
 (siehe Nika)
www.flomerics.com

GNS Systems

GNS Systems implementiert bei TRW Automotive zukunfts-trächtige CAE-Strukturen

Die GNS Systems GmbH konnte mit TRW Automotive einen weiteren namhaften Kunden aus dem Automobilsektor gewinnen. Für die TRW-Standorte Düsseldorf und Koblenz hat das Unternehmen eine zukunftsorientierte, Web-basierende CAE-System- und Anwendungsinfrastruktur implementiert und in Betrieb genommen, an deren Konzeptionierung man ebenfalls maßgeblich beteiligt war. Auch zukünftig sollen Betreuung und Erweiterung der Systeme über die GNS Systems GmbH erfolgen.

www.gns-systems.de

Intec

DaimlerChrysler wählt Simpack Software für die Mehrkörpersimulation

DaimlerChrysler (Mercedes-Benz Car Group, Department of Power Train Simulation), hat die Software Simpack von der Intec GmbH für die Simulation von Mehrkörpersystemen gewählt. Die Entscheidung für Simpack fiel nach einer intensiven Evaluierungsphase von drei Jahren im Bereich „engine dynamic simulation“. Ein weiterer Grund für die Entscheidung waren Softwareentwicklungen, die Intec in enger Zu-

sammenarbeit mit DaimlerChrysler realisieren konnte.

www.simpack.com

Intes

Permas Version 11 freigegeben

Nach einer Entwicklungszeit und einer Testphase von fast zwei Jahren wurde die neue Version 11 der FEM-Software Permas freigegeben. Die Version bietet zahlreiche neue Funktionen wie Random Response, vereinfachtes Sub-Modeling und Radiation Heat Transfer, zahlreiche Erweiterungen bestehender Features sowie eine verbesserte Performance vor allem im Bereich Dynamik und Kontaktanalysen.

www.intes.de

LMS

LMS bringt Revision 6 von LMS Virtual.Lab an den Markt

Das neue Release bietet eine erweiterte und vereinheitlichte Modellierungsumgebung, diese integriert alle erforderlichen Modellerzeugungs- und Simulationswerkzeuge für exakte funktionale Analysen auf Systemebene. Diese neue Lösung macht Schluss mit dem enormen Aufwand, jeweils eigene Modelle für separate Disziplinen erzeugen zu müssen, und erlaubt es, attributübergreifende Analysen einfach und reibungslos durchzuführen.

LMS International und Imagine verkünden strategische Partnerschaft

LMS International und Imagine unterzeichneten eine Vereinbarung für eine strategische Partnerschaft, in

Werbeanzeige

CAD/FEM/CFD-Datenaustausch



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

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



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

Chris Jones, BAE SYSTEMS, Luft- und Raumfahrtindustrie

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



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



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

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

deren Rahmen integrierte Lösungen für die funktionale Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme entwickelt und vermarktet werden sollen. Diese integrierten Lösungen stärken auf Seiten von LMS die Kompetenz und die Produkte für die Systemmodellierung und Funktionssimulation und auf Seiten von Imagine die Kompetenz und die Produkte für die physikbasierte multidisziplinäre Systemmodellierung und Simulation. Beide Partner liefern kombinierte Lösungen für die Analyse mechatronischer Systeme, basierend auf der Interoperabilität zwischen LMS Virtual.Lab Motion und Imagine AMESim.

LMS Test.Lab rationalisiert Karosseriebau im Europäischen Technologiezentrum von Toyota

LMS International vermeldete die Implementierung von LMS Test.Lab als eines der Hauptsysteme zum Messen von Fahrgeräuschen und Schwingungen im Europäischen Technologiezentrum von Toyota am Standort Zaventem in Belgien. Das erweiterte Zentrum eröffnete kürzlich im Rahmen von Toyotas Initiative, die europäischen Entwurfs- und Entwicklungsaktivitäten des japanischen Unternehmens an einen neuen Standort zu verlagern. LMS Test.Lab wurde für das NVH Entwicklungsteam des Technologiezentrums installiert und unterstützt die Gruppe, die technisch für Geräusche und Schwingungen (NVH) am Gesamtfahrzeug verantwortlich ist.

www.lmsintl.com

MSC.Software

MD Nastran Rotor Dynamics wird Industrie-Standard

MSC.Software Corp. gab zusammen mit Boeing Commercial Airplanes bekannt, dass mit Hilfe von MD Nastran Rotor Dynamics das Zweijahresziel zur Bereitstellung eines Industriestandards für Simulationen im Bereich Rotordynamik erreicht wurde. MD Nastran Rotor Dynamics bietet den Standard, mit dem Flugzeug- und Turbinenhersteller die Zeit bis zur Lösungsfindung verkürzen und die Zusammenarbeit während der Analyse verbessern

können. MD Nastran Rotor Dynamics ist aus der Zusammenarbeit zwischen Nasa, Boeing, bedeutenden Boeing-Partnern und MSC.Software entstanden, um eine Zusammenarbeit zwischen Flugzeug- und Turbinenhersteller zu ermöglichen.

MSC.Software und IBM kooperieren, um Kunden mit On Demand Simulationsbedarf einen Wettbewerbsvorsprung zu sichern

MSC.Software Corp. gab bekannt, dass das Unternehmen mit IBM kooperiert, um gemeinsam MD on Demand anzubieten. Basis hierfür ist das Deep Computing Capacity on Demand (DCCOD) Angebot von IBM. Dank dieser Zusammenarbeit können Kunden MD Nastran in einer On Demand Umgebung nutzen, die ihren Spitzenbedarf an Analysen deckt, und somit sicherstellen, dass sie in Bereichen mit hartem Wettbewerb optimale Produkte schnell auf den Markt bringen. MD on Demand unterstützt die On Demand Initiative von IBM und stellt eine flexible, schnelle und strategische Lösung für die Geschäftsumgebungen der Kunden zur Verfügung. MD on Demand ist ein Hosted Service, bei dem die Kunden MD Nastran Analysen in einem DCCOD Zentrum durchführen können. MD on Demand ist als Dienstleistung konzipiert, die Kunden in Spitzenzeiten zusätzliche Kapazitäten zur Verfügung stellt, oder als optionales Angebot für Kunden, die zwar Bedarf an komplexen Simulationen haben, jedoch nicht so regelmäßig, dass die Anschaffung der Anwendung und der dafür notwendigen Infrastruktur gerechtfertigt wäre. Weitere Informationen zum Angebot MD on Demand erhalten Sie unter: <http://mdondemand.mscsoftware.com>.

MSC.Software präsentiert MSC SimEnterprise

MSC.Software Corp. gab die Markteinführung von SimEnterprise bekannt. SimEnterprise ist eine Entwicklungsplattform für unternehmensweite Simulationen, die eine enge Zusammenarbeit von CAE-Konstrukteuren, Analysefachleuten,

Managern und der Zulieferkette während des gesamten Entwicklungsprozesses erlaubt. So lassen sich beträchtliche Vorteile bei der Interaktion, dem Datenmanagement und der Prozessautomatisierung erzielen. Hierbei wird ein offener Systemansatz verfolgt, bei dem jeder Beteiligte seine bevorzugte Software einsetzen kann. Die Software zielt darauf ab, den Zugriff auf und das Arbeiten mit Daten für die Entwicklerteams zu verbessern, wobei die Simulationsdaten überall im erweiterten Unternehmensumfeld gemeinsam genutzt werden können.

www.mscsoftware.com

Nika

Nika wird von Flomerics übernommen

Flomerics (Flotherm) und Nika GmbH (EFD - Engineering Fluid Dynamics) sind Softwareunternehmen im Bereich der Strömungssimulation. Nike wurde von Flomerics übernommen.

www.nika-germany.de

Samtech

Neue Version Boss quattro

Samtech gibt die Verfügbarkeit der Boss quattro V5.1 bekannt.

Neue Software Europlexus

Samtech gibt das kommerzielle Release der FEM-Software Europlexus bekannt, welches seit dem Jahr 2000 gemeinsam von der French Atomic Energy Commission (CEA Saclay), dem Joint Research Centre (Europäische Union), EDF und Samtech entwickelt wurde.

www.samcef.com

Tecosim

Prozesslösung Tec|Bench

Die Tecosim Technische Simulation GmbH bietet der Automobilindustrie mit Tec|Bench erstmalig eine Prozesslösung zum Vergleich mit Konkurrenzprodukten an. Am Markt frei erhältlichen Produkte werden durch Tec|Bench in virtuelle Rechenmodelle umgewandelt. Die ermittelten Daten lassen sich anschließend mit den eigenen, sich noch in der frü-

hen Entwicklungsphasen befindlichen Produkten vergleichen.
www.tecosim.de

Unigraphics Solutions

Weltweit größter Automobilzulieferer wird Mitglied der JT Open-Initiative und unterstützt Etablierung des JT-Formats als Industriestandard für den 3D-Datenaustausch

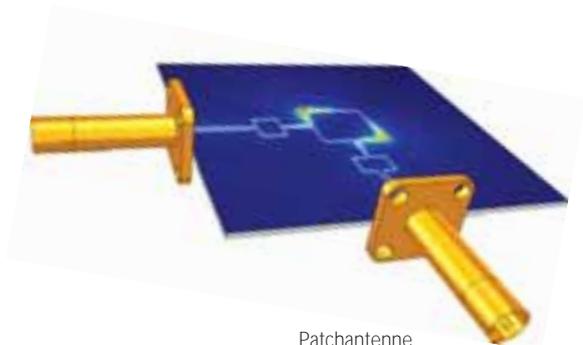
UGS gibt bekannt, dass die Robert Bosch GmbH - der weltweit größte Automobilzulieferer - der JT Open-Initiative beiträgt. Die JT Open-Initiative verbindet führende Unternehmen der Fertigungsindustrie, die PLM als Wettbewerbsstrategie erkannt haben und in JT eine Technologie sehen, diese Strategie umzusetzen. JT ist das am meisten genutzte Datenformat der Fertigungsindustrie, um wichtige Produktinformationen auszutauschen - inklusive detaillierter 3D-Produktgeometrie. Das 'schlanke' Datenformat erleichtert die effektive unternehmensweite Zusammenarbeit während des gesamten Produktlebenszyklus'.

UGS gewinnt mit Smart Engineering neuen CAE-Vertriebs- und Dienstleistungspartner

UGS hat jetzt mit dem Unternehmen Smart Engineering GmbH eine Partnerschaft für den Vertrieb seiner windows-basierten FEM-Lösung Femap with NX Nastran und begleitende Dienstleistungen abgeschlossen. Smart Engineering war bisher Partner des Unternehmens MSC. Software für MSC. Nastran for Windows. Im Februar 2006 beendete UGS das Abkommen mit MSC. Software, das es MSC. Software ermöglichte, das UGS-Produkt Femap als MSC. Nastran for Windows zu bündeln und zu vertreiben. Smart Engineering entschloss sich danach schnell dazu, mit UGS eine Partnerschaft einzugehen, um seiner in 10 Jahren aufgebauten Kundenbasis eine Fortsetzung des Einsatzes der leistungsfähigen Kombination aus Femap und Nastran zu ermöglichen.
www.ugs.com

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

COMSOL
MULTIPHYSICS™



Patchantenne

Große Performance für die Lösung komplexer Modelle.

Anspruchsvolle Aufgaben erfordern innovative Software: Mit COMSOL Multiphysics™ können Sie beliebige Kopplungen physikalischer Phänomene durchführen.

Analysieren Sie Strukturmechanik, Elektromagnetik und Wärmetransport in einem einzigen Simulationsmodell. Genauigkeit, Schnelligkeit und Nutzerfreundlichkeit stehen dabei an erster Stelle.

Kostenlose CD mit Fachbeiträgen zur Mathematischen Simulation und aktueller Katalog unter:



www.comsol.de/conference2005/cd/

www.comsol.de

 COMSOL

COMSOL MULTIPHYSICS IS A TRADEMARK OF COMSOL AB.

5th World Congress of Biomechanics	29.07.- 04.08.06	München, D	www.wcb2006.org	Institut für Biotechnik e.V.
Abaqus Benutzerkonferenz	18.-19.09.06	Erfurt, D	www.abacus.de	Abaqus Deutschland GmbH
CAT.Pro	19.-23.09.06	Stuttgart, D	www.catpro.de	Messe Stuttgart GmbH
MSC.Software Virtual Product Development Conference 2006	20.-21.09.06	Frankfurt, D	www.mssoftware.com	MSC.Software GmbH
1. Technologie- und Informationstag von CAEvolution & Engineous	21.09.06	Garching, D	www.caevolution.de	CAEvolution GmbH
NAFEMS Seminar: Simulation of Power Generation Technology	27.09.06	Ratcliffe, UK	www.nafems.org	NAFEMS
VDI-Kongress: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau	27.-28.09.06	Würzburg, D	www.vdi-wissensforum.de	VDI
Cadferm Forum Knowledge Based Engineering (KBE)	28.09.06	München, D	www.cadferm.de	Cadferm GmbH
PLM Europe Conference - Unigraphics	09.-11.10.06	Frankfurt, D	www.ugsplm.com	Unigraphics GmbH
EuroPam 2006	10.-12.10.06	Toulouse, F	www.esi-group.com	ESI Group
5. LS-Dyna Forum	12.-13.10.06	Ulm, D	www.dynamore.de	Dynamore GmbH
NAFEMS Trainingskurs Basic 1: Praxisorientierte Strukturmechanik / Festigkeitslehre	16.-17.10.06	Wiesbaden, D	www.nafems.de	NAFEMS DACH
Euroblech 2006	24.-28.10.06	Hannover, D	www.euro-blech.de	
24. Cadferm Users' Meeting	25.-27.10.06	Fellbach, D	www.cadferm.de	Cadferm GmbH
Comsol Multiphysics Konferenz	30.-31.10.06	Frankfurt, D	www.femlab.de	Femlab GmbH
NAFEMS Seminar: Integration of Structural Analysis / CFD into the Development Process	02.-03.11.06	Göteborg, S	www.nafems.org/nordic	NAFEMS Nordic
ATS Altair Technology Seminar	07.11.06	Böblingen, D	www.altair.de	Altair Engineering GmbH
ECF 2006, 10. European PLM Forum	07.-09.11.06	Paris, F	www.ecforum.com	IBM, Dassault Systemès
NAFEMS Seminar: Simulation versus Test	08.11.06	Cheshire, UK	www.nafems.org	NAFEMS
Fluent CFD Forum	14.11.06	Bad Nauheim, D	www.fluent.de	Fluent Deutschland GmbH
NAFEMS Workshop: Aerospace Industry	15.11.06	Anaheim, USA	www.nafems.org	NAFEMS
1. Workshop für Multidisciplinary Simulation in Bio-Medical Applications	21.-22.11.06	Mosbach, D	www.scai.fhg.de	Fraunhofer SCAI
3. Autosim Workshop	23.-24.11.06	Lissabon, PT	www.autosim.org	NAFEMS
Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 3.0	23.-24.11.06	Weimar, D	www.dynardo.de	Dynardo GmbH
NAFEMS Trainingskurs Basic 2: Praxisorientierte Grundlagen für FEM-Analysen	27.-28.11.06	Wiesbaden, D	www.nafems.de	NAFEMS DACH
Euromold 2006	29.11.-02.12.06	Frankfurt	www.euromold.com	Demat GmbH
NAFEMS Seminar: Materialmodellierung	05.-06.12.06	Wiesbaden, D	www.nafems.de	NAFEMS DACH
NAFEMS Seminar: CFD im Wandel - Zuverlässiger Einsatz CAD-basierter Software sowie anwendungsspezifischer Codes	26.-27.03.2007	Wiesbaden, D	www.nafems.de	NAFEMS DACH
NAFEMS Seminar: Zuverlässiger Einsatz numerischer Simulationsmethoden in der Vorausberechnung	28.-29.03.2007	Wiesbaden, D	www.nafems.de	NAFEMS DACH

Modernste Verfahren der Prozesssimulation

Simulationsingenieur/in

Perspektive Gruppenleiter/in

Wir sind ein unabhängiges und hoch innovatives Entwicklungs- und Beratungsunternehmen mit kurzen Entscheidungswegen und Sitz in einer attraktiven Universitätsstadt. Unsere Schwerpunkte liegen in der Werkstoff- und Prozessoptimierung. Mit einem interdisziplinären Team bearbeiten wir Forschungs- und Entwicklungsaufträge für die Industrie und die öffentliche Hand. Wir sind bereits seit 20 Jahren erfolgreich in diesem Markt aktiv.

Im Zuge der weiteren Expansion suchen wir eine/n Simulationsingenieur/in, der/die sich schwerpunktmäßig der Modellierung von Gieß- und Erstarrungsprozessen mittels eigener und kommerzieller Software widmet. Dies umfasst insbesondere die Rechengittergenerierung auf der Basis von CAD-Modellen, die eigenverantwortliche Durchführung von Simulationsrechnungen sowie die Dokumentation und Präsentation Ihrer Ergebnisse beim Kunden. Ferner bauen Sie mittelfristig

das auf diesen Bereich spezialisierte Team aus und leiten es.

Mit diesem Angebot wenden wir uns an Kandidaten/-innen mit passendem akademischem Abschluss und fundierter Kenntnis von Simulationsmethoden. Diese müssen nicht aus dem Gießereiumfeld, sondern können beispielsweise auch aus der Mechanik oder der Chemie stammen. Sie konnten sich solide Kenntnisse der einschlägigen Software sowie der Finite-Elemente-Methode aneignen. Zudem sollten Sie Erfahrungen mit kommerziellen Netzgeneratoren haben. Sie verfügen über einen zielorientierten und pragmatischen Arbeitsstil und können sich kooperativ in ein funktionierendes Team integrieren. Des Weiteren zeichnen Sie sich durch ein überzeugendes Auftreten und Kommunikationsstärke aus. Wir bieten Ihnen eine anspruchsvolle Aufgabe mit guten Entwicklungsperspektiven in einem gesunden Unternehmen sowie eine überdurchschnittliche, leistungsorientierte Vergütung.

Wenn wir Sie mit dieser Aufgabenstellung ansprechen könnten, so stehen Ihnen unsere Berater, Frau Christina Langen und Herr Christian Weimar, unter der Rufnummer (0 22 61) 7 03-5 18 bzw. mailto: christian.weimar@kienbaum.de gerne zur Verfügung. Sie sichern Ihnen Vertraulichkeit und die sorgfältige Beachtung von Sperrvermerken zu.

Interessenten bitten wir um Zusendung aussagekräftiger Bewerbungsunterlagen (tabellarischer Lebenslauf, Zeugniskopien, Lichtbild, Angabe des Gehaltswunsches/Eintrittstermins) unter der Kennziffer 0866608 an die Kienbaum Executive Consultants GmbH, Postfach 10 05 52, 51605 Gummersbach. <http://kienbaum.bewerbung.de>

Kienbaum 

Executive Search
Human Resource & Management Consulting

Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Kroatien, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Polen, Russland, Schweiz, Tschechien, Ungarn, Brasilien, China, Singapur, Thailand

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

Schalten Sie ein/e

Stellenanzeige/Stellengesuch *

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

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

* Die Schaltung von Stellenanzeigen ist NAFEMS Mitgliedern vorbehalten.

Join the team!

HITACHI

Inspire the Next

Die Hitachi Power Europe GmbH plant und baut Kernkomponenten für fossil befeuerte Kraftwerke, etwa Mahlanlagen, Umwelttechnik, Großdampferzeuger oder Turbinen. Zudem gehören schlüsselfertige Kraftwerke zum Lieferprogramm. Aufgrund der weltweit starken Nachfrage nach wirtschaftlichen und umweltschonenden Kraftwerken und der starken Technologieposition wächst das Unternehmen rasant. Für die Erweiterung unserer Teams besetzen wir zum nächstmöglichen Zeitpunkt folgende Stelle:

FEM-Berechnungsingenieur (m/w)

Voraussetzungen:

- Diplom-Ingenieur der Fachrichtung Maschinenbau
- Sehr gute Kenntnisse in Technischer Mechanik, Festigkeit, Thermodynamik und Werkstofftechnik
- Fundierte FEM-Kenntnisse und Erfahrungen in der FEM-Anwendung, wie z. B. ABAQUS, ANSYS, MSC.NASTRAN, o. ä., (bevorzugt mit Programmsystemen MSC.MARC, MSC.Patran, MSC.Mentat)
- Umfassende Kenntnisse in mindestens einer Programmiersprache für technische Probleme (FORTRAN, C, Visual Basic)
- Fähigkeit zur Umsetzung von FE-Berechnung auf ausgeführte Konstruktionsbauteile
- Mindestens 2 Jahre Berufserfahrung im Bereich FEM-Berechnung
- Gute Englischkenntnisse in Wort und Schrift
- Ausgeprägtes analytisches Denkvermögen
- Selbständige Arbeitsweise
- Team- und Kommunikationsfähigkeit

Aufgabengebiet:

- Modellierung, Berechnung einschl. Bewertung und Optimierung von Bauteilen im Kraftwerksbau in enger Abstimmung mit der Konstruktion (analytisch sowie FEM)
 - Thermodynamische Analysen
 - Inelastische Analyse, insb. Kriechberechnung an Bauteilen bei hohen Temperaturen
 - Schadensanalyse und Lebensdauerberechnung
 - Erstellung und Pflege von eigenen Berechnungs-Firmenrichtlinien
 - Entwicklung von neuen Berechnungsmethoden
 - Mitarbeit in Forschungsprojekten
- Die Betreuung und Einarbeitung durch qualifizierte Mitarbeiter/innen sowie eine gute Einbindung ins Team sind bei uns selbstverständlich. Für nähere fachliche Informationen steht Ihnen Frau Dr. Andrea Reidick, Telefon 0208 8333777 gerne zur Verfügung.

Bitte senden Sie Ihre vollständigen Bewerbungsunterlagen (gerne auch per E-Mail) unter Angabe der Kennziffer PF/23/2005 zu.

www.hitachi-power.com



Vertriebsingenieur / in

Wir sind die deutsche Tochtergesellschaft der ESTECO srl, Triest, Italien und verantwortlich für den Vertrieb und die Anwendungsberatung für das Programm modeFRONTIER in Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Die Produktentwicklung ist heute zunehmend geprägt von kürzeren Entwicklungszeiten und geringeren Preisen bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Produkteigenschaften. Ein Produkt, das eine bestimmte Anforderung erfüllt ist nicht mehr gut genug, es wird ein optimales Produkt gefordert. Ein Autokühler muss nicht nur wie früher einen bestimmten Wärmestrom übertragen, er muss auch noch in einen bestimmten Bauraum passen, möglichst leicht und möglichst kostengünstig zu fertigen sein.

Unter diesen Randbedingungen ist nicht nur der Einsatz von CAE-Berechnungsprogrammen (FEM, CFD u.a.) notwendig, sondern es wird immer wichtiger, den Entwurfsprozess selbst mit Software zu unterstützen, um systematisch – und nicht zufällig – zu einem optimalen Design zu gelangen.

Hierzu dienen Programme wie modeFRONTIER, die eine ganze Berechnungskette vom CAD-System über den Gittergenerator und ein oder mehrere Berechnungsprogramme integrieren. Eine Optimierungssoftware wie modeFRONTIER benutzt statistische Algorithmen, um aus dem Einfluss verschiedener Produktparameter (beispielsweise geometrischer Größen) auf die Zielgrößen (Leistung, Gewicht, ...) einen für diese Zielgrößen optimalen Satz dieser Parameter zu finden.

modeFRONTIER (**m**ulti-**o**bjective **o**ptimization and **d**esign **e**nvironment) zeichnet sich gegenüber anderen Optimierern durch die einfache Integration nahezu aller CAD- und CAE-Pakete, die Vielzahl und die Güte der zur Verfügung stehenden Algorithmen sowie die einfache Handhabung durch die intuitive graphische Benutzeroberfläche aus.

Für den Vertrieb von modeFRONTIER suchen wir zum nächstmöglichen Zeitpunkt eine Ingenieurin oder einen Ingenieur. Ihre Aufgabe umfasst die Generierung und Qualifizierung von Anfragen, die Demonstration der Software bei potenziellen Kunden, die Angebotserstellung und den Abschluss von neuen Lizenzverträgen. Weiter sind Sie verantwortlich für die vertriebliche Betreuung bestehender Kunden.

Wir bieten Ihnen große Freiheiten sowie Entwicklungsmöglichkeiten in einem jungen, schnell wachsenden Unternehmen und erwarten eine selbstständige, pro-aktive und ergebnisorientierte Arbeitsweise. Erfahrungen bei der Anwendung und im Verkauf von CAE-Software setzen wir voraus, ebenso verhandlungssicheres Englisch.

Wir freuen uns auf Ihre Bewerbung zu Händen von

Frieder Semler
Geschäftsführer
ESTECO GmbH
Sprollstr. 10/1
72108 Rottenburg
Tel. ++49 7472 988689-0, Fax –98
semler@esteco.com

Informationen zu modeFRONTIER:
<http://www.esteco.com/products.jsp>
<http://www.esteco.com/registration.jsp>

Vergleich verschiedener FE Berechnungsmethoden für das elektromagnetische Drehmoment von PM Maschinen

Dieter Gerling, Gurakuq Dajaku

Institut für Elektrische Antriebstechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg

Grundsätzlich kann das Drehmoment elektrischer Maschinen mit Hilfe verschiedener Methoden berechnet werden. In diesem Beitrag werden die Methoden „Maxwellscher Spannungstensor“, „magnetische Koenergie“ und „Ersatzschaltbild“ untersucht. Als Beispiel wird eine Permanentmagnet (PM) Maschine mit Oberflächenmagneten am Rotor mit Hilfe des FE Softwarepaketes ANSYS analysiert. Für die Ersatzschaltbildmethode werden die d-q-Parameter der elektrischen Maschine mit Hilfe der „Fixed Permeability Method“ (FPM) berechnet. Die FPM erlaubt die Berechnung der gewünschten Parameter mit hoher Genauigkeit.

Die durch Anwendung der verschiedenen Berechnungsmethoden erhaltenen Ergebnisse werden bezüglich Genauigkeit, Einfachheit der Anwendung und Rechenzeit miteinander verglichen.

1. Einleitung

Die Drehmomenterzeugung zum Antrieb einer Last über einen bestimmten Drehzahlbereich ist die grundlegende Aufgabe eines jeglichen elektrischen Motors. Deshalb ist das Drehmoment die wesentliche Größe bei der Analyse bzw. dem Design von elektrischen Maschinen. Die Finite Elemente Methode stellt eine genaue Berechnungsmethode, basierend auf einer Bestimmung des elektromagnetischen Feldes, zur Verfügung. Da bei der Feldberechnung die Wicklungsverteilung, die genaue Geometrie und die Nichtlinearität des Eisens berücksichtigt werden, ist diese Methode sehr exakt.

In diesem Beitrag wird eine PM-Maschine mit Oberflächenmagneten mit Hilfe des Programmpaketes ANSYS untersucht. Abbildung 1 zeigt die Geometrie der betrachteten PM-Maschine; die wesentlichen geometrischen Daten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

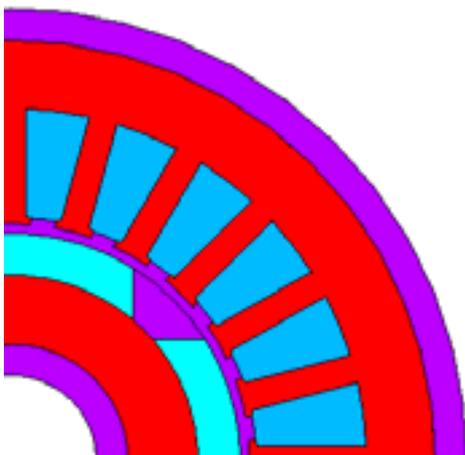


Abbildung 1: Geometrie der betrachteten PM-Maschine.

TABELLE 1- GEOMETRIEDATEN

Rotor Radius	[mm]	21.6
Luftspaltlänge	[mm]	0.9
Magnetdicke	[mm]	4
Magnetpol-Winkel	[deg]	127.8
Anzahl der Pole	[--]	4
Außenradius des Stators	[mm]	40
Blechpaketlänge	[mm]	35

Zur Berechnung des elektromagnetischen Drehmomentes dieser Maschine sind unterschiedliche Methoden, alle basierend auf FE-Rechnungen, angewendet worden: „Maxwellscher Spannungstensor“, „d-q-Modell der PM-Maschine“ und „magnetische Koenergie“. Die Nutzung des Maxwellschen Spannungstensors ist wahrscheinlich die einfachste Methode, weil sie nur die lokale Flussdichteverteilung entlang einer spezifischen Kontur im

Luftspalt der Maschine erfordert. Die Genauigkeit der Drehmomentberechnung mit dieser Methode hängt von der Modell-Diskretisierung und der Wahl der Kontur ab.

Betrachtet man das Prinzip der virtuellen Arbeit, dann berechnet sich das elektromagnetische Drehmoment aus der Ableitung der magnetischen Koenergie nach dem Drehwinkel (bei konstantem Strom). Diese Methode erfordert mindestens zwei FE-Rechnungen, um eine Koenergieänderung mit einer inkrementellen Änderung der Rotorposition zu erhalten. Dies erhöht insgesamt die Rechenzeit.

Die Ermittlung des elektromagnetischen Drehmomentes mit der dritten Methode basiert auf dem mathematischen d-q-Modell der PM-Maschine. Die d-q-Parameter der Maschine können exakt mit Hilfe der „Fixed Permeability Method (FPM)“ [1-3] berechnet werden. Diese Methode stellt sicher, dass der Sättigungseinfluss bei der Berechnung der

- d-q-Induktivitäten (alleinige Stromerregung der Statorwicklungen) und der
- induzierten Spannung (back emf; alleinige Permanentmagneterregung)

berücksichtigt wird. Der Algorithmus zur Berechnung der d-q-Parameter der PM-Maschine mit der „Fixed Permeability Method“ ist in Kapitel vier dieses Beitrages dargestellt.

2. Elektromagnetisches Drehmoment

2.1 Maxwellscher Spannungstensor

Die Berechnung des Drehmomentes mit Hilfe des Maxwell'schen Spannungstensors ist sehr verbreitet, weil sie sehr unkompliziert anzuwenden ist und nur eine geringe Rechenzeit benötigt. Andererseits ist die Genauigkeit dieser Methode offensichtlich abhängig von der Art des Problems, von der Modell-Diskretisierung und von der Wahl der Kontur im Luftspalt, über deren Länge integriert wird. Bei der Anwendung des Maxwell'schen Spannungstensors ist es wichtig, mindestens drei Elementlagen im Luftspalt anzuordnen, und das Drehmoment in der mittleren Elementlage zu berechnen.

Das elektromagnetische Drehmoment T_e im Luftspalt des Motors auf einer geschlossenen Fläche mit dem Radius r kann durch Integration des Maxwell'schen Spannungstensors berechnet werden. Für zweidimensionale Modelle gilt:

$$T_e = \frac{L}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_r B_\theta d\theta \quad (1)$$

wobei B_r und B_θ die radiale und tangentielle Komponente der Flussdichte sind und L die aktive Länge der Maschine. Nutzt man die Periodizität der elektrischen Maschine aus, so kann das Integral von 0 bis 2π elektrischen Graden ausgewertet werden und das Ergebnis mit der Anzahl der Polpaare p multipliziert werden.

2.2 Koenergie

Die am zweithäufigsten genutzte Methode basiert auf dem Prinzip der virtuellen Arbeit, d.h. der Änderung der magnetischen Koenergie mit dem Rotorpositionswinkel bei konstantem Strom:

$$T_e = \left. \frac{\Delta W_{\text{co-eng}}}{\Delta \theta} \right|_{i=\text{const}} \quad (2)$$

Bei dieser Methode ist für die Berechnung eines einzelnen Punktes die Rechenzeit gegenüber der ersten Methode verdoppelt, weil die elektromagnetischen Felder für zwei Rotorpositionswinkel bekannt sein müssen, um eine Koenergieerhöhung ermitteln zu können.

2.3 d-q-Modell der PM-Maschine

Die Modellierung und Analyse von PM-Maschinen geschieht üblicher Weise mit der bekannten Raumzeigertheorie. Im Folgenden werden die relevanten Gleichungen, die auch für den Fall eines gesättigten Betriebszustandes gelten, dargestellt.

Das elektromagnetische Drehmoment ist in der d-q-Formulierung:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \quad (3)$$

Die Spannungsgleichungen des dynamischen Betriebs sind:

$$\begin{aligned} u_d &= R \cdot i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega \cdot \psi_q \\ u_q &= R \cdot i_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega \cdot \psi_d \end{aligned} \quad (4)$$

wobei im allgemeinen die Flussverkettungen von beiden Stromkomponenten abhängen, analog zu dem folgenden magnetischen Model:

$$\begin{aligned} \psi_d &= \psi_d(i_d, i_q) \\ \psi_q &= \psi_q(i_d, i_q) \end{aligned} \quad (5)$$

Arbeitet der Motor im ungesättigten (d.h. linearen) Betrieb, dann ändern sich die Flussverkettungen in d- und q-Achse linear mit den entsprechenden Strömen:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d \cdot i_d + \psi_d^m \\ \psi_q &= L_q \cdot i_q \end{aligned} \quad (6)$$

wobei ψ_d^m die Flussverkettung in der d-Achse aufgrund der permanenten Magnetisierung ist. Im ungesättigten Fall verläuft der gesamte Permanentmagnetfluss in der d-Achse.

Wird der Motor mit einem hohen Drehmoment, d.h. mit großen Strömen, betrieben, dann sind Sättigungseinflüsse nicht mehr vernachlässigbar und die beiden Flussverkettungskomponenten (in d- und q-Achse) hängen jeweils von beiden Stromkomponenten (in d- und q-Achse) ab. Das vollständige magnetische Modell für den gesättigten Motor wird dann zu:

$$\begin{aligned} \psi_d(i_d, i_q) &= L_d(i_d, i_q) \cdot i_d + \psi_d^m(i_d, i_q) \\ \psi_q(i_d, i_q) &= L_q(i_d, i_q) \cdot i_q + \psi_q^m(i_d, i_q) \end{aligned} \quad (7)$$

Verglichen mit Glg. (6) tritt eine zusätzliche Komponente der permanenten Flussverkettung in der q-Achse auf. Wie die Induktivitäten L_d und L_q hängen auch die Flussverkettungen der permanenten Magnetisierung ψ_d^m und ψ_q^m von den Stromkomponenten in beiden Achsen ab. Es kann gezeigt werden, dass für eine PM-Maschine mit eingesetzten Magneten ψ_d^m mit i_d ansteigt, während es mit i_q abfällt. Analog hierzu steigt bei der gesättigten Maschine ψ_q^m (das für den Motorbetrieb der PM-Maschine negativ ist) mit i_q , während es mit i_d abfällt; die Variation erreicht bis zu 24% des Wertes von ψ_d^m . Dies ist ein wesentlicher Einfluss der Sättigung.

Aus den Gleichungen (3) und (7) kann die folgende Beschreibung für das elektromagnetische Drehmoment hergeleitet werden:

$$T_e = \frac{3}{2} p \left\{ \left[L_d(i_d, i_q) - L_q(i_d, i_q) \right] \cdot i_d \cdot i_q + \left[\psi_d^m(i_d, i_q) \cdot i_q - \psi_q^m(i_d, i_q) \cdot i_d \right] \right\} \quad (8)$$

Dieser Ausdruck wird benutzt, um das elektromagnetische Drehmoment mit der dritten FE-Methode zu berechnen. Die d-q-Parameter der PM-Maschine werden hierbei mit Hilfe der „Fixed Permeability Method“ [1-3] ermittelt. Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist, dass nichtlineare Probleme in lineare transformiert werden, indem die Permeabilitäten der nichtlinearen Berechnung abgespeichert werden: Für jeden Betriebspunkt wird die Permeabilität für jedes FE-Element aus einer vorangegangenen FE-Berechnung mit vollständiger Erregung (Ströme und Permanentmagnet) für die folgende Berechnung abgespeichert. Mit dieser abgespeicherten Permeabilität wird nun eine zweite FE-Berechnung durchgeführt, entweder mit alleiniger Strom- oder Permanentmagnet-Erregung. Dies garantiert, dass der Sättigungseinfluss, der unter Last wirksam wird, nicht vernachlässigt wird, wenn die d-q-Parameter der Maschine berechnet werden.

3. Ergebnisse der FE-Analyse

Auf der Grundlage der oben beschriebenen FE-Berechnungsmethoden ist im Folgenden das elektromagnetische Drehmoment für einen Maximalstrom von $I = 2.56 \text{ A}$ und einen Lastwinkel (Winkel zwischen der Gesamtflussverkettung aufgrund der Stromerregung und der q-Achse) von $\delta = 0^\circ$ ermittelt. Für diesen Betriebspunkt ist die Feldlinienverteilung und die Flussdichte entlang der Permanentmagnetoberfläche über zwei benachbarte halbe Pole in Abbildung 2 dargestellt. Auf der Magnetoberfläche besitzt die Flussdichteverteilung einen relativ hohen Oberwellenanteil, der durch die Nutung des Stators hervorgerufen wird.

Alle folgenden FE Berechnungen sind mit dem Softwarepaket ANSYS durchgeführt worden.

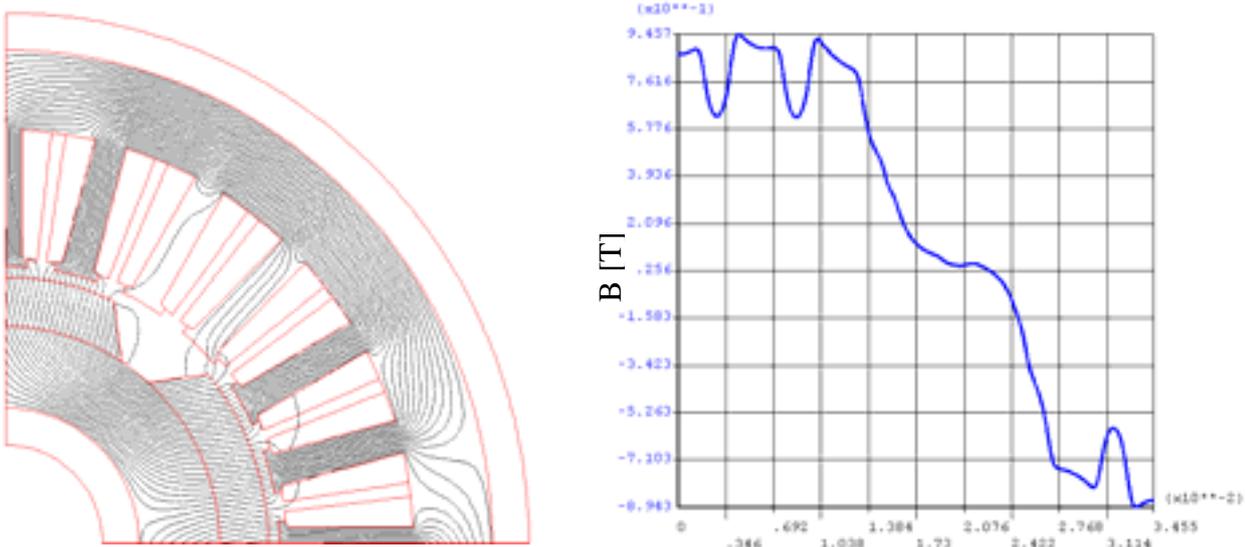


Abbildung 2: Feldlinienverteilung (links) und Flussdichte entlang der Permanentmagnetoberfläche über zwei benachbarte halbe Pole (rechts).

Zunächst wird das elektromagnetische Drehmoment für die Methoden „Maxwellischer Spannungstensor“ und „Koenergie“ bei fester Stromerregung und unterschiedlichen Rotorpositionen berechnet. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Resultate beider Methoden sehr gut übereinstimmen. Die Drehmomentkurve ist näherungsweise cosinusförmig abhängig vom Lastwinkel (für einen festen Statorstrom ist der Lastwinkel gleichbedeutend mit der Rotorposition). Abbildung 3 stimmt auch mit der bekannten Tatsache überein, dass PM-Maschinen mit Oberflächenmagneten das maximale Moment für $\delta = 0^\circ$ (d.h. $I = I_q$) errei-

chen. Aufgrund der Statornutung sind der reinen Cosinusform harmonische Anteile überlagert, die auch als Klebemoment (cogging torque) bekannt sind. Häufig ist dieses Klebemoment der größte Teil der Drehmomentpulsation. Da es durch die Interaktion von Statorzähnen und Magneten hervorgerufen wird, ist es zunächst nicht stromabhängig. Erst wenn die Zähne aufgrund eines hohen Stromes gesättigt werden steigt im allgemeinen das Klebemoment an, weil die effektive magnetische Nutöffnung größer wird.

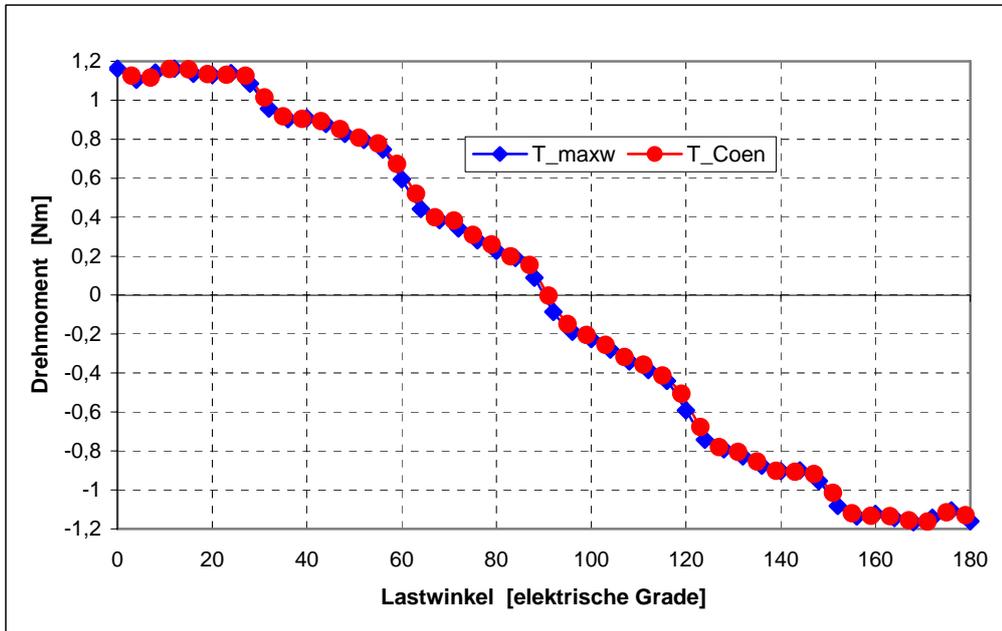


Abbildung 3: Elektromagnetisches Drehmoment als Funktion des Lastwinkels ($I = 2.56 \text{ A}$), berechnet mit den Methoden „Maxwellscher Spannungstensor“ und „Koenergie“.

Im Folgenden wird nun für die gleichen Betriebsbedingungen wie zuvor das elektromagnetische Drehmoment als Funktion der Rotorposition berechnet. Verglichen werden jetzt die Methoden „Maxwellscher Spannungstensor“ und „d-q-Modell der PM-Maschine“. Zur Ermittlung der d-q-Parameter des Motors wird die „Fixed Permeability Method“ angewendet. Die so berechneten d-q-Induktivitäten und d-q-Flussverkettungen aufgrund der permanenten Magnetisierung betragen: $i_q = 2.56 \text{ A}$, $i_d = 0 \text{ A}$, $L_q = 6.483 \text{ mH}$, $L_d = 6.483 \text{ mH}$, $\psi_d^m = 1.531 \cdot 10^{-1} \text{ Vs}$, $\psi_q^m = -7.663 \cdot 10^{-4} \text{ Vs}$.

Abbildung 4 zeigt den Sättigungszustand im Eisen der PM-Maschine für den betrachteten Betriebszustand. Diese Permeabilitätsverteilung ist das Ergebnis der „Fixed Permeability Method“. Es können in der Maschine drei Regionen mit niedriger relativer Permeabilität (d.h. hoher Sättigung) unterschieden werden: die Statorzähne, das Statorjoch und das Rotorjoch, jeweils im Hauptflusspfad.

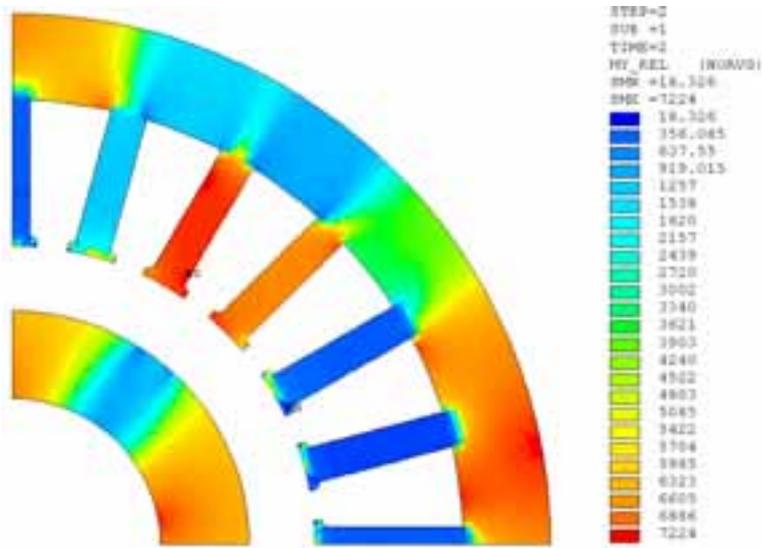


Abbildung 4: Verteilung der relativen Permeabilität im Eisen der PM-Maschine für $I = 2.56 \text{ A}$ und $\delta = 0^\circ$ (die blaue Färbung zeigt niedrige relative Permeabilität und somit hohe Sättigung an).

Das elektromagnetische Drehmoment als Funktion der Rotorposition für $I = 2.56 \text{ A}$ und $\delta = 0^\circ$ ist in Abbildung 5 dargestellt, wobei die Berechnungsmethoden „Maxwellscher Spannungstensor“ und „d-q-Modell“ verwendet wurden. Auch hier ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

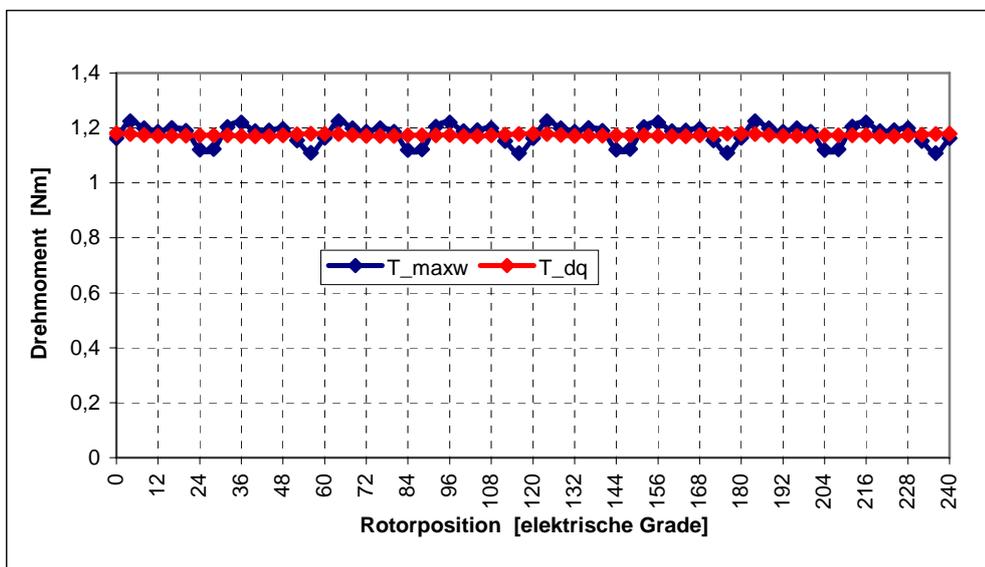


Abbildung 5: Elektromagnetisches Drehmoment als Funktion der Rotorposition für $I = 2.56 \text{ A}$ und $\delta = 0^\circ$; Berechnungsmethoden: „Maxwellscher Spannungstensor“ und „d-q-Modell“.

Da die Berechnung des elektromagnetischen Drehmomentes mit der Methode „Maxwellscher Spannungstensor“ alle Drehmomentkomponenten im Luftspalt der PM-Maschine beinhaltet, sind hierbei auch die Nutungseffekte zu sehen. Das „d-q-Modell“ dagegen berücksichtigt nur den Mittelwert des elektromagnetischen Drehmomentes: Die Statornutung ist in diesem Modell nicht enthalten.

4. Rechenzeit

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln diskutiert, ist die Berechnungsmethode „Maxwellscher Spannungstensor“ wahrscheinlich am weitesten verbreitet, um das elektromagnetische Drehmoment zu berechnen. Dies liegt daran, dass diese Methode in der Anwendung unkompliziert ist und zudem nur eine relativ geringe Rechenzeit benötigt: Nur eine Simulation pro Betriebspunkt ist erforderlich.

Bei der „Koenergie“-Methode verdoppelt sich demgegenüber die Rechenzeit, da zwei Feldlösungen für einen Betriebspunkt benötigt werden, um eine Koenergiedifferenz zu bekommen.

Auch bei der Berechnung des Drehmomentes mit Hilfe des „d-q-Modells“ werden zwei Simulationen benötigt, weil die „Fixed Permeability Method“ angewendet werden muss. Die erste Simulation wird unter vollständiger Erregung (Strom- und Permanentmagneterregung) durchgeführt. Hieraus wird die relative Permeabilität eines jeden FE-Elementes berechnet und für die folgende Berechnung abgespeichert. Mit dieser abgespeicherten Permeabilitätsverteilung (die den Sättigungszustand der Maschine widerspiegelt) wird dann eine zweite Berechnung durchgeführt; entweder bei alleiniger Stromerregung, oder bei alleiniger Permanentmagneterregung. Diese zweite Berechnung mit der eingefrorenen Permeabilitätsverteilung ist schneller als die erste, weil das Feldproblem nun linearisiert ist. Abbildung 6 verdeutlicht den Berechnungsvorgang mit Hilfe eines Flussdiagramms. Sollen mit Hilfe dieser Berechnungsvorschrift die Mittelwerte der d-q-Parameter ermittelt werden, so muss diese Prozedur für verschiedene Rotorpositionswinkel durchgeführt und danach über alle Rotorpositionswinkel gemittelt werden. In diesem Fall ist diese Methode extrem zeitaufwändig.

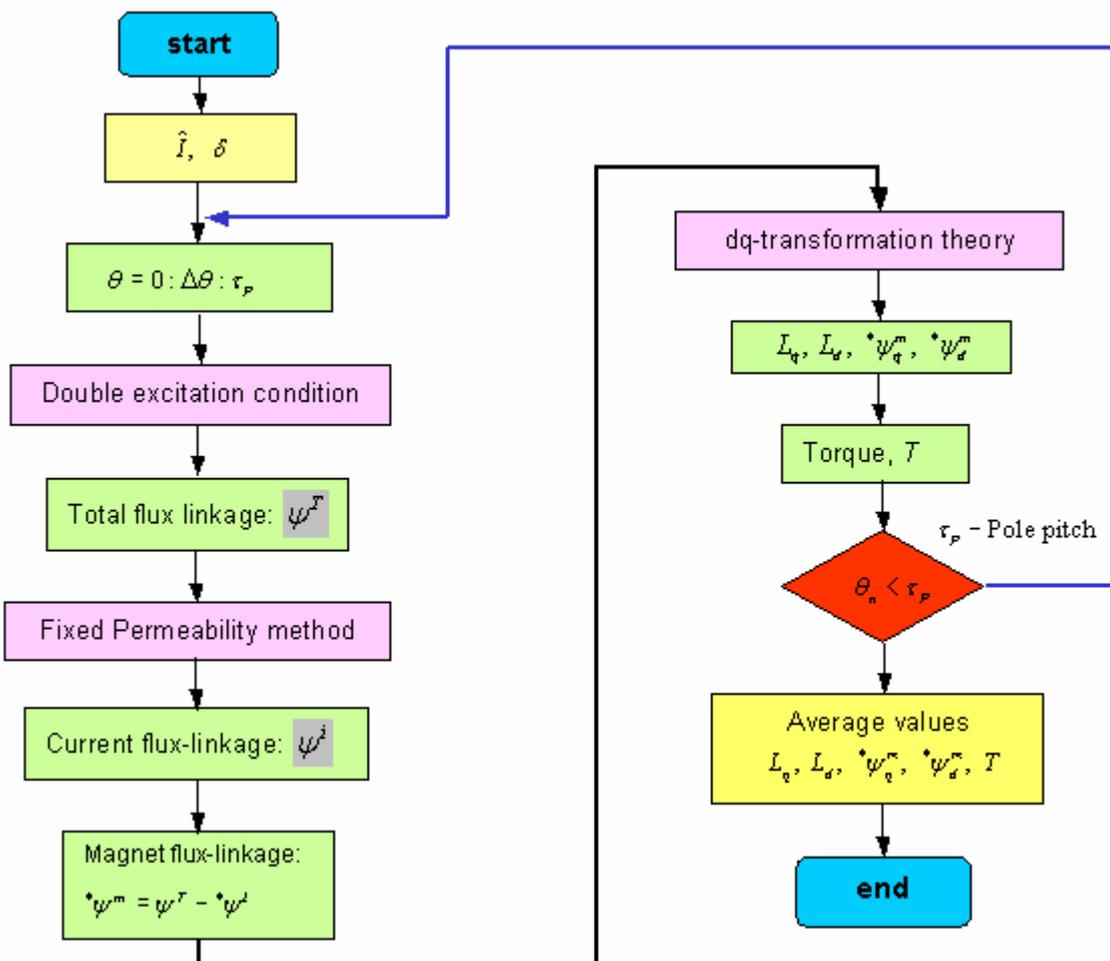


Abbildung 6: Flussdiagramm zur Berechnung der d-q-Parameter der PM-Maschine.

5. Zusammenfassung

Das Drehmoment ist ein sehr wichtiger Parameter bei der Analyse und dem Design elektrischer Maschinen. Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode kann das Drehmoment, basierend auf der elektromagnetischen Feldverteilung, genau berechnet werden. In diesem Beitrag werden drei verschiedene Methoden zur Berechnung des Drehmomentes miteinander verglichen, wobei alle Methoden die FE-Analyse nutzen: „Maxwellscher Spannungstensor“, „Koenergie“ und „d-q-Modell“. Bei richtiger Anwendung erhält man mit allen Methoden gute Ergebnisse, allerdings unterscheiden sich die Methoden im Aufwand (Arbeitszeit des Anwenders und Rechenzeit des Computers) und in der Berücksichtigung von Oberwellen, wie sie z.B. durch die Statornutung hervorgerufen werden.

Literatur

- [1] Kwak S. J., Kim K. J., Jung H. K.: "The characteristics of the magnetic saturation in the interior permanent magnet synchronous motor", International Conference on Electrical Machines, 2004, Cracow, Poland (ICEM 2004)
- [2] Bianchi N., Bolognani S.: "Magnetic models of saturated interior permanent magnet motors based on finite element analysis", IEEE IAS Annual Meeting, 1998, St. Louis, USA
- [3] Jianhui H., Jibin Z., Weiyang L.: "Finite element calculation of the saturation dq-axes inductance for a direct-drive PM synchronous motor considering cross-magnetization", International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003, Singapore (PEDS 2003)

Modellierung und Finite Elemente Simulation von Aktuatoren aus dielektrischen Elastomeren

Michael Wissler^{1,2}, Prof. Dr. Edoardo Mazza^{2,1}

¹ Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), CH-8600 Dübendorf

² Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Institut für mechanische Systeme, CH-8092 Zürich

Dielektrische Elastomere gehören zur Gruppe der elektroaktiven Polymere und werden als Aktuatoren verwendet um grosse Deformationen zu erzeugen. Elektromechanische Modelle und Berechnungstools sind erforderlich für das Design und die Optimierung solcher Aktuatoren. Die Formulierung des passenden mechanischen konstitutiven Modells ist dabei eine Herausforderung aufgrund grosser Deformationen und zeitabhängigen Effekten (Viskoelastizität). In dieser Arbeit wird ein quasilineares visko-hyperelastisches Modell verwendet um das elektromechanische Verhalten von einfachen Kreisaktuatoren numerisch zu berechnen.

Elektroaktive Polymere (EAP) sind neuartige Materialien welche in adaptiven Strukturen als Aktuatoren eingesetzt werden, speziell wenn sehr grosse Deformationen erforderlich sind. Solche Aktuatoren setzen elektrische Energie in mechanische Arbeit direkt um und produzieren Dehnungen bis zu 100 %. Die dielektrischen Elastomere sind eine Kategorie der elektroaktiven Polymere und zeigen viel versprechende Eigenschaften [1]. Verschiedene Anwendungen werden entwickelt [2, 3] wie zum Beispiel Robotergelenke, Pumpen, Ventile und künstliche Muskeln. Aktuatoren aus dielektrischen Elastomeren bestehen aus einem Kondensator mit einem dünnen, inkompressiblen Elastomerfilm eingeklemmt zwischen zwei nachgiebigen Elektroden (Abbildung 1). Gemäss [2] kann der elektromechanische Druck p_{el} , welcher auf den isolierenden Elastomerfilm wirkt, berechnet werden für eine elektrische Aktivierungsspannung U und eine Schichtdicke d :

$$p_{el} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \left(\frac{U}{d} \right)^2 \quad (1)$$

ϵ_0 ist die Vakuumspermittivität ($8.85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm) und ϵ_r ist die relative dielektrische Konstante des Elastomers (hier: 4.7). Aufgrund der mechanischen Kompression zieht sich der Elastomerfilm in Dickenrichtung zusammen und expandiert aufgrund des inkompressiblen Materialverhaltens senkrecht dazu. Um die Performance zu erhöhen werden die Elastomerfilme vorgedehnt, bis zur fünffachen Ursprungslänge.

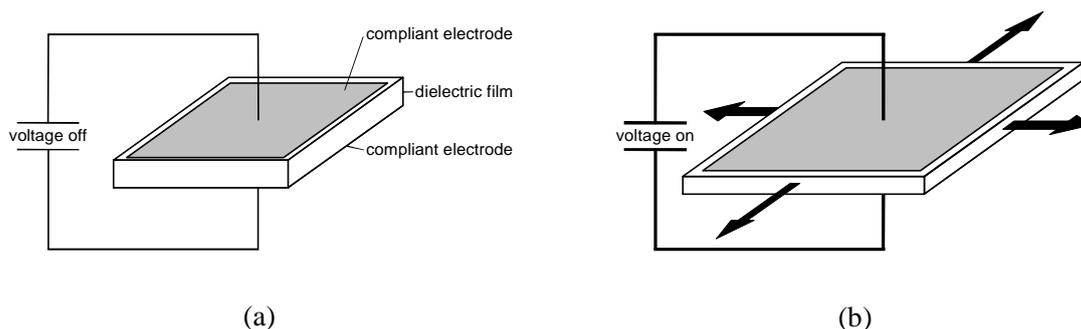


Abbildung 1: Funktionsprinzip eines Aktuators aus dielektrischen Elastomeren. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung kontrahiert der Elastomerfilm in Dickenrichtung und dehnt sich senkrecht dazu aus.

Bis anhin gibt es nur sehr wenige Arbeiten über die Modellierung und Simulation von dielektrischen Elastomeren. In [4, 5] wird ein quasilineares visko-hyperelastisches Modell verwendet um einen Kreisaktuator bei einer Vordehnung ($\lambda_P = 4$) und einer Aktivierungsspannung ($U = 3.5$ kV) zu beschreiben. In dieser Arbeit werden 3 unterschiedliche Vordehnungen und 3 unterschiedliche Aktivierungsspannungen betrachtet. Für die Evaluierung der Simulation wurden experimentelle Daten verwendet.

Das experimentelle Herstellungsverfahren erfolgte in 2 Schritten (siehe auch [4, 5]): In einem ersten Schritt wurde das Elastomer (VHB 4910, 3M) radial vorgedehnt und auf einen runden Rahmen aufgebracht. Die Vordehnung λ_p ist hier definiert als Verhältnis zwischen dem Radius R (Abbildung 2) im vorgedehnten (75 mm) und im nichtvorgedehnten Zustand. Die Vordehnung wurde gewählt als $\lambda_p = 3, 4$ und 5 . In einem zweiten Schritt wurden die Elastomerfilme beschichtet (Fläche: Kreis mit Radius $r_0 = 7.5$ mm, siehe Abbildung 2) mit einer Silikon/Graphit-Dispersion.

Für jede Vordehnung wurden 3 Aktuatoren hergestellt. Jeder Aktuator wurde mit einer konstanten elektrischen Spannung U während 15 min aktiviert. Abhängig vom Experiment wurde eine konstante Spannung von 2, 2.5 oder 3 kV aufgebracht. Die nominelle Dehnung $s = r_1/r_0 - 1$ wurde mit einem Videoextensometer gemessen.

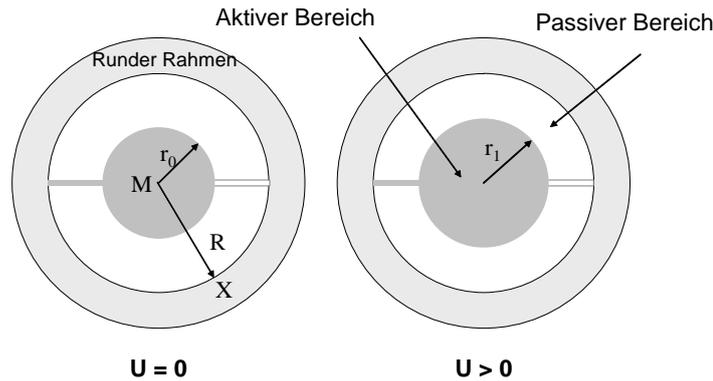


Abbildung 2: Anordnung eines Kreisaktuators für die elektromechanischen Messungen, links deaktiviert, rechts aktiviert.

Konstitutives Modell

Um das mechanische Verhalten des Elastomerfilms zu beschreiben ist ein dreidimensionales konstitutives Modell erforderlich. Sowohl grosse Dehnungen (Hyperelastizität) als auch zeitabhängige Effekte (Viskoelastizität) sind zu berücksichtigen.

Hyperelastizität

Das Dehnungsenergiepotenzial W repräsentiert die Dehnungsenergie eines Materials und ist dazu geeignet, Materialien mit grossen Dehnungen zu beschreiben. Hier werden die beiden Dehnungsenergiepotenziale von Yeoh und Ogden verwendet. Die Yeoh-Form [6] wird mit den drei Materialparametern C_{10} , C_{20} and C_{30} durch folgende Gleichung beschrieben:

$$W = C_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) + C_{20}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2)^2 + C_{30}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2)^3 \quad (2)$$

Das Verstreckungsverhältnis λ_i ($i = 1, 2$ and 3) ist definiert als deformierte Länge dividiert durch die undeformierte Länge in den Hauptrichtungen der Deformation. Die Ogden-Form [7] ist gegeben durch

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \cdot (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (3)$$

Hier werden 3 Terme ($N=3$) für die Ogden-Energiefunktion verwendet.

Viskoelastizität

Die Zeitabhängigkeit der mechanischen Antwort in einem sogenannten quasilinearen viskoelastischen Modell [8] wird beschrieben durch zeitabhängige Koeffizienten im Dehnungsenergiepotential. Die zeitabhängige Funktion $g(t)$ welche die zeitabhängigen Koeffizienten charakterisiert ist gegeben durch die sogenannten Prony-Serie:

$$g(t) = 1 - \sum_{k=1}^N g_k \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{t_k}\right)\right) \quad (4)$$

g_k und t_k charakterisieren das Relaxationsverhalten und t ist die Zeit. Die Kopplung zwischen grossen Dehnungen (hyperelastisches Verhalten) und zeitabhängigen Parametern (g_k , t_k) wird als quasilineares visko-hyperelastisches Materialmodell bezeichnet [5, 8].

Finite Elemente Simulation

Die Simulation erfolgte mit der Finiten Elemente Methode (FEM). Als FE-Programm wurde ABAQUS [9] verwendet. Das Modell ist achsensymmetrisch und die Rotationsachse geht durch den Punkt M, Abbildung 2. Das Modell beinhaltet eine Symmetrieebene senkrecht zur Rotationsachse (Abbildung 3). Es wurden achsensymmetrische 4-Knoten Elemente [9] (CAX4H: A 4-node bilinear axisymmetric quadrilateral, hybrid, constant pressure) gewählt.

Der elektromechanische Druck p_{el} wirkt auf den aktive Bereich und wird als 'Surface pressure' aufgebracht. Aufgrund der permanenten Änderung von p_{el} wurde eine Fortran-Userroutine geschrieben, welche den momentanen Druck als Funktion von der momentanen Dicke d und der Aktivierungsspannung U berechnet. Die Beziehung zwischen elektromechanischem Druck, Dicke und Aktivierungsspannung ist gegeben durch Gleichung 1. Für das mechanische Verhalten des Elastomerfilms wurde das quasilineare visko-hyperelastische Modell verwendet.

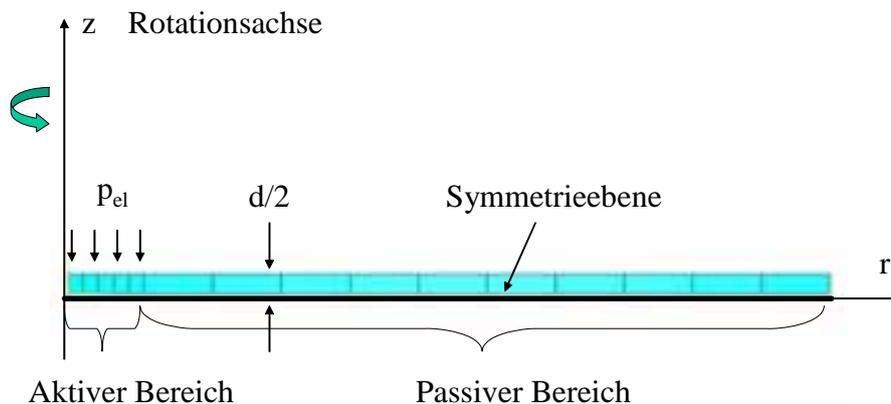


Abbildung 3: Achsensymmetrisches FE-Modell eines Aktuators aus dielektrischen Elastomeren

Drei Modelle mit den unterschiedlichen Vordehnungen $\lambda_p = 3, 4$ and 5 wurden betrachtet. Für jede Vordehnung wurde ein separates Modell hergestellt. Die drei Aktivierungsspannungen $U=2, 2.5$ and 3 kV wurden einzeln aufgebracht. Insgesamt wurden neun Simulationen durchgeführt. Die Simulationen wurden entsprechend den Experimenten in 3 Schritten ausgeführt: (i) Vordehnung in radialer Richtung linear über einer Zeitperiode von 20 s mit dem vordefinierten Vorstreck-Verhältnis λ_p (3, 4 oder 5), (ii) Relaxationsphase für 3600 s und (iii) Aufbringen von p_{el} auf die aktive Zone für 900 s entsprechend der Aktivierungsspannung ($U = 2, 2.5$ oder 3 kV).

Um die Materialparameter zu erhalten wurde in Matlab [10] ein Optimierungsalgorithmus programmiert [11], welcher den Fehler f , die Differenz zwischen dem berechneten und dem experimentellen Dehnungsverlauf, minimiert. Die Materialparameter wurden gefittet für die Fälle Vordehnung $3 / U = 2$ kV und Vordehnung $4 / U = 3$ kV.

Resultate

Die Resultate der kombinierten Optimierung von Vordehnung 3 und 4 bei 2 kV sind in Abbildung 4 ersichtlich.

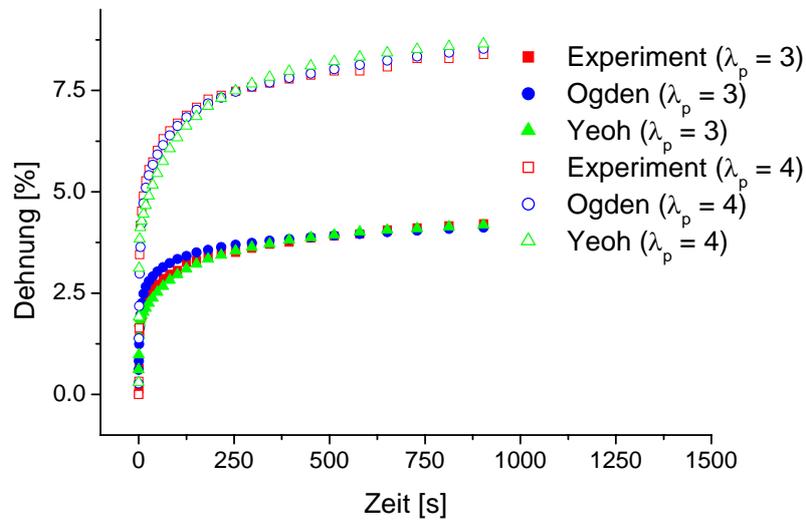


Abbildung 4: Berechnungen mit den optimierten Materialparameter für das Yeoh- und das Ogden-Modell verglichen mit den experimentellen Daten.

Alle mit den optimierten Materialparameter berechneten Kurven sind zusammen mit den experimentellen Daten dargestellt für Vordehnung 3 (Abbildung 5), Vordehnung 4 (Abbildung 6) und Vordehnung 5 (Abbildung 7).

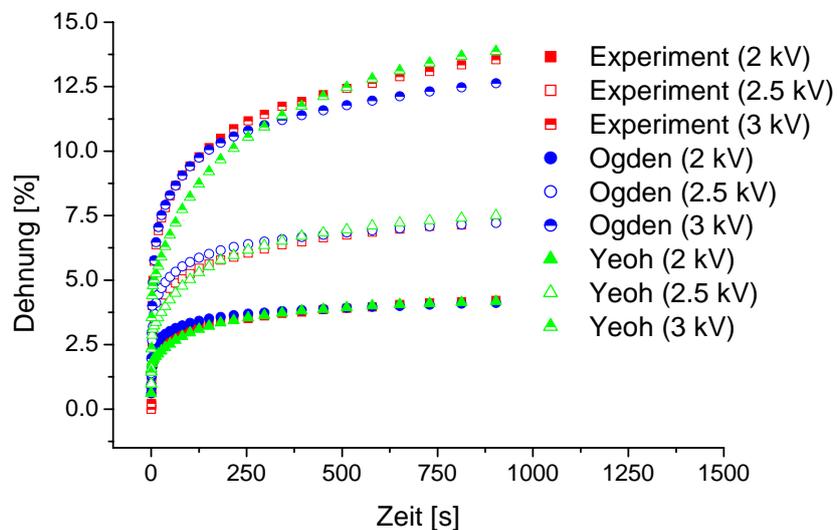


Abbildung 5. Simulation vs. Experiment: Aktivierungsverhalten bei Vordehnung 3

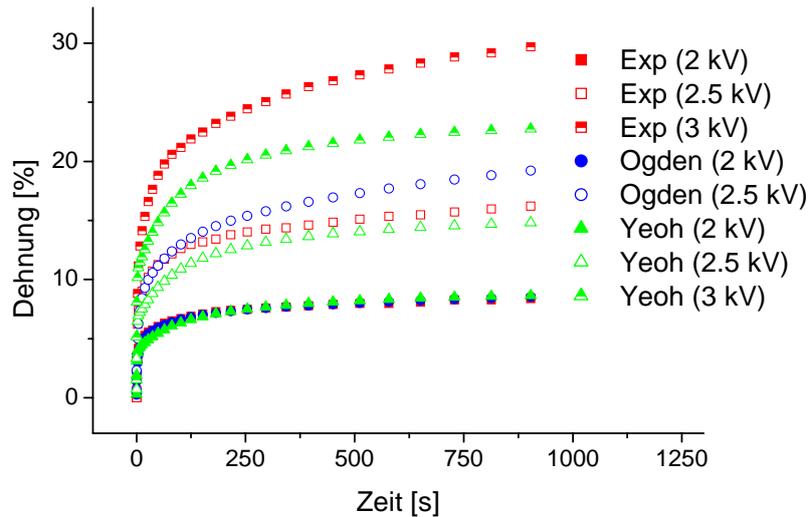


Abbildung 6. Simulation vs. Experiment: Aktivierungsverhalten bei Vordehnung 4

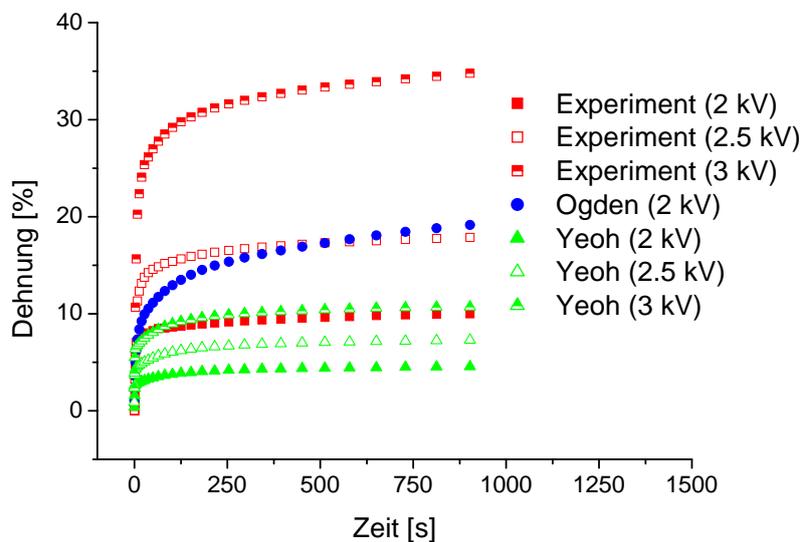


Abbildung 7. Simulation vs. Experiment: Aktivierungsverhalten bei Vordehnung 5

Diskussion und Schlussfolgerung

Die Resultate der Materialparameter-Optimierung zeigen, dass eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten erhalten wird für das Ogden- und das Yeoh-Modell, wenn der Dehnungsverlauf gefittet wird für Vordehnung $\lambda_p = 3$ und 4 bei 2 kV.

Bei den Aktivierungsspannungen 2.5 und 3 kV stimmen bei Vordehnung 3 die Berechnungen gut überein mit den Experimenten. Dies gilt sowohl für das Ogden- als auch für das Yeoh-Modell. Bei Vordehnung 4 und 2.5 kV führt das Yeoh-Modell zu besseren Resultaten als das Ogden-Modell. Bei 3 kV konvergierte die Berechnung für das Ogden-Modell nicht. Die Abweichung des Yeoh-Modells beträgt 30 % bezüglich den experimentellen Daten bei $t = 15$ min.

Aufgrund Konvergenzproblemen konnte bei Vordehnung 5 für das Ogden-Modell nur der Verlauf bei 2 kV berechnet werden. Für das Yeoh-Modell konvergierten alle drei Aktivierungsspannungen, es treten jedoch

beträchtliche Abweichungen verglichen mit den Experimenten auf. Eine bessere Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment wird erwartet wenn Vordehnung 5 auch bei der Materialparameteroptimierung miteinbezogen wird.

Es wurde gezeigt, dass das quasilineare visko-hyperelastische Modell mit einem Materialparameter-Set in der Lage ist gute Voraussagen über einen relativ grossen Bereich von Vordehnung und Aktivierungsspannung zu treffen. Speziell das Yeoh-Modell zeigt eine gute Beständigkeit und Konvergenz.

Danksagung

Wir bedanken uns beim Schweizerischen Nationalfonds (SNF, Projekt-Nr. 200021-107661/1) für finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Bar-Cohen Y., *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential and Challenges*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2001
- [2] Pelrine R., Kornbluh R. et al., *Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation*, *Sensors and Actuators A*, 1998, vol. 64, pp. 77-85
- [3] Pelrine R., Kornbluh R., et al., *High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%*, *Science*, 2000, vol. 287, pp. 836-839
- [4] Wissler M., Mazza E., *Modeling of a pre-strained circular actuator made of dielectric elastomers*, *Sensors and Actuators A* 120, 2005, pp. 184 - 192
- [5] Wissler M., Mazza E., *Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators*, *Smart Materials and Structures*, vol. 14, pp. 1396 – 1402, 2005
- [6] Yeoh O.H., *Some forms of the strain energy function for rubber* *Rubber, Chem. Technol.*, vol. 66, 1993, pp. 754-771
- [7] Ogden R.W., *Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids*, *Proc. R. Soc. Lond.*, A 326, 1972, pp. 565-584
- [8] Fung Y.C., *Biomechanics. Mechanical properties of living tissues*, 2nd edn., Springer-Verlag, New York, 1993, p. 277
- [9] *Abaqus/Standard Manual*, 2003. Version 6.4.1, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- [10] *Matlab 7.0*, 2004, The MathWorks, Inc.
- [11] M. Wissler, E. Mazza, *Modeling and Finite Element Simulation of Dielectric Elastomer Actuators*, *NAFEMS Seminar: Numerical Simulation of Electromechanical Systems*, 26. – 27. October, 2005, Wiesbaden, Germany

Autoren

Michael Wissler ist diplomierte Ingenieur ETH. Er promoviert über die Modellierung und Simulation von Aktuatoren aus elektroaktiven Polymeren an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa).

Edoardo Mazza ist ausserordentlicher Professor für Mechanik am Institut für Mechanische Systeme der ETH Zürich.

Simulation einer Transversalflussmaschine in Flachmagnetanordnung

Dipl.-Ing. Jochen Schüttler
Seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter des IALB
(Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente)
an der Universität Bremen, Deutschland.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik
Seit Oktober 1994 Professor für elektrische Antriebstechnik
an der Universität Bremen

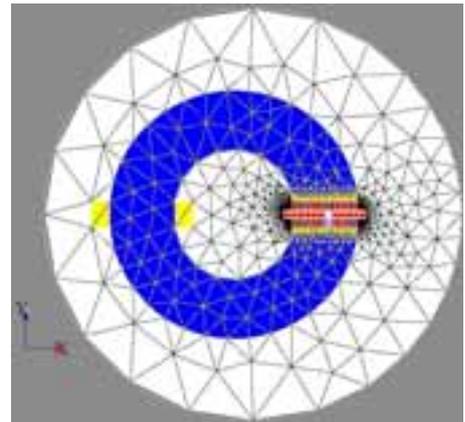


Abb. 7: Mesh des gesamten Raums

Elektrische Maschinen mit hohem Drehmoment bei niedriger Drehzahl werden heute in vielen technischen Anwendungen benötigt, insbesondere als Direktantriebe. Transversalflussmotoren (TFM) erfüllen diese Voraussetzungen und sind dabei sehr kompakt (s. [1]). Allerdings sind sie größtenteils in einem experimentellen Entwicklungsstadium und neigen zur Abgabe hoher Drehmoment-Welligkeit (Ripples). In einem Projekt des IALB wird ein Prototyp einer Serien-TFM, dessen innere Geometrie unbekannt ist, durch ein Modell mit realistischen Feld- und Leistungsdaten angenähert. Dieses kann z.B. mit Finite Elemente-Werkzeugen herausgearbeitet werden. Um schnelle Ergebnisse zu gewinnen, wird ein äquivalentes 2D-Modell geschaffen, das die reale 3D-Struktur nachbildet. Mit den gewonnenen Maßen der Maschine wird ein 3D-Modell entworfen. Die Ergebnisse werden nicht nur bezüglich Feldform und -stärke verglichen, sondern auch bzgl. Feldenergie und resultierenden Drehmoments.

Das Transversalflussprinzip

Das namensgebende Merkmal von Transversalflussmaschinen ist die magn. Flussführung transversal zur Rotationsrichtung. Ein weiteres entscheidendes Merkmal ist die ringförmige Windung im Stator, bei der die Stromrichtung mit der Rotationsrichtung übereinstimmt. Das innovative Design des Flusspfads kombiniert mit dem Gebrauch neuer Magnetmaterialien führt zu High Performance-Antrieben mit einer im Vergleich zu konventionellen Gleichstrom-, Asynchron- und Synchronmaschinen 3-5fach höherer Leistungsdichte.

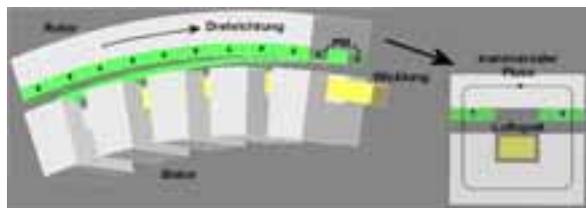


Abb. 1: Darstellung des Transversalflussprinzips, Flachmagnetanordnung

Zur Zeit erreichen die Kraftdichten normaler Asynchronmotoren bis zu 20-30 kN/m². Eine Standard-Synchronmaschine erreicht 40-60 kN/m². assergekühlte und kraftdichtenoptimierte High Performance-Maschinen können bis 65 kN/m² erreichen, kurzzeitig bis zu 80 kN/m². Wassergekühlte Transversalflussmaschinen erreichen bis zu 200 kN/m² (vgl. [1]).

Ein weiterer Vorteil ist der höhere Wirkungsgrad, der aus zwei Gründen resultiert: den reduzierten Kupferverlusten, da es keinen Wicklungskopf gibt, und der Tatsache, dass magnetischer und elektrischer Kreislauf nicht um den gleichen Raum konkurrieren.

Das Prinzip erlaubt eine Vielzahl möglicher Entwurfsversionen, die sich oft nur im mech. Aufbau, aber nicht bzgl. der elektromagnetischen Krafterzeugung unterscheiden. Typischerweise brauchen nur drei Haupttopologien unterschieden zu werden: Reine Reluktanzmaschinen (TFRM) und permanentmagneterregte Anordnungen (TFPM), die weiter in Flusssammler- und Flachmagnetanordnung unterteilt werden (s. Bild 1 u. 2). Die hier vorgestellte Arbeit konzentriert sich auf den Flachmagnettyp, der schon in zumindest einem Serienmotor vorkommt (Abs. 3).

Neben den genannten Vorteilen gibt es prinzipbedingte Nachteile der Transversalflusstechnik. Diese be-

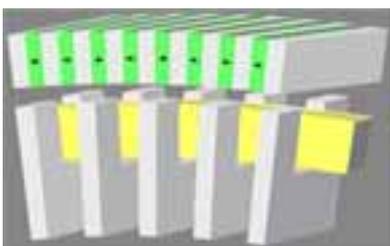


Abb. 2: Darstellung des Transversalflussprinzips, Sammleranordnung

stehen in den Drehmoment-Ripples, den Normalkraftschwankungen, dem niedrigen Leistungsfaktor und dem komplexen Design (insbesondere beim Sammlertyp). Drehmoment- und Normalkraftschwankungen führen zu Geräuschen und zerstörerischen Vibrationen. Dem begegnen Entwickler zumeist mit speziellen Bauformen (z.B. in [3]) oder speziellen Bestromungsverläufen (z.B. in [4]).

Die Finite Elemente-Modelle

Es existiert ein Prüfstand am IALB mit einer TFPM in Flachmagnetanordnung, die MTC1-145-3 von Servax/Landert. Der Motor sollte nicht geöffnet werden, aber auch so lässt sich sagen, dass ein Stator/Rotor-Paar der Skizze in Bild 3 ähnlich sein sollte, mit unbekanntenen Werten für die tatsächlichen Maße.

Um schnelle Ergebnisse zu erzielen, die möglichst nah an den realen Abmaßen liegen, wird ein äquivalentes 2D-Modell entworfen (4.1). Sobald damit Parameter gefunden wurden, die zu realitätsnahem Verhalten führen, wird damit ein 3D-Modell erstellt (4.2), um akkurate Ergebnisse für das magnetische Feld zu gewinnen. Diese werden zum Vergleich mit einem hier nicht vorgestellten analytischen Modell verwendet.

Das äquivalente FE-2D-Modell

Es ist schwierig, die Struktur einer TFM nach Bild 1 und 3 in eine 2D-

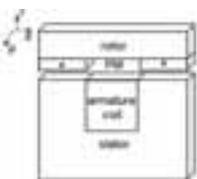


Abb. 4: 2D-Modellentwurf von Rotor und Stator

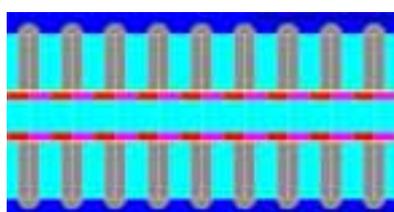


Abb. 5: Verbindung der Statorpole

Geometrie zu wandeln. Die Statorpole können so versetzt werden, dass man zu der translatorischen Ersatzdarstellung in Bild 4 gelangt. Aber die Wicklung und die Verbindung zwischen oberen und unteren Statorpolen liegen dann hinter dieser Frontalansicht.

Weil die Struktur periodisch symmetrisch ist, können die oberen und unteren Statorpole jeweils wie in Bild 5 verbunden werden.

Wenn die oberen und unteren Statorpole zueinander mit einem großen äußeren Verbindungsstück extrem hoher Permeabilität geschlossen werden, kann die eigentliche Verbindung hinter der Anordnung imitiert werden. Die Wicklung kann einfach neben diesem Verbindungsstück eingezeichnet werden. Die Vorgehensweise führt zu Randeffekten an den Kanten des Stators/Rotors, die es in der realen Struktur nicht gibt. Die Anordnung in Bild 6 ist das endgültige 2D-Modell.

Der nächste Schritt ist ein funktionierendes Mesh, das fein genug im Luftspaltbereich, etwas weniger fein im Rest der realen Struktur und sehr grob im äußeren Bereich ist (s. Bild 7). Dadurch kommt es zu einem großen Gradienten in der Mesh-Kantenlänge, der mit einer künstlichen Zwischenschicht vor den Statorpolen abgefangen wird (s. Bild 8). Weiterhin muss das Mesh die Bewegung des Rotors zulassen.

Für die vielen identischen Teile im zentralen Bereich wurde ein verketteter Mesh-Generator spezifiziert, wodurch ein identi-

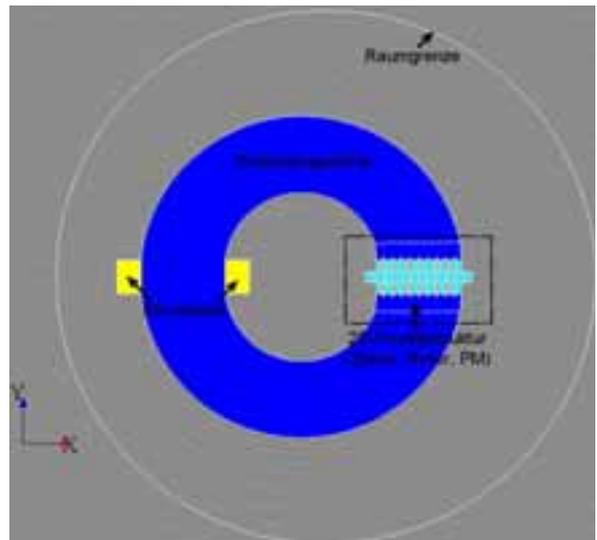


Abb. 6: Vollständiges 2D-Modell mit Verbindungsstück und Wicklung

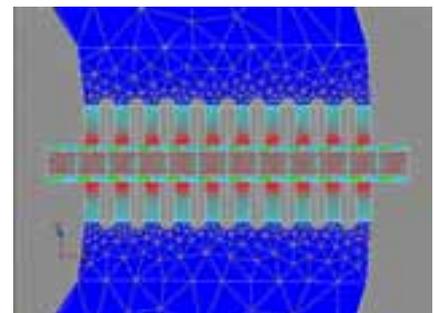


Abb. 8: Mesh im Bereich der Zwischenschicht

sches Mesh entsteht. Die vom Generator bewertete Güte des gesamten Meshs kann in Bild 9 abgelesen werden. Die verschiedenen Regionen werden vorbenannt und dann ihren Materialien zugewiesen. Da es keine Möglichkeit gibt, die Material-

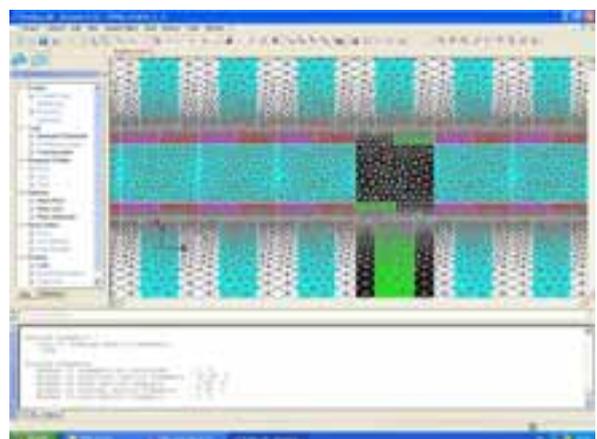


Abb. 9: Detailbild des Meshs in Rotor, Stator und Bewertung der Güte

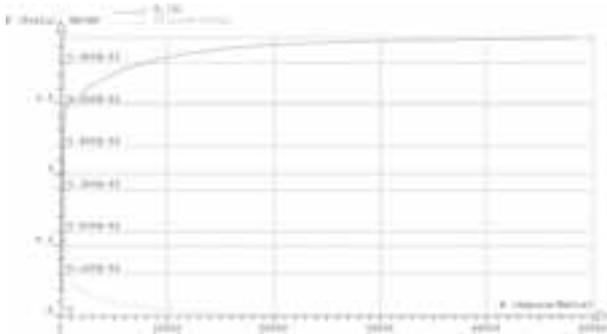


Abb. 10: Eisensättigungskurve

eigenschaften des realen Motors zu ermitteln, werden typische Eisen- und Magnetparameter eines früheren Projekts angesetzt. Die Eisensättigungskennlinie ist in Bild 10 zu sehen, die Magnete haben eine Remanenzinduktion von $B_r = 1,28$ T und eine relative Permeabilität von $\mu_r = 1,028$. Das Verbindungsstück wird mit $\mu_r = 1000000$ beschrieben.

Als Randbedingung wird der Fluss $\phi = 0$ an der Raumgrenze angesetzt. Die Tiefe wird auf einen aus den Außenmaßen wahrscheinlichen Wert gesetzt. Der Solver wird für ein magnetostatisches Problem gestartet, mit 15 verschiedenen Werten für die Rotorverschiebung und (kreuzpermutiert) 9 Werten für den Anregungsstrom. Der Solver benötigt 48 min pro Durchgang auf einem PC mit AthlonXP 1800+ CPU und

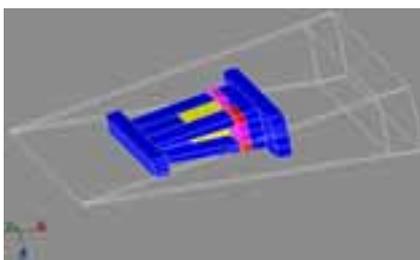


Abb. 11: Modell der TFPM und Raumgrenzen

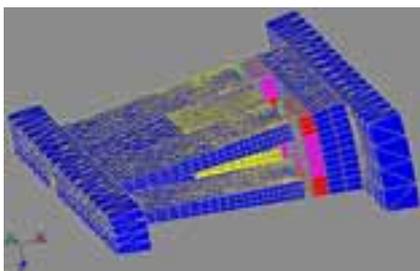


Abb. 12: Mesh des 3D-Modells der TFPM

1,5 GB RAM. Damit können sukzessiv die korrekten Konstruktionsparameter angenähert werden. In den Ergebnissen (Kap. 5.2) ist ausschließlich die finale Version zu sehen.

Es gibt viele Unsicherheiten im Modell, die aus den Materialien und einigen Freiheitsgraden in den Konstruktionsparametern herühren.

Das FE-3D-Modell

Mit den gefundenen Baugrößen kann ein detaillierteres und realistischeres 3D-Modell erstellt werden, das die Feldwerte und die Streuung akkurat darstellt.

Die Parameter werden eingegeben, was zu der Struktur in Bild 11 führt. Die breiteren Balken innen und außen stellen Gehäuseteile dar. Nur zwei Rotorpolteilungen werden modelliert, weil der Rest der Geometrie periodisch identisch ist.

Der Luftspalt wird in 2 sehr dünne Lagen geteilt, von denen eine dem Stator und eine dem Rotor zugerechnet werden. Alle mech. Teile des Rotors sind in eine nicht dargestellte Region von Luft eingeschlossen und zusammen dem rotierenden Mechanical Set zugeordnet. Der ganze Rest zählt zum festen Mechanical Set.

Die Mesh-Bedingungen sind vergleichbar mit dem 2D-Modell: Ein feines Mesh im Luftspalt, weniger fein im Eisen und grob zu den Raumgrenzen hin. In einigen Bereichen wurde ein gitterförmiges Mesh vorgegeben, was zu der Darstellung in Bild 12 führt.

Die Materialien werden ihren zugehörigen Bereichen wie im 2D-Modell zugeordnet. Die Schnittebenen wer-

den mit der Randbedingung zyklischer Periodizität beschrieben. An allen anderen Raumgrenzen wird der Fluss zu Null gesetzt. Dabei repräsentiert die äußere Kante Punkte im Unendlichen (Infinite Box). Bis zu den inneren Raumgrenzen gilt eine geeignete Transformation, um an den inneren linearen Bereich anzuschließen.

Der Solver wird für ein magnetostatisches Problem gestartet. Der Rotationswinkel deckt in 16 Schritten einen Bereich ab, der 360° elektrischem Winkel entspricht, und kreuzpermutiert dazu wird der Strom in 9 Werte von 0 bis 4 Ampere und in 5 Werte von 4 bis 12 Ampere (Überlastbereich) eingeteilt. Die Lösung wird in 6 h und 18 min berechnet.

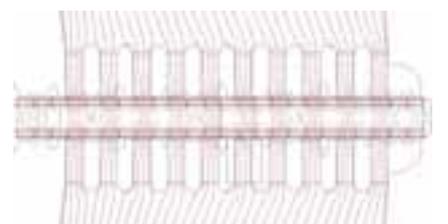


Abb. 13: Feldgeometrie, dargestellt durch Isoflusslinien

Ergebnisse

2D-Ergebnisse

Die Feldgeometrie wird in Bild 13 gezeigt. Darin sind auch die zu vernachlässigenden Randeffekte zu sehen.

Die berechnete Kraft (Bild 14) wird von 10 Polpaaren einer Phase erzeugt. Die Polpaarzahl ist $p = 32$ pro Phase, also muss für das Drehmoment ein Faktor von $3,2 \cdot r$ multipliziert werden, mit r als mittlerem Radius des Rotors. Die anderen 2 Phasen sollten identisch bis auf ihre Verschiebung von 120° / 240° sein. Das Ergebnis für Nennstrom wird in Bild 15 gezeigt. Der Mittelwert des Drehmoments ist 12,14 Nm, also 1,2 % über dem anvisierten Wert von 12 Nm. Die Drehmomentschwankungen sind deutlich zu sehen.

3D-Ergebnisse

Es ist schwierig, eine informative

Darstellung von vektoriellen Feldgrößen im 3D-Raum zweidimensional darzustellen. Aussagekräftiger ist die Drehmomentkurve (Bild 16). Hier muss keine Multiplikation durchgeführt werden, der Radius und alle 32 Polpaare werden korrekt berücksichtigt. Das gemeinsame Moment aller drei Stränge zeigt (Bild 17). Der Mittelwert ist 11,85 Nm.

Die hohe Qualität der 2D-Resultate ist offensichtlich, beide Ergebnisse sind nahezu identisch. Das ist nicht nur eine Bestätigung für das 2D-Modell, sondern auch für die Genauigkeit des Ergebnisses selbst.

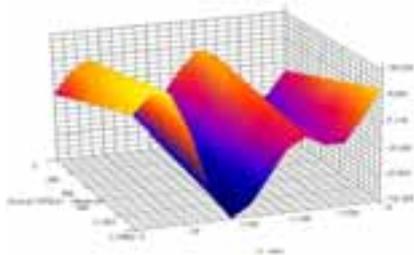


Abb. 14: Berechnete Kraft

Zusammenfassung

Zwei FE-Modelle für eine Transversalfeldmaschine in Flachmagnetanordnung sind erstellt worden, um die Feldverteilung und das Drehmoment korrekt zu bestimmen.

Das 2D-Modell kann die Realität nur durch starke Anpassungen widerspiegeln. Trotzdem sind die Ergebnisse sehr genau. Das 3D-Modell produziert selbst genaue Ergebnisse und hat damit das 2D-Modell bestätigt. Zusätzlich kann damit der Streufluss in der dritten Dimension bestimmt werden.

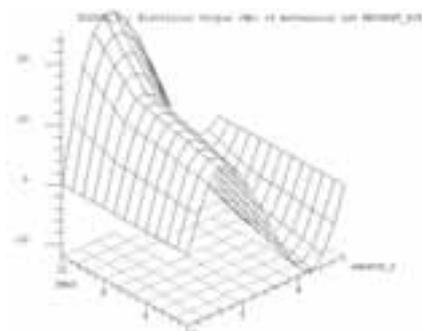


Abb. 16: Berechnetes Drehmoment

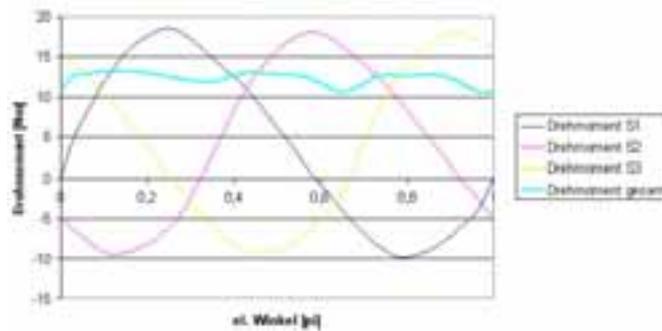


Abb. 15: Gesamtmoment aller drei Phasen

Beide Ziele, eine existierende Maschine ohne genaues Wissen ihrer inneren Struktur zu modellieren und deren Feldverteilung und Drehmoment genau zu berechnen, wurden erfolgreich erreicht. Die Untersuchungen wurden mit dem Softwareprogramm Flux und dessen Modulen durchgeführt.

Quellen

- [1] Weh, H.; May, H.: "Achievable force densities for permanent magnet excited machines in new configurations", ICEM'86, Munich, 1986
- [2] Schüttler, J.: "Entwurf eines feldbasierten Modells für Transversalfeld-Maschinen", IALB, Universität Bremen, 2003
- [3] Vinogradski, M.; Werner, U. ; Orlik, B.: "Genetic Algorithms Used for Geometrical Structure Design of Transverse Flux Permanent Magnet Motors to Optimize the Torque Wave Form", PCIM Nürnberg 2004
- [4] Schüttler, J.: "Regelung von Transversalfeldmaschinen", IALB, Universität Bremen, 2004
- [5] Hasubek, B.E.; Nowicki, E.P.:

"Two Dimensional Finite Element Analysis of Passive Rotor Transverse Flux Motors with Slanted Rotor Design", Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Mai 1999, p. 1199 – 1204

[6] Isastia, V.; Meo, S.; Belluci, M.: "An analytical method for a simplified design of a transverse flux permanent magnet machine", ISBN 90-75815-07-7, EPE 2003, Toulouse, 2003, p. 1 - 10

[7] Nürnberger I., Beineke S., Meyer N.: „Hohlwellen-Direktantriebe für Handlingaufgaben in Produktionsmaschinen“, Antriebstechnik Bd. 42 Nr.2, 2003

[8] Berchten, S.: "Kosten sparen – mit Direktantrieben in Transversalfeldstechnik“, Landert-Motoren AG, 8180 Bülach, Schweiz

[9] http://www.servax.com/produkte/pdf/wm024/wm_024_d_high_torque.pdf

[10] Werner, U.; Schüttler, J.; Orlik, B.: "Speed and Torque Control of a Permanent Magnet Excited Transverse Flux Motor for Direct Servo Drive Applications", EPE 2005, Dresden, <http://epe2005.cborg.net/programme.html>

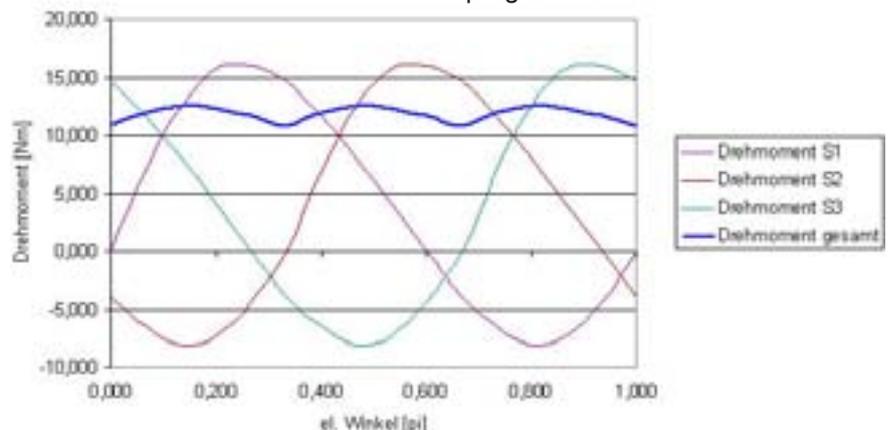


Abb. 17: Gesamtmoment aller drei Phasen

Instationäre Fluid-Struktur-Anwendungen

Dr.-Ing. Ulrich Heck
 Dr. Heck Consulting and Engineering, Krefeld

Innerhalb des weiten Spektrums der Fluid-Struktur-Anwendungen stellen instationäre gekoppelte Strömungs-Strukturprobleme besondere Herausforderungen an die Modellierung und Berechnung. In diesem Fall kommt es nicht selten durch die Interaktion von inkompressiblen Strömungen mit elastischen Strukturen zu einem physikalisch vollständig veränderten Gesamtsystem, so dass spezielle Lösungsmethoden, die direkte statt der partitionierten, herangezogen werden müssen. Zwei Beispiele aus unterschiedlichen Bereichen, der Medizintechnik (Blutdruckmessgerätentwicklung) und der Automobilkomponenten (Hochfrequenzverhalten von Hydrolagern) werden präsentiert und die mit dem System ADINA gewonnenen Simulationsergebnisse experimentellen Lösungen vergleichend gegenübergestellt.

Dieser Artikel präsentiert die gekürzte deutschsprachige Fassung des Tagungsbeitrags im Rahmen des dritten Nafems CFD-Seminars: Simulation of Coupled Flow Phenomena (Multifield FSI)- Applications and Trends, Mai 2006 [1]. Der Autor ist Inhaber eines Ingenieurbüros für Berechnungsdienstleistungen mit den Schwerpunkten Fluid-Struktur-Kopplung, Strömungssimulation (CFD) und nichtlineare Strukturmechanik, weitere Informationen unter <http://www.dhcae.de/>.

Hintergrund

Generell ist zu beobachten, dass die Nachfrage nach Lösungen von gekoppelten Problemen, so genannten Multiphysikanwendungen, rasant zunimmt. Insbesondere die Modellierung und Berechnung von Wechselwirkungen zwischen Strömungen und Festkörpern, die Fluid-Struktur-Interaktionen, sind verstärkt Gegenstand wissenschaftlicher Forschung

und kommen zunehmend in der industriellen Produkt- und Prozessentwicklung zum Einsatz [2].

Zur Lösung von gekoppelten Strömungs-Struktur-Anwendungen werden meist die partitionierten Verfahren eingesetzt. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass der Strömungs- und der Festkörperbereich getrennt modelliert und gelöst werden, meist mit unterschiedlichen

Solvern oder Programmsystemen. Beispielsweise wird im ersten Schritt der Strömungsraum unter der Annahme starrer Berandung berechnet, dann die Strömungskräfte auf den elastischen Bereich übertragen, im Struktursolver die Spannungen/Dehnungen und Verschiebungen berechnet und die resultierende Geometrieänderung an den Strömungssolver zurückgegeben. Diese getrennte, partitionierte Behandlung hat den entscheidenden Vorteil, dass unterschiedliche und somit sehr effiziente Lösungsmethoden für die jeweiligen Bereiche gewählt werden können. Somit sind diese Verfahren prädestiniert für große Probleme und komplexe Strömungsverhältnisse. Der Nachteil dieser Methode ist, dass starke Wechselwirkungen mit der Beeinflussung physikalischer Zeitskalen zwischen Struktur und Strömung nur mit großem numerischem Aufwand gelöst werden können. Hier sind meist die direkten Lösungsverfahren, bei denen das gesamte Fluid- und Struktursystem simultan gelöst wird, effizienter.

Ein typisches und anschauliches Beispiel ist die Blutströmung im Arterien: Die Kompressibilität eines Fluids stellt einen strömungsmechanisch wichtigen Parameter dar, denn diese bestimmt die Druckwellengeschwindigkeit. Flüs-

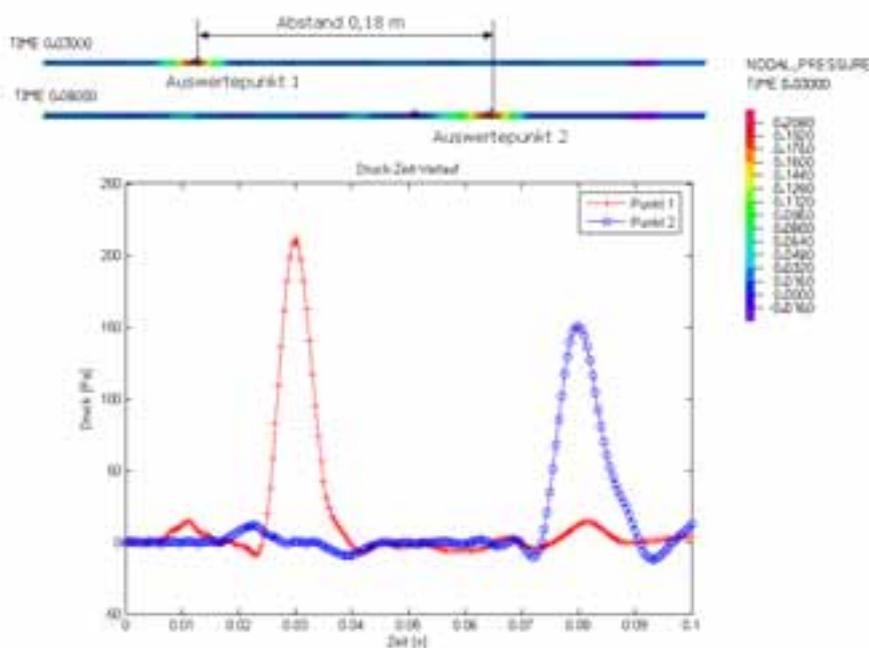


Abb 1: Verifikation der Pulswellengeschwindigkeit: Bestimmung des zeitlichen Druckverlaufs an 2 charakteristischen Auswertepunkte.

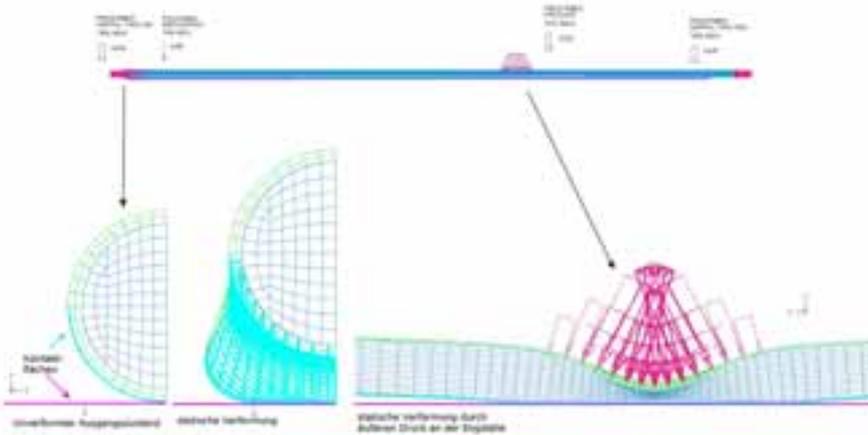


Abb. 2: Modell der statische Vorlast zur Simulation der Blutdruckmessung: axiale und radiale Dehnung, Verformung des Gefäßes durch äußeren Druck (Luftmanschette)

sigkeiten wie Wasser oder auch Blut mit Hauptbestandteil Wasser sind nahezu inkompressibel, daher breitet sich eine Druckwelle in Wasser sehr schnell (ca. 1300 m/s) aus, also meist deutlich schneller als das strömende Medium. Bei der Blutströmung ist zwar auch das Strömungsmedium weitgehend inkompressibel, jedoch wird durch die Aderwand eine zusätzliche Elastizität bereitgestellt. Als Folge ist auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle (Schallgeschwindigkeit) in Blutströmungen von ca. 1300 m/s auf 4-10 m/s reduziert. Diese Pulswellengeschwindigkeit (PWV) berechnet sich näherungsweise nach der Moens-Korteweg-Gleichung

$$c_0 = \sqrt{\frac{E_s h}{2r\rho_f}}$$

mit E dem Elastizitätsmodul der Aderwand, h der Wanddicke r dem Radius und ρ_f der Flüssigkeitsdichte [3].

Durch die Berücksichtigung der nachgiebigen Arterie treten im Vergleich zur Annahme starrer Strömungsränder folgende Systemveränderungen auf:

1. Entscheidende Systemeigenschaften wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Druckwelle hängen nun sowohl von Fluid- als auch Struktureigenschaften ab.
2. Die Druckwellengeschwindigkeit wurde um mehrere Größenordnungen reduziert.

3. Die Strömungsgeschwindigkeit des Blutes kann nun in der Größenordnung der Druckwellengeschwindigkeit vorliegen, wodurch strömungsmechanisch kompressible Strömungen gekennzeichnet sind. In Blutströmungen kann es zu vergleichbaren Effekten der kompressiblen Strömung wie „Überschallströmungen“ (Strömungsgeschwin-

digkeit größer als Schallgeschwindigkeit) oder einem dem „Verdichtungsstoß“ ähnlichen Vorgang kommen, der vielfach für einen Kollaps von stenotisierten Arterien verantwortlich gemacht wird [4].

Es ist einleuchtend, dass eine numerische Lösung dieser Anwendung mit partitionierten Ansätzen problematisch ist: Wird beispielsweise im ersten Zeitschritt nur der Fluidraum unter der Annahme starrer Wände analysiert, wäre bei einer Druckerhöhung die Druckwelle nur unter der Berücksichtigung der Fluidkompressibilität deutlich zu schnell (1300 m/s statt 4-10 m/s) und das Ergebnis des reinen Strömungsfelds sehr weit von der physikalisch richtigen Lösung des gekoppelten Systems entfernt.

Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Fluid-Struktur Anwendungen präsentiert: Einerseits aus der Medizintechnik, die Blutströmung in Arterien mit dem Hinter-

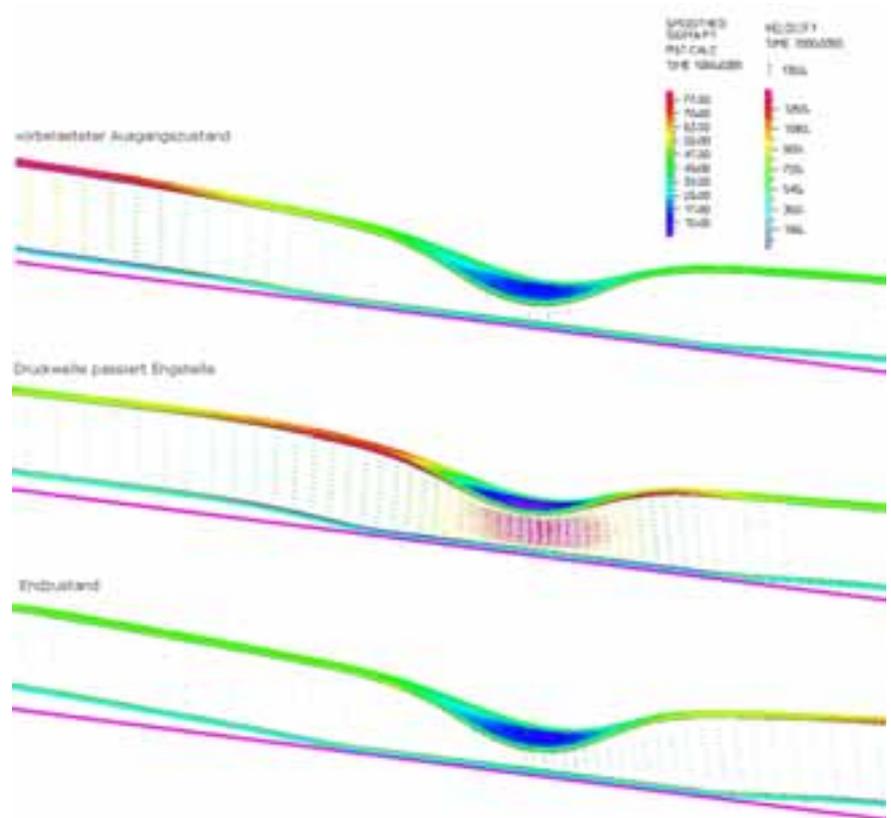


Abb 3: Modellierung der oszillometrischen Blutdruckmessung: Druckwelle passiert die durch äußeren Druck verformte Engstelle. Zeitliche Sequenz des Modellausschnitts mit Geschwindigkeitsvektoren im Fluid und Spannungen in der Aderwand.

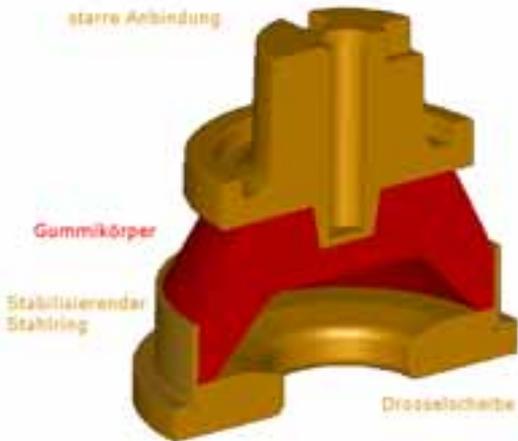


Bild 4: Hydrolagergeometrie: Schnitt durch das rotationssymmetrische Lager (nur Festkörperbereich dargestellt)

grund der Simulation der oszillometrischen Blutdruckmessungen, andererseits aus dem Automobilbereich: Hier wird die Simulation von Hydrolagen zur Schwingungsisolierung vorgestellt. Trotz der unterschiedlichen Anwendungen, interagieren in beiden Fällen weitgehend inkompressible Flüssigkeiten mit nachgiebigen Strukturen, wobei instationäre und viskose Kräfte in der Strömung dominieren, so dass in beiden Fällen die direkten Lösungsverfahren besonders geeignet sind.

Lösungsmethode

Im Strömungsbereich wird aufgrund der starken Verschiebungen an den Fluid-Struktur Rändern eine ALE-Formulierung (Arbitrary Lagrangian-Euler-Formulierung) verwendet, während im Strukturbereich eine Lagranische Formulierung herangezogen wird. Am Fluid-Struktur Interface werden Kräfte und Verschiebungen ausgetauscht. In den hier eingesetzten Simulationsverfahren wird eine direkte Lösung der Struktur- und Strömungsgleichungen verwendet [1],[5].

Die Berechnung findet mit dem System ADINA statt. ADINA bietet für gekoppelte Strömungs-Strukturprobleme sowohl die direkte Lösung als auch die partitionierte Lösung an, wobei in beiden Fällen implizite

Lösungsverfahren verwendet werden, die die Einhaltung des Kräfte- und Verschiebungsgleichgewichts am Fluid-Struktur-Interface gewährleisten, Details s. [1],[5],[6].

Blutströmung

Im ersten Schritt wird die Pulswellengeschwindigkeit im arteriellen System verifiziert: Dazu wird ein 3d-Adermodell in einem physiologisch realistischen Elastizitäts- und Geometrieparameterbereich aufgesetzt [7] und mit einem schlagartigen Druckanstieg beaufschlagt, Modellierungsdetails s. [1]. Als Referenz wird die Moens-Korteweg-Gleichung zur Pulswellengeschwindigkeit (PWV) herangezogen. Die PWV ergibt

sich in der Simulation zu 3,6 m/s, während die Moens-Korteweg-Gleichung 4 m/s vorhersagt, s. Bild 1. Somit wird die durch die FSI-Kopplung bedingte Reduzierung der PWV von den 1300 m/s (reine Fluidkompressibilität) auf die 4 m/s (elastische Wand) durch die Simulation abgebildet. Die Diskrepanz zur Moens-Korteweg-Gleichung ist auf die dort gemachten vereinfachenden Annahmen bzgl. der Druckverteilung und des reibungsfreien Fluids zurückzuführen.

Im zweiten Schritt wird eine technische Anwendung untersucht, die Simulation der oszillometrischen Blutdruckbestimmung. Bei dieser Meßmethode wird über eine Luftman-

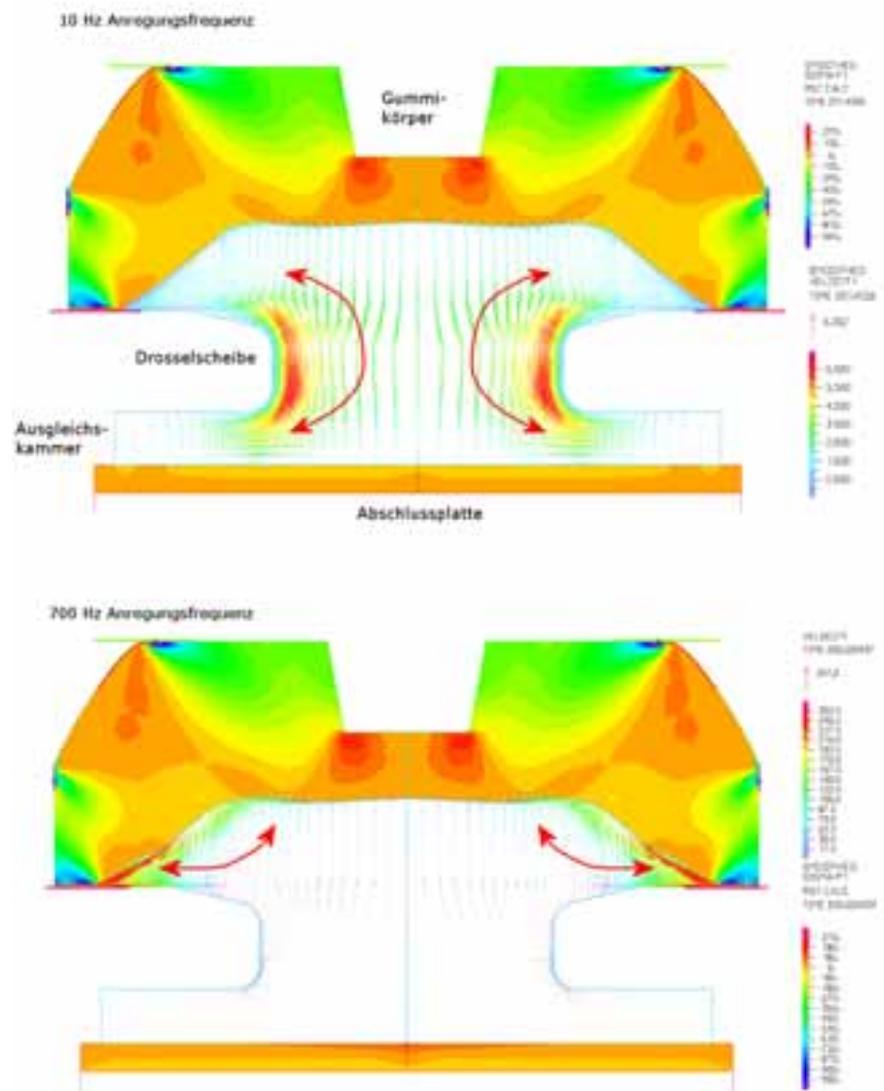


Bild 5: Strömungsverhältnisse im Lager bei verschiedenen Anregungsfrequenzen: Oben 10Hz: Flüssigkeitsaustausch zwischen den Kammern, unten 700 Hz: Kein Durchströmen der Drosselscheibe. Darstellung: Geschwindigkeitsvektoren im Fluid und Spannungen in Festkörpern

schette ein äußerer Druck auf das Gefäß aufgebracht und die Arterie dadurch komprimiert. Die vom Herzen ausgehende Druckwelle erzeugt an dieser Engstelle eine Oszillation der Gefäßwand, die sich in die Luftmanschette überträgt und dort detektiert wird. Aus der registrierten Oszillationsamplitude in Abhängigkeit des jeweiligen Manschetten-drucks kann der Blutdruck bestimmt werden.

Um den statischen Grundzustand des Gefäßes im Simulationsmodell physiologisch realistisch abzubilden, wird dieses axial gestreckt und durch den diastolischen Ruhedruck in radiale Richtung gedehnt. Die äußere Druckbeaufschlagung durch die luftgefüllte Manschette wird in Form einer Druckrandbedingung aufgeprägt, die die Aderwand auf eine starre Unterlage presst, s. Bild 2. Ausgehend von diesem statisch verformten Zustand wird eine instationäre Druckwelle aufgeprägt, die die Engstelle passiert, s. Bild 3. Bei verschiedenen äußeren Drücken kann die Abhängigkeit der jeweiligen Oszillationshöhe von verschiedenen Parametern (Adersteifigkeit, Druckamplitude der Puls-welle etc.) nachvollzogen werden und somit ein tieferes Verständnis der Blutdruckmessung liefern, das in der Geräteentwicklung umgesetzt wird. Diese Anwendung demonstriert darüber hinaus die Anforderungen an Programmsysteme zur Lösung medizinischer Fragestellungen mit Simulationswerkzeugen. Hierzu gehören insbesondere nichtlineare Modellierungsfähigkeiten wie Kontakt, hyperelastische Materialien für biomechanische Anwendungen und die Berücksichtigung starke Dehnungen und Verschiebungen, s. auch [8],[9],[10].

Hydrolager

Hydrolager werden in Automobilen eingesetzt, um die Vibrationen vom Motor auf die Karosserie zu isolieren. Sie bestehen aus einem Gummikörper, in dem sich eine viskose Flüssigkeit befindet, s. Bild 4. Über die starre Anbindung werden die Vibrationen in das Lager einge-

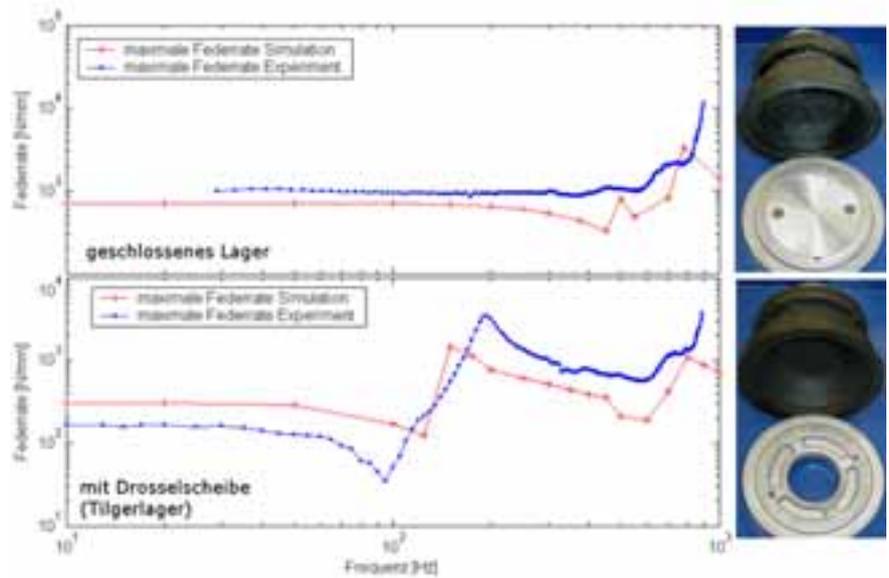


Abb. 6: Federrate in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz: Vergleich Simulation Experiment für beide Lagertypen.

leitet. Die Flüssigkeit kann über eine Drosselscheibe in eine weitere Ausgleichskammer überströmen. Im Rahmen der Studie werden zwei Bauformen untersucht, zum einen ein geschlossenes Lager (nicht praxisrelevantes Funktionsmuster) und ein Lager mit Drosselscheibe (Tilgerlager). Hierbei ergeben sich für die Hersteller der Lager Fragestellungen bzgl. des dynamischen Verhaltens wie Eigenformen, Eigenfrequenzen und Federraten, der erforderlichen Kraft für die Weganregung, als auch funktionsrelevante Sicherheitsaspekte wie z.B. detaillierte Strömungsverhältnisse zur Vermeidung von Kavitation.

Die Durchführung der Simulation findet in zwei Teilschritten statt: Zuerst wird das Hydrolager durch eine Verschiebung statisch belastet, bis es sich im eingefederten Zustand befindet. Anschließend wird in direkter numerischer Zeitintegration unter Aufgabe einer zeitabhängigen Verschiebungsrandbedingung mit unterschiedlichen Anregungsfrequenzen das dynamische Verhalten wie das Strömungsfeld, Eigenfrequenzen und die zur Anregung erforderlichen Kräfte bestimmt.

Während bei niedrigen Frequenzen die Flüssigkeit lediglich in den Kammern ausgetauscht wird, ist auf-

grund der Trägheit der Flüssigkeitsmasse bei hohen Frequenzen die Drosselscheibe quasi geschlossen und es findet nur ein Flüssigkeitsaustausch innerhalb der Gummi-kammer statt. Dieses Verhalten wird in der Simulation richtig abgebildet (s. Bild 5).

Bild 6 zeigt den Verlauf der dynamischen Federrate (erforderliche Kraft durch maximalen Verschiebungsweg) von Simulation und Experiment im Vergleich. Die Messung der Federrate erfolgt auf einer Hydropulsmaschine mit konstanter Wegamplitude. Die Messungen wurden von der Firma Contitech-Vibration Control im Rahmen des Projektes durchgeführt und freundlicherweise für die Veröffentlichung zur Verfügung gestellt [11].

Insgesamt wird eine gute Übereinstimmung des charakteristischen Verlaufs der Federrate in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz erzielt, so dass die wesentlichen dynamischen Effekte und die Wirkung der Einbauten durch das Simulationsmodell wiedergegeben werden. Durch die nachgiebige Ausgleichskammer ist die Federrate im Tilgerlager bei niedrigen Frequenzen deutlich reduziert. Das lokale Maximum bei 200 Hz entspricht der ersten Eigenfrequenz des Lagers. Im

Hochfrequenzbereich verhalten sich beide Lager ähnlich, da kein Flüssigkeitstransport mehr durch die Drosselscheibe stattfindet und somit auch das Tilgerlager geschlossen wirkt.

Die bestehenden Abweichungen zwischen Simulation und Experiment sind weitgehend auf eine Diskrepanz in der statischen Steifigkeit und vereinfachte Annahmen im Gummimodell (vereinfachtes Dämpfungsmodell, konstante Steifigkeit im gesamten Frequenzbereich) zurückzuführen.

Diskussion

In instationären Fluid-Strukturanwendungen mit nachgiebigen Festkörpern und weitgehend inkompressiblen Flüssigkeiten kommt es häufig zu einer komplexen physikalischen Interaktion, für deren Simulation häufig direkte Lösungsverfahren besser geeignet sind als die weitgehend eingesetzten partitionierten Verfahren. Für den Anwender ist es hilfreich über mehrere Lösungsmethoden zu verfügen, um eine Beeinflussung der Berechnung durch das gewählte Lösungsverfahren auszuschließen und die effizienteste Lösungsmethode auszuwählen. FSI-Anwendungen stellen darüber hinaus hohe Anforderungen an den Berechnungsingenieur: Umfangreiche Erfahrung und Kenntnisse sowohl in der Strömungssimulation und Strukturmechanik als auch in der Berechnung von FSI-Problemen sind unabdingbar für eine effektive Modellierung, zuverlässige Berechnung und kritische Ergebnisbeurteilung.

Quellen

- [1] Heck U. "Transient Fluid Structure Interaction", Nafems Seminar „Simulation of Coupled Flow phenomena (Multified FSI)" May, 2006, Konferenzband, ISBN 1-874376-11-5
- [2] Heck U., „Fluid Struktur Interaktionen: Erfahrungen, Anwendungen“, Grenzen; in „Simulation“ (ISSN 1610-8949), Ausgabe 1/2004, p. 16-19
- [3] McDonald DA, 1974, Blood flow in arteries, Baltimore, Williams and Wilkens
- [4] Ku D., "Blood flow in arteries", Annu. Rev. Fluid. Mech, 1997, 29 pp. 399-434
- [5] Zhang H., Bathe K.J., "Direct and iterative computing of fluid flows fully coupled with structures", Computational Fluid and Solid Mechanics, Elsevier 2001, p.1440-1443
- [6] ADINA R&D "Theory and Modelling Guide, Volume III: ADINA-F", September 2004
- [7] Avolio, "Multi-branched model of the human arterial system", Med & Biol. Eng. & Comput, 1980. 18.709-718
- [8] Delfino et al. "Residual strain effects on the stress field in a thick wall finite element model of the human carotid bifurcation", J. Biomechanics, Vol 30, No.8, pp. 777-78, 1997
- [9] Younis H., Chung, C., Kamm R., "Challenges in developing an accurate model for carotid bifurcation blood flow and wall mechanics", Computational Fluid and Solid Mechanics, Elsevier 2001, p.1434-1439.
- [10] Tang D, Yang C, Walker, H., Kobayahsi S, Ku, D., "A 3-D model with fluid-structure interactions for unsteady blood flow in stenotic arteries with cyclic wall collapse", Computational Fluid and Solid Mechanics, Elsevier 2001, p.1388-1392.
- [11] Heck U., Bebermeier J., Uhrmeister B., „Simulation des Hochfrequenzverhaltens von Hydrolagern- gekoppelte Strömungs-Strukturanalyse“, erschienen in „Systemanalyse in der KFZ-Technik“, Hrsg. Andreas Laschet, Expert-Verlag, 2005, ISBN 3-8169-2479-4, p. 130-140

Simulation fluidgedämpfter Strukturschwingungen mittels partitioniertem Kopplungsansatz via MpCCI

Sven Schrape, Arnold Kühhorn, Mark Golze,
Lehrstuhl für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen,
Brandenburgische Technische Universität Cottbus (BTU)

Der Lehrstuhl für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen besitzt langjährige Erfahrungen mit experimentellen und numerischen Schwingungsuntersuchungen von Hochdruckverdichterschaufelscheiben in Integralbauweise. In diesem Zusammenhang wird eine aeroelastisch voll gekoppelte Berechnung eines ebenen, schwingenden Verdichtergitters unter vereinfachten Bedingungen aufgezeigt. Zur Validierung der verwendeten Kopplungssoftware wird voran ein erstes Testproblem einer querangeströmten, elastischen Platte betrachtet, die einer strömungsinduzierten, abklingenden Schwingung unterliegt.

Motivation

Infolge vielfältiger Mechanismen werden integrale Verdichterlaufräder in modernen Triebwerken (eng.: **blade integrated disk – Blisk**) über ein weites Frequenzband kontinuierlich zu Schwingungen angeregt. Diese im wesentlichen durch aerodynamische Anfachung hervorgerufenen Beanspruchungen sind hinsichtlich der Lebensdauer der Blisks maßgeblich (fremderregte Schwingungen). Durch Imperfektionen (eng.: **mistuning**) treten zusätzlich sogenannte Lokalisierungsphänomene auf - örtlich begrenzte Überhöhungen der Schwingungsantworten [1], [2]. In Kombination mit einer ungünstigen aerodynamischen Anregung kann ein lebensdauerkritischer Anstieg des Beanspruchungsniveaus einzelner Schaufeln hervorgerufen werden.

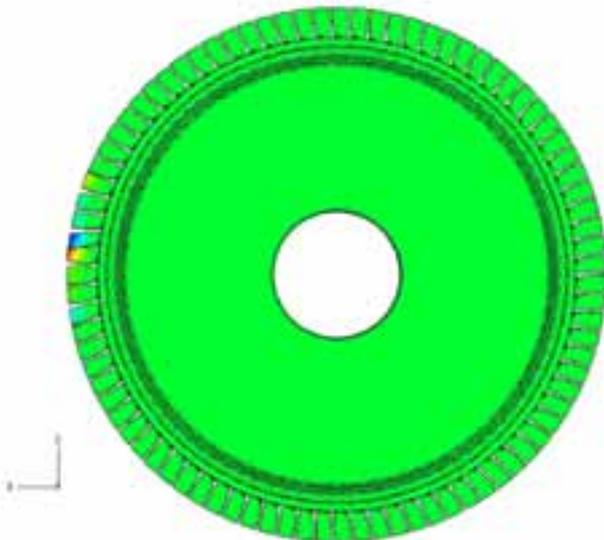


Abb. 1: Lokalisierungsphänomen an einem Blisk-Modell (Verschiebung u_1)

In Anbetracht der genannten Gegebenheiten ist es von großem Interesse, inwieweit das die Schaufeln umströmende Fluid zu einem verbesserten mechanischen Verhalten beitragen kann. Zusätzliche Strömungseffekte, wie aerodynamische Dämpfung, Frequenzabweichungen aufgrund mitschwingender Luftmassen sowie verstärkte Kopplungseffekte zwischen benachbarten Schaufeln, sind zu erwarten. Sie können einer starken Lokalisierung entgegenwirken. Mit der Identifikation dieser Effekte hinsichtlich quasi-stationärer Betriebspunkte beschäftigt sich ein laufendes Forschungsvorhaben. In diesem Zusammenhang werden aeroelastisch voll gekoppelte, numerische Fluid-Struktur-Interaktions (FSI) Analysen durchgeführt.

Kopplungskonzept

Für folgend aufgezeigte Simulationen wurde ein expliziter, partitionierter Kopplungsalgorithmus benutzt. Diesbezüglich wurde der FE-Code ABAQUS 6.5.1 (Struktur) mit dem CFD-Code FLUENT 6.2.16 (Strömung) mittels der Kopplungsschnittstelle MpCCI (Mesh based parallel Code Coupling Interface) gekoppelt, welche vom Fraunhofer Institut SCAI entwickelt wurde [5].

Bei expliziten Verfahren werden die Strömungs- und Strukturgrößen in jedem Zeitschritt einmalig berechnet und anschließend über die Kontaktfläche ausgetauscht (2-Weg-Kopplung). Im Rahmen der vorgestellten Simulationen erfolgte eine sequentielle Abarbeitung der Zeitschritte.

Der CFD-Code basiert auf der Finiten Volumen Methode. Hierbei ist insbesondere auf bewegte Ränder der Struktur in der Fluid-Domäne zu achten. Diesbezüglich kommt eine Arbitrary-Lagrange-Euler Formulierung (ALE) zur Anwendung, die eine korrekte mathematische Beschreibung zur Strömungsberechnung auf bewegten Gittern liefert. Gleichung (1) zeigt die integrierte Form der Transportgleichung für ein Skalar Φ eines bewegten Kontrollvolumens V mit der Oberfläche A :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \Phi dV + \int_A \rho \Phi (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \cdot d\mathbf{A} = \int_A \Gamma \nabla \cdot \Phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\Phi dV \quad (1)$$

(Änderungsrate + konvektiver Fluss = diffusiver Fluss + Quellterm)

wobei ρ die Fluid-Dichte, \mathbf{u} den absoluten Fluid-Geschwindigkeitsvektor, \mathbf{u}_g den Geschwindigkeitsvektor des bewegten Gitters, Γ den Diffusionskoeffizienten und S_Φ einen Quellterm von Φ darstellt. In Anbetracht der ALE-Formulierung sind folgend aufgeführte Erhaltungsgleichungen in raumfesten Euler-Koordinaten gegeben.

Querangeströmte, elastische Platte

Konfiguration

Zur grundsätzlichen Validierung des angewendeten Kopplungsalgorithmus wurde ein Literaturbeispiel herangezogen. Betrachtet wird eine geometrisch einfache Konfiguration einer fest eingespannten Platte (asymmetrische Position im Strömungsraum), die mittels eines Modellfluides umströmt wird.

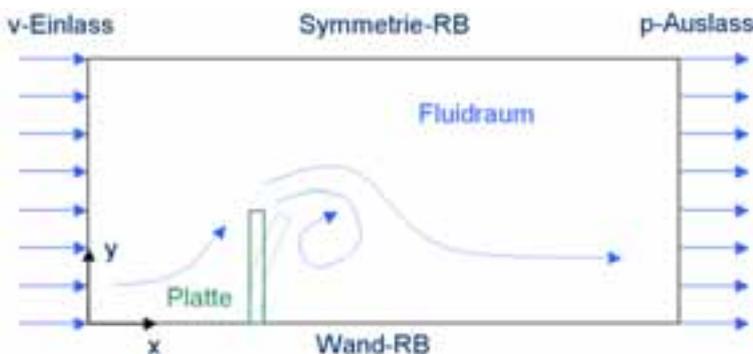


Abb. 2: Modellkonfiguration der elastischen Platte

Geometrie Strömungsgebiet	Geometrie Strukturmodell
$L_x = 50 \text{ m}$ $L_y = 6 \text{ m}$ $L_z = 0,4 \text{ m}$	$L_x = 0,01 \text{ m}$ $L_y = 1 \text{ m}$ $L_z = 0,4 \text{ m}$
Fluiddaten	Materialdaten
$\rho_f = 1 \text{ kg/m}^3$ $\mu_f = 0,2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $v = 10 \text{ m/s}$ Blockprofil	$E = 3500 \text{ N/mm}^2$ $\nu = 0,32$ $\rho_s = 1200 \text{ kg/m}^3$

Abb. 3: Modell-, Struktur- und Fluiddaten

Aufgrund der symmetrischen Randbedingungen der Seitenflächen führt die Platte nur Biegeschwingungen um die z-Achse aus. Es wird ein zweidimensionales Modell betrachtet. Am linken Rand wurde ein Geschwindigkeitsblockprofil von $u=10\text{m/s}$ angenommen, wodurch sich mittels der charakteristischen Plattenlänge $L_y=1\text{m}$ und der kinematischen Viskosität $\nu=\mu/\rho$ eine Reynoldszahl von $Re=50$ und somit eine laminare Strömung einstellt. Um die zunächst steife Platte bildet sich bis zum Zeitpunkt $t=0\text{s}$ ein stationäres Umströmungsfeld aus (Startlösung zur Initialisierung des Strömungsfeldes). Für $t>0\text{s}$ wirken die Druck- und Reibungskräfte auf die nunmehr elastische Platte.

Numerisches Modell

Die Konfiguration behandelt eine laminare, isotherme und inkompressible Strömung eines Newtonschen Fluides. Aufgrund der Inkompressibilität reduziert sich die Kontinuitätsgleichung (2) auf die Divergenzfreiheit des Geschwindigkeitsfeldes u_i .

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{2}$$

Die Navier-Stokes Gleichungen bestehen zusätzlich aus 3 Impulserhaltungsgleichungen (3):

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \circ \mathbf{u}) \right) = \mathbf{f} - \nabla \circ p + \mu \Delta \mathbf{u} \tag{3}$$

wobei $\Delta \mathbf{u}$ den Laplace Operator angewendet auf den Geschwindigkeitsvektor \mathbf{u} , $\nabla \circ p$ den Druckgradienten des Druckes p und ∇ den Nabla Operator kennzeichnen. Die Volumenkräfte \mathbf{f} entfallen.

Vor der gekoppelten Berechnung wurde die Gitterunabhängigkeit der CFD-Lösung der starr umströmten Platte mittels einer stationären Strömungsanalyse untersucht. Verwendet wurde in der Folge eine „Upwind“-Diskretisierung 2. Ordnung. Das ausgewählte Netz (220x60 Kontroll-Volumen) wurde um die Plattenspitze verfeinert. Die zeitliche Diskretisierung erfolgte mittels implizitem Verfahren 1. Ordnung. Zur Lösung der Erhaltungsgleichungen wurde ein sequentieller Löser unter Anwendung des SIMPLE Algorithmus nach Patanker für die Druck-Geschwindigkeitskopplung benutzt.



Abb. 4: CFD-Netz

Die Strukturberechnungen erfolgten mit der Finiten Elemente Methode, welche auf dem Prinzip der virtuellen Verschiebung (4) basiert.

$$\int_{V_0} \mathbf{P} \cdot \delta \mathbf{G} dV_0 = \int_{V_0} \rho_0 (\mathbf{k}_0 - \ddot{\mathbf{u}}) \cdot \delta \mathbf{u} dV_0 + \int_{A_0} \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{u} dA_0 \tag{4}$$

Hierbei kennzeichnet \mathbf{P} den 2. Piola-Kirchhoff Spannungstensor, \mathbf{G} den Greenschen Verzerrungstensor, \mathbf{t} den nominalen Spannungsvektor, ρ_0 die Dichte und $\delta \mathbf{u}$ eine virtuelle Verschiebung. Weiterhin kennzeichnet $\rho_0 \cdot \mathbf{k}_0$ die Volumenkraftdichte, wobei Volumenkräfte für diese Konfiguration entfallen. Weiterhin wird ein hyperelastisches, isotropes Materialgesetz gemäß St. Venant angenommen.

Nach der räumlichen Diskretisierung resultiert bei verschwindender Strukturdämpfung ein gekoppeltes System gewöhnlicher, semi-diskreter Bewegungs-Differentialgleichungen. Dessen zeitliche Integration wurde mit einem impliziten Verfahren nach Hilbert-Hughes-Taylor ausgeführt. Aufgrund des 2D-Modells kommen entsprechende Kontinuumselemente des ebenen Spannungszustandes mit inkompatiblen Moden zum Einsatz. Nach einer

Netzvalidierung wurde das Strukturnetz mit 2x6 Elementen für die Plattenbreite von 10mm festgelegt (4x24 Elemente für 3mm/4mm breite Platten).

Ergebnisse der sequentiellen, instationär gekoppelten Berechnung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Plattenspitzenverschiebung des transienten Einschwingvorgangs der elastischen Platte auf ihren stationären Verschiebungswert. Es wird ersichtlich, dass sich die Plattenspitzenverschiebungen mit kleineren Zeitschritten einem maximalen Wert annähern – der hinsichtlich des verwendeten Algorithmus genauesten Lösung. Der Verschiebungswert der stationären Lösung wird zeitschritunabhängig erreicht. Ferner ist eine Phasenverschiebung zu beobachten. Zusätzlich wurde die Plattenbreite variiert. Mit abnehmender Breite verformt sich die Platte stärker, da sich das Flächenträgheitsmoment verringert. Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit den in [3] veröffentlichten überein.

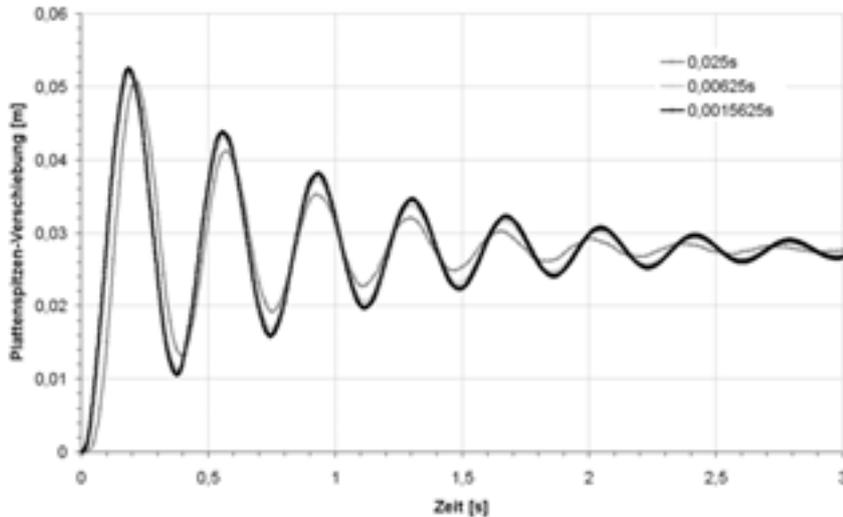


Abb. 5: Variation des Zeitschrittes Δt (10mm Plattenbreite)

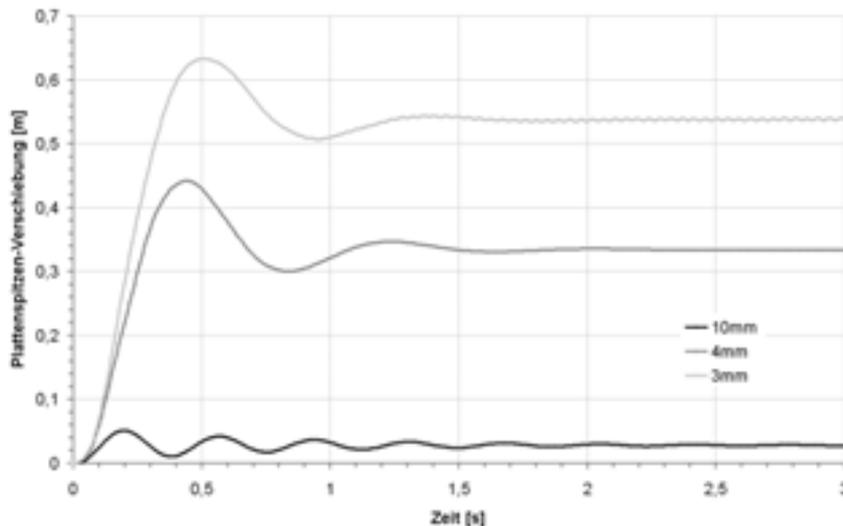


Abb. 6: Variation der Plattenbreite ($\Delta t=0,01s$)

Die nachstehende Abbildung zeigt die zeitabhängige Entwicklung der Stromlinien um eine Platte (Breite 4mm, $\Delta t=0,01s$). Erkennlich wird die Ablösung und Neuentstehung eines Wirbels aufgrund der sehr elastischen Plattenstruktur.

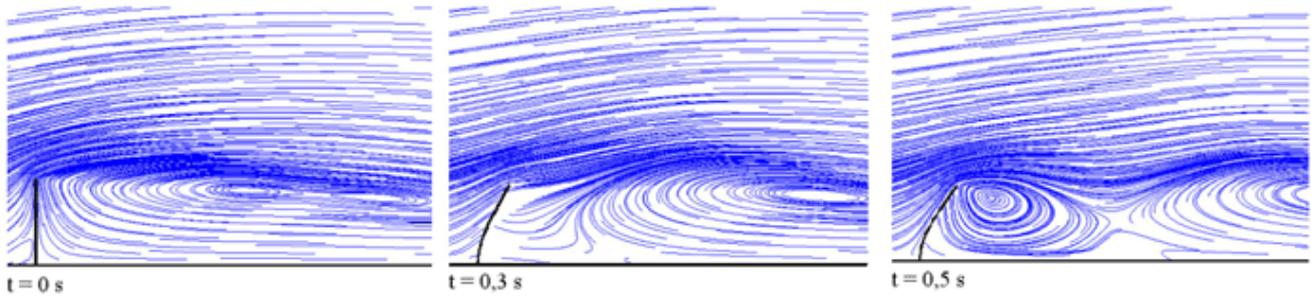


Abb. 7: Entwicklung von Stromlinien um eine elastische Platte

Vereinfachtes Verdichtergitter

Konfiguration

In diesem Kapitel wird ein erster Ansatz einer gekoppelten Simulation anhand eines vereinfachten Modells aufgezeigt. Er zielt auf grundsätzliche Untersuchungen des numerischen Verhaltens solcherart Problemstellungen ab. Die Konfiguration besteht aus einem ebenen Verdichtergitter, dessen Daten der nachstehenden Abbildung (Airfoils innerhalb der CFD-Domäne) entnommen werden können.

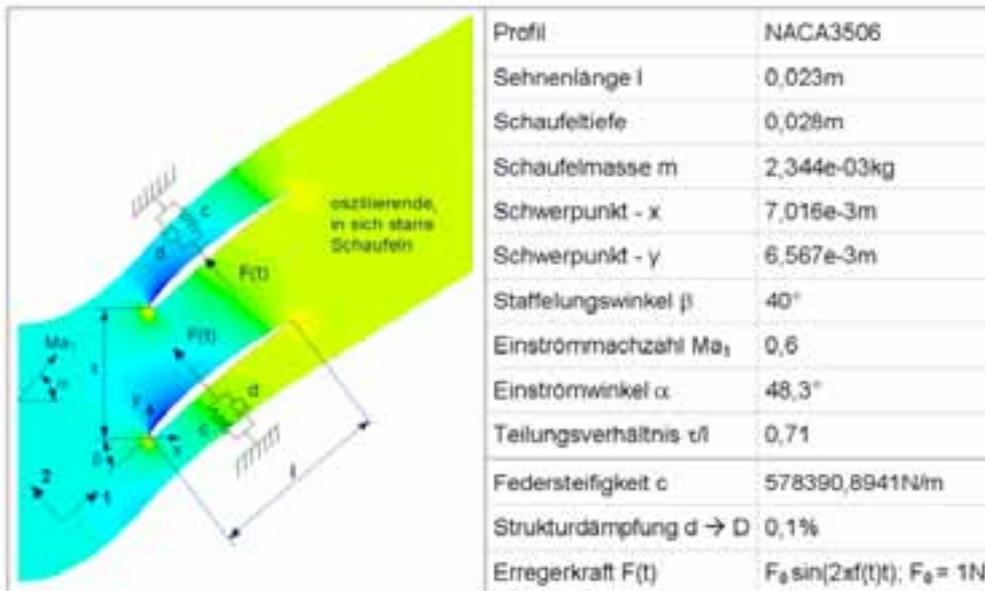


Abb. 8: Konfigurationsdaten des Verdichtergitters, statische Druckverteilung

Prinzipiell entspricht die in sich steife Schaufel einem Ein-Freiheitsgrad-Schwinger (ungebunden in lokaler 2 Richtung – keine Torsionsschwingungen möglich) und wird mittels einer Gleitsinus-Krafterregung F(t) beaufschlagt. Über Schaufelmasse und Federsteifigkeit wird eine Eigenfrequenz von f₀=2,5kHz definiert. Um diese während der Simulation zu durchfahren, arbeitet das Erregersignal in einem Frequenzband von 2,475kHz-2,525kHz (t_{ges}=0,24576s). Strukturseitig wird eine Lehrsche Dämpfung von D=0,1% angenommen.

Numerisches Modell

Die ebene, subsonische Strömung wird kompressibel gerechnet (ideales Gas). Unter der Annahme eines reibungsfreien Fluids werden die Euler-Gleichungen gelöst. Damit gleicht die Massenerhaltungsgleichung der einer laminaren Strömung (6).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{6}$$

Die Impulserhaltung wird durch Gleichung (7) beschrieben (ohne Berücksichtigung von Volumenkräften).

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \circ \mathbf{u}) = -\nabla \circ p \quad (7)$$

Aufgrund der Kompressibilität wird zusätzlich die Energieerhaltungsgleichung gelöst (8).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} E) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (8)$$

Dabei kennzeichnet E die totale Energie. Zur Lösung der Euler-Gleichungen wurde ein gekoppelter, impliziter Löser gewählt. Die Zeitintegration erfolgte mittels implizitem Euler Schema (1. Ordnung). Mit ersten Untersuchungen gleichphasiger Schaufelschwingungen wurde die Modellierung nur eines Schaufelkanals vorgenommen (periodische Seitenrandbedingungen). Am Einströmrand wurde der Totaldruck ($p_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), die Totaltemperatur ($T_0 = 300 \text{ K}$) und der Einströmwinkel definiert, am Ausströmrand entsprechend der statische Druck ($p_2 = 0.865 \cdot 10^5 \text{ Pa}$). Eine stationäre Strömungsanalyse ergab mittels einer „Upwind“-Diskretisierung 2. Ordnung bei $26 \times 119 \text{ KV}$ Ergebnisse, die sehr gut mit den von Grüber veröffentlichten [4] übereinstimmen.

Der FE-Code löst die gewöhnlichen Bewegungs-Differentialgleichungen unter Berücksichtigung von Masse, Steifigkeit und Dämpfung gemäß vorheriger Definition geometrisch linear. Die Zeitintegration erfolgte explizit mit einem Zentralen Differenzen Verfahren. Über einen Vergleich der alleinigen Strukturantwort mit einer Runge-Kutta Referenzlösung (2. Ordnung) für den exakten Ein-Freiheitsgrad-Schwinger wurde ein Zeitschritt gewählt ($\Delta t_{\text{FEM}} = 1.875 \cdot 10^{-6} \text{ s}$), der numerische Fehler seitens der FE-Berechnung möglichst klein hält.

Numerische Ergebnisse

Folgend werden Untersuchungen zur numerischen Dissipation, verursacht durch den CFD-Code bzw. Kopplungsalgorithmus, aufgegriffen. Dazu wurden mittels eines „Subcycling“-Schemas gekoppelte Berechnungen angestellt, bei denen der CFD-Zeitschritt jeweils halbiert wurde (4 x von $\Delta t_{\text{CFD}} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ auf $\Delta t_{\text{CFD}} = 1.875 \cdot 10^{-6} \text{ s}$), während der FEM-Zeitschritt konstant blieb ($\Delta t_{\text{FEM}} = 1.875 \cdot 10^{-6} \text{ s}$).

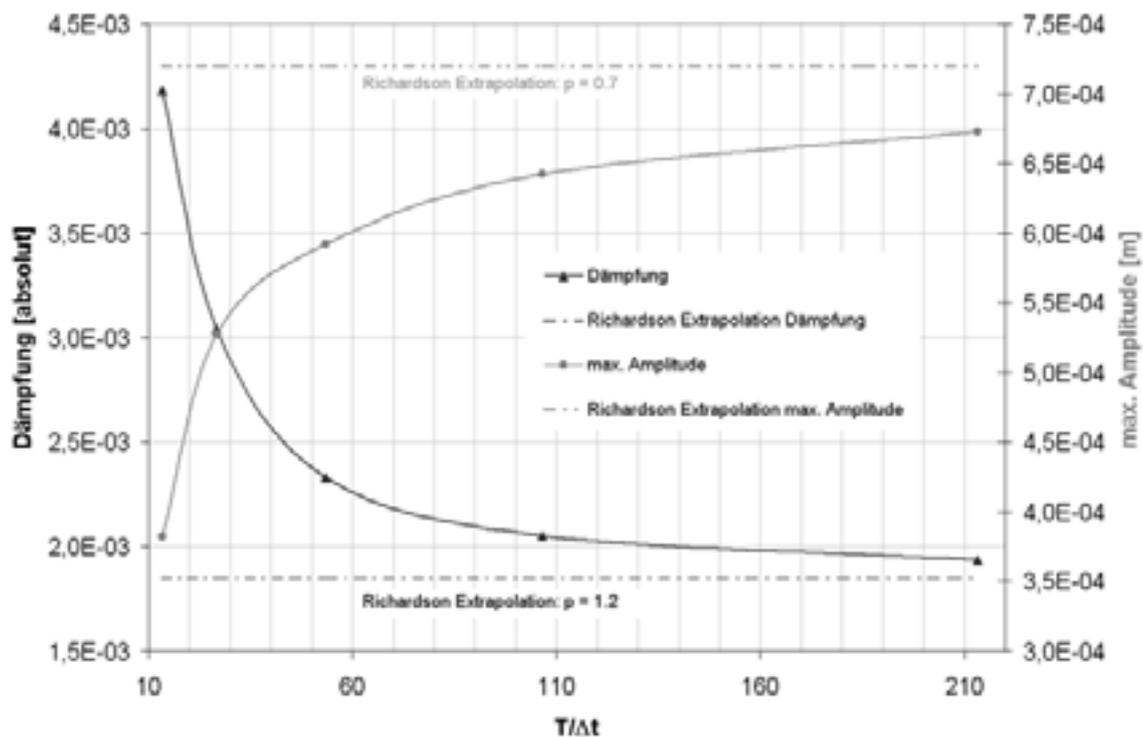


Abb. 9: Zeitschrittabhängigkeit der numerischen Dissipation

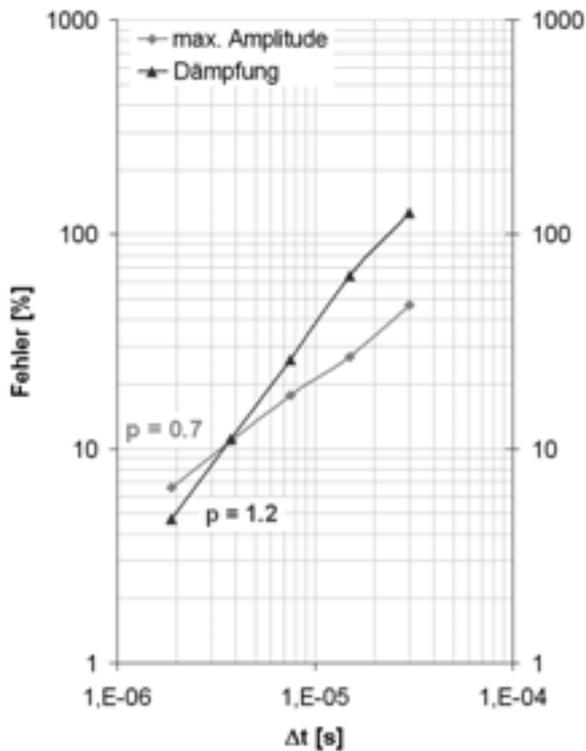


Abb. 10: Konvergenzverhalten

Im ersten Diagramm sind die Gesamtdämpfung sowie die maximalen Schwingungsamplituden in Abhängigkeit von $T/\Delta t$ (Anzahl der Zeitschritte pro ausgeführter Schwingungsperiode) dargestellt. Wie erwartet verursacht die mit kleineren Zeitschritten reduzierte numerische Dissipation das Absinken der Schaufelschwingungsamplituden sowie das Anwachsen der Gesamtdämpfung. Die Dämpfung wurde hierbei mittels der Bandweitenmethode aus dem fouriertransformierten Verschiebungssignal der schwingenden Schaufel erfasst. Die Berechnung der Konvergenzordnung aus den jeweiligen Werten der drei kleinsten Zeitschritte ermöglicht die Anwendung einer Richardson Extrapolation zur Bestimmung zeitschrittunabhängiger Lösungswerte ($D_{\text{extrapol.}} = 0.185\%$, $\text{Amp}_{\text{max extrapol.}} = 7.2 \cdot 10^{-4} \text{m}$). Im zweiten Diagramm wurde der zugehörige prozentuale Fehler doppeltlogarithmisch über der Zeitschrittweite aufgetragen. Die linearen Kurvenverläufe verdeutlichen hierbei die Gültigkeit der angewendeten Extrapolationstheorie.

Letztlich wird ein numerisches Experiment durchgeführt, bei dem strömungsseitig der relativ große Zeitschritt von $\Delta t_{\text{CFD}} = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{s}$ gewählt wurde, um bei möglichst geringen Rechenzeiten erste Trends zu ermitteln und Plausibilität des Schaufelschwingungsverhalten zu überprüfen. Nachstehende Abbildungen ermöglichen den Vergleich zwischen der strukturmechanischen FE-Berechnung der Schaufelantwort ohne Umströmung und der gekoppelten FSI-Simulation mit Berücksichtigung der umströmenden Luft. Jeweils sind das Verschiebungs-Zeit-Signal und das dazugehörige FFT-Signal angegeben.

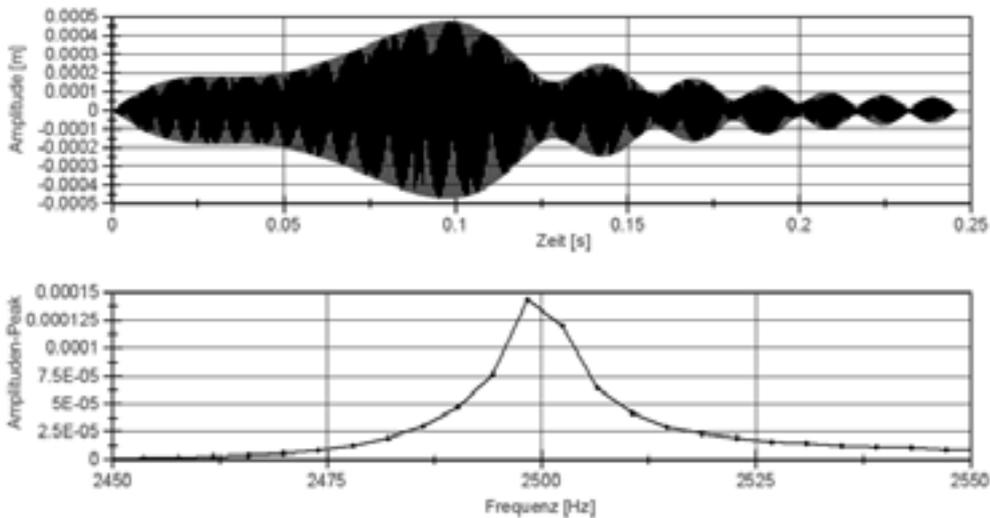


Abb. 11: FEM-Simulation ($\Delta t_{FEM} = 1.875 \cdot 10^{-6} s$)

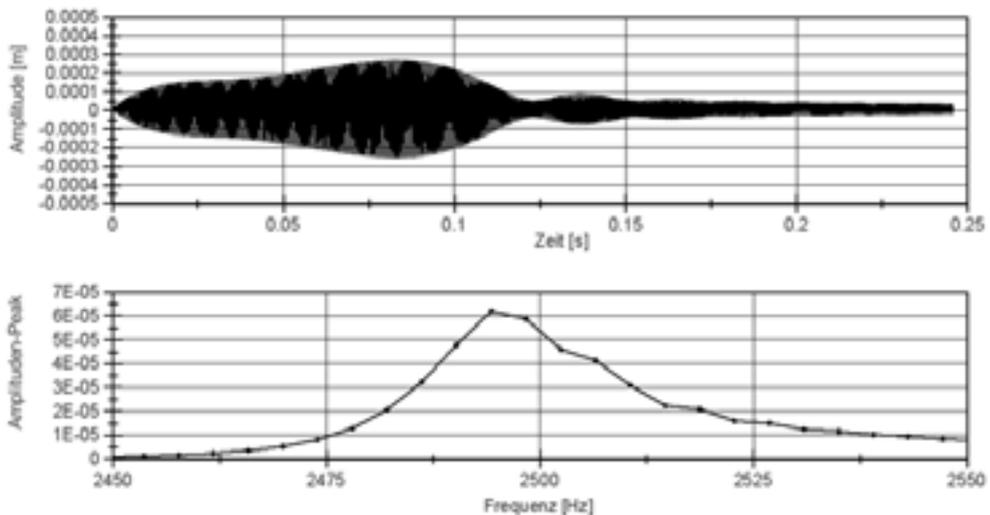


Abb. 12: FSI-Simulation ($\Delta t_{CFD} = 1.5 \cdot 10^{-5} s$)

Im Fall der FSI-Simulation sinken die Schaufelamplituden aufgrund der numerischen und aerodynamischen Dämpfung. Die aus dem FFT-Signal berechnete, im Vergleich zur definierten Strukturdämpfung größere Gesamtdämpfung beträgt $D_{FSI}=0.304\%$. Dabei ist die Frequenzauflösung Δf zu beachten ($\Delta f = 1/t_{ges}$). Mit $\Delta f=4,07Hz$ entsteht ein Fehler aufgrund des Verlustes des FFT-Signal Maximums. Eine einfache Signalverbesserung gelang bereits mit einer Interpolation über Akima-Splines ($D_{FSI}=0.275\%$). Die erwartete Frequenzabsenkung von ca. 4Hz ist hauptsächlich durch die mitschwingende Luftmasse zu erklären.

Das gezeigte Vorgehen zielt auf eine optimale Konfiguration hinsichtlich eines „realeren“ Verdichtergitter-Modells ab. Weiterführende Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses von Strömungsparametern auf strukturdynamische Effekte sind bereits in Bearbeitung.

Quellen

- [1] Beirow, B.; Kühhorn, A.; Golze, M.; Klauke, Th.: Strukturdynamische Untersuchungen an Hochdruckverdichterschaufelscheiben unter Berücksichtigung von Mistuningeffekten, VDI-Schwingungstagung 2004, Modalanalyse und Identifikation, VDI-Berichte Nr. 1825, 2004.
- [2] Beirow, B.; Kühhorn, A.; Golze, M.; Klauke, Th.; Parchem, R.: Experimental and Numerical Investigations of High Pressure Compressor Blades Vibration Behaviour Considering Mistuning. NAFEMS World Congress, St Julians, Malta, 2005.

- [3] Glück, M.: Ein Beitrag zur numerischen Simulation von Fluid-Struktur-Interaktionen – Grundlagenuntersuchungen und Anwendungen auf Membrantragwerke. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Shaker – Verlag, Aachen, 2003.
- [4] Grüber, B.: Über den Einfluß der Viskosität auf das aerodynamische Dämpfungsverhalten bei schwingenden ebenen Verdichtergittern in transsonischer Strömung, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 7 Nr. 437, VDI Verlag, Düsseldorf 2002.
- [5] Fraunhofer Institute for Algorithms and Scientific Computing SCAI, 2005: MpCCI 3.0.4 Manuals and Tutorials., <http://www.scai.fraunhofer.de/mpcci.html>.
- [6] FLUENT, Inc., 2005: FLUENT 6.2 User Guide. <http://www.fluentusers.com>
- [7] ABAQUS, Inc., 2005: ABAQUS Analysis User Manual. ABAQUS, Inc., Providence.

Der Autor Sven Schrape arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen der BTU Cottbus. Zuvor studierte er ebenfalls an der Universität Cottbus Maschinenbau.

Simulation von gekoppelten strömungsmechanischen und elektromagnetischen Effekten am Beispiel der Prozesssimulation des Lichtbogenschweißens

A. Spille-Kohoff, P. Bartsch
CFX Berlin Software GmbH

Die Kopplung der numerischen Strömungssimulation (CFD) mit anderen physikalischen Effekten wird immer wichtiger. Neben Fluid-Struktur-Interaktionen eröffnet die Kopplung an elektromagnetische Effekte einen weiten Anwendungsbereich für CFD-Programme. Dieser Artikel gibt einen Überblick über verschiedene Anwendungsgebiete dieser Kopplung, wobei für die hier dargestellten Fälle der CFD-Löser ANSYS CFX erweitert und genutzt wurde. Abschließend wird die physikalisch äußerst komplexe Simulation eines Metall-Schutzgas-Schweißverfahrens vorgestellt.

Dr. rer. nat. Andreas Spille-Kohoff ist Leiter der Forschung und Entwicklung,
Dr.-Ing. Peter Bartsch Geschäftsführer der CFX Berlin Software GmbH (<http://www.cfx-berlin.de>).

Überblick

Während die numerische Strömungssimulation Erhaltungsgleichungen, insbesondere der Massen- und Impulserhaltung (Kontinuitätsgleichung und Navier-Stokes-Gleichungen), löst, basiert die Elektromagnetik auf den Maxwell-Gleichungen, erweitert durch Materialbeziehungen wie die Permeabilität und die Permittivität.

CFD-Gleichungen	Maxwell-Gleichungen
$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0$ $\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u} u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \dots$	$\operatorname{div} \vec{B} = 0$ $\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
	$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_e$ $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Die Kopplung der beiden physikalischen Bereiche kann extern erfolgen, beispielsweise durch einen Datenaustausch zwischen unterschiedlichen, auf das jeweilige Teilgebiet spezialisierten Programmen, oder die Kopplung wird intern durchgeführt, d.h. alle Gleichungen werden von einem Löser berechnet. Die größten Vorteile der zweiten Variante sind die starke interne Kopplung und die einfachere Handhabung (ein Programm, ein Netz, eine Struktur, kein Kopplungsinterface), nachteilig ist, dass für verschiedene physikalische Effekte oft sehr verschiedene numerische Verfahren zur Lösung geeignet sind (z.B. Finite Volumen für CFD, Boundary Element-Methode für Elektromagnetik).

Vereinfachungen und Annahmen für die Elektromagnetik führen zu drei unterschiedlichen Anwendungsgebieten für die Kopplung von CFD und Elektromagnetik:

- **Ferro-Hydrodynamik (FHD):** Die Ferro-Hydrodynamik betrachtet magnetische Dipole in Magnetfeldern; elektrische Effekte werden vernachlässigt. Die Dipole werden im magnetischen Feld durch die Kelvinkraft beschleunigt. Beispiele sind ferrofluidische Flüssigkeiten für Tintenstrahldrucker oder die gezielte Beeinflussung magnetischer Biopartikel zu deren Ansammlung und Detektion.
- **Elektro-Hydrodynamik (EHD):** Die Elektro-Hydrodynamik betrachtet elektrisch geladene Teilchen in elektrischen Feldern; magnetische Effekte werden vernachlässigt. Die Teilchen werden im elektrischen Feld durch die Coulombkraft beschleunigt. Typische Beispiele sind Elektrophorese, Elektroosmose, Brennstoffzellen, Elektrolyse, elektrolytische Beschichtung mit Zink oder Gold und elektrostatisches Beschichten, z.B. mit elektrisch geladenem Lackspray.

- Magneto-Hydrodynamik (MHD):** Die Magneto-Hydrodynamik betrachtet keine einzelnen Ladungsträger, sondern beschreibt elektrisch leitende Fluide oder Festkörper durch ihre elektrische Leitfähigkeit. Es fließt ein elektrischer Strom, der ein magnetisches Feld erzeugt und zur Widerstandserwärmung führt. Die Fluide werden durch die Lorentzkraft beschleunigt; freie elektrische Ladungen oder magnetische Dipole werden vernachlässigt. Beispiele sind Lichtbogenschweißen, Plasmaschneiden, Leistungsschalter und das Heizen, Laminarisieren und Mischen von leitenden Fluiden (Elektroprozess-technik, z.B. für Siliziumschmelzen).

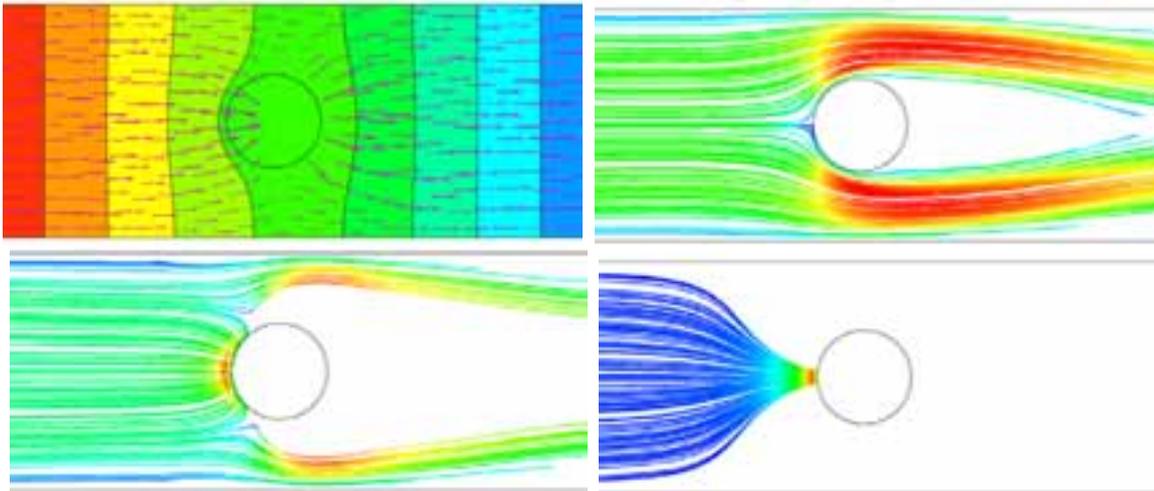
Die einzelnen Gebiete lassen sich nicht immer scharf abgrenzen. So kann man zum Beispiel eine elektrolytische Beschichtung durch ein Magnetfeld beeinflussen. Nach einem Überblick über Simulationen in diesen drei Bereichen wird näher auf die Simulation des Impulsschweißens, einer speziellen Anwendung der Magneto-Hydrodynamik, eingegangen.

Ferro-Hydrodynamik

Ferro-Hydrodynamik befasst sich mit magnetischen Dipolen, die durch die Kelvinkraft

$$\vec{F} = \mu_0 (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H}$$

mit der Magnetisierung M in inhomogenen magnetischen Feldern H beschleunigt und in Rotation versetzt werden.[4] Die Dipole können als diskrete Partikel oder als kontinuierliche Dichteverteilung betrachtet werden. Die Berechnung des magnetischen Feldes berücksichtigt die materialspezifische Suszeptibilität.



Links oben: Das magnetische Potential (farbig) und das magnetische Feld H (Vektoren) in einem Kanal mit einem externen magnetischen Induktionsfeld und einem paramagnetischen Stahlzylinder.

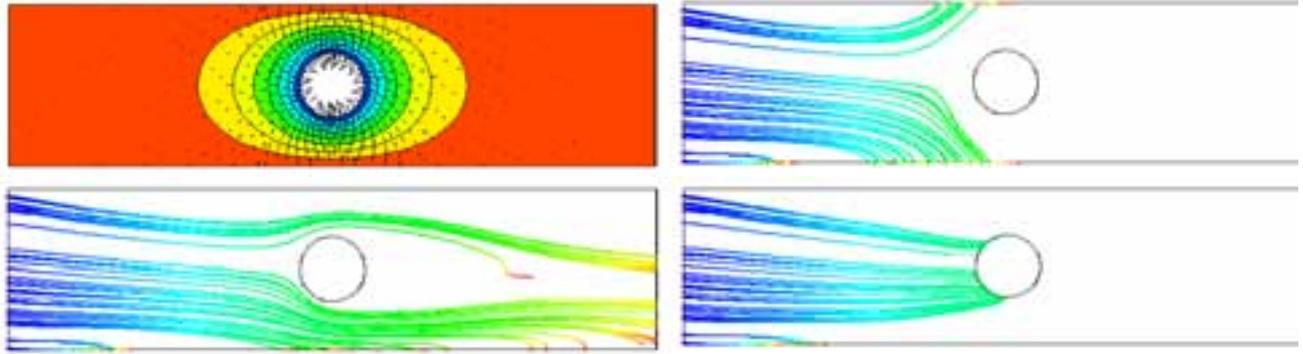
Rechts oben, links und rechts unten: Bahnlinien der magnetischen Dipole ohne, mit moderater und mit starker Magnetisierung. Deutlich sind die Anziehung vorne (und hinten) und die Abstoßung oben und unten am Zylinder zu erkennen.

Elektro-Hydrodynamik

Elektro-Hydrodynamik befasst sich mit freien Ladungen, die in elektrischen Feldern E durch die Coulombkraft

$$\vec{F} = q\vec{E} \text{ bzw. } \vec{f} = \rho\vec{E}$$

beschleunigt werden. Die Ladungen können als diskrete Partikel mit der Ladung q mit Hilfe der Lagrangeschen Beschreibung oder als kontinuierliche Konzentrationsverteilung mit der Ladungsdichte ρ über die Eulersche Beschreibung simuliert werden.



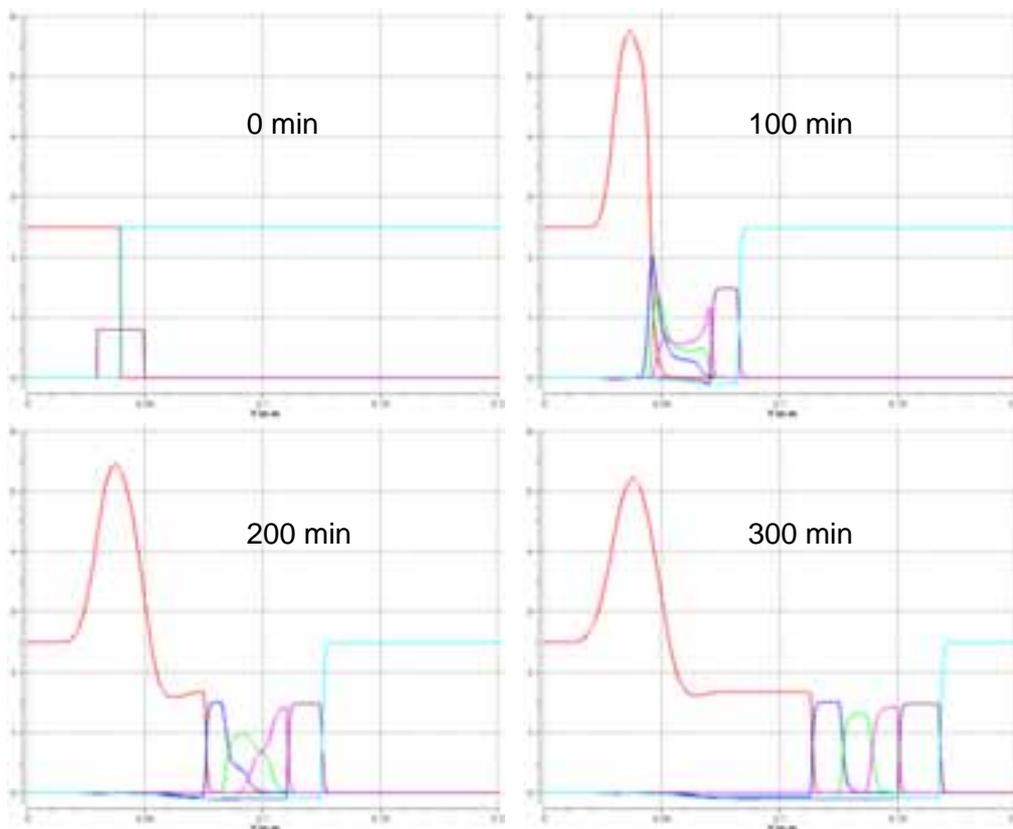
Links oben: Elektrisches Potential (farbig) und Feld (Vektoren) zwischen anodischen Kanalwänden und Zylinderkathode.

Rechts oben, links unten und rechts unten: Partikel im elektrischen Feld unter Einfluss der Gravitation mit negativer Ladung (Anionen), ohne Ladung und mit positiver Ladung (Kationen).

In wässrigen Ionenlösungen wird statt der Beschleunigung durch die Coulombkraft, der die Reibungskräfte entgegenwirken, meist die elektrische Mobilität μ verwendet, die für den Gleichgewichtszustand die Ionenmigrationgeschwindigkeit u_m mit dem lokalen elektrischen Feld E verknüpft:

$$\vec{u}_m = \mu \vec{E}$$

Ein typisches Beispiel ist die Elektrophorese, bei der Ionengemische mittels elektrischer Felder getrennt werden.



Elektrophorese (Isotachophorese) für die Trennung von Säuren in wässrigen Lösungen.[5]

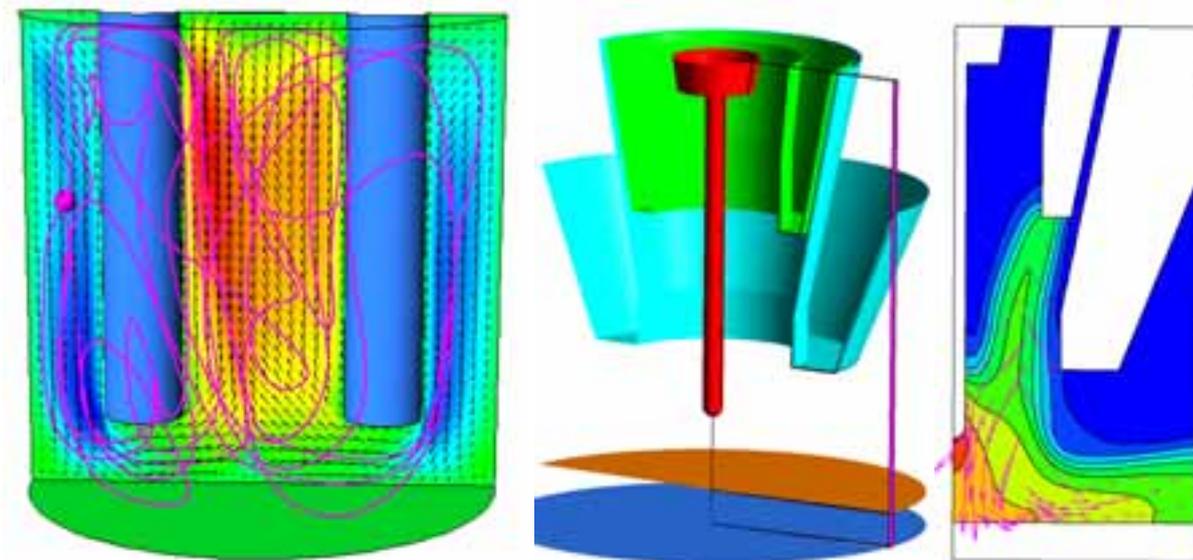
Magneto-Hydrodynamik

In der Magneto-Hydrodynamik werden freie elektrische Ladungen und freie magnetische Dipole vernachlässigt. Die Fluide und Festkörper können durch ihre elektrische Leitfähigkeit σ (zumeist stark temperaturabhängig) und ihre relative Permeabilität beschrieben werden. Ein elektrischer Strom j fließt aufgrund einer externen Spannung und aufgrund der Strömung im magnetischen Feld B (Ohmsches Gesetz):

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B})$$

Der elektrische Strom führt zur Widerstandserwärmung und erzeugt ein magnetisches Feld; durch den elektrischen Strom im magnetischen Feld wirkt die Lorentzkraft f_L auf das Fluid:

$$\vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B}$$



Links: Elektromagnetisches Durchmischen einer Säure durch ein externes magnetisches Feld und eine angelegte Spannung zwischen den zylinderförmigen Elektroden; vertikale Geschwindigkeit als Farben und eine typische Stromlinie.

Mitte und rechts: Plasma-MIG-Schweißen mit zwei Lichtbögen: zwischen Draht und Werkstück und zwischen Plasma-Elektrode und Werkstück; das Bild rechts zeigt die Temperatur als Farbe und die Strömungsgeschwindigkeit als Vektoren.

Simulation des Lichtbogenschweißen

Lichtbogenschweißen und Plasmaschneiden sind viel genutzte Techniken, um Metallteile zu verbinden oder zu trennen. Beim MSG-Schweißen wird ein Metalldraht kontinuierlich dem Werkstück zugeführt, beispielsweise zwei überlappenden Metallblechen, die gefügt werden sollen. Ein Schutzgas, meist Argon, aus einer Düse umströmt den Draht. Zwischen der Spitze des Drahtes und dem Werkstück brennt ein elektrischer Lichtbogen und schmilzt den Draht und das Werkstück. Geschmolzene Tropfen des Drahtes fallen auf die Schweißstelle und formen die Schweißnaht. Beim WIG-Schweißen und Plasmaschneiden wird der Draht durch eine feste, nicht abschmelzende Elektrode, oft Wolfram, ersetzt, so dass nur das Werkstück aufschmilzt.

Obwohl Schweißverfahren seit Jahrzehnten genutzt werden, ist über den genauen physikalischen Hintergrund wenig bekannt. Der größte Teil des Fachwissens ist auf eine begrenzte Zahl von Standard-Schweißverfahren begrenzt. Doch viele Anwendungen sind komplizierter als diese Standardfälle:

- Moderne, digital gesteuerte Stromquellen erlauben eine komplexe Prozesssteuerung mit Echtzeitoptimierung, was zu mehr Möglichkeiten führt als ein konstanter Strom, eine konstante Spannung oder das Impulsschweißen.
- Wechselstromschweißen wird immer beliebter, eine Optimierung erfolgt jedoch nur durch Versuch und Irrtum.

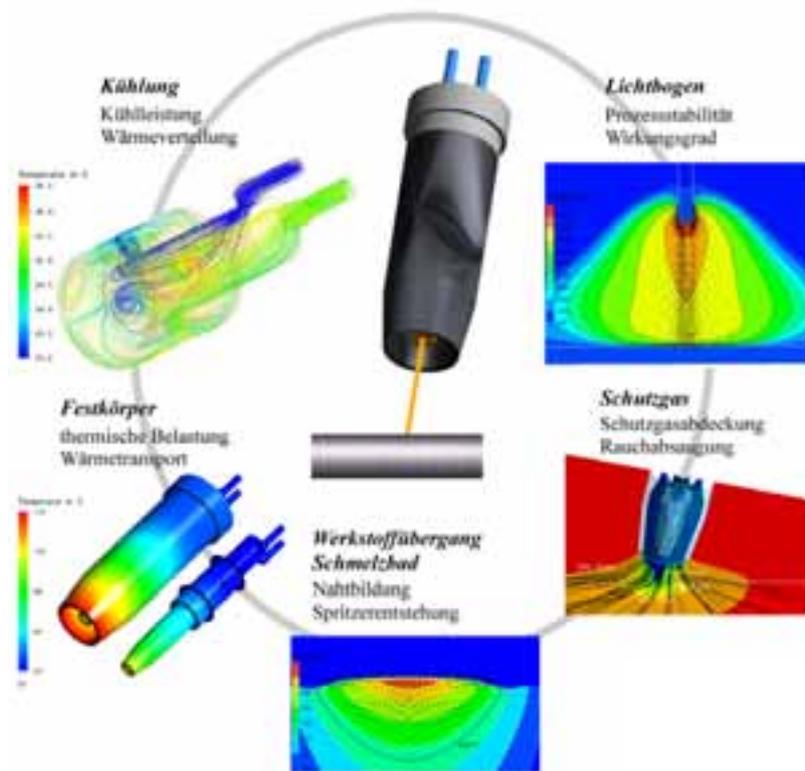
- Mehrfachsysteme mit zwei oder mehr Schweißbrennern erlauben ein schnelleres Schweißen, beeinflussen sich jedoch gegenseitig. Über diese Wechselwirkungen ist wenig bekannt.

All diese neuen Verfahren führen weitere Schweißparameter ein, mit denen der Schweißprozess hinsichtlich aktueller Zielsetzungen optimiert werden kann:

- Dünnere Werkstücke: Bleche werden immer dünner. Aktuelles Ziel in der Automobilindustrie ist das Schweißen von Blechen mit nur noch 0,2 mm Dicke, ohne den Korrosionswiderstand, d.h. die Verzinkungsschicht zu zerstören.
- Mehr Materialien: Aluminium und Magnesium werden in der Automobilindustrie immer beliebter, tragende Teile sind jedoch meist noch aus Stahl. Diese neuen Materialien und ihre Kombinationen müssen schnell und langlebig gefügt werden.
- Nacharbeitungsfreie Schweißnähte: Ein manuelles Überarbeiten der Schweißnaht ist teuer, so dass Spritzer, Löcher, Zinkschichtverdampfung und starke Verzüge bereits im Fertigungsprozess vermieden werden müssen.
- Geschwindigkeit: Die Fügeverfahren sollen immer schneller, doch trotzdem robust und stabil arbeiten.

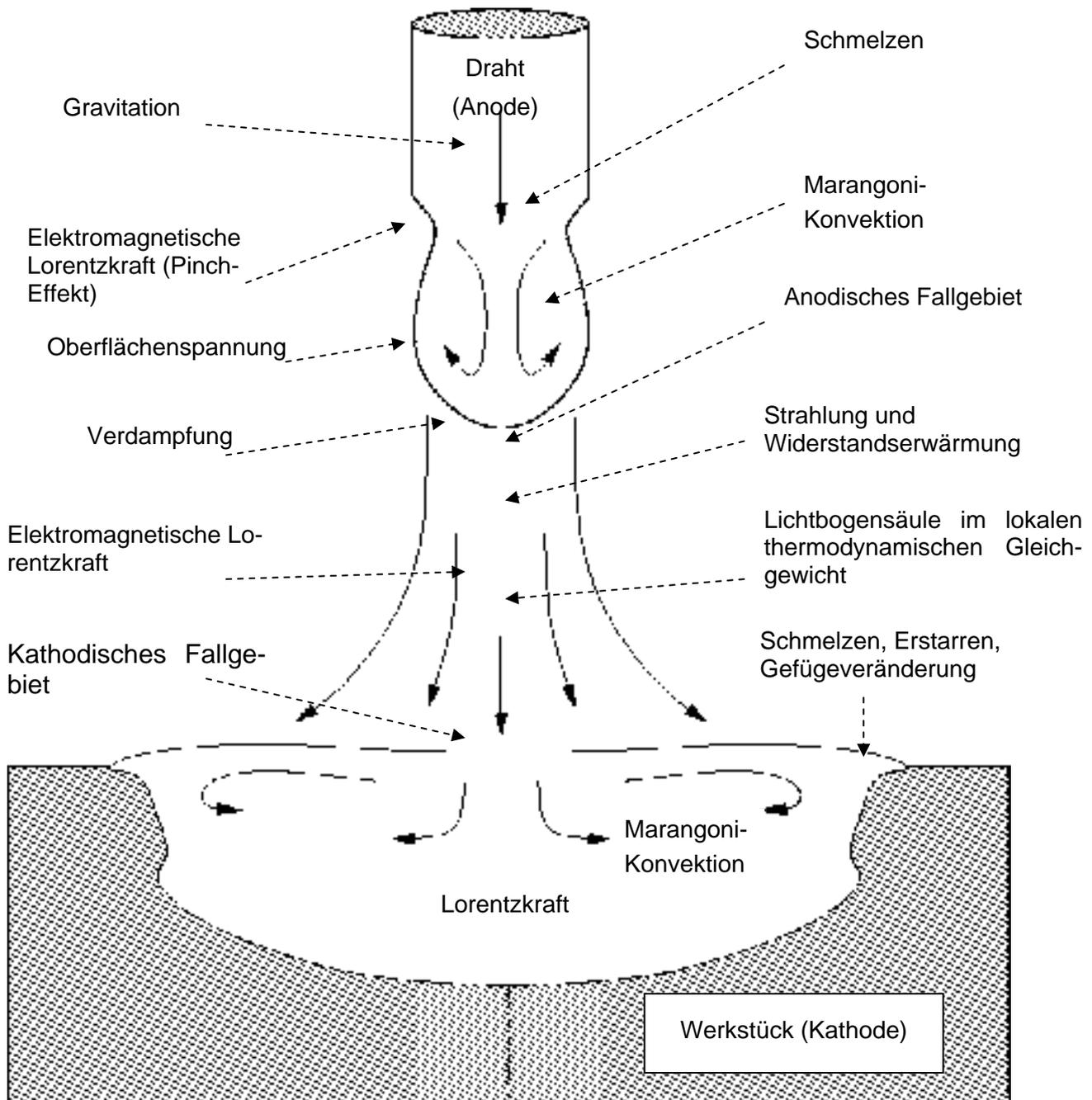
Für den optimalen Einsatz dieser neuen Verfahren ist ein grundlegendes Verständnis des komplexen Schweißprozesses unverzichtbar. Die Simulation ist ein wichtiges Werkzeug, um dieses tiefe Verständnis zu erlangen: Es liefert die notwendige hohe zeitliche und räumliche Auflösung aller physikalischen Größen, es erlaubt die Quantifizierung und Bewertung jedes einzelnen physikalischen Effekts, und es gestattet auf einfache Weise Änderungen in der Geometrie, den Randbedingungen und den Materialeigenschaften. Einfachere Modelle sind nicht in der Lage, die komplexen, gekoppelten Phänomene hinreichend genau zu beschreiben, und experimentelle Messungen sind beim Schweißen aufgrund der hohen Temperaturen von bis zu 30.000 K im Lichtbogen mit seiner starken Wärmestrahlung kaum möglich.

CFX Berlin hat im Rahmen des Forschungsprojektes „ChopArc: MSG-Lichtbogenschweißen für den Ultraleichtbau“ den kommerziellen CFD-Löser ANSYS CFX zur Prozesssimulation des MSG-Schweißens erweitert.[1] Zusammen mit dem Schweißinstitut der TU Berlin, dem Stromquellenhersteller REHM (Uhingen), Regelungsexperten der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik (Berlin) und dem Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik (Greifswald) wurde der Schweißprozess optimiert, um den Energieeintrag zu senken und Spritzer, Löcher und starken Verzug zu vermeiden. Dabei stand zunächst der Lichtbogen im Vordergrund, da er wesentlich den Wärmeeintrag in das System bestimmt und damit große Auswirkungen auf die Schutzgasströmung und -abdeckung, den Werkstoffübergang, die Nahtbildung und auf die Kühlung des Schweißbrenners hat.



In modernen MSG-Schweißbrennern für automatisiertes Schweißen ist eine Vielzahl physikalischer Prozesse zu einem Gesamtprozess verbunden. Während die Simulation der Kühlflüssigkeitsströmung, der Wärmeleitung durch feste Bauteile und der Schweißrauchabsaugung relativ einfach ist, muss eine Simulation des Lichtbogens, der Schutzgasabdeckung und des Werkstoffübergangs diese komplexen Effekte berücksichtigen:

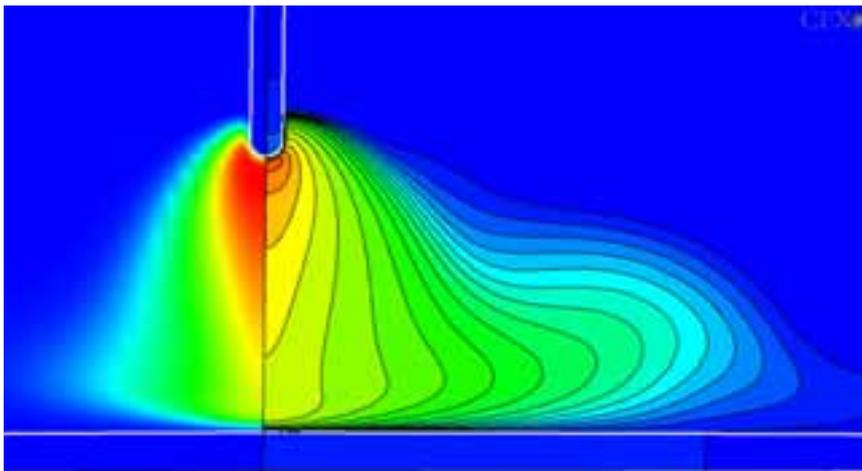
- **Mehrphasenströmung:** Zwischen einer fest-flüssigen Phase (Metall) und den beteiligten Gasen liegt eine freie Oberfläche vor; das Metall besteht in der Regel aus mehreren Komponenten (Legierung, verzinktes Blech oder unterschiedliche Materialien in Werkstück und Draht), und auch das Gas ist ein Gemisch aus Schutzgas (oft Argon), zum Teil mit aktiven Anteilen wie CO_2 , und der Umgebungsluft.
- **Oberflächeneffekte:** Während Oberflächenspannung und Adhäsion wichtig für die Tropfenbildung sind, hat die Marangoni-Konvektion einen großen Einfluss auf die Schweißnahttiefe.
- **Phasenübergänge:** Das Metall schmilzt am Drahtende und auf dem Werkstück, erstarrt dann wieder (mit Gefügebildung und Änderung der Werkstoffeigenschaften in der Wärmeeinflusszone), und aufgrund der lokal großen Wärmeeinbringung durch den Lichtbogen verdampfen bis zu 10% des Drahtes. Diese Phasenübergänge müssen mit geeigneten Modellen beschrieben werden.
- **Strahlung:** Sowohl die Strahlungsemission des Lichtbogens als auch dessen Absorption auf den Oberflächen müssen in der Simulation berücksichtigt werden.
- **Elektromagnetik:** Energie und Impuls in dem System werden von den elektromagnetischen Effekten stark beeinflusst. Die externe Spannung verursacht einen elektrischen Strom durch das leitende Metall und die heißen Gase (Plasma). Der elektrische Strom erzeugt ein magnetisches Feld. Das Fluid wird von der Lorentzkraft beschleunigt (der sogenannte Pinch-Effekt) und durch Widerstandserwärmung erhitzt. Mit Hilfe zusätzlicher Transportgleichungen können diese magneto-hydrodynamischen Effekte direkt im CFD-Löser simuliert werden.
- **Physik des Lichtbogens:** Der elektrische Lichtbogen zwischen den zwei Elektroden kann in drei Teile aufgeteilt werden: Kathodisches und anodisches Fallgebiet und die Plasmasäule dazwischen. Die Lichtbogensäule kann zumeist im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht (LTG) angenommen werden, so dass die Materialeigenschaften des Gases wie Dichte, Viskosität, elektrische und thermische Leitfähigkeit nur Funktionen von Temperatur, Druck und lokaler Zusammensetzung sind.[2] Für die Fallgebiete muss ein Fallgebietsmodell [3] implementiert werden, das ambipolare Diffusion, Ionisation und Rekombination, die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit an den Elektroden und den Energieumsatz an den Elektrodenoberflächen durch Absorption bzw. Emission von Elektronen und durch Ionenneutralisation berücksichtigt.



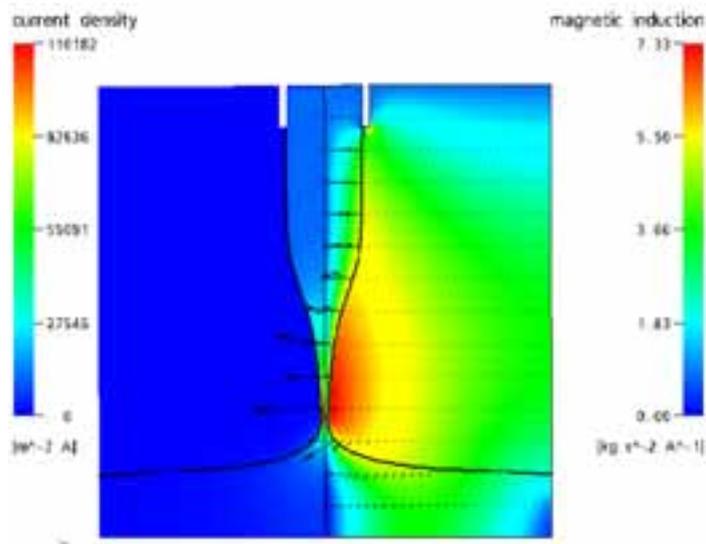
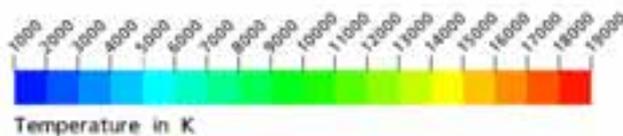
Vielzahl der physikalischen Effekte beim MSG-Schweißen

Für die Simulation des MSG-Schweißens wurden die o.g. physikalischen Effekte in einen CFD-Löser implementiert, ohne externe Programme zu verwenden. Simulationen des Kurzschlusses und der Lichtbogenphase zeigen eine gute Übereinstimmung mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Messungen. Stabilität und Konvergenz des Löser waren trotz der starken Temperatur- und Druckabhängigkeiten der Materialeigenschaften, trotz der sehr hohen Gradienten, z.B. dem Temperaturabfall an den Elektroden von 20,000 K über weniger als 1 mm, und trotz der Komplexität und starken Kopplung der physikalischen Effekte gut. Dies zeigt auch den Vorteil der internen numerischen Kopplung multiphysikalischer Problemstellungen.

Eine Kopplung mit externen Programmen wie der Strukturmechanik wird notwendig, wenn Spannungen und Verzerrungen durch die Temperaturschwankungen und die Verformung der Schmelzbadgeometrie mitberücksichtigt werden müssen. Sobald starke Verformungen einen Effekt auf den Schweißprozess haben, muss eine bidirektionale Kopplung verwendet werden.



Lichtbogen zwischen freiem Drahtende und Werkstück: Elektronenkonzentration (links), Temperaturen (rechts) bis über 19,000 K



Kurzschlussverbindung zwischen dem Drahtende und dem Werkstück: Stromdichte (links), magnetische Induktion (rechts), Lorentzkraft (schwarze Vektoren in rechter Hälfte)

Quellen

- [1] S.-F. Goecke, E. Metzke, A. Spille-Kohoff, M. Langula: ChopArc: MSG-Lichtbogenschweißen für den Ultraleichtbau, Fraunhofer IRB Verlag 2005, ISBN 3-8167-6766-4.
- [2] A.B. Murphy, C.J. Arundell: Transport Coefficients of Argon, Nitrogen, Oxygen, Argon-Nitrogen, and Argon-Oxygen Plasmas, Plasma Chemistry and Plasma Processing 14 (1994), Nr. 4.
- [3] L. Sansonnens, J. Haidar, J.J. Lowke: Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion, Journal of Physics D: Applied Physics 33 (2000), Nr. 2.
- [4] R.E. Rosensweig: Ferrohydrodynamics, Dover Publications 1997.
- [5] R.A. Mosher, D.A. Saville, W. Thormann: The Dynamics of Electrophoresis, VCH 1992.

Bitte per Post oder Fax senden:

Tel.: +49 (0)8092-83550

Fax: +49 (0)8092-83551

e-mail: info@nafems.de

Adresse für Fensterkuvert



NAFEMS Kontakt DACH & Nordic
Schillerstr. 6

D-85567 Grafing
Germany

Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe 4

Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

NAFEMS Mitgliedschaft

NAFEMS Magazin „Benchmark“

NAFEMS Seminare

NAFEMS Trainingskurse

NAFEMS World Congress 2007 (Vancouver, CAN)

Registered Analyst Zertifizierung

EU-Projekte

Internationale Arbeitsgruppen

Bitte nehmen Sie mich in Ihren Verteiler auf.

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

Ich möchte folgendes zum NAFEMS Magazin anregen:

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

Absender

Firma: _____

Abt.: _____

Titel, Vor-/Nachname: _____

Straße: _____

PLZ-Ort: _____

Tel.: _____

Fax: _____

e-mail: _____

Bitte senden Sie das NAFEMS Magazin auch an:

Firma: _____

Abt.: _____

Titel, Vor-/Nachname: _____

Straße: _____

PLZ-Ort: _____

Tel.: _____

Fax: _____

e-mail: _____