



# Online-Magazin

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

## Fachartikel in dieser Ausgabe

**Submodellansatz zur effizienten Analyse des Anlageverhaltens von Manschettendichtungen aus PTFE-Compound mit Rückförderstrukturen**

**Gekoppelte Elektromagnetische Feldsimulation mit FEM und BEM**

**Plasmasimulationen in Überspannungseinrichtungen**

**Untersuchungen zur Topologieoptimierung von Frequenzproblemen**

...sowie Neuigkeiten, Veranstaltungskalender, Schulungen, ...



**KEYNOTES ANNOUNCED**

**11-14 JUNE 2017**  
**STOCKHOLM | SWEDEN**  
A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION



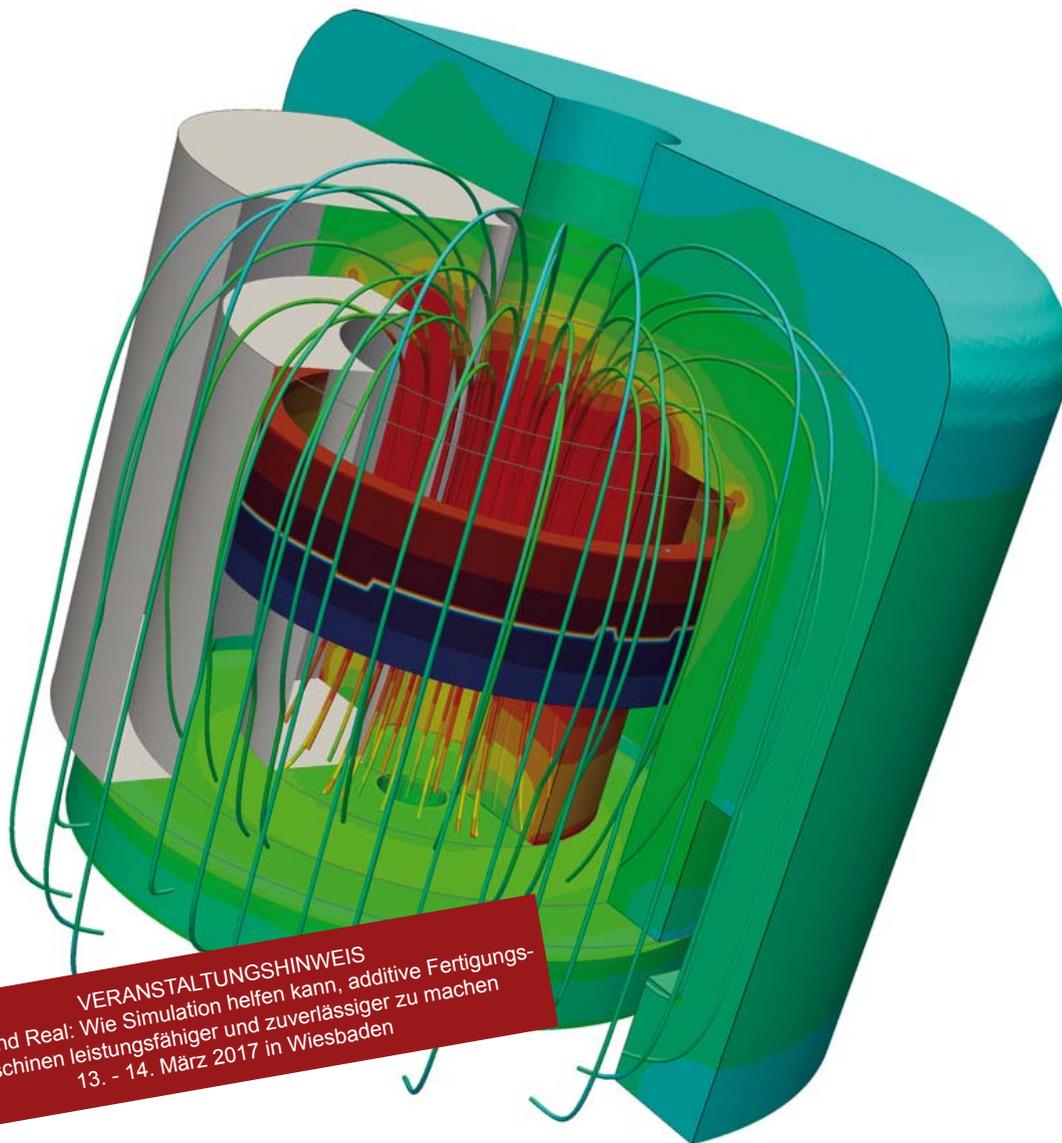
[nafems.org/congress](http://nafems.org/congress)

**NAFEMS World Congress**  
incorporating the  
**3<sup>rd</sup> International**  
**SPDM Conference**

The only one independent, international conference dedicated exclusively to everyone involved in engineering analysis, simulation, modelling, and systems engineering.

- +470 abstracts submitted
- comprehensive hardware and software exhibition
- workshops
- discussion rounds
- trainings
- networking, ..

**Don't miss it! Be part of it!**



**VERANSTALTUNGSHINWEIS**  
Virtual and Real: Wie Simulation helfen kann, additive Fertigungsmaschinen leistungsfähiger und zuverlässiger zu machen  
13. - 14. März 2017 in Wiesbaden

Alle bisherigen Ausgaben kostenlos zum Download unter: [www.nafems.org/magazin](http://www.nafems.org/magazin)

Sponsoren dieser Ausgabe:



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

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

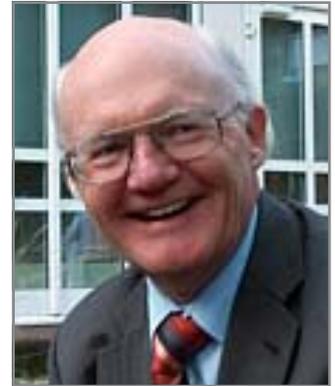
als Wort des Jahres 2016 hat die Gesellschaft für deutsche Sprache das Kunstwort 'postfaktisch' ausgewählt. Damit weist sie darauf hin, dass es in politischen und gesellschaftlichen Diskussionen zunehmend um Emotionen anstelle von Fakten geht. Zum Glück ist das in vielen Bereichen zumindest heute noch nicht verbreitet. Die Arbeitsweise von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren sollte auf nachprüfbaren Tatsachen basieren. Dasselbe gilt auch für Mediziner und Juristen. Würden Sie zum Beispiel Ärzten vertrauen, wenn die sich bei ihren Diagnosen überwiegend von Emotionen leiten ließen? Oder was wäre das für ein Richter, dessen Entscheidungen auf Gerüchten oder Falschmeldungen statt auf belegbaren Fakten beruhen? Deshalb hoffe ich sehr, dass wir nicht generell in ein Zeitalter abdriften, in dem "Fake News" einen wesentlichen Einfluss gewinnen. Die Unsitte ist übrigens nicht neu. Ein historisch bedeutendes Beispiel stellt die sogenannte Emser Depesche dar. Im Juli 1870 hatte der damalige preußische Ministerpräsident Otto von Bismarck ein Telegramm aus Bad Ems aus dem Umfeld von König Wilhelm I. derart gekürzt an die Presse gegeben, dass der Tenor wesentlich schärfer wurde. Das war sicher nicht die Ursache, wohl aber der Anlass für den deutsch-französischen Krieg 1870/71.

Bei der Auswahl der Beiträge für dieses Magazin wird sorgfältig darauf geachtet, dass die getroffenen Aussagen auf belegbaren Tatsachen beruhen. Sollte Ihnen dennoch ein Fehler auffallen, so wäre das Redaktionsteam für einen entsprechenden Hinweis dankbar. Als Fachbeiträge enthält das vorliegende Heft vier Arbeiten, jeweils aus einem anderen Anwendungsbereich. Für die Auslegung von Wellen-Dichtungen mit Rückförderstrukturen aus Elastomeren beschreibt der erste Beitrag einen Submodellansatz, der den Rechenaufwand erheblich reduziert. Elektromagnetische Felder durchdringen nicht nur Strukturen, sondern auch die angrenzende Luft. Durch die im zweiten Beitrag empfohlene Kopplung von FEM mit Randelementmethoden (BEM) lässt sich das Abklingverhalten im Außenraum besser erfassen. Blitzschutzgeräte verwenden häufig Gasentladungen, um die Blitzenergie schnell abzuleiten. Im dritten Beitrag wird vorgeschlagen, eine CFD-Simulation, die die Gasdynamik unter Berücksichtigung der chemischen Prozesse, der Turbulenz und des thermischen Verhaltens abbildet, mit einer elektromagnetischen Simulation zu koppeln. In der Topologieoptimierung wird häufig der SIMP-Ansatz verwendet, der die Steifigkeit in nicht benötigten Bereichen reduziert. Bei dynamischer Optimierung kann das aber zu künstlichen Eigenformen und zu einer Modellierungsschwäche führen. Der vierte Beitrag benennt Kriterien, die auf diese Probleme hinweisen.

Wie schon in früheren Heften verdeutlichen die Fachbeiträge wieder die beeindruckende Bandbreite im Anwendungsspektrum der numerischen Simulation. Ich hoffe, dass Sie darüber hinaus auch von den Informationen zu NAFEMS-Events, den Neuigkeiten und den Anzeigen profitieren.

Mit freundlichen Grüßen

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



*Prof. Dr.-Ing.  
Klaus Rohwer*

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



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



[www.3ds.com/products-services/simulia](http://www.3ds.com/products-services/simulia)



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



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



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



[www.math2market.de](http://www.math2market.de)



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

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

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

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

Das oberste Gremium bei NAFEMS ist das **Council of Management**. Deren Mitglieder sind:

- C. Stavrinidis (Chairman, ESA, NL)
- M. Zehn (Vice Chairman, TU Berlin, D)
- R. L. Dreisbach (The Boeing Company, USA)
- D. Ellis (Cadferm Ireland, UK)
- G. Miccoli (Imamoter, I)
- M. Moatamedi (University of Narvik, N)
- S. Morrison (Lusas, UK)
- P. Newton (GBE, UK)
- M.-C. Oghly (Micado, F)
- A. Ptchelintsev (Nokia, FI)
- A. Puri (Selex Sensors & Airborne Systems, UK)
- M. Wiedemann (DLR, D)
- J. Wood (formerly Strathclyde University, UK)

Um die Aktivitäten von NAFEMS in den verschiedenen geografischen Regionen zu vertreten, neutral zu leiten und die nationalen Belange innerhalb der NAFEMS zu vertreten, wurden sogenannte regionale Steering Committees (Lenkungsausschüsse) gebildet. Die Mitglieder des **NAFEMS Steering Committees für Deutschland, Österreich und Schweiz (DACH)** sind:

- W. Dirschmid (CAE Consulting), Chair
- W. Bauer (Daimler AG)
- A. Gill (Ansys Germany)
- R. Helfrich (Intes)
- M. Hoffmann (Altair Engineering)
- C. Hühne (DLR)
- F. Jurecka (Dassault Systèmes)
- W. Moretti (Schindler Elevator)
- E. Niederauer (Siemens PLM Software)
- F. Peeters (ehem. Dassault Systèmes)
- A. Pfaff (PD Tec)
- A. Starlinger (Stadler Altenrhein)
- A. Svobodnik (Mvoid Technologies)
- E. Wang (Cadferm)
- M. Zehn (TU Berlin/Femcos)

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

- R. Banjac (Siemens PLM Software)
- W. Dirschmid (CAE Consulting)

- A. Frenk (Dassault Systèmes)
- A. Gill (Ansys Germany)
- T. Grahs (move-csc)
- U. Heck (Dr. Heck Consulting & Engineering)
- B. Hupertz (Ford)
- U. Janoske (Universität Wuppertal)
- G. Kohnen (DHBW Mosbach)
- R. Stauch (MahleBehr)
- M. Stephan (DHBW Mosbach)
- A. Stück (DLR)
- T. Weber (CD-adapco)
- K. Wolf (Fraunhofer SCAI)

Die technischen Bereiche bei NAFEMS werden durch spezialisierte **internationale Arbeitsgruppen (Working Groups)** koordiniert. Folgende Gruppen sind aktuell bei NAFEMS aktiv:

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

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

## Werden auch Sie – Ihre Firma – NAFEMS-Mitglied!

NAFEMS hat weltweit über **1.300 Mitgliedsunternehmen und -Institutionen**. Mitglieder erhalten unter anderem:

- Freie Seminarplätze
- Literatur und „Benchmark“ (FEM-Magazin)
- Ermäßigungen für Trainingskurse, Kongresse und Literatur
- Kostenlose Stellenanzeigen auf caejobsite.com
- Zugriff auf passwortgeschützten Webbereich mit Kontaktmöglichkeiten und Informationen
- Kontakt zu über 1.300 Organisationen weltweit

**Werden auch Sie Mitglied !**  
[www.nafems.org/involved](http://www.nafems.org/involved)

**Impressum**

**Editor-in-Chief**

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

**Redaktioneller Beirat**

Dr. Alfred Svobodnik  
Mvoid Technologies  
Prof. Dr. Manfred Zehn  
TU Berlin / Femcos mbH

**Redaktion**

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

**Gestaltung / Layout / Anzeigen**

Werbos GbR  
Griesstr. 20  
D-85567 Grafing b. München  
Germany  
Tel. +49 (0) 176 217 984 01  
e-mail: info@werbos.de  
www.werbos.de

**Bezugspreis / Aboservice**

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

**Anzeigenpreise**

Preisliste vom 01.01.2016

**Verteilung / Bezug**

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

**Copyright © 2016, Werbos GbR.**

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

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

**ISSN 2311-522X**

Vorwort des Editor-in-Chief.....2  
Sponsoren .....3  
**NAFEMS**  
Über NAFEMS.....4  
Inhalt / Impressum .....5  
**NAFEMS Events**  
Übersicht: Konferenzen/Seminare, Schulungen, e-learnig Kurse .....6  
Seminar/Fachkonferenz  
Einladung und Vortragsprogramm:  
Virtual and Real: Wie Simulation helfen kann, additive Fertigungs-  
maschinen leistungsfähiger und zuverlässiger zu machen.....7  
Trainingskurse  
Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation.....8  
Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung .....9  
Verification and Validation in Engineering Simulation ..... 10 - 11  
Simulation und Analyse von Composites ..... 12  
Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis..... 13  
**NAFEMS World Congress 2017 & 3rd Int. SPDM Conference**....14 - 19  
**Literatur**  
Internationale NAFEMS Zeitschrift „Benchmark“ .....20  
e-library / neue Publikationen / Online Resource Center .....21  
Invitation 2 Tender .....22 - 23  
**Professional Simulation Engineer PSE & Membership** .....24  
**NAFEMS Mitgliedschaft** .....25  
**Neuigkeiten** .....26 - 41  
Veranstaltungskalender.....42 - 43  
**Fachbeiträge**  
**Dichtungsmodellierung:**  
**Submodellansatz zur effizienten Analyse des  
Anlageverhaltens von Manschettendichtungen aus  
PTFE-Compound mit Rückförderstrukturen**.....42 - 53  
N. Dakov, F. Bauer, W. Haas (Universität Stuttgart)  
**Elektromagnetische Systeme:**  
**Gekoppelte Elektromagnetische Feldsimulation  
mit FEM und BEM** .....54 - 63  
L. Kielhorn, T. Rüberg, J. Zechner (Tailsit)  
**Multiphysik:**  
**Plasmasimulationen in Überspannungseinrichtungen** .....64 - 72  
M. Mürmann, R. Fuchs, H. Nordborg  
(Hochschule für Technik Rapperswil)  
**Topologieoptimierung:**  
**Untersuchungen zur Topologieoptimierung von  
Frequenzproblemen** .....73 - 87  
L. Harzheim (Adam Opel)  
**Werbeanzeigen**  
CEI/Ensight.....27  
DYNAmore .....39  
esocaet .....33  
Hochschule Rapperswil .....37  
ISKO engineers .....31  
Math2Market.....35  
Siemens PLM .....29  
x-technik Verlag .....41  
**Rückmeldeformulare**.....88 - 89

## Konferenzen und Seminare

Konferenz-/Seminartitel	Termin	Ort
<b>Virtual and Real: Wie Simulation helfen kann, additive Fertigungsmaschinen leistungsfähiger und zuverlässiger zu machen</b> <a href="http://www.nafems.org/am17">www.nafems.org/am17</a>	12. - 13. März	Wiesbaden
<b>NAFEMS World Congress &amp; Int. SPDM Conference</b> <a href="http://www.nafems.org/congress">www.nafems.org/congress</a>	11. - 14. Juni	Stockholm, Schweden
<b>Simulation Driven Engineering</b> <a href="http://www.nafems.org/sde17">www.nafems.org/sde17</a> (ab Frühjahr 2017)	Herbst 2017	tba
<b>Computational Fluid Dynamics</b> <a href="http://www.nafems.org/cfd17">www.nafems.org/cfd17</a> (ab Frühjahr 2017)	Herbst 2017	tba

Informationen zu allen NAFEMS Veranstaltungen finden Sie unter [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events)

## Schulungen

Schulungstitel	Termin	Ort	Teilnahmegebühr Regulär / Mitglied <sup>1)</sup>	
Inhaltsbeschreibung auf Seiten 8 - 13				
<b>Verification and Validation in Engineering Simulation</b> <a href="http://www.nafems.org/events/nafems/2017/vandv1">www.nafems.org/events/nafems/2017/vandv1</a>	22. - 23. März	FRA	1.950	1.560
<b>CFD Analysis: Theory and Applications</b> <a href="http://www.nafems.org/events/nafems/2017/cfd-course1">www.nafems.org/events/nafems/2017/cfd-course1</a>	08. - 09. Mai	WI	990	700
<b>Non-Linear Finite Element Analysis</b> <a href="http://www.nafems.org/events/nafems/2017/non-linear-1">www.nafems.org/events/nafems/2017/non-linear-1</a>	10. - 11. Mai	WI	1.490	1.100
<b>Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</b> <a href="http://www.nafems.org/events/nafems/2017/dach-fea1">www.nafems.org/events/nafems/2017/dach-fea1</a>	15. - 17. Mai	WI	1.490	1.100
<b>Simulation und Analyse von Composites</b> <a href="http://www.nafems.org/events/nafems/2017/comp-course1">www.nafems.org/events/nafems/2017/comp-course1</a>	22. - 23. Mai	WI	1.490	1.100

WI = Wiesbaden / FRA = Frankfurt <sup>1)</sup> in Euro zzgl. ges. MwSt. je Teilnehmer

Eine Beschreibung der Schulungsinhalte finden Sie auf Seiten 8 - 13. Weitere Schulungen und Kurse, die web-basiert (e-learning bzw. Webinare) oder ausserhalb der deutschsprachigen Region stattfinden, finden Sie unter [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events).

## e-Learning Kurse

E-Learning ermöglicht schnelle, höchst effektive und kostengünstige Trainings. Folgende Themen werden regelmäßig angeboten:

- **Practical Modelling of Joints and Connections**
- **Practical Computational Fluid Dynamics**
- **Fluid Dynamics Review for Computational Fluid Dynamics**
- **Basic Finite Element Analysis**
- **Basic Dynamic Finite Element Analysis**
- **Elements of Turbulence Modeling**
- **Computational Fluid Dynamics for Structural Designers and Analysts**
- **Fatigue & Fracture Mechanics in Finite Element Analysis**
- **Advanced Dynamic Finite Element Analysis**
- **Fluid Dynamics Review for Computational Fluid Dynamics**
- **Composite Finite Element Analysis**
- **Structural Optimization in Finite Element Analysis**
- **Practical Computational Fluid Dynamics**

Aktuelle Termine und weitere Infos unter [www.nafems.org/e-learning](http://www.nafems.org/e-learning)

## NAFEMS Seminar - Einladung und Vortragsprogramm

# Virtual and Real: Wie Simulation helfen kann, additive Fertigungsmaschinen leistungsfähiger und zuverlässiger zu machen

13. - 14. März 2017, Wiesbaden

Additive Manufacturing (AM), auch bekannt als 3D-Druck, ist ein Überbegriff in der Fertigungstechnologie, unter dem unterschiedliche schichtweise Verfahren zusammengefasst werden, bei denen Material (Metall, Kunststoff oder eine Kombination) miteinander verschmolzen oder gebunden wird, um das gewünschte Teil zu erzeugen. Die Additive Fertigung hat sich seit den späten 1980er Jahren langsam entwickelt, bis sie sich durch das Auslaufen von mehreren wichtigen Patenten in jüngster Vergangenheit deutlich schneller verbreitet hat und ihren Mehrwert in einer Vielzahl industrieller Anwendungen unter Beweis stellen konnte. Bemerkenswert ist dabei insbesondere, dass der Anwendungsbereich der AM nun über Rapid Prototyping hinaus in die industrielle Fertigung expandiert, insbesondere dort, wo kleine Stückzahlen (bis hin zur individuellen Einzelfertigung) oder extremer Leichtbau gefragt sind.

Aktuell vergeht kaum ein Tag, ohne das ein Artikel in der einschlägigen Fachliteratur erscheint, in dem über eine neuartige Nutzung der Additiven Fertigung berichtet wird... ob es sich dabei um eine gedruckte Armprothese handelt, um die Herstellung einer Brücke vor Ort, oder den Druck eines ganzen Autos. Allerdings bestehen noch erhebliche Herausforderungen hinsichtlich der Geschwindigkeit, Zuverlässigkeit und Vorhersagbarkeit von AM-Prozessen, die eine breitere Akzeptanz bzw. eine Zertifizierung und damit eine noch häufigere Anwendung in der Industrie behindern.

Die zentrale Frage, für die wir im Dialog zwischen CAE-Experten, Maschinenherstellern sowie Forschern und Wissenschaftlern im Rahmen dieses NAFEMS Seminars erörtern

### Vortragsprogramm

#### 13. März

- 13:30 Begrüßung und technische Einführung**  
F. Jurecka (Dassault Systemes Deutschland);  
E. Niederauer (Siemens PLM); T. Morris (NAFEMS)
- 14:15 Herausforderungen in der Additiven Fertigung**  
G. Schöpf (Additive Fertigung Magazin)
- 14:45 Keynote-Vortrag: Changing Design Approaches – Bionic Design with Additive Manufacturing**  
M. Lippert (Laser Zentrum Nord)
- 15:30 Kaffeepause**
- 16:15 Pulverbettbasierende additive Fertigungsprozesse und -simulation aus der Perspektive eines Maschinenherstellers**  
M. Steuer (EOS)
- 16:45 Die Rolle der Simulation bei Additive Metals Manufacturing aus der Perspektive von Renishaw**  
E. Klett (Renishaw)
- 17:15 Prozesssimulation und -optimierung für die Additive Fertigung**  
S. Ribeiro-Ayeh (Dassault Systemes Deutschland)
- 17:45 Get together in der Ausstellung**

#### 14. März

- 08:30 AM in der Luftfahrt von Simulation zur Zulassung**  
R. Zeillinger (Prime aerostructures)
- 09:00 Simulation in der Additiven Fertigung**  
T. Haushahn (Cadferm)
- 09:30 Optimierung der AM-Prozesskette durch skalierbare praxisorientierte Simulation**  
P. Mehmert (Simufact Engineering)
- 10:00 Untersuchung der thermomechanischen Eigenschaften von additiv gefertigtem IN718 mit Hilfe von Mikrostruktursimulationen**  
M. Baiker, J. Pagenkopf, D. Helm (Fraunhofer IWM)
- 10:30 Kaffeepause**
- 11:00 Workshop/Diskussion – Virtual and Real: Wie Simulation helfen kann, additive Fertigungsmaschinen leistungsfähiger und zuverlässiger zu machen**  
Moderation: F. Jurecka (Dassault Systemes Deutschland);  
E. Niederauer (Siemens PLM); G. Schöpf (Additive Fertigung)
- 12:30 Mittagspause**
- 13:30 Abfahrt der Busse zur Matsuura Machinery GmbH: Besichtigung der Hybrid Additive Manufacturing-Anlagen**  
Besichtigt und erläutert werden die Lumex-Avance im laufenden Betrieb sowie der Nebenaggregate mitsamt Zubehör sowie daran anknüpfend der Hybridprozess von Laserschmelzverfahren und Hochgeschwindigkeitszerspannung. Demowerkstücke werden erläutert und Fragen werden von Technikern beantwortet.

ca. 15:30Ankunft am Hotel / Ende der Veranstaltung

wollen, lautet daher: „Wie kann Simulation helfen, additive Fertigungsmaschinen leistungsfähiger und zuverlässiger zu machen?“

Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme.

[www.nafems.org/am17](http://www.nafems.org/am17)

In Kooperation mit x-technik Additive Fertigung

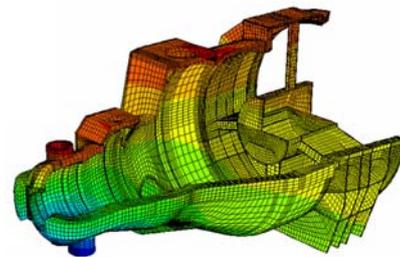


Event Sponsor



## NAFEMS Schulung

# Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation



15. - 17. Mai 2017 in Wiesbaden / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Die Schulung vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die notwendigen Grundlagen für den erfolgreichen und effizienten Einsatz der Finite-Elemente-Methode. Nach Auffrischung von strukturmechanischem Basiswissen, welches für das Verständnis und für die kompetente Auswertung von FE-Berechnungen unerlässlich ist, wird auf leicht verständliche Art erklärt, wie die FE-Programme arbeiten. Zahlreiche einfach gehaltene, anwendungsspezifische Beispiele aus der Industrie unterstützen die Diskussion um Voraussetzungen für adäquate Modellbildung und liefern wertvolle Tipps für die professionelle Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Ingenieure und Konstrukteure, welche ihre Kenntnisse in Technischer Mechanik bzw. Festigkeitslehre aus der Studienzeit im Hinblick auf die Anwendung bei FE-Simulationen auffrischen und ausbauen möchten, sind besonders angesprochen. Der Kurs wird in einer Workshop-Atmosphäre durchgeführt, wodurch eine aktive Mitwirkung gefördert wird.

### Inhalte

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

### Referent



*Prof. Dr.-Ing. Armin Huß verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Technischen Mechanik, Technischen Schwingungslehre und der Anwendung der Finiten Elemente Methode, davon über 20 Jahre Praxis-Erfahrung als freiberuflicher Ingenieur für die Anwendung der FEM in den unterschiedlichsten Bereichen der Technik. Seit Mitte 2009 ist er als Professor für Technische Mechanik, Schwingungslehre und Finite Elemente an der Frankfurt University of Applied Sciences tätig.*

### Kursprache

Deutsch

### Inhouse-Kurs

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

### Informationen und Anmeldung

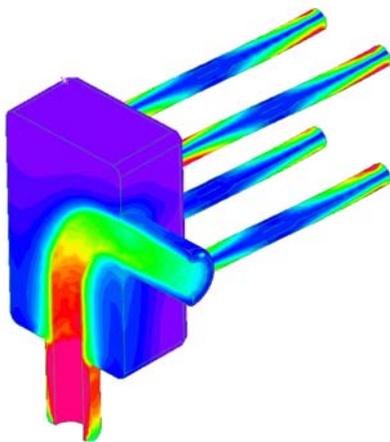
[www.nafems.org/events/nafeems/2017/dach-fea1](http://www.nafems.org/events/nafeems/2017/dach-fea1)

## NAFEMS Schulung

# Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

8. - 9. Mai 2017 in Wiesbaden / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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



### Inhalte

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

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

### Kurssprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

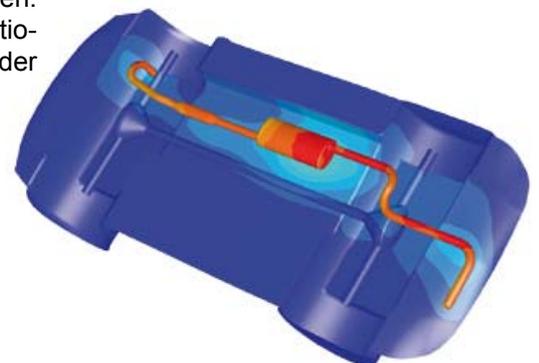
### Inhouse-Kurs

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

### Referent



*Prof. Dr.-Ing. Gangolf Kohnen hat über 25 Jahre Erfahrung mit CAE-Anwendungen mit Schwerpunkten auf dem Gebiet der Strömungsberechnung CFD in Lehre, Forschung und Industrie. Herr Kohnen leitet den Bereich Maschinenbau und Virtual Engineering an der Hochschule Baden-Württemberg Mosbach.*



### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/events/nafems/2017/cfd-course1](http://www.nafems.org/events/nafems/2017/cfd-course1)

## NAFEMS Schulung

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

22. - 23. März 2017 in Frankfurt / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

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

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

### The Course

#### Participants of this master class will:

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

### Who Should Attend?

#### This master class course is designed for:

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

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

### Program

#### Introduction

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

#### Validation, Qualification & Certification of Industrial Products

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

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

**V&V and Simulation Management**

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

**Realistic Simulation**

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

**V&V Fundamentals and Standards**

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

**Verification**

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

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

**Uncertainty Quantification**

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

**V&V Implementation Strategies**

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

**Course Language**

Englisch

**Tutors**



Jean-Francois Imbert

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



Philippe Pasquet

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

**Informationen und Anmeldung**

[www.nafems.org/events/nafems/2017/vandv1](http://www.nafems.org/events/nafems/2017/vandv1)

## NAFEMS Schulung

# Simulation und Analyse von Composites

22. - 23. Mai 2017 in Wiesbaden / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Faserverbundwerkstoffe haben sich inzwischen in verschiedensten Industriebereichen etabliert. Durch verschiedenste Faserarchitekturen und Harzsysteme sind Verbundwerkstoffe für unterschiedlichste Anwendungsfälle und Einsatzbereiche konfektionierbar. Der Konstrukteur und Berechnungsingenieur wird daher mit einer Vielfalt unterschiedlichster Werkstoffe konfrontiert, deren Festigkeitsanalyse vergleichsweise komplex ist. Ganz wesentlich für das Tragverhalten von Faserverbundwerkstoffen ist das Delaminations- und Schädigungsverhalten. Die Ablösung der Einzelschichten voneinander ist für gewöhnlich der entscheidende Versagensfall.

Das Ziel dieses Kurses ist die Einführung in die Schädigungsmechanik für Faserverbundwerkstoffe und die Modellierung der Delaminationen. Dem in der Praxis arbeitenden Ingenieur werden die Grundlagen der Schädigungsmechanik, die Möglichkeiten der Delaminationsanalyse und die typischen Verfahren zur Bestimmung relevanter Materialeigenschaften vermittelt.

### Training

Der Kurs vermittelt die Inhalte über die Schädigungsmechanik und Delaminationsmodellierung von Faserverbundwerkstoffen bei statischen Belastungen. Dazu werden die Grundlagen der Schichtentheorie, der Mischungstheorie und der Festigkeitstheorie für Faserverbunde dargestellt. Anhand von Beispielen

aus der industriellen Praxis wird die Schädigungsmechanik eingeführt und die typischen Modelle zur Delaminationsanalyse vorgestellt.

Neben den theoretischen Grundlagen werden Tipps und Hinweise für die Anwendung der Modellierungsansätze in der FE-Analyse vorgestellt.

In dem Kurs soll auch die Möglichkeit bestehen, Anwendungsfälle der Teilnehmer aus der industriellen Praxis zu berücksichtigen.

### Wer sollte teilnehmen

Berechnungsingenieure, Konstrukteure und Mitarbeiter, die als Simulationsingenieure arbeiten. Der Kurs vermittelt die wesentlichen Inhalte, um die Tragfähigkeit von Faserverbundstrukturen simulieren zu können.

### Inhalte

- Klassische Laminattheorie und Laminattheorien höherer Ordnung
- Mischungstheorien und Mikro-mechanik
- Festigkeitskriterien und Materialdegradationsmodelle
- Einführung in die Schädigungsmechanik
- Schädigungsmodelle für Verbundwerkstoffe
- Delaminationsmodellierungen

### Referent



*Dr.-Ing. Daniel Hartung (Premium Aero-tec GmbH) hat langjährige Erfahrung in der Anwendung und Entwicklung von Materialmodellen,*

*Analysemethoden und Finite Elemente Modellierungen für Faserverbundwerkstoffe. Während seiner Tätigkeit für das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat er sich intensiv in die Modellierung und Analyse der Faserverbundwerkstoffe eingearbeitet und neuartige Analysemethoden entwickelt. Zusätzlich hat sich Hr. Hartung während dieser Zeit umfassend mit der Prüfung und Kennwertermittlungen von Faserverbundwerkstoffen befasst. Zurzeit arbeitet Hr. Hartung in der Industrie und entwickelt unter anderem Berechnungsmodelle und Analysemethoden für Verbundwerkstoffe im Flugzeugbau. Aus der Leitung und Mitarbeit unterschiedlicher Industrie- und Forschungsprojekte kennt Herr Hartung die Herausforderungen bei der Anwendung verschiedenster Modelle sowie die wissenschaftlichen Herausforderungen bei der Modellentwicklung.*

### Kurssprache

Deutsch

### Inhouse-Kurs

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

### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/events/nafems/2017/comp-course1](http://www.nafems.org/events/nafems/2017/comp-course1)

## NAFEMS Schulung

# Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis

10. - 11. Mai 2017 in Wiesbaden / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

### The objectives of this Finite Element course are:

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

### Who Should Attend

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

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

### Technical Content

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

and non-linear FE analysis, Non-linear algorithms and procedures, Difficulties in modelling non-linear problems.

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

### Tutor



*Dr. Gino Duffett has over 30 years of experience in CAE software development, training, industrial implementation and usage on an interna-*

*tional level in various sectors, mostly automotive and renewable energy. Currently a Technology Project Manager focussing on innovative simulation driven design and automatic optimization.*

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

### Course Language

English

### Inhouse-Kurs

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

### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/events/nafems/2017/non-linear-1](http://www.nafems.org/events/nafems/2017/non-linear-1)





**E**ngineering analysis, modelling, simulation, and systems engineering are becoming ever more embedded in the product development process across all industries in every part of the world. The technology is no longer seen as niche – we are moving into the mainstream at a rapid pace.

As manufacturing techniques and product lifecycle management processes develop and grow, the use of Finite Element Analysis (FEA), Computational Fluid Dynamics (CFD), Multibody Simulation (MBS) and all of the associated technologies is increasing exponentially. As a result, your community is expanding and evolving with the technology into a truly cross-industry, multi-skilled, global society, with its own unique perspectives, problems, and solutions.

We stand at a crossroad. In order for the technology to progress further and for us, the users, to keep pace with this development, collaboration and sharing of experience and knowledge is vital.

**There is only one independent, international conference dedicated exclusively to everyone involved in engineering analysis, simulation, modelling, and systems engineering, and we want YOU to be a part of it.**

The 2017 NAFEMS World Congress will take place from the 11th to 14th of June in Stockholm, Sweden, and will focus entirely on engineering analysis, modelling and simulation and its impact on industry and beyond. NAFEMS is the only independent voice of the CAE community, representing over 1300 member organizations worldwide from OEM's to suppliers, leading academic institutions, international research and development bodies, and prominent software vendors.

The NAFEMS World Congress is the premier international forum for everyone involved in the industry. With dedicated tracks on all aspects of simulation, free masterclasses, workshops and short training courses, an outstanding social program and an excellent line-up of keynote and invited speakers, this is one event you cannot afford to miss.

## Two Conferences at One Location

The NAFEMS World Congress will also host the 3rd International Conference on Simulation Process and Data Management (SPDM). This industry-leading event will bring together industrial users, technology experts, academics and software vendors alike, allowing all those with an interest to take part in the only truly independent, international forum dedicated to SPDM. Attendees, speakers and exhibitors have free access to both events under one registration.

As well as the SPDM Conference, the NAFEMS World Congress will also host a dedicated symposium on Manufacturing Process Simulation & Additive Manufacturing, covering all virtual manufacturing tools within the product design and manufacturing cycle.

## Registration Now Open

Authors	NAFEMS Members	€990
	Non-Members	€1190
Standard Delegates	NAFEMS Members	€1090
	Non-Members	€1290

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



## Congress Themes

The Congress will cover a wide range of topics, addressing every aspect of engineering simulation in a full 3-day program.

### Structural Analysis

- Linear and Nonlinear Analysis
- Joints, Connections & Welding
- Contact
- Durability, Fatigue & Fracture
- Thermal Structural Analysis

### Computational Fluid Dynamics

- Turbulence
- Conjugate Heat Transfer
- Multiphase and Phase Change
- Acoustics
- Mesh Solutions & Mesh Adaption

### Dynamics & Testing

- Crash Simulation
- Seismic
- Linear Dynamics
- Non-linear Dynamics
- Combining Physical & Virtual Testing
- Impact
- Droptest

### Multi-body Simulation

- MBS, FE, and the Co-simulation of Both

### Analysis Management

- Quality Assurance
- Measures of Agreement
- Automation of Analysis
- Virtual Testing in a Regulatory Environment

### Business Issues

- The Business Case for Simulation
- The World Market for Simulation
- Strategies for Determining Investment in Simulation
- Return on investment (ROI)

### CAD CAE Integration

- CAE Interoperability
- Simulation Driven Design
- Meshing
- Integration of Analysis into the Design Process
- The Semantic Web
- CAD Representation of Manufacturing Features

### Materials

- Materials Characterisation
- Plastics
- Elastomers/Polymers
- Parameter Identification
- Material Data
- Nanomaterials

### Composites

- Layer Optimisation
- Draping
- Composite Manufacture and Assembly
- Simulating As-Built and In-Service Conditions
- Multi-scale, Multi-fidelity Modelling
- Damage and Failure Criteria

### Life Sciences

- Biomedical
- Biomechanics
- Medical Devices
- Medicine

### Geotechnical & Foundation Engineering

- Constitutive Models for Civil Engineering
- Input Parameters for Geotechnical Models
- Using FEA with Eurocode 7
- Soil-Structure Interaction

### Confidence in Results

- Verification & Validation
- Benchmarks & Test Cases
- Lessons Learnt from Round Robins
- High Confidence FEA and CFD
- Uncertainty Quantification

### Multiphysics

- Coupled Simulations
- Fluid-Structure Interaction
- Structure-acoustics
- Vibro-acoustics
- Thermo-mechanical
- Multi-physics, Multi-scale, Multi-fidelity
- Benchmarking and Validation of Multiphysics

### Electrical

- Electromechanical
- Electromagnetical
- Electrochemical
- EMV
- Electronics
- Electronics Cooling
- e-Mobility

### Systems Modelling & Simulation

- Systems Simulation
- Systems Engineering
- Requirements Management
- Model-Based Systems Engineering (MBSE)

### Emerging Issues

- Current Industrial Applications
- Future Industrial Needs
- Business Benefits of CAE

### Computing

- High Performance Computing
- Open Source Codes
- Cloud Computing
- Software as a Service (SaaS)
- Solver Technology
- Visualization
- Virtual Reality

### Optimisation

- Topology, Shape, Sizing
- Structural
- Fluid
- Multidisciplinary / Multiphysics / Multiobjective
- Algorithms
- Design/Process Integration

### Methods

- Discrete Element Method (DEM)
- Meshfree Methods (EFG, SPH, ...)
- New Methods
- Pre- and Postprocessing

### Stochastics

- Sensitivity Analysis
- Taguchi Methods
- Variational Studies
- Robust Design

### Education & Training

- Qualifying the Analysts
- Meshing
- Element Selection
- Methods Development
- Modelling Techniques
- Simulation Skills Management
- Results Interpretation
- Using FEA and CFD for Code Compliance

### Simulation Data Management (Conference)

Papers related to SPDM will automatically be considered for the SPDM Conference.

- SDM Requirements
- SDM Strategies
- Scope of SDM
- Experience of SDM Systems
- Simulation Process Management
- Data Standards

### Manufacturing Process Simulation (Symposium)

Relevant papers will automatically be considered for this symposium.

- Business benefits
- Obtaining material properties for process simulation
- Challenges and Benefits of simulating the AM process
- Industrial case studies
- Integrating process simulation into the design cycle
- Validating process simulation methods

#NAFEMS17



## Keynote & Invited Speakers

We are delighted to announce the lineup of Keynote and Invited speakers for the NAFEMS World Congress 2017. Representing industry and academia from around the globe, they speak from positions of great experience and knowledge, and are sure to provide an excellent insight into their work in the simulation and analysis field.

### Keynote Speakers

Steven A. Chisholm

**Boeing Commercial Airplanes**

*Smarter Testing Through Simulation for Efficient Design and Attainment of Regulatory Compliance*

Dirk Ruschmeier

**Porsche AG**

*Simulation Data Management – The Next Challenges*

Georg N. Duda

**Charité – Universitätsmedizin Berlin**

*Mechano Biology of Tissue Regeneration*

Berna Szabó

**Engineering Software Research & Development, Inc.**

*On the Formulation and Application of Design Rules*

David Ewins

**Imperial College London**

*On the Balance and Integration of Simulation and Test in Engineering Structural Dynamics*

### Invited Speakers

Peter Giddings

**National Composites Centre**

*Virtual Manufacturing – Taking Manufacturing Simulation to the Shop Floor*

Ulf Lindblad

**Tetra Pak**

*Fighting bugs with HPC*

Harald Hasselblad

**Volvo Car Group**

*Optimization Culture Arena – CAE-CAD integrated development at Volvo Cars*

Fred Huizinga

**ASML**

*Introducing PSE within ASML - Lessons Learned and the Way Forward*



# Stockholm

The first city to be named “European Green Capital” in 2010, Stockholm is much more than green and clean. It’s vibrant. It’s laidback. It’s beautiful and it’s got something for everyone. The city is known for producing innovative IT and media businesses, sleek designs, edgy fashion and world-class nightclubs. It offers a cosmopolitan atmosphere with a bustling café and restaurant culture and has one of the highest concentrations of museums and galleries in the world.

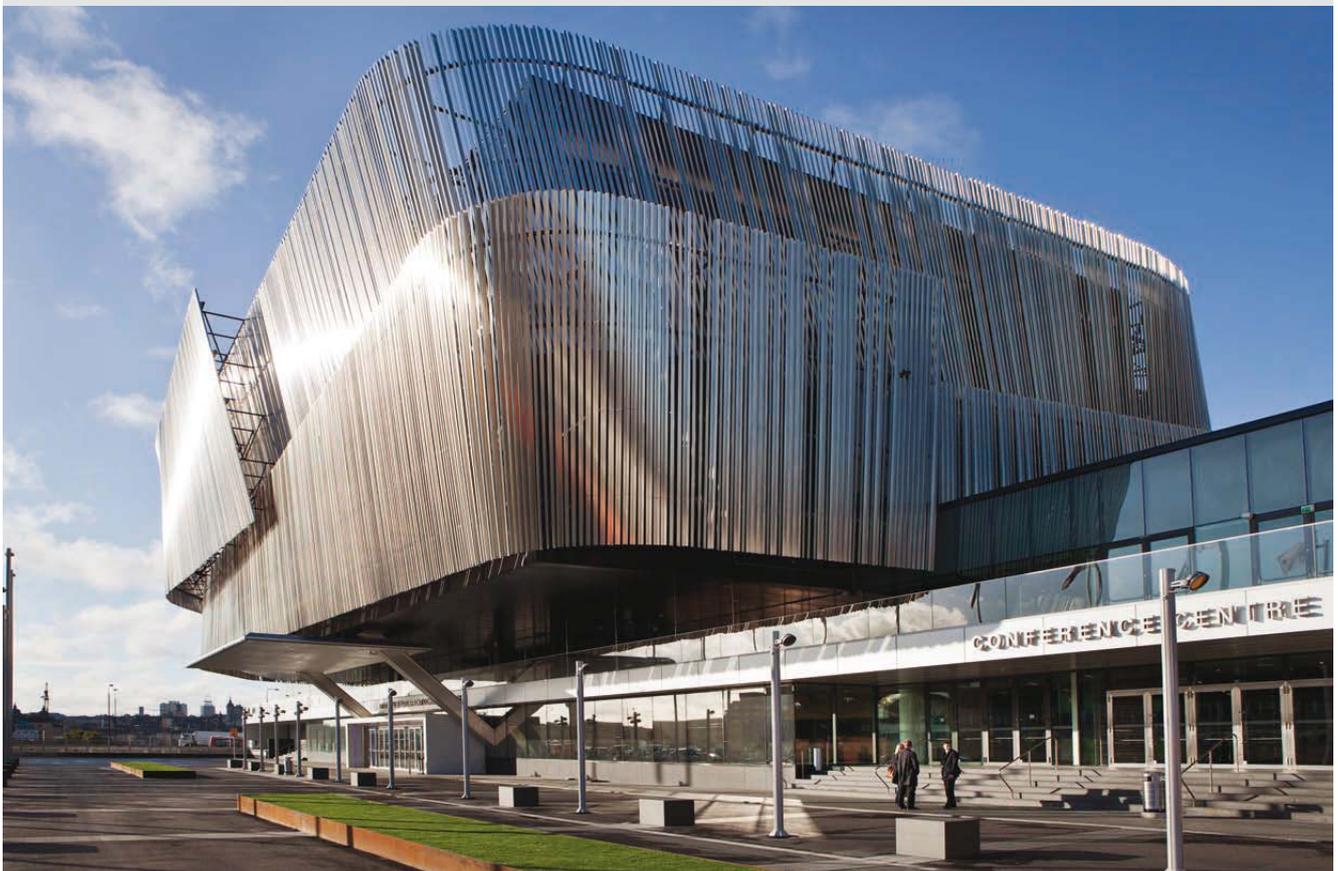
Beyond the buzzing metropolis of the city centre’s boutiques and restaurants, Stockholm is laid out in a system of 14 interconnected islands, earning the city the nickname “Venice of the North”. Yet, the city centre is small enough to allow you to take it in on foot. The waters of Stockholm offer a stunning backdrop to everything else the city has to offer.

One of the most characteristically Swedish traditions of all is Midsummer, when the sky never darkens. In 2017 it’s celebrated on June 24, just a few days after the NAFEMS World Congress.

## Venue

### Stockholm Waterfront Congress Centre

Stockholm Waterfront Congress Centre is Sweden’s newest and most versatile venue for large-scale meetings and events. Located in the heart of Stockholm, across the water from the City Hall, the modern architecture is a spectacular addition to the city skyline. Located between the Central Railway Station and the City Hall – host to the annual Noble prize dinner – providing easy access to some of the best shops, restaurants and sights in Stockholm. Directly connected to the congress centre is the Radisson Blu Waterfront Hotel, a 414 room international first class hotel. The railway station and the Arlanda Express train platform are easily accessible by escalator right next to the congress centre. [stockholmwaterfront.com](http://stockholmwaterfront.com)





Platinum Sponsor												
Gold Sponsors												
Silver Sponsors	<table border="0" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>											
SPDM Sponsors												
Media Sponsor												

## Sponsorship & Exhibition An Outstanding Opportunity

The NAFEMS World Congress presents a unique opportunity, as delegates are primarily high-level decision makers working in industry across the globe. The exhibition area will be a central point at the Congress, ensuring that there is a consistent level of “traffic” at all times – refreshments, announcements, events, and competitions will focus on this area, giving you the chance to meet as many of our delegates as possible.

### Align your organisation with NAFEMS

As the only international association dedicated to the engineering analysis, modelling, simulation, and systems engineering community, NAFEMS is widely held to be the leading independent source of information and training for engineering analysts and designers of all levels. Sponsors and exhibitors will have the chance to promote their attendance prior to the event, through the various packages outlined at [nafems.org/congress](http://nafems.org/congress). Being seen to be participating in the NAFEMS World Congress gives the analysis world a positive impression of your company’s commitment to best practice, standards and continued professional development.

### Benefits

So what are the benefits of sponsoring and exhibiting at the NAFEMS World Congress?

- Promote your company to a large but highly focused group of individuals who have a pre- qualified interest in your product
- Establish important contacts within the industry
- Keep an eye on the activities of your direct competition
- Increase your company’s visibility and standing in the analysis community
- Showcase your latest product releases and service offerings
- Discover exactly what your target market needs, and what trends are emerging across the industry

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



Internationales NAFEMS Magazin

## Benchmark Magazin, Ausgabe Januar 2017

Die internationale NAFEMS Zeitschrift „Benchmark“ erschien in der Druckauflage im Januar 2017. Download (nur für Mitglieder) und Informationen zum Abonnement finden Sie unter:

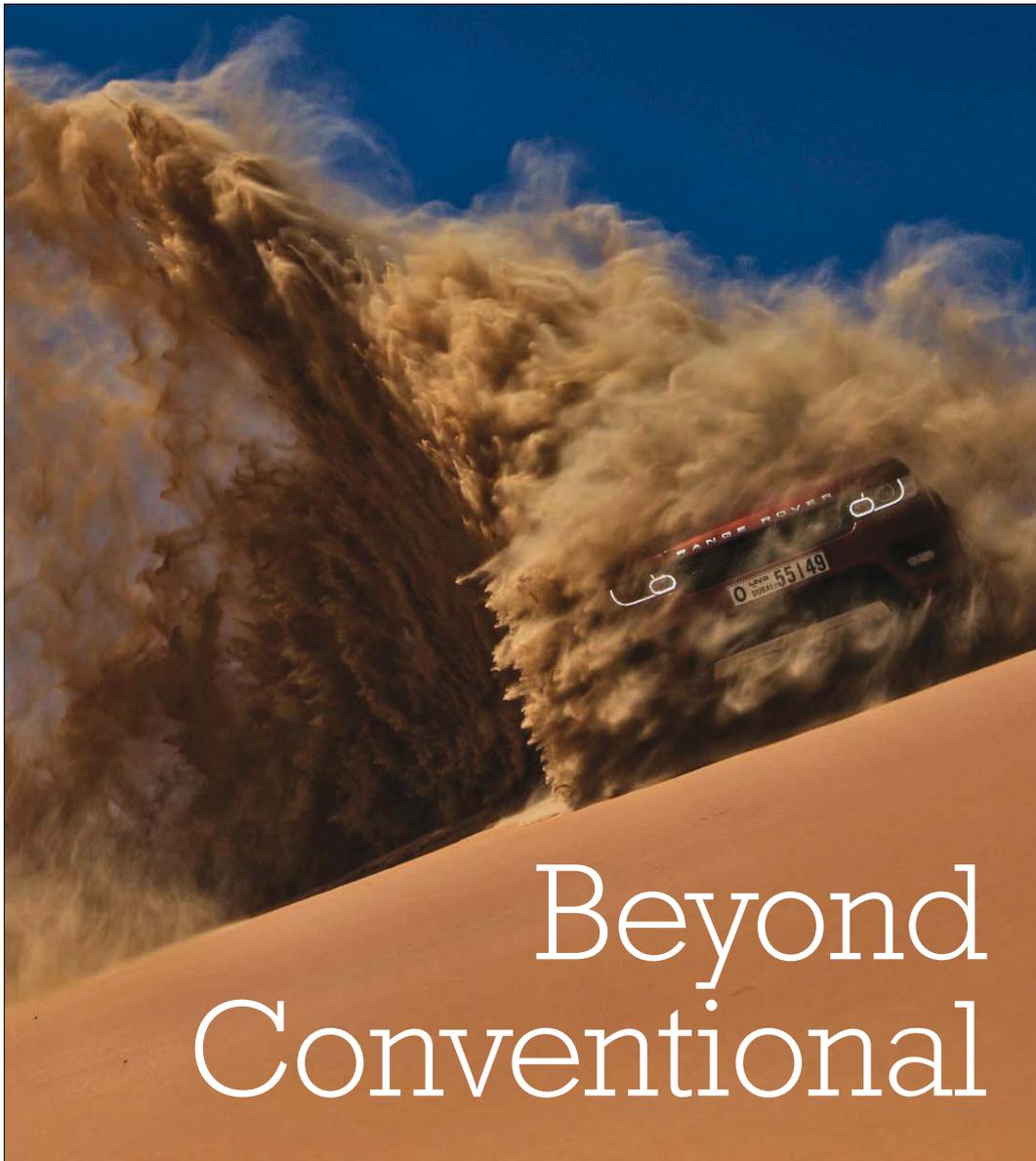
[www.nafems.org/publications/benchmark](http://www.nafems.org/publications/benchmark)

# BENCH MARK

**January 2017 issue . . .**

- Higher Order Methods
- Particle Methods
- Virtual Engineering to Ensure Excellent Customer Experiences for Life
- Introduction to LOTAR of Engineering Analysis and Simulation Data
- What is Equilibrium Finite Element Analysis
- Unfitted Finite Element Methods: a Modern Paradigm for Advanced Numerical Simulations
- NURBS-Enhanced Finite Element Method: Towards a Seamless CAD-FEA Integration
- and more...

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





## NAFEMS reference library at the click of a button



Subscribe to NAFEMS Corporate e-library and have instant access to over 140 of our acclaimed publications.

The NAFEMS Corporate e-library allows subscribed members to download copies of over 140 acclaimed NAFEMS publications; including the newest releases. Updated regularly, the e-library provides any of the available NAFEMS publications to be downloaded instantly as a PDF – ensuring that the information you need is available when you need it.

By subscribing, companies can create their own NAFEMS reference library - worth over \$19,500. More than 140 publications can be downloaded at any time, by any site covered by the subscription agreement. Conveniently accessed

via the NAFEMS website, there is no limit to how often publications can be downloaded, making subscription a solution for the entire team.

The easy to navigate system ensures it is virtually effortless to find the publication you require and once chosen, your publication is only a download away. There is no easier way for your company to benefit from the wealth of information that NAFEMS has published over the last 30 years.

### Find out about subscription today

Contact [elibrary@nafems.org](mailto:elibrary@nafems.org)  
or **+44(0) 1355 225 688**  
to discuss your requirements.

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

## New Publications

A number of new publications have recently been produced by NAFEMS (copies are included with this issue for member contacts).

### NAFEMS International Journal of Multiphysics CaseStudies – Volume 1

Produced by the NAFEMS Multiphysics Working Group (MPWG), we hope that this journal will serve as both an inspiration and a source of knowledge for practitioners of multiphysics simulations in the field. Volume 1 presents some typical examples of modern multiphysics simulations. The selection of papers does not focus on a specific area, and neither have we attempted to cover the whole field. Multiphysics simulation is a very wide and growing domain and we can therefore look forward to many more interesting contributions in years to come.

### How to Perform Optimisation Under Uncertainty

This short guide focuses on Design Optimisation Under Uncertainty (OUU) methods. The importance of adopting a systematic approach in the use of modern computational design tools for OUU is highlighted, alongside best practices in the application of these methods through three examples of increasing complexity.

### How to Model Fluid Flow Systems: Computational Fluid Dynamics versus Fluid System Simulation

This publication aims to help practising engineers decide what type of flow simulation tool to use, and when to use it. The advantages and disadvantages of 3D CFD methods are compared with 1D System Simulation methods. Each type of method has its strengths and weaknesses. Neither is 'better' nor 'worse' than the other, but one may be more appropriate for a given task than the other. In some cases, the judicious use of both tools may be recommended which can provide an approach which delivers the 'best of both worlds'. Guidance is provided on the selection of the right tool for the right job followed by an overview of System Simulation methods. Additional copies of these books can be purchased from the NAFEMS website, and they are also available through the NAFEMS eLibrary.

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

## NAFEMS Online Resource Centre

Since NAFEMS was established in 1983, a wealth of technical information has been produced by our working-groups, from seminars, conferences, publications and Benchmark. Until now, this content has been organised in various forms, both in print and online. Over the past year, we have been working hard to pull all of this information together in a more accessible format, in order to ensure NAFEMS members have access to everything the organisation has produced in the past twenty or so years. This work has culminated in the new online 'resource centre', which aims to be a central repository for all NAFEMS publications, articles, presentations and information. The resource centre will ensure that this information is easily accessible to members, providing a wealth of content to the community. The resource centre is currently undergoing beta testing, with the aim of launching in the first part of this year.

# invitation<sup>2</sup>TENDER



## How to Analyse and Process CFD Output

NAFEMS' Computational Fluid Dynamics Working Group (CFDWG), wishes to commission a new document with the suggested title 'How to Analyse and Process CFD Output' to equip analysts with the understanding and techniques necessary to obtain key project data and insight from CFD output.

The book should show how post-processing and flow visualisation are key in obtaining flow variables and derived quantities in a form that is useful for project requirements. The flow variables which are typically modelled in CFD and quantities frequently derived from the flow variables should be stated, with a description of their usefulness. The different uses, advantages and disadvantages of numerical values (both averaged and single point values), static and animated images should be explained. Issues with geometrically and physically complex 3D simulations, where there is a danger of missing important results if arbitrary post-processing locations or instances are used, should be commented on with tips on how best to achieve the required output.

**Costs** The total cost of authoring, maintaining and producing a publication collating challenges, solutions and points to note from the submissions received is not expected to exceed £4-6000 (GBP).

Comparison of results from different simulations and with test data, is an important aspect of post-processing. Although this document should not aim to cover validation issues, guidance would be appropriate on how to compare results produced using different modelling methods or test data with simulated data and the importance of a standard post-processing approach. Similarly, the role of post-processing to check the results are credible and correctly reflect the intended model set-up should be covered and comments should be made on the data storage requirements and implications for using an SDM (Simulation Data Management) system.

The book must be illustrated by examples, ideally taken from a wide range of industries. There must be no bias towards any particular CFD or visualisation software and both solver integrated and third party post-processors should be mentioned.

**The expected length of the book would be up to 100 pages.**

**Submission** Interested potential author can submit tenders or request additional information using the following email address: [cfid@nafems.org](mailto:cfid@nafems.org)

**Deadline** Interested parties are encouraged to submit proposals by March 1st 2017.

## How To Model Crack Propagation using Finite Elements

The NAFEMS Education and Training Working Group (ETWG) wishes to commission a new document with the suggested title "How To Model Crack propagation Using Finite Elements". This book should be aimed at a graduate-level industrial user who is familiar with basic linear FE analysis, but is inexperienced in advanced FE simulations. The book should assume little or no knowledge of fracture mechanics theory or FE modelling of cracks. The following topics are expected to be included:

- Fracture mechanics: Theoretical background  
*basic introduction to LEFM, stress intensity factors, J-Integral, etc.*
- Crack propagation theory  
*Crack initiation, criteria for direction of crack growth, fatigue crack growth, etc.*
- Modelling crack propagation using FEA  
*crack-tip elements, XFEM and other methods*
- Benchmarks on FE simulation of crack propagation.  
*Benchmarks may include 2D and 3D crack growth, automatic re-meshing for modelling crack growth, plasticity around crack tip, multiple cracks, etc*

**Costs** The total cost of authoring, maintaining and producing a publication collating challenges, solutions and points to note from the submissions received will be proportional to the proposed content and is not expected to exceed £7000 (GBP).

**Submission** Interested potential authors should view full submission details at [nafems.org/publications/tender](http://nafems.org/publications/tender), or request additional information using the following email address: [etwg@nafems.org](mailto:etwg@nafems.org)

**Deadline** Interested parties are encouraged to submit proposals by April 1st 2017.

## NAFEMS CFD Benchmarks

NAFEMS' **Computational Fluid Dynamics Working Group (CFDWG)**, wishes to commission several new documents of CFD Benchmarks. The NAFEMS benchmarks form a resource for NAFEMS members and the wider engineering and simulation community. This set of published, neutral and independently defined cases is considered a valuable resource and where applicable is still widely used by simulation code vendors as part of their verification and validation activities. However, these benchmarks are primarily for structural analysis problems, often for which closed-form solutions are available; so while the existing NAFEMS benchmarks were highlighted as being valuable they are limited in scope and there was enthusiasm for further benchmarks tackling a wider range of problem types with more advanced physics.

The document will provide a set of benchmarks, presented in a standard format, consistent with other NAFEMS publications. Each benchmark will provide a full description of the case, such that it can be recreated by a simulation engineer using software of their choice, and good quality data, relevant to the purpose of the case, with which the

results of a simulation can be compared. The data can come from either a closed-form solution or high quality physical measurements.

The benchmarks do not provide guidance on the simulation process to apply to any particular case although comments may be included. This is a deliberate decision due to the increasing variety of simulation techniques available and the growing computational capability which could render guidance given as obsolete or even misguided in a relatively short period of time. It is expected that where commercial software is applicable to a NAFEMS benchmark, the software vendor will then produce guidance on how best to tackle the case with their software, possibly also the results calculated by the software, for validation purposes. Benchmarking can be educational, in that a benchmark can be used as the basis for a demonstration or tutorial on how a specific case should be defined or run.

The benchmarks should be for the benefit of engineers and scientists in industry, whether users or developers of simulation tools.

**Costs** The total cost of authoring a publication consisting of a set of benchmarks and addressing reviewer feedback, will be proportional to the number of cases proposed in the volume and is not expected to exceed £5000{GBP} for a volume of 10 cases.

**Submission** Interested potential authors should view full submission details at [nafems.org/publications/tender](http://nafems.org/publications/tender), or request additional information using the following email address: [cfdf@nafems.org](mailto:cfdf@nafems.org)

**Deadline** There is no fixed deadline for submissions as there is an ongoing drive for material and several volumes by different authors or teams of authors can be in progress concurrently.



for full details visit [nafems.org/publications/tender](http://nafems.org/publications/tender)



# PSE

Professional Simulation Engineer



## A New Standard for Simulation Engineers

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



## Membership to suit you

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

### Site membership

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

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

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

### Corporate membership

*Tailored membership for large companies with multiple locations*

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

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

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

### Small company membership

*Cost-effective membership for small to medium sized enterprises*

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

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

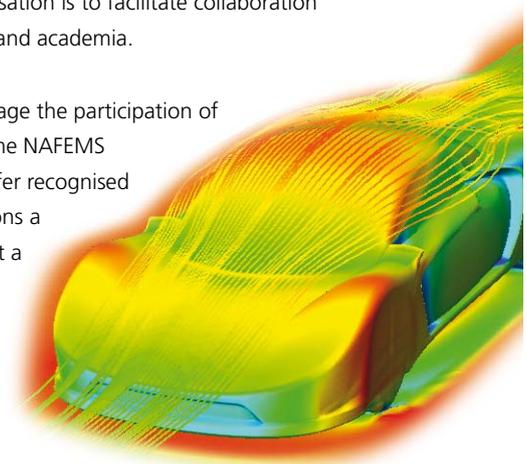
### Academic membership

*Offering the benefits of site membership to recognised academic institutions*

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

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

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



## ANSYS

**ANSYS 18 – Die nächste Generation der Ansys Simulationsplattform erweitert die Grenzen in der Produktentwicklung**

Ansys verändert mit der neuen Version Ansys 18 die Produktentwicklung. „Sowohl weniger als auch sehr erfahrene Ingenieure können mit Ansys 18 unsere technische Simulationssoftware nun über den gesamten Produktlebenszyklus anwenden. Die nächste Generation der branchenführenden technischen Simulationssoftware von Ansys basiert auf jahrzehntelanger Spitzentechnologie für die umfassendsten und genauesten digitalen Prototypen in allen wesentlichen Bereichen der Physik, Elektronik und Embedded Software“, unterstreicht Thomas Zanzinger, Geschäftsführer von Ansys Germany. „Diese funktionsreiche Version erweitert die Grenzen der Simulation im Vorfeld des Entwicklungsprozesses durch digitale Forschung und im Anschluss durch den Einsatz von Digital Twins sowie die Ausdehnung der Simulation auf Betrieb und Wartung der Produkte.“ Simulation wird über den gesamten Produktlebenszyklus angewendet und gibt Ingenieuren die Möglichkeit, zusätzliche Optionen abzubilden – ein Trend, den Ansys ‚Pervasive Engineering Simulation‘ nennt. Die vereinfachte Benutzerfreundlichkeit der Ansys Simulation erlaubt mehr Nutzern, bereits frühzeitig im Designprozess Vorteile aus der Simulation zu ziehen. Die höhere Skalierbarkeit ermöglicht Anwendern eine fast unendliche Auswahl bei der Bewertung des optimalen Produktdesigns. Ansys 18 integriert außerdem eine Internet of Things-Plattform zur Simulation von digitalen Zwillingen im Betrieb.

Durch das Erzeugen von Digital Twins erweitern führende Organisationen ihre Simulationsanwendungen. Die virtuelle Darstellung von einzelnen Betriebsanlagen ermöglicht deren Leistungs- und Produktivitätssteigerung. Sensoren an den Maschinen übermitteln spezielle Betriebsdaten — Temperatur, Vibration, Aufprall, Last — an den digitalen Zwilling. Durch das konti-

nuierliche Feedback können Ingenieure den Betrieb einer Maschine oder eines Systems optimieren und widrige Umstände, lange bevor sie auftreten, vorhersagen. Dies spart Milliarden Euro bei der Optimierung von Produktion und Wartung ein. Wird Ansys 18 in Kombination mit Partneranwendungen wie GE Predix oder PTC ThingWorkx eingesetzt, können Anwender digitale Zwillinge erzeugen und vorausschauende Analysen erstellen, um Leistung und Betrieb ihrer Produkte in der Praxis zu optimieren.

Die Industrie befindet sich in Bezug auf Produktion und Produktentwicklung heute in einem wesentlichen Umbruch. Trends wie das Internet der Dinge, additive Fertigung und lernende Maschinen verschmelzen die physikalischen und digitalen Welten miteinander und geben ein beispielloses Tempo bei Produktinnovationen vor. Die Chancen sind für den gewaltig, der die unglaublichen Komplexitätsstufen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg beherrscht.

Frühe Designentscheidungen beeinflussen die Produktkosten in hohem Maße. Nutzer können durch das Potenzial der digitalen Forschung von Ansys 18 hunderte von „Was-wäre-wenn-Konzepte“ bereits in der frühen Designphase testen und die Produktperformance auf Stärken, Leistung, thermische und elektrische Eigenschaften, Druck, Durchflussrate sowie diverse weitere Anforderungen hin prüfen. Dank der digitalen Forschung können Designer und Produktingenieure optimale Kombinationen bestimmen und gleichzeitig andere ausschließen, um so Zeit und Geld zu sparen.

„Neue Technologien und sich verändernde Kundenerwartungen treiben einen grundlegenden Umbruch bei der Herstellung und Vermarktung von Produkten voran. Die Simulation spielt dabei eine entscheidende Rolle, weil sie Ingenieuren die benötigten Mittel zur Verfügung stellt, Produkte während des gesamten Lebenszyklus zu optimieren und umzugestalten“, fasst Thomas Zanzinger zusammen. „Mit Ansys 18 können Anwender im Vorfeld des Entwicklungsprozesses eine füh-

rende Simulationslösung einsetzen, um Änderungen im Design und des nachfolgenden Produktlebenszyklus schnell zu bewerten sowie Betriebsdaten in Echtzeit zu analysieren. Firmen erhalten wegweisende Daten, um die Innovation, Effizienz der Betriebsabläufe und Produktqualität zu fördern und gleichzeitig Kosten sowie die Zeit bis zur Markteinführung zu reduzieren.“

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

## ARAS

**Schaeffler Gruppe setzt auf Aras als Plattform für Engineering Cockpit mit 20.000 Usern**

Aras, führender Anbieter von Enterprise Product Lifecycle Management (PLM) Software, gibt heute bekannt, dass die Schaeffler Gruppe Aras Innovator für sein Engineering Cockpit einsetzen wird. Das Engineering Cockpit bietet bis zu 20.000 Anwendern rollenbasiert Zugriff auf Informationen aus den verschiedenen Disziplinen, Schnittstellen, Systemen und Autorenwerkzeugen, um bessere Entscheidungen zu treffen. Die Zusammenarbeit mit dem global tätigen Automobil- und Industriezulieferer ist das erste Ergebnis der Partnerschaft von Aras und IBM Watson IoT, die im Dezember letzten Jahres angekündigt wurde.

Die digitale Transformation des gesamten Unternehmens ist eines der Fokusthemen bei Schaeffler. Dabei ist das Engineering Cockpit ein zentrales Werkzeug, um alle Disziplinen und Systeme bestmöglich zu vernetzen. Das Cockpit ist eine webbasierte Anwendung, die direkten Zugang auf Entwicklungsdaten bietet, auch wenn sie auf mehrere Entwicklungszentren verteilt sind. Es unterstützt in der ersten Phase das unternehmensweite Konfigurations- und Änderungsmanagement. Das Unternehmen war auf der Suche nach einer flexiblen, erweiterbaren und redundanzfreien Projektdokumentation sowie nach umfassendem Support für Aufgaben entlang des gesamten Produktlebenszyklus.

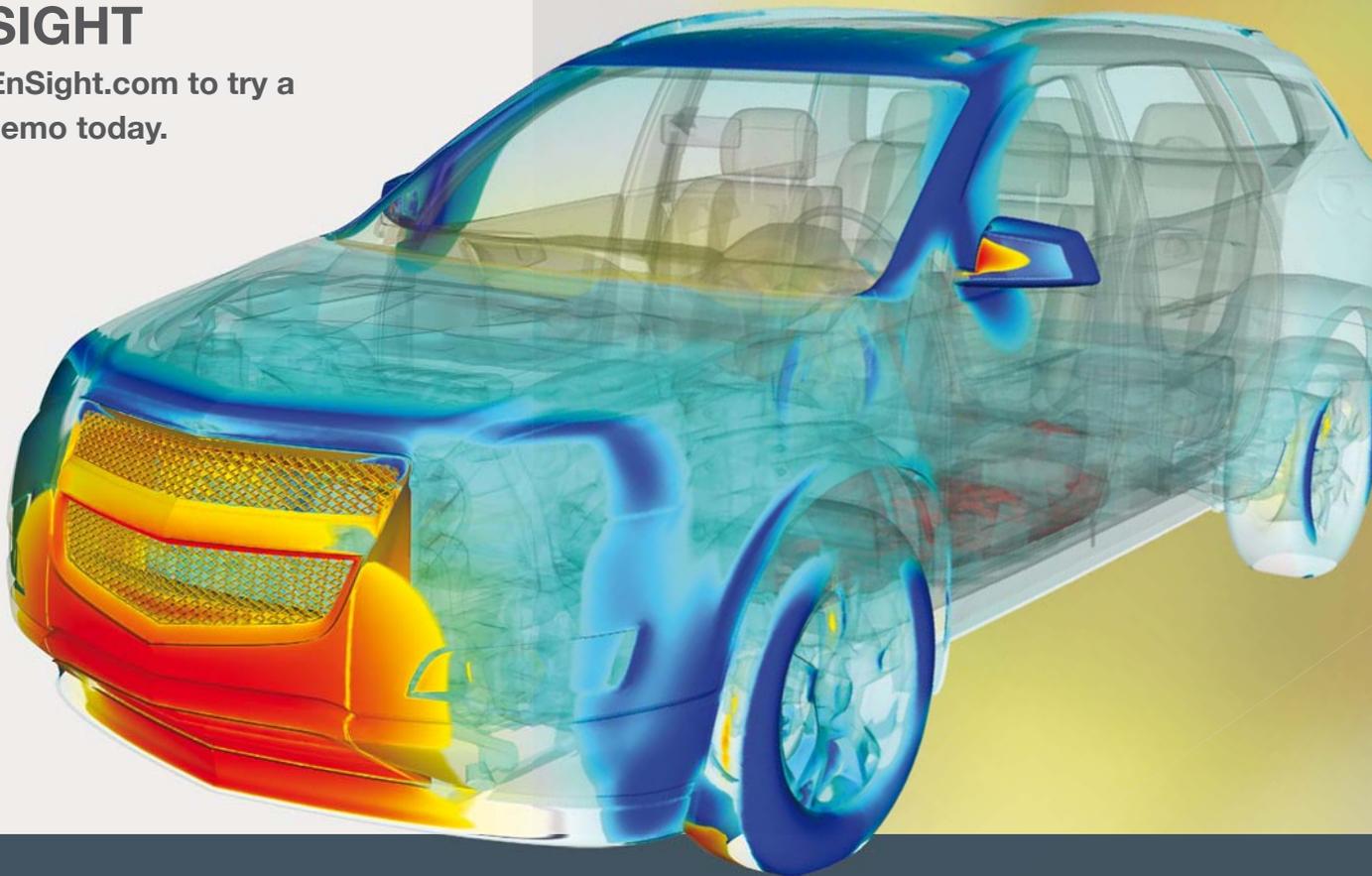
Schaeffler zielt mit Aras Innovator vor allem auf folgende konkrete

# Experience the Most Powerful Post-Processor

Use EnSight to analyze, visualize and communicate CFD, FEA and MBD simulation data across the most comprehensive list of CAE data formats in the industry. Process huge data sets, automate activities and share high-quality images and videos of your results, all from one software suite. With EnSight, understanding and communicating your results has never been easier.

## ENSIGHT

Visit [EnSight.com](http://EnSight.com) to try a free demo today.



### EnSight USA Contact

2166 N. Salem Street  
Suite 101  
Apex, NC 27523  
USA

919-363-0883  
[marketing@ensight.com](mailto:marketing@ensight.com)

### EnSight Europe Contact

Lichtenbergstr. 8  
85748 Garching b. Munich  
Germany

+49 89 5484-2193  
[Arnold.Holler@ensight.com](mailto:Arnold.Holler@ensight.com)

Verbesserungen ab:

- Innerhalb von sechs Monaten soll ein unternehmensweites, disziplinübergreifendes Konfigurations- und Änderungsmanagement für den Engineering Change Process bereitstehen
  - Für die Produktentwicklung soll über das gesamte Unternehmen und alle Disziplinen hinweg Kontrolle über Konfigurationen und Datenintegrität gewährleistet werden
  - Effizientere Verwaltung von Service-Anfragen
  - Disziplinübergreifende Kommunikation, da sich die Produktdaten und Engineering-Prozesse über die gesamte Zuliefererkette erstrecken
  - Übergreifende Projektkoordination
  - Unterstützung bei Verwaltungsberichten und –Entscheidungen
  - Einbindung von Enterprise Systemen (u.a. SAP und PTC Windchill)
- Aras bietet mit seiner PLM-Plattform die benötigte Flexibilität, um die unterschiedlichen Systeme der einzelnen Disziplinen des Produktentstehungsprozesses zu verbinden und somit die Voraussetzung für den Digital Thread sowie eine einheitliche Datenbasis für die Integration der IoT-Plattform zu schaffen. Die Lösung von Aras liefert zudem eine tiefere Integration von System Engineering und den eingebundenen Software-Entwicklungstools (ALM/MBSE) innerhalb der Produktkonfigurationssteuerung des Engineering Cockpits. Darüber hinaus werden mit Aras Analysen von und mit der digitalen Plattform möglich. Dabei stehen zunächst Metriken auf Systementwicklungsebene im Fokus. „Mit Aras dringen wir in eine neue Dimension der Integration unserer Daten vor. Wir sind dabei, unsere bestehenden Prozesse und Abläufe digital zu optimieren, um neue serviceorientierte Prozesse zu schaffen. Der nächste logische Schritt ist nun eine stärkere Verbindung unserer bestehenden Systeme und der damit einhergehende Datenaustausch in allen Unternehmensbereichen“, sagt Dirk Spindler, Senior Vice President R&D von Schaeffler.
- „Unsere Plattform integriert die bestehenden Systeme und ermöglicht Schaeffler so, seine Investitionen zu sichern. Gemeinsam schaffen wir

durch die Integration den Durchgriff auf alle Disziplinen und Prozesse des Business of Engineering als auch ein unternehmensweites Konfigurations- und Änderungsmanagement“, sagt Andreas Mueller, Vice President Operations von Aras. „Aras freut sich darauf, dass wir gemeinsam mit IBM einen der größten Automobilzulieferer bei seiner digitalen Agenda unterstützen dürfen.“

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

## BETA CAE SYSTEMS

### Neues Releases verfügbar

BETA CAE Systems veröffentlichte die neuen Versionen BETA suite v17.0.4. und ANSA/ Epsilon / µETA v17.0.3 suite.

### BETA CAE Systems kauft TOP CAE Corp.

BETA CAE Systems gab die Akquirierung der japanischen Firma TOP CAE Corporation bekannt.

[www.beta-cae.com](http://www.beta-cae.com)

## CADFEM

### ANSYS 18 – Die nächste Generation der Ansys Simulationsplattform erweitert die Grenzen in der Produktentwicklung

- Info siehe „ANSYS“ -

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

## COMSOL

### LiveLink for SolidWorks ermöglicht Comsol Anwendern Simulations-Apps mit CAD Einbindung zu erstellen

Die Comsol Multiphysics GmbH hat eine Aktualisierung seiner LiveLink for SolidWorks Softwarelösung veröffentlicht. Als Zusatzmodul zur Comsol Multiphysics Software ermöglicht LiveLink for SolidWorks die Synchronisierung eines CAD-Modells zwischen den beiden Softwarepaketen.

Die neueste Version von LiveLink for SolidWorks ermöglicht einen einfachen und mit der SolidWorks

Software synchronen Zugriff, mit dem Simulations-Apps gestartet und ausgeführt werden können. Simulationsexperten und Berechnungsingenieure können nun mit dem Application Builder Apps erstellen, die andere Anwender, wie z. B. Konstrukteure, in die Lage versetzen, eine in SolidWorks erstellte Geometrie in der zugeschnittenen Umgebung der App zu analysieren und zu modifizieren. Die Anwender können Apps innerhalb der SolidWorks Umgebung durchsuchen und diese ausführen. Dies umfasst auch Apps, die eine mit SolidWorks synchronisierte Geometrie verwenden. Neue App: „Bike Frame Analyzer“ Mit dem LiveLink for SolidWorks Update wurde, um die neuen Möglichkeiten zu demonstrieren, die Anwendungsbibliothek um die neue App „Bike Frame Analyzer“ ergänzt. Die neue App nutzt LiveLink for SolidWorks, um die Geometrie interaktiv zu aktualisieren, während die Verformung und die Spannungsverteilung im Rahmen berechnet werden. Mit der App können sehr einfach verschiedene Konfigurationen eines Fahrradrahmens getestet und dabei zahlreiche unterschiedliche Parameter, wie z. B. Abmessungen, verwendete Werkstoffe sowie unterschiedlichste Lasten und Randbedingungen, untersucht werden. Um die neueste Version der Softwarepakete Comsol Multiphysics und Comsol Server herunterzuladen oder Ihre bestehende Installation zu aktualisieren besuchen Sie [www.comsol.com/product-update](http://www.comsol.com/product-update).

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

## DASSAULT SYSTÈMES

### Dassault Systèmes kauft Next Limit Dynamics

Mit der Akquise von Next Limit Dynamics erweitert Dassault Systèmes seine Industry Solution Experiences für Multiphysics Simulation auf der 3DEXperience Plattform. Die Technologie XFlow CFD basiert auf der Lattice Boltzmann Methode (LBM) und wird zur Simulation von hochdynamischen Strömungen genutzt. XFlow ermöglicht die Berechnung



komplexer Strömungseigenschaften bzw. Strömungsverhalten, z.B. Interaktionen zwischen Flüssigkeiten und Gasen oder auch festen Strukturen. Weitere Bereiche sind die Untersuchung von Wärme- und Massenübergang, beweglichen Körpern, Mehrphasensystemen, Akustik und Fluid-Struktur-Kopplung. XFlow erlaubt die schnelle Berechnung komplexer Strömungsfelder ohne dass ein Vernetzungsprozess nötig ist.

XFlow wird u.a. eingesetzt um Fahrzeugemissionen zu mindern, Lärmemissionen von Flugzeugen zu verringern und die Effizienz von Windturbinen zur Stromerzeugung zu erhöhen. Kunden dieser Technologie sind unter anderem Airbus, AISIN AW, Caterpillar, Doosan, Ford, Google X, Honda, Mitsubishi, NASA, Safran Helicopter Engines und Toyota.

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

## DYNARDO

### OptiSLang 6.0.0 veröffentlicht

Dynardo veröffentlichte die neue Version 6.0.0 der Optimierungssoftware OptiSLang.

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

## ESI-GROUP

### ESI veröffentlicht PAM-Stamp 2017 und liefert umfassende Effizienzverbesserungen

Die ESI Group gab die Veröffentlichung von ESI PAM-Stamp bekannt, ESIs Simulationslösung für die Blechumformung. Als End-to-End-Lösung deckt ESI PAM-Stamp Kalt-, Halbwarm- und Warmumformungsprozesse sowie die meisten speziellen Prozesse für alle metallischen Materialien ab. ESI PAM-Stamp bietet für alle Industriebereiche eine komplette Lösung, um Fertigungsprozesse für Folge-, Folgeverbund- und Transferwerkzeuge sowie Werkzeugsätze für Presslinien und die Wirkflächenkonstruktion digital abzubilden. Von ersten Machbarkeitsstudien der Formteilgestaltung bis zur finalen Validierung des gesamten Umformprozesses liefert PAM-Stamp unter Anwendung von ESIs Triple Speed-Technologie schnelle und zuverlässige Ergebnisse hinsichtlich Ausdünnung, Riss- und Faltenbildung, Schnittlinienoptimierung, Rückfederung und Rückfederungskompensation, ESI PAM-Stamp ermöglicht so den Spezialisten für die Wirkflächenkonstruktion und Blechumformungsprozesse, Bauteile auf Anhieb effizient und fehlerfrei zu gestalten und zu fertigen.

### ESI Inendi gewährleistet Cyber-Sicherheit industrieller Netzwerke, Integration von IoT sowie Technologien für maschinelles Lernen

Die ESI Group wurde von der „Alliance de la Confiance Numérique“ mit dem „Label France Cybersecurity“ in der Kategorie „Industrial Networks Security“ ausgezeichnet. Der Preis wurde auf dem Internationalen Forum für Cybersicherheit, FIC 2017 (International Forum on Cybersecurity), überreicht. Eine wichtige Veranstaltung zur Cybersicherheit, die vom 24.-25. Januar in Lille, Frankreich stattfand. Die Auszeichnung hebt ESIs Kompetenz bei der Gewährleistung von Cybersicherheit in industriellen Netzwerken hervor, eine wachsende Sorge für die Fabriken der Zukunft.

### ESI veröffentlicht IC.IDO 11 und stellt Virtual Reality in den Mittelpunkt der Produktionstechnik

Die ESI Group gab die Veröffentlichung der neuen Version von IC.IDO bekannt, ihrer für den industriellen Einsatz entwickelten Virtual Reality (VR)-Lösung. ESI IC.IDO 11 bietet eine profunde Leistungssteigerung sowie neue Funktionalitäten für die effiziente, prozessinterne technische Bewertung, die Validierung von Montagewerkzeugen sowie die Überprüfung von Zugänglichkeit und Bedienbarkeit. Vollständig kompatibel mit Head Mounted Displays (HMD), profitieren Fertigungsunternehmen mit IC.IDO 11 in jeder Phase des

Entwicklungsprozesses von der VR-Integration. Anwender können mit natürlichen Hand- und Armbewegungen in einer realistischen Art und Weise mit ihren Entwicklungen interagieren, während sie Konstruktionsänderungen an bestehenden VR-Szenarien durchführen.

ESI IC.IDO 11 fokussiert sich auf die Unterstützung der Entwicklung und Validierung effizienter Fertigungs- und Montageprozesse in allen Industrien. Ingenieure aus den Bereichen Prozessfreigabe, Fertigungsplanung und Ergonomie sowie dem Management von Montagewerkzeugen werden von IC.IDOs neuen Entwicklungen zur Beschleunigung des Prozessdesigns und der Montageplanung profitieren. Derart können Engpässe vermieden und die Produktivität optimiert werden. Durch die Möglichkeit, gemeinsam mit Kollegen – ob vor Ort oder an weit entfernten Standorten – Überprüfungen der Prozessauslegung durchzuführen, ist IC.IDO ein wichtiges Instrument, um interaktive Prozess-Reviews zu fördern und Konstruktionsfehler oder ergonomische Mängel früh im Prozess zu eliminieren, noch bevor ein physischer Prototyp gebaut wird.

Laut Philippe James, Vizepräsident Continuous Improvement and Risks bei Safran Nacelles, „verändert IC.IDO nachhaltig die Arbeitsweise der Ingenieure bei Safran Nacelles: Virtual Reality reduziert zum einen die Notwendigkeit physischer Prototypen und kostspieliger Werkzeugänderungen. Gleichzeitig werden Live-Besprechungen der Teams gefördert, sodass sie schneller zu optimalen Lösungen gelangen, als wenn sie isoliert voneinander arbeiten würden.“

IC.IDO 11 ist die erste Softwareversion, bei der zusätzlich zu den VR CAVEs, Powerwalls und Desktopsystemen auch Head Mounted Displays (HMD) eingesetzt werden können. Die Möglichkeit HMDs – wie das bekannte HTC Vive – zu nutzen, versetzt Ingenieure in die Lage, sich mittels immersiver VR noch intensiver mit der Untersuchung ihrer Konstruktionen zu befassen. Natürliche Hand- und Armbewegungen verstärken das realistische Erlebnis.

Gleichzeitig profitieren Nutzer von Interaktionen mit dem Produkt in Echtzeit und in seiner tatsächlichen Größe. Außerdem können Ingenieure VR schon früher und öfter im Entwicklungsprozess nutzen, da sie nicht länger von der Verfügbarkeit zentraler Ressourcen (VR CAVE oder VR-Experte) eingeschränkt werden. Ihre HMDs bieten nun zu jeder Zeit direkten Zugriff auf ein benutzerfreundliches Desktop-VR-System.

Mit IC.IDO 11 können Ingenieure auf natürliche Art und Weise – ohne spezielle Body Tracking-Anzüge oder -Ärmel zu tragen – virtuelle Untersuchungen und Bewertungen der Produkt-/Prozessintegration durchführen, die Zugänglichkeit validieren und verifizieren, ob die Produktentwicklung auch im praktischen Einsatz betriebsfähig ist. Innerhalb der VR-Umgebung in IC.IDO können sie mit simulierten Objekten interagieren, genauso wie es Montage- und Servicetechniker in der laufenden Produktion machen würden. Der spezielle Charme dieser Technologie liegt darin, dass HMDs auch die gemeinsame Erfahrung fördern: IC.IDO 11 erlaubt Anwendern auf der ganzen Welt, sich in derselben Sitzung zu verbinden und dieselben Daten auf demselben Netzwerk zu nutzen. Kollegen können so in einer gemeinsamen virtuellen Realität zusammenarbeiten, ungeachtet davon, wo sie sich geographisch befinden.

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

## GRANTA DESIGN

### Additive Fertigung – Erweitertes Softwarepaket zur Optimierung von Prozessparametern

Granta Design hat das erweiterte Softwarepaket Granta MI:Additive Manufacturing angekündigt. Mit dieser Version der Software können Werkstoff- und Prozessinformationen additiv hergestellter Bauteile verwaltet, analysiert und angewendet werden, wodurch eine effektive Entwicklung und Fertigung gewährleistet ist. Mit neuen einfach anwendbaren Werkzeugen können

Materialkennwerte und Prozessparameter grafisch gegenübergestellt und so Entwicklungstendenzen besser identifiziert werden. Darüber hinaus können die Anwender sowohl Versuchs- als auch Simulationsdaten verwalten und vergleichen. Neue Funktionen ermöglichen kontrollierte Prozesse – Anwendungsbeispiele reichen von der Unterstützung bei der Verwaltung des Fertigungsprozesses und des Versuches bis hin zur unternehmensweiten Implementierung von Anforderungs- und Freigabeprozessen.

Die additive Fertigung (Additive Manufacturing, kurz AM) verspricht, die Welt der Fertigung zu verändern – dies ist jedoch nur dann umsetzbar wenn Eigenschaften, Konsistenz und Qualität der Bauteile sichergestellt werden können. Dies erfordert ein tiefgehendes Verständnis der Prozessparameter und ihres Einflusses auf die Werkstoffe. MI:Additive Manufacturing ist ein Softwarepaket mit vielen verschiedenen Werkzeugen. Es baut auf dem branchenführenden Materialinformations-Managementsystem Granta MI auf und umfasst eine Datenstruktur („Schema“) sowie Funktionen zur Informationsverwaltung, die es dem Anwender ermöglichen, den Überblick zu behalten und die benötigten Daten über Pulverwerkstoffe, Fertigungsprozesse, Maschinenparameter und Versuche zu handhaben. Nutzer können die Daten konsolidieren, mit einem schnellen, einfach anwendbaren Webinterface durchsuchen und sie unternehmensweit über einen kontrollierten Zugriff zur Verfügung stellen.

Der neue Granta MI:Mat Analyzer ermöglicht eine moderne Diagrammdarstellung sowie die grafische Analyse der in Granta MI abgelegten Informationen zur additiven Fertigung. Mit der Anwendung können multidimensionale Darstellungen und Beziehungsdiagramme erstellt und so die wichtigen Verbindungen zwischen Materialkennwerten und AM-Prozessparametern visualisiert und besser verstanden werden. Diese Einblicke können genutzt werden, um Prozessparameter zu modifizieren und so optimale Ergebnisse zu erhalten.

Bei der Implementierung von Granta MI zur Unterstützung von AM-Projekten passt das Granta Design Service Team die verfügbaren Werkzeuge und Technologien den jeweiligen Projektanforderungen an. Zwei aktuelle Anwendungsbeispiele aus diesem Bereich sind die Erstellung eines Werkzeuges, mit dem ein spezielles Management von Pulverwerkstoffen, unter Berücksichtigung der Misch- und Recyclingeffekte der Materialien, realisiert werden konnte und ein Entwicklungswerkzeug zur Parameterfindung, das die optimalen Prozessparameter verwaltet. Diese Werkzeuge und das zugrundeliegende Wissen aus diesen Anwendungsfällen stehen nun auch allen anderen Kunden zur Verfügung.

Das MI:Additive Manufacturing Paket kann nahtlos in verschiedene AM Anlagen eingebunden werden, darunter die Anlagen von EOS, Arcam und Renishaw. Granta bietet darüber hinaus Zugriff auf die Senvol Database, die führende Referenzquelle in diesem Bereich, um Werkstoffe, basierend auf Kennwerten, Typ oder kompatiblen Maschinen, zu suchen und zu vergleichen, so dass der Anwender von Anfang an die richtige Wahl treffen kann.

Granta spielt bei der Entwicklung der AM-Standards in der Industrie eine aktive Rolle und stellt sicher, dass das Granta Schema immer aktuell ist und direkt für die Verwaltung und Darstellung der Daten, gemäß der Standards (z.B. ASTM F42), für die zukünftige Qualifizierung und Zertifizierung genutzt werden kann. Das System kann so konfiguriert werden, dass Qualifizierungsberichte automatisch generiert werden.

Najib Baig, Produkt Manager - Materials Innovation bei Granta, sagte: „Es ist absolut erforderlich, dass für die additive Fertigung, so früh wie möglich eine wirtschaftliche Prozessstrategie entwickelt wird. Das Granta MI:Additive Manufacturing Paket ermöglicht es den Anwendern, ihre Prozesse und Datenströme zu verwalten, Risiken zu kontrollieren und die Zeit bis zur Fertigung zu verkürzen.“

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



Offen. Partnerschaftlich. Inspirativ.  
Die etwas andere CAE-Konferenz.

## CAInspiration Forum 2017

**29. März 2017**

Literaturhaus, München

**Machen Sie Ihr Unternehmen fit für folgende Herausforderungen in der virtuellen Produktentwicklung:**

- Session 1** DIE SIMULATIONSUMGEBUNG DER ZUKUNFT - Wie ändert sich die Welt des Berechners?
- Session 2** SIMULATION IN DER CLOUD - Trend mit Zukunftschancen?
- Session 3** OPTIMIERUNG, DATENANALYSE UND ERKENNTNISGEWINN - Optimieren Sie noch oder gewinnen Sie schon Erkenntnisse?

**Jetzt Ticket sichern!**

Mehr Informationen unter:

[www.cainspiration-forum.de](http://www.cainspiration-forum.de)

**HOCHSCHULE RAPPERSWIL**

**CAS Computational Fluid Dynamics –Neuer Weiterbildungslehrgang in Strömungssimulation**

Im September 2016 ist der neue Weiterbildungslehrgang CAS Computational Fluid Dynamics an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil in der Schweiz erfolgreich gestartet. 16 berufstätige Ingenieurinnen und Ingenieure lassen sich während sechs Monaten berufsbegeleitend zu Experten in Strömungssimulation ausbilden und vertiefen bereits vorhandene Kenntnisse.

Der Fokus der Weiterbildung liegt in der Anwendung von Strömungssimulationen im industriellen Umfeld, in der Physik der Strömungen und in den mathematischen Methoden, auf denen Strömungssimulationen basieren. Vermittelt wird das Wissen von Dozierenden der HSR Hochschule für Technik Rapperswil und der ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Die Dozierenden arbeiten in der angewandten Forschung und Entwicklung der Fachhochschulen und bringen ihre Praxiserfahrung mit Strömungssimulationen in den Unterricht ein. Ergänzt wird der Unterricht mit Gastreferaten von Simulationsexperten aus der Industrie. Mit der betreuten Projektarbeit, in der die Teilnehmenden selbstständig eine CFD-Analyse für eine Problemstellung aus dem eigenen Berufsalltag durchführen, erarbeiten sich die Teilnehmenden ab dem ersten Kurstag einen Mehrwert für Ihren Arbeitgeber.

Die Lerninhalte des CAS Computational Fluid Dynamics wurden von NAFEMS geprüft. Der Weiterbildungslehrgang hat von NAFEMS das Label ‚NAFEMS approved module‘ erhalten. Der CAS-Lehrgang ist eine Kooperation der HSR mit dem Weiterbildungsanbieter esocaet in Deutschland. Die Studierenden profitieren so nicht nur vom vermittelten Know-how im Unterricht, sondern erweitern auch ihr berufliches Netzwerk im Simulationsbereich. Der nächste Lehrgang CAS Computational Fluid Dynamics startet im September 2017.

[www.hsr.ch/cas-cfd](http://www.hsr.ch/cas-cfd)

**INTES**

**Neue Software PCGen zur Modellierung von Fluid-Tanks für Permas**

Fluid-Tanks werden vielfältig eingesetzt, von Tanks in der Raumfahrt bei Raketen und Satelliten bis zu Speichertanks in Raffinerien und Kraftwerken. Solche Tanks sind häufig fast rotationssymmetrisch, d.h. sie weisen geringe Abweichungen wie Längsrippen oder Flanschverschraubungen auf. Es ist außerdem charakteristisch für diese Modelle, dass die Struktur überwiegend aus Schalenelementen besteht, und dass das Fluid regelmäßig mitmodelliert wird, um die dynamische Kopplung von Fluid und Struktur zu berücksichtigen. Für eine solche Modellierung wurde als Erweiterung von VisPER (Visual Permas) das neue Modellierungswerkzeug PCGen (Permas Component Generator) entwickelt, das die Modellierung von Geometrie, Struktur, Fluid und Vernetzung bündelt und damit Berechnungsmodelle in hocheffizienter Weise erstellen kann.

Die Vorgehensweise in PCGen kann wie folgt beschrieben werden:

- Für die üblichen Bestandteile eines Tanks existiert eine Bibliothek von parametrischen Geometriemodellen.
- Solche Teile werden von unten nach oben bis zum fertigen Tank zusammengesetzt und die Parameter anschließend auf die aktuellen Werte eingestellt.
- Die Dickenverteilung in der Struktur und evtl. der Füllstand des Fluids wird angegeben.
- Die Materialwerte von Struktur und Fluid werden definiert.
- Abschließend wird das Modell mit einigen Einstellungen zur Netzfeinheit kompatibel vernetzt und anschließend für Permas gespeichert. Fertig!

Um die Schwingungen der Fluidoberfläche zu berücksichtigen, kann PCGen auch entsprechende Wellenelemente auf der Fluidoberfläche generieren. Die Frequenzen der Oberflächenwellen werden unter der Annahme eines starren Tanks direkt in PCGen ermittelt und ausgegeben. Nach einer gekoppelten

Schwingungsanalyse mit Permas können diese Eigenfrequenzen mit den Berechnungsergebnissen verglichen werden.

**Fluid-Struktur-Kopplung zur Erdbeben-Simulation von Tanks**

Tankspeicher mit kritischem Inhalt (z.B. Öl) müssen bei einem Erdbeben nicht nur den Strukturbelastungen standhalten, sondern es muss auch durch Festlegung der maximalen Füllhöhe das Überschwappen der Flüssigkeit verhindert werden. Dazu gibt es in vielen nationalen Normen entsprechende Festlegungen, z.B. in ASCE 4-98 oder GB50191-93 für den Nuklearbereich. Da die Flüssigkeit mit ihrer großen Masse bei raschen Bewegungen in einem Erdbeben große Belastungen für die Tankhülle bedeuten, wird die Simulation am besten als direkte Fluid-Struktur-Kopplung ausgeführt. Dadurch werden sowohl die Spannungen in der Struktur als auch die Wellenhöhe der Flüssigkeitsoberfläche in einer Simulation ermittelt.

Neben den Elementen für die Tankstruktur, stellt Permas dafür zum einen Fluidelemente und ihre Kopplung zur Struktur zur Verfügung sowie spezielle Wellen-Elemente für die freie Oberfläche der Flüssigkeit, um die Wellenhöhe zu bestimmen. Als Belastung kommt z.B. ein Zeitsignal der horizontalen Anregung des Tankfundaments durch ein Erdbeben in Frage. Die Berechnung erfolgt hier in Form einer Modalanalyse im Zeitbereich, wobei zunächst die gekoppelten Eigenschwingungsformen bestimmt werden und damit dann das gekoppelte Antwortverhalten des Tanks berechnet wird.

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

**INSTAL**

**Instal-News**

Das Informations- und Expertenportal [www.4innovative-engineers.com](http://www.4innovative-engineers.com) bietet interessante Informationen und einen regelmäßigen Newsletter. Schauen Sie mal vorbei.

[www.4innovative-engineers.com](http://www.4innovative-engineers.com)

## MSC SOFTWARE

### Hexagon AB wird MSC Software übernehmen

MSC Software gab bekannt, dass eine Vereinbarung für die Übernahme von MSC durch Hexagon AB erreicht wurde. Die Übernahme unterliegt den üblichen behördlichen Einreichungen und Freigaben und soll bis Ende April abgeschlossen sein. MSC wird weiterhin als unabhängiger Geschäftsbereich arbeiten, innerhalb der Hexagon-Sparte Manufacturing Intelligence (MI). Das Hauptgeschäft von MI liegt im Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau, Unterhaltungselektronik und anderen Märkten mit diskreter Fertigung, und konzentriert sich zunehmend darauf, durchgängige Lösungen aus einer Hand (End-to-End) anzubieten. Prozessorientierte Lösungen sind für Hersteller unverzichtbar, und das Portfolio von MSC deckt die entscheidenden Auslegungs- und Entwicklungsprozesse ab.

“Unser Anliegen ist weiterhin, ganz gezielt die Entwicklung von führenden Simulationstools voranzutreiben, die von der Material- bis hin zur Systemsimulation reichen“, sagt Dominic Gallelo, Präsident & CEO von MSC Software. “Wir werden weiter daran arbeiten, unseren Kunden wegweisende, wertvolle Lösungen zu liefern. Unsere Mission und Roadmap ändern sich zwar nicht, doch voraussichtlich werden wir durch den Zusammenschluss mit Hexagon noch bessere Möglichkeiten haben, neue prozessorientierte Lösungen von Entwicklung bis Fertigung anzubieten.”

“Mit MSC eröffnen sich ganz neue Wege bei unserer Mission, verlässliche Fertigungsintelligenz zu liefern. Das bringt uns der Umsetzung unserer Vision der intelligenten, vernetzten Fabrik für Industrien mit diskreter Fertigung wie Fahrzeugbau und Luft- und Raumfahrt einen weiteren Schritt näher“, sagt Ola Rollén, Präsident und CEO von Hexagon. “Wir können nun die Daten, die unsere MI-Sparte erzeugt, viel wirksamer einsetzen, um im Arbeitsablauf vorgelagerte Designentscheidungen und Prozesse zu verbessern. Die

esocaet  
STUDIES



## Applied Computational Mechanics (M.Eng.)

### Berufsbegleitend studieren – Master, Zertifikat oder Module

+

+

+

+

+

+

+

+

#### Ihre Vorteile

- Transfer neuer Technologien
- Unterricht von CAE-Experten
- Geblockte Präsenzphasen
- Flexibel für individuelle Pläne
- **NEU:** Bewerberprogramm

#### Ihr Studium

- Strukturmechanik-Simulation
- 9 Module und Masterarbeit
- Anrechnung von Berufspraxis
- Breites Wahlfachangebot
- Einzelne Module buchbar

#### Info-Webinar:

24. März 2017, 26. April 2017

#### Info-Veranstaltung:

07. April 2017



+

+

+

+

+

+

[www.esocaet.com/nafems](http://www.esocaet.com/nafems)

+

+

by CADFEM®

Übernahme wird durch den Kontakt mit unserer Sparte für Prozessindustrie, Kraftwerksbau und Schiffbauindustrie auch für MSC neue Märkte und Berührungspunkte eröffnen.“ Hexagon ist ein weltweit führender Informationstechnologieanbieter, der für mehr Qualität und Produktivität in georäumlichen und industriellen Unternehmensanwendungen sorgt. Die Lösungen von Hexagon integrieren Sensoren, Software, Fachwissen und Kundenprozesse in intelligente übergreifende Informationssysteme, die verlässliche Informationen liefern. Sie werden in einem breiten Spektrum wichtiger Industrien genutzt. Hexagon (Nasdaq Stockholm: HEXAB) hat über 16000 Mitarbeiter in 46 Ländern und einen Nettoumsatz von ca. 3 Milliarden Euro. Erfahren Sie mehr auf [hexagon.com](http://hexagon.com) und folgen Sie uns unter @HexagonAB. Goldman, Sachs & Co. fungiert als Finanzberater von MSC Software, Paul Hastings LLP als Rechtsbeistand.

**Die Plattform zur Materialmodellierung simuliert beliebige Verbundwerkstoffe**

e-Xstream engineering gab die Veröffentlichung der neuen Version von Digimat bekannt. Digimat 2017.0 erweitert seine Modellierungsmöglichkeiten mit zusätzlichen Features und neuen hochentwickelten Materialien, wobei der Arbeitsablauf ständig effizienter wird. Es können mit impliziten Finite-Elemente-Solvern progressive Fehleranalysen (PFA) durchgeführt werden, um den Schädigungsfortschritt bei kurzfaserverstärkten Kunststoffen zu bestimmen. Mit den Erkenntnissen aus der PFA können die Anwender die Bruchfestigkeit des Teiles vollständig vorhersagen, ohne zusätzliche Versuche durchführen zu müssen. Die Inter-Chip-Delamination von diskontinuierlich faserverstärkten Kunststoffen (DFC) kann modelliert werden. Digimat-FE ermöglicht eine komplette Charakterisierung des DFC-Versagens für jede Art der Belastung und Mikrostruktur. Zu den virtuellen Tests unidirektionaler (UD) und gewebter Materialien in Digimat-VA gehören nun auch verschiedene Konfigurationen von Lagerungen

bzw. Verbindungsarten, so dass die teuren physikalischen Tragfähigkeitstests durch Simulation ergänzt und reduziert werden können. Neue hochentwickelte Materialien In Digimat-MF und Digimat-FE werden neue gewebte 3D-Geometrien unterstützt. Die gängigen Webmuster für orthogonale und Interlock-3D-Materialien können in einer einfachen Benutzeroberfläche definiert werden. Die in Digimat-MX enthaltene Materialdatenbank wurde erweitert und enthält neue direkt einsetzbare Modelle von DSM und Dupont Performance Materials. Digimat-RP hat nun Schnittstellen zu den FEM-Programmen Radioss mit Schalenelementen, Optistruct und Permas. So erhalten Strukturingenieure genauere Berechnungsergebnisse für Plastikteile und damit im Endeffekt einen robusteren Entwicklungsprozess. Digimat-MX, das Materialdatenbanktool von Digimat, unterstützt automatisches Reverse Engineering von unidirektionalen und gewebten PFA-Modellen. Der komplizierte Prozess, ein multiskalares Material zu erzeugen und zu kalibrieren, wurde zu einem einzigen Klick vereinfacht. Mikrostrukturen für kurzfaserverstärkte Kunststoffe können in Digimat-FE schneller erzeugt werden, so dass in kürzerer Zeit ein höherer Volumenanteil von Einschlüssen für die Mikrostrukturgeometrie erzielt werden kann. Diese neue Version der Plattform zur Materialmodellierung bringt eine Reihe spannender neuer Features und Verbesserungen sowohl für Material- als auch für Strukturingenieure, die mit einer immer größeren Auswahl an hochentwickelten Materialien zu tun haben.

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

**MVOID TECHNOLOGIES**

**Virtuelle Entwicklung der automobilen Soundysteme erreicht nächste Entwicklungsstufe**

Was macht Fahrzeuge zur Stradivari aus Stahl, Aluminium, Kunststoff und Magnesium? Ist Akustik Zauberei? Nein. Sicher nicht. Die Akustik im Fahrzeug ist von einer Vielzahl von

Faktoren abhängig. Akustikexperten sind mit einer äußerst komplexen Architektur auf engstem Raum konfrontiert. Durch physikalische/mathematische Parameter und Erkenntnisse der Psychoakustik kommt Mvoid klanglichen Kollateralschaden auf die Spur.

Entscheidend für ein herausragendes Klangerlebnis sind die geeignete Position und die optimale Integration der Lautsprecher in die Fahrzeugkabine. Selbst ein Premium-Lautsprecher kann an der falschen Position oder, indem er ungeeignet verbaut wurde, keinen sauberen Klang reproduzieren. Die teuer erkaufte Klang-Güte versagt. Wie lassen sich Fehlerquellen frühzeitig erkennen? Was unterscheidet eine gute von einer herausragenden Fahrzeugakustik?

Mvoid analysiert zunächst mit Hilfe von modernen, multiphysikalischen Simulationsanwendungen die einzelnen Lautsprecher innerhalb der Fahrzeugkabine. Bis in die hinterste Ecke im Innenraum wird die Verteilung des Schalldrucks sowie entstehende Reflexionen, verursacht durch mitschwingende Verkleidungselemente, Fenster und Sitzbezüge, über mathematische/physikalische Parameter ermittelt. Für jeden einzelnen Lautsprecher wird die geeignete Position gefunden. Die bestmöglichen Komponenten werden ausgewählt (Ebene 1 – 3 der Mvoid-Methodik). Das Zusammenwirken des Gesamtsystems, die Interaktion der einzelnen Lautsprecher kann über die Simulationsanwendungen nur sehr mühsam und extrem zeitaufwendig betrachtet werden.

Warum ist dies wichtig?

Das menschliche Gehör nimmt alle Lautsprecher im Verbund in einem Fahrzeug wahr. Die Analysen der einzelnen Lautsprecher und deren Frequenzverhalten alleine sind nicht ausreichend. Die Aufgabe ist, einen herausragenden Klang im Gesamtsystem zu reproduzieren. Eine frühzeitige Betrachtung des Gesamtsystems kann erhebliche Kosten und Zeit einsparen. Mvoid's virtuelles Tuning und Auralisation (Ebene 4 und 5 der Mvoid-Methodik) widmen sich diesen Aufgabenstel-

lungen.

Mvoid's virtuelles Tuning und Auralisation (= Mvoid VRtool) eruieren die Interaktionen der Lautsprecher untereinander. Das Soundsystem ist in der virtuellen Realität hörbar (= Auralisation).

Die Betrachtung des Gesamtsystems ist notwendig, um zu prüfen:

- Wo verteilen sich wie welche Schallwellen im Gesamtsystem?

In der komplexen Architektur der Fahrzeugkabine können sich Bereiche bilden, an denen sich die Schallwellen gegenseitig neutralisieren. Es können sich konstruktive (Addition) oder destruktive (Auslöschung) Einflüsse ergeben. Die einzelnen Lautsprecher müssen so beeinflusst werden, dass sich deren akustische Energie im Fahrzeug an den relevanten Stellen optimal addiert und nicht subtrahiert.

- Welche Laufzeit- und Pegelunterschiede existieren von den Lautsprechern zum Hörer?

Passagiere sitzen dicht an einem Lautsprecher und verhältnismäßig weit weg und in einem anderen Winkel zu anderen Lautsprechern. Der Lautsprecher in der Fahrertür erreicht den Fahrer wesentlich früher als der Lautsprecher, der in der Beifahrertür integriert ist. Der Schall trifft nicht gleichzeitig im Ohr ein. Zudem sind sie unterschiedlich laut. Diese Differenzen des Schalldruckpegels müssen ausgeglichen werden.

- Existieren trotz aller Vermeidungsbemühungen Akustiklöcher?

Im Fahrzeug können sich Unregelmäßigkeiten und Resonanzen (= akustische Eigenmoden) im Frequenzgang ergeben, die für das menschliche Gehör zu laut oder zu leise wirken. Frequenzgänge, die deutliche Absenkungen aufweisen, können ein Indikator sein, dass bestimmte Frequenzen – ein wesentlicher Bestandteil der Musik – fehlen. Mit Hilfe von Mvoid VRtool lassen sich vielfältige Szenarien durchspielen. Kann beispielsweise das Performance-Ziel unter Verwendung eines Subwoofers erreicht werden, der bis 50 Hz hoch spielt, und Woofern in den vorderen Türen, die erst ab 70 Hz gut klingen? Ein herausforderndes Unterfangen, würde man aus Erfahrung meinen. Mvoid

# MATH 2 MARKET

Simulation Software **GEO**DICT



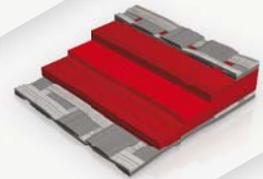
## Import

the  $\mu$ CT scan or FIB/SEM image data of a CRP plate into the GeoDict simulation software.



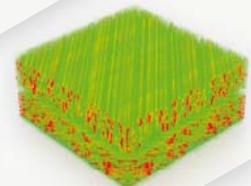
## Model

the digital material structure from the image data. Change material parameters to fit specifications.



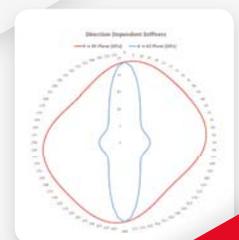
## Analyze

the properties of the material model, choosing from a variety of digital material analysis modules.



## Evaluate

the simulation results and validate the best designs with physical experiments.



Satisfied?

Optimize your parameters

[www.math2market.de](http://www.math2market.de)

Start production

prognostiziert sicher, ob im Fahrzeug kostenintensive Änderungen an der Hardware, also Änderungen an Lautsprechern und deren Integration notwendig, oder mittels Tuning, also mit sehr geringen Kosten, ein Klang reproduziert werden kann, der herausragend gut ist.

Die Akustikexperten analysieren mit Mvoid VRtool die Interaktion aller Lautsprecher und stimmen das Gesamtsystem virtuell ab (= virtuelles Tuning basierend auf virtuellen Messungen aus Ebenen 1 - 3 der Mvoid-Methodik). Für ein einwandfreies Klangerlebnis unterziehen sie jeden Sitzplatz einer eigenen Analyse und beseitigen Störungen. Für jeden Lautsprecher wird der ideale Frequenzgang eingestellt.

Ein zusätzlicher, bedeutender Bonus-Punkt: Mittels binauraler Wiedergabetechnik (Auralisation) werden die Ergebnisse über Kopfhörer erlebbar, hörbar. Es besteht zudem die Möglichkeit, die räumliche Wiedergabe – die Bühnendarstellung – des Soundsystems zu bewerten und zu optimieren. Beispielsweise prüfen die Akustikexperten, mit welcher Lautsprecher-Position die beste Bühnendarstellung transportiert werden kann oder welchen Einfluss der Center-Tweeter ausübt etc. Solche Fragen können nur im finalen Hörtest beantwortet werden.

In den Tests nutzen die Akustikexperten Tonsignale und beliebige Songs. Wird die Räumlichkeit nicht natürlich wiedergegeben, verliert das Musikstück an Charakter. Assoziationen, beispielsweise mit einem Live-Erlebnis, werden getrübt. Das Klangbild wird verfälscht. Das finale Klangbild gründet sich folglich nicht alleine auf Zahlen, Daten, Auswertungen und Graphiken. Erkenntnisse der Psychoakustik sind involviert.

Indem die Ergebnisse in die virtuelle Realität transportiert werden – erlebbar, hörbar sind – sind die Akustikexperten und Entscheidungsträger in der Lage, sicher und einfach Entscheidungen für die weitere Entwicklung des Soundsystems zu treffen. Argumente werden nicht nur durch graphische Auswertungen untermauert, sondern auch dadurch, dass die Soundsysteme hörbar sind. Es wird deutlich, dass nicht allei-

ne die Betrachtung der einzelnen Lautsprecher und deren Frequenzverhalten ausreichen. Die Vorteile einer Analyse des Gesamtsystems liegen auf der Hand:

1. Frühzeitige virtuelle Analyse und Optimierung der akustischen Einflüsse auf Systemebene, um spätere kostenintensive Modifikationen zu vermeiden

2. Frühzeitige Analyse, ob Probleme durch Software (Tuning) lösbar sind; Können Resonanzen minimiert, Laufzeitunterschiede angepasst und Akustiklöcher eliminiert werden?

3. Frühzeitige Analyse, ob konstruktive Änderungen notwendig sind: Reproduzieren die ausgewählten Komponenten an den definierten Positionen in der gewählten Integration einen einwandfreien Klang oder muss schlimmstenfalls Hardware, das heißt Lautsprecher oder deren Integration, geändert werden.

Virtuelle Entwicklung der automobilen Soundsysteme erreicht nächste Entwicklungsstufe

Indem die Interaktionen aller Lautsprecher virtuell untereinander analysiert, optimiert und hörbar – in die virtuelle Realität transportiert – werden können, hat die virtuelle Entwicklung der automobilen Soundsysteme die nächste Entwicklungsstufe erreicht, meint das Mvoid-Team.

Die Experten und Entscheidungsträger der Automobilhersteller haben nun die Möglichkeit, die Fahrzeug-Soundsysteme in der Vorentwicklung von den ersten Ideen bis zum Endergebnis in der virtuellen Welt zu analysieren. Kaum ein Aspekt bleibt einer Analyse des späteren realen Soundsystems überlassen.

Akustikexperten und Entscheidungsträger können sicher bewerten, ob das Soundsystem das gewünschte harmonische Klangbild reproduziert – eine Stradivari aus Stahl, Aluminium, Kunststoff und Magnesium.

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

## P+Z ENGINEERING

### Know-how auf dem Prüfstand: ARRK Engineering erweitert sein Leistungsspektrum durch eigene Akustik-Versuchshalle

Veränderungen auf dem Markt sowie neue gesetzliche Anforderungen verlangen von Entwicklungsdienstleistern im Automotive-Bereich ebenso wie in anderen Industriezweigen, etwa der Haushalts- oder Unterhaltungselektronik, heute die Kapazitäten, Gewerke komplett eigenständig umsetzen zu können. Während früher die Akustik-Prüfstände der Kunden genutzt wurden, gibt es nun auch die Möglichkeit, in örtlicher Nähe zum Stammsitz von ARRK Engineering in München Versuche zu Strukturdynamik und Körperschall über Luftschall bis hin zu Störgeräuschkustik eigenverantwortlich umzusetzen. Zusätzlich zu der bereits vorhandenen akustischen Kompetenz im Unternehmen können so Konstruktion, Simulation und Versuch noch besser miteinander verknüpft werden.

Eine Simulation hilft die Physik besser zu verstehen und Versuchsaufbauten entsprechend zu optimieren, umgekehrt tragen Versuche dazu bei die Simulation zu verbessern, indem bisher unbekannte Parameter ermittelt werden. Das Zusammenspiel dieser Ansätze bringt auch in der Akustik – zumal wenn beides aus einer Hand kommt – einen Zeitgewinn sowie eine Verbesserung der Qualität. „Um unserem Anspruch gerecht zu werden, das Gesamtsystem sowohl in der frühen Phase als auch beim Troubleshooting im Blick zu behalten, haben wir zunächst – ausgehend von einer externen Marktanalyse – den Bedarf ermittelt und daraus das zukünftige Leistungsspektrum und die Anforderungen an die neue Akustik-Versuchshalle abgeleitet“, erläutert Daniel Plum, Abteilungsleiter Erprobung und Versuch bei ARRK Engineering. Was über die Kapazitäten der neuen Halle hinausgeht, wird zusammen mit Partnern umgesetzt.

Das Herz der Akustik-Versuchsflächen ist ein reflexionsarmer Semi-Freifeldraum mit Innenabmessungen von 10,6 x 6,6 x 4 m, der nach



**HSR**  
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
RAPPERSWIL  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

Kursstart: 28. September 2017  
Informieren Sie sich jetzt!

[www.hsr.ch/cas-cfd](http://www.hsr.ch/cas-cfd)

Neues berufsbegleitendes Weiterbildungsangebot

# CAS Computational Fluid Dynamics

Im CAS Computational Fluid Dynamics vermitteln Ihnen unsere Dozierenden umfassendes Fachwissen für die erfolgreiche Anwendung von Strömungssimulationen – wissenschaftlich fundiert und praxisorientiert.

Modul A	Modul B	Modul C
CFD in Practice	Fluid Dynamics and Heat Transfer	Mathematics and Computational Methods
Eigene Praxiserfahrung mit CFD-Simulationen sammeln.	Die Physik von Strömungen verstehen.	Die numerischen Methoden hinter CFD-Simulationen begreifen.

Bestimmen Sie den Umfang Ihrer Weiterbildung nach Ihren Bedürfnissen. Buchen Sie den CAS-Lehrgang oder einzelne Module. Oder erweitern Sie den Lehrgang zu einem berufsbegleitenden esocaet-Masterstudium.

esocaet  
STUDIES



Werden Sie Expertin oder Experte für numerische Strömungssimulation. Profis haben nie ausgelernt.

DIN EN ISO3754 zertifiziert und dabei nach der entsprechend höheren Genauigkeitsklasse abgenommen wurde. Um Außeneinwirkungen sowie die Abstrahlung von Schall und Schwingungen zu verhindern, wurden für das Fundament und die zweischalige Konstruktion 80 t Stahlbeton verbaut. Die Innenseite der Wände ist für eine nutzungsoptimierte Auslegung mit speziellen, 1,5 m langen Akustikkeilen ausgekleidet. Die messtechnische Ausstattung entspricht dem State of the Art: Mittels MKII/PAK von Müller BBM und Siemens LMS Test.Lab kann die abgestrahlte Schalleistung des Gesamtfahrzeugs sowie der Komponenten und Module bis zur unteren Frequenzgrenze des Raums von 50 Hz getestet werden. Des Weiteren sollen aber auch in Zukunft Untersuchungen anderer Maschinen und technischer Geräte, zum Beispiel aus der Haushalts- oder Unterhaltungselektronik, durchgeführt werden. Für weniger anspruchsvolle Anwendungen, für die 500 Hz als untere

Frequenzgrenze ausreichend sind, steht ein kleineres Akustikstudio bereit. Es kann für den Einsatz des Akustikshakers, des Transmission Lost-Prüfstands sowie zur Messung kleinerer Komponenten nach DIN EN ISO 3744 genutzt werden. Die große Shakeranlage für triaxiale Strukturdynamik- und Lebensdauerprüfungen ist mit einer Aufspannfläche von 900 x 900 mm ausgestattet und für eine Nutzlast von 1,3 t beziehungsweise einen Kraftvektor von 40 kN ausgelegt. Sowohl der separate Einsatz als auch die Kombination mit einer Klimaprüfkammer sind möglich. Die dafür vorgesehene Kammer fasst ein Volumen von 1.700 l und deckt einen Temperaturbereich von -70 °C bis +180 °C ab. Die Feuchte kann zwischen 10 und 95 Prozent eingestellt werden, um Lebensdauer- oder Klimawechseltests, Untersuchungen zur Bauteilalterung oder Modalanalysen durchzuführen. „Elektrische und mechanische Bauteile lassen sich so auf ihre Vibrationsfestigkeit und Resonanzen sowie gemäß

OEM-spezifischen Prüfvorschriften testen“, führt Plum aus. Für die Analyse von Störgeräuschen steht ein Akustik-Shaker mit sehr geringem Eigen-Betriebsgeräusch von weniger als 27 dB(A) zur Verfügung, der mittels Lastrahmen ein Gewicht von 320 kg stemmen kann. Für die Belastungsprüfungen werden bis zu 1,2 kN aufgewendet. Der Frequenzbereich für die Vibrationen liegt dabei zwischen 0 und 2 kHz, so dass sich Störgeräusche wie Klappern oder Knarzen genauer untersuchen lassen. Die neue Versuchshalle wird jedoch nicht nur für Zuverlässigkeitsprüfungen, Geräuschanalysen und Produktinspektionen genutzt. „Ein wichtiges Zukunftsthema sind auch die Bereiche Sounddesign und Psychoakustik“, weiß Dr. Marinus Luegmair, Leiter des CoC Akustik. Schon jetzt berät ARRK Engineering seine Kunden in diesem Bereich und arbeitet kontinuierlich an der Entwicklung neuer Methoden und Verfahren. Die ARRK Engineering Division ist ein essentieller Bestandteil des inter-

nationalen ARRK-Firmenverbundes und spezialisiert auf sämtliche Leistungen rund um die Produktentwicklung. Das Kompetenzspektrum reicht dabei von der Konzeption über Entwurf und Simulation bis hin zu praktischen Tests und Materialforschung. Ermöglicht wird dies durch eine enge Vernetzung der vier Bereiche – Konstruktion, Technische Berechnung & Simulation, Erprobung & Versuch sowie Elektrik & Elektronik – und der sieben Centers of Competence. Darin werden die Experten unterschiedlicher Disziplinen zusammengebracht, um eine ganzheitliche Betrachtung des Entwicklungsprozesses zu gewährleisten. Auf diese Weise unterstützt ARRK Engineering als führender Entwicklungspartner seit 50 Jahren Kunden im Premiumsegment. Die Standorte der weltweit tätigen ARRK Engineering Division, die aus der P+Z Engineering GmbH hervorging, liegen in Deutschland, Rumänien, dem Vereinigten Königreich und Japan. Die ARRK Engineering Division beschäftigt mehr als 1.000 Mitarbeiter.

[www.arrk-engineering.com](http://www.arrk-engineering.com)

## SIEMENS PLM SOFTWARE

### Siemens hilft Land Rover BAR bei Vorbereitungen zum America's Cup

Seit rund drei Jahren unterstützt der Bereich Product Lifecycle Management (PLM) von Siemens Land Rover BAR dabei, den America's Cup Class (ACC)-Katamaran für das britische Team zu konstruieren, auszuwerten, zu verifizieren und herzustellen – das alles rechtzeitig und im Rahmen des Budgets. In mehr als 85.000 Arbeitsstunden für Konstruktion und Fertigung entstand ein 15 Meter langes Boot, in dem 190 Sensoren und vier Videokameras mit 1.200 Metern elektrischer und elektronischer Leitungen verbunden sind. Durch die Zusammenarbeit mit Siemens war das Team in der Lage, den ehrgeizigen Zeitplan einzuhalten. Dafür kam eine integrierte Softwareumgebung für Product Lifecycle Development zum Einsatz,

in der verschiedene Disziplinen nahtlos zusammenarbeiten konnten. Das Ergebnis ist ein Schiff, das den America's Cup dorthin zurückbringen soll, wo 1851 alles begann. Es wurde auf der Insel Bermuda im Rahmen einer feierlichen Zeremonie auf den Namen „Rita“ getauft.

„Während des Konstruktions- und Bauprozesses konnten wir dank der Softwaretechnologie von Siemens unsere konstruktiven Lösungen simulieren, analysieren und testen“, sagt Andy Claughton, Chief Technology Officer bei Land Rover BAR. „Mit dieser Software konnten wir Zeit sparen und werden bis zum Wettbewerb noch weitere Verbesserungen vornehmen. Wir hoffen, dass wir den Cup zum ersten Mal in der Geschichte des Rennens nach Großbritannien holen können.“

Land Rover BAR hat sich für Lösungen von Siemens PLM Software entschieden und setzt damit auf eine integrierte, virtuelle Umgebung für digitales Modellieren und digitale Simulation. Zu den verwendeten Softwareprodukten gehört NX für die Produktkonstruktion, Teamcenter für die Verwaltung von Daten, das Fibersim Portfolio für die Konstruktion von Verbundwerkstoffen sowie das Simcenter Softwareportfolio. Es umfasst Femap und STAR CCM+ für die Analyse von Konstruktionen und numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Wenn ein äußerst wettbewerbsfähiges und innovatives Rennboot effektiv konstruiert werden soll, dann sind während der Entwicklungsphase fortlaufend Verbesserungen an der Konstruktion nötig. Mit PLM-Lösungen von Siemens ist Land Rover BAR in der Lage, einen digitalen Zwilling des Bootes zu erstellen. Damit sind schnelle Auswertungen und Zusammenarbeit möglich. Für digitale Konstruktion und Konstruktionsanalyse kommt NX zum Einsatz. Die Software erlaubt schnelle Veränderungen an Bootskonstruktionen während der Entwicklungsphase und ermöglicht es, das digitale Modell automatisch anzupassen. Die Basis dafür liefern virtuelle Simulationen. Technische Veränderungen können im Team an-

hand von 3D-Modellen des digitalen Zwillings diskutiert werden. So lässt sich die Konstruktion schneller und kostengünstiger verbessern. Teamcenter als digitaler Datenstrang über alle Konstruktionsprozesse hinweg gibt dem Team Zugang zu einer einzigen Quelle aktueller Produktdaten. Teamcenter verwaltet die gesamte Produktdefinition, alle Überarbeitungen und den Änderungsprozess. Damit kann das Wissen über Produkt und Prozesse bestmöglich genutzt werden, um Produktivität und Innovation zu fördern.

„Wir sind stolz auf unsere Partnerschaft mit Land Rover BAR und sehr gespannt darauf, Rita beim 35. America's Cup starten zu sehen“, sagt Tony Hemmelgarn, President und CEO von Siemens PLM Software. „Um bei dem Rennen erfolgreich zu sein, müssen Teams bei der Entwicklung und Konstruktion nahtlos zusammenarbeiten – auch in der Testphase. Unsere integrierten Branchenlösungen in Verbindung mit der Expertise des gesamten Konstruktions- und Rennteams von Land Rover BAR und seinen Partnern haben ein beeindruckendes Weltklasse-Rennboot für das britische Team hervorgebracht.“

Siemens PLM Software, eine Geschäftseinheit der Siemens Digital Factory Division, ist ein weltweit führender Anbieter für Produktlebenszyklusmanagement (PLM)- und Fertigungsablaufmanagement (MOM)-Software, Systeme und Dienstleistungen mit über 15 Millionen lizenzierten Anwendern und mehr als 140.000 Kunden weltweit. Siemens PLM Software hat den Stammsitz in Plano, Texas, und stellt seinen Kunden in enger Zusammenarbeit industrielle Softwarelösungen zur Verfügung. Sie unterstützen Unternehmen weltweit dabei, nachhaltige Wettbewerbsvorteile zu erzielen, indem sie die wirklich relevanten Innovationen in die Realität umsetzen.

### IDC MarketScape stuft Siemens für 2016 zweimal als weltweiten MES-Marktführer ein

Siemens wurde in zwei verschiedenen MarketScape Bewertungen von IDC als marktführend eingestuft, und zwar im Worldwide Discrete



## LS-DYNA – Ein Code für viele Anwendungen

- Explizite und implizite Strukturberechnungen
- Thermo-mechanisch gekoppelte Simulationen
- Inkompressible Fluide und FSI
- Kompressible Fluide und FSI
- Elektromagnetismus
- Frequency Domain Analysen
- Partikelmethoden



Bild: Daimler AG



THUMS™

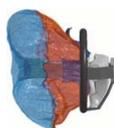
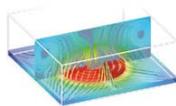
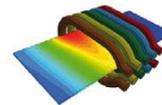
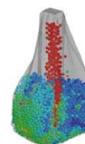
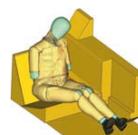
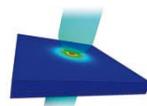


Bild: Daimler AG



DYNAMore GmbH

Stuttgart • Dresden • Ingolstadt • Berlin • Langlingen • Zürich • Linköping • Göteborg • Turin • Versailles  
 Tel.: +49 (0)711 - 45 96 00 - 0 • E-Mail: info@dynamore.de • www.dynamore.de

Manufacturing Execution System 2016 Vendor Assessment (doc # EMEA41047916, März 2016) und im Worldwide Process Manufacturing Execution System 2016 Vendor Assessment (doc # EMEA41048116, März 2016). Aufgrund des umfangreichen MES-Angebotes, das zum Manufacturing Operations Management (MOM) Portfolio gehört und vom Geschäftsbereich Siemens Product Lifecycle Management (PLM) Software entwickelt wird, wurde Siemens bei zwei zentralen Kenngrößen als führend eingestuft: Funktionsumfang und Strategie. MES ist eine der Hauptkomponenten des umfangreichen Portfolios an Software für das digitale Unternehmen von Siemens. Das Angebot zielt darauf ab, die Fertigung weltweit zu digitalisieren.

„Siemens MES wurde im IDC MarketScape als führend eingestuft. Das untermauert einmal mehr unsere Expertise bei der Transformation von Unternehmen weltweit hin zu Digital Enterprises“, sagt René Wolf,

Senior Vice President Manufacturing Operations Management bei Siemens PLM Software. „Wir arbeiten gemeinsam mit unseren Kunden daran, die Herausforderungen der digitalen Welt von heute zu meistern und ihre spannenden Chancen zu nutzen. Wir werden weiterhin unsere gesamte Expertise und den Vorsprung unserer Software dafür einsetzen, Innovationen unserer Kunden erfolgreich umzusetzen. Wir wollen ihnen helfen, ihren eigenen Kunden auch künftig Mehrwert zu bieten.“

Im IDC MarketScape: Worldwide Discrete Manufacturing System 2016 Vendor Assessment wird der globale MES-Markt für diskrete Fertigung ausgewertet. Der Fokus liegt darauf, die führenden Anbieter zu bewerten und zu vergleichen, die in Branchen wie Automobilbau, Luftfahrt, Maschinen- und Anlagenbau, Metallverarbeitung, Hochtechnologie und Elektronik sowie Halbleiterproduktion aktiv sind. Das IDC MarketScape: Worldwide Process

Manufacturing Execution System 2016 Vendor Assessment betrachtet den weltweiten MES-Markt für die Prozessindustrie. Der Schwerpunkt der Bewertungen und Vergleiche liegt hier auf den führenden Anbietern für Branchen wie Konsumgüter, Chemie, Metall und Pharmazie. In beiden Assessments wird Siemens als Marktführer bei Funktionsumfang und Strategie eingestuft.

Das Anbieter-Analysemodell IDC MarketScape ist darauf ausgelegt, einen Überblick über die Wettbewerbsfähigkeit der Anbieter von Informations- und Kommunikationstechnologien (ICT) in einer bestimmten Branche zu geben. Der Untersuchungsmethode liegt ein strenges Bewertungsverfahren zugrunde, das sowohl qualitative als auch quantitative Kriterien berücksichtigt. Das Ergebnis ist eine Grafik, aus der die jeweilige Position eines Anbieters innerhalb eines bestimmten Marktes hervorgeht. IDC MarketScape bietet einen klaren Rahmen, in dem sich Produkte

und Dienstleistungen, Fähigkeiten und Strategien sowie aktuelle und zukünftige Erfolgsfaktoren der Anbieter von IT- und Telekommunikationstechnologie sinnvoll miteinander vergleichen lassen. Dieser Rahmen liefert Technologie-Einkäufern zudem eine umfassende Grundlage, um Stärken und Schwächen aktueller und potentieller Anbieter unter Berücksichtigung aller relevanten Aspekte zu beurteilen.

Siemens PLM Software, eine Geschäftseinheit der Siemens Digital Factory Division, ist ein weltweit führender Anbieter für Produktlebenszyklusmanagement (PLM)- und Fertigungsablaufmanagement (MOM)-Software, Systeme und Dienstleistungen mit über 15 Millionen lizenzierten Anwendern und mehr als 140.000 Kunden weltweit. Siemens PLM Software hat den Stammsitz in Plano, Texas, und stellt seinen Kunden in enger Zusammenarbeit industrielle Softwarelösungen zur Verfügung. Sie unterstützen Unternehmen weltweit dabei, nachhaltige Wettbewerbsvorteile zu erzielen, indem sie die wirklich relevanten Innovationen in die Realität umsetzen.

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

## SIMUFACT

### Simufact Forming 14: Besseren Bedienkomfort und zusätzliche Fertigungsverfahren

Simufact Engineering stellt mit Simufact Forming 14 die neue Version seiner Umformsimulationslösung vor. Die Software überzeugt durch ein neues Bedienkonzept, das die Modellerstellung und die Auswertung der Simulationsergebnisse (Pre- und Postprocessing) weiter vereinfacht. Ein weiteres Highlight der neuen Version ist das neue Pressschweiß-Modul, das die Simulation von Fügeverfahren ermöglicht, in denen Werkstücke durch Druck und Wärme miteinander verbunden werden. Für die Simulation von mechanischen Fügeprozessen stellt Simufact Forming neue Prozessstypen zur Verfügung: Prozessspezifische Voreinstellungen verkürzen den Modellaufbau für die Fügeverfahren

Halbhohlstanznieten, Stanznieten, Blindnieten sowie für Zugversuche. Mit dem Joining Optimizer bietet Simufact Forming ein zusätzliches Werkzeug an, das vor allem in automobilen Zusammenbau Verwendung findet. Auch die bereits bei der wire 2016 in einem Pilotprojekt vorgestellte Kopplung der Prozesssimulation mit der Prozessüberwachung auf Basis einer Schnittstelle ist nun in die Software eingeflossen.

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

## TRANSVALOR

### Partnerschaft mit Elysium

Elysium verkündete eine neue Partnerschaft mit Transvalor, dem führenden Software-Editor für Materialumformung. Nach jahrzehntelanger Entwicklung bei der Herstellung, werden 3D-Daten heute überall in den Phasen des Produktlebenszyklus verwendet und die Interoperabilität zwischen mehreren Anwendungen/Systemen ist ein Schlüsselfaktor, um eine reibungslose und effektive Nutzung von 3D-Daten zu gewährleisten. Eine ständige Herausforderung besteht bei der Herstellerindustrie, um Probleme zu verhindern, die durch eine schlechte Datenqualität und/oder geometrische Komplexität von 3D-CAD-Daten verursacht werden, z.B. Fehler beim Import von Konstruktionsdaten in Simulationstools, Übersetzungsfehlern wie Konstruktionsabsichtsverlust und defekte Geometrie, Fehler oder schlechte Ergebnisse bei der Netzgenerierung.

Transvalor ist ein renommierter Anbieter einer umfangreichen Hochleistungs-Simulationssoftware-Suite, die eine große Auswahl und Vielfalt an Formgebungsverfahren für metallische Festkörper und flüssige Materialien sowie für Polymer anspricht. Bei der Zusammenarbeit mit dem CADdoctor, einer in der Industrie bewährten Anwendung zur 3D-Datenübersetzung und -optimierung, ist diese neue Partnerschaft darauf ausgerichtet 1) die oben erwähnten Probleme zu lösen, denen Benutzer von Transvalor Lösungen

einschließlich FORGE, Coldform, Thercast und REM3D begegnen und 2) eine sofortige Wiederverwendung der Design-CAD-Daten zu ermöglichen. Dies kann durch die Fähigkeit erreicht werden, CAD-Daten in das Transvalor-Format zu übersetzen während Geometriefehler repariert werden oder durch eine Vereinfachung der Daten für effiziente und genaue numerische Simulationen. „Transvalor wurde immer durch Innovation angetrieben und wir haben nach einem angesehenen Partner gesucht, um bei der CAD-Interoperabilität voranzukommen. Mit dem CADdoctor von Elysium fanden wir genau das, wonach wir gesucht haben: eine robuste und zuverlässige Lösung, die einen Multi-CAD-Datenaustausch mit außerordentlichen automatischen Heilungsprozessen ermöglicht,“ erklärt Emmanuel Chenot, Geschäftsführer von Transvalor. „Unsere Kunden erwarten nahtlose Lösungen beim Import von Geometrien von Gießformen oder Gesenkformen von ihrer CAD-Umgebung zu unserer CAE-Software. Die Beseitigung der umständlichen Reparaturvorgänge und der Zugang zur nativen Unterstützung für die meisten beliebten CAD-Dateiformate ist ein riesiger Vorteil. Dieser Beitrag zum Erhalt qualitativ hochwertiger Geometrien ist wichtig, um die schnellsten und genauesten Simulationsergebnisse zu gewährleisten.“

„Elysium könnte nicht zufriedener sein sich mit Transvalor zusammenzuschließen. Als Anbieter der Interoperabilitätslösung sieht Elysium es als seine Aufgabe dem Endnutzer Freiheit zur Nutzung der branchenführenden 3D-CAD/CAM/CAE-Tools für ihren Bedarf zu garantieren und Simulation ist einer der Bereiche, worauf sich Elysium in den letzten Jahren fokussiert hat. Dies wird den CADdoctor-Markt für diejenigen erweitern, die 3D-CAD-Daten beim Gießen, Umformen, Formgeben und Spritzgussimulationen wiederverwenden müssen“ erklärt Kentaro Fukuta, Geschäftsführer des Global Business Teams bei Elysium. „Die Kombination des CADdoctor von Elysium und den weltführenden numerischen Simulationslösungen



## Alle x-technik Fachmagazine und Ausgaben in einer App

Neu und kostenlos für iOS und Android,  
Smartphones und Tablets.



Jetzt downloaden auf

[www.x-technik.com/app](http://www.x-technik.com/app) oder QR-Code scannen



iOS ist eine Marke von Cisco, die in den USA und weiteren Ländern eingetragen ist. Apple, das Apple Logo, iPad und iPhone sind Marken der Apple Inc., die in den USA und weiteren Ländern eingetragen sind. App Store ist eine Dienstleistungsmarke der Apple Inc. Android und Google Play sind eingetragene Marken von Google Inc.

**x-technik**

x-technik IT & Medien GmbH, Schöneringer Straße 48, A-4073 Wilhering,  
Tel. +43 7226-20569, Fax +43 7226-20569-20, magazin@x-technik.com, www.x-technik.com

von Transvalor werden die Kunden von Transvalor nachdrücklich unterstützen, um den nächsten Erfolg zu haben—erstellen Sie ein einfaches Modell für halbautomatische CAE-Simulation vom Design-CAD-Modell, bekommen Sie ein genaues Erlebnis bei der Simulation und verkürzen Sie die Gesamtzeit noch mehr.“

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

### VOLUME GRAPHICS

#### Strukturmechanik-Simulation für VGStudio MAX 3.0 veröffentlicht

Volume Graphics hat das Zusatzmodul Strukturmechanik-Simulation für die erweiterbare High-End-Software VGStudio MAX 3.0 veröffentlicht. Mit dem neuen, optional erhältlichen Zusatzmodul können Anwender jetzt direkt auf CT-Daten simulieren, welchen Belastungen ein Bauteil standhält. Eine aufwendige und verlustbehaftete Netzgenerierung entfällt. Virtuelle Funktionstests sind nun direkt auf dem CT-Scan des Realbauteils möglich.

Das neue Zusatzmodul Strukturmechanik-Simulation:

- simuliert mechanische Belastung direkt auf Voxeldaten;
- berechnet Werte wie von-Mises-Spannung und Hotspots;
- unterstützt drei Kraftarten: gerichtete Kraft, Drehmoment, Druck/Ansaugdruck;
- ermöglicht Nicht-Experten komplexe Simulationen;
- eliminiert Netzgenerierung als Fehlerquelle im Vergleich zu etablierten Methoden;
- liefert Ergebnisse schneller, da eine aufwendige Netzgenerierung entfällt und
- funktioniert selbst auf großen Datensätzen.

Service Pack 3 aktualisiert die komplette 3.0-Familie

Das neue Zusatzmodul Strukturmechanik-Simulation ist Teil des gerade erschienenen Service Packs 3, das die gesamte 3.0-Produktfamilie aktualisiert. Das Update bietet eine Reihe von Verbesserungen für VGStudio MAX 3.0, VGStudio 3.0, VGMetrology 3.0, VG InLine 3.0 und myVGL 3.0. Darüber hinaus enthält

das Service Pack 3 neue Sichtfeld-Erweiterungs-Modi (FOV) für die CT-Rekonstruktion. Diese erlauben es, große Objekte ohne Abschneiden oder Zusammenfügen von Projektionsdateien zu scannen – und dies bei voller räumlicher Auflösung. Verfügbarkeit der neuen Versionen Alle Applikationen sind ab sofort verfügbar. Angebote für VGStudio MAX 3.0, VGStudio 3.0, VGMetrology 3.0 und VG InLine 3.0 erstellt Volume Graphics auf Anfrage. Volume Graphics bietet kostenlose, zeitlich beschränkte Testversionen von VGStudio MAX 3.0, VGStudio 3.0 und VGMetrology 3.0 an. myVGL 3.0 ist kostenlos und kann auf der Webseite von Volume Graphics angefordert werden.

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

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

**Fachkongress Composite Simulation**

22.-23.02. Fellbach, D [www.composite-simulation.de](http://www.composite-simulation.de) VDC

**Star Global Conference**

06.-08.03. Berlin, D [www.star-global-conference.com](http://www.star-global-conference.com) Siemens

**Conference for Wind Power Drives (CWD)**

07.-08.03. Aachen, D [www.cwd.rwth-aachen.de/konferenz](http://www.cwd.rwth-aachen.de/konferenz) RWTH Aachen

**Intec**

07.-10.03. Leipzig, D [www.leipzig-intec.de](http://www.leipzig-intec.de) Leipziger Messe

**Composites Recycling**

08.-09.03. Stuttgart, D [www.carbon-composites.eu](http://www.carbon-composites.eu) Carbon Composites

**NAFEMS Seminar: Virtual and Real: Wie Simulation helfen kann, additive Fertigungsmaschinen leistungsfähiger und zuverlässiger zu machen**

13.-14.03. Wiesbaden, D [www.nafems.org/am17](http://www.nafems.org/am17)

**German OpenFoam User Meeting (GOFUN 2017)**

21.-22.03. Braunschweig, D [www.tu-braunschweig.de](http://www.tu-braunschweig.de) TU Braunschweig

**NAFEMS Schulung: Verification and Validation in Engineering Simulation**

22.-23.03. Frankfurt, D [www.nafems.org/events/nafems/2017/vandv1](http://www.nafems.org/events/nafems/2017/vandv1)

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

23.-24.03. Schladming, A [www.4a-engineering.at](http://www.4a-engineering.at) 4a engineering

**CAInspiration-Forum**

28.-29.03. München, D [www.cainspiration-forum.de](http://www.cainspiration-forum.de) ISKO engineers

**Virtuelle Techniken in der Fahrzeugentwicklung**

29.-30.03. Stuttgart, D [www.vdi-wissensforum.de](http://www.vdi-wissensforum.de) VDI

**Automotive CAE Grand Challenge**

05.-06.04. Hanau, D [www.carhs.de](http://www.carhs.de) Carhs

**Hannover Messe**

24.-28.04. Hannover, D [www.hannovermesse.de](http://www.hannovermesse.de) Messe Hannover

**Matfem-Konferenz**

25.04. Hohenkammer, D [www.matfem.de](http://www.matfem.de) Matfem

**Ansys Conference & 11. Cadfem Austria Users' Meeting**

27.-28.04. Linz, A [www.usersmeeting.at](http://www.usersmeeting.at) Ansys/Cadfem

**ANSYS User Club Workshop**

04.-05.05. Dresden, D [www.auc-ev.de](http://www.auc-ev.de) AUC

**NAFEMS Schulung: CFD Analysis: Theory and Applications**

08.-09.05. Wiesbaden, D [www.nafems.org/events/nafems/2017/cfd-course1](http://www.nafems.org/events/nafems/2017/cfd-course1)

**Europäische LS-Dyna Konferenz**

09.-11.05. Salzburg, A [www.dynamore.de/conf2017](http://www.dynamore.de/conf2017) DYNAmore

**NAFEMS Schulung: Non-Linear Finite Element Analysis**

10.-11.05. Wiesbaden, D [www.nafems.org/events/nafems/2017/non-linear-1](http://www.nafems.org/events/nafems/2017/non-linear-1)

**Int. Femfat User Meeting**

10.-12.05. Steyr, A [www.magna.com](http://www.magna.com) Magna

**NAFEMS Schulung: Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation**

15.-17.05. Wiesbaden, D [www.nafems.org/events/nafems/2017/dach-fea1](http://www.nafems.org/events/nafems/2017/dach-fea1)

**NAFEMS Schulung: Simulation und Analyse von Composites**

22.-23.05. Wiesbaden, D [www.nafems.org/events/nafems/2017/comp-course1](http://www.nafems.org/events/nafems/2017/comp-course1)

**RoundTable Simulating Manufacturing**

30.05.-01.06. Marburg, D [www.simufact.de](http://www.simufact.de) Simufact

**Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage**

01.-02.06 Weimar, D [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de) Dynardo

**NAFEMS World Congress & Int. SPDM Conference 2017**

11.-14.06. Stockholm, S [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress)



**Permas Anwendertreffen**

20.06. Stuttgart, D [www.intes.de](http://www.intes.de) Intes

**Symposium für Smarte Strukturen und Systeme – 4Smarts**

21.-22.06. Braunschweig <http://4smarts2017.inventum.de/home/> DLR u.a.

**Rapid.Tech**

20.-22.06. Erfurt [www.rapidtech.de](http://www.rapidtech.de) Messe Erfurt

**Europäische Altair Technology Conference**

26.-28.06. Frankenthal, D [www.altairatc.com/europe](http://www.altairatc.com/europe) Altair

**GSVF - Graz Symposium Virtual Vehicle**

27.-28.06. Graz, A [www.gsvf.at](http://www.gsvf.at) VIF

**Int. Conference on Low Cycle Fatigue (LCF8)**

27.-29.06. Dresden, D [www.lcf8.de](http://www.lcf8.de) DVM

**Bayreuther 3D-Konstrukteurstag**

20.09. Bayreuth, D [www.konstrukteurstag.de](http://www.konstrukteurstag.de) Univ. Bayreuth

**GeoDict User Meeting**

26.-27.09. Kaiserslautern, D [www.math2market.de](http://www.math2market.de) Math2Market

**Cadferm Ansys Simulation Conference**

15.-17.11. Koblenz, D [www.simulation-conference.com](http://www.simulation-conference.com) Cadferm/Ansys

**Weitere Veranstaltungen:** [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events)

# Submodellansatz zur effizienten Analyse des Anlageverhaltens von Manschettendichtungen aus PTFE-Compound mit Rückförderstrukturen

Nino Dakov, Frank Bauer, Werner Haas  
Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart

Wellendurchtrittsstellen an Gehäusen werden oft mit Hilfe von Radial-Wellendichtringen aus Elastomer, kurz Elastomer-RWDR, abgedichtet. Im Fall hoher Geschwindigkeiten und hohe Einsatztemperaturen können alternativ Manschettendichtungen aus PTFE-Compound, kurz PTFE-Manschetten, aufgrund ihrer besseren thermischen und chemischen Beständigkeit eingesetzt werden. Im Unterschied zu Elastomer-RWDR können PTFE-Manschetten jedoch nur über zusätzliche Dichthilfen Leckage aktiv verhindern. Für die Auslegung dieser Dichthilfen ist die Kenntnis der Anlage von PTFE-Manschetten an der Welle nach der Montage von großer Bedeutung. Hierzu können FEM-Montagesimulationen durchgeführt werden.

Am Beispiel einer PTFE-Manschette mit bidirektionalen Rückförderstrukturen wird in diesem Beitrag ein Submodellansatz zur einfachen Simulation der Pressung in der Dichtzone vorgestellt. Der Submodellansatz wird im Vergleich mit einem vollständigen Geometriemodell validiert und liefert eine Zeiteinsparung von 89 %. Anhand der Analyse der Pressung in der Dichtzone wird mit Hilfe des Submodellansatzes exemplarisch eine Modelloptimierung durchgeführt.

## 1 Einleitung

Zur Abdichtung bespritzter oder drucklos überfluteter Wellendurchtrittsstellen an Gehäusen werden standardmäßig Radial-Wellendichtringe (RWDR) aus Elastomer eingesetzt. Stoßen Elastomer-RWDR an ihre chemischen oder thermischen Beanspruchungsgrenzen, werden oft Manschettendichtungen aus PTFE-Compound (Polytetrafluorethylen), kurz PTFE-Manschetten, verwendet. Durch Füllstoffe verstärkte PTFE-Manschetten weisen nahezu universelle chemische und thermische (-260 °C bis 260 °C, [1]) Beständigkeit auf. Im Gegensatz zu Elastomer-RWDR zeigen PTFE-Manschettendichtungen jedoch kein aktives Rückfördervermögen. Vielmehr muss die dynamische Dichtheit durch makroskopische Strukturen zur Umlenkung und Rückförderung von Leckage sichergestellt werden. Bei Anwendungen mit einer Drehrichtung der Welle, z. B. bei Kurbelwellen, werden PTFE-Manschetten mit Spiralrille eingesetzt [2]. Um die Dichtwirkung in beide Drehrichtungen zu gewährleisten, wurden am Institut für Maschinenelemente an der Universität Stuttgart PTFE-Manschetten mit bidirektionalen Rückförderstrukturen zwischen zwei geschlossenen Ringen entwickelt [3] und weiterentwickelt [4], Abb. 1.

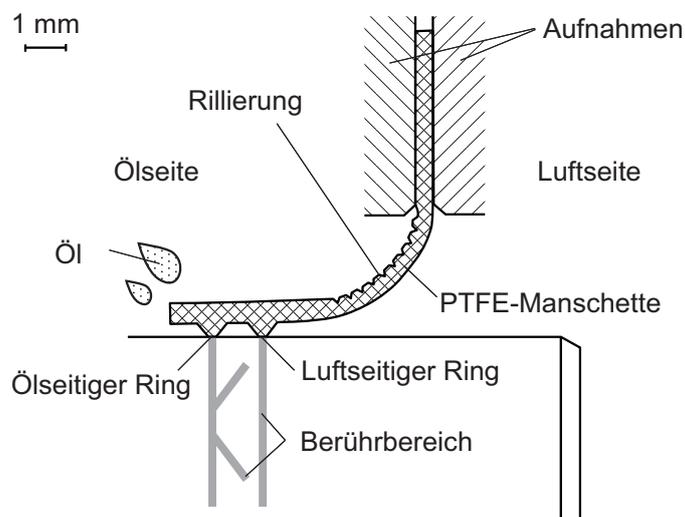


Abb. 1: Manschettendichtung mit Rückförderstrukturen

Im eingebauten Zustand liegt die PTFE-Manschette vollständig mit den Rückförderstrukturen auf der Welle auf. Die zugrundeliegende Funktion ist von GÖLZ umfassend beschrieben [5]. Im statischen Zustand hindern beide geschlossenen Ringe Öl am Austreten zur Luftseite. Dringt im dynamischen Betrieb Öl in den Raum zwischen die beiden geschlossenen Ringen, wird dieses von der Welle mitgeschleppt und an den Rückförderstrukturen umgelenkt, Abb. 2. In einem doppelt konvergenten Spalt zwischen Rückförderstruktur und ölseitigem Ring kommt es durch Schleppdruck zum Rückfördern zurück in den Ölraum. Für die Dichtheit im statischen und dynamischen Betrieb ist daher die Anlage der Rückförderstrukturen auf der Welle von zentraler Bedeutung. Um die Anlage zu analysieren, kann eine FEM-Montagesimulation (Finite-Elemente-Methode) durchgeführt werden. Dabei wird die PTFE-Manschette quasistatisch auf die Welle aufgestülpt.

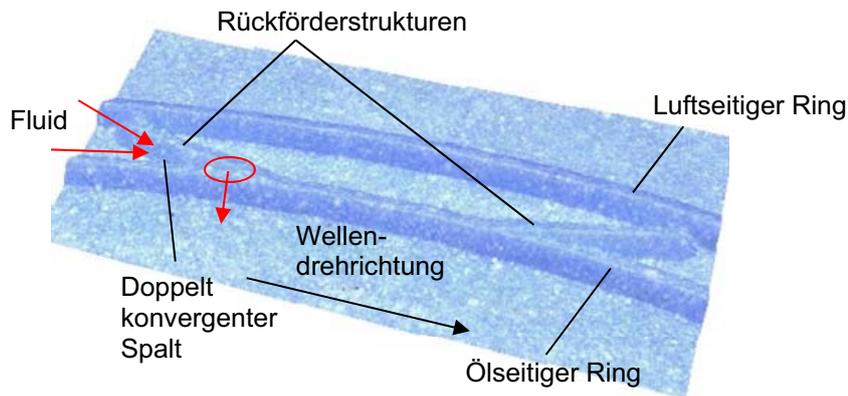


Abb. 2: Realer Detailausschnitt in 3D-Darstellung [5]

Die PTFE-Manschette kann mittels eines rotationssymmetrischen 2D- oder eines vollständigen 3D-Geometriemodells abgebildet werden. Für PTFE-Manschetten mit rotationssymmetrischer Geometrie bietet die 2D-Modellierung hohe Recheneffizienz. Aufgrund der räumlichen Gestalt der bidirektionalen Rückförderstrukturen ist für die Bestimmung der Pressungsverteilung im Berührungsbereich mit der Welle jedoch eine dreidimensionale Analyse notwendig. Eine mit der 2D-Simulation vergleichbare Netzfeinheit im Querschnitt der PTFE-Manschette führt bei der 3D-Berechnung zu deutlich mehr Elementen. Um den Rechenaufwand zu mindern, wird im folgenden Beitrag ein Submodellansatz vorgestellt, welcher die 2D- mit der 3D-Modellierung koppelt. Ein 2D-Ausgangsmodell liefert Verschiebungsrandbedingungen für einen 3D-Detailausschnitt der PTFE-Manschette im Berührungsbereich mit der Welle. Der Submodellansatz wird im Vergleich mit einem vollständigen 3D-Geometriemodell validiert.

## 2 Modellbildung

Abb. 1 veranschaulicht die PTFE-Manschette mit Einbaumgebung im Querschnitt. Acht Rückförderstrukturen für jede Drehrichtung sind über den Umfang verteilt. Auf der Rückseite der PTFE-Manschette ist eine konzentrische Rillierung angebracht. Dadurch wird bei der Montage eine stärkere Biegung der PTFE-Manschette und somit eine bessere Anlage auf der Welle erzeugt. Die PTFE-Manschette wird in zwei Aufnahmen eingespannt und über eine 15°-Einfuhrschräge auf die Welle aufgeweitet. Der Wellendurchmesser beträgt  $d = 80$  mm. Abb. 3 veranschaulicht den Montagevorgang.

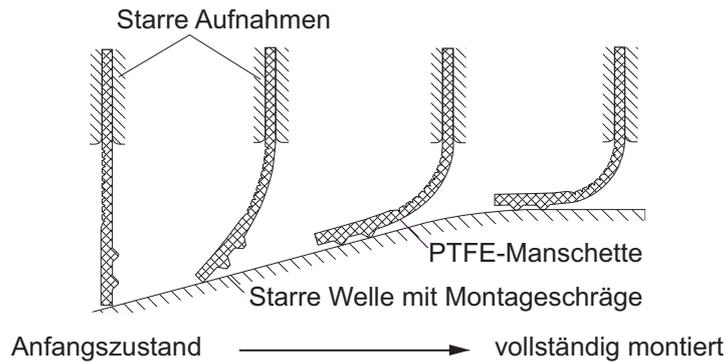


Abb. 3: Montage der PTFE-Manschette

Für die Netzerstellung wird Altair HyperMesh v13.0 eingesetzt. Das *Pre-* und *Postprocessing* wird mit MSC Mentat 2014.2.0 durchgeführt. Der *Solver* ist MSC Marc 2014.2.0. Das PTFE-Compound wird durch ein elastisch-plastisch-isotropes Materialmodell mit Fließkriterium nach *VON MISES* unter Verwendung der Streckgrenze und Fließkurve aus dem quasistatischen Zugversuch beschrieben. Das einfache Materialmodell ist für den qualitativen Vergleich der Geometriemodelle ausreichend.

### 2.1 Vollständiges Geometriemodell

Das Netz für das vollständige Geometriemodell wird anhand eines Achterschnittes der PTFE-Manschette erstellt und in zwei Bereiche unterteilt, Abb. 4. Der äußere Bereich wird für eine bessere Netzqualität strukturiert vernetzt. Der Bereich der Rückförderstrukturen und der geschlossenen Ringe wird aufgrund der komplexen Gestalt mit einem unstrukturierten Netz diskretisiert. Darüber hinaus wird an einer der Rückförderstrukturen eine Netzverfeinerung vorgenommen. An dieser Stelle werden bei der Ergebnisdiskussion die Kontaktpressung und die Vergleichsspannung ausgewertet. Die Aufnahmen für die PTFE-Manschette und die Welle werden mittels Flächen als starre Körper modelliert.

Für die Gleichungslösung wird die *NEWTON-RAPHSON*-Methode eingesetzt. Der verwendete Kontaktalgorithmus ist *node-to-segment*. Als Elementtyp in MSC Marc 2014.2.0 werden lineare Tetraeder des Typs 134 eingesetzt.

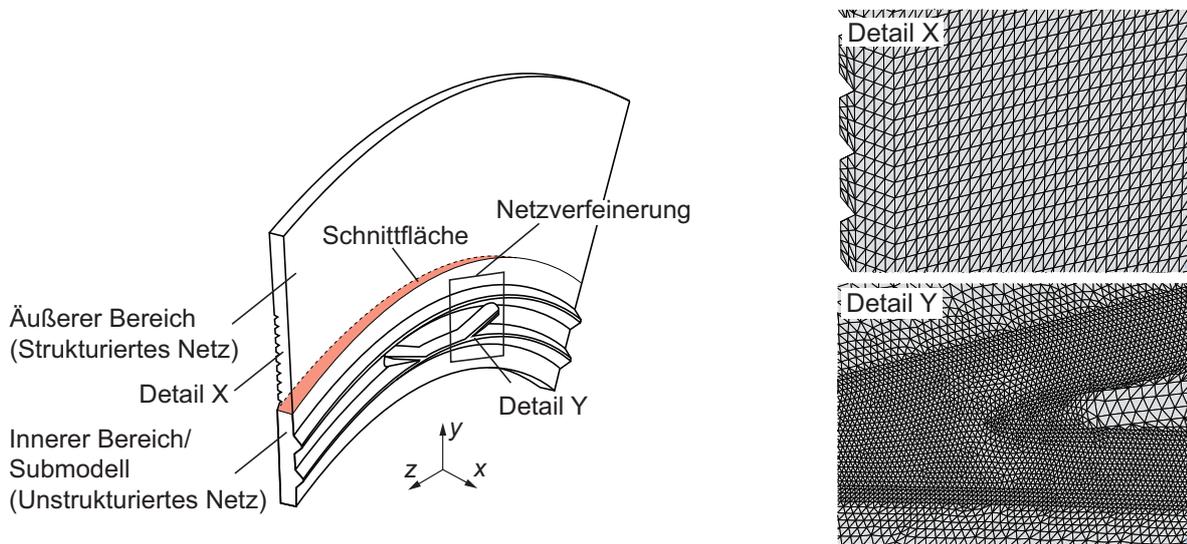


Abb. 4: Vollständiges Geometriemodell (Achtelschnitt) der PTFE-Manschette

## 2.2 Submodellansatz

Die Geometrie der PTFE-Manschette ist bis auf die Rückförderstrukturen rotationssymmetrisch. Unter der Annahme, dass auch die Verschiebungen über dem Umfang bei der Montage nahezu symmetrisch sind, kann als Ausgangsmodell für den Submodellansatz das rotationssymmetrische 2D-Modell der PTFE-Manschette verwendet werden, Abb. 5. Das Submodell stellt somit den inneren Bereich des vollständigen Geometriemodells der PTFE-Manschette dar. Als Randbedingungen an der 3D-Schnittfläche werden die  $x$ - und  $y$ -Verschiebungen  $u_{2D}$  und  $v_{2D}$  aus der 2D-Simulation eingesetzt.

Es werden Randbedingungen des Typs *Fixed Displacement* verwendet. Hierbei wird jedem Knoten der Trennfläche des Submodells eine Verschiebung zugewiesen, welche über eine Tabelle für das aktuelle Inkrement bestimmt wird. Wie aus Abb. 5 ersichtlich, werden mit dem Index  $i$  die einzelnen Knotenreihen der 3D-Trennfläche in Axialrichtung gekennzeichnet. Der Index  $j$  stellt die Knotenreihen in Umfangsrichtung der 3D-Trennfläche dar. Die Randbedingungen  $u_{3D}$  ergeben sich nach der Beziehung

$$u_{3D,\{i\}} = u_{2D,\{i\}} \quad \text{mit} \quad i = 1 \dots 7. \tag{1}$$

Die einzelnen Knotenreihen  $i$  werden zu Knoten-Sets zusammengefasst, um die Randbedingung einmalig für jedes Set zu definieren. Die Definition der Randbedingungen  $v_{3D}$  lautet

$$v_{3D,\{i,j\}} = v_{2D,\{i\}} \cdot \cos(\varphi_{\{j\}}) \quad \text{mit} \quad i = 1 \dots 7 \quad \text{und} \quad j = 1 \dots 200. \tag{2}$$

Hierbei werden die Verschiebungen  $v_{3D}$  an der Schnittfläche in Abhängigkeit der Knotenreihe  $i$  in Axialrichtung und der Knotenreihe  $j$  in Umfangsrichtung bestimmt. Durch die 200 Knotenreihen in Umfangsrichtung und sieben Knotenreihen in Axialrichtung entstehen insgesamt 1400 einzelne Randbedingungen. Aus diesem Grund werden die *Fixed Displacements*  $v_{3D}$  mit Hilfe eines Python-Programms automatisch angelegt.

Die  $x$ - und  $y$ -Verschiebungen  $u_{2D}$  und  $v_{2D}$  über die Inkrementzahl sind in Abb. 6 veranschaulicht.

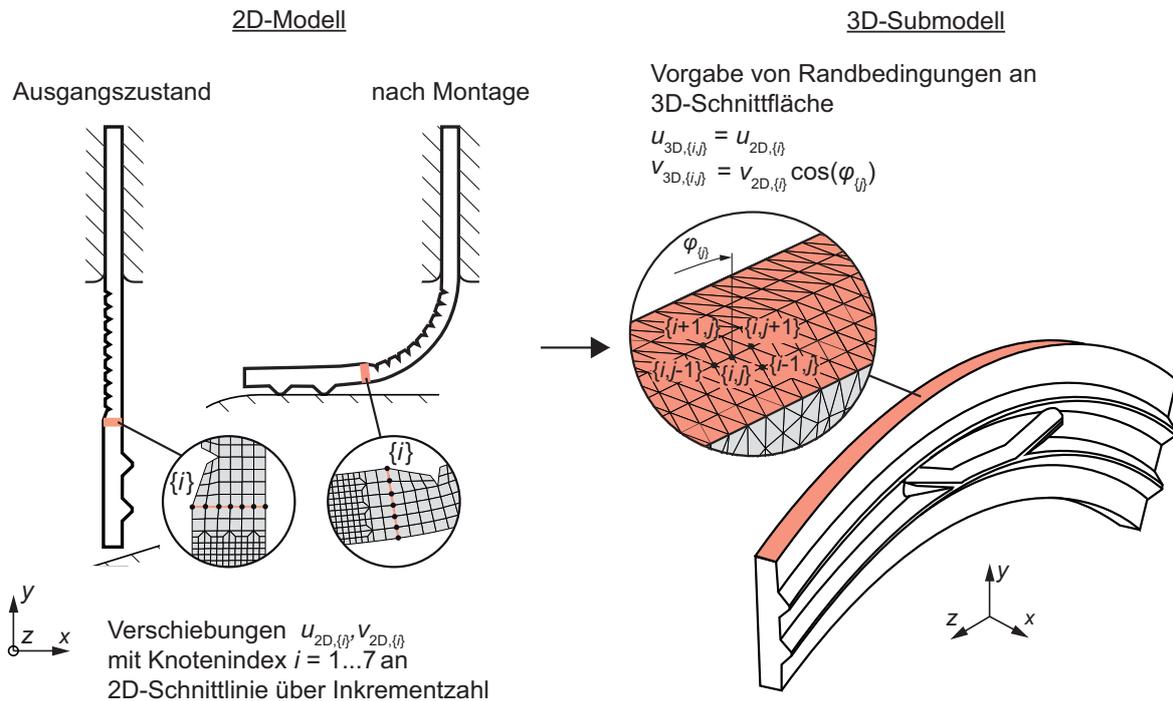


Abb. 5: Submodellansatz

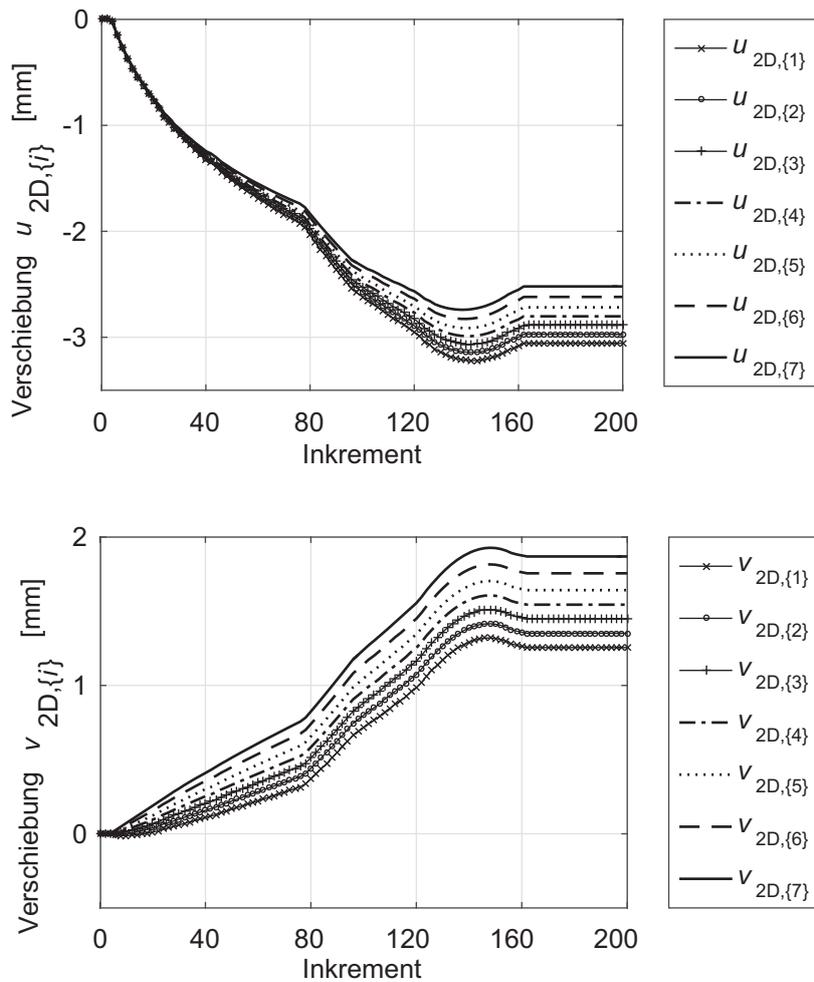


Abb. 6: Verschiebungen über Inkrementzahl

### 3 Ergebnisdiskussion

Der Submodellansatz wird anhand der Pressung in der Dichtzone und der Radialkraft im Vergleich mit dem Vollmodell validiert. Wesentliche Aspekte der Spannungs- und Pressungsverteilung im Bereich der Rückförderstruktur werden analysiert. Anschließend wird mit Hilfe des Submodellansatzes exemplarisch eine Geometrieoptimierung der PTFE-Manschette durchgeführt.

#### 3.1 Validierung des Submodellansatzes

Die Simulationszeit (*Wall Time*) für das vollständige Geometriemodell und den Submodellansatz ist in Tab. 1 aufgeführt. Mittels des vorgestellten Ansatzes kann die Elementanzahl um 50 % und die Rechenzeit um 89 % reduziert werden.

Die Kontaktpressung zwischen PTFE-Manschette und Welle im eingebauten Zustand ist bei beiden Simulationen weitestgehend identisch, Abb. 7 und Abb. 8. Mit Hilfe des Submodellansatzes wird dabei tendenziell eine höhere Pressung am luftseitigen geschlossenen Ring berechnet. Dies liegt am Einfluss der Rückförderstrukturen auf die Durchbiegung der PTFE-Manschette im Bereich der Rillierung, welcher beim Submodellansatz nicht berücksichtigt wird.

Tab. 1: Vergleich der Simulationszeit mit 8 Kernen, CPU Intel(R) Xeon(R) X5560 2,8 GHz

Modell	Submodellansatz		Vollmodell
	Axialsymm. 2D-Modell	3D-Detailausschnitt	
Elementanzahl	3388	≈ 1,2 Mio.	≈ 2,4 Mio.
Simulationszeit	≈ 120 Sekunden	≈ 22 Stunden	≈ 8 Tage 7 Stunden

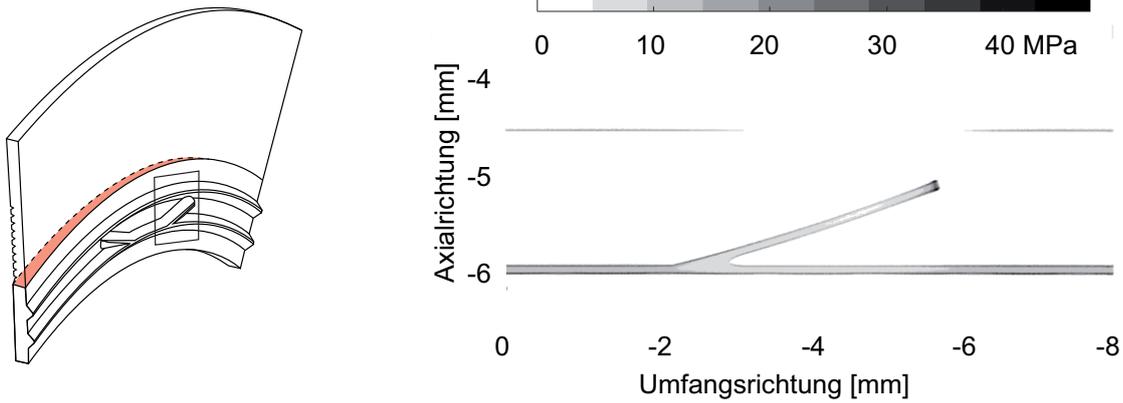


Abb. 7: Kontaktpressung beim Vollmodell

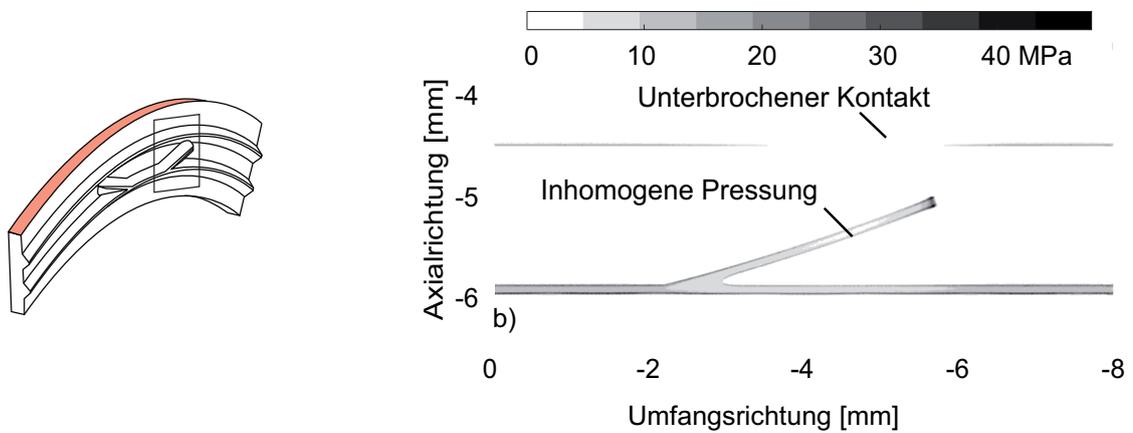


Abb. 8: Kontaktpressung beim Submodell

Als weiteres Vergleichskriterium dient die Radialkraft  $F_R$  zwischen PTFE-Manschette und Welle. Diese ist als die Summe aller Kontaktnormalkräfte  $F_k$  der sich im Kontakt befindenden Knoten  $k = 1 \dots n$  definiert

$$F_R = \sum_{k=1}^n F_k. \tag{3}$$

Abb. 9 stellt die errechneten Radialkräfte über die Inkrementzahl für den Achterschnitt beider Modelle dar. Die maximale absolute Abweichung bei der Radialkraft beim Submodell im Vergleich zum Vollmodell beträgt  $\Delta F_{\text{abs}} = 2,8 \text{ N}$ . Dies entspricht einem relativen Fehler von  $\Delta \varepsilon_{\text{rel}} = 5,6 \%$ .

Aufgrund der guten Übereinstimmung in der Kontaktpressung und der Radialkraft bei beiden Modellen wird in den weiteren Betrachtungen der Submodellansatz wegen der höheren Recheneffizienz verwendet.

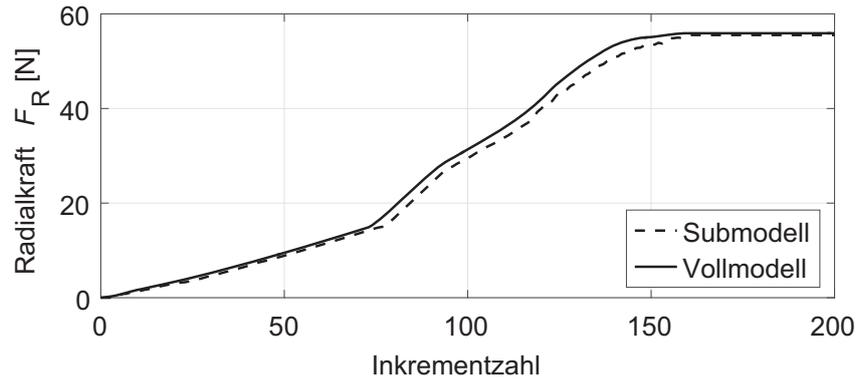


Abb. 9: Radialkraft in Abhängigkeit der Inkrementzahl für die Montagesimulationen

### 3.2 Spannungsanalyse

Abb. 10 stellt die Vergleichsspannung an der Oberfläche im Bereich der Rückförderstruktur für das Submodell dar. Der Hauptanteil an der Vergleichsspannung hat an dieser Stelle die Spannung in Umfangsrichtung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Beanspruchung entlang der Rückförderstruktur vom ölseitigen geschlossenen Ring in Richtung des luftseitigen Rings abnimmt. Im Gegensatz zu den geschlossenen Ringen erfährt die Struktur eine ungleichmäßige Längenänderung, welche an deren Ende bei dem luftseitigen geschlossenen Ring ihr Minimum hat. Der Grund für die geringe Dehnung ist der scharfe Übergang der erhabenen Rückförderstruktur zum glatten Bereich der PTFE-Manschette. Unmittelbar an dem Ende der Rückförderstruktur zum luftseitigen Ring nimmt die Spannung wieder zu. Der geometrische Übergang der erhabenen Rückförderstruktur in den umliegenden Bereich stellt eine Kerbstelle dar, an welcher nach dem Aufstülpen der PTFE-Manschette auf die Welle ein mehrachsiger Spannungszustand entsteht.

Die Abnahme der Längenänderung der Rückförderstruktur ist der Grund für die mangelnde Pressung zwischen PTFE-Manschette und Welle, welche im Abschnitt 3.3 analysiert wird.

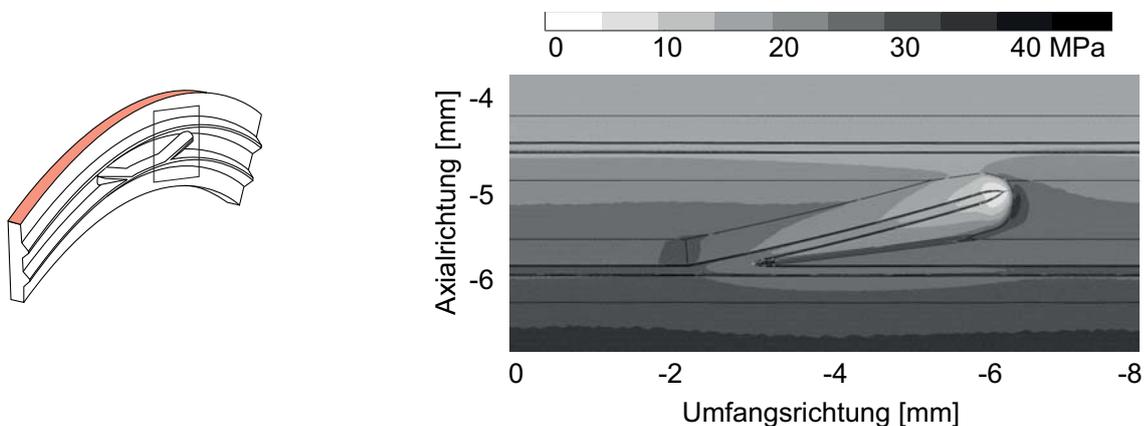


Abb. 10: Vergleichsspannung nach VON MISES

### 3.3 Pressungsanalyse

Bei der Analyse der Kontaktpressung zwischen PTFE-Manschette und Welle wird im Folgenden auf zwei Aspekte eingegangen. Als erster Aspekt ist aus Abb. 8 ersichtlich, dass die Pressung zwischen dem luftseitigen Ring und der Welle insgesamt sehr gering und im Bereich der Rückförderstruktur unterbrochen ist. Die kleine Berührbreite ist auf die geringere Aufdehnung vom luftseitigen im Vergleich zum ölseitigen Ring bei der Montage zurückzuführen. Die Unterbrechung des Kontaktes hängt mit der lokal erhöhten Steifigkeit der PTFE-Manschette durch die Rückförderstrukturen und dadurch schlechteren Anlage an die Welle zusammen. Zusätzlich ist die Höhe der Rückförderstruktur am luftseitigen Ende aufgrund der inhomogenen Längenänderung (vgl. Abschnitt 3.2) zu groß und verhindert die Berührung zwischen dem luftseitigen Ring und der Welle. Die unzureichende Pressung an dieser Stelle kann statische Leckage begünstigen.

Der zweite Aspekt bei der Pressungsanalyse ist die inhomogene Kontaktpressung entlang der Rückförderstruktur. Der Effekt wird ebenso mit der ungleichmäßigen Dehnung entlang der Rückförderstruktur nach dem Aufstülpen erklärt. Insbesondere die geringe Pressung in der Mitte der Struktur kann die Strömungsumlenkung im Betrieb erschweren. Es ist deswegen sinnvoll, eine gleichmäßige Anpressung oder einen geringen Spalt im Mikrometerbereich zwischen Rückförderstruktur und Welle anzustreben.

### 3.4 Geometrieoptimierung

Im folgenden Abschnitt wird exemplarisch die Geometrieoptimierung des ersten untersuchten Aspektes in der Analyse der Pressungsverteilung vorgenommen – die Kontaktpressung zwischen dem luftseitigen Ring und der Welle. Ziel ist es, eine geschlossene Pressungslinie über dem gesamten Umfang des luftseitigen Ringes zu erzeugen. Dafür werden zwei Maßnahmen separat betrachtet.

Um den Einfluss der Rückförderstruktur auf den luftseitigen geschlossenen Ring zu reduzieren, kann als Erstes die Länge der Struktur verkürzt werden. Eine zu kurze Rückförderstruktur erschwert jedoch die Strömungsumlenkung. Aus diesem Grund wird die Länge der Rückförderstruktur um lediglich 30 % reduziert. Abb. 11 zeigt die veränderte Geometrie zusammen mit der sich ergebenden Pressung zwischen PTFE-Manschette und Welle. Im Vergleich zu der ursprünglichen Pressungsverteilung aus Abb. 8 ist der Bereich der Kontaktunterbrechung am luftseitigen Ring in Abb. 11 wesentlich geringer. Durch kürzere Rückförderstrukturen lässt sich jedoch keine vollständig geschlossene Pressungslinie am luftseitigen Ring erreichen.

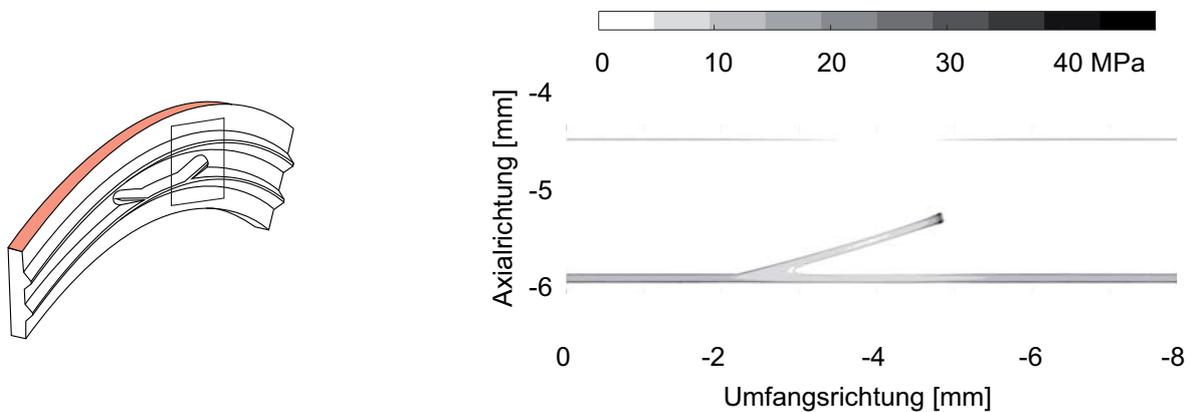


Abb. 11: Kontaktpressung für Geometrievariante mit verkürzten Rückförderstrukturen

Abb. 12 stellt die Vergleichsspannung im Bereich der Rückförderstruktur für die Geometrievariante mit verkürzten Rückförderstrukturen dar. Die Längenänderung der Rückförderstruktur entspricht dem Verlauf der ursprünglichen Geometrie in Abb. 10.

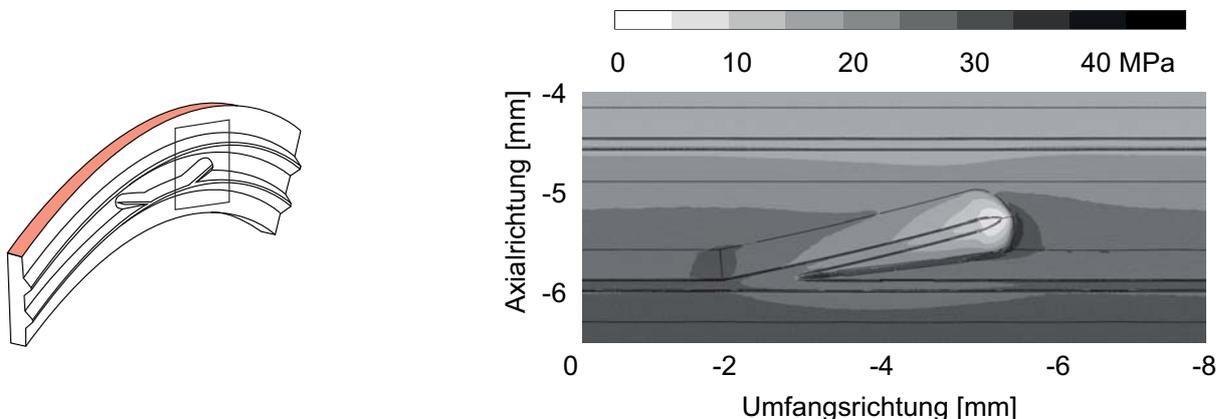


Abb. 12: Vergleichsspannung für Geometrievariante mit verkürzten Rückförderstrukturen

Alternativ kann die ursprüngliche Geometrie durch die Änderung der Höhe in Längsrichtung der Rückförderstruktur von dem ölseitigen zum luftseitigen Ring verbessert werden. Um den abrupten Übergang der erhabenen Rückförderstruktur in den glatten Bereich der PTFE-Manschette zu vermeiden, wird die Struktur entlang der Länge um 5° zurückgenommen. Abb. 13 stellt die dadurch erzielte geschlossene Linienpressung am luftseitigen Ring dar. Durch den geringen Spalt zwischen Rückförderstruktur und Welle nach der Montage und aufgrund der geschlossenen Pressungslinie am Ende der Struktur an dem ölseitigen Ring kann sich weiterhin ein Staudruck ausbilden und somit Leckage zurück in den Ölraum gefördert werden.

Abb. 14 veranschaulicht die Vergleichsspannung für die Geometrievariante mit abgesenkten Rückförderstrukturen. Die Spannungsinhomogenität in Längsrichtung der Rückförderstruktur ist an dieser Stelle deutlich geringer als bei der ursprünglichen Geometrie.

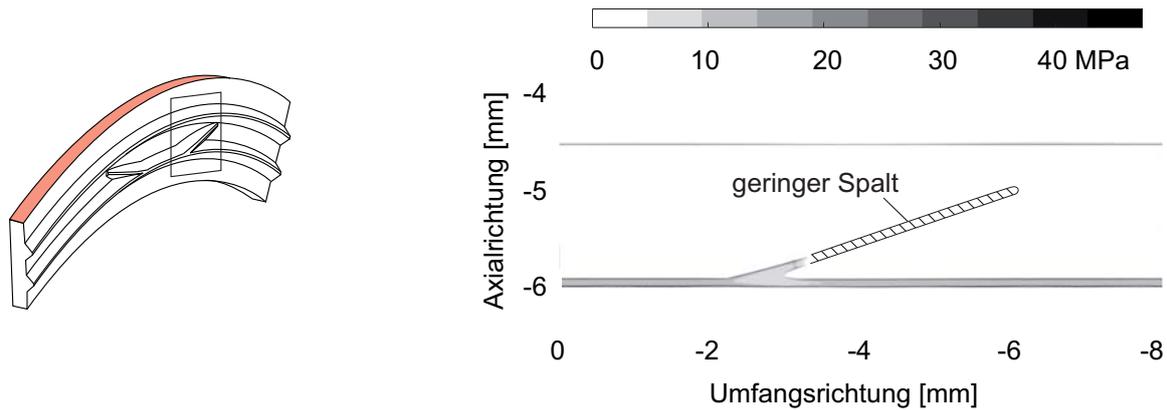


Abb. 13: Kontakt- und Vergleichsspannung für Geometrievariante mit abgesenkten Rückförderstrukturen

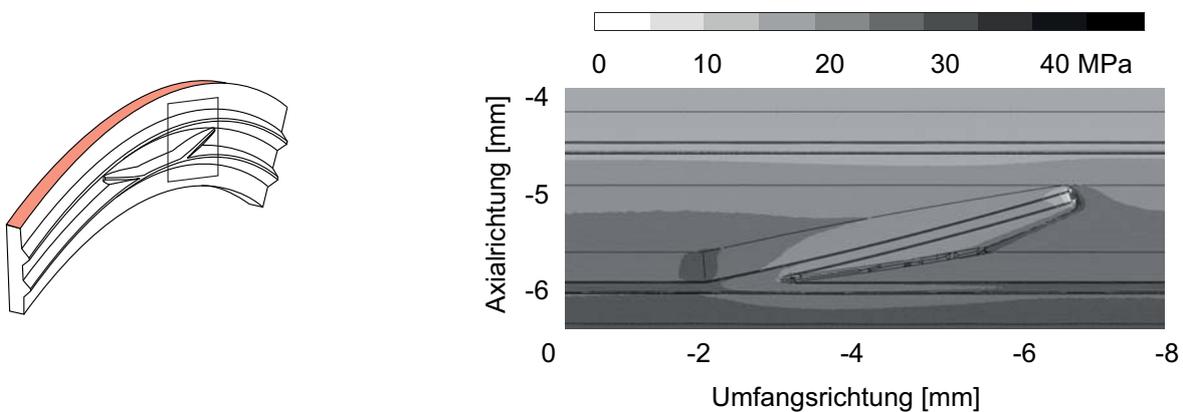


Abb. 14: Vergleichsspannung für Geometrievariante mit abgesenkten Rückförderstrukturen

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein Submodellansatz für die effiziente Analyse des Anlageverhaltens von PTFE-Manschetten mit bidirektionalen Rückförderstrukturen vorgestellt. Der Ansatz wird im Vergleich mit einem vollständigen Geometriemodell erfolgreich validiert und bietet bei 3D-Montagesimulationen eine Zeiteinsparung von 89 %. Am Beispiel der unterbrochenen Pressungslinie entlang des luftseitigen geschlossenen Ringes wird mit Hilfe des Submodellansatzes eine Geometrieoptimierung durchgeführt. Die weitere Anpassung der Rückförderstrukturen der PTFE-Manschette ist innerhalb einer Topographieoptimierung möglich.

## 5 Danksagung

Diese Arbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Forschungsprojekts HA 2251/28-1 „Untersuchung der Funktionsmechanismen von Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds“ gefördert.

## 6 Literatur

- [1] Schlipf, M.; Schuster, M.: "Konstruieren mit PTFE. Werkstoffe, Designkriterien, Verarbeitung, Systemlösungen" Verl. Moderne Industrie (Die Bibliothek der Technik, Bd. 300), 2007
- [2] Bauer, F.: "PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrinne – Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen", Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2008
- [3] Gölz, J.; Bauer, F.; Haas, W.: "PTFE Lip-Seals with Bi-directional Sealing Aids", 18th International Colloquium Tribology, Ostfildern-Nellingen, 10.-12. Januar 2012, Book of Synopses 2012, W. J. Bartz (Hrsg.) - TAE Esslingen
- [4] Gölz, J.; Bauer, F.; Haas, W.: "The problem is solved – bidirectional PTFE lip seals", 68th STLE Annual Meeting & Exhibition, Detroit, USA, 5.-9. Mai, 2013; Tagungs-CD
- [5] Gölz, J.; Bauer, F.; Haas, W.: "Experimental Study on the Sealing Mechanism of Bidirectional PTFE Lip Seals"; Tribology Transactions, Taylor & Francis, Volume 57, Issue 5, 2014; S. 867-870

# Gekoppelte Elektromagnetische Feldsimulation mit FEM und BEM

Lars Kielhorn, Thomas Rüberg, Jürgen Zechner

Tailsit GmbH, 8010 Graz, Austria, [www.tailsit.com](http://www.tailsit.com)

**Die TailSit GmbH ist ein Softwareunternehmen, das spezielle Berechnungssoftware aus den Bereichen Strukturmechanik, Elektrodynamik und Akustik entwickelt. Die hier behandelte FEM-BEM Formulierung wurde für die Robert Bosch GmbH, Deutschland, implementiert.**

## 1 Motivation

Die Neu- und Weiterentwicklung elektrischer Maschinen, Magnetsensoren oder Transformatoren ist ohne die virtuelle Produktauslegung mittels numerischer Simulation wirtschaftlich nicht mehr möglich. Die Grundlage der hierbei verwendeten Simulationen bilden dabei die Maxwell-Gleichungen, die die Phänomene des Elektromagnetismus beschreiben. Als Diskretisierungsverfahren kommt vorzugsweise die Finite Element Methode (FEM) zum Einsatz. Obwohl ursprünglich für elastomechanische Problemstellungen entwickelt, hat sich die Methode seit Mitte der 1980er Jahre auch für elektromagnetische Problemstellungen etabliert.

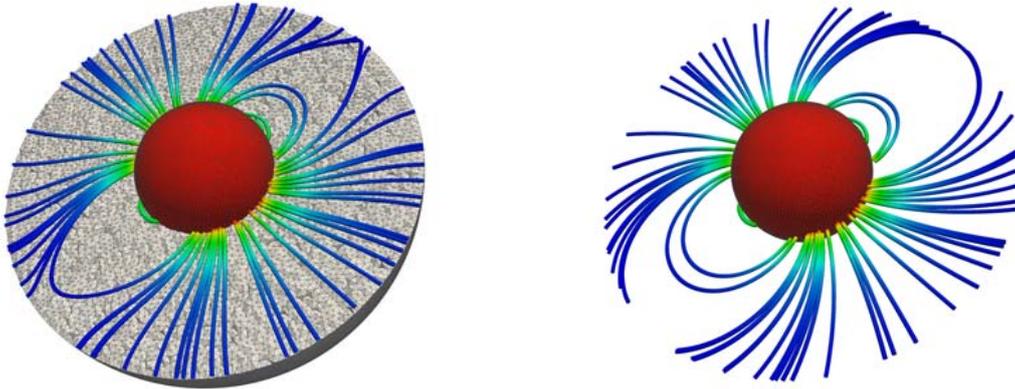
Elektromagnetische Felder durchdringen nicht nur die zu modellierenden Bauteile, sondern existieren auch in der Luftregion, die die Bauteile umgibt. Diese Charakteristik ist ein wesentlicher Unterschied zur Strukturmechanik und bedingt bei rein volumenbasierten Verfahren auch die Vernetzung des häufig unbegrenzten Luftgebiets. Dies führt zu folgenden Problemen:

- Am Rand des Diskretisierungsgebiets werden nicht-physikalische Randbedingungen eingepreßt. Der damit einhergehende Modellierungsfehler kann zu falschen Berechnungsergebnissen führen (vgl. Abb. 1a).
- Die Vernetzung des Luftgebiets verursacht einen zusätzlichen Modellierungsaufwand, der den effizienten Einsatz der FEM erheblich einschränken kann (vgl. Abb. 1a).
- Das Modell besteht sehr häufig aus sich bewegenden Bauteilen. Z.B. führt die veränderte Rotor/Stator-Stellung eines Elektromotors zu einer Neuvernetzung der dazwischen liegenden Luftschicht.

Um die Nachteile einer reinen FEM auszugleichen, behandelt dieser Beitrag die Kopplung von Finiten Element Methoden mit Randelementmethoden (BEM) im Kontext magnetostatischer Feldprobleme. Während Finite Element Methoden auf der Diskretisierung partieller Differentialgleichungen beruhen, stellen Randelementmethoden ein Verfahren zur Diskretisierung von Randintegralgleichungen dar. Diese beschreiben das Verhalten des unbeschränkten Außenraums durch Integralgleichungen, die lediglich auf der Oberfläche des Berechnungsgebiets definiert sind. Durch den Einsatz von Randelementmethoden gestaltet sich die Konstruktion der numerischen Methode zwar etwas aufwendiger, allerdings werden die Nachteile der FEM aufgehoben, da die BEM die Abklingbedingung der elektromagnetischen Felder exakt erfüllt. Ein Modellierungsfehler entfällt daher genauso wie eine Diskretisierung des Luftgebiets (vgl. Abb. 1b). Der größte Vorteil ist jedoch, dass mit der hier vorgestellten Methode bewegliche Bauteile automatisch erfasst werden, so dass dem Anwendungsingenieur größtmögliche Freiheiten in der Modellierung gewährt werden.

## 2 Die magnetostatische FEM-BEM Formulierung

Die hier vorgestellte FEM-BEM Formulierung basiert im Wesentlichen auf [8]. Während dort eine rigorose mathematische Herleitung für Wirbelstromprobleme erfolgt, soll an dieser Stelle die wesentliche Idee der Kopplung für die Magnetostatik präsentiert werden.



(a) Reiner FEM-Ansatz: Modellierungsfehler, zusätzlicher Diskretisierungsaufwand (b) FEM-BEM Ansatz: Exaktes Einprägen des Abklingverhaltens, minimaler Vernetzungsaufwand

Abbildung 1: Vergleich FEM und FEM-BEM für eine magnetisierte Kugel

Sei  $\mathbf{H}$  die magnetische Feldstärke und  $\mathbf{B}$  der magnetische Fluss. Die Grundgleichungen der Magnetostatik lauten

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \operatorname{curl} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \mathbf{B} = \mu(\mathbf{H} + \mathbf{M}). \quad (1)$$

Die erste Gleichung in (1) postuliert das Fehlen magnetischer Monopole während die zweite Gleichung die differenzielle Form des Ampèreschen Gesetzes darstellt. Dabei bezeichnet  $\mathbf{j}$  eine gegebene Stromdichte. Die verbleibende Gleichung ist das Materialgesetz mit der magnetischen Permeabilität  $\mu$  und gegebenenfalls einer vorgegebenen Magnetisierung  $\mathbf{M}$ . Durch Einführen des Vektorpotenzials  $\operatorname{curl} \mathbf{A} := \mathbf{B}$  reduzieren sich die Gleichungen aus (1) wegen  $\operatorname{div} \operatorname{curl} \mathbf{A} \equiv 0$  zu der Bestimmungsgleichung

$$\operatorname{curl} \mu^{-1} \operatorname{curl} \mathbf{A} = \mathbf{j} + \operatorname{curl} \mathbf{M}.$$

Mit der Notation  $(\mathbf{u}, \mathbf{v})_M := \int_M \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} \, dM$  gilt für diese Gleichung dann die folgende Variationsformulierung: *Finde  $\mathbf{A} \in H(\operatorname{curl}, \Omega)$ , so dass*

$$(\mu^{-1} \operatorname{curl} \mathbf{A}, \operatorname{curl} \mathbf{A}')_{\Omega} - (\gamma_N^- \mathbf{A}, \gamma_D^- \mathbf{A}')_{\Gamma} = (\mathbf{j}, \mathbf{A}')_{\Omega} + (\mathbf{M}, \operatorname{curl} \mathbf{A}')_{\Omega} \quad (2)$$

für alle Test-Funktionen  $\mathbf{A}' \in H(\operatorname{curl}, \Omega)$  gilt. Dabei bezeichnet  $\Omega$  ein abgeschlossenes Gebiet und  $\Gamma := \partial\Omega$  ist sein Rand. Der Raum  $H(\operatorname{curl}, \Omega)$  bezeichnet alle Funktionen, deren Rotation quadrat-integrierbar ist. Eine konforme Finite-Element-Diskretisierung führt dann auf die sogenannten Kanten- bzw. Nédéleclemente [12], wobei beide Begriffe synonym gebraucht werden. Für nähere Details und weiterführende theoretische Ausarbeitungen der FEM für die Maxwell-Gleichungen sei auf [11, 7] verwiesen.

Besonderes Augenmerk verdient der Randterm in Gl. (2). Mit dem nach außen gerichteten Normalenvektor  $\mathbf{n}$  bezeichnen die Operatoren  $\gamma_D \mathbf{A} := \mathbf{n} \times \mathbf{A} \times \mathbf{n}$  und  $\gamma_N \mathbf{A} := \operatorname{curl} \mathbf{A} \times \mathbf{n}$  die Dirichlet- und Neumannspuren des Vektorpotenzials  $\mathbf{A}$ . Darüber hinaus kennzeichnet die Hochstellung  $(\cdot)^-$  die Spuren bezogen auf das innere Gebiet  $\Omega$ . Motiviert durch das Abklingverhalten der magnetischen Felder wird in reinen FEM Formulierungen üblicherweise  $\gamma_N^- \mathbf{A} = 0$  gesetzt. Dieser Modellierungsfehler wird in der FEM-BEM Formulierung unter Ausnutzung der Transmissionsbedingungen für das magnetische Feld und für den magnetischen Fluss an der Oberfläche jedoch vermieden. Mit der Hochstellung  $(\cdot)^+$  für die äußeren Spurooperatoren lauten die Transmissionsbedingungen

$$\gamma_D^+ \mathbf{A} - \gamma_D^- \mathbf{A} = 0, \quad \mu_0^{-1} \gamma_N^+ \mathbf{A} - \mu^{-1} \gamma_N^- \mathbf{A} = 0.$$

Die Größe  $\mu_0$  ist die konstante Permeabilität des Vakuums bzw. der Luft. Mit Hilfe der Stratton-Chu Formel [2, Kap. 6.2] werden im nächsten Schritt die äußeren Spurooperatoren durch Randpotenziale ersetzt. Diese sind von der Form

$$(\mathbf{W}\mathbf{A})(\mathbf{x}) := \int_{\Gamma} G(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \mathbf{A}(\mathbf{x}') \, ds_{\mathbf{x}'}, \quad G(\mathbf{x} - \mathbf{x}') := \frac{1}{4\pi} \frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}. \quad (3)$$

Das Potenzial in Gl. (3) wird als vektorielles Einfachschichtpotenzial bezeichnet. Im Zuge der FEM-BEM-Kopplung treten noch zwei weitere Potenziale in Erscheinung. Im Einzelnen sind dies das skalare Einfachschichtpotenzial  $(V \operatorname{curl}_{\Gamma} \mathbf{A})(\mathbf{x}) := \int_{\Gamma} G(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \operatorname{curl}_{\Gamma} \mathbf{A}(\mathbf{x}') \, ds_{\mathbf{x}'}$  mit  $\operatorname{curl}_{\Gamma} \mathbf{A} := \operatorname{curl} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}$ , sowie das vektorielle

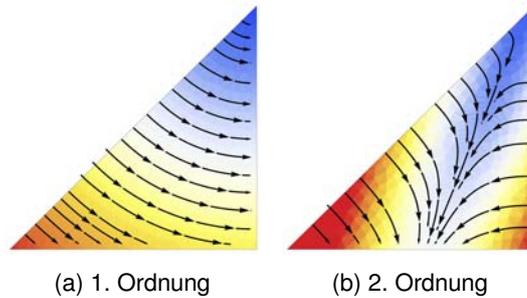


Abbildung 2: Kantenelemente für das Dreieckselement

Doppelschichtpotenzial  $(\mathbf{K}\mathbf{A})(\mathbf{x}) := \mathbf{curl}\mathbf{W}(\mathbf{n} \times \mathbf{A})(\mathbf{x})$ . Die endgültige Variationsformulierung der FEM-BEM Kopplung lautet dann: *Finde  $\mathbf{A} \in H(\mathbf{curl}, \Omega)$ ,  $\lambda \in H(\mathbf{div}_\Gamma 0, \Gamma)$ , so dass*

$$(\mu^{-1} \mathbf{curl} \mathbf{A}, \mathbf{curl} \mathbf{A}')_\Omega + (V \mathbf{curl}_\Gamma \gamma_D \mathbf{A}, \mathbf{curl}_\Gamma \gamma_D \mathbf{A}')_\Gamma - (\mathbf{K}^* \lambda, \gamma_D \mathbf{A}')_\Gamma = (\mathbf{j}, \mathbf{A}')_\Omega + (\mathbf{M}, \mathbf{curl} \mathbf{A}')_\Omega \quad (4)$$

$$(\mathbf{K} \gamma_D \mathbf{A}, \zeta)_\Gamma - (\mathbf{W} \lambda, \zeta)_\Gamma = 0$$

für alle Test-Funktionen  $\mathbf{A}' \in H(\mathbf{curl}, \Omega)$ ,  $\zeta \in H(\mathbf{div}_\Gamma 0, \Gamma)$  gilt. Dabei ist  $\lambda := \mu_0^{-1} \gamma_N^+ \mathbf{A}$  gerade die Tangentialkomponente des Magnetischen Feldes  $\mathbf{H}$  auf der Oberfläche. In Gl. (4) tritt mit dem adjungierten Doppelschichtpotenzial  $\mathbf{K}^*$  außerdem ein weiteres Randpotenzial auf. Auf seine Definition wird jedoch verzichtet, da sich in der späteren Diskretisierung die entsprechende Matrix als negative Transponierte des diskretisierten Doppelschichtpotenzials  $\mathbf{K}$  ergibt. Es muss nun noch näher auf den Raum  $H(\mathbf{div}_\Gamma 0, \Gamma)$  eingegangen werden. Dieser wurde eingeführt, um künstliche Integraloperatoren bzw. Eichpotenziale aus der Variationsformulierung zu entfernen. Er besteht aus allen Tangentialfeldern, die keine Oberflächendivergenz aufweisen. Wegen  $\mathbf{div}_\Gamma \mathbf{curl}_\Gamma \varphi \equiv 0$  können die Funktionen  $\lambda$  und  $\zeta$  daher durch die Oberflächenrotation skalarer Funktionen  $\varphi$  bzw.  $\varphi'$  ersetzt werden. Die Oberflächenrotation ist dabei als  $\mathbf{curl}_\Gamma \varphi := \mathbf{grad} \varphi \times \mathbf{n}$  definiert. Physikalisch erlaubt die Funktion  $\varphi$  die Interpretation als magnetisches Potenzial.

Es sei angemerkt, dass die FEM-BEM Formulierung die komplette Flexibilität der FEM erhält. Zwar gelten die Integraloperatoren nur für lineare Materialien, aber da sie lediglich den unbeschränkten Außenraum abbilden, haben sie keinen Einfluss auf die Modellierung des möglicherweise nicht-linearen Innenraums. Nicht-Linearitäten im Material werden auch weiterhin einzig und allein über die FEM-Bilinearform  $(\mu^{-1} \mathbf{curl} \mathbf{A}, \mathbf{curl} \mathbf{A}')_\Omega$  abgebildet.

Eine konforme Galerkin-Diskretisierung der Variationsformulierung (4) erfordert die Verwendung von Kantenelementen. Diese Funktionen sind für 3D-Elementtypen in [1] zu finden und wurden hier für Tetraeder, Hexaeder, Prismen sowie für Pyramiden implementiert. Die Funktionen für 2D-Oberflächenelemente ergeben sich dann aus entsprechenden Spurbildungen. Illustrativ seien die Funktionen für das Dreieck in Abb. 2 dargestellt. Bei den Kanten-Funktionen sind die die Stetigkeitsbedingungen dahingehend abgeschwächt, dass lediglich die Tangentialkomponenten des Vektorfeldes über Elementkanten bzw. über Elementflächen stetig sind.

Mittels der so definierten Ansatzräume ergibt sich folgendes Gleichungssystem

$$S \underline{x} = \underline{g}, \quad S := \begin{bmatrix} A + R^T V R & R^T K^T \\ K R & -W \end{bmatrix}, \quad \underline{x} := \begin{bmatrix} \underline{a} \\ \underline{\varphi} \end{bmatrix}, \quad \underline{g} = \begin{bmatrix} f(\mathbf{j}, \mathbf{M}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

In Gl. (5) korrespondieren die Matrizen  $A$ ,  $V$ ,  $K$  und  $W$  zu den diskretisierten Operatoren aus der Variationsformulierung (4). Die Matrix  $R$  stellt eine Restriktionsmatrix dar, die aus den Volumenfreiheitsgraden die Oberflächenfreiheitsgrade extrahiert. Die unbekannt Vektoren  $\underline{a}$  und  $\underline{\varphi}$  entsprechen den Koeffizienten der gesuchten Felder  $\mathbf{A}$  und  $\lambda := \mathbf{curl}_\Gamma \varphi$ . Das Gleichungssystem (5) ist symmetrisch aber nicht positiv-definit. Direkte Lösungsverfahren scheiden von vornherein aus. Zum Einen ist das Gleichungssystem singulär, da das Vektorpotenzial  $\mathbf{A}$  wegen  $\mathbf{curl} \mathbf{A} = \mathbf{curl}(\mathbf{A} + \mathbf{grad} \zeta)$  nur bis auf Gradientenfelder eindeutig bestimmt ist. Zum Anderen verbietet die effiziente Diskretisierung der Randpotenziale direkte Lösungsverfahren. Wir wenden uns daher iterativen Lösungsverfahren zu und müssen im Zuge dessen auf die Wahl einer entsprechenden Vorkonditionierungsstrategie eingehen. Ein effizienter Vorkonditionierer für das System ist durch

$$P_S^{-1} := \begin{bmatrix} P_{AMS}^{-1} & \\ & P_W^{-1} \end{bmatrix}$$

gegeben. Dabei ist  $P_{AMS}^{-1}$  ein AMS-Vorkonditionierer, der auf algebraischen Mehrgitter-Verfahren in Verbindung mit *auxiliary Maxwell space methods* basiert [4]. Der Vorkonditionierer  $P_W^{-1}$  beruht auf Ideen des *operator preconditioning*. Hierbei besitzt der Vorkonditionierer die entgegengesetzten Abbildungseigenschaften wie der Operator, auf den er anzuwenden ist [13, Kap. 2.6]. Im Falle von Ansätzen höherer Ordnung verwenden wir additive Unterraumkorrekturen [16], die durch das Verwenden hierarchischer Ansatzräume ermöglicht werden. Aufgrund der fehlenden positiven Definitheit des Gleichungssystems kommt das MINRES-Verfahren als iteratives Lösungsverfahren zum Einsatz [14].

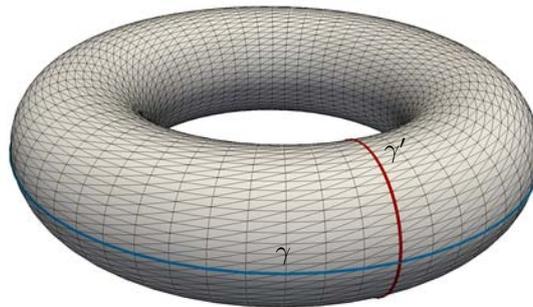


Abbildung 3: Fundamentalzyklen  $\gamma$  (blau) und  $\gamma'$  (rot) auf einem mehrfach zusammenhängendem Gebiet

Die Konstruktion des numerischen Verfahrens ist nun beinahe abgeschlossen. Allerdings bleibt noch ein letztes Problem zu klären. In industriellen Anwendungen bestehen die Berechnungsmodelle in der Regel aus mehrfach zusammenhängenden Gebieten. Durch den Ansatz  $\lambda = \mathbf{curl}_\Gamma \varphi$  wurde de-facto ein skalares Potenzial als unbekanntes Feld für den Außenraum eingeführt. Letztlich gilt damit für das magnetische Feld die Darstellung  $\mathbf{H} = -\mathbf{grad} \varphi$ . Das Ampéresche Gesetz lautet in seiner integralen Form

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\ell = J, \tag{6}$$

wobei  $L$  einen beliebigen, aber geschlossen, Pfad darstellt und  $J$  den Gesamtstrom repräsentiert. In Abb. 3 ist schematisch eine Leiterschleife dargestellt, in der ein Gesamtstrom  $J \neq 0$  fließt. Ersetzt man im Ampéreschen Gesetz nun  $\mathbf{H}$  durch  $\mathbf{grad} \varphi$  ergibt sich das Ringintegral über den Gradienten für beliebige Pfade  $L$  zu Null. Dieses Ergebnis ist offensichtlich falsch. Begründet ist dieser Widerspruch in der Tatsache, dass Potenzialansätze bei mehrfach zusammenhängenden Gebieten als Ansatz für das magnetische Feld  $\mathbf{H}$  unvollständig sind. Daher wird der Ansatz für  $\lambda$  auf

$$\lambda := \mathbf{curl}_\Gamma \varphi + \sum_{n=1}^N \alpha_n \eta_n \tag{7}$$

erweitert. In Gl. (7) bezeichnen die Funktionen  $\eta_n$ ,  $n = 1, \dots, N$  Vektorfelder, die entlang der sogenannten relevanten Fundamentalzyklen  $\gamma_n$  aufgebracht werden. Die Koeffizienten  $\alpha_n$  sind die zugehörigen Freiwerte. Im obigen Beispiel (Abb. 3) würde diese Funktion also entlang des Zyklus  $\gamma$  aufgebracht werden. Wesentliches Merkmal ist nun, dass  $\gamma$  den Zyklus  $\gamma'$  schneidet. Ferner ist  $\eta$  so gewählt, dass neben  $\mathbf{div}_\Gamma \eta \equiv 0$  auch  $\oint_{\gamma'} \mathbf{n} \times \eta \cdot d\ell = 1$  gilt. Damit steht der Ansatz (7) nicht im Widerspruch zum Ampéreschen Gesetz aus Gl. (6). Die Anzahl  $N$  der relevanten Zyklen ist durch die erste Bettizahl  $\beta_1(\Gamma)$  gegeben, die die Anzahl der zweidimensionalen Löcher beschreibt und es gilt  $N = \frac{1}{2} \beta_1(\Gamma)$ . Die Bestimmung der relevanten Fundamentalzyklen  $\gamma_n$ , die zum Einprägen der Funktionen  $\eta_n$  notwendig sind, ist manuell nicht durchführbar. Es sei daher auf die Arbeit [9] verwiesen, in der ein Algorithmus zur Berechnung der relevanten Pfade angegeben wird. Das Einsetzen des Ansatzes (7) in die Variationsformulierung (4) und anschließende Galerkin-Diskretisierung resultiert letztlich in der modifizierten Systemmatrix

$$\tilde{S} := S - \hat{S}_\eta, \quad \text{rank}(\hat{S}_\eta) = N, \quad N \ll \dim(S). \tag{8}$$

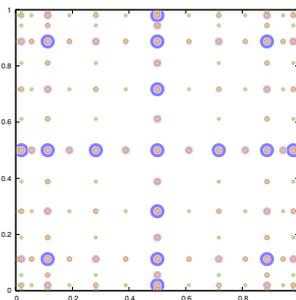
Der Einbau der Funktionen  $\eta_n$  kann demnach als eine Rang- $N$ -Störung des Ausgangssystems aufgefasst werden. Damit bleiben sowohl die Vorkonditionierungs- als auch die Löserstrategie unangetastet.

### 3 Implementierung von Randelementmethoden

Wie gezeigt, besitzen Randelementmethoden den großen Vorteil, dass Außenraumprobleme ohne Modellierungsfehler behandelt werden können. Allerdings können die Nachteile der Methode ebenso wenig verschwiegen werden. So eignen sich Randelementmethoden grundsätzlich nur für lineare Problemstellungen. Das ist in diesem Zusammenhang aber kein Problem, da der Außenraum lediglich die lineare Luftregion umfasst.

Ein weiteres Problem stellt die numerische Integration der Kernfunktionen dar. Für  $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}'$  ist die Kernfunktion  $G(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$  aus Gl. (3) singularär. Damit müssen für identische und benachbarte Randelemente spezielle Quadraturformeln angewendet werden. Für das Galerkin-Verfahren bieten sich die numerischen Quadraturregeln nach [3] an.

Ferner handelt es sich um eine Quadratur über ein 4-dimensionales Referenzgebiet. Mit Hilfe geschachtelter Quadraturregeln [15] auf sogenannten *sparse grids* [5] gelingt es, diese Quadraturen effizient auszuführen. Die Abb. 4a zeigt die geschachtelte Verteilung der Quadraturpunkte auf dem Referenzgebiet  $(0, 1)^2$ . In Tab. 4b wird eine geschachtelte Quadratur basierend auf eindimensionalen Gauss-Patterson Regeln mit der klassischen Gauss-Legendre Quadratur für das Integral  $I[G] := \int_{(0,1)^4} G(\mathbf{x} - \mathbf{x}') dx' dx$  verglichen. Für einen vergleichbaren Quadraturfehler benötigt die Gauss-Patterson Quadratur deutlich weniger Auswertungen  $N_{GP}$  als die klassische Gauss-Legendre Quadratur ( $N_{GL}$ ). Darüber hinaus können durch die Einbettungen der Gauss-Regeln die Auswertungen eines gröbereren Gitters für die Berechnungen auf dem feineren Gitter wiederverwendet werden. Unter Verwendung eines entsprechenden Fehlerschätzers bedeutet dies neben einem deutlichen Effizienz- auch einen Robustheitsgewinn bei den singularären oder fast-singularären Integrationen.



$ (Q_{GP} - I)[f] $	$N_{GP}$	$ (Q_{GL} - I)[f] $	$N_{GL}$
0.00173436	72	0.000260374	128
1.53943e-05	264	1.53943e-05	648
9.51828e-07	648	8.69854e-07	1152
4.16051e-10	1544	9.82676e-10	10368

(a) Geschachtelte Gauss-Patterson Quadratur auf einem Sparse Grid im Intervall  $(0, 1)^2$  (b) Sparse-Grid Gauss-Patterson Quadratur (GP) vs. Tensor-Produkt Gauss-Legendre (GL)

Abbildung 4: Sparse-Grid Quadratur

Die bisher beschriebenen Schwierigkeiten bei der Implementierung der Randelementmethode werden letztlich jedoch durch die quadratische Komplexität der Methode in den Hintergrund gedrängt. Die Reduktion des physikalischen Problems auf die Oberfläche gelingt nur durch das Einführen nicht-lokaler Integraloperatoren. Eine naive Diskretisierung dieser Operatoren führt daher zu vollbesetzten Systemmatrizen. Für  $M$  Oberflächenfreiheitsgrade ist damit das Aufstellen, Speichern sowie das Anwenden des diskreten Operators jeweils von der Ordnung  $\mathcal{O}(M^2)$ . In den vergangenen Jahrzehnten wurden jedoch Methoden entwickelt, die den Aufwand der BEM deutlich reduzieren können. Bei den *schnellen Randelementmethoden* besteht die wesentliche Idee darin, die Kernfunktion  $G$  über die Produktdarstellung

$$G(\mathbf{x} - \mathbf{x}') = \sum_{p=0}^{\infty} R_p(\mathbf{x})S_p(\mathbf{x}') \approx \sum_{p=0}^P R_p(\mathbf{x})S_p(\mathbf{x}') \tag{9}$$

geeignet zu approximieren. Gelingt diese Darstellung, so können die Integrationen in  $\mathbf{x}$ - und  $\mathbf{x}'$ -Richtung aufgespalten werden. Leider ist die Approximation der Funktion  $G(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$  nicht global, sondern lediglich lokal in Regionen möglich, in denen die Punkte  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{x}'$  einen hinreichend großen Abstand voneinander haben. Um diese Regionen zu identifizieren, wird das Gitter daher rekursiv in Clusterbäume zerlegt. Dabei können verschiedene Zerlegungsstrategien gewählt werden. Für die Zerlegung von Oberflächen sind Binärbäume und Octrees die gebräuchlichsten Datenstrukturen. In dieser Arbeit wird die Adaptive Kreuzapproximation (ACA) [6] verwendet, für die sich das Arbeiten mit Binärbäumen bewährt hat. Die Abb. 5a zeigt beispielhaft eine solche Clusterung. Die verschiedenen Cluster sind dabei unterschiedlich eingefärbt. Für Cluster,

die einen hinreichend großen Abstand zueinander haben, ist nun die Approximation nach Gl. (9) möglich. Cluster, für die das nicht gilt, müssen gegebenenfalls nochmals unterteilt werden. Algebraisch ist die Gl. (9) äquivalent zu einer Niedrigrangapproximation. Die ACA-Methode erstellt derartige Niedrigrangapproximationen für zulässige Clusterpaare. Die resultierende Matrixstruktur ist dann eine *data-sparse* Darstellung einer vollbesetzten Matrix. Solche Matrizen werden als *H*-Matrizen bezeichnet. Die Abb. 5b zeigt schematisch die *H*-Matrixstruktur. Grüne Blöcke kennzeichnen dabei Niedrigrangapproximationen während die roten Blöcke diejenigen Bereiche kennzeichnen, in denen keine Approximation durchgeführt werden konnte. Es ist klar zu erkennen, dass sich diese Bereiche um die Diagonale der Matrix herum konzentrieren. Die Einträge stammen aller Regel nach aus nah beieinander liegenden Elementen, für die keine Approximation möglich ist. Durch die Verwendung der Adaptiven Kreuzapproximation wird die ursprüngliche quadratische Komplexität von  $\mathcal{O}(M^2)$  auf eine quasi-lineare Komplexität von  $\mathcal{O}(M \log M)$  reduziert. Dies gilt sowohl für das Aufstellen, das Speichern als auch für das Anwenden der *H*-Matrix. Erst diese Komplexitätsreduktion ermöglicht das Anwenden von Randelementen im industriellen Kontext.

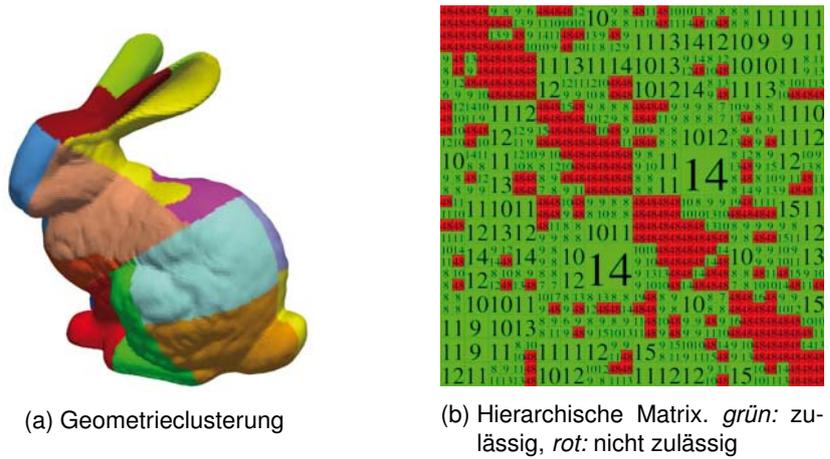


Abbildung 5: Wesentliche Bestandteile schneller Randelementmethoden

## 4 Ergebnisse

Im Folgenden wird die FEM-BEM Formulierung anhand ausgewählter Beispiele gezeigt. In Kap. 4.1 wird die Methode verifiziert und gegen eine reine FEM-Formulierung verglichen. In Kap. 4.2 wird die Effizienz der Vorkonditionierung untersucht. Schließlich wird in Kap. 4.3 die Methode auf ein industrierelevantes Modell angewendet. Dieses wird hier lediglich mit linearem Materialverhalten modelliert. Auf die Behandlung nicht-linearer Materialien wird verzichtet. Allerdings sei angemerkt, dass solche Simulationen leicht mit den klassischen Methoden möglich sind, da lediglich die FEM-Operatoren entsprechend modifiziert werden müssen.

### 4.1 Kugel mit konstanter Magnetisierung

Auch wenn es etwas akademisch erscheinen mag, wird die Verifikation der Methode zunächst an einem möglichst einfachen Beispiel durchgeführt. Hierzu betrachten wir eine Kugel  $\Omega := \{\mathbf{x}: |\mathbf{x}| \leq r\}$  mit konstanter Magnetisierung  $\mathbf{M} = 1\mathbf{e}_z$ . Die Kugel hat einen Radius von  $r = 1$  und besitzt die Permeabilität  $\mu_0$  des Vakuums. Für diese Problem kann der magnetische Fluss analytisch zu  $\mathbf{B} = 2/3\mu_0\mathbf{e}_z$  bestimmt werden [10, Kap. 5.10]. Als Validierungsgröße wird das Energiemaß  $\|\mathbf{B}\|_2^2 := (\mathbf{B}, \mathbf{B})_\Omega$  benutzt. Für die exakte Lösung berechnet es sich zu  $\|\mathbf{B}\|_2 = (\frac{16}{27}\pi)^{1/2}\mu_0 \approx 1.3644\mu_0$ . Neben der analytischen Lösung wird die FEM-BEM Formulierung auch gegen reine FE-Methoden verglichen. Für die zusätzliche Modellierung der Luft wird dabei ebenfalls eine Kugel mit Radius  $R > r$  gewählt, so dass für das FEM-Gebiet  $\hat{\Omega}_R := \Omega \cup \{\mathbf{x}: r < |\mathbf{x}| \leq R\}$  gilt. Die Abb. 6a trägt die Maße  $\|\mathbf{B}\|_2$  gegen die Anzahl der FEM-Freiheitsgrade für unterschiedliche Gitter auf. Die rote, horizontale Linie markiert die analytische Lösung. Es ist klar zu erkennen, dass die FEM-BEM Formulierung bereits für sehr grobe Gitter gute Lösungen liefert und dass diese bei Verfeinerung sehr schnell gegen die exakte Lösung streben. Die Lösung für das gröbste Gitter ist in Abb. 6b dargestellt. Dieses Gitter

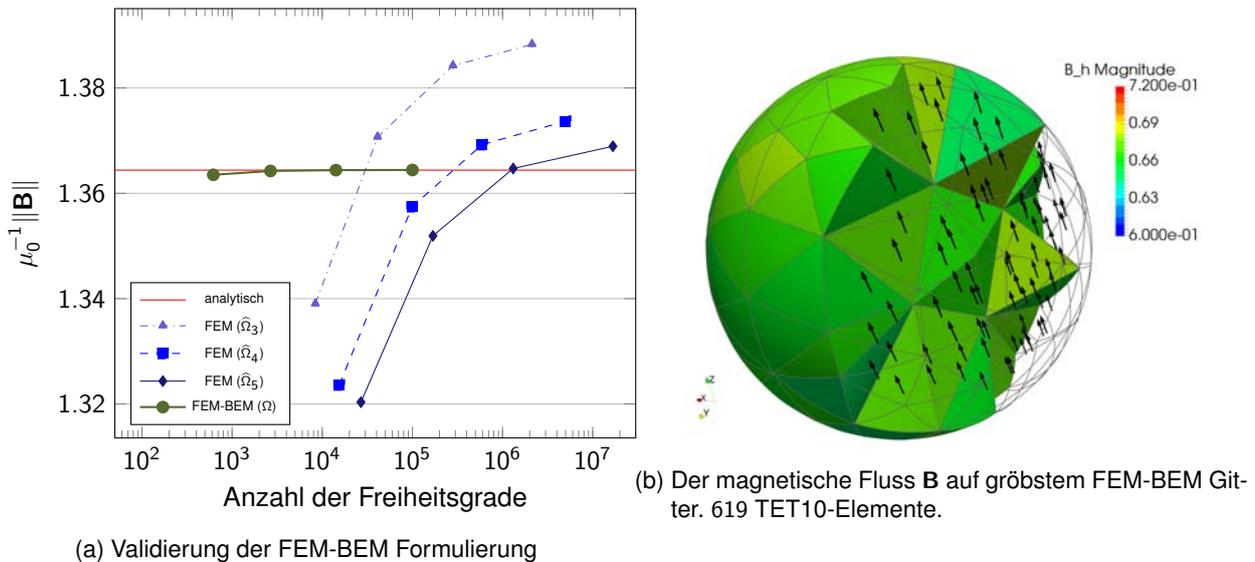


Abbildung 6: Ergebnisse für die magnetisierte Kugel

besteht aus 377 gekrümmten Tetraedern und weist insgesamt 619 FEM- und 113 BEM-Freiheitsgrade auf. Klar zu erkennen ist, dass der magnetischen Fluss  $\mathbf{B}$  bereits für dieses grobe Gitter sehr gut approximiert wird.

Anders sieht die Situation bei den reinen FEM-Formulierungen aus. Es werden drei verschiedene FEM-Gebiete  $\hat{\Omega}_R$  mit den Radien  $R = 3, 4, 5$  betrachtet. An den Gebietsrändern  $\partial\hat{\Omega}_R$  werden jeweils die Tangentialkomponenten des magnetischen Flusses auf Null gesetzt. Dies entspricht homogenen Neumann-Randbedingungen. Die Abb. 1a aus Kap. 1 zeigt die Feldlinien von  $\mathbf{B}$  für die feinste Diskretisierung des FEM-Gebiets  $\hat{\Omega}_3$ . Der qualitative Einfluss des Modellierungsfehlers ist klar zu erkennen. Besonders ausgeprägt ist er in Äquatornähe, wo die Feldlinien widernatürlich normal zum Rand des Gebiets auslaufen. Zwar bessert sich das Verhalten der FEM-Lösungen mit größer werdenden Radien  $R$ , aber eine Konvergenz gegen die exakte Lösung ist natürlich nicht festzustellen. Beispielsweise besteht das feinste Gitter für das größte FE-Gebiet  $\hat{\Omega}_5$  aus mehr als 14 Millionen Finiten Elementen. Es enthält damit ca. 16.7 Millionen Freiheitsgrade und dennoch ist die Abweichung von  $\|\mathbf{B}\|_2$  gegenüber der korrekten Lösung noch immer deutlich.

### 4.2 Magnetischer Kern umgeben von einem Ringstrom

Nachdem die FEM-BEM Formulierung verifiziert wurde, soll nun die Effizienz des Lösers untersucht werden. Als Maß für die Effizienz werden hier die Anzahl der Iterationen für verschiedene Gitterverfeinerungen betrachtet. Idealerweise führt ein optimaler Vorkonditionierer zu annähernd konstanten Iterationszahlen. Außerdem sollte sich der Vorkonditionierer robust gegenüber Materialsprüngen zeigen.

Wir betrachten ein Modell bestehend aus einem Zylinder und einem Torus. Der Zylinderradius beträgt  $R = 1$  und seine Höhe ist  $H = 3$ . Der Außenradius des Torus ist  $R_A = 4$ , sein Innenradius ist mit  $R_I = 0.5$  gegeben. Er stellt eine einfache Leiterspule dar, in der ein Ringstrom  $\mathbf{j} = 1\mathbf{e}_\varphi$  fließt. Die Permeabilität der Spule ist  $\mu_0$ . Der Zylinder stellt einen magnetischen Kern dar. Er wird mit den Permeabilitäten  $\mu_r = 10^0, 10^2, 10^5$  modelliert. Dabei ist  $\mu_r$  die relative Permeabilität  $\mu_r := \mu/\mu_0$ .

$L_j$	$h$	$N_{\text{FEM}}$	$N_{\text{BEM}}$
1	0.60	5 402	706
2	0.39	27 251	2 872
3	0.19	166 748	12 049

(a) Netzweite  $h$  & FEM-, BEM-Freiheitsgrade

$\mu_r$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
$10^0$	47	51	63
$10^2$	78	88	117
$10^5$	84	92	119

(b) Iterationszahlen

Tabelle 1: Gitterkonfigurationen sowie Iterationszahlen für unterschiedliche Netzweiten und Permeabilitäten

Die Tab. 1a listet die Netzweiten sowie die Anzahl der FEM- und BEM-Freiheitsgrade für drei verschiedene

Gitter  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  auf. Die Abb. 7 zeigt die berechneten FEM- und BEM-Felder für das feinste Gitter und für die höchste Permeabilität  $\mu_r = 10^5$ . In der Tab. 1b sind die Iterationszahlen für die verschiedenen Gitter und für variierende Permeabilitäten angegeben. Dabei wurde jeweils eine relative Lösergenauigkeit von  $10^{-8}$  gewählt. Für eine gegebene Permeabilität ist dabei eine unwesentliche Abhängigkeit des Lösers von der Netzweite festzustellen. Ähnlich verhält es sich mit dem Einfluss springender Materialkoeffizienten. Mit größer werdenden Permeabilitäten steigen auch die Iterationszahlen leicht an. Allerdings ist der Sprung der Iterationszahlen von  $\mu_r = 1$  auf  $\mu_r = 100$  deutlich ausgeprägter als der größere Sprung von  $\mu_r = 100$  auf  $\mu_r = 10^5$ . Insgesamt zeichnet sich die gewählte Vorkonditionierungsstrategie dadurch aus, dass die Iterationszahlen nur eine geringe Abhängigkeit von der Netzweite und dem Materialparameter aufzeigen.

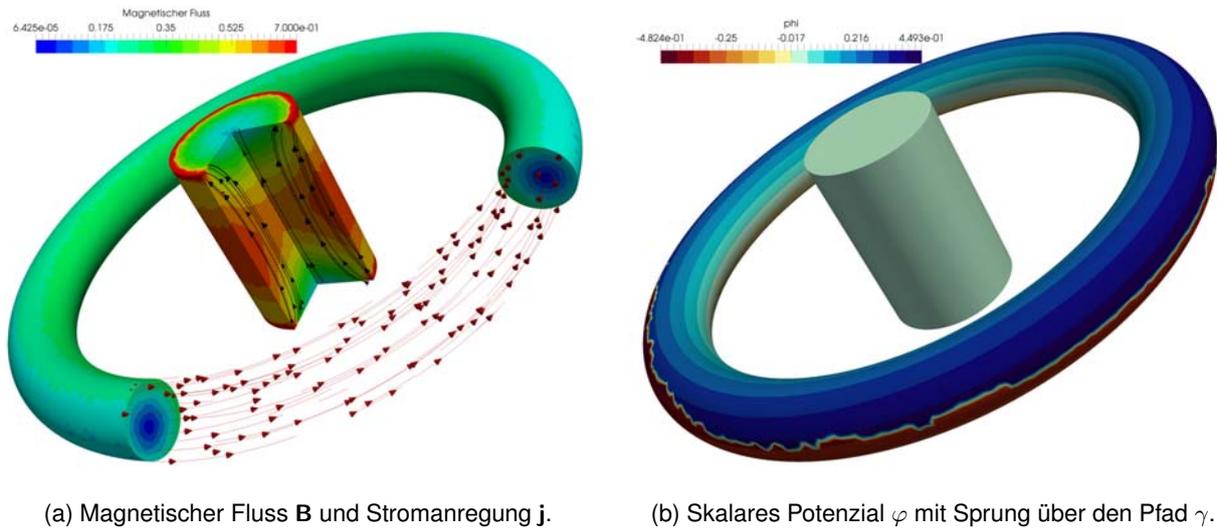


Abbildung 7: Magnetischer Fluss  $\mathbf{B}$  und skalares Potenzial  $\varphi$  für die Ringspule ( $\mu_r = 10^5$  im Kern).

### 4.3 Magnetventil

Als praxisrelevantes Beispiel wird nun ein Magnetventil betrachtet. Das Modell wurde mit freundlicher Genehmigung der Robert Bosch GmbH zur Verfügung gestellt. Wie bereits erwähnt, eignet sich die FEM-BEM-Formulierung besonders bei Modellen, die bewegliche Bauteile enthalten. Die Systemmatrix  $\tilde{S}$  aus Gl. (8) kann dann für  $m$  Bauteile wie folgt partitioniert werden

$$\tilde{S} = \begin{bmatrix} \tilde{S}_{0,0} & \dots & \tilde{S}_{0,m-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{S}_{0,m-1}^T & \dots & \tilde{S}_{m-1,m-1} \end{bmatrix}.$$

Ändert sich nun die geometrische Position eines Bauteils  $\hat{m}$  müssen lediglich die Nebendiagonalblöcke  $\tilde{S}_{\hat{m},i}$  mit  $i = 0, \dots, m - 1$  und  $i \neq \hat{m}$  neu erstellt werden. Gerade in Verbindung mit schnellen Randelementmethoden können diese Aktualisierungen der Systemmatrix sehr effizient durchgeführt werden. Da die Bauteile getrennt voneinander sind, weisen die entsprechenden Nebendiagonalblöcke keine Singularitäten auf, wodurch die Matrizen  $\tilde{S}_{\hat{m},i}$  in der Regel sehr gut komprimierbar sind und daher speicher- und zeiteffizient aufgestellt werden können. Die Abb. 8 zeigt ein Magnetventil bestehend aus drei Teilgebieten. Im Einzelnen handelt es sich dabei um eine stromführende Ringspule, ein Gehäuse sowie eine Armatur. Letztere ist für das Öffnen und Schließen des Ventils verantwortlich. In Abb. 8a ist das Magnetventil fast geschlossen während die Abb. 8b das Ventil in geöffneter Position zeigt.

Das Berechnungsmodell besteht aus 2.4 Millionen FEM Freiheitsgraden und 105 000 BEM Freiheitsgraden. Ferner besteht das Modell aus unterschiedlichen Materialien. Die relative Lösertoleranz beträgt  $10^{-5}$  und die Anzahl der notwendigen Iterationen beträgt 289. Die Aktualisierung der Systemmatrix  $\tilde{S}$  erfordert lediglich ein Neuberechnen der Interaktionen *Armatur-Ringspule* und *Armatur-Gehäuse*. Die zugehörigen BEM-Matrizen werden außerdem durch Verwendung des ACAs auf ca. 0.5% bzw. 0.9% ihrer eigentlichen Größe komprimiert und die Berechnungszeit ist dementsprechend gering. Die Iterationen können ebenfalls signifikant reduziert

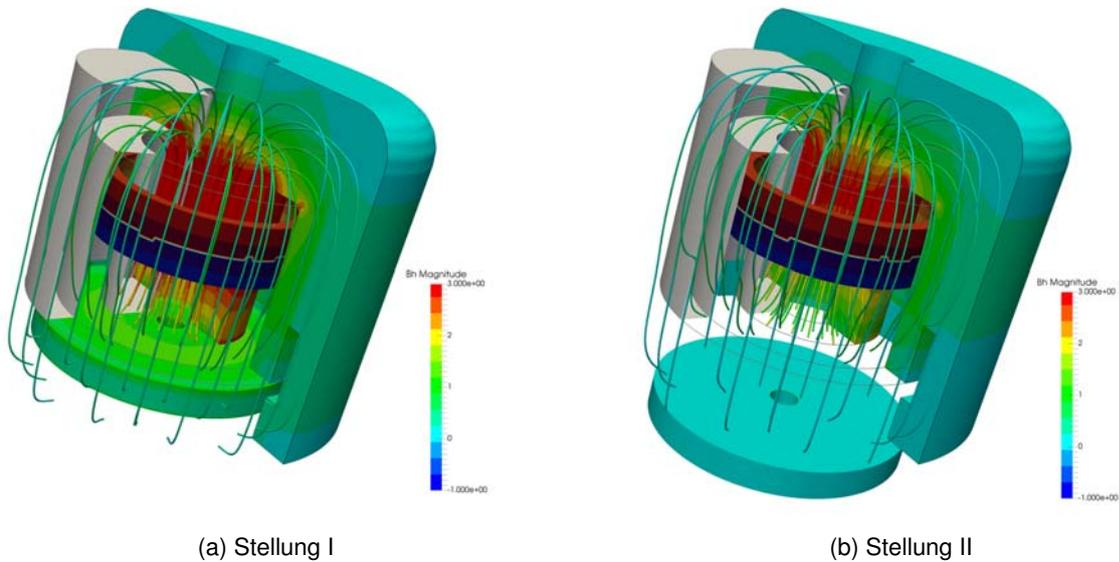


Abbildung 8: Magnetventil: Magnetischer Fluss  $\mathbf{B}$  und skalares Potenzial  $\varphi$  in der Ringspule.

werden, da die Lösung des ersten Lastschritts als Startvektor verwendet werden kann. Die Anzahl der notwendigen Iterationen beträgt für den zweiten Lösungsvektor 156.

#### 4.4 Periodizitäten

In der Praxis weisen elektrische Maschinen einen hohen Grad an räumlicher Periodizität auf. Um die Modellgrößen zu reduzieren, müssen diese Periodizitäten auch im numerischen Modell umgesetzt werden. Während Periodizitäten in der Finiten-Element-Methode sehr leicht eingebaut werden können, gestaltet sich ihre Behandlung für Randelementmethoden wiederum etwas aufwendiger. Beispielhaft behandeln wir hier eine Rotationssymmetrie wie sie in Abb. 9a schematisch dargestellt ist. Wir nehmen an, dass die elektrische Maschine in  $n$  gleiche Teilgebiete gegliedert werden kann. Aufgrund der Nicht-Lokalität der Integraloperatoren ergeben sich für die BEM-Potenziale dann zyklische Blockmatrizen, so dass für das Matrix-Vektor-Produkt  $\underline{y}_k = \sum_{i=0}^{n-1} V_{k-i} \underline{x}_i$  mit  $k = 0, \dots, n-1$  gilt. Dabei werden die Indizes  $k - i$  zyklisch wieder in den Indexbereich abgebildet. Nehmen wir eine symmetrische Belastung der Maschine an, dann gilt  $\underline{x}_0 = \underline{x}_1 = \dots = \underline{x}_{n-1} =: \underline{x}$ . Damit kann ein periodischer BEM-Operator  $\tilde{V}$  wie folgt definiert werden

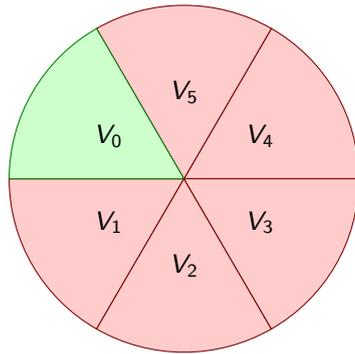
$$\underline{y} = \tilde{V} \underline{x}, \quad \tilde{V} := \sum_{i=0}^{n-1} V_{n-1-i}, \quad V_\ell := V_{0\ell}. \quad (10)$$

Der Term  $V_{0\ell}$  drückt aus, dass sich die Matrix aus der Interaktion des 0-ten mit dem  $\ell$ -ten Teilgebiet zusammensetzt. Die Ausnutzung von Periodizitäten stellt sich auch für die Anwendung schneller Randelementmethoden als vorteilhaft heraus, da periodische Gebiete per Konstruktion bereits gut separiert sind und Singularitäten damit lediglich an den Rändern des periodischen Gebietes auftreten können.

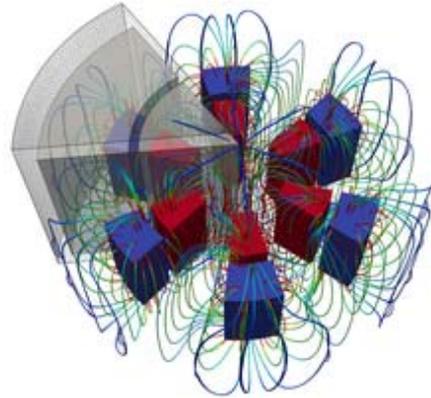
Da hier ein symmetrisches Galerkin-Verfahren Verwendung findet, kann die Summation in Gl. (10) effizienter durchgeführt werden. In Abb. 9a gilt beispielsweise  $V_5 = V_1^T$  und  $V_4 = V_2^T$ . Die Abb. 9b zeigt einen einfachen Motor, der mittels der beschriebenen Periodizitäten simuliert wurde.

#### 5 Fazit

In dieser Arbeit wurde erstmals die Implementierung einer mathematisch fundierten FEM-BEM-Formulierung präsentiert und auf relevante Beispiele der Ingenieurspraxis angewandt. Die Kopplung basiert auf einer konsistenten Galerkin-Diskretisierung mittels Kantenfunktionen. Da die Größe der auftretenden Systemmatrizen den Einsatz direkter Löser verbietet, wurde ein iterativer Löser zusammen mit einer entsprechenden Vorkonditionierungsstrategie vorgestellt. Die Methode wurde anhand einfacher Testbeispiele verifiziert und anschließend auf ein industrielles Modell angewandt, bei dem die Vorteile der Methode augenscheinlich sind:



(a) Schematische Darstellung der Symmetrien. Grün: *master-grid*, Rot: *slave-grids*



(b) Einfaches Motorenbeispiel. Darstellung des magnetischen Flusses  $\mathbf{B}$

Abbildung 9: Behandlung von Symmetrien

Da keinerlei Luftspalte sowie Außenraumgebiete vernetzt werden müssen, wird der Modellierungsaufwand minimiert. Außerdem werden auch bewegliche Bauteile ohne zusätzlichen Aufwand simuliert. Periodizitäten werden ebenfalls in die Berechnungsmodelle eingebaut. Damit stellt die hier präsentierte FEM-BEM Methode nicht nur eine sinnvolle Ergänzung zu rein FEM-basierten Ansätzen dar, sondern sie bietet ganz konkrete wirtschaftliche Vorteile, da die Modelle schneller und somit kostengünstiger erstellt werden können.

## Literatur

- [1] M. Bergot and M. Duruflé. High-order optimal edge elements for pyramids, prisms and hexahedra. *Journal of Computational Physics*, 232(1):189–213, 2013.
- [2] D. Colton and R. Kress. *Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory*, volume 93. Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] S. Erichsen and S. A. Sauter. Efficient automatic quadrature in 3-d Galerkin BEM. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 157(3):215–224, 1998.
- [4] R. Falgout and U. Yang. hypre: A library of high performance preconditioners. *Computational Science—ICCS 2002*, pages 632–641, 2002.
- [5] Th. Gerstner and M. Griebel. Numerical integration using sparse grids. *Numerical Algorithms*, 18(3-4):209–232, 1998.
- [6] W. Hackbusch. *Hierarchische Matrizen: Algorithmen und Analysis*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [7] R. Hiptmair. Finite elements in computational electromagnetism. *Acta Numerica*, 11:237–339, 2002.
- [8] R. Hiptmair. Symmetric coupling for eddy current problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 40(1):41–65, 2002.
- [9] R. Hiptmair and J. Ostrowski. Generators of  $H_1(\Gamma_h, \mathbb{Z})$  for Triangulated Surfaces: Construction and Classification. *SIAM Journal on Computing*, 31(5):1405–1423, 2002.
- [10] J. D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons, Inc., 3rd edition, 1999.
- [11] P. Monk. *Finite element methods for Maxwell's equations*. Oxford University Press, 2003.
- [12] J.C. Nédélec. Mixed finite elements in  $\mathbb{R}^3$ . *Numerische Mathematik*, 35:315–341, 1980.
- [13] G. Of. *BETI-Gebietszerlegungsmethoden mit schnellen Randelementverfahren und Anwendungen*. PhD Thesis, Universität Stuttgart, 2006.
- [14] C. C. Paige and M. A. Saunders. Solution of sparse indefinite systems of linear equations. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 12(4):617–629, 1975.
- [15] T. C. Patterson. The optimum addition of points to quadrature formulae. *Mathematics of Computation*, 22(104):847–856, 1968.
- [16] Jinchao Xu. Iterative methods by space decomposition and subspace correction. *SIAM Review*, 34(4):581–613, 1992.

# Plasmasimulationen in Überspannungseinrichtungen

Mario Mürmann, Roman Fuchs, Henrik Nordborg  
Institut für Energietechnik, Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz

## 1 Einleitung

Gasentladungen sind Teil unseres Alltags. als Blitze sehen wir sie am Himmel, als kleine Funkenüberschläge nehmen wir sie wahr, wenn wir z.B. Stecker in Steckdosen stecken. Bei elektrischen Schaltvorgängen entstehen Gasentladungen und führen dort zu hoher Beanspruchung der Kontakte, sie sollten dort daher möglichst vermieden werden. In Überspannungseinrichtungen von Hochspannungsleitungen, insbesondere in Blitzschutzgeräten werden Gasentladungen wiederum genutzt, um die hohe Energie von Blitzen in möglichst kurzer Zeit gegen Erde zu führen. Eine Herausforderung in diesen Geräten ist das angestrebte schnelle Löschen dieser leitenden Verbindung, nachdem die überschüssige Energie abgeleitet worden ist. Elektrische Gasentladungen sind in der technischen Produktentwicklung durchaus relevant, allerdings sind deren Simulationen und Berechnungen nur sehr aufwändig zu gewährleisten.

Gasentladungen entstehen in Gasen, wenn in sich Elektronen von Atomen und Molekülen lösen und somit als freie Ladungsträger für einen elektrischen Strom zur Verfügung stehen, es entsteht ein leitfähiges Gas, ein Plasma. Dieser Zustand wird erreicht, indem dem Gas ausreichend hohe Energie z.B. durch Aufheizen zugeführt wird, oder ein ausreichend hohes elektrisches Feld zur Ionisation der Gasmoleküle bzw. -atome führt. Für den Zustand des Plasmas sind dabei sowohl fluiddynamische als auch elektromagnetische Phänomene relevant.

Bei hohen Strömen entwickelt sich die Gasentladung zu einem elektrischen Lichtbogen, der sich durch hohe elektrische Leitfähigkeit und eine gemeinsame Temperatur für Elektronen und Ionen auszeichnet.

In einem Lichtbogen entsteht aufgrund der ohmschen Verluste Wärme, die überwiegend durch Strahlung an die Umgebung abgegeben wird. Dabei verändert sich die chemische Zusammensetzung des Plasmas, wodurch das fluiddynamische, thermische und elektrische Verhalten des Plasmas variiert. Durch zusätzlichen Materialabbrand an Kontakten und Erosion eventuell vorhandenen Gehäusematerials wird das Plasma mit Fremdmolekülen angereichert, wodurch sich wiederum die chemische Zusammensetzung des Plasmas ändert, und damit die Materialparameter variieren. Diese Prozesse finden auf sehr kleinen Zeitskalen statt und müssen bei der numerischen Simulation geeignet berücksichtigt werden. Diese ist nach wie vor sehr anspruchsvoll. Auf physikalischer Seite sind viele komplexe Phänomene geeignet zu berücksichtigen, die zudem teils starke Nichtlinearitäten aufweisen. Das physikalische Verhalten von Lichtbögen wird sowohl von der Gasdynamik, Turbulenz, Plasmachemie als auch von der Strahlung und der Wechselwirkung des Plasmas mit den Elektroden bestimmt. Ferner bilden sich hochkompressible Strömungsformen mit Temperaturen von einigen zehntausend Kelvin und Überdrücken von mehreren Atmosphären aus.

Eine vollständige und umfassende Beschreibung dieser Effekte wird aus Sicht der Numerik nicht angestrebt. Vielmehr werden sie modellhaft über semi-empirische Modelle approximiert, deren Exaktheit und Gültigkeit naturgemäß begrenzt sind.

## 2 Numerik

Aus numerischer Sicht umfasst eine Simulation eines Lichtbogens daher mehrere Einzelsimulationen, die miteinander gekoppelt werden müssen. Sowohl Gasdynamik als auch Elektromagnetik bestimmen den Zustand eines Plasmas, was die Kopplung beider physikalischer Bereiche erfordert. Die Simulationswerkzeuge dieser beider Domänen sind historisch gesehen getrennt voneinander entwickelt und optimiert worden. Ein Code, mit dem beide Phänomene gleichermaßen verbunden und in hoher Detailstufe simuliert werden können, gibt es derzeit nicht. Vielmehr muss eine CFD-Simulation, die die Gasdynamik unter Berücksichtigung der chemischen Prozesse, der Turbulenz und des thermischen Verhaltens abbildet, mit einer elektromagnetischen Simulation über geeignete externe Schnittstellen gekoppelt werden. Eine weitere Kopplung mit einer strukturmechanischen Simulation zur Berücksichtigung eventueller Gehäuseverformungen ist ebenfalls denkbar, dies ist allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Die Berechnung der Gasdynamik erfordert die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) &= 0 \\ \frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \sigma (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \\ \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{v} - \lambda \nabla T) &= \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \mathbf{v}) + \sigma \mathbf{E}^2 - \nabla \cdot \mathbf{j}_{rad}\end{aligned}$$

Diese Gleichungen beschreiben die fundamentalen Prinzipien der Massen-, Impuls-, und Energieerhaltung. Ihre Lösung besteht in der Bestimmung der Größen Druck  $p$  und Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  für ein gegebenes Fluid mit wohldefinierten Materialeigenschaften, die oft in einer weiteren Gleichung, z.B. der idealen Gasgleichung formuliert werden. Für ein Plasma ist dieser Ansatz nicht mehr gültig, vielmehr werden die benötigten Eigenschaften durch tabellierte Daten für Dichte  $\rho$ , Enthalpie  $h$ , Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Viskosität  $\tau$  und elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  in die Berechnung integriert. Die Lösung der Energieerhaltungsgleichung innerhalb der Navier-Stokes-Gleichungen erfordert in der Regel die Lösung einer zusätzlichen Gleichung für den Wärmetransport durch Strahlung, die dann den Quellterm  $\mathbf{j}_{rad}$  zur Verfügung stellt. Da diese Gleichung von der Art der Modellierungstiefe für die Wärmestrahlung abhängt, ist diese hier nicht explizit mit aufgeführt. Weiterhin bestimmen das elektrische Feld  $\mathbf{E}$  sowie die magnetische Flussdichte  $\mathbf{B}$  zusammen mit der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  weitere Quellterme für die Energie- und Impulserhaltung.

Um die elektromagnetischen Phänomene und insbesondere das elektrische Feld  $\mathbf{E}$  sowie die magnetische Flussdichte  $\mathbf{B}$  zu bestimmen, müssen wiederum die Maxwellgleichungen gelöst werden:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_{el} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Phänomenen, außerdem werden hiermit Kraftwirkungen auf Ladungsträger und entstehende thermische Energieeinträge aufgrund ohmscher Wärme bestimmt. In elektrischen Lichtbögen kann von elektrischer Ladungsneutralität ausgegangen werden, wodurch sich die Maxwellgleichungen im stationären Fall vereinfachen zu:

$$\begin{aligned}\mathbf{j} &= \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \nabla \cdot \mathbf{j} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j}\end{aligned}$$

Zur Lösung der Maxwellgleichung wird u.a. die Kenntnis der elektrischen Leitfähigkeit des zu berechnenden Mediums benötigt. Diese hängt wiederum von den Größen Druck und Temperatur ab, also von der Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen. Aus mathematischer Sicht entsteht somit ein zusammenhängendes, nichtlineares Gleichungssystem, das aber aufgrund der verschiedenen Simulationswerkzeuge getrennt voneinander gelöst werden muss.

Die CFD-Simulation basiert üblicherweise auf der Finite-Volumen-Methode, die elektromagnetische Simulation auf der Finite-Element-Methode. In der vorliegenden Arbeit ist eine Kopplung von ANSYS Fluent mit ANSYS EMAG über das Softwarepaket MpCCI der Fraunhofer-Gesellschaft realisiert worden. Hier werden die ohmschen Verluste sowie die Lorentzkraft basierend auf der numerischen Lösung in ANSYS EMAG berechnet und ANSYS Fluent als Quellterme zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zur Verfügung gestellt. Umgekehrt benötigt ANSYS EMAG zur Lösung der Maxwellgleichungen die elektrische Leitfähigkeit, die in ANSYS Fluent aufgrund der erhaltenen Temperatur- und Druckverteilung berechnet wird und an ANSYS EMAG via MpCCI übergeben wird. Sie bestimmt damit die Kopplung der Strömung mit dem elektromagnetischen Feld.

Der Abbrand von Kontakten sowie die Erosion von Gehäusematerial sind in der vorliegenden Arbeit bislang nicht berücksichtigt.

In *Abb. 1* ist die Kopplung und der Datenaustausch schematisch dargestellt.

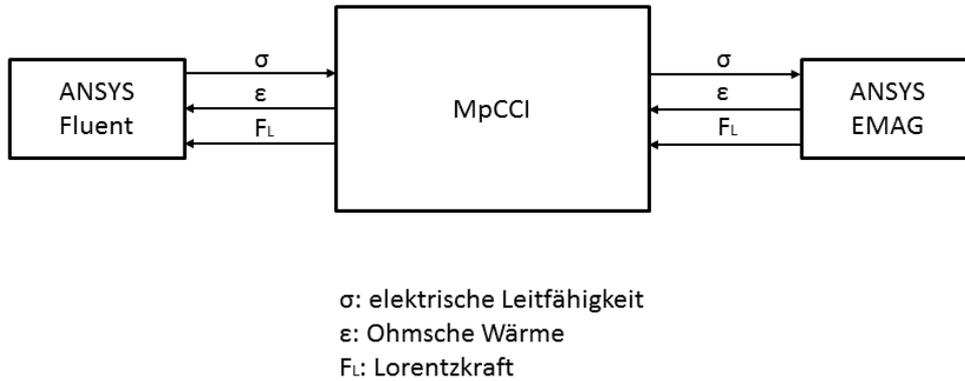


Abb. 1: Schematische Darstellung der Kopplung und des Datenaustauschs zwischen ANSYS Fluent und ANSYS EMAG via MpCCI.

### 3 Materialmodelle

Die chemische Zusammensetzung eines Gases ändert sich mit der Temperatur- und Druckverteilung. In Luft dissoziieren z.B. die vorhandenen Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle ( $N_2$  und  $O_2$ ) im Verlaufe einer Temperaturerhöhung zu Stickstoff- und Sauerstoffatomen ( $N$  und  $O$ ). Diese können wiederum Bindungen zu  $NO$ -Molekülen eingehen etc. Jede zusätzlich im Gas vorhandene Komponente ermöglicht zahlreiche weitere chemische Reaktionen. Weitere Druck- und Temperaturerhöhungen führen zur Bildung von Ionen und freien Elektronen, was einen Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit des gesamten Gases, nun ein Plasma, zur Folge hat. In Abb. 2 ist die Zusammensetzung von Luft in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Druck von 1 bar dargestellt. Die Zusammensetzung der Luft bei Standardbedingungen beträgt hier:

- 78.09 % Stickstoff ( $N_2$ )
- 20.95 % Sauerstoff ( $O_2$ )
- 0.93 % Argon ( $Ar$ )
- 0.03 % Kohlendioxid ( $CO_2$ )

Schon für diese relativ einfache Zusammensetzung ergeben sich zahlreiche vorkommende Reaktionen.

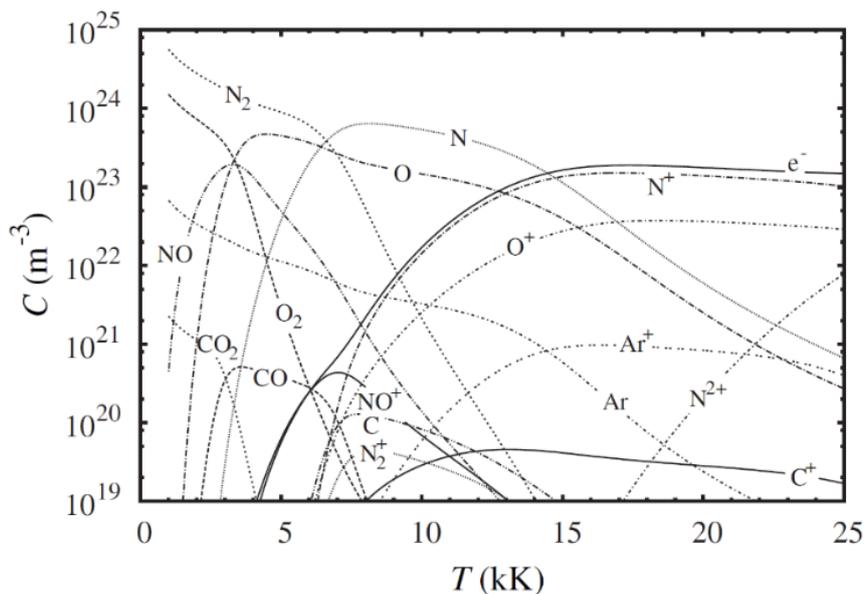
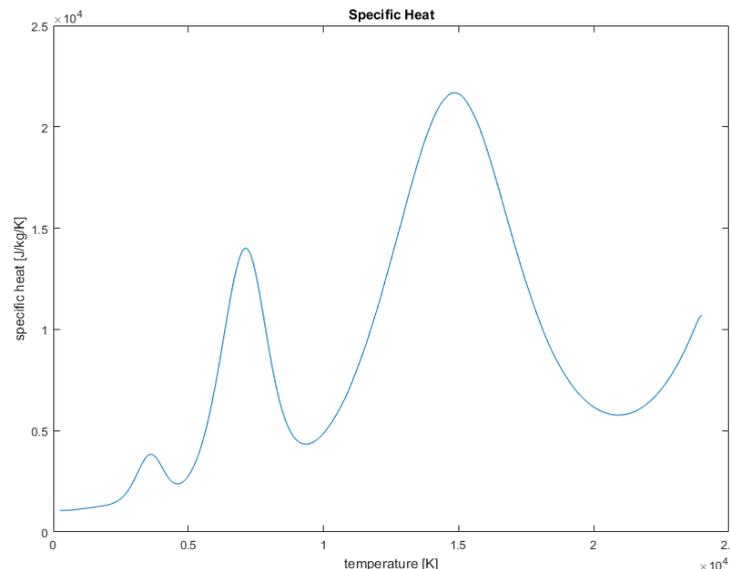


Abb. 2: Konzentrationen der wesentlichen Bestandteile von synthetischer Luft in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Druck von 1 bar.

Dabei hat jede vorkommende chemische Reaktion einen Einfluss auf die makroskopischen Materialeigenschaften wie Dichte, spezifische Enthalpie etc., die zur Lösung sowohl der Navier-Stokes-Gleichungen als auch der Maxwellgleichungen benötigt werden. Im Allgemeinen werden die chemischen Reaktionen aufgrund des immensen Aufwandes im Rahmen einer Plasmasimulation nicht direkt berechnet. Vielmehr wird ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht vorausgesetzt und so die vorkommenden Reaktionen und die damit verbundenen makroskopischen Materialeigenschaften vorab in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bestimmt. Dieser Vorgang umfasst Berechnungen aus der statistischen Thermodynamik und der Quantenmechanik. Für die CFD-Simulation werden die Größen Dichte, spezifische Enthalpie, Viskosität und thermische Leitfähigkeit benötigt. Für die elektromagnetische Simulation wird die elektrische Leitfähigkeit verwendet. Diese Daten können teils Veröffentlichen entnommen werden<sup>1,2</sup>. In *Abb. 3* ist der Verlauf der spezifischen Wärmekapazität für Luft in Abhängigkeit der Temperatur beispielhaft bei einem Druck von 1 bar dargestellt.



*Abb. 3: Beispielhafte Darstellung der spezifischen Wärmekapazität von Luft in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Druck von 1 bar.*

Durch die hohen vorkommenden Temperaturen in Plasmen wird das thermodynamische Gleichgewicht stark von der Wärmestrahlung bestimmt, da die Temperatur mit der vierten Potenz in diese Art des Wärmetransports eingeht. Konvektion und besonders Diffusion spielen für das thermische Verhalten des Plasmas eine untergeordnete Rolle. Einerseits wird das Plasma durch den elektrischen Stromfluss durch ohmsche Wärmeeinträge erhitzt, andererseits wird es vor allem durch Wärmestrahlung abgekühlt. Um die Strahlung bestimmen zu können, müssen die Absorptionseigenschaften des Plasmas wiederum in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung analog zu den übrigen Materialeigenschaften bekannt sein. Die Bestimmung des Strahlungstransports erfolgt anhand vorgegebener Strahlungsmodelle, die die Absorptionsdaten als Eingabe benötigen. Diese müssen geeignet aufbereitet sein, um in den jeweiligen Strahlungsmodellen in ANSYS Fluent verwendet werden zu können<sup>3,4</sup>. Dazu werden die Absorptionsspektren des Gases in mehrere diskrete Frequenzbänder unterteilt und anschließend zu Absorptionskoeffizienten der diskreten Frequenzbänder geeignet gewichtet. Diese Koeffizienten hängen dann wiederum von Druck und Temperatur ab. In *Abb. 4* ist das Absorptionsspektrum für Luft bei drei verschiedenen Temperaturen und einem Druck von 1 bar beispielhaft dargestellt. Diese Abbildung ist der Literatur entnommen<sup>3</sup>. Eine direkte Verwendung dieser Spektren als Eingabe für den Solver ist aufgrund der extrem starken Nichtlinearitäten unmöglich.

Durch die hohe Relevanz der Wärmestrahlung für das thermodynamische Gleichgewicht des Plasmas ist die Wahl des verwendeten Mittelungsverfahrens in der Berechnung der Absorptionsspektren ein äußerst wichtiger Schritt in der Vorbereitung der jeweiligen Plasmasimulation.

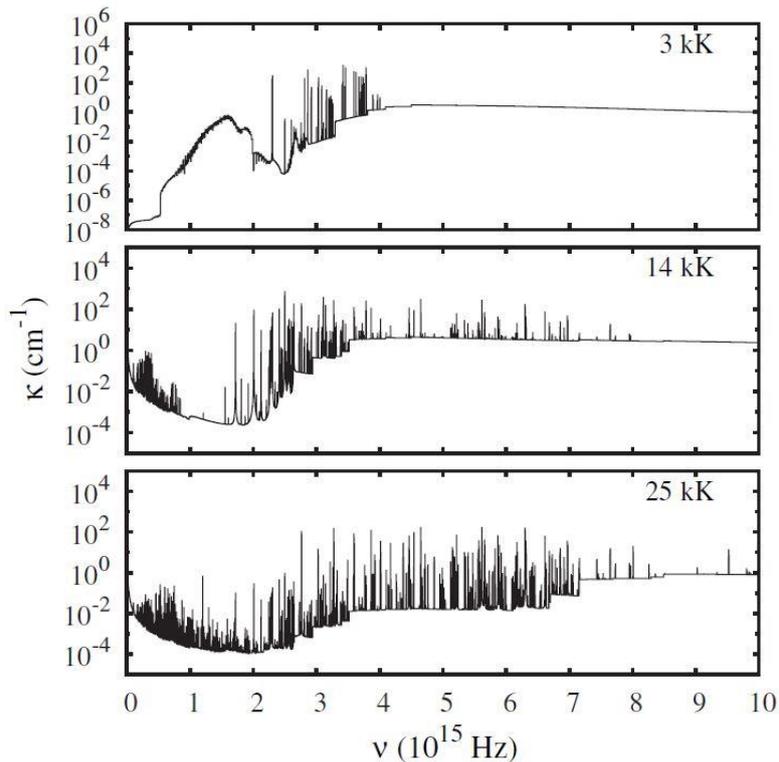


Abb. 4: Beispielhafte Darstellung des Absorptionsspektrums von Luft bei drei verschiedenen Temperaturen und bei einem Druck von 1 bar. Diese Abbildung ist der Literatur entnommen<sup>3</sup>.

#### 4 Kopplung der Simulationscodes

Das gekoppelte Simulationsmodell umfasst somit ein CFD-Modell in ANSYS Fluent und ein Elektromagnetik-Modell in ANSYS EMAG. Ersteres wurde mit zahlreichen in C programmierten, benutzerdefinierten Funktionen (UDFs) erweitert, um vor allem die Materialeigenschaften des Plasmas geeignet berücksichtigen zu können. Diese Funktionen dienen vor allem dazu, Interpolationsroutinen zum Einlesen der Materialparameter basierend auf Druck und Temperatur bereitzustellen. In der vorliegenden Arbeit wurde eine bikubische Splineinterpolation verwendet. Die Kopplungssoftware stellt Befehle für den automatischen Datenaustausch zu ANSYS EMAG zur Verfügung, weshalb das Modell selbst über eine in Scheme programmierte Skriptdatei angesteuert werden muss. Die Simulation der Turbulenz wird mit dem k-epsilon-Modell realisiert, die Strahlung mittels der „Diskrete Ordinaten-Methode“. Die chemische Zusammensetzung des Plasmas ist bereits in den verwendeten Materialdaten berücksichtigt, so dass auf die Verwendung eines Mixture-Modells verzichtet werden kann.

Das Simulationsmodell in ANSYS EMAG wird mit einer in APDL verfassten Skriptdatei angesteuert. Auch hier wird von MpCCI eine Befehlsbibliothek zur Verfügung gestellt, mit der Datenaustausch zu ANSYS Fluent realisiert wird. In der vorliegenden Arbeit ist die Berechnung des elektrischen Potentials und der elektrischen Stromdichte stationär. Allerdings erlaubt ANSYS EMAG darüber hinaus die Integration des FE-Modells in einen elektrischen Schaltkreis, so dass das Verhalten eines gekoppelten Lichtbogenmodells innerhalb elektrischer Bauteile im Zusammenspiel mit anderen elektrischen Komponenten untersucht werden kann, dies auch transient, ebenso ist die Berücksichtigung externer Magnetfelder möglich. Diese Berechnungsvarianten werden in gegenwärtigen Arbeiten genutzt, sind allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Trotz der sehr flexiblen Möglichkeiten der verwendeten Skriptsprachen und des eleganten Datenaustausches via MpCCI bleiben allerdings potentielle Fehlerquellen durch die Verwendung verschiedener Codes erhalten. Zudem stellt diese Art der Simulation relativ hohe Anforderungen an die Qualifikation des Simulationsingenieurs, da dieser neben dem notwendigen Know-how der Physik und Chemie auch Kenntnisse der verschiedenen Programmiersprachen und Simulationscodes benötigt. Ein vereinfachtes Handling durch ein integrales Simulationstool existiert bislang nicht.

#### 4.1 Simulationsumgebung

Am Institut für Energietechnik (IET) der Hochschule für Technik in Rapperswil wurde eine Simulationsumgebung basierend auf ANSYS Fluent, ANSYS EMAG und MpCCI implementiert, mit der die gekoppelten Simulationen etwas effizienter durchgeführt werden können. Diese wurde bereits anhand einiger industrieller Anwendungen am IET getestet. Dabei werden die für die gekoppelten Lichtbogensimulationen notwendigen Eingangsdaten und Materialdatensätze zentral in einem GUI verwaltet. Dieses stellt dann die vom Benutzer spezifizierten Eingaben automatisch den beiden Simulationscodes ANSYS EMAG und ANSYS Fluent im Hintergrund zur Verfügung. Der vom Benutzer zu leistende Aufwand durch Programmierung in C, Scheme bzw. APDL entfällt. In Abb. 5 ist die Architektur dieser Simulationsumgebung schematisch dargestellt.

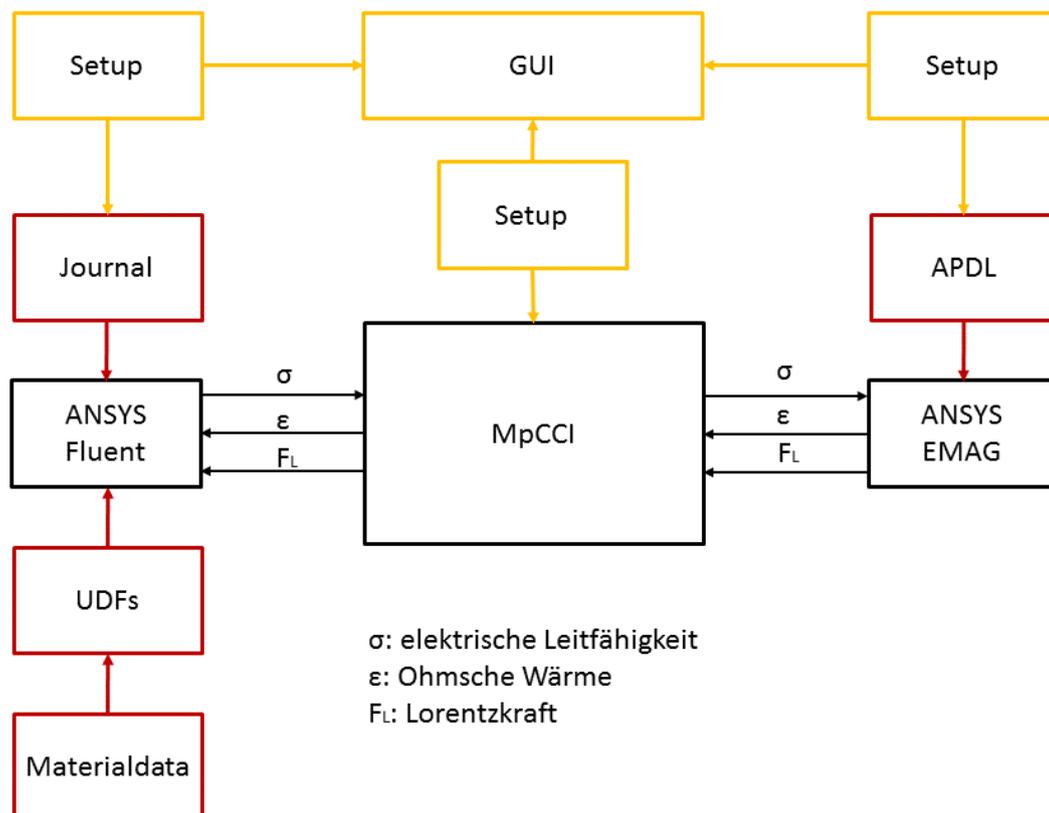


Abb. 5: Schematische Darstellung der am Institut für Energietechnik (IET) verwendeten Simulationsumgebung. Durch ein GUI wird die Verwaltung und Eingabe von Simulationseingangsdaten sowie Ausgabedateien stark vereinfacht.

#### 4.2 Simulationsmodell

Als Beispiel wird in der vorliegenden Arbeit ein Überspannungsableiter der Firma Streamer International aus Sankt Petersburg betrachtet, in dem eine Funkenstrecke genutzt wird, um aus Blitzschlägen resultierende Überspannungen abzubauen<sup>5</sup>. Dabei wird die Funkenstrecke durch mehrere hintereinander geschaltete Schaltkammern unterteilt, so dass eine Reihenschaltung von Lichtbögen entsteht. Die Schaltkammern fungieren dabei als Düsen, aus denen das Plasma durch den starken Druckaufbau aufgrund der ohmschen Wärme innerhalb der Düse ausgestoßen wird, nachdem die überschüssige Energie des Blitzes gegen Erde abgeleitet worden ist. Für einen optimalen Druckaufbau ist der geometrische Aufbau der Düsen entscheidend. In Abb. 6 ist eine einzelne Schaltkammer bzw. Düse dargestellt, sie besteht im Wesentlichen aus zwei hohlen Kupferkontakten und einer Konstruktion aus Kunststoff bzw. Hartgummi.



Abb. 6: Darstellung einer Schaltkammer der Firma Streamer International, die innerhalb von Überspannungsschutzeinrichtungen verwendet werden kann.

Ziel der durchgeführten Simulationen war, das Löschverhalten des Lichtbogens in Abhängigkeit der Geometrie der Schaltkammer zu erforschen, nachdem dieser durch einen Blitzeinschlag gezündet wurde. Hierbei wird insbesondere ein effizienter und schneller Löschvorgang angestrebt, um das Hochspannungsnetz nach Ableiten der überschüssigen Energie nicht zu belasten. In Abb. 7 ist das Simulationsmodell dargestellt. Dabei wurde eine Symmetrie des Aufbaus genutzt, so dass Rechenzeit eingespart werden konnte.

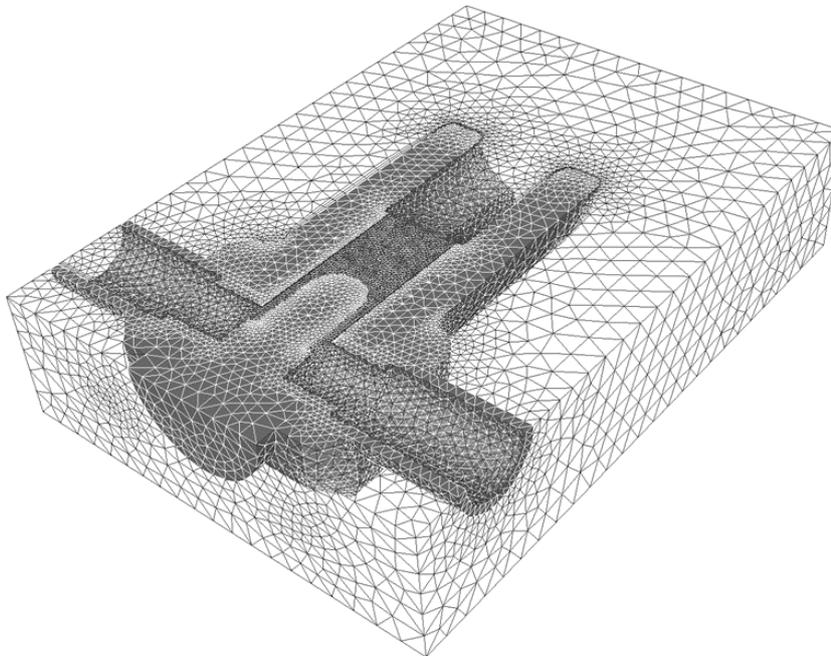
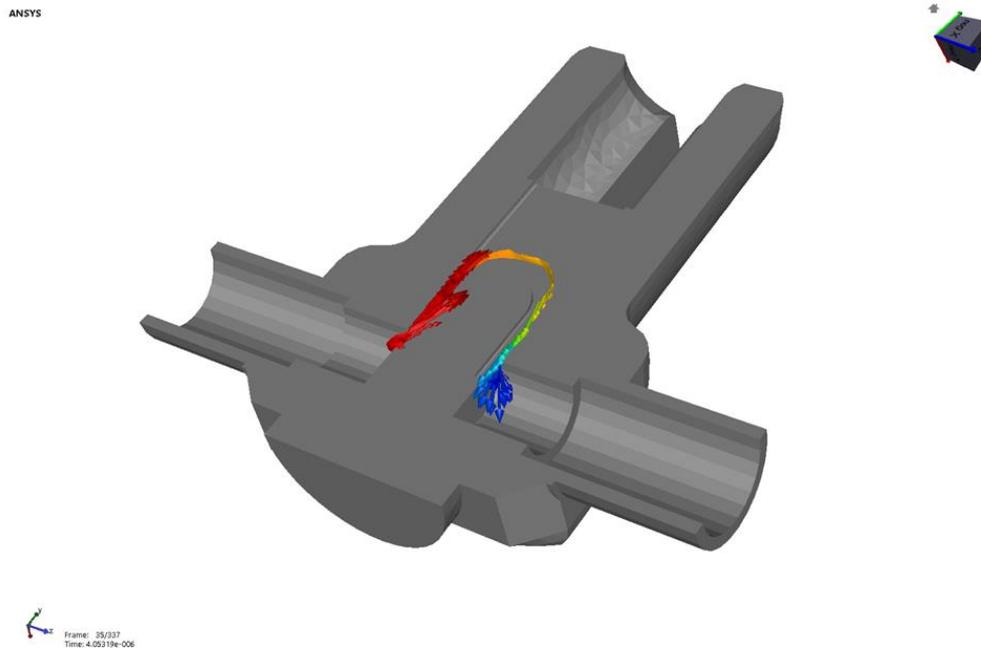


Abb. 7: Darstellung des verwendeten Simulationsmodells. Dunkel eingefärbt ist eine Schaltkammer des Überspannungsableiters mit angeschlossenen Hohlkontakten. Die umgebende Luft ist hell eingefärbt.

Um die Simulationen durchzuführen, wurden zunächst die Materialparameter der Luft bestimmt, die dann als Tabellen zur Verfügung standen. Anschließend wurden die beiden Kupferkontakte mit zeitabhängigen Spannungsrandbedingungen belegt, deren Werte aus Experimenten bekannt waren. Der Blitzeinschlag wurde nicht direkt simuliert, vielmehr wurde der Bereich zwischen den Kontakten innerhalb der Schaltkammer zu Beginn der Simulation künstlich erhitzt, um basierend auf der Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Temperatur und Druck eine elektrisch leitfähige Strecke zwischen den Kontakten zu erzeugen. Durch das Zusammenspiel von ohmscher Wärme aufgrund des Stromflusses durch die Kontakte bzw. das Plasma einerseits und Wärmeverlusten durch Strahlung und Konvektion basierend auf dem Druckaufbau innerhalb der Düse andererseits ergeben sich charakteristische Verläufe von Leistung, Strom und Spannung der Schaltkammern, die zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Düsen genutzt werden. *Abb. 8* zeigt den Stromfluss innerhalb der Schaltkammer sowie den Verlauf des elektrischen Potentials (farbig).



*Abb. 8: Schematische Darstellung des Stromflusses innerhalb der Schaltkammer. Farblich eingefärbt ist das elektrische Potential.*

In *Abb. 9* ist beispielhaft der zeitliche Verlauf der Dichte anhand mehrerer Teildarstellungen illustriert. Die Ausbreitung der Schockwelle aufgrund des Druckaufbaus innerhalb der Düse ist deutlich zu erkennen.

Auf Basis der durchgeführten Simulationen konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die in die Verbesserung des Produktdesigns eingeflossen sind.

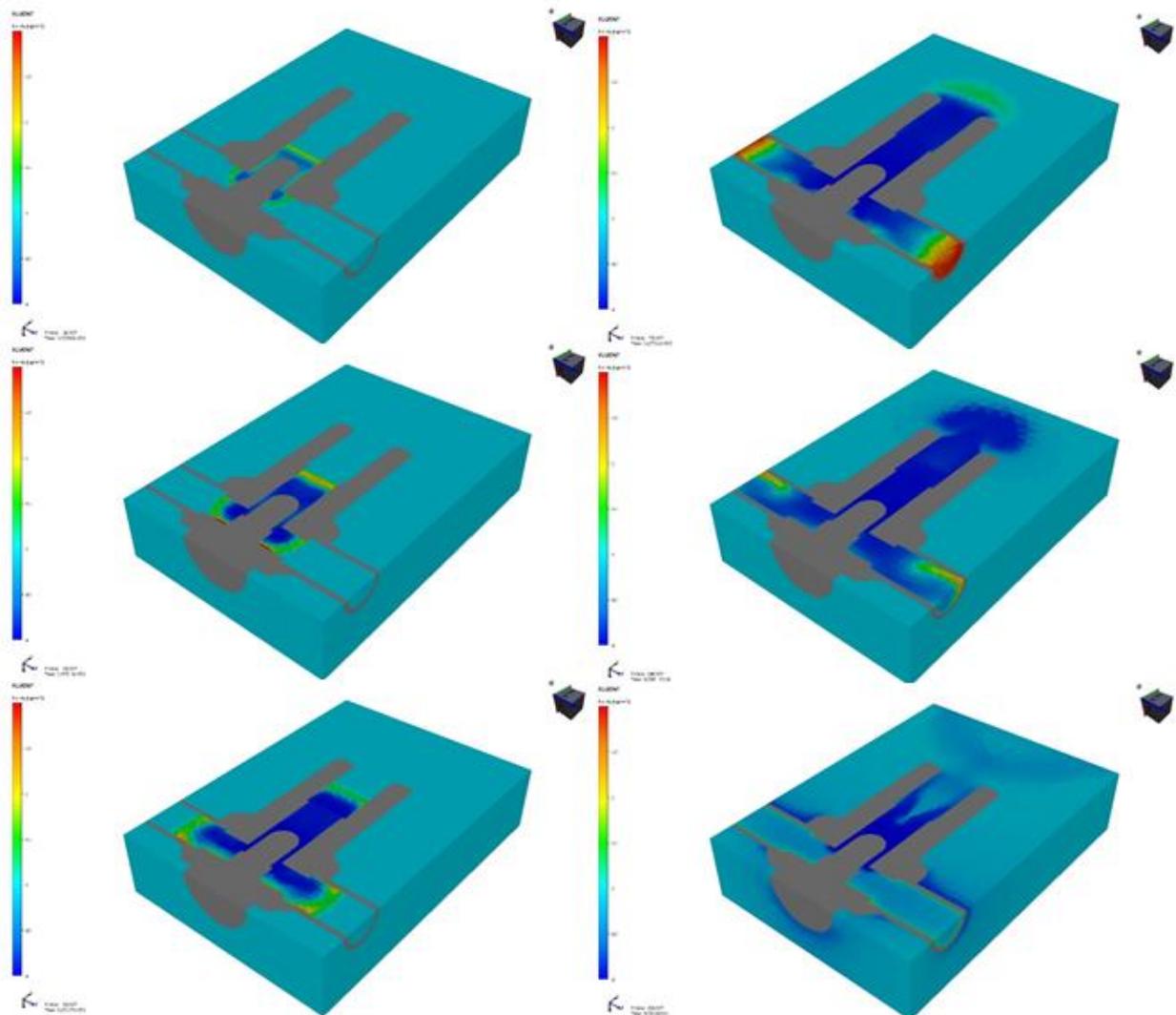


Abb. 9: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Luftdichte, um den Einfluss der Gasdynamik auf das Löschverhalten der Schaltkammer zu illustrieren.

## 5 Literatur

- [1] D'Angola, A., Colonna, G., Gorse, C., Capitelli, M.: "Thermodynamic and transport properties in equilibrium air plasmas in a wide pressure and temperature range", European Physical Journal, 2008, 129-150.
- [2] Shi-Qiang Chen, Hai-Xing Wang, Choueiri, E.Y.: "Two-Temperature Thermodynamic and Transport Properties of Hydrogen Plasmas", IEPC, 2011, 152.
- [3] Kloc, P., Aubrecht, V., Bartlova, M., Coufal, O.: "Radiation transfer in air and air-Cu plasmas for two-temperature profiles", Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48-61.
- [4] Gleizes, A., Gonzales, J.J., Freton, P.: "Thermal plasma modelling", Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, R153-R183.
- [5] Kozakov, R. et al., "Investigation of a Multi-Chamber System for Lightning Protection at Overhead Power Lines", Plasma Physics and Technology, 2, 2, 150-154.

# Untersuchungen zur Topologieoptimierung von Frequenzproblemen

Lothar Harzheim  
Adam Opel AG

In diesem Beitrag wird der Unterschied zwischen einer Topologieoptimierung bezüglich Steifigkeit und Eigenfrequenz dargestellt. Während der erste Fall unproblematisch ist, können bei einer Optimierung von Eigenfrequenzen Effekte auftreten, welche die Ergebnisse unbrauchbar machen oder deren Qualität zumindest stark reduzieren. Einer dieser Effekte ist das Auftreten von künstlichen, und damit unphysikalischen, Eigenmoden. Ein anderes Problem ist das Auftreten einer Modellierungsschwäche, was bedeutet, dass ein dichtebasierter Designvorschlag nicht mehr eine physikalische 1-0 Struktur approximieren kann. In einem solchen Fall entstehen unbrauchbare Designvorschläge, die große Bereiche mit geringer Dichte aufweisen. Basierend auf diesen Erkenntnissen, werden Kriterien vorgestellt, die es dem Anwender ermöglichen, unbrauchbare Ergebnisse zu identifizieren. Abschließend wird durch die Optimierung eines Querträgers die Wirksamkeit der Kriterien demonstriert und das Optimierungsproblem mit Hilfe einer alternativen Formulierung gelöst.

## 1 Einleitung

Die Topologieoptimierung zur Bestimmung von optimalen Designs hat sich in der Praxis als mächtiges und einfach anzuwendendes Werkzeug erfolgreich etabliert. Im Gegensatz zur Formoptimierung liefert jedoch die Topologieoptimierung kein ausgefeiltes Design, sondern einen Designvorschlag, der grob und unscharf sein kann. Ausgangspunkt einer Topologieoptimierung ist dabei immer der zur Verfügung stehende Bauraum, der sogenannte Designraum. In diesem wird während der Topologieoptimierung Material entfernt und umgeordnet, so dass sich am Schluss eine Struktur ergibt, die ein bestimmtes Kriterium erfüllt. Dabei wird in der Topologieoptimierung das Material nicht wirklich entfernt. Vielmehr werden die materialfreien Bereiche, auch Lochbereiche genannt, simuliert, indem dort die Steifigkeit der Elementen sehr stark reduziert wird. Die Idee ist dabei, dass Elemente mit einer stark reduzierten Steifigkeit keinen nennenswerten Beitrag mehr zum Strukturverhalten liefern und somit den Lochbereich in guter Näherung beschreiben. Jedoch wird die Steifigkeit nicht direkt modifiziert, sondern über die normierte Dichte  $x \in [\varepsilon, 1]$  für jedes Element individuell gesteuert. Der Zusammenhang zum E-Modul und damit zur Steifigkeit wird dabei in den meisten Fällen über den sogenannten SIMP-Ansatz [1], [2]

$$E = E^0 x^p, \quad (1)$$

beschrieben. Dabei bedeutet  $x = 1$ , dass das Element die maximal mögliche Steifigkeit mit einem E-Modul  $E^0$  hat und somit massiv ist, während ein Element bei  $x = \varepsilon$  die minimal mögliche Steifigkeit  $E^0 \varepsilon^p$  besitzt und damit ein entferntes Element simuliert. Ein Wert von null ist nicht möglich, weil dann die Steifigkeitsmatrix singular wird. Der Wert  $\varepsilon$  muss deshalb groß genug sein, um numerische Stabilität zu gewährleisten und klein genug, um das entfernte Material zu simulieren. In der Praxis hat sich ein Wert von  $\varepsilon = 0,01$  bewährt, der im Folgenden immer angenommen wird. Weiterhin muss für ein physikalisches Material immer  $p \geq 2$  gelten [3], [4]. Im Folgenden wird ein Wert von  $p = 3$  verwendet.

Während der SIMP-Ansatz bei einer linearen statischen Analyse immer funktioniert und auch eine praktikable Annäherung an ein reines massives Bauteil darstellt, ist dies bei der dynamischen Topologieoptimierung nicht unbedingt der Fall. Der Grund dafür ist, dass Frequenzen nicht nur durch die Steifigkeits- sondern auch durch die Materialverteilung beeinflusst werden. Dies hat zwei Konsequenzen. Zum einen können lokale Eigenformen in Bereichen mit niedriger Dichte, im Folgenden künstliche Eigenformen genannt, auftreten [5]. Erwünscht ist jedoch, dass das Verhalten des Systems ausschließlich durch die massiven Bereiche kontrolliert wird und diese somit allein das physikalische Verhalten approximieren. Ein anderes Problem ist die sogenannte Modellierungsschwäche bei der dynamischen Topologieoptimierung. Dies bedeutet, dass ein Modell, bei dem die Bereiche mit kleinen Dichten entfernt und die mit den großen Dichten durch massives Material ersetzt werden

sind, nicht das ungefähr gleiche physikalische Verhalten aufweist wie der dichte-basierte Designvorschlag. Dies ist aber gerade die Voraussetzung dafür, dass eine Topologieoptimierung funktioniert und ein Designvorschlag sinnvoll interpretiert werden kann. Das ist jedoch gerade bei der dynamischen Optimierung nicht immer sichergestellt. Im Folgenden werden die künstlichen Eigenformen und die Modellierungsschwäche beschrieben und danach Kriterien abgeleitet, die anzeigen, ob ein Problem vorliegt oder nicht.

## 2 Künstliche Eigenformen

Unter künstlichen Eigenformen versteht man lokale Eigenformen, die nur oder fast ausschließlich in Bereichen mit niedriger Dichte auftreten [5]. Liegen die Frequenzen dieser künstlichen Eigenformen in dem Bereich, der in der Optimierung verwendet wird, wird die Optimierung durch unphysikalische Eigenformen im Lochbereich getrieben und damit das Ergebnis mit großer Wahrscheinlichkeit unbrauchbar. Erwünscht ist vielmehr, dass das Verhalten des Systems ausschließlich oder zumindest dominant durch die massiven Bereiche kontrolliert wird, weil diese das physikalische Verhalten approximieren.

Die künstlichen Eigenformen sind unkritisch, wenn die dazugehörigen Frequenzen außerhalb des für die Optimierung relevanten Frequenzbereichs liegen. Wenn man beispielsweise die Standardzielfunktion

$$f = \sum_{i=1}^M \frac{1}{\nu_i} \tag{2}$$

zur Maximierung der ersten  $M$  Eigenfrequenzen für die Topologieoptimierung verwendet, dann hat man kein Problem, wenn alle Frequenzen  $\nu_i$  der künstlichen Eigenformen beim optimalen Design oberhalb von  $\nu_M$  liegen. Es empfiehlt sich somit immer, die Eigenformen nach der Optimierung zu überprüfen. Unglücklicherweise fördert der SIMP-Ansatz (1) die Ausbildung von künstlichen Eigenformen, weil sich der maximal mögliche E-Modul  $E^0$  über das Potenzgesetz auf den Wert  $E = E^0 x^p$  reduziert, wenn sich die normierte Dichte  $x$  verringert. Als Konsequenz sinken während der Optimierung die Frequenzen mit kleiner werdenden Dichten  $x$  im Lochbereich ab und nähern sich dadurch dem in den meisten Fällen relevanten niederfrequenten Bereich an. So gilt beispielsweise für die erste Eigenfrequenz (Biege-Eigenform) eines Kragträgers [6]

$$\nu \propto \sqrt{\frac{E}{x}} \propto \sqrt{x^{p-1}}. \tag{3}$$

Somit begünstigt der SIMP-Ansatz die Ausbildung von lokalen Eigenformen mit niedriger Eigenfrequenz im Bereich niedriger Dichten.

Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass eine Topologieoptimierung bezüglich der Eigenfrequenzen fehlschlagen muss, wie das Beispiel in Abb. 1 zeigt. Hier ist Ergebnis der Topologieoptimierung eines Kragträgers mit nicht angebondenen eingefrorenen Bereich gezeigt. Das Ziel war, mit der Formulierung in Gleichung (2) die ersten drei Eigenfrequenzen möglichst weit nach oben zu schieben. Weiterhin wurde durch die Füllgradrestriktion  $\nu \leq 0,3$  festgelegt, dass nur 30% des Designraums aus massiven Elementen bestehen darf (Abb. 1). Dabei ist der Füllgrad  $\nu = V/V^0$  über das Volumenverhältnis des massiven Volumens  $V$  zum Volumen des Designraums  $V^0$  definiert.

In Abb. 2 sind neben dem Optimierungsergebnis noch die ersten drei Eigenformen vor und nach der Optimierung dargestellt. Es ist offensichtlich, dass sich die 2. und die 3. Eigenform während der Optimierung vertauscht haben, was jedoch hier wegen der Wahl der Zielfunktion unproblematisch ist. Weiterhin zeigt sich, dass keiner der drei für die Optimierung relevanten Eigenformen eine künstliche Eigenform ist. Erst die 31. Eigenform ist eine künstliche Eigenform (Abb. 3) und damit für die Optimierung unkritisch.

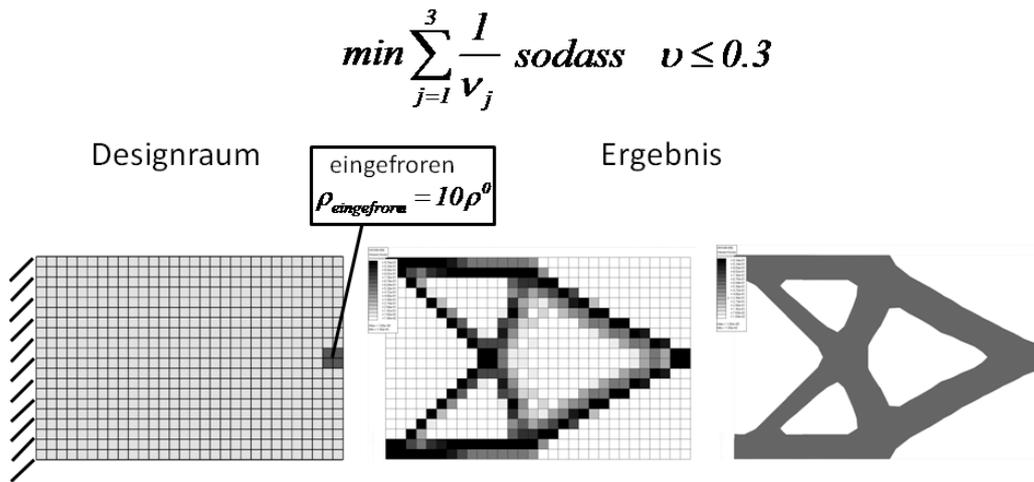


Abb. 1: Ergebnisse einer dynamischen Topologieoptimierung für einen Designraum mit nicht angebundenen eingefrorenen Bereich.

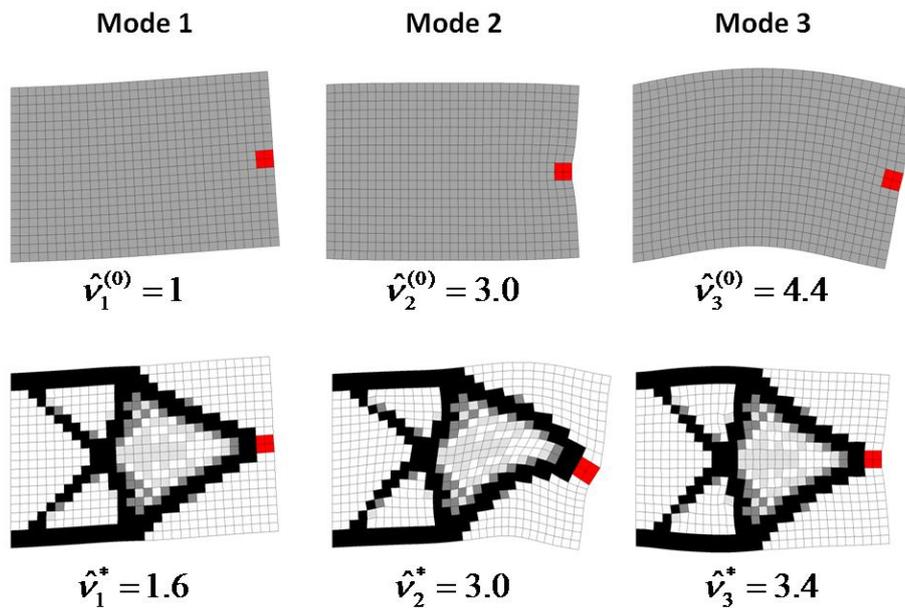


Abb. 2: Die ersten drei Eigenformen vor (oben) und nach der Optimierung (unten).

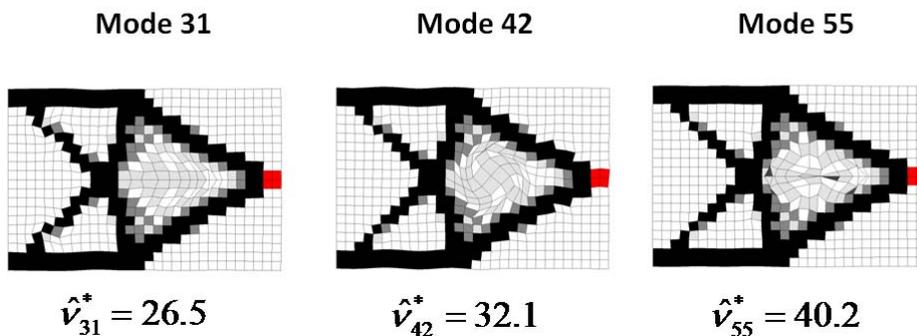


Abb. 3: Die erste künstliche Eigenform (31) und zwei weitere exemplarisch herausgegriffene künstliche Eigenformen der optimierten Struktur. In allen drei Fällen befinden sich die maximalen Amplituden im rechten eingeschlossenen Lochbereich während die massive Struktur nahezu in Ruhe ist.

### 3 Modellierungsschwäche

Bei den oben besprochenen künstlichen Eigenformen handelt es sich um lokale Eigenformen im Lochbereich, welche sich beim Postprocessing in der Regel problemlos identifizieren lassen. Somit kann der Anwender nach der Optimierung gut überprüfen, ob ein Problem aufgrund der künstlichen Eigenformen vorliegt oder nicht. Ein Problem aufgrund der Modellierungsschwäche ist dagegen nicht so einfach zu erkennen. Unter Modellierungsschwäche versteht man, dass es Dichteverteilungen gibt, welche die physikalische Struktur nicht approximieren. Das bedeutet, dass wenn man in einem solchen Fall die Bereiche hoher Dichte durch massives Material ersetzt und die mit niedriger Dichte entfernt, man eine Struktur erhält, die ein deutlich anderes Verhalten aufweist. Dieses Phänomen soll anhand des in Abb. 4 dargestellten Beispiels näher erläutert werden. Hier ist das Optimierungsziel, in dem vorgegebenen Designraum eines Kragträgers das Design zu ermitteln, bei dem die erste Eigenfrequenz möglichst hoch liegt. Nach [6] gilt für die erste Eigenfrequenz (Biege-Eigenform) eines Kragträgers mit konstantem Querschnitt

$$\hat{\nu}_1(y) \propto \sqrt{\frac{E}{\rho y^4}} \tag{4}$$

Dabei ist  $E$  der E-Modul,  $\rho$  die Dichte,  $y$  die auf die Länge  $L$  des Designraums normierte Länge  $l$  des Kragträgers

$$y = \frac{l}{L} \tag{5}$$

und  $\hat{\nu}_1(y)$  die auf die Frequenz  $\nu_1(1)$  des massiven Designraums in Abb. 4 normierte erste Eigenfrequenz

$$\hat{\nu}_1(y) = \frac{\nu_1(y)}{\nu_1(1)} = \frac{1}{y^2} \tag{6}$$

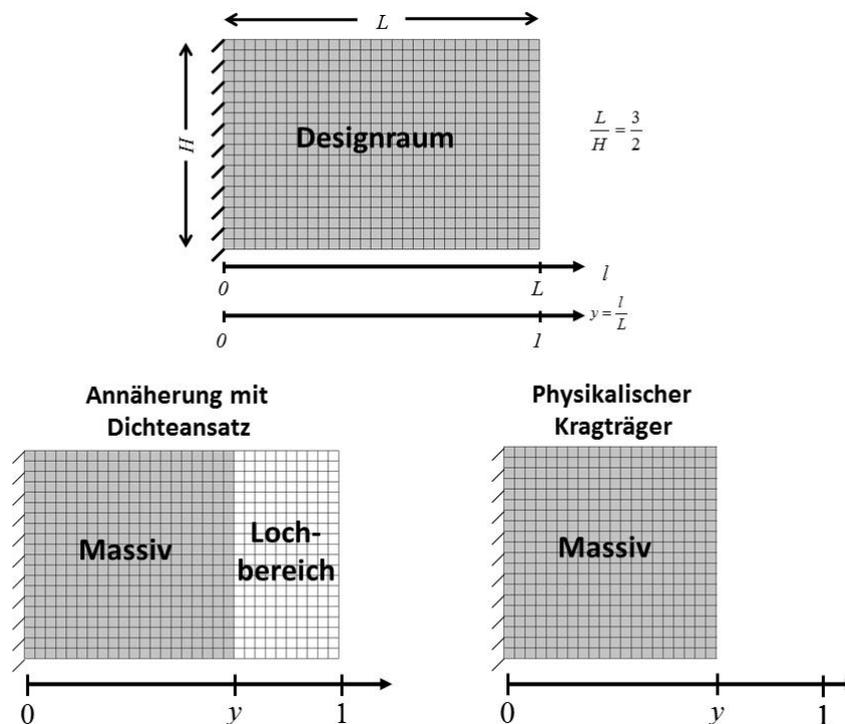


Abb. 4: Designraum eines Kragträgers, Näherung eines Trägers mit der Länge  $y$  über den Dichteansatz (Dichtemodell) und der entsprechende physikalische Kragträger.

Da Formel (4) nur für schlanke Balken gilt, ergibt sich bei einer Überprüfung mit einem FE-Modell bei kleineren Werten von  $y$  eine Abweichung von den vorhergesagten Frequenzwerten (siehe Abb. 5). Der generelle Trend, dass die Frequenz mit kleiner werdender Länge  $y$  ansteigt und bei  $y=0$  singulär und damit maximal wird, ist jedoch identisch.

Mit dem Dichteansatz erhält man die beste Näherung (im Folgenden Dichtemodell genannt) für einen Kragträger der Länge  $y$  (im Folgenden physikalischer Träger genannt), indem der Bereich von 0 bis  $y$  mit massiven und der Bereich von  $y$  bis 1 mit Lochelementen gefüllt wird (Abb. 4). Es wird jedoch schnell klar, dass diese Näherung den physikalischen Kragträger nur begrenzt mit ausreichender Genauigkeit beschreiben kann. So ergibt sich aus Gleichung (4), dass sich die Frequenz  $\hat{v}_1^{Loch}(y)$  eines physikalischen Kragträgers aus reinen Lochelementen aus der Frequenz  $\hat{v}_1(y)$  des physikalischen Trägers aus massiven Elementen ermitteln lässt zu

$$\hat{v}_1^{Loch}(y) = \sqrt{\frac{E^{Loch} \rho}{E \rho^{Loch}}} \hat{v}_1(y). \tag{7}$$

Dabei sind  $E^{Loch}$  und  $\rho^{Loch}$  jeweils der E-Modul und die Dichte der Lochelemente, welche sich über den SIMP-Ansatz (1) als Funktion von  $E$  und  $\rho$  der massiven Elemente bestimmen lassen zu

$$\begin{aligned} \rho^{Loch} &= \varepsilon \rho \\ E^{Loch} &= \varepsilon^p E. \end{aligned} \tag{8}$$

Damit ergibt sich aus Gleichung (7)

$$\hat{v}_1^{Loch}(y) = \sqrt{\varepsilon^{p-1}} \hat{v}_1(y). \tag{9}$$

Somit ist der Verlauf der Frequenz als Funktion von  $y$  bei dem physikalischen Modell aus reinen massiven und aus reinen Lochelementen bis auf einen Skalierungsfaktor identisch (Abb. 6). Daraus ergibt sich jedoch, dass ein massiver Kragträger mit der Länge  $y=0$  im Dichteansatz die endliche Frequenz

$$\hat{v}_1^{Loch}(1) = \sqrt{\varepsilon^{p-1}} \hat{v}_1(1) \tag{10}$$

aufweist, weil er mit einem Kragträger der Länge  $y=1$  aus reinen Lochelementen und damit durch eine künstliche Eigenform modelliert wird. Die Frequenz ist dabei nicht nur alles andere als singulär, sondern liegt sogar noch unterhalb der Frequenz des massiven Kragträgers. Somit kann der Kragträger aus reinen Lochelementen den physikalischen Kragträger mit der Länge  $y=0$  nicht mal näherungsweise modellieren und weist somit eine eklatante Modellierungsschwäche auf.

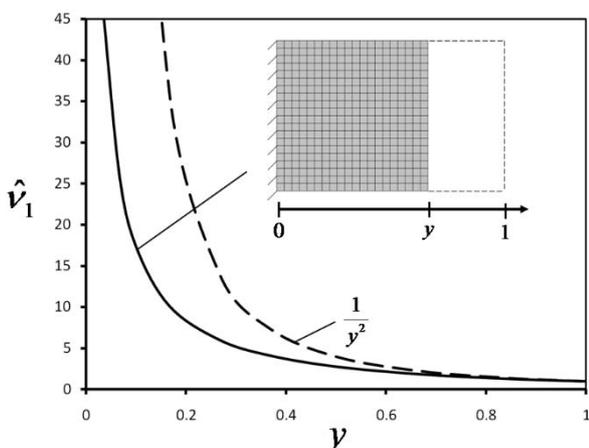


Abb. 5: Verlauf der ersten Eigenfrequenz eines Kragträgers in Abhängigkeit von seiner Länge  $y$  aus der FEM-Analyse und der theoretischen Vorhersage. Bei der Ermittlung der Werte aus der FEM-Analyse wurde jeweils immer ein Netz mit ausschließlich massiven Elementen verwendet (physikalisches Modell).

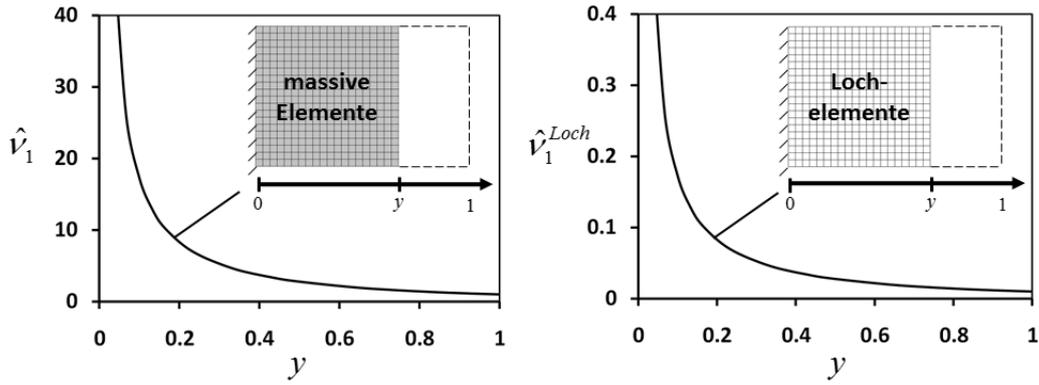


Abb. 6: Verlauf der ersten Eigenfrequenz als Funktion von  $y$  eines physikalischen Kragträgers modelliert mit ausschließlich massiven (links) und ausschließlich Lochelementen (rechts) für  $\varepsilon = 0,01$  und  $p = 3$ .

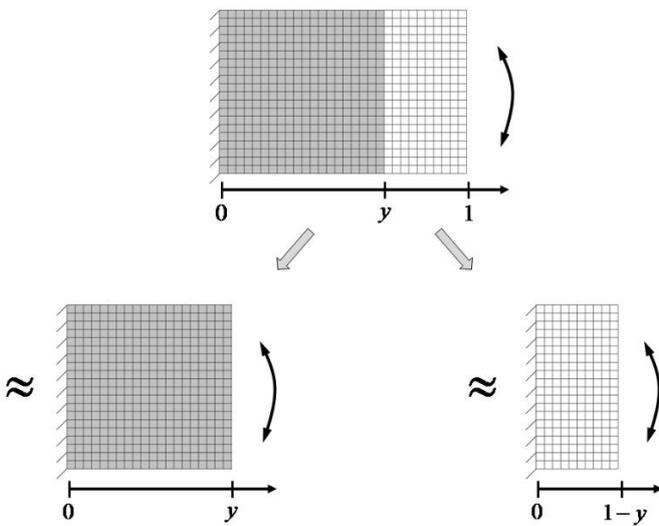


Abb. 7: Veranschaulichung der Näherung, den massiven und den Lochbereich als entkoppelt zu betrachten.

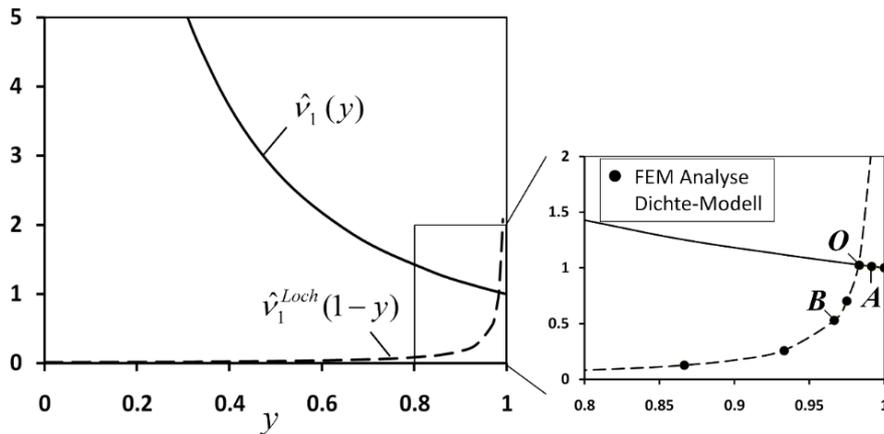


Abb. 8: Verlauf der Frequenz  $\hat{v}_1$  für einen Kragträger der Länge  $y$  aus massiven Elementen und der Frequenz  $\hat{v}_1^{Loch}$  eines Kragträgers aus Lochelementen der Länge  $1-y$ . Die Punkte im rechten hervorgehobenen Bereich bezeichnen die erste Eigenfrequenz  $\hat{v}_1^{DM}(y)$  aus exemplarisch ausgewählten FE-Analysen des Dichtemodells, die zur Kontrolle des analytischen Modells durchgeführt wurden (siehe Abb. 9).

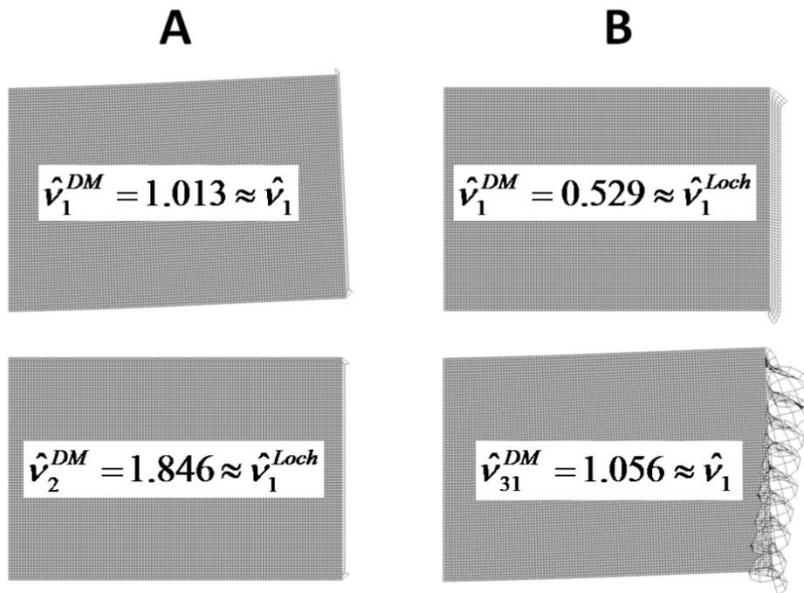


Abb. 9: Eigenformen an denen in Abb. 9.16 gekennzeichneten Punkte A und B. Es sind jeweils die erste Eigenform und die Eigenform dargestellt, welche der ersten Eigenform eines physikalischen Kragträgers aus reinen Lochelementen (Punkt A) oder reinen massiven Elementen (Punkt B) entspricht. Im letzteren Fall wird die Frequenz durch die großen Verschiebungen der Loch-elemente nur unwesentlich beeinflusst.

Da das Dichtemodell den physikalischen Kragträger in diesem Grenzfall nicht realistisch abbildet, kann es das auch nicht im gesamten Zwischenbereich. Vielmehr muss dort irgendwo der Wechsel zwischen physikalischer und künstlicher Eigenform stattfinden. Diesen kann man mithilfe eines einfachen Zwei-Massen-Schwinger-Modells untersuchen, bei dem der massive und der Lochbereich infolge des großen Steifigkeitsunterschieds als entkoppelt betrachtet werden können. Damit setzt sich in erster Näherung das Dichtemodell für einen Kragträger der Länge  $y$  aus einem physikalischen massiven Träger der Länge  $y$  mit der Frequenz  $\hat{v}_1(y)$  und einem Träger aus Lochelementen der Länge  $1-y$  mit der Frequenz  $\hat{v}_1^{Loch}(1-y)$  zusammen (siehe Abb. 7). Geht man nun von einem massiven Balken mit  $y=1$  aus, entspricht die erste Eigenfrequenz der des massiven Bereichs  $\hat{v}_1(1)$ , welche mit kleiner werdenden Länge  $y$  ansteigt. Gleichzeitig sinkt jedoch die Eigenfrequenz des Lochbereichs  $\hat{v}_1^{Loch}(1-y)$  mit kleiner werdenden  $y$ , sodass sich beide Kurven schließlich schneiden (Abb. 8 und 9). Ab dann entspricht die erste Eigenfrequenz nicht mehr der physikalischen Eigenfrequenz des massiven Bereichs, sondern der unphysikalischen Eigenfrequenz des Lochbereichs. Möchte man die erste Eigenfrequenz maximieren, ergibt sich deswegen als „Optimum“ nicht die Länge null, sondern der Schnittpunkt  $O$  der beiden Kurven bei  $y \approx 0,98$ . Somit zeigt sich, dass das Dichtemodell selbst für die beste mögliche Annäherung mit einer scharfen Trennung zwischen massiven und Lochelementen nicht in der Lage ist, das Verhalten eines massiven Kragträgers bezüglich der ersten Eigenfrequenz über den großen Bereich  $y < 0,98$  auch nur annähernd realistisch abzubilden und sich als Konsequenz ein falsches Optimum ergibt. Im allgemeinen Fall, bei dem nicht nur einzelne sondern mehrere zusammenhängende Frequenzen maximiert werden, ergibt sich das Optimum (eventuell auch lokale Optima) als Maximum der überlagerten Kurven für die betrachteten Frequenzen.

Bis hierhin kann man die Modellierungsschwäche auch als Problem aufgrund von künstlichen Eigenformen auffassen, die man problemlos am Verformungsbild identifizieren kann. Dies ist jedoch nicht mehr bei einem Ergebnis einer Topologieoptimierung möglich, weil dort immer mittlere Übergangsdichten im Design vorhanden sind. Die oben durchgeführten Überlegungen, dass beim Verkürzen des Balkens, was einer Reduktion des Füllgrades entspricht, ein Übergang von physikalischer zu künstlicher Eigenform stattfindet und sich das Optimum an dem daraus resultierendem Maximum einstellt, treffen aber auch dort zu. Der Unterschied ist jedoch, dass sich keine künstliche Eigenform mehr identifizieren lässt, weil sich durch den glatten Übergang in den Dichten ein Design ohne harte Steifigkeitssprünge und sich dadurch ein gleichmäßiges Verformungsbild ergibt. Dennoch gilt auch hier, dass sich die „optimale“ Lösung aufgrund einer künstlichen Eigenform einstellt und man somit ein falsches Ergebnis erhält. So ergibt sich beispielsweise für den Kragträger als Lösung des Optimierungsproblems

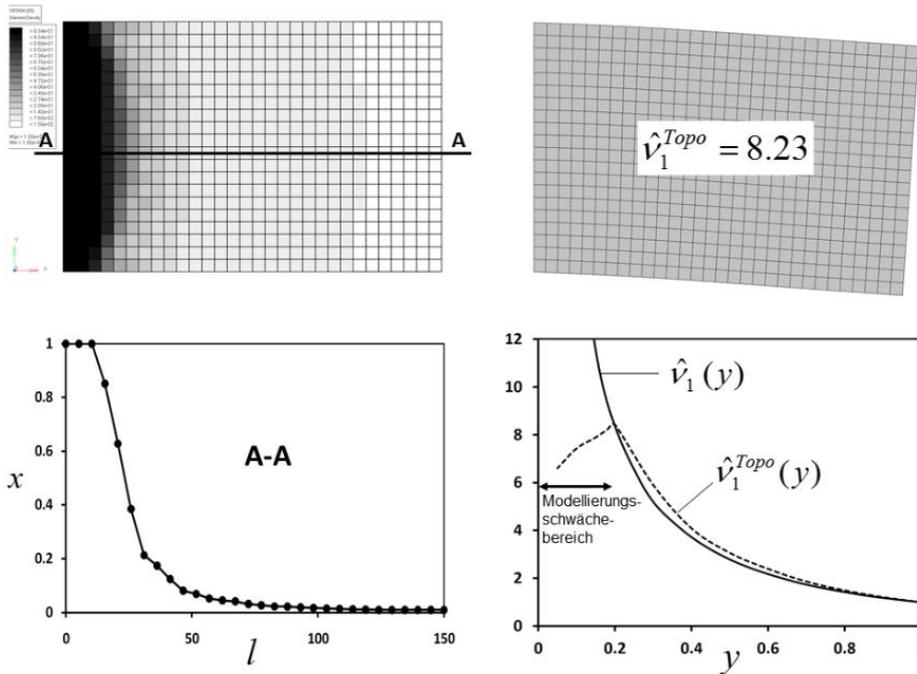


Abb. 10: Ergebnis der Topologieoptimierung (mit eingeschalteter Checkerboard-Control).  
 Oben: Dichteverteilung im Optimum (links) und erste Eigenform (rechts).  
 Unten: Dichteverteilung entlang A-A (links) und Verlauf ersten Eigenfrequenz  $\hat{v}_1^{Topo}(y)$  der Topologieoptimierung<sup>1</sup>, dessen Maximum das Optimum aus der Topologieoptimierung ist, im Vergleich zu einem physikalischen Kragträger aus reinen massiven Elementen in Abhängigkeit der Kragträgerlänge bzw. des Füllgrads (rechts).

$$\min \sum_{i=1}^3 \frac{1}{v_i} \tag{11}$$

sodass  $v \leq v^U$

für  $0,18 \leq v^U$  immer die gleiche Lösung bei einem Füllgrad von  $v^* \approx 0,18$ , welcher näherungsweise der Länge  $y = 0,18$  entspricht (Abb. 10). Dies bestätigt die oben gemachte Annahme, dass sich das Optimum aus einem universellen Maximum im Zwischenbereich ergibt. In diesem speziellen Beispiel führt dies zu einem Kragträger mit der „optimalen“ Länge  $y \approx 0,18$  und damit zu einem offensichtlich falschen Ergebnis. Weiterhin erhält man wie gewohnt einen Designvorschlag mit einem unscharfen Übergangsbereich zwischen massiven und Loch-Elementen, mit dem Effekt, dass man keine künstlichen Eigenformen mehr identifizieren kann.

Es stellt sich die Frage, ob es Beispiele gibt, bei denen die Modellierungsschwäche nicht auftritt. Ein solcher Fall liegt in der Regel vor, wenn ein Bereich des Designraums eingefroren ist, der dominant die Eigenformen bestimmt. Die Topologieoptimierung liefert in diesem Fall nur einen Designvorschlag, wie das bestehende Design am besten zu verstärken ist, um die Frequenzen zu erhöhen. Solch ein Designvorschlag enthält typischerweise durchgehende Verstärkungen aus massiven Elementen, wie dies in dem Beispiel in Abb. 11 zu erkennen ist.

<sup>1</sup> Das linke Kurvensegment von  $\hat{v}_1^{Topo}$  wurde über die Lösung des Optimierungsproblems

$$\min \sum_{j=1}^3 \frac{1}{v_j}, \text{ sodass } v \leq v^U$$

für verschiedene Werte von  $v^U$ , das rechte Kurvensegment über die Lösung von

$$\min \sum_{j=1}^3 \frac{1}{v_j}, \text{ sodass } v^L \leq v$$

für verschiedene Werte von  $v^L$  bestimmt.

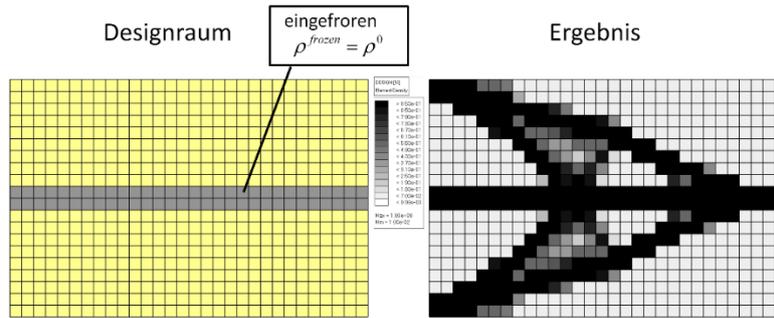


Abb. 11: Ergebnis der Topologieoptimierung eines Kragträgers mit eingefrorener mittlerer Strebe.

Ein anderes Beispiel, bei dem sich die Modellierungsschwäche nicht auswirken kann, liegt vor, wenn es im Designraum eingefrorene Bereiche gibt, die nicht gelagert sind. In diesem Fall ist es nicht mehr ohne weiteres möglich, dass sich die massiven Elemente während der Optimierung immer mehr in Richtung der Anbindung zurückziehen, um dadurch die Frequenz zu erhöhen. Vielmehr kann man in diesem Fall erwarten, dass eine massive Verbindung zwischen den eingefrorenen Bereichen und der Lagerung favorisiert wird, um die Frequenz zu maximieren. Der verfälschende Einfluss der Lochelemente und den Elementen mittlerer Dichte bliebe dann gering. Das Beispiel in Abb. 1 ist ein solcher Fall, bei dem ein nicht gelagerter Bereich von der Optimierung ausgeschlossen (eingefroren) wird. Hier ergibt sich eine sinnvolle Lösung, bei der die Einspannung mit dem eingefrorenen Bereich über eine massive Struktur verbunden ist. Dieser Zusammenhalt wird gleichsam erzwungen, weil eine Auflösung der Verbindung zu einem Abfall der Frequenzen führen würde. Jedoch gilt das nur, wenn die Masse des eingefrorenen Bereichs groß genug ist, um einen relevanten Einfluss auf das Design zu nehmen. So sind in Abb. 12 die Ergebnisse einer Topologieoptimierung für verschiedene Dichtewerte des eingefrorenen Bereichs dargestellt. Man erkennt, dass das Ergebnisse unterhalb von  $\rho^{frozen} = \rho^0$  offenbar nicht mehr brauchbar sind und das Problem der Modellierungsschwäche wieder auftritt.

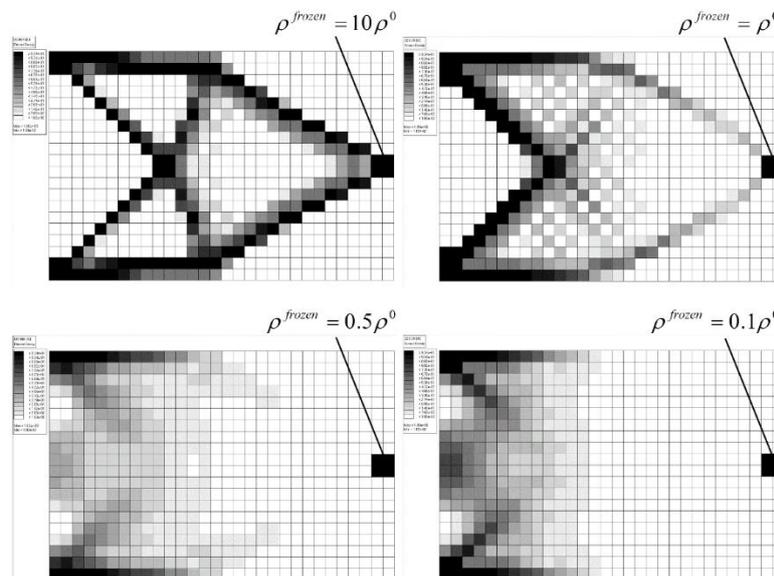


Abb. 12: Ergebnisse einer Topologieoptimierung für das Modell aus Abb. 1 für verschiedene Dichtewerte des eingefrorenen Bereichs. Die Volumenrestriktion  $v \leq 0,3$  ist bei allen Ergebnissen aktiv.

#### 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann man sagen, dass es nach einer dynamischen Topologieoptimierung möglich ist, dass das Ergebnis aufgrund von künstlichen Eigenformen oder einer Modellierungsschwäche nicht sinnvoll zu interpretieren ist. Dies ist vor allem dann wahrscheinlich, wenn es keine dominanten oder nicht angebundene eingefrorene Bereiche im Designraum gibt. Auf jeden Fall sollten immer folgende Punkte überprüft werden:

1. Befinden sich am Ende einer Optimierung unter den verwendeten Frequenzen eine oder mehrere künstliche Eigenformen?
2. Ist im Optimum weder die Füllgradrestriktion noch eine andere Restriktion aktiv?
3. Gibt es zwischen Einspannung und nicht angebundene eingefrorenen Bereichen nur große Bereiche mit geringen Dichten im Bereich von 0,1 bis 0,3 und keine durchgehenden Strukturen höherer Dichte (größer als 0,5)?

Wenn mindestens einer dieser Punkte erfüllt ist, dann ist das Ergebnis vermutlich unbrauchbar und man sollte man auf keinen Fall versuchen, den Designvorschlag physikalisch umzusetzen. Es bleibt alternativ die Möglichkeit, statische Ersatzlastfälle zu bestimmen, welche zu ähnlichen Verschiebungsfeldern führen wie die interessierenden Eigenformen, und darauf basierend eine Optimierung mit dem Ziel, die Steifigkeit zu maximieren, durchzuführen. Im Folgenden wird dieses am Beispiel eines Querträgers demonstriert.

#### 5 Anwendungsbeispiel: Topologieoptimierung eines Querträgers

In Abb. 13 ist der vordere Querträger einer Karosserie [7] dargestellt, in dem in der Mitte ein elektrischer Frontsensor untergebracht ist. Um ein problemloses Funktionieren des Sensors zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass der Pegel der nicht relevanten Schwingungen, wie sie im Normalbetrieb auftreten, nicht zu hoch wird. Nur dann können die Crash-relevanten Signale problemlos diskriminiert werden. Um dies nachzuweisen, wird eine modale Frequenzganganalyse durchgeführt, bei der im relevanten Frequenzbereich in Fahrtrichtung (x-Richtung) eine sinusförmige Anregung

$$F(t) = f \sin(2\pi\nu t) \tag{12}$$

mit konstanter Amplitude  $f$  auf den Anschraubpunkt des Sensors aufgegeben wird. Ausgewertet wird die Beschleunigung  $\ddot{x}$  in x-Richtung im Mittelpunkt des Sensors. Aus dieser wird dann die Inertanz

$$I = \frac{\ddot{x}}{f} \tag{13}$$

bestimmt. Die Anforderung lautet, dass die Inertanz über den betrachteten Frequenzbereich unterhalb der in Abb. 14 dargestellten Grenzkurve liegen soll. Wie dort zu erkennen ist, erfüllte das Basisdesign diese Anforderung nicht, obwohl bereits eine Strebe zur Verbesserung eingebaut worden war (Abb. 13). Vor dem Einbau der Strebe, verletzte Spitze I die Anforderung. Die dazugehörige Eigenform, bei dem der Querträger nach vorne und hinten kippt (Abb. 15), wurde durch den Einbau der Strebe jedoch so stark verbessert, dass die Spitze unterhalb der Grenzkurve sank. Für die Eigenformen II und III, bei denen die Hauptanregung eine Torsion des Querträgers war, wirkte sich die Strebe dagegen kaum aus, sodass in diesem Bereich die Anforderung weiterhin verletzt war.

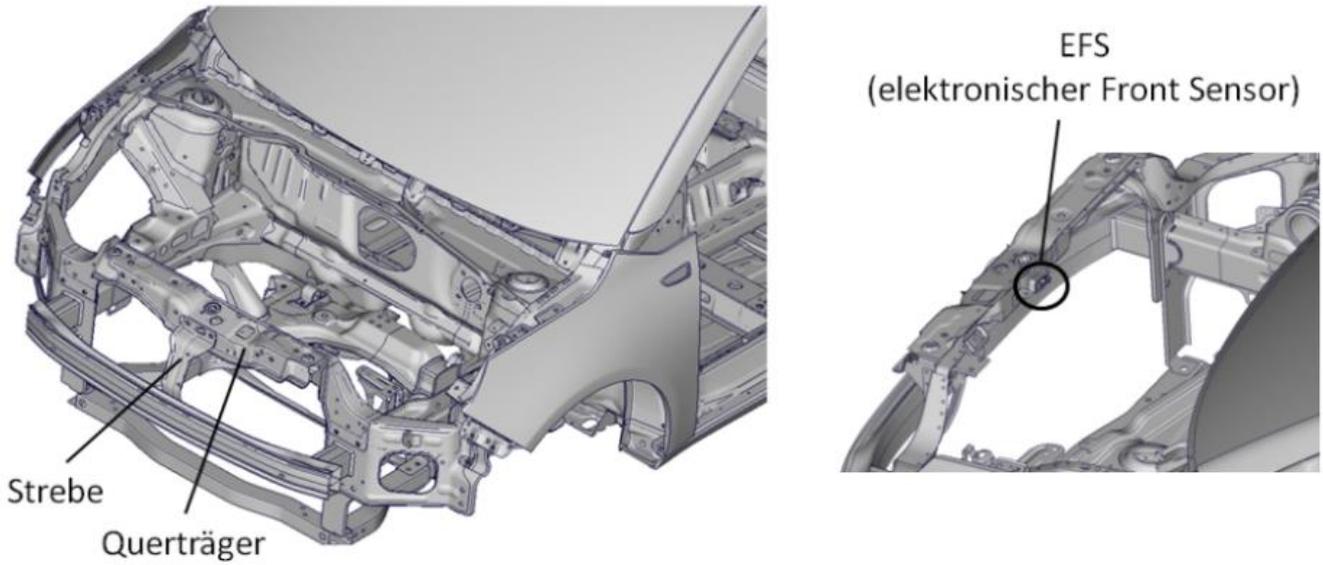


Abb. 13: Querträger mit Strebe und Sensor

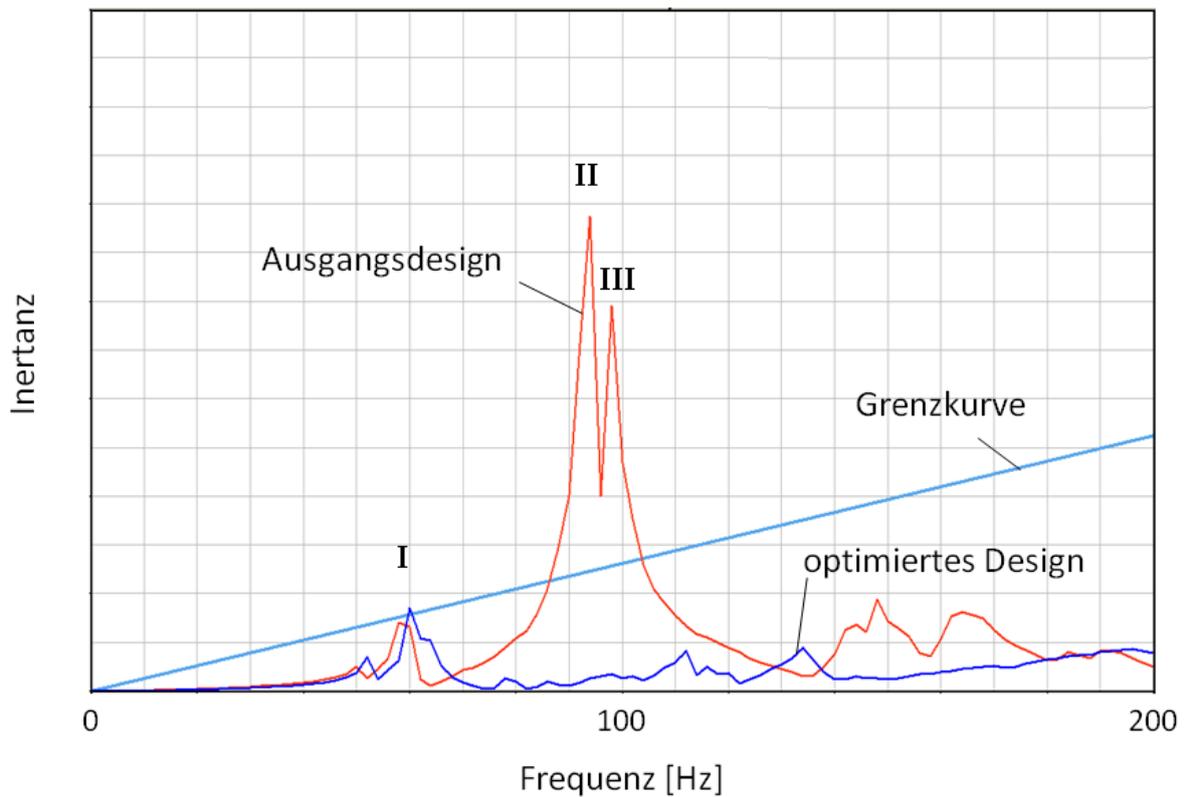


Abb. 14: Verlauf der Grenzkurve und der Inertanz für das Ausgangs- und das optimierte Design mit Bezeichnung der drei dominanten Spitzen

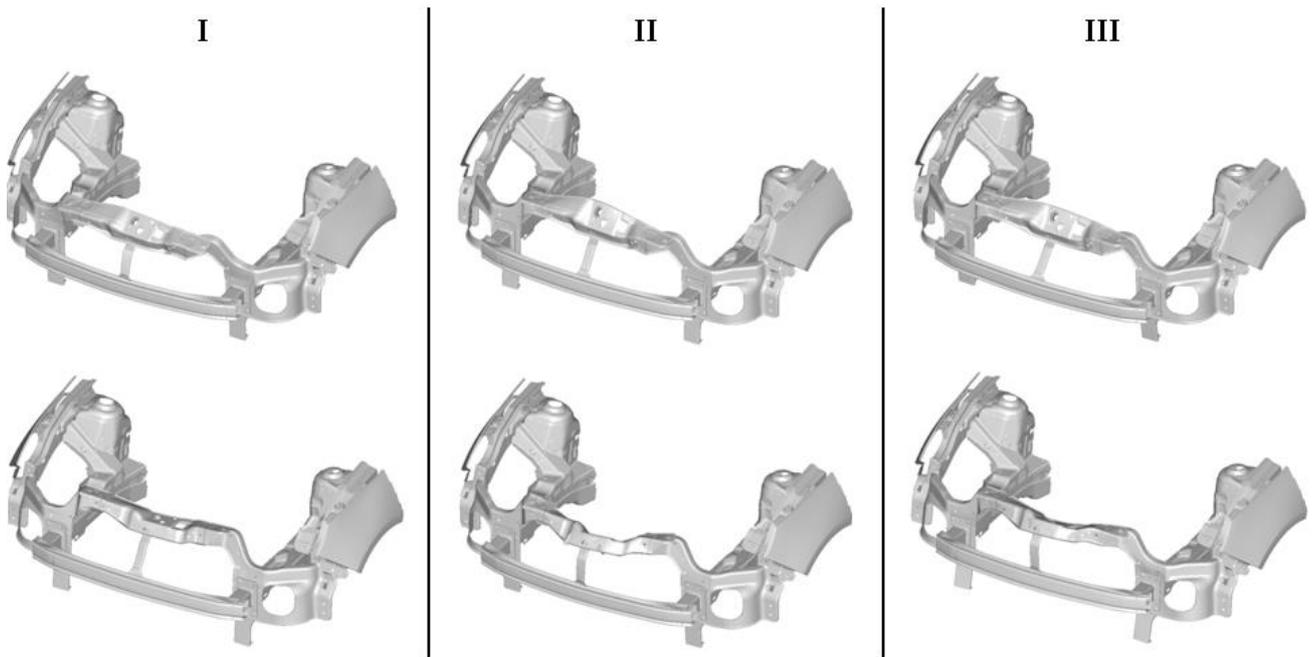


Abb. 15: Die drei Eigenformen, die den drei Spitzen in Abb. 14 entsprechen.

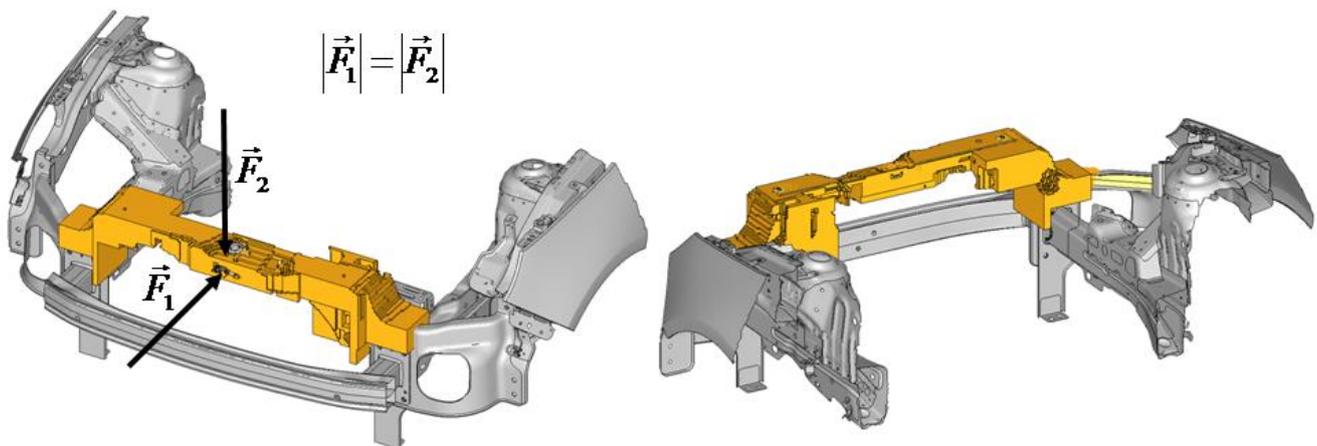


Abb. 16: Designraum (gelb) für die Topologieoptimierung mit den beiden verwendeten Lasten für die zweite Topologieoptimierung bezüglich Steifigkeit.

Da befürchtet wurde, dass die Strebe in einigen Crash-Lastfällen zu unerwünschten Lastpfaden und damit zu Problemen führt, war es das Ziel, mithilfe der Topologieoptimierung ein Design ohne Strebe zu finden, das die Anforderungen erfüllt. Da es sich um einen dynamischen Lastfall handelte, wurde im ersten Schritt eine Optimierung bezüglich der Eigenfrequenzen durchgeführt, weil erwartet wurde, dass sich das Verhalten der Inertanz verbessert, wenn die unteren Frequenzen nach oben geschoben werden. Weiterhin konnte bei dieser Gelegenheit überprüft werden, ob das oben geschilderte Modellierungsproblem auftrat oder nicht.

Der verfügbare Designraum ist in Abb. 16 dargestellt. Die Bereiche um das Schloss und um den Sensor wurden „eingefroren“. Die Absicht war, die Frequenz der Eigenformen, die den Spitzen *I*, *II* und *III* entsprechen, anzuheben. Da jedoch bei der Topologieoptimierung ein Mode-Tracking nicht sinnvoll ist, wurden die ersten sechs Frequenzen, in denen die erwünschten Frequenzen enthalten waren, mithilfe der reziproken Formulierung nach oben geschoben. Das Optimierungsproblem lautete somit:

$$\min \sum_{j=1}^6 \frac{1}{V_j}, \tag{14}$$

sodass

$$v \leq 0,2 .$$

Das Ergebnis für den verwendeten Füllgrad von 0,2 zeigte, dass das Ergebnis die oben besprochene Modellierungsschwäche aufwies und somit nicht verwendet werden konnte. So lagen zwar im relevanten Frequenzbereich keine erkennbaren künstlichen Eigenformen vor, aber die beiden anderen Kriterien ließen sich hier anwenden. So wurde in der Optimierung der maximale mögliche Füllgrad von  $v = 0,2$  nicht ausgenutzt. Vielmehr stellte sich im Optimum ein Füllgrad von  $v^* = 0,187$  ein. Weiterhin zeigte sich in der Dichteverteilung, welche in Abb. 17 dargestellt ist, dass im Designvorschlag fast ausschließlich nur Dichten unterhalb von 0,3 vorhanden waren. Der Massenanteil der „eingefrorenen“ Schloss- und Sensorbereiche war offenbar zu gering, um die Modellierungsschwäche zu beheben. Diese Vermutung wurde bestätigt durch die Tatsache, dass man das gleiche Ergebnis erhielt, wenn man die „eingefrorenen“ Bereiche entfernte. Es machte somit keinen Sinn, die Strukturen mit geringer Dichte physikalisch umzusetzen.

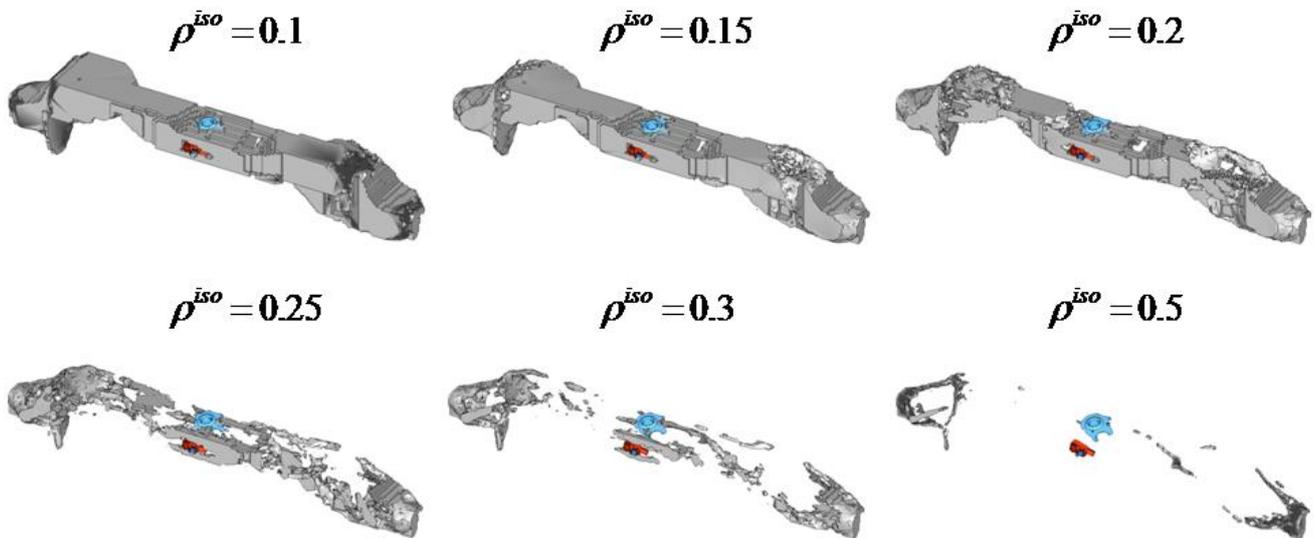


Abb. 17: Dichteverteilung des Designvorschlags aus der Frequenzoptimierung mit  $v \leq 0,2$ . Dargestellt sind Isoflächen für verschiedene Dichtewerte  $\rho^{iso}$ .

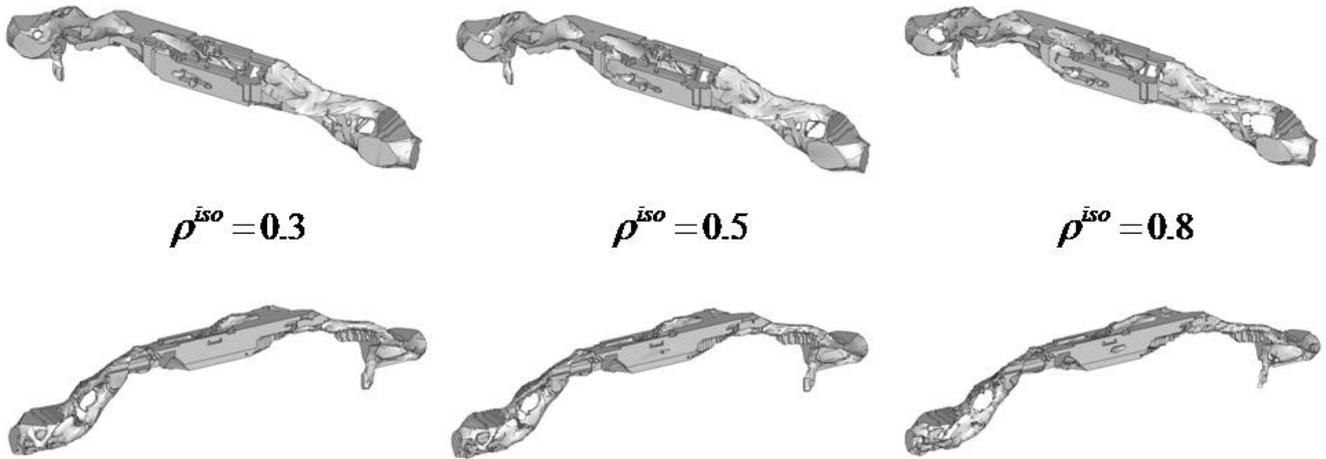


Abb. 18: Dichteverteilung des Designvorschlags aus der Steifigkeitsoptimierung mit verschiedenen Dichtewerten für die dargestellten Isoflächen.

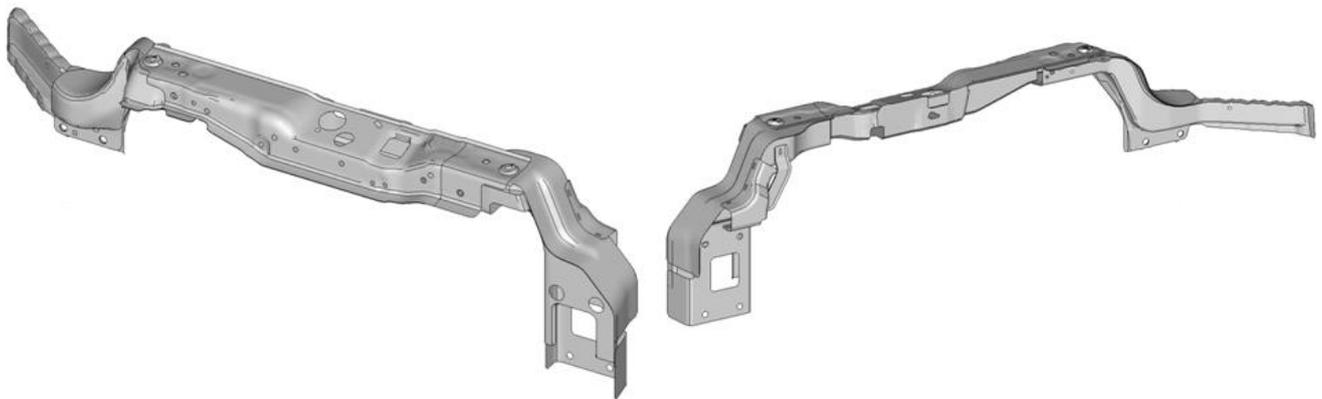


Abb. 19: Umsetzung des Designvorschlags aus Abb. 18

Basierend auf dem oben erläuterten Ergebnis wurde das Ergebnis der frequenzbasierten Optimierung verworfen und auch von einer Optimierung basierend auf einer modalen Frequenzganganalyse abgesehen. Stattdessen wurden zwei statische Ersatzlastfälle bestimmt, welche zu ähnlichen Verschiebungsfeldern führten wie die interessierenden Eigenformen (Abb. 16). Beim ersten Lastfall mit der Last  $\vec{F}_1$  wurde auf dem Anschraubpunkt des Sensors eine Einheitslast entgegen der Fahrtrichtung aufgebracht. Dieser Lastfall sollte die „Kipp“-Eigenform repräsentieren, welche der Spitze I entsprach. Die vertikale Einheitskraft  $\vec{F}_2$  im zweiten Lastfall wirkte nicht mittig auf den Querträger, sondern war etwas in Fahrtrichtung verschoben. Sie sollte die beiden „Torsions“-Eigenformen repräsentieren, die den Spitzen II und III entsprachen. Als Zielfunktion wurde die Summe der mittleren Nachgiebigkeiten  $C_1$  und  $C_2$  aus beiden Lastfällen verwendet. Das Optimierungsproblem lautete somit:

$$\min (C_1 + C_2), \tag{15}$$

sodass

$$v \leq 0,2.$$

Das Ergebnis der Optimierung ist in Abb. 18 dargestellt. Hier zeigte sich, dass – wie erwünscht – der Designvorschlag im Wesentlichen aus massiven Elementen mit einer Dichte  $\rho > 0,8$  bestand. Es wurden auch weitere Optimierungsläufe mit verschiedenen Fertigungsrestriktionen durchgeführt, welche jedoch Designvorschläge ergaben, die weniger erfolversprechend aussahen. Somit wurde das in Abb. 18 gezeigte Ergebnis ohne Fertigungsrestriktionen verwendet.

In Abb. 19 ist die Umsetzung gezeigt. Hier wurde der Designvorschlag so interpretiert, dass der Mittelbereich des Querträgers als geschlossenes Profil ausgeführt werden sollte. Weiterhin wurden Details des Designvorschlags dazu verwendet, um Hinweise zu bekommen, wie der Mittelbereich seitlich angebunden werden sollte. Abgewichen wurde bei dem Verlauf der seitlichen Anbindungen, welche im Designvorschlag schon frühzeitig diagonal nach außen abfallen, in der Umsetzung dagegen noch über einen größeren Bereich in Höhe des Mittelteils verliefen. Der Grund dafür war, dass in diesem Bereich die Anschlagspuffer für die Haube angebracht wurden. Am Ende musste wie immer überprüft werden, ob die abgeleitete Konstruktion wirklich die Anforderungen erfüllte. Die Auswertung der modalen Frequenzganganalyse zeigte (Abb. 14), dass die getroffenen Maßnahme erfolgreich waren und dass man ein Design gefunden hatte, das ohne Strebe auskommt.

## 6 Literatur

- [1] Bendsoe, M. P.: "Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem", Struct Opt 1, 1989, 193 – 202
- [2] Rosvany, G. I. N., Zhou, M., Birker, T.: "Generalized Shape Optimization without Homogenisation", Struct Optim 4, 1992, 250 – 254
- [3] Bendsoe, M. P., Sigmund, O.: Material Interpolation Schemes in Topology Optimization. Archives of Applied Mechanics 69(9 – 19), 1999, 635 – 654
- [4] Bendsoe, M. P., Sigmund, O.: Topology Optimization, Theory, Methods and Applications. Springer Verlag Berlin Heidelberg NY, 2003, ISBN 3-540-42992-1
- [5] Pedersen, N. L.: "Maximization of Eigenvalues Using Topology Optimization", Struct Multidisc Optim 20, 2000, 2-11
- [6] Roark, R. J.: "Roark's Formulas for stress & Strain", Sixth Edition. McGraw-Hill Book Company 1989, ISBN 0-07-072541-1
- [7] Harzheim, L.: „Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendungen, 2. Auflage“, Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 2014, Europa-Nr. 56580, ISBN 978-3-8085-5659-7

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

Adresse für Fensterkuvert



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

## Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (1/2017)

Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

- |   |   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft      | <input type="checkbox"/> NAFEMS e-learning                            |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“ | <input type="checkbox"/> Professional Simulation Engineer PSE         |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare            | <input type="checkbox"/> Internationale Arbeitsgruppen                |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse      | <input type="checkbox"/> NAFEMS World Congress / Int. SPDM Conf. 2017 |

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.

Ich interessiere mich für [www.CAEjobsite.com](http://www.CAEjobsite.com). Bitte kontaktieren Sie uns.

**Absender**

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

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

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

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

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

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

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

Straße: \_\_\_\_\_

Straße: \_\_\_\_\_

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

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

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

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

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

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

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

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

Bitte per Post oder E-Mail an:  
[magazin@nafems.de](mailto:magazin@nafems.de)

Adresse für Fensterkuvert

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

## Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (1/2017)

Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

- |   |   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft      | <input type="checkbox"/> NAFEMS e-learning                            |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“ | <input type="checkbox"/> Professional Simulation Engineer PSE         |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare            | <input type="checkbox"/> Internationale Arbeitsgruppen                |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse      | <input type="checkbox"/> NAFEMS World Congress / Int. SPDM Conf. 2017 |

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.

Ich interessiere mich für [www.CAEjobsite.com](http://www.CAEjobsite.com). Bitte kontaktieren Sie uns.

**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: \_\_\_\_\_



# Online-Magazin

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

Tel. +49 (0) 176 217 984 01  
e-mail: [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de)

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

ONE  
**ASSOCIATION**  
1 0 0 0 M E M B E R  
O R G A N I S A T I O N S

ONE  
**VISION**  
3 0 0 T E C H N I C A L  
G R O U P P A R T I C I P A N T S

ONE  
**COMMUNITY**  
O V E R 3 0 0 0  
E V E N T A T T E N D E E S

ONE  
**NAFEMS**  
T H E I N T E R N A T I O N A L  
A S S O C I A T I O N F O R  
T H E E N G I N E E R I N G  
A N A L Y S I S C O M M U N I T Y



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