



# Online-Magazin

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

## Fachbeiträge

### MAGNETOMECHANIK

Anwendung modaler Analysen und Partizipationsfaktoren zur Bewertung magnetomechanischer Simulationen

### STRÖMUNGSMECHANIK

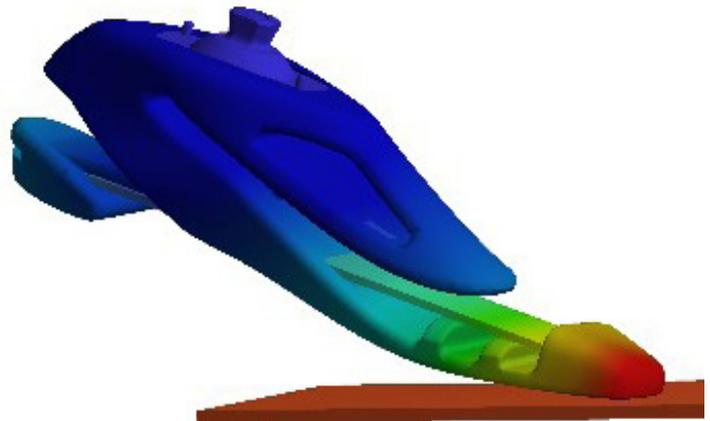
Anforderungen und Grenzen traditioneller FVM und neuer SPH-Ansätze zur Strömungssimulation in Fahrzeuggetrieben

### STRUKTURDYNAMIK

Integrierte Systemsimulation einer Fräsmaschine

### MEDIZINTECHNIK

Finite Elemente basierte Qualitätssicherung in der digitalen Prozesskette von individuell gefertigten Orthopädieprodukten



## NAFEMS20 DACH CONFERENCE

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

Call for Papers: Bitte um Abstracts bis 24.01.2020



International Conference on  
CAE Interoperability 2020

13-14 May 2020, Bamberg, Germany

Call for Papers: Bitte um Abstracts bis 24.01.2020



**NWC** NAFEMS  
NAFEMSWORLD CONGRESS 2021

JUNE 14 – 18, 2021 – SALZBURG, AUSTRIA  
A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION

& International SPDM Conference

**spdm**  
INTERNATIONAL CONFERENCE  
Simulation Process & Data Management

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,

wir leben in einer Zeit, in der das Virtuelle mehr und mehr die Realität zu verdrängen scheint. Man spricht davon, reale Versuche häufiger durch virtuelle Tests zu ersetzen. Damit kommt man schneller und mit geringerem Aufwand zu Aussagen über das Verhalten des untersuchten Produkts. Bei der Wertung dieser Aussagen sollte man sich jedoch immer bewusst sein, dass man lediglich ein Modell des Produktes numerisch analysiert. Es kommt also darauf an, dass das Modell die wesentlichen Eigenschaften des realen Produkts möglichst zutreffend abbildet und dass schließlich das Modell auch mit geeigneten Methoden numerisch umgesetzt wird. Wenn man sich die Modellentwicklungen in den vergangenen Jahren ansieht, kann man zwei gegensätzliche Tendenzen feststellen. Zum einen werden sie immer detaillierter und beinhalten auch mehr Funktionen. Als Stichworte sind hier multi-dimensionale und multi-physikalische Ansätze zu nennen. Diese Tendenz wird durch stark wachsende und effizientere Rechner- und Speicherkapazitäten begünstigt. Zum anderen wird versucht, die Modelle so einfach wie möglich zu gestalten. Das ist dann besonders angesagt, wenn dasselbe Problem vielfach mit geänderten Parametern untersucht werden muss. Im Extremfall führt das zu Metamodellen, also einer Modellbildung über Abstraktionsebenen hinweg, so dass die Verbindung zur Realität kaum noch zu erkennen ist. Ziel sollte es sein, zwischen den beiden Tendenzen die optimale Lösung zu finden, die die wichtigen Eigenschaften des Produkts hinreichend genau beschreibt, aber Unwichtiges außer Acht lässt. Die Entwicklung von Lösungsmethoden tendiert zu stabileren und effektiveren Verfahren, die in einigen Fällen an bestimmte Problemstellungen angepasst sind.



*Prof. Dr.-Ing.  
Klaus Rohwer*

Beeindruckende Beispiele für eine sinnvolle Modellbildung finden sich auch in den Fachbeiträgen des vorliegenden Heftes. Die ersten beiden Beiträge sind allerdings eher methodenorientiert. Zunächst wird die Simulation elektromechanischer Effekte behandelt, wie sie zum Beispiel in der Magnetresonanztomographie auftreten. Harmonische Verschiebungen werden in mechanische Eigenmoden des Systems entwickelt, um Resonanzen zu identifizieren. Als Alternative zur komplex gekoppelten Simulation lässt sich mit der Methode der Partizipationsfaktoren ermitteln, welche Kryostatmoden von einer gegebenen Kombination aus Gradientenspule und MRT Magnet angeregt werden. Der zweite Beitrag kommt aus dem Bereich der Strömungssimulation in Fahrzeuggetrieben. In ihm wird die traditionelle Finite-Volumen-Methode (FVM) verglichen mit Methoden der Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Es zeigt sich, dass letztere sich gut für das frühe Entwurfsstadium eignen, während die FVM detailliertere Ergebnisse liefert aber einen erhöhten Aufwand für das Preprocessing erfordert. Der dritte Beitrag weist nach, dass für eine optimale Auslegung von Werkzeugmaschinen Topologie und Regler in das Modell einbezogen werden müssen. Dabei hat die Reihenfolge der Optimierungsprozesse einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse. In einem Beitrag aus der Medizintechnik wird schließlich gezeigt, wie aus Anwenderdaten automatisch die Anatomie erkannt wird, um darauf aufbauend individuell angepasste Prothesen oder Orthesen digital in Form, Funktion und Design zu entwickeln und anschließend in einem 3D-Drucker zu fertigen.

Ich denke, wir haben damit wieder sehr interessante Ausführungen vorliegen, und ich wünsche Ihnen beim Lesen Erkenntnisse, die Sie in Ihrer Arbeit voranbringen.

Mit freundlichen Grüßen

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

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



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

Vorwort des Editor-in-Chief.....2  
 Sponsoren .....3  
 Inhalt / Impressum .....4

**NAFEMS Events**  
 Übersicht: Konferenzen, Schulungen, e-learnig Kurse .....5  
 NAFEMS DACH Konferenz ´20 - Call for Papers .....6 - 7  
 VMAP Int. Conference on CAE Interoperability ´20 - Call for Papers ...8  
 NAFEMS World Congress ´21 - Vorankündigung .....9  
 NAFEMS Regionalkonferenzen ´20 - Übersicht.....10  
 NAFEMS Europ. Multiphysics Conference ´20 - Vorankündigung .....10

**NAFEMS Studierendenwettbewerb**.....11

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

**NAFEMS Literatur**  
 Invitation 2 Tender .....18 - 19  
 Benchmark Magazin .....20

**Neuigkeiten** .....21 - 32

**Veranstaltungskalender** .....33

**Fachbeiträge**

**Magnetomechanik**  
 Anwendung modaler Analysen und Partizipationsfaktoren  
 zur Bewertung magnetomechanischer Simulationen .....34  
 C. Ströhlein (Universität Regensburg); H. Landes (SIMetris);  
 A. Krug, P. Dietz, A. vom Endt (Siemens Healthcare)

**Strömungsmechanik**  
 Anforderungen und Grenzen traditioneller FVM und neuer  
 SPH-Ansätze zur Strömungssimulation in Fahrzeuggetrieben .....42  
 G. Maier, W. Baier, A. Diemath (AVL List); F. Testa (AVL Italia)

**Strukturdynamik**  
 Integrierte Systemsimulation einer Fräsmaschine .....53  
 R. Helfrich, B. Kirchgäßner, G. Nötzel-Steidle (Intes)

**Medizintechnik**  
 Finite Elemente basierte Qualitätssicherung in der digitalen  
 Prozesskette von individuell gefertigten Orthopädieprodukten .....72  
 F. Glas (Mecuris)

**Über NAFEMS**  
 Übersicht .....78  
 Ziele .....79  
 Mitglied werden .....80  
 Mitgliedsmodelle .....81  
 Technische Arbeitsgruppen .....82  
 Veranstaltungen .....83  
 PSE Zertifizierung .....84  
 Training .....85  
 Resource Centre .....86  
 Publikationen.....87

**Werbeanzeige**  
 ITEA3 VMAP Projekt.....21 - 24

**Rückmeldeformulare** .....88/89

**Impressum**

**Editor-in-Chief**

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

**Redaktioneller Beirat**

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

**Redaktion**

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

**Gestaltung / Layout / Anzeigen**

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

**Bezugspreis / Aboservice**

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

**Anzeigenpreise**

Preisliste vom 01.01.2019

**Verteilung / Bezug**

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

**Copyright © 2019, Werbos GbR.**

Nachdruck – auch auszugsweise -, 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**

## Konferenzen in DACH 2020

Konferenztitel

Termin

Ort

# NAFEMS20 DACH CONFERENCE

[www.nafems.org/dach20](http://www.nafems.org/dach20)

11.-13. Mai

Bamberg



**International Conference on  
CAE Interoperability 2020**

[www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020](http://www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020)

13.-14. Mai

Bamberg

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

## Schulungen in DACH 2020

Schulungstitel

**Verification and Validation in Engineering Simulation**

[www.nafems.org/vandv20-1](http://www.nafems.org/vandv20-1) (in Kürze online)

02.-03. März

München

**Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie**

[www.nafems.org/fkm20-1](http://www.nafems.org/fkm20-1) (in Kürze online)

Frühjahr

Wiesbaden

**NVH**

in Planung, bei Interesse bitte melden

**Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation**

auf Anfrage / Inhouse

**CFD Analysis: Theory and Applications**

auf Anfrage / Inhouse

**Non-Linear Finite Element Analysis**

auf Anfrage / Inhouse

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

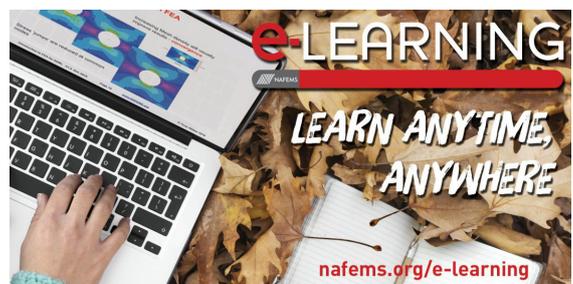
Eine Beschreibung der Schulungsinhalte finden Sie auf Seiten 12 - 17. Weitere Schulungen und Kurse, die web-basiert (e-learning bzw. Webinare) oder ausserhalb der deutschsprachigen Region stattfinden, finden Sie unter [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events).

## e-Learning Kurse

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

Folgende Themen werden regelmäßig angeboten:

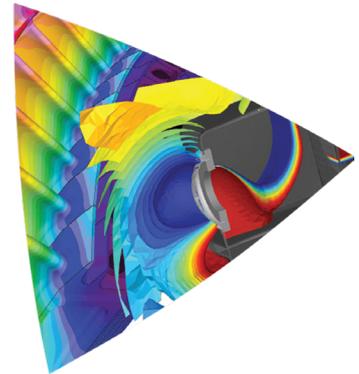
- 10 Steps to Successful Explicit Dynamic Analysis
- Advanced Dynamic FEA
- Basic FEA
- Composite FEA
- CFD for Structural Designers and Analysts
- Elements of Turbulence Modeling
- Fatigue & Fracture Mechanics in FEA
- Introduction to Dynamics using FEA
- Introduction to Engineering Simulation for Non-Specialists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



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

Ankündigung und Call for Papers

# NAFEMS20 DACH CONFERENCE



Fachkonferenz für Modellierung, Berechnung & Simulation

**11. - 13. Mai, Bamberg, Deutschland**

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

– Bitte reichen Sie Ihren Abstract bis 24. Januar 2020 ein –

## Call for Papers

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



Mit dieser Fachkonferenz bietet Ihnen NAFEMS eine Plattform, auf der neue Techniken und Tools präsentiert werden sollen und den Teilnehmern die Möglichkeit geboten wird, auf breiter Basis erfolgreiche Anwendungen und Trends mit Spezialisten aus Forschung und im besonderen Maße aus der Industrie zu diskutieren. Die Teilnahme ist gleichsam offen für NAFEMS-Mitglieder und Nichtmitglieder, wobei NAFEMS-Mitglieder im Rahmen ihrer Mitgliedschaft gegen fünf „NAFEMS seminar credits“ kostenlos teilnehmen.



## Gestalten Sie mit - reichen Sie einen Vortrag ein!

Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie mit einem Fachvortrag aktiv an der Gestaltung der Konferenz und damit zum Erfolg beitragen würden. Wir wünschen uns Beiträge, die interessante oder beachtenswerte industrielle Anwendungen, Weiterentwicklungen in der Technologie oder Theorie, zur Sicherung der Ergebnisqualität, zur Verbesserung des Datenmanagements und der Systemintegration sowie zur Verbesserung der Aus- und Weiterbildung auf diesem Gebiet beinhalten. Wir freuen uns auf Ihren Abstract, den Sie bitte bis zum 24. Januar 2020 an [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de) senden.



**Informationen und Anmeldung:** [www.nafems.org/dach20](http://www.nafems.org/dach20)

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

**Driving Design with Engineering Simulation**

- Finite Element Analysis
- Computational Fluid Dynamics <sup>1)</sup>
- Multibody dynamics
- Discrete Element Methods
- Boundary Element Method
- Meshfree methods
- New/emerging numerical methods
- Co-simulation / code coupling
- Structure integrity, static, dynamic, high speed impact
- Fluid flow
- Acoustic
- NVH
- Electrical
- Heat transfer
- Optical
- Electromagnetic fields, EMC
- Multiphysics
- Multiscale
- Multidisciplinary analysis
- Optimisation (structures, flow, ...)
- Pre- and postprocessing
- Stochastic / probabilistic methods

**Systems Modelling**

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

**Implementing Simulation Confidence**

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

**Deploying your Simulation Capability**

- Automation
- Democratisation
- HPC - High performance computing
- Cloud computing

- Licensing
- CAD - CAE integration
- Real time simulation
- Business case simulation projects

**Effective Simulation of Materials**

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

**Digital Engineering**

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

**Manufacturing Process Simulation**

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

**Simulationsdatenmanagement SDM**

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

<sup>1)</sup> Im CFD-Fokus:

**Mehrphasenströmung**

Mehrphasenanwendungen gewinnen im Bereich der Strömungssimulation branchenübergreifend immer mehr an Bedeutung: Ob Kavitation an Schiffspropellern, Siedevorgänge bei der Wärmebehandlung von Metallen, Partikel- oder Tropfenabscheidung in verfahrenstechnischen Anlagen oder Sloshingvorgänge in Autotanks, in vielen technischen Anwendungen müssen Mehrphasenprobleme sicher und zuverlässig modelliert werden. Verbesserte Modellierungen mit klassischen Finite Volumen Verfahren aber auch der Einsatz neuer Methoden in diesem Gebiet wie Lattice-Boltzmann oder SPH ermöglichen es inzwischen, ein breites Spektrum an komplexer Physik für Mehrphasenanwendungen abzudecken. Neben den allgemeinen Vorträgen im CFD-Bereich freuen wir uns insbesondere über Beiträge zum Thema Mehrphasenströmung. Geplant ist ein Keynote-Vortrag, dedizierte Vortragsessions, eine Kurzeinführung in die Theorie (Darstellung und Grenzen der Modelle) sowie einen Workshop zu Best Practices mit Beispielen für Mehrphasenströmungen.

**Einreichung von Abstracts**

Wir freuen uns auf Ihren 1/2-seitigen, deutschsprachigen Titel + Abstract per e-mail an [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de) bis zum **24. Januar 2020**.

**Veranstaltungsort / Hotel**

Welcome Kongresshotel Bamberg

**Teilnahmegebühren**

- Nicht-Mitglieder: Euro 775,-
- NAFEMS-Mitglieder: frei unter Verwendung von 5 seminar credits\*
- NAFEMS-Mitglieder ohne seminar credits: Euro 500,-
- Vortragende aus Unternehmen zur Produktion/Weiterverarbeitung von materiellen Gütern/Waren in Fabriken/Anlagen : frei

**Ausstellung/Sponsoring**

Bitte fordern Sie weitere Informationen an.

**Informationen und Anmeldung:**

[www.nafems.org/dach20](http://www.nafems.org/dach20)

Ankündigung und Call for Papers



## International Conference on CAE Interoperability 2020

13-14 May 2020, Bamberg, Germany

Interoperability is a significant topic for much of the Computer-Aided Engineering (CAE) simulation and analysis sector. Improving accuracy and speed in both product and process design is a constant requirement. A critical factor in this is enabling seamless collaboration between teams, often in different organisations, addressing different simulations and physics. This, however, presents a significant barrier.

The 1st International Conference on Interoperability, organised by the VMAP project, will discuss these issues and more. The conference will take place in Bamberg, Germany, from 13th-14th May 2020, following directly on from the NAFEMS DACH Regional Conference at the same venue.

Focusing on the many aspects, problems and possible solutions in interoperability including software implementation, simulation process integration, data transfer, standards, ontologies, and collaboration, this will be the first independent, international gathering focussing solely on interoperability.

### Call for Papers

The call for papers is now open, and we are welcoming submissions from every industry and region from across the globe. All presentations which are relevant to interoperability within CAE will be welcome, but we are particularly interested in the following topics:

- Standards for Interfaces and Data Formats
- Software Solutions supporting Interoperability and Standards
- Manufacturing Simulation
- Process Integration and Design Optimization
- Digital Factories and Digital Twins

### Abstract submission

Please send your abstract (300 words) to [gino.duffett@nafems.org](mailto:gino.duffett@nafems.org) by January 24th 2020 at the latest. Abstracts must include author name, organisation, address, phone number and email address.

### Venue

Welcome Kongresshotel Bamberg, Mußstraße 7, 96047 Bamberg, Germany

### Delegate Fee

Free of charge for experienced experts, engineers, developers and practitioners in the field. The number of participants is therefore strictly limited and available on a first-come,

first-served basis, with acceptance being solely at the organiser's discretion. Participation will be limited to one person per entity; however, additional registrations can be requested from the organisers if necessary.

### Conference Language

English

### Conference Organisation

NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH  
Griesstraße 20,  
D-85567 Grafing b. München  
Phone: +49 176 217 984 01  
Fax: +49 3 22 11 08 99 13 41  
[info@nafems.de](mailto:info@nafems.de)  
[www.nafems.org](http://www.nafems.org)

Informationen und Anmeldung: [www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020](http://www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020)

Ankündigung



# NWC

NAFEMSWORLD CONGRESS **2021**

**JUNE 14 – 18, 2021 – SALZBURG, AUSTRIA**  
**A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION**

& International SPDM Conference



**INTERNATIONAL CONFERENCE**  
 Simulation Process & Data Management

Wir freuen uns sehr, Ihnen schon heute mitteilen zu können, dass der 13. NAFEMS World Congress & International SPDM Conference (NWC) vom 14. - 18. Juni 2021 in Salzburg, Österreich stattfinden wird.

Folgender Ablauf ist angedacht

MONTAG 14. JUNI	DIENSTAG, 15. JUNI	MITTWOCH 16. JUNI	DONNERSTAG 17. JUNI	FREITAG 18. JUNI
<b>CAE Messe/ Ausstellung</b> (Eintritt frei)  <b>Pre-Con- gress short trainings</b> (nur für Konferenz- teilnehmer)	<b>Get together Ausstellungseröffnung</b>  <b>NAFEMS World Congress &amp; Int. SPDM Conference</b>  <b>Kongressbegleitende CAE Messe/Ausstellung</b> (nur für Konferenzteilnehmer)			zus. CAE Events *: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trainings</li> <li>• Projektmeetings</li> <li>• Diskussions- gruppen</li> <li>• Anwendertreffen</li> <li>• Softwarehersteller</li> <li>• Meetings von Partner- organisationen</li> <li>• Firmenbesichtigungen</li> <li>• u.a..</li> </ul>

Sollten Sie Interesse haben, Ihren eigenen, ggf. auch zweitägigen CAE-Event (\*) – z.B. Software-Anwendertreffen, Projektmeeting, Organisations-/Vereinsmitgliedertreffen, Hands-on, Firmenvorstellung, Diskussionsrunde etc., am 18. Juni an den NAFEMS World Congress anzukoppeln, setzen Sie sich bitte zeitnah per e-mail an [roger.oswald@nafems.org](mailto:roger.oswald@nafems.org) in Verbindung. Am diesem Tag planen wir auch Firmenbesichtigungen. Die Agenda der letzten Konferenz in Quebec City, Kanada, sowie die Liste der Aussteller und Sponsoren finden Sie unter [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress).

Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie zum Gelingen der Veranstaltung mit einem Vortrag und/oder mit der Teilnahme an der Ausstellung bzw. am Sponsoring beitragen würden. Die Deadline zur Abgabe von Abstracts ist für Anfang November 2020 geplant.

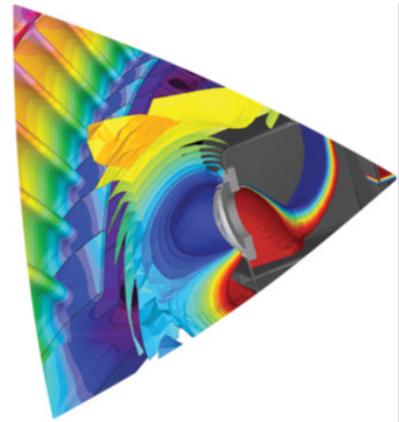
Weitere Informationen finden Sie zeitnah unter [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress)

**NAFEMS World Kongresse:**

- 2021 Salzburg, Österreich
- 2019 Quebec City, Kanada
- 2017 Stockholm, Schweden
- 2015 San Diego, USA
- 2013 Salzburg, Österreich
- 2011 Boston, USA
- 2009 Kreta, Griechenland
- 2007 Vancouver, Kanada
- 2005 Malta
- 2003 Orlando, USA
- 2001 Como, Italy
- 1999 Rhode Island, USA
- 1997 Stuttgart, Deutschland

# NAFEMS20 Regional Conferences

[nafems.org/2020](http://nafems.org/2020)



**Bamberg, Deutschland**  
11. - 13. Mai

**Indianapolis, USA**  
16. - 18. Juni

**East Europe**  
September

**Goteborg, Schweden**  
26. - 27. Mai

**Singapor**  
27. Juli

**Paris, Frankreich**  
18. - 19. November

**Milton Keynes, UK**  
9. - 10. Juni

**Bangalore, Indien**  
24. - 25. Juli

**Barcelona, Spanien**  
November

Ankündigung

## NAFEMS

# European Multiphysics Conference

**20. - 21. Oktober 2020 in München**

**Nähere Infos folgen in Kürze.**

## NAFEMS Studierendenwettbewerb

## NAFEMS Student Award 2020/2021

Abgabetermin: 28. Februar 2020

**Auszeichnung für hervorragende studentische Arbeiten:  
Berechnung und Simulation im Bereich der Ingenieurwissenschaften****1. Preis:**

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

**2. Preis:**

300 Euro <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Preisgeld mit freundlicher Unterstützung der Mvoid Group ([www.mvoid-group.com](http://www.mvoid-group.com))

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

**Teilnahmebedingungen**

Senden Sie bitte zunächst eine Zusammenfassung Ihrer Arbeit (ca. 300 - 1000 Wörter) zusammen mit Ihren und den Kontaktdaten Ihres/Ihrer Betreuer/s zu. Die Einreichung muss in englischer Sprache im Textformat erfolgen. [Das Online-Formular zur Einreichung steht unter \[www.nafems.org/professional-development/student-awards/dach/\]\(http://www.nafems.org/professional-development/student-awards/dach/\) zur Verfügung.](http://www.nafems.org/professional-development/student-awards/dach/)

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

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

**Regeln und Vorschriften****Teilnahmeberechtigung**

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

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

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

**Vergaberichtlinien**

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

## NAFEMS Schulung

*Dieser Kurs wurde bereits über 35 Mal in ganz Europa gehalten!*

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

2. - 3. März 2020 in München / 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/vandv20-1](http://www.nafems.org/vandv20-1)  
 (in Kürze online)

## NAFEMS Schulung

# Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie

Frühjahr 2020 in Wiesbaden / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

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

### Gliederung

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

### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/fkm20-1](http://www.nafems.org/fkm20-1) (in Kürze online)

Theorie zum statischen Festigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

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

Beispiel „Getriebegehäuse“ zum statischen Nachweis

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

Theorie zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

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

Beispielrechnung „Getriebegehäuse“ zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis

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

Einführung in die Spannungskonzepte für die Schweißnahtbewertung

- > Nennspannungskonzept
- > Strukturspannungskonzept
- > Kerbspannungskonzept

- > Modellierung für Kerbspannungskonzept

Theorie Statischer Nachweis für geschweißte Bauteile

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

Beispiele zum statischen Nachweis geschweißter Bauteile

- > Strukturspannungsnachweis
- > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis

Theorie Ermüdungsnachweis für geschweißte Bauteile

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

### Referent

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

## NAFEMS Schulung

# Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

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

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

### Who Should Attend

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

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

### Technical Content

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

cedures, Difficulties in modelling non-linear problems.

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

### Tutor

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



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

### Course Language

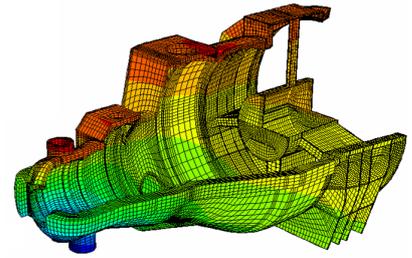
English

### Inhouse-Kurs

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

## NAFEMS Schulung

# Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation



Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

### Kurssprache

Deutsch

### Inhouse-Kurs

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

## NAFEMS Schulung

# Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

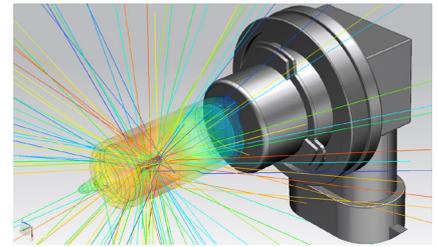
Die Schulung vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung (CFD). Neben der Funktionsweise von Programmen, die anhand zahlreicher einfacher Beispiele erläutert wird, steht die Vermittlung des gesamten Lösungsprozesses im Vordergrund. Mit Hilfe von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

### Inhalte

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

Problemen / Fehlerquellen beim Lösungsprozess

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



### Referent



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

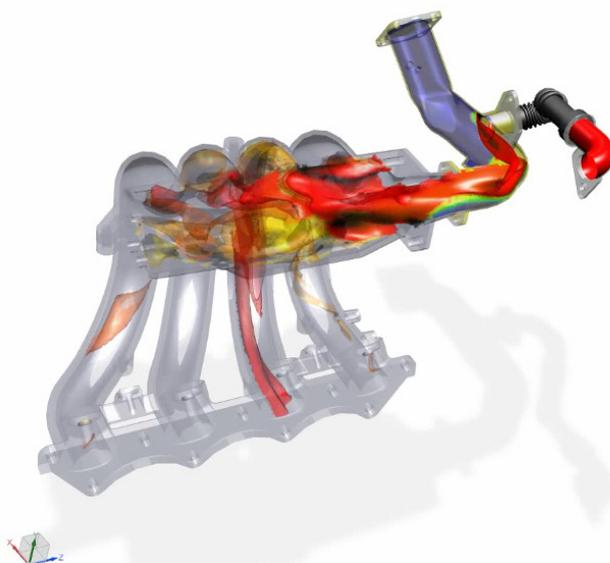
*der Strömungsberechnung CFD in Lehre, Forschung und Industrie. Herr Kohnen leitet den Bereich Maschinenbau und Virtual Engineering an der Hochschule Baden-Württemberg Mosbach.*

### Kursprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

### Inhouse-Kurs

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



# invitation<sup>2</sup>TENDER



## How to Analyse and Process CFD output

The NAFEMS Computational Fluid Dynamics Working Group (CFDWG), wishes to commission a new How-to guide with the suggested title "How to Analyse and Process CFD output".

The book will focus on the analysis and processing of CFD output. Its aim is to equip analysts with the understanding and techniques necessary to obtain key project data from CFD output. Part of this is to understand that the post processing starts very early in the project and that the post processing requirements may influence the grouping of surfaces or location of interior surfaces and model setup.

### Scope

The book should go further than merely illustrating how to post-process and visualise Computational Fluid Dynamics results: it should also show how to check the output of CFD software to ensure that the results are credible and correctly reflect the intended model set-up. This will include checks for physical realism; global conservation of conserved quantities; etc. The role of visualisation and the numerical processing of CFD output should be highlighted in such checks. The benefits and limitations of cross-checks on the credibility and consistency of Computational Fluid Dynamics results through simple calculations and comparisons to empirical data should also be covered.

Whilst the main focus of the book is on the analysis and processing of CFD output, brief coverage should also be given to checks that the flow solver has converged, that sufficient time-steps have been simulated in an unsteady flow and that the CFD output correctly reflects the intended model set-up, through checks on self-consistency, scrutiny of boundary conditions, etc.

The content should focus on the output of RANS models of turbulent flow. Both steady and unsteady flows should be addressed. The book should also mention the differing requirements imposed by LES and DES.

### Cost

The total cost is not expected to exceed £6000 and the document should be completed within 12 months from NAFEMS approval.

Proposals should be sent to [cfd@nafems.org](mailto:cfd@nafems.org).

Extended details available at [nafe.ms/CFDoutput](http://nafe.ms/CFDoutput)

Deadline for proposals: 1st of April 2020.

## How to Create Geometry and Mesh for CFD

The NAFEMS Computational Fluid Dynamics Working Group (CFDWG), wishes to commission a new document with the suggested title "How to Create Geometry and Mesh for CFD". The book will focus on the definition of geometry and the generation of meshes for computational fluid dynamics. The content should concentrate on the use of RANS models of turbulent flow, but with some attention given also to the differing requirements for laminar and non-Newtonian flow, and the emerging techniques of LES and DES.

### Scope

The first part of the book should aim to give the reader an engineering-level understanding of the function of the mesh in CFD. The need for geometrical fidelity and the requirements relating to the extent of geometrical domain should be explained with reference to the basics of fluid mechanics. The role played by the mesh in the solution of the equations of fluid flow should then be described in some detail, but referring to mathematical equations only where necessary to avoid ambiguity or verbosity.

Different approaches to mesh design and construction should be explained with reference to: structure, organisation and topology; element/cell geometry; cell resolution and quality; solver type. The volume to surface approach should be included together with the surface to volume approach for 3D domains. As well as covering conventional fully connected structured, unstructured and hybrid meshes, the use of generalised (non-conformal) interfaces should be addressed, and possibly immersed boundary, cut cell and other flexible techniques, such as distributed porosity methods.

Unsteady analysis involving relative motion of complex bodies requires special consideration. Methodologies to handle such case should be introduced such as mesh distortion, mesh removal and addition, moving grids and overset grids. The reader should be made aware that meshless methods are also possible.

The second part of the book should turn attention to the processes of geometry and mesh building and checking. The processes should be described in general terms, indicating the types of software tool commonly employed, but without reference to particular packages or products.

### Cost

The total cost is not expected to exceed £6000 and the document should be completed within 12 months from NAFEMS approval.

Proposals should be sent to [cfd@nafems.org](mailto:cfd@nafems.org)

Extended details available at [nafe.ms/mesh](http://nafe.ms/mesh)

Deadline for proposals: 1st of April 2020.

For full details visit [nafe.ms/tenders](http://nafe.ms/tenders)

## How To Model Extreme Deformations

The NAFEMS Computational Structural Mechanics Working Group (CSMWG) would like to commission a How-To guide for the modelling of extreme deformation.

The intent of the document is to act as an introductory guide for analysts who, whilst experienced in small displacement finite element simulation, wish to understand the simulation challenges posed by systems with much greater deformation. Examples include high-speed impacts, blast response and penetration of materials and structures, slow-speed but severe forming processes [e.g. forging and extrusion] and simulation of parts containing elastomeric or foam materials. The use of explanatory example problems is strongly encouraged. These are to be used to illustrate the difficulties encountered in obtaining convergence to a realistic solution, e.g. due to excessive mesh distortion, and how alternative approaches can permit the simulation to proceed to completion.

This book should be aimed at analysts who are experienced in explicit dynamic analysis using a predominantly Lagrangian approach.

### Scope

The scope of the publication should cover the following concepts. Note, this list is not exhaustive and suggestions for modifications from potential authors are welcome:

- Fundamental differences between static implicit, dynamic implicit, and dynamic explicit simulation schemes. Stress and strain measures for large deflections.
- Wave propagation phenomena
- Material modelling
- Isotropic and anisotropic materials
  - Strain-rate, temperature, and pressure-dependency aspects of material responses
  - Damage models, failure initiation and propagation
  - Equations of state
  - Internal heat generation due to deformation and heat transfer between regions
- Contact modelling, friction, erosion.
- Solution methods:
- Implicit vs explicit solution schemes
- Computer requirements for implicit and explicit solvers, and scalability issues
  - The use of explicit dynamic schemes to solve implicit static problems with extreme deformation, and how to ensure a physically representative solution
  - Riks method and artificial stabilisation to assist in unstable static calculations
  - The transfer between solution schemes, or explicit-implicit switching, e.g. springback after forming
- Modelling:
  - Lagrangian meshes (including deliberate pre-distortion to become progressively better shaped during the calculation)
  - Re-meshing and mapping of Lagrangian solutions from one mesh to another after excessive deformation
  - Purely Eulerian grids and interaction between Lagrangian meshes within Eulerian grids
  - Arbitrary Lagrangian-Eulerian adaptive meshing
  - Particle methods (SPH) and interactions between particle and Lagrangian regions
- Common pitfalls and solution verification checking methods

### Cost

The total cost is not expected to exceed £7,000 and the publication is anticipated to be approximately 100 A5 pages in length. Proposals should be sent to NAFEMS at [csmwg@nafems.org](mailto:csmwg@nafems.org).

**Deadline for proposals: 1st of January 2020.**

## A Layperson's Guide to Finite Element Analysis of Structures

The NAFEMS Education and Training Working Group (ETWG) wishes to commission new items of guidance titled "A Layperson's Guide to Finite Element Analysis of Structures". The guide will be aimed at non-engineers, and delivered in two formats:

- Book format: See the guidance below for additional details.
- Video script format: Authors are requested to write a text script to accompany the book. The script may be developed in future into a short video.

### Content

The headings below are suggestions for the structure and contents to be covered. Potential authors may suggest a different structure if they wish.

What is FEA?

- Why bother with FEA?
- What is the geometry of the structure?
- What happens on the surface?
- Why do we need a computer?
- Is it accurate?
- Can it lead to wrong answers?
- Case studies

And Finally ...

- Concluding remarks on the future of FEA, engineering simulation, virtual reality, etc.

### Cost

The total cost is not expected to exceed £5000 and the document should be completed within 18 months from NAFEMS approval.

Proposals should be sent to [etwg@nafems.org](mailto:etwg@nafems.org)

Extended details available at [nafe.ms/laypersons](http://nafe.ms/laypersons)

**Deadline for proposals: 1st of April 2020.**

[nafe.ms/tenders](http://nafe.ms/tenders)

**For full details visit [nafe.ms/tenders](http://nafe.ms/tenders)**

Internationales NAFEMS Magazin

## Benchmark Magazin, Ausgabe Oktober 2019

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

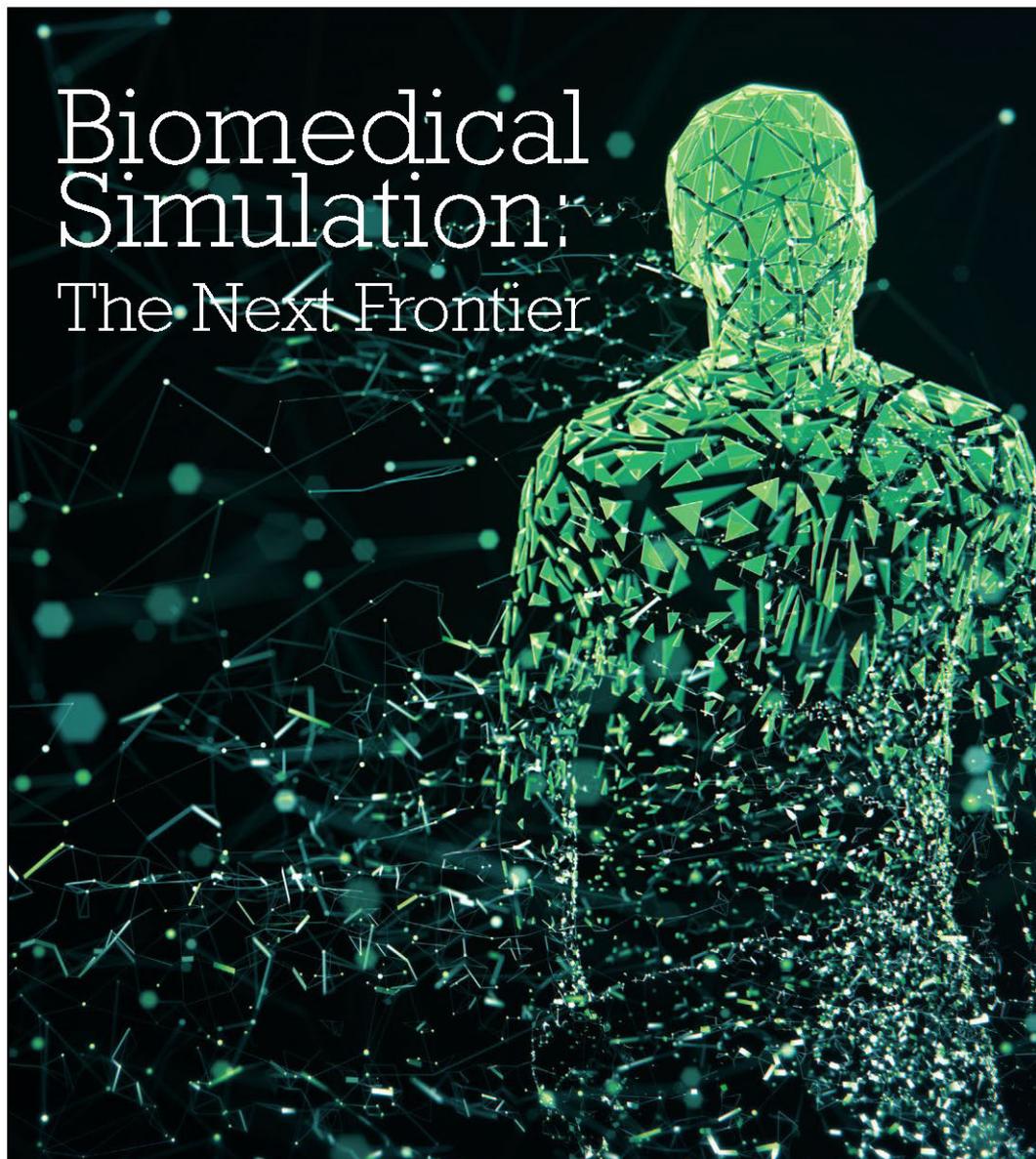
[www.nafems.org/publications/benchmark](http://www.nafems.org/publications/benchmark)

# BENCH MARK

### October 2019 issue . . .

- Subject-Specific Twin Model of the Human Foot to Improve Foot and Ankle Surgery
- Understanding Muscle Mechanics
- FDA Will Believe it When They See It - Virtually
- Bioinspiration - Shape Optimization in Biological Structures Revisited... A Precis
- The Next 10 Years of CAE in Mexico - An Event Summary
- Priorities Advancing Regulatory Science and In Silico Medicine at the FDA
- A Parametric Study of Self-dynamisable Internal Fixator Used in Femoral Fracture Treatment
- Giving Arthritis the Finger
- YMAP - Interoperability: The Key Issues
- Excel for Engineers and other STEM Professionals
- Analysis Origins - OptiStruct

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





# VMAP



**International Conference on  
CAE Interoperability 2020**

13-14 May 2020, Bamberg, Germany

[www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020](http://www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020)

## Interoperability of Engineering Data within Integrated CAE Workflows

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

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

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

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

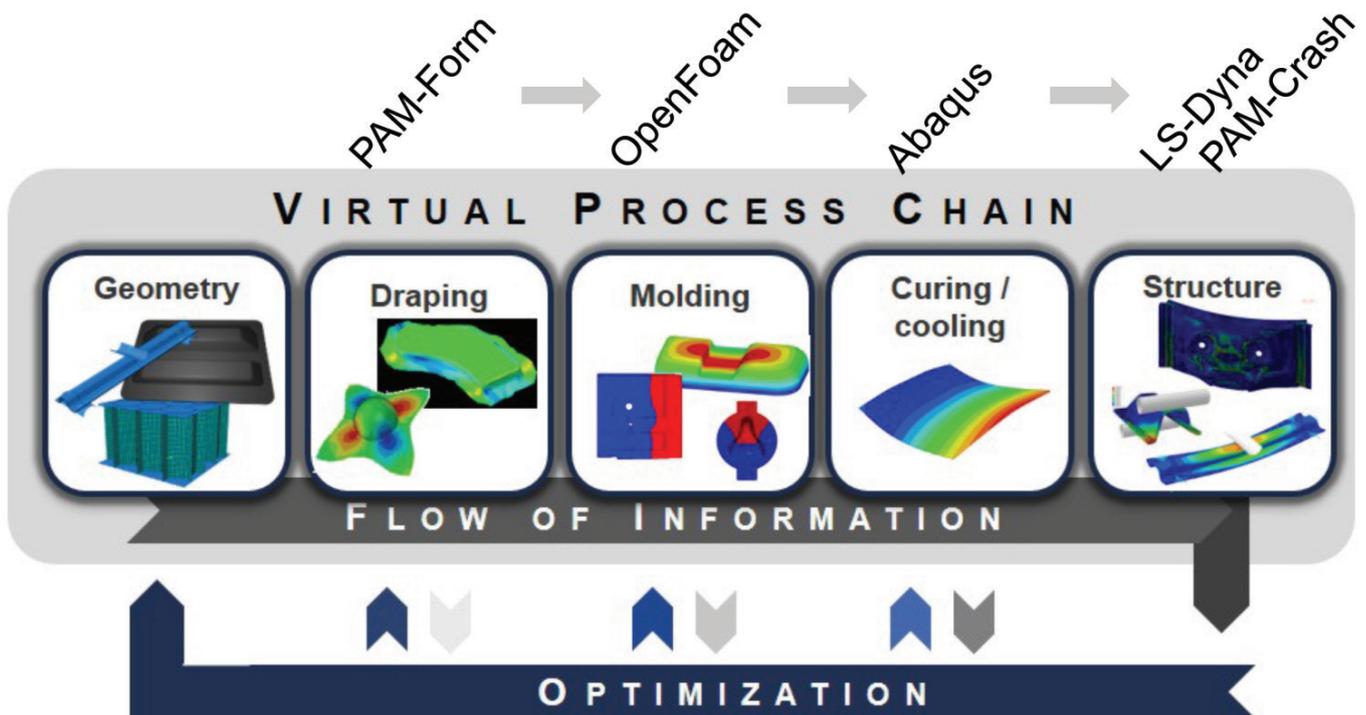
VMAP has already been directly integrated into CAE tools like MSC-Marc, MSC-Nastran, CadMould, PAM-RTM, PAM-Crash, Open-FOAM, COMPRO and RAVEN as well as independent/neutral translation tools like envyo that supports the LS-DYNA suite, Digimat, FiberMap, MpCCI and the ANSA pre-processor.

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



## Use Case Example – Composite Lightweight Vehicle (AUDI)

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



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

### VMAP Standards Community

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

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

### Complex workflow?

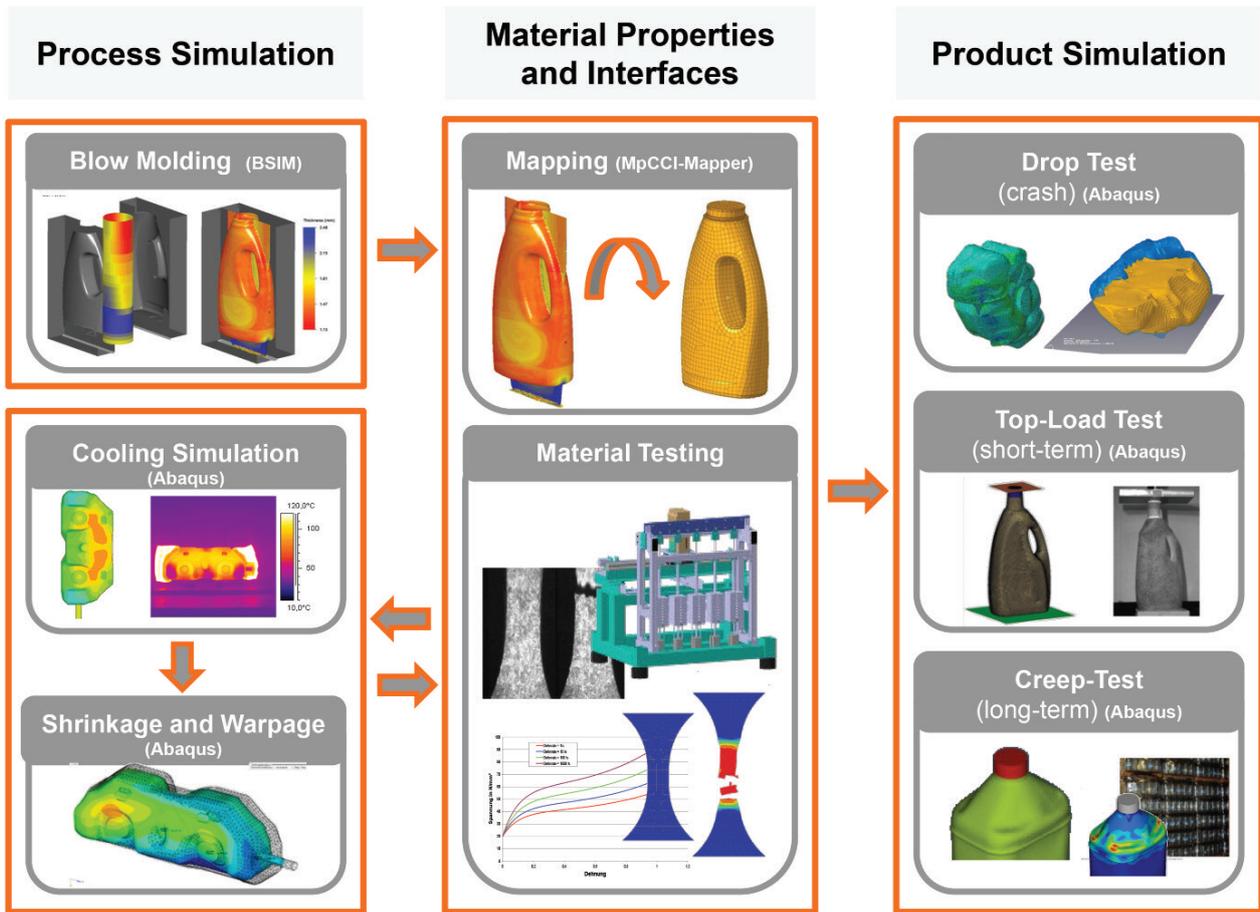
### Difficult material data transfer?

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

[info@vmap.eu.com](mailto:info@vmap.eu.com) | [www.vmap.eu.com](http://www.vmap.eu.com)

## Use Case Example – Extrusion Blow Moulding (Rikutec)

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



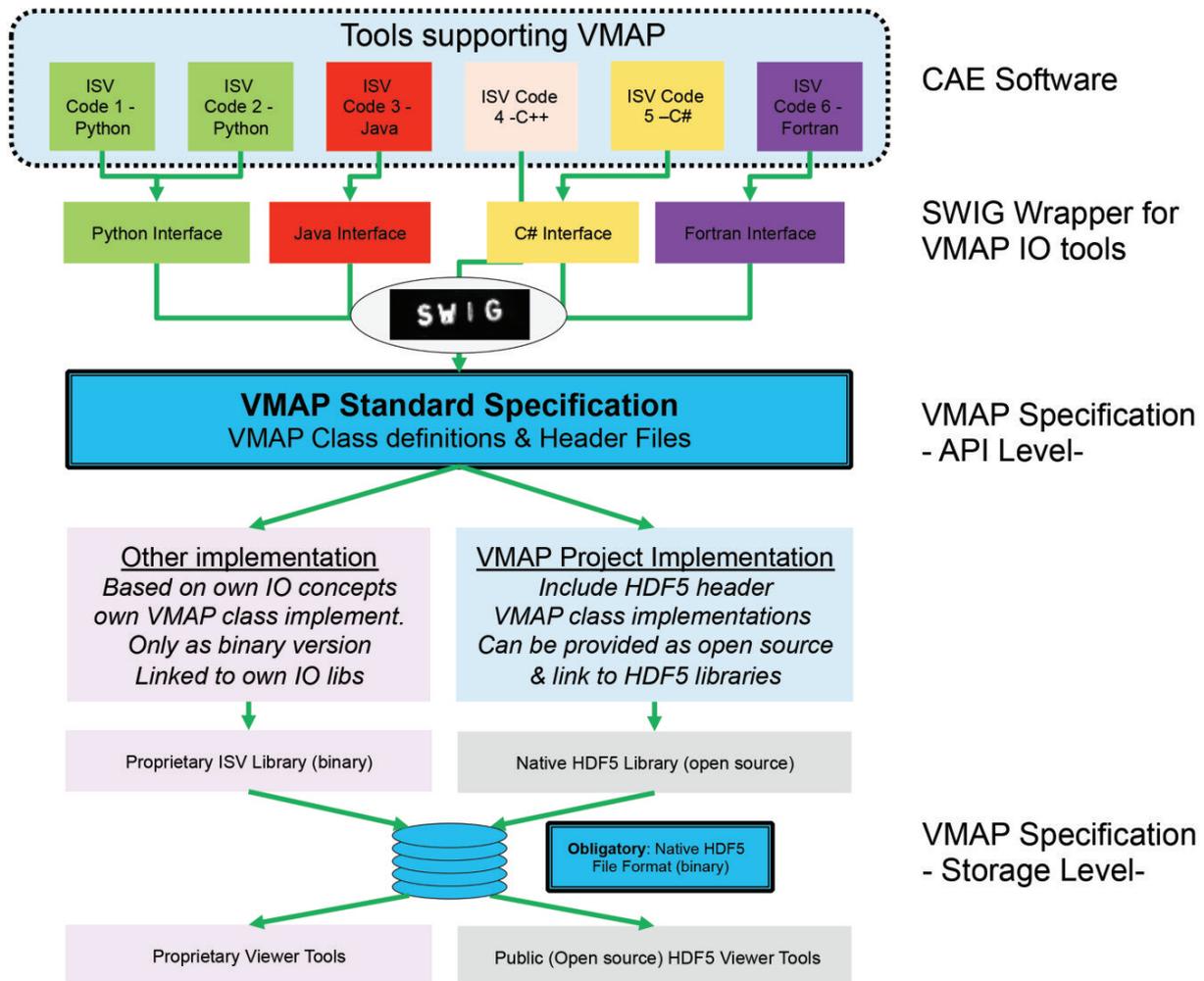
## Help for Software Developers

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

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

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

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



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

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

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

ITEA is a EUREKA Cluster, the community is founded in Europe based on the EUREKA principles and is open to participants worldwide. [itea3.org](http://itea3.org)

**ALTAIR****Altair übernimmt DEM Solutions**

Altair, ein weltweit agierendes Technologieunternehmen, das Software- und Cloud-Lösungen für die Bereiche Produktentwicklung, High-Performance Computing (HPC) und Data Intelligence anbietet, hat heute bekanntgegeben, dass es das Unternehmen DEM Solutions übernommen hat, Hersteller der führenden Diskrete Elemente Methode (DEM) Software EDEM für die Schüttgut-Simulation.

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

**ANSYS****Ansys Release 2019R3**

Ansys hat am 10. September 2019 das neue Release Ansys 2019R3 frei gegeben. Es enthält wie gewohnt eine Vielzahl an Neuerungen und Weiterentwicklungen über das gesamte Einsatzspektrum der Ansys-Programmfamilie hinweg.

Besonders erwähnenswert sind im Bereich Strukturmechanik der Ausbau der Ribbon-Oberfläche, die neue strukturmechanisch-thermische 2-Wege-Kopplung und das Inverse Solving. Im Bereich Strömung wurden das Fluent Meshing, v.a. im Hinblick der einzigartigen Mosaic-Technologie um interessante Möglichkeiten erweitert und zudem hilfreiche Workflows weiterentwickelt. Die Tools für elektromagnetische Anwendungen zeichnen sich durch neue Materialoptionen sowie wesentliche Verbesserungen bei der Rechenzeit, der Radarsimulation und beim Wärmemanagement aus. Als Anwender von Ansys Discovery profitieren Sie von Erweiterungen beim Rendering, der engen Anbindung an Ansys Mechanical und neuen Funktionen zur Topologieoptimierung (Discovery Live) sowie von zusätzlichen Balkenelementen und Beulanalysen (Discovery AIM). Beim Ansys TwinBuilder wurde die Anbindung an Modelica ausgebaut, zudem sind verschiedene Analyse-Module hinzugekommen.

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

**BETA CAE Systems****Neue Versionen**

Beta CAE Systems veröffentlichte kürzlich die neue Version v20.0.1 ihrer Software Suites Serie ANSA/Epilysis/META v19.1.x. sowie die Version Spdrn v1.3.1.

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

**CADFEM****Rückblick: Cadfem Ansys Simulation Conference**

Die 37. Cadfem Ansys Simulation Conference fand vom 16.-17. Oktober im Kongress Palais Kassel statt. Nach dem Eröffnungsplenum am Mittwoch, konnten sich die Teilnehmer der Konferenz in den neuen Technologie-Update Sessions zu den aktuellsten Trends und Entwicklungen in der Industrie informieren. Vom Autonomen Fahren über den Digitalen Zwilling bis hin zur Schraubenbewertung waren zahlreiche Themen vertreten.

Wie anderen Anwender Ansys-Software einsetzen, konnte in den 11 parallelen Sessions bestaunt werden. Im Zentrum des 18. Cadfem Forums stand im diesen Jahr der Digitale Zwilling. Hier diskutierten Experten und Interessierte über die verschiedenen Aspekte und Einsatzmöglichkeiten. Aktiv konnten auch die Teilnehmer des Design Thinking Workshops werden. Abgerundet wurde die Veranstaltung am Donnerstag durch das Abschlussplenum, welches wie auch das Eröffnungsplenum durch Brigitte Büscher moderiert wurde. Die Vorträge der 37. Cadfem Ansys Simulation Conference können im Cadfem Kundenportal myCadfemM heruntergeladen.

Insgesamt 36 Firmen beteiligten sich an der großen Fachausstellung im Festsaal des Kongress Palais Kassel. Neben den Hauptsponsoren HPE, Open Telecom Cloud und Lenovo informierten viele Cadfem Partner über ihre Produkte und Dienstleistungen rund um Ansys. Neben Ansys waren auch weitere unmittelbare Software-Partner von Cadfem dabei: ESSS (Entwickler von Rocky

DEM zur Partikelsimulation), MDL (Entwickler von Motor-CAD zur Auslegung von Elektroantrieben). Bei der digitalen Aussteller Rallye (confgames) kamen Aussteller und Konferenzteilnehmer besonders schnell und spielerisch in Kontakt.

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

**CARHS****Safety Companion veröffentlicht**

Die Ausgabe 2020 des SafetyCompanion von carhs.training ist ab sofort als pdf Version zum Download verfügbar. Der SafetyCompanion enthält 77 Seiten mit SafetyWissen, darunter 50 aktualisierte oder gänzlich neue Seiten. Unter anderem wurden die Euro NCAP AEB Tests für 2020 aktualisiert und viele Details zu den neuen Ratings von Latin NCAP und Asean NCAP hinzugefügt. Neben dem SafetyWissen finden sich im SafetyCompanion die Termine und Inhalte von über 150 Seminaren und Events zum Thema Fahrzeugsicherheit. Neu im Programm sind z. B. Seminare zum Thema Machine Learning und Künstliche Intelligenz für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Die gedruckte Ausgabe des SafetyCompanion erscheint im Dezember 2019.

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

**COMSOL****Comsol veröffentlicht Version 5.5 von COMSOL Multiphysics**

Comsol, der führende Anbieter von Softwarelösungen für Multiphysics-Modellierung, Simulation sowie Design und Bereitstellung von Simulations-Applications, kündigt die neueste Version seiner Comsol Multiphysics-Software an. In der Version 5.5 bietet das Design Module völlig neue Zeichenwerkzeuge zur einfacheren Erstellung und vielseitigeren parametrischen Steuerung von Geometriemodellen. Neue und aktualisierte Löser beschleunigen eine Vielzahl von Simulationen. Zwei neue Add-On-Produkte, das Porous Media Flow Module und das Metal

Processing Module, erweitern die Leistung der Multiphysics Produktpalette.

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

## DYNAMORE

### LS-DYNA Material Competence Center bezieht neue Räume in Leinfelden-Echterdingen

Das LS-DYNA Material Competence Center (MCC) von DYNAMore hat die neuen Räume in Leinfelden-Echterdingen bei Stuttgart bezogen. Mit dem Umzug baut das Unternehmen den Bereich Materialcharakterisierung weiter aus und stellt die Weichen für weiteres Wachstum in der Zukunft.

„Nur der Zugriff auf qualitativ hochwertige Werkstoffdaten, wenn notwendig bis hinein in den Versagens- und Bruchbereich, ermöglicht die erfolgreiche Kalibrierung von Werkstoffmodellen“, erklärt Prof. Dr.-Ing. André Haufe, Leiter des LS-DYNA Material Competence Center. „Mit den neuen Räumen haben wir jetzt ideale Voraussetzungen dafür geschaffen, die Datenerfassung aus Experimenten und die effiziente Bedienung von Werkstoffmodellen sowie unser damit verbundenes Dienstleistungsangebot weiter auszubauen“, so Haufe weiter.

Das MCC bietet kalibrierte Materialkarten und die bestmöglichen Modelltechniken für:

- Metallische Werkstoffe bis hin zur Versagensprognose (GISSMO, eGISSMO, DIEM, etc.)
- Polymere und Composites (unverstärkt, kurzfaserverstärkt, endlosfaserverstärkt)
- Elastomere
- Glas (float, thermisch oder chemisch vorgespannt) und keramische Werkstoffe
- Verbindungstechnik (punktförmig, linienförmig, flächig)

Ziel des LS-DYNA Material Competence Center ist es, die gesamte Ingenieurleistung, beginnend bei der Versuchsdurchführung bis hin zur Auslieferung einer für die spezielle Kundenanwendung kalibrierten Werkstoffkarte aus einer Hand anzubieten. Neben der Bereitstellung

von Materialkarten für gängige und etablierte Werkstoffe bieten das MCC insbesondere auch die Identifikation von Parametern der zahlreichen erweiterten und komplexeren Werkstoffmodelle von LS-DYNA an. „Wir koordinieren die Versuchsplanung und paaren dieses Know-how mit der langjährigen Erfahrung von DYNAMore, um unsere Kenntnisse im Bereich der Werkstoffmodelle in LS-DYNA sowie die notwendigen Methoden zu deren Parameteridentifikation einzubringen“, erläutert Ulrich Franz, Geschäftsführer der DYNAMore GmbH.

Die Expertise des LS-DYNA Material Competence Center besteht zudem in der Übertragung von kalibrierten Prozessdaten aus der Bauteilherstellung (Spritzgießen, Strangpressen, Umformen, Wärmebehandlung, Warmformen, Gießen, Massivumformen, Drapieren usw.) in die nachgelagerte Bauteilsimulation (Crash, Impakt, Steifigkeit usw.). Hierfür greifen die Experten vom MCC typischerweise auf den Prozessmapper Envyo, eine DYNAMore-Eigenentwicklung, zurück. Im Fall von speziellen Anwendungen, wie z.B. der Hochdynamik oder bei thermomechanisch-gekoppelten Untersuchungen, kooperiert das LS-DYNA Material Competence Center mit bekannten und etablierten Werkstofflaboren bezüglich der experimentellen Versuchsumfänge. Wenn Sie Interesse an den Lösungen des LS-DYNA Material Competence Center von DYNAMore haben oder weitere Informationen benötigen, erreichen Sie die Mitarbeiter unter folgender Adresse: DYNAMore MCC, Kolumbusstraße 47, 70771 Leinfelden-Echterdingen Tel.: +49 (0)711 45 96 00 17, E-Mail: [mcc@dynamore.de](mailto:mcc@dynamore.de), [www.dynamore.de/de/mcc](http://www.dynamore.de/de/mcc).

### Neuer Service: kostenlose Materialkarten für über 60 Stahlsorten

In Zusammenarbeit mit dem österreichischen Stahlhersteller voestalpine hat DYNAMore eine Materialdatenbank für verschiedene Stahlsorten erstellt. Die Materialkarten stehen den LS-DYNA Usern nun kostenlos

zur Verfügung und können bei DYNAMore bezogen werden.

Der Stahlhersteller voestalpine aus Linz ermöglichte es, dass einige der von ihm vertriebenen Stahlsorten den LS-DYNA Usern nun zur freien Nutzung zur Verfügung stehen. Die Daten wurden im Excel Format von voestalpine bereitgestellt und von DYNAMore Mitarbeitern ins LS-DYNA Keyword Format übertragen. Insgesamt stehen über 60 verschiedenen Stahlsorten zur Verfügung. Darunter sind:

- Weiche Stähle/Mild Steels
- Niedrig- und mikrolegierte Stähle/High Strength Low Alloy Steels (LA or HSLA)
- Bake-Hardening Stähle/Bake Hardenable Steels (BH)
- Hochfeste IF-Stähle/High Strength IF-Steels (IF)
- Kohlenstoff Mangan Stähle/Carbon manganese steels
- Dualphasenstähle/Dual Phase Steels (DP)
- Komplexphasenstähle/Complex Phase Steels (CP)
- Dualphasenstähle mit verbesserter Umformbarkeit/Dual Phase Steels with improved formability
- Martensitische Stähle/Martensitic Steels (MS)
- Presshärtende Stähle/Press hardening steels (phs)

Die Daten sind in Unterverzeichnissen strukturiert. Die jeweiligen Stahltypen werden hierbei zwischen kaltgewalzten Stählen und warmgewalzten Stählen unterschieden. Des Weiteren stehen zwei Einheitssysteme MPa\_ton\_mm\_s und GPa\_kg\_mm\_ms zur Verfügung. Für jeden Stahl gibt es im LS-DYNA Keyword Format zwei Dateien:

- CR1-GI\_DX52D-Z.dyn: Materialkarte für LS-DYNA (jeweils MAT\_036: 3 R-Werte + Fließkurve)
- CR1-GI\_DX52D-Z\_ISO\_12004-2\_Transverse\_1.00\_mm.fld: Grenzformänderungskurve fürs Postprocessing mit LS-PrePost

Die Daten stellt die DYNAMore GmbH für Ihre Kunden kostenfrei zur Verfügung. Interessenten können sich gerne unter [info@dynamore.de](mailto:info@dynamore.de) an DYNAMore wenden. Zum Erhalt

muss lediglich eine Vereinbarung unterschrieben werden. DYNAMore bedankt sich herzlich bei voestalpine für die Bereitstellung der Daten und freut sich auf zukünftige gemeinsame Projekte.

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

## DYNARDO

### Dynardo ist jetzt Teil der Ansys Familie

Ansys, der weltweit führende und innovative Anbieter von Simulationssoftware, gab bekannt, dass eine endgültige Vereinbarung über die Akquisition von Dynardo, einem führenden Anbieter von PIDO (Simulation Process Integration and Design Optimization) -Technologie, getroffen wurde. Somit erhalten Ansys-Kunden Zugang zu umfassenden Tools zur Prozessintegration und robusten Designoptimierung, die es ermöglicht, optimale Produkteschneller und wirtschaftlicher zu realisieren. Unternehmen stehen vor der Herausforderung, Produkte der nächsten Generation zu konzipieren, wobei die Entwicklungen bei autonomen Fahrzeugen, Elektrifizierung und 5G weiter voranschreiten und die Komplexität und damit die Entwicklungskosten steigen. Um diese Anforderungen zu erfüllen und gleichzeitig bahnbrechende Produkte auf den Markt zu bringen, setzen Unternehmen auf offene und herstellernerneutrale PIDO-Technologien, die einen besseren Zugang zu weiteren Tools ermöglichen. Durch die Integration von Dynardos Softwareplattformen in die Simulationsdaten, Prozesse und Wissensmanagementlösungen von Ansys Minerva, erhalten Kunden zusätzliche Möglichkeiten, entscheidende Simulations- und Optimierungsergebnisse zu integrieren und zu verwalten. Dynardo hat seinen Hauptsitz in Weimar, Deutschland, und beschäftigt mehr als 60 Mitarbeiter mit Standorten in Österreich und den USA. Als bestehender Ansys-Partner entwickelt Dynardo modernste Algorithmen für Optimierung, Ausfallquantifizierung, Robustheit, Varianten- und Sensiti-

vitätsanalyse, Simulationsworkflow-Erstellung sowie Data Mining. Das Produktportfolio enthält optiSLang, eine führende Softwareplattform für Prozessintegration und multidisziplinäre Optimierung. Dynardos Produkte werden weltweit von Kunden aus den Bereichen Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt und Elektrotechnik erfolgreich eingesetzt.

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

## IHF INGENIEURGESELLSCHAFT

### AutoFENA NL für den automatisierten Festigkeitsnachweis nach der neuen „FKM-Richtlinie Nichtlinear“

Die ihf Ingenieurgesellschaft hat nach intensiven Tests das neue Softwareprodukt AutoFENA NL für den Vertrieb freigegeben. AutoFENA NL ist ein Programm zum automatisierten Durchführen eines Festigkeitsnachweises nach der neuen „FKM-Richtlinie Nichtlinear“ des Forschungskuratoriums Maschinenbau (FKM) innerhalb des VDMA. Die „Richtlinie Nichtlinear“ ist ein vom FKM entwickelter Standard für einen statischen und zyklischen Festigkeitsnachweis im Maschinenbau und anderen Branchen. Das neue Konzept für den Festigkeitsnachweis wurde entwickelt, um lokal plastisch beanspruchte Strukturen besser bewerten zu können. Die „FKM-Richtlinie Nichtlinear“ wurde Anfang 2019 veröffentlicht.

Mit AutoFENA NL wird erstmals ein automatisierter Nachweis anhand dieser Richtlinie auf Basis von Finite-Elemente-Ergebnissen ermöglicht. AutoFENA NL bietet Schnittstellen zu ANSYS, ABAQUS und HyperView. Die Bedienung und die Auswertung erfolgen innerhalb der vertrauten Programmumgebungen der jeweiligen FE-Software.

Das Programm wurde aufbauend auf der langjährigen Erfahrung von ihf bei der Umsetzung der „FKM-Richtlinie Linear“ und der beständigen Mitarbeit im FKM-Fachkreis entwickelt. Zudem fand im Entwicklungsprozess ein direkter Austausch mit den Autoren der Richtlinie statt.

Über tausend Testlastfälle sichern dabei eine hohe Qualität des Solvers.

Mit der Richtlinie besteht erstmals die Möglichkeit, einen richtlinienkonformen Festigkeitsnachweis unter Einbeziehung von nichtlinearem Werkstoffverhalten durchzuführen. Im statischen Nachweis können damit z.T. erhebliche plastische Reserven erschlossen werden. Mit dem zyklischen Nachweis kann die Anrisslebensdauer für gegebene Last-Zeit-Folgen berechnet werden, und dass auch bei niedrigen Versagensschwingspielzahlen. Gegenüber der „FKM-Richtlinie Linear“ wird somit der Anwendungsbereich des Festigkeitsnachweises erweitert. Je nach Anwendungsfall und Material kann die Auslastung um bis zu 50% verbessert werden.

Mit AutoFENA NL werden die erforderlichen Daten direkt aus dem FE-Modell übernommen und der Nachweis automatisiert durchgeführt. Eine Vorauswahl der kritischen Stelle ist daher nicht erforderlich. Als Ergebnisse werden im Konturplot die ermittelte Lebensdauer und andere relevante Ergebnisgrößen abgebildet. Ebenso ist die detaillierte Dokumentation ausgewählter Nachweisstellen im PDF-Format möglich. Weitere Informationen finden Sie unter <https://www.ihf-ffm.de/autofena-nl>.

[www.ihf-ffm.de](http://www.ihf-ffm.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

### 3D-gedruckte Verbundteile werden leistungsfähiger durch gemeinsame Simulationssoftware von Markforged und MSC Software

Markforged, der führende Hersteller von 3D-Druckern für Metall- und Kohlefaser, und MSC Software, Anbieter von CAE-Simulationssoftware und Dienstleistungen, sind eine Technologie-partnerschaft eingegangen. Die Unternehmen bieten für die Markforged 3D-Drucker Prozesssimulation, Simulation des Bauteilverhaltens und Materialanalysetools an.

Bereits heute können Kunden für die Endloskohlefaser- und Onyx-Materialien von Markforged Materialanalysen in der Software Digimat von e-Xstream Engineering, einer Tochterfirma von MSC, durchführen. Bald wird sich die Zusammenarbeit so erweitern, dass die Simulation des ganzen Prozesses und des Bauteilverhaltens in einer gemeinsamen CAE-Umgebung möglich sind.

„Markforged ist ein Vorreiter im 3D-Druck. Sein Endloskohlefasermaterial ist so stark, dass es in Fabriken in aller Welt Aluminium ersetzt“, sagt Olivier Lietaer, Business Development Ingenieur für die additive Fertigung bei e-Xstream Engineering. „Dieser Wandel in Entwicklung und Herstellung erfordert neue Berechnungsmöglichkeiten, um die Bauteile der Kunden ebenso zuverlässig zu validieren wie traditionell hergestellte Bauteile. Digimat verwendet spezifische, passende Daten für die Druckbedingungen – das gibt den Anwendern die 100%ige Sicherheit, dass ihre Bauteildesigns 3D-gedruckt werden können. So wird die additive Fertigung auch zugänglich für Anwendungen, die strenge Testprozeduren verlangen. Zusammen ermöglichen Markforged und MSC es den Kunden, das Verhalten eines Bauteils von seinen Materialeigenschaften bis hin zu Festigkeit und Gewicht des fertigen Produkts zu gewährleisten.“

Partnerschaft für Anwender und Kundenanforderungen:

Danfoss Power Solutions ist ein

weltweit führender Anbieter für Mobilhydraulik und bietet eine umfassende Palette energieeffizienter und intelligenter hydraulischer, elektronischer und elektrischer Lösungen für Baufahrzeuge, landwirtschaftliche und weitere Off-Highway-Fahrzeuge. Wie auch viele andere Kunden ist Danfoss hocherfreut über die Partnerschaft:

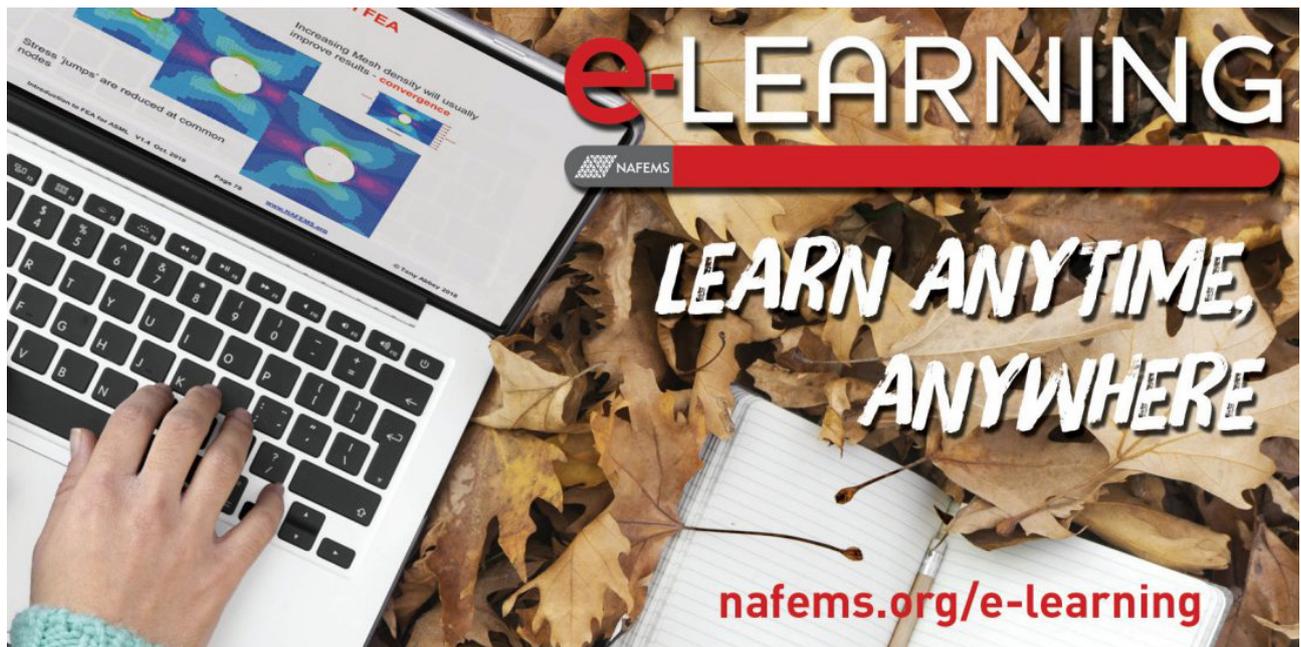
„Wir setzen Metall- und Kohlefaser-Drucker von Markforged seit über einem Jahr ein, sie sind von unschätzbarem Wert. Bei der Investition haben wir vor allem an die Werkzeugbereitstellung gedacht. Tatsächlich konnten wir unsere logistischen Prozesse vereinfachen und optimieren und Vorrichtungen wesentlich kostengünstiger ersetzen als bei der spanenden Bearbeitung“, so Jeff Herrin, Vice President Research & Development bei Danfoss Power Solutions. „Aber wir wollten noch mehr Anwendungen für den 3D-Druck finden und das Verhalten unserer Produkte prüfen - schon bevor sie gedruckt werden. Die Partnerschaft von Markforged mit MSC wird nicht nur belegen, dass ihre Verbundbauteile Metall ersetzen können, sondern auch das beste Entwicklungspotential eines Bauteils aufzeigen. Mit MSC simulieren wir das ideale Gewicht, ideale Kostenersparnis und ideale Bearbeitungszeiten, das hilft uns beim Reduzieren von Zeit- und Materialverbrauch – wir können einfach drucken und einsetzen.“

Die jüngsten Fortschritte in der additiven Fertigung, wie bei der Faserführung für Endlosfasern, erweitern den Anwendungsbereich des 3D-Drucks auch auf schwer belastete Strukturbauteile. Diese Strukturanwendungen erfordern jedoch häufig eine vorausgehende Validierung schon bei der Entwicklung, um sicherzustellen, dass die Betriebs- und Sicherheitsanforderungen erfüllt werden können. Danfoss hat mit Markforged eine Hubkonsole gedruckt, welche Gussgehäuse auf ein Fließband heben soll. Es geht um schwebende Lasten in unmittelbarer Nähe der Arbeiter – also ist eine Validierung nötig, um sichere Arbeitsbedingungen zu ge-

währleisten. Dank der Partnerschaft von MSC und Markforged konnte der Simulationsablauf an einer Demo-Hubkonsole validiert werden, der Fehlerort wurde identifiziert. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Sicherheitstoleranz und liefern den Nachweis, dass die Hubkonsole sicher im Betrieb eingesetzt werden kann. Darüber hinaus lassen sich noch Masse und Kosten einsparen. Was beinhaltet die Partnerschaft?

- Material Engineering – Kunden von MSC und Markforged haben Zugriff auf digitale Materialkarten, welche mechanische und weitere Materialeigenschaften der endlosfaser- und kurzfaserverstärkten Kunststoffe von Markforged erfassen.
- Prozesssimulation – Anwender können zukünftig den 3D-Druck in der Software von MSC modellieren. Sie können auch Standards zur Druckkalibrierung erstellen, jede Maschine für das Bauteil optimieren und erreichen, dass jedes Bauteil auf Anhieb richtig gedruckt wird.
- Bauteilverhalten – die Material- und Druckinformation von Markforged werden mit der FE-Simulation von MSC verbunden. Es lassen sich Simulationen für Entwürfe mit Endlosfasern und gedruckten Thermoform-Kunststoffen durchführen, um Festigkeit und Betriebsverhalten der Teile vorherzusagen.

„Wir sind begeistert, zusammen mit einem führenden Softwareanbieter für Faserverbundmodellierung und Simulation unseren Kunden solche Möglichkeiten zu bieten. Die branchenführenden FE-Lösungen von MSC für Verbundwerkstoffe werden unseren Kunden entscheidend helfen, das richtige Design für ihre Kohlefaser-Bauteile zu finden“, sagt Jon Reilly, VP of Product, Markforged. „Der 3D-Druck verändert die Welt der Fertigung. Mit MSC als Partner können wir sicherstellen, dass alle mit Markforged gedruckten Teile ihr bestes Leistungspotential entfalten.“



**Generatives Design: Neue Lösung beschleunigt Entwicklungsprozesse für die additive Fertigung um bis zu 80 Prozent**  
 MSC Software, Anbieter von CAE-Simulationssoftware und Dienstleistungen, veröffentlichte MSC Apex Generative Design: eine neue Softwarelösung für die Designoptimierung. Diese Lösung verbessert durch eine konkurrenzlose Automatisierung von Designprozessen mit eingebautem Fertigungs-Knowhow die Qualität.

MSC Apex Generative Design zielt darauf ab, die Produktivität im Vergleich zur klassischen Topologieoptimierung um bis zu 80% zu erhöhen. Ein Bauteildesign, das additiv herstellbar ist (Design for Additive Manufacturing, DfAM), wird von der Software binnen weniger Stunden geliefert – ein Bruchteil der normalerweise benötigten Zeit. Dadurch wird eine verlässliche additive Fertigung kosteneffizienter und greifbarer.

In MSC Apex Generative Design muss der Entwickler nur die Randbedingungen und das Designziel angeben. Es werden dann mehrere gewichtsoptimierte Designkandidaten vorgeschlagen, die die Möglichkeiten des Bauraums ausloten und eine optimale Spannungsverteilung haben. Dies ist eine Bereicherung

für den Gestaltungsprozess – die Entwickler gewinnen mehr Zeit, das Produktkonzept zu optimieren und zusätzliche nützliche Funktionalitäten einzubauen. Die intelligente Glättungstechnologie gewährleistet, dass jeder Kandidat eine perfekte, druckbare Oberfläche hat.

**Prüfgelände von Applus+ IDIADAs jetzt digitalisiert in Adams, um Fahrdynamik zu simulieren**  
 MSC Software, Anbieter von CAE-Simulationssoftware und Dienstleistungen, hat eine Vereinbarung mit Applus+ IDIADA unterschrieben, deren virtuelles Prüfgelände in der Mehrkörpersimulationssoftware Adams anzubieten. Fahrzeughersteller können jetzt virtuelle Fahrdynamiktests und –entwicklung auf einer digitalen Version der renommierten Teststrecken durchführen. Applus+ IDIADA bietet weltweit Dienstleistungen im Bereich Konstruktion, Entwicklung, Versuch und Zulassung für die Autoindustrie an. Ihr 360 Hektar großes Prüfgelände bei Barcelona ist das umfangreichste Europas und gilt als eines der weltweit am besten ausgestatteten Prüfgelände.

Der IDIADA Spain Virtual Proving Ground, eine digitalisierte 3D-Modellierung aller Teststrecken des Prüfgeländes, ist jetzt in Adams

verfügbar, der meistgenutzten Software für die Mehrkörpersimulation im Fahrzeugbereich. Die Kunden können damit Straßenlastdaten erzeugen, um realistische Berechnungen von Lebensdauer, Fahrverhalten und Komfort verschiedener Fahrzeugsysteme durchzuführen. So werden weniger echte Fahrzeugprototypen und Testfahrten benötigt, um die Lastfälle zu erstellen. Ingenieure können an jedem Ort auf die umfangreichen Daten zugreifen und Zeit und Geld bei der Entwicklung sparen.

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

## SIMUFACT

**Simufact macht die metallbasierte additive Fertigung mit integrierter Druckkostenschätzung und mehr Interoperabilität effizienter**

Simufact, ein weltweit operierendes Softwareunternehmen, das Prozesssimulationslösungen und –dienstleistungen für die Fertigungsindustrie anbietet, veröffentlicht Simufact Additive 2020. Diese leistungsstarke Lösung zur Optimierung von metallbasierten additiven Fertigungsprozessen kann nun auch die Kosten des Druckprozesses abschätzen. Das Zusammenspiel mit

der 3D-Drucksoftware Materialise Magics und den 3D-Metalldruckern von Renishaw wurde verbessert, um Fertigungsprozesse zu straffen. Durch neue Technologien ist die Software noch schneller und robuster geworden.

Simufact Additive 2020 erweitert den Anwendungsbereich über die Fertigungssimulation hinaus. Die Anwender können nicht nur den Druckprozess virtuell auslegen und optimieren, sondern auch die Kosten des Druckvorgangs für Einzelteile oder Baugruppen beurteilen. Ferner lassen sich nicht nur die Kosten für den Druckprozess abschätzen, sondern auch die Kosten für die Nacharbeit, wie etwa das Schneiden, Fräsen, Bohren und Schleifen. Die Kostenabschätzung lässt sich bei der Ermittlung der optimalen Orientierung des zu druckenden Bauteils ebenfalls mit berücksichtigen.

Simufact ist immer bestrebt, den Datenaustausch in der Prozesskette der additiven Fertigung zu vereinfachen. Daher hat Simufact Additive 2020 eine Schnittstelle zu Materialise bekommen: über das 3MF-Format, das Standard-Dateiformat im 3D-Druck. Das 3MF-Format ermöglicht einfachen und zuverlässigen Datenaustausch mit Software von Drittanbietern und reduziert die Zeit für den Modellaufbau deutlich. Simufact Additive 2020 hat eine integrierte Renishaw QuantAM Programmierschnittstelle für Vorbereitung und Export von Druckjobs, welche dem Anwender eine fehlerfreie Datenübertragung aus Simufact Additive direkt auf die Renishaw-3D-Metalldrucker bietet. Dadurch erhöht sich spürbar die Produktivität, da der gesamte Ablauf vom Entwurf bis zum gedruckten Teil in der Software möglich ist. Weitere Schnittstellen für eine ähnlich einfache Anbindung an andere Drucker sind in der Entwicklung.

Die neue Softwareversion verwendet die innovative Methode der adaptiven Voxelvernetzung. Weil die Größe der Voxellemente im Bauteil automatisch während der Rechnung angepasst wird, erhöht sich die Simulationsgeschwindigkeit. So erhalten die Anwender schneller

ihre Ergebnisse, und dies bei noch zuverlässigerer und robusterer Simulation.

Mithilfe der Hybriden Fertigung können Hersteller das Pulverbett-schmelzen mit der konventionellen Fertigung kombinieren. Ein weiteres Highlight der neuen Version: In Simufact Additive 2020 lässt sich ein bestimmtes Teil definieren, auf dem der Druckvorgang beginnen soll, einschließlich innerer Spannungen. So können Spannungen und Verzüge der gesamten Baugruppe und aller Einzelteile untersucht werden.

Dr. Hendrik Schafstall, CEO und Geschäftsführer von Simufact, sagt dazu: „Mit Simufact Additive 2020 dehnen wir unseren Simulationsbereich aus, von der reinen Druckoptimierung bis hin zur Kostenoptimierung. Die neue Version unterstreicht auch unser Engagement für Offenheit und Interoperabilität mit Produkten von Drittanbietern. Wir sind der Meinung, die Hersteller sollten an jedem beliebigen Punkt im Prozess mit der Verbesserung von Qualität und Effizienz anfangen können, um die additive Fertigung intelligenter zu machen.“

Simufact Additive wird von führenden Herstellern wie Safran und BAE Systems eingesetzt, um die Qualität zu verbessern und kostspielige Prototypen zu reduzieren. Simufact Additive 2020 ist auch zusammen mit den anderen Programmen von MSC Software im MSC One Lizenz-tokensystem verfügbar.

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

**TECOSIM**

**Forschung: Einsatz von Plexiglas für Automobilverglasungen**

Gemeinsam mit Partnern aus Hochschulen und Industrie hat Tecosim jetzt das von der Hessenagentur geförderte Forschungsprojekt SimPlex erfolgreich beendet. Ziel des Vorhabens war es, eine neue Simulationsmethode zur Berechnung des Crashverhaltens von Automobilverglasungen aus Plexiglas zu entwickeln. Die Abschlusspräsentation fand am 12. November in der ETA-Fabrik der Technischen Universität

Darmstadt statt.

Das 2017 gestartete und nun abgeschlossene Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mechanik und Materialforschung (IMM) der Technischen Hochschule Mittelhessen, der TU Darmstadt und Industriepartnern zeigt auf, ob ein Einsatz von Kunststoffverglasungen aus Polymethylmethacrylat (PMMA) hinsichtlich der Crashtauglichkeit machbar ist. „Der Werkstoff verspricht eine Gewichtsreduktion von bis zu 50 Prozent im direkten Vergleich zu konventionellen Fahrzeugscheiben. Und dies bei deutlich verbesserter Bruchdehnung und Akustik“, erläutert Prof. Dr. Stefan Kolling von der Technischen Hochschule Mittelhessen die Motivation des Vorhabens.

Gemeinsam entwickelten die Wissenschaftler der beteiligten Institute und die Ingenieure von Tecosim eine Methode, um den Werkstoff im digitalen Fahrzeugentwicklungsprozess einzusetzen und ihn mit herkömmlichen Mineralglas zu vergleichen. „Mithilfe einer praxistauglichen Simulationsmethode können wir nun einen virtuellen Prototyp erstellen und verschiedene Crashszenarien prognosesicher simulieren. Damit sind wichtige Weichen für einen Einsatz von Plexiglas im Automobilbau gestellt“, sagt Damaso Lopez Ruiz, CAE-Manager bei Tecosim. „Gemeinsam mit Industriepartnern werden wir nun in einem nächsten Schritt unsere Gespräche mit Kunden über eine Anwendung in der Praxis intensivieren“, ergänzt Martin Westerwald, Geschäftsführer der Tecosim GmbH.

Innerhalb des Forschungsprojektes entwickelten die Partner ein Materialmodell für PMMA und bestimmten experimentell die erforderlichen Werkstoffparameter. Kern der Werkstoffuntersuchung war eine statistische Auswertung des Bruchverhaltens, da dieses das Verletzungsrisiko insbesondere bei einem Kopfaufprall (Bild 1) maßgeblich bestimmt. Anhand eines Validierungsmodells wurde so die Verletzungswahrscheinlichkeit erstmals quantifiziert. Abschließend wurden die Materialmodelle in Ge-

samtfahrzeugsimulationen in den Lastfällen Seitencrash und Pfahlaufprall eingesetzt.

Eine Auswertung von Simulationen mit herkömmlichen Glas und PMMA wies dabei vergleichbare Ergebnisse auf. Darüber hinaus wurde im abgeschlossenen Projekt ein Verbund aus PMMA und TPU-Folie entwickelt. Dies versetzt das Konsortium in die Lage, auch Verbundglasscheiben (Windschutz- und Seitenscheiben) zu bewerten.

Im Rahmen des Projektes stellten die Wissenschaftler zudem an einer PMMA-Seitenscheibe die Bedeutung des stochastischen Materialverhaltens für die Fahrzeugauslegung dar. Das Maß für die Verletzungswahrscheinlichkeit ((in der passiven Sicherheit als Head Injury Criterion (HIC) bezeichnet)) reagiert sehr sensitiv auf eine streuende Bruchdehnung. Der stochastischen Simulation und der Festlegung geeigneter Zielgrößen kommt daher zukünftig eine große Bedeutung zu. Bei der Umsetzung des Forschungsprojektes konnte das Team auf Simulationsdaten aus dem von Tecosim eigenentwickelten Reverse Engineering Prozess TEC|Bench zurückgreifen. Dabei werden auf dem Markt verfügbare Fahrzeuge gescannt und die gewonnenen Geometriedaten in CAE-Modelle zur Crashsimulation aufbereitet.

In der Automobilbranche ist die Nachfrage nach Leichtbaulösungen ungebrochen. Insbesondere auch mit Blick auf Elektromobilität, höhere Reichweiten und weitere CO<sub>2</sub>-Einsparungen suchen die Experten kontinuierlich Maßnahmen zur weiteren Gewichtsreduzierung. Bei einem Anteil der Verglasung am Gesamtfahrzeuggewicht von bis zu fünf Prozent bieten Scheiben aus transparenten Kunststoffen hohes Potenzial. Dabei gilt es nicht nur, den direkten Massenvergleich zu betrachten. Das Gesamtgewicht wird am Fahrzeug auf einem einheitlichen Höhenniveau, etwa bei Seitenfenstern oder Schiebedächern, eingespart. Dadurch kann der Fahrzeugschwerpunkt für eine bessere Fahrdynamik abgesenkt werden. Darüber hinaus sind Ple-

xiglasscheiben durch ihre höhere Bruchdehnung besser als Mineralglasscheiben gegen Steinschlag geschützt. Aufgrund seiner Dämpfungseigenschaft liefert Plexiglas zudem eine bessere Akustik und kann somit den Fahrkomfort erhöhen.

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

## SIEMENS PLM SOFTWARE

### Siemens öffnet Additive Manufacturing Network

Siemens kündigte den offiziellen Start und die allgemeine Verfügbarkeit des Additive Manufacturing Networks (AM-Netzwerk) an. Es wurde bereits erfolgreich bei mehreren Kunden und Partnern wie Decathlon, Siemens Gas & Power, Siemens Mobility, HP und Materialise in einer Pilotphase getestet und implementiert. Das AM-Netzwerk ist eine innovative Cloud-basierte Lösung zur Förderung der Zusammenarbeit und Prozessabwicklung zwischen Ingenieuren, Einkauf und Lieferanten von 3D-Druckteilen. Sie stellt einen durchgängigen digitalen Prozess bereit, der die Nachfrage nach Komponenten mit dem Lieferantennetzwerk verbindet. So wird eine global verteilte Fertigung ermöglicht. Das AM-Netzwerk von Siemens wird auf der Formnext 2019 in Frankfurt am Main vorgestellt.

Das AM-Netzwerk von Siemens richtet sich an Unternehmen, Lieferanten und Partner, die die Einführung der additiven Fertigung (Additive Manufacturing – AM) für industrielle Prozesse und Anwendungen beschleunigen wollen. Sie digitalisiert den Order-to-Delivery-Prozess, indem es die technischen und kaufmännischen Prozesse für hochwertige AM-Funktionsprototypen und Serienteile aufeinander abstimmt. Das System vernetzt Käufer mit einem globalen Anbieternetzwerk. Das optimiert den Prozess, fördert die Zusammenarbeit sowie das Engagement und koordiniert die Arbeitsabläufe. So wird der Durchsatz erhöht und die Betriebskosten gesenkt. Als Teil der Software as a Service (SaaS)-Suite von Siemens erfüllt das AM-Netzwerk die streng-

ten Anforderungen an Sicherheit, Verfügbarkeit und Compliance.

Erste Anwender erkennen bereits die Vorteile der Plattform. Decathlon, der größte Sportartikelhändler der Welt mit über 1500 Filialen in 49 Ländern, nutzt das AM-Netzwerk, um den Bestellprozess in der Additiven Fertigung zu verwalten. Außerdem kontrollieren sie damit den Produktionsfortschritt als Teil ihrer Strategie um den Einsatz von 3D-Drucken weltweit zu skalieren und die Produktion unter Einhaltung hoher Qualitätsstandards zu steigern. Bei Siemens Gas & Power wird das AM-Netzwerk genutzt um agiler handeln zu können und Anfragen in Echtzeit zu beantworten. So wird sichergestellt, dass die Kunden genau das rechtzeitig bekommen, was sie bestellt haben.

Das AM-Netzwerk von Siemens richtet sich an Unternehmen, Lieferanten und Partner, die die Industrialisierung der additiven Fertigung (Additive Manufacturing – AM) beschleunigen wollen. Es digitalisiert den Order-to-Delivery-Prozess, indem es die technischen und kaufmännischen Prozesse für hochwertige AM-Funktionsprototypen und Serienteile aufeinander abstimmt. Das System vernetzt Käufer mit einem globalen Anbieternetzwerk. Das optimiert den Prozess, fördert die Zusammenarbeit sowie das Engagement und koordiniert die Arbeitsabläufe. So wird der Durchsatz erhöht und die Betriebskosten gesenkt. Als Teil der SaaS-Suite von Siemens erfüllt das AM-Netzwerk die strengsten Anforderungen an Sicherheit, Verfügbarkeit und Compliance.

Erste Anwender erkennen bereits die Vorteile der Plattform. Bei Siemens Gas & Power trägt sie dazu bei, den Durchsatz in der Fertigung zu erhöhen und den Einsatz von Maschinen zu optimieren. Dies geschieht, indem es einen reibungslosen Informationsfluss gewährleistet und gleichzeitig einen detaillierten Überblick über Kosten und Produktionszeiten von Anfang bis Ende gibt. Darüber hinaus nutzt Decathlon das Netzwerk, um die additive Fertigung weltweit zu skalieren und die

Produktion zu steigern, bei gleichbleibend hohem Qualitätsstandard. Anfang des Jahres erweiterten Siemens und HP ihre langjährige strategische Allianz mit der Einführung einer gemeinsamen Lösung für die additive Fertigung für die Automobilindustrie sowie weitere wichtige Branchen. Die Möglichkeiten in der Zusammenarbeit wachsen mit der Integration der fortschrittlichen 3D-Drucktechnologie von HP, mit dem Siemens AM-Netzwerk und der Ergänzung der Digital-Manufacturing-Network-Partner von HP in das Siemens-AM-Netzwerk weiter. Das HP Digital Manufacturing Network ist eine globale Gemeinschaft von Dienstleistern für die digitale Fertigung. Sie sind in der Lage bei der Entwicklung, Herstellung und Lieferung hochwertiger Kunststoff- und Metallkomponenten im Großformat zu unterstützen. Dafür nutzen sie die Multi-Jet-Fusion- und Metal Jet 3D-Drucklösungen von HP.

Das AM-Netzwerk ist eine weitere Möglichkeit, mit der Siemens den Zugang zu den neuesten Erkenntnissen und Technologien verbessert, um den Kunden die Einführung der industriellen additiven Fertigung zu erleichtern und den Geschäftsbetrieb zu digitalisieren. Siemens präsentiert die Komplettlösung auf der Formnext 2019 und stellt Funktionen wie digitale Inventur, Teileanalyse, Ausschreibungsverfahren, Lieferantennetzwerk, Kostenanalyse, Auftragseingang, Kundenkommunikation, Produktionsverfolgung und -planung sowie Datenanalyse, Dashboards und Berichte vor.

Das AM-Netzwerk von Siemens steht nun weltweit zur Registrierung zur Verfügung. Weitere Informationen über das Additive Manufacturing Network von Siemens finden Sie unter [www.siemens.com/plm/am-network/](http://www.siemens.com/plm/am-network/).

**Siemens präsentiert in NX integrierte AM-Path-Optimizer-Technologie für die additive Fertigung**  
Siemens Digital Industries Software stellt den Additive Manufacturing (AM) Path Optimizer vor. Der AM Path Optimizer ist eine Beta-Technologie, die in die NX Software

integriert ist. Sie soll Kunden bei der Lösung von Überhitzungsproblemen helfen, dazu beitragen, Ausschuss zu reduzieren sowie die Produktionsleistung zu erhöhen. Auf diesem Weg wird die Industrialisierung von AM oder der Einsatz von AM im industriellen Maßstab erreicht. Siemens hat diese fortschrittliche Simulationstechnologie der nächsten Generation entwickelt, um die Produktionserträge und Qualität von Komponenten zu maximieren, die im Pulverbett-Schmelzverfahren hergestellt werden. Diese neueste Erweiterung der durchgängigen Siemens-Lösung für die additive Fertigung speist den digitalen Faden. Dieser dokumentiert jeden Schritt des gesamten additiven Fertigungsprozesses.

Aufbauend auf der im November 2018 angekündigten Lösung Simcenter Additive Manufacturing Process Simulation ergänzt der AM Path Optimizer die Siemens-Strategie für den digitalen Zwilling des Fertigungsprozesses. Er behebt Fehler, die durch suboptimale Scanstrategien und Prozessparameter verursacht wurden. Diese können zu systematischen Ausfällen durch Überhitzung führen. Das hat Ausschuss und Unstimmigkeiten in der Komponentenqualität zur Folge.

Siemens hat diese Beta-Technologie mit TRUMPF als Partner erfolgreich getestet. „Mit dem AM Path Optimizer können Siemens und TRUMPF die Standardisierung von Additiv-Technologien weiter vorantreiben“, sagt Jeroen Risse, AM-Experte bei TRUMPF. „In unseren Demos konnten wir eine Verbesserung der geometrischen Genauigkeit, die Vermeidung von Überhitzungsfehlern beim Überlackieren sowie eine homogenere Oberflächenqualität feststellen. Außerdem erwarten wir, dass die Ausschussrate deutlich reduziert wird.“

Die Technologie verwendet einen innovativen Ansatz, der physikalische Simulation mit Machine Learning kombiniert. Somit kann eine vollständige Arbeitsdatei in wenigen Minuten vor der Produktion an der Maschine analysiert werden. Es ist zu erwarten, dass diese Technologie dazu

beiträgt, First-Time-Right-Drucke zu produzieren und die Anzahl der Tests und Fehlversuche drastisch zu reduzieren. Sie kann auch dabei helfen, Druckkosten zu senken und den Druck von Komponenten zu realisieren, die heute fast unmöglich herzustellen sind.

„Der AM Path Optimizer ist die neueste Innovation in den End-to-End-Lösungen für die additive Fertigung von Siemens. Wir sind davon überzeugt, dass sie einen großen Einfluss auf den Einsatz von AM für Komponenten, die im Pulverbett-Schmelzverfahren hergestellt werden, haben wird“, sagt Zvi Feuer, Senior Vice President, Manufacturing Engineering Software bei Siemens Digital Industries Software. „Die Kombination von NX für additive Fertigung und unserer Simcenter AM-Technologie innerhalb des Xcelerator-Portfolios bietet unseren Kunden wichtige Ressourcen. So können sie Produzenten bei der Entwicklung und dem Druck von großformatigen Gebrauchsteilen, die auf dem Markt einzigartig sind, unterstützen.“

Siemens arbeitet mit Erstanwendern, um die AM Path Optimizer-Lösung weiter zu testen. Weitere Informationen zur Herstellung von Qualitätsteilen mit industrieller Software für die additive Fertigung finden Sie unter: [www.siemens.com/plm/additivemanufacturing](http://www.siemens.com/plm/additivemanufacturing)

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

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 (FCS)**

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

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

03.-04.03. Werfenweng, A [www.4a.at](http://www.4a.at) 4a engineering

**NAFEMS Kurs:**

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

02.-03.03. München, D [www.nafems.org/vav20-1](http://www.nafems.org/vav20-1) (in Kürze) NAFEMS

**Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik**

17.-18.03. Stuttgart [www.fkfs-veranstaltungen.de](http://www.fkfs-veranstaltungen.de) FKFS

**Wind and Drivetrain Conference**

21.04. Hamburg, D [3ds.com](http://3ds.com) Dassault Systèmes

**Automotive CAE Grand Challenge**

21.-22.04. Hanau, D [www.carhs.de](http://www.carhs.de) Carhs

**Permas Anwenderkonferenz**

23.-24.04. Stuttgart, D [www.intes.de](http://www.intes.de) Intes

**Graz Symposium Virtual Vehicle (GSVF)**

05.-06.05. Graz, A [www.gsvf.at](http://www.gsvf.at) ViF

**NAFEMS Kurs:**

**Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie**

tba München, D [www.nafems.org/fkm20-1](http://www.nafems.org/fkm20-1) (in Kürze) NAFEMS

**NAFEMS DACH Konferenz**

11.-13.05. Bamberg, D  
[www.nafems.org/dach20](http://www.nafems.org/dach20)

**VMAP Int. Conference on CAE Interoperability**

13.-14.05. Bamberg, D  
[www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020](http://www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020)

**NAFEMS20**  
**DACH CONFERENCE**



**NAFEMS Nordic Conference**

26.-27.05. Göteborg, S [www.nafems.org/nordic20](http://www.nafems.org/nordic20) NAFEMS

**NAFEMS UK Conference**

09.-10.06. Milton Keynes, UK [www.nafems.org/2020](http://www.nafems.org/2020) NAFEMS

**NAFEMS Americas Conference**

16.-18.06. Indianapolis, USA [www.nafems.org/2020](http://www.nafems.org/2020) NAFEMS

**MSC Software Conference**

23.-24.06. München, D [www.mscsoftware.com](http://www.mscsoftware.com) MSC Software

**NAFEMS Singapor**

27.07. Singapore [www.nafems.org/2020](http://www.nafems.org/2020) NAFEMS

**NAFEMS India**

24.-25.07. Bangalore, IND [www.nafems.org/2020](http://www.nafems.org/2020) NAFEMS

**NAFEMS East Europe**

tba -Sept. tba [www.nafems.org/2020](http://www.nafems.org/2020) NAFEMS

**LS-DYNA Forum**

07.-09.10. Ulm, D [www.dynamore.de](http://www.dynamore.de) DYNAMore

**NAFEMS France Conference**

18.-19.11. Paris, F [www.nafems.org/2020](http://www.nafems.org/2020) NAFEMS

**NAFEMS Iberia**

tba - Nov. Barcelona, ESP [www.nafems.org/2020](http://www.nafems.org/2020) NAFEMS

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

# Anwendung modaler Analysen und Partizipationsfaktoren zur Bewertung magnetomechanischer Simulationen

Christopher Ströhlein<sup>1</sup>, Hermann Landes<sup>2</sup>, Andreas Krug<sup>3</sup>, Peter Dietz<sup>3</sup>, Axel vom Endt<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universität Regensburg, Regensburg, Deutschland

<sup>2</sup>SIMetris GmbH, Erlangen, Deutschland

<sup>3</sup>Siemens Healthcare, Erlangen, Deutschland

Zur nicht-invasiven medizinischen Bildgebung werden bei der Magnetresonanztomographie (MRT) Superpositionen eines starken statischen magnetischen Feldes mit linear ortsabhängigen dynamischen elektromagnetischen Feldern (Gradientenfelder) verwendet. Bedingt durch leitfähige Strukturen innerhalb des MRT Systems kommt es zu Wechselwirkungen dieser Felder. Über induzierte Wirbelströme entstehen Lorentzkräfte, welche die Strukturen in Bewegung versetzen und wiederum Wirbelströme verursachen. Zur Untersuchung dieser magnetomechanischen Vorgänge können direkt gekoppelte Simulationen unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode genutzt werden.

Diese Arbeit präsentiert zwei eigens entwickelte Methoden, um eine verbesserte Interpretation der Simulationsergebnisse dieser komplexen Wechselwirkungskette zu erreichen sowie die Qualität des Finite-Elemente Netzes zu gewährleisten:

- Mittels einer linearisierten Formulierung werden harmonische Verschiebungen berechnet, welche in den mechanischen Eigenmoden des Systems entwickelt werden. Das erlaubt die Identifikation von auftretenden Resonanzen und den zugehörigen angeregten Komponenten.
- Mit einer indirekt gekoppelten Betrachtung der auftretenden wirbelstrominduzierten Kräfte lässt sich effizient eine Übersicht der zu erwartenden Resonanzen erzeugen. Die zugehörigen magnetomechanischen Partizipationsfaktoren erlauben eine schnelle Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells ohne eine komplex gekoppelte Simulation.
- 
- 
- 

## 1 Einleitung

Ein Kernbestandteil der klinisch am häufigsten eingesetzten MRT Scanner ist ein Kryostat, welcher die supraleitenden Hauptspulen umgibt und einen geringen Kühlaufwand gewährleistet. Teile des Kryostaten sind hochleitfähig und zeigen daher eine starke Wechselwirkung mit den im Betrieb auftretenden elektromagnetischen Feldern. Diese Wechselwirkungen können mitunter zu Vibrationen und damit verbundenen unerwünschten Effekten wie Wärmeentwicklung oder Störfeldern führen. Nachdem der Kryostat ein geschlossenes System in einem empfindlichen Zustand (Temperatur und Druck) darstellt, ist es schwierig, Messdaten bezüglich dieser Prozesse unter Betriebsbedingungen zu erhalten. Um die auftretenden magnetomechanischen Mechanismen besser zu verstehen, werden daher zunehmend Finite-Elemente (FE) Simulationen eingesetzt [1 - 7]. Diese zeigen allerdings aufgrund der Kopplung der beteiligten physikalischen Felder und des Aufbaus der MRT Scanner (Abb. 1) eine erhebliche Komplexität.

In dieser Arbeit werden nun zwei Methoden vorgestellt, die es ermöglichen, die verwendeten FE Modelle und die damit erzielten Ergebnisse besser(einfacher) zu beurteilen und einzuordnen. Diese Verfahren orientieren sich an den aus der Strukturmechanik bekannten modalen Partizipationsfaktoren sowie dem „Modal Assurance Criterion“ (vergl. Übersichtsartikel in [9]) und wurden an die in den MRT Scannern vorliegenden physikalischen Verhältnisse adaptiert.

## 1.1 MRT System

Bei der Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) werden Signale mit Bildinformation erzeugt, indem wohldefinierte Veränderungen von Magnetfeldern eingesetzt werden. Um ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erreichen, wird ein starkes und homogenes statisches Grundfeld ( $B_0$ ) innerhalb des Bildgebungsvolumens benötigt; für klinische MRT Systeme sind derzeit Feldstärken von 1.5 T und 3 T üblich. Diese Grundfelder werden mittels Helium-gekühlter Supraleiter erzeugt, die zum Schutz vor Wärme und anderer Strahlung von einem sogenannten Kryostaten, bestehend aus mehreren gegeneinander isolierten metallischen Kesseln, abgeschirmt werden (Abb. 1). Quelle der meisten abzuschirmenden Strahlung ist eine dynamisch geschaltete Spule, die für die Erzeugung eines Magnetfeldes mit räumlichen Gradienten zuständig ist. Der zeitlich veränderliche Magnetfeldgradient ist notwendig, um das MRT Signal räumlich zu kodieren. Durch den dynamischen Betrieb dieser sogenannten Gradientenspule werden Wirbelströme in einem breiten Frequenzspektrum im Kryostaten induziert.

Sämtliche Wirbelströme, die im MRT System auftreten, wechselwirken mit dem  $B_0$  Feld der Supraleiter und generieren Lorentzkkräfte. Die durch die Gradientenspule im Kryostaten induzierten Wirbelströme bewirken eine entsprechende Bewegung der leitfähigen Strukturen. Gemäß der Lenz'schen Regel erzeugen die resultierenden Vibrationen Wirbelströme und Wechselfelder mit dem Ziel, die auftretende Flussänderung im  $B_0$  Feld zu reduzieren. Die emittierten Felder interagieren wiederum mit umliegenden leitfähigen Strukturen, und somit ergibt sich ein magnetomechanisch gekoppeltes System mit komplexem Verhalten. Von speziellem Interesse sind hierbei die Ohmschen Verluste, die von den Wirbelströmen im Kryostaten verursacht werden. Diese Wirbelstromverluste (ECL, engl. eddy current losses) zeigen ein resonantes Verhalten, erklärbar durch verstärkte Vibrationen bei Anregungen nahe den mechanischen Eigenfrequenzen des Kryostaten.

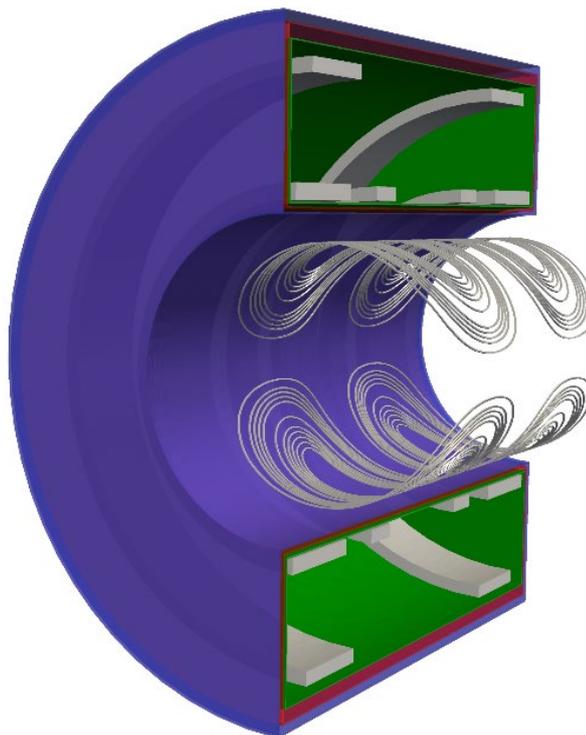


Abb. 1: Ausschnitt der magneto-mechanisch relevanten Komponenten des MRT Systems. Der hochleitfähige kryogenische Schild umgibt die Hauptmagnetspulen und schirmt sie gegen unerwünschte Strahlung. Der Schild ist Teil von mehreren zylindrischen Kesseln, welche charakteristischen Einfluss auf das magnetomechanische System ausüben. Zentral im Bild sind die sattelförmigen Leiterbahnen einer transversalen Gradientenspule skizziert.

## 2 Angewendete Methoden

### 2.1 Direkt gekoppelte FE Simulation

Um eine numerische Beschreibung der magnetomechanischen Problemstellung über den FE Formalismus zu erhalten, ist es essenziell, Kopplungsterme in die zugrundeliegenden Differentialgleichungen zu integrieren. Die durchgeführten Simulationen berücksichtigen die Kopplung mittels folgender Gleichungen [8].

$$\begin{aligned} K_u u + C_u \dot{u} + M_u \ddot{u} &= F(A) \\ K_A(u)A + M_A(u)\dot{A} &= J(u, A) \end{aligned}$$

Die Abhängigkeit der Permeabilität und der Leitfähigkeitsmatrix von der Verschiebung ist dabei implizit enthalten. Für MRT Systeme kann dieser Ansatz linearisiert werden, indem eine Unterteilung in statische und dynamische Beiträge stattfindet, zum Beispiel für das Magnetfeld  $B(t) = B_0 + B_-(t)$ . Das statische Magnetfeld der Supraleiter  $B_0$  ist um zwei bis drei Größenordnungen größer als die auftretenden dynamischen Felder  $B_-$ , und eine Vernachlässigung der höheren dynamischen Terme führt zu einer linearisierten Näherung [5]. Betrachtet man die reduzierten Gleichungen im Frequenzraum erhält man folgendes System

$$\left( \begin{pmatrix} K_u & 0 \\ 0 & K_A \end{pmatrix} + j\omega \begin{pmatrix} C_u & C_{uA} \\ C_{Au} & M_A \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} M_u & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} u \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_j \\ J_i \end{pmatrix}$$

### 2.2 Modale Entwicklungsfaktoren

Als Ergebnis der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Berechnungen erhält man unter anderem die maximalen Schwingungsamplituden  $u(\omega)$  der auftretenden Kryostatvibrationen. Die Schwingungsform jedes einzelnen kryogenischen Kessels kann in dessen Eigenmoden  $u_q$  entwickelt werden, wobei  $q$  die Moden, sortiert nach ihrer Eigenfrequenz, nummeriert. Zu welchem Anteil welche Mode  $u_q$  an der Bewegung  $u(\omega)$  beteiligt ist, kann mit den modalen Entwicklungsfaktoren (*MEF*) quantifiziert werden

$$MEF(q, \omega) = \frac{|\sum_r u(r, \omega) \circ u_q(r)|}{\sum_r |u_q(r)|}$$

wobei  $r$  als Index für die Finiten Elemente der betrachteten Komponente verwendet wird. Die Matrix  $MEF(q, \omega)$  enthält damit maximal große Werte, wenn die harmonische Bewegung  $u(\omega)$  auf Elementebene stets (anti-)parallel zu der Eigenmode  $u_q$  verläuft. Ein Vergleich der *MEF* Werte zu den simulierten ECL erlaubt daher eine Zuordnung von Resonanzen zu stark beteiligten Komponenten und enthält somit Informationen über die Güte der auftretenden Oszillationen.

### 2.3 Magnetomechanische Partizipationsfaktoren

Aus der Analyse der *MEF* Matrizen für die verschiedenen Kessel des Kryostaten ist erkennbar, dass die Resonanzen eines Kessels dominante Auswirkungen auf den ECL haben. Es handelt sich hierbei um den Kessel mit der höchsten Leitfähigkeit und der geringsten Dichte, wodurch er am empfindlichsten auf wirbelstrominduzierte Lorentzkraften reagiert. Die folgenden Betrachtungen sind daher auf diesen, als kryogener Schild (KS) bezeichneten Kessel, konzentriert. Eine weitere Vereinfachung wird erzielt, indem die Analyse auf den inneren Zylinder des KS limitiert wird. Die Gradientenspule besitzt zu diesem Teil des KS den geringsten Abstand, wodurch dort die stärksten Wechselwirkungen mit dem erzeugten elektromagnetischen Feld auftreten. Wie bereits in 2.1 angewendet, kann in MRT Systemen davon ausgegangen werden, dass die stärksten Lorentzkraften  $F$  durch Interaktion von Wirbelströmen  $J$  mit dem  $B_0$  Feld zustande kommen.

$$F(r) \sim J(r) \times B_0(r)$$

Da aufgrund der geringen Dicke des KS parallele Feldanteile vernachlässigt werden können, werden diese Kräfte in guter Näherung durch Wirbelströme erzeugt, die sich aus der zum leitfähigen Medium senkrecht stehenden Feldverteilung  $B_\perp$  der Gradientenspule berechnen lassen. Damit lässt sich die Kraftverteilung nähern mittels

$$F(r) \sim (\nabla \times B_\perp(r)) \times B_0(r)$$

Es handelt sich dabei um eine rein analytische Berechnung der Kraftverteilung, die mit Biôt-Savart Formulierungen der Spulen netzunabhängig durchgeführt werden kann [10]. Kennt man die Kraftverteilung  $F(r)$  und die modale Auslenkung  $u_q(r)$  für die Elemente des KS Zylinders, lässt sich der Partizipationsfaktor (PF) der Eigenmode  $q$  berechnen als

$$P_q = \frac{|\sum_r F(r) \circ u_q(r)|}{\sum_r |u_q(r)|}$$

Dabei bezeichnet  $\circ$  das Skalarprodukt zwischen dem Verschiebungsvektor der Eigenmoden  $u_q$  und dem Kraftvektor  $F$ .

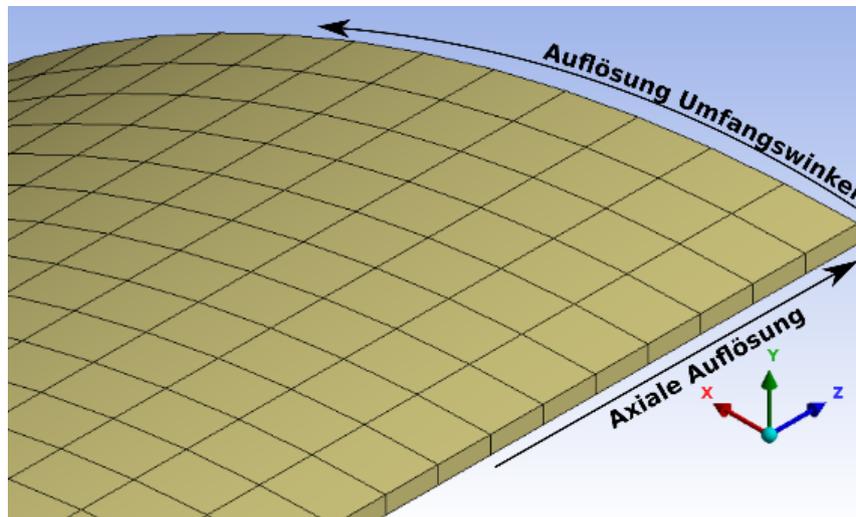


Abb. 2: Repräsentative Darstellung der Vernetzung des inneren Hohlzylinders des kryogenischen Schildes. Die PFs können verwendet werden, um die Netzauflösung zu optimieren.

Die Berechnung kann auch als eine Betrachtung der Parallelität der Kraft und der Verschiebung interpretiert werden. Die Kraftverteilung wird in den Eigenmoden der Vibration entwickelt, wobei die Entwicklungsparameter den Partizipationsfaktoren entsprechen. Eine starke Anregung über das Feld der Gradientenspule sollte nur bei Moden möglich sein, die einen hohen PF besitzen.

Mithilfe der PFs wurde eine Netzstudie bezüglich des inneren Zylinders des KS durchgeführt. Dazu wurde erst die Umfangsauflösung (vgl. Abb. 2) zwischen  $2^\circ$  und  $6^\circ$  variiert, während die axiale Elementlänge bei 6 mm fixiert wurde. Dann wurden verschiedene axiale Auflösungen zwischen 6 mm und 48 mm bei konstanten  $2^\circ$  Umfangsauflösung analysiert. Untersucht wurden Veränderungen in den PFs im Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 600 Hz. Sobald eine Konvergenz der Ergebnisse erkannt wird, kann von einer ausreichenden feinen Vernetzung ausgegangen werden.

### 3 Ergebnisse & Diskussion

Die präsentierten Ergebnisse stammen von Simulationen eines klinischen MRT Systems mit 1.5 T Feldstärke und einer transversalen Gradientenspule (Abb. 1). Die eingesetzten FE-Netze verwendeten Nédélec Elemente 1.Ordnung und der untersuchte Frequenzbereich wurde auf 0 - 600 Hz beschränkt.

#### 3.1 Modale Entwicklungsfaktoren

Abbildung 3 zeigt eine Illustration der  $MEF(q, \omega)$  Matrix für den KS. Ein Vergleich der Reihen (Werte einer Modenzahl  $q$  für verschiedene Anregungsfrequenzen) mit dem ECL Spektrum (Abb. 4), welches mittels der linearisierten harmonischen Berechnung (Abschnitt 2.1) berechnet wurde, erlaubt die Zuordnung von Moden zu ECL Maxima. Die Mode Nummer 8 erscheint in der Matrix besonders dominant und in einem deutlich breiteren Frequenzbereich aufzutreten als im ECL Spektrum erkennbar. Die Kreise in Abbildung 3 markieren für jede Eigenmode (Reihe) die entsprechende rein mechanisch bestimmte Eigenfrequenz (10 Hz Auflösung) der Mode. Es fällt auf, dass die Eigenfrequenzen stark beteiligter Moden stets bei tieferen Frequenzen liegen als die ihnen zugeordneten Resonanzen im ECL Spektrum. In Tabelle 1 sind diese Frequenzverschiebungen quantifiziert.

Ein Vergleich der Abbildungen zeigt das gleichzeitige Auftreten von ECL Maxima und hoher MEF Werte des KS. Allerdings ist eine Versteifung des mechanischen Systems hervorgerufen durch das statische Grundfeld  $B_0$  erkennbar. Die Wechselwirkungen der bewegungsinduzierten Wirbelströme mit dem Magnetfeld bremsen die Ausbildung der Vibrationen entsprechend der Lenz'schen Regel. Sie bewirken damit eine Erhöhung der Eigenresonanz, wie sie auch über eine Zunahme der Steifigkeit des Materials auftreten würde.

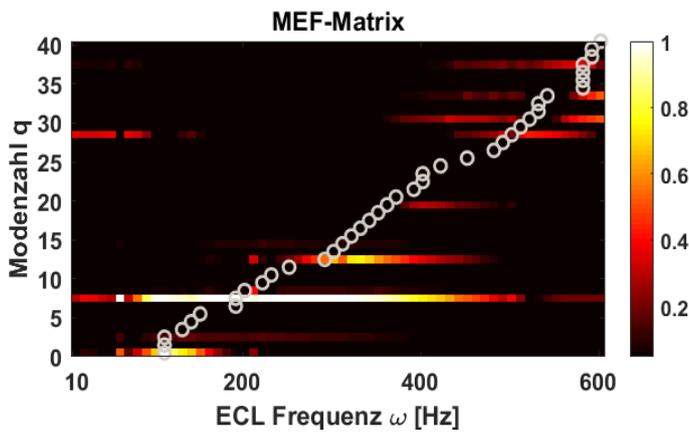


Abb. 3: Illustration der  $MEF(q, \omega)$  Matrix für den KS. Die Kreise markieren die zur Eigenfrequenz der Mode  $q$  nächstgelegene Frequenz  $\omega$ .

Tab. 1: Eigenfrequenzverschiebungen durch  $B_0$  Versteifung ermittelt für deutlich auftretende Moden

$q$	Eigenfrequenz [Hz]	Frequenzerhöhung [Hz]
1	106	$4 \pm 5$
8	188	$32 \pm 5$
13	290	$40 \pm 5$
20	361	$39 \pm 5$
29	501	$19 \pm 5$
31	521	$79 \pm 5$
34	545	$> 65$
38	586	$> 14$

Es muss jedoch beachtet werden, dass jede Eigenmode unterschiedlich mit  $B_0$  interagiert, da die Modenform und das Magnetfeld eine räumliche Verteilung besitzen. Knoten und Bäuche einer Mode treten in unterschiedlich ausgeprägten inhomogenen Bereichen des Magnetfeldes auf. Die Vibration verursacht folglich mehr oder weniger starke Flussänderungen, weshalb jede Mode zu einem anderen Grad in ihrer Bewegung gehemmt wird. Dadurch ist die Frequenzverschiebung stark modenabhängig und unterliegt keiner einfachen Systematik.

### 3.2 Magnetomechanische Partizipationsfaktoren

In Abbildung 4 sind links das ECL Spektrum und die nach 2.3 berechneten Partizipationsfaktoren dargestellt. Das verwendete Berechnungsschema verbindet die magnetisch auftretenden Kräfte und die angeregten Modenformen indirekt, wodurch die durch  $B_0$  bedingte Versteifung mit dieser Methode nicht erfasst wird. Alle in Tabelle 1 aufgeführten Moden besitzen signifikante PF Werte. Berücksichtigt man die gelisteten Frequenzverschiebungen, ermöglicht das eine klare Zuordnung der PFs zu ECL Maxima (Abb. 4 rechts). Für eine Analyse der anregbaren Eigenmoden und relative Aussagen zwischen verschiedenen Modellen liefert der magnetomechanische PF Ansatz somit bereits viele Informationen. Dabei haben die vereinfachenden Annahmen im Berechnungsschema sowie die Reduzierung der modalen Analyse auf eine Komponente die Komplexität des Modells drastisch verringert. Der benötigte Zeitbedarf für eine PF Berechnung lag um mindestens einen Faktor 240 niedriger als für die gekoppelte Simulation.

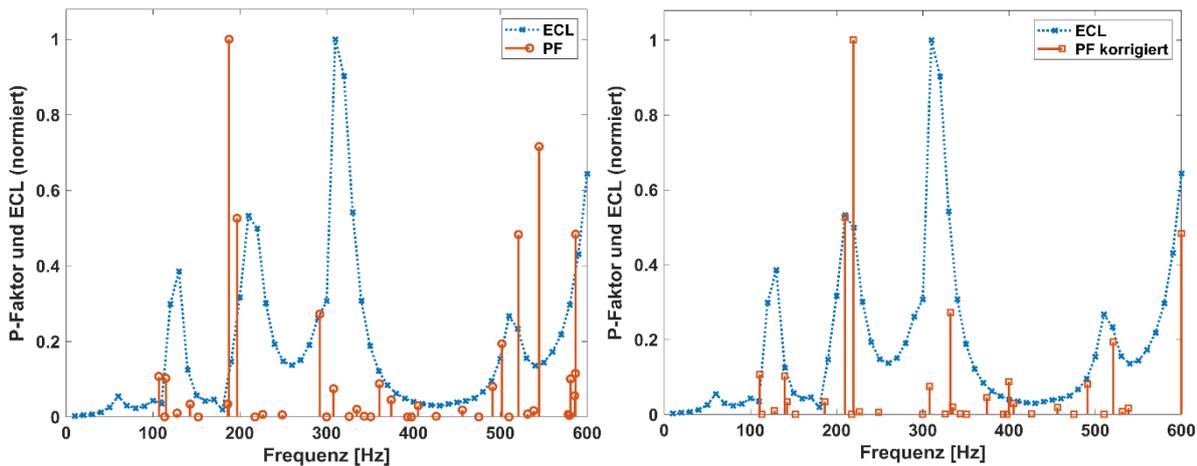


Abb. 4: Links - Plot des ECL Spektrums und der PFs. Eine einwandfreie Zuordnung der relevanten Moden zu den ECL Maxima ist kaum möglich. Rechts – Überarbeiteter Plot. Unter Berücksichtigung der  $B_0$  Versteifung (Tab. 1) können die Resonanzfrequenzen der Moden und der ECL Maxima besser einander zugeordnet werden.

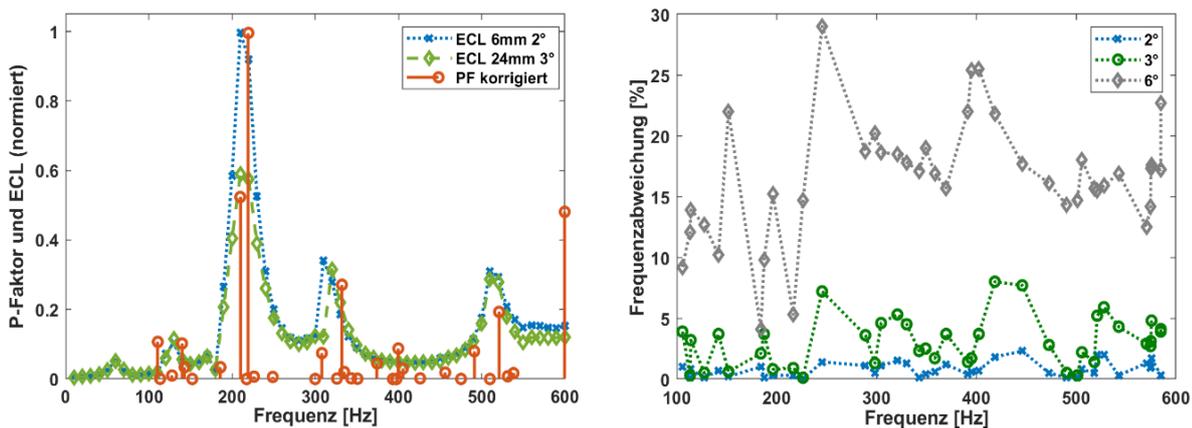


Abb. 5: Zwei ECL Kurven für die feinste und die per magnetomechanischer PF Analysen optimierte Vernetzung für die inneren Kryostatzylinder sowie nochmals die um die  $B_0$  Versteifung korrigierten PFs. Rechts - Prozentuale Abweichung der Eigenfrequenzen für verschiedene Winkelauflösungen. Als Referenz Eigenfrequenzen dienten die Ergebnisse eines Netzes mit  $1^\circ$  Auflösung und Elemente 2. Ordnung.

Die PF Analyse enthält allerdings keine Informationen über die Güte der Resonanzen und damit keine Aussagen über etwaige Überlagerungen von Eigenmoden. Dementsprechend schwierig ist die Beurteilung von Amplitudenverhältnissen zwischen dem ECL und den PFs, speziell bei eng zusammenliegenden Eigenfrequenzen.

Ein weiterer Grund für die abweichenden Amplituden liegt darin, dass sich der PF Ansatz auf die Analyse des inneren Zylinders des KS beschränkt. Diese Komponente des Kryostaten ist zwar der dominante Träger von relevanten magnetomechanische Wechselwirkungen, die Kopplung zu den anderen Komponenten kann aber einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss ausüben. Während das ECL Maximum bei 210 Hz durch die KS Resonanz (Mode 8) des inneren Zylinders verursacht wird, ist bei den anderen Maxima davon auszugehen, dass auch Wirbelströme auf anderen Komponenten zu den Verlusten beitragen. Trotz dieser Vernachlässigung ist eine klare Korrelation zwischen den frequenzkorrigierten PFs und den ECL Maxima erkennbar.

Beschränkt man die Auswertung der Wirbelstromverluste ebenfalls auf die inneren Zylinderstrukturen des Kryostaten ergibt sich wie zu erwarten war ein noch besseres Bild der Übereinstimmung von PFs und ECL (Abb. 5).

Zusammengefasst bietet die PF Methode eine Möglichkeit, um herauszufinden, welche Kryostatmoden von einer gegebenen Kombination aus Gradientenspule und MRT Magnet angeregt werden. Durch die massiven Zeitersparnisse bei der Modellerstellung und Berechnung stellt sie eine effiziente Alternative zur komplex gekoppelten Simulation dar. Für detaillierte Informationen über die ECL kann auf die Berechnung der direkten Kopplung nicht verzichtet werden.

### 3.3 Netzoptimierung mittels Partizipationsfaktoren

Abbildung 6 zeigt PF Verteilungen, die zur Optimierung der Netzauflösung der inneren Kryostatzylinder verwendet wurden. Man erkennt eine Konvergenz der Partizipationsfaktoren unter Verwendung feinerer Elementgrößen. Die Hauptcharakteristiken des feinsten Netzes mit 6 mm axial und 2° Umfangsauflösung (Plot a) sind bereits bei 3° (Plot b) und beim Netz mit 24 mm (Plot d) erkennbar. Bis auf kleinere Diskrepanzen in den Absolutwerten der Frequenzen und Amplituden, ist die Anzahl der relevanten PFs gleich und die Amplitudenverhältnisse sind ähnlich.

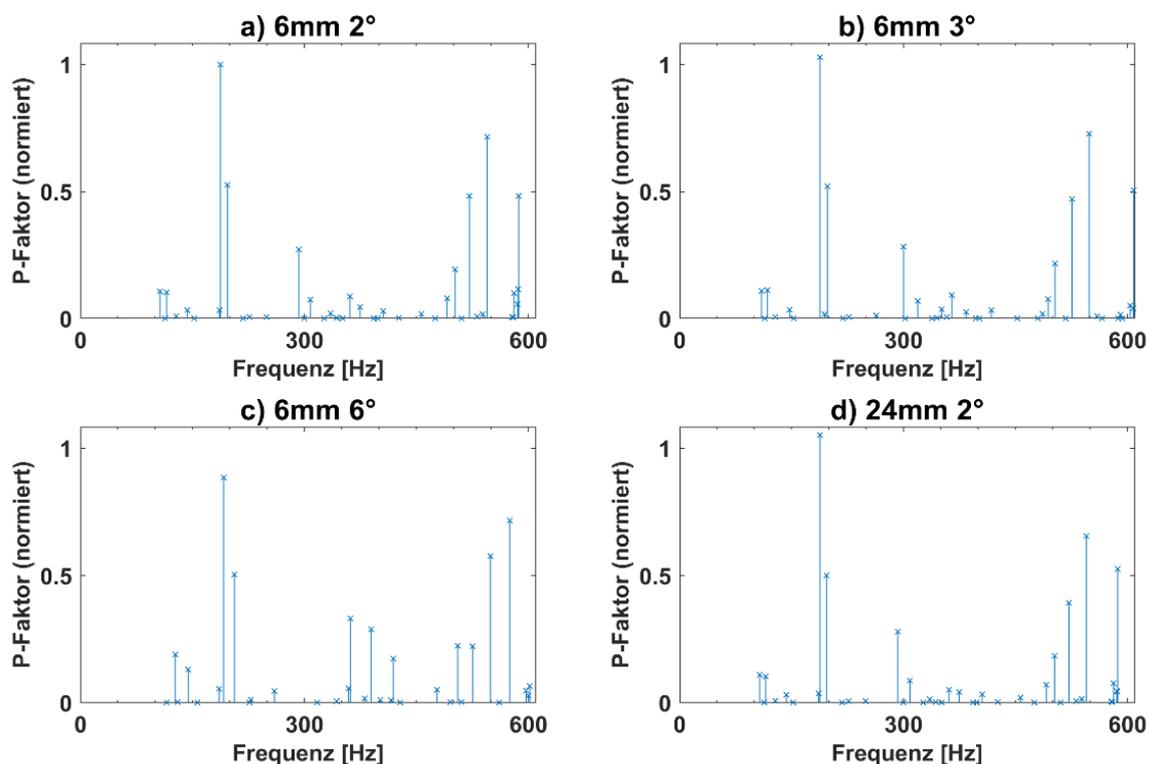


Abb. 6: Partizipationsfaktoren ermittelt auf dem inneren Zylinder des KS für verschiedene Elementgrößen. Die Plots b und d, scheinen konvergiert, sie zeigen starke Ähnlichkeit zur Referenz a. Die Vernetzung mit 6° Winkelauflösung zeigt stärkere Abweichungen in den PFs (c).

Der Plot c mit 6° Winkelauflösung hingegen ist ein Parametersatz, der noch deutliche Abweichungen aufweist. Es fehlen deutliche Partizipationsfaktoren um 300 Hz und 600 Hz, während die Faktoren im Bereich um 400 Hz zu hoch sind. Ein Vergleich zwischen den erzielten Ergebnissen in der ECL Simulation mit den optimierten Netzparametern (3° und 24mm) ist in Abb. 5 links geplottet. Im Allgemeinen ist die Übereinstimmung der Ergebnisse sehr gut, nur die Amplitude im Hauptmaximum ist deutlich unterschätzt. Teilweiseweise liegt das an einer zu groben Abtastung des Maximums, eine abschließende Klärung steht jedoch noch aus. Ein verringerter Überlapp der beiden involvierten Resonanzen kann nahezu ausgeschlossen werden, da der Unterschied der jeweiligen Eigenfrequenzen geringer als 1% ist. Der Zeitgewinn der Simulation durch das optimierte Netz liegt bei 40% von 60 h auf 36 h.

Der Vorteil dieser Methode zur Netzoptimierung wird bei Betrachtung des rechten Plots in Abbildung 5 deutlich. Der Plot zeigt die Abweichung der Eigenfrequenzen der Moden berechnet mit verschiedenen Winkelauflösungen im Vergleich zu einem noch feineren Netz (Elemente zweiter Ordnung mit 3mm und 1° Auflösung).

Dieser konventionelle Ansatz der Netzoptimierung nutzt keine Informationen darüber welche Moden tatsächlich mit dem Feld der Gradientenspule anregbar sind. Die Abweichungen mit den durch PF Analyse optimierten Parametern liegen hierbei teilweise über 5%. Dennoch zeigt die ECL Berechnung mit dieser Auflösung akzeptable Ergebnisse. Das liegt daran, dass die Moden mit signifikanten PFs Werte zeigen, die durchweg und meist deutlich kleiner als 5% sind.

Die Verwendung von magnetomechanischen PFs zur Modelloptimierung hat sich damit als praktikabel erwiesen. Außerdem ist die Methode effizienter als simplere Ansätze, da sie sich auf relevante Eigenmoden konzentriert und damit eine Überspezifizierung der Netzparameter verhindert.

## 4 Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen der Promotion [11] des ersten Autors durchgeführt, welche durch Siemens Healthineers, Erlangen finanziert wurde.

## 5 Literatur

- [1] Ströhlein, C.A., Krug, A., vom Endt, A., Dietz, P., Landes, H.: "Modelloptimierung mittels modaler Partizipationsfaktoren für Simulationen von Magnet-Resonanz-Tomographen", Cadfem Ansys Simulation Conference, 2017
- [2] Ströhlein, C.A., Krug, A., Landes, H.: "Feldstörungen und Wirbelstromverluste in MRT-Systemen aufgrund magneto-mechanischer Interaktionen", Cadfem Ansys Simulation Conference, 2016
- [3] Landes, H., Krug, A., Dietz, P., Stein, A.: "Modal Analysis for Coupled Magneto-Mechanical Systems Applied to MRI Scanners", Ansys Cadfem User Meeting, 2012
- [4] Rausch, M., Gebhardt, G., Kaltenbacher, M., Landes, H.: "Computer-aided design of clinical resonance imaging scanners by coupled magnetomechanical-acoustic modeling". IEEE Trans. Mag., 41, 2005
- [5] Landes, H., Dietz, P., Krug, A., Stein, A.: "Simulations in Ultra-High-Field Magnetic Resonance Imaging", Ansys Cadfem User Meeting, 2010
- [6] Ledger, P.D., Gil, A.J., Poya, R., Kruij, M., Wilkinson, I., Bagwell, S.: "Solution of an industrially relevant coupled magneto-mechanical problem set on an axisymmetric domain", Applied Mathematical Modelling, 2016
- [7] H. Landes, A. Hauck, Anwendung von Finite-Element Verfahren zur Berechnung gekoppelter magneto-mechanischer Probleme, NAFEMS Magazin (3), pp.55-66, 2013
- [8] Kaltenbacher, M.: "Numerical simulation of mechatronic sensors and actuators", 3rd ed., Springer, 2015
- [9] Allmang, R.J., The modal assurance criterion (MAC): twenty years of use and abuse, Sound and Vibration Magazine. 38(8), pp.14-23, 2003
- [10] Urankar, L. K.: "Vector potential and magnetic field of current-carrying finite arc segment in analytical form, Part III: Exact computation for rectangular cross section", IEEE.Trans.Mag.,Vol. Mag-18, pp.1860-1867, 1982
- [11] Ströhlein, C.A., „Magnetomechanical interactions in clinical MRI cryostats“, Dissertation, Universität Regensburg, eingereicht 2018

# Anforderungen und Grenzen traditioneller FVM und neuer SPH-Ansätze zur Strömungssimulation in Fahrzeuggetrieben

Gernot Maier\*, Francesco Testa\*\*, Wolfgang Baier\*, Andreas Diemath\*

\* AVL List GmbH, Graz, Österreich

\*\* AVL Italia S.r.l., Turin, Italien

Als Unternehmen mit starkem Fokus auf virtueller Entwicklung sucht AVL stets nach neuen und innovativen Lösungen in verschiedensten Anwendungsgebieten des Automobilbereichs. Eines dieser Anwendungsgebiete ist die Simulation von Ölströmungen in Getrieben, wo sich neue Simulationsmethoden wie SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) aufgrund des geringeren Preprocessing-Aufwands sowie kurzen Simulationszeiten als attraktive Lösungen anbieten.

Diese Abhandlung beschreibt aktuelle Simulationsaufgaben und Ziele zur Untersuchung von Getriebeströmungen im Rahmen von F&E und zeigt Grenzen im Entwicklungsprozess auf. Des Weiteren wird das "klassische" Finite-Volumen-Verfahren mit partikelbasierten SPH-Methoden in Hinsicht auf ihre Stärken, Schwächen und Grenzen der Anwendbarkeit verglichen. Diese Vergleiche basieren auf verschiedenen Beispielen mit zunehmender geometrischer Komplexität, angefangen von einzelnen Zahnrädern bis hin zu Strömungen in komplexen Getrieben.

Die gewünschten Resultate von Getriebesimulationen sind normalerweise gut definiert und beinhalten genaue Prognosen über hydrodynamische Verluste sowie der allgemeinen Ölverteilung in einem Getriebe unter Einbeziehung des temperaturabhängigen Verhaltens des Öls sowie des Wärmeaustausches mit benachbarten Bauteilen, wie beispielsweise dem Getriebegehäuse. Neben der Herausforderung, physikalische Vorgänge wie einphasige oder mehrphasige Strömungen, thermische Effekte und sonstige Wechselwirkungen wie beispielsweise Wandfilm miteinzubeziehen, stellt die Berücksichtigung sich drehender Bauteile und komplexer Bauteile mit sehr kleinen Spalten eine Herausforderung für Getriebesimulationen dar. Abhängig von der Komplexität der Geometrie und der untersuchten Effekte eignet sich eine der beiden Simulationsmethoden jeweils besser als die andere.

Während die SPH-Methode hinsichtlich Preprocessing- und Simulationszeiten Vorteile hat, liefert das Finite-Volumen-Verfahren genauere Resultate in Hinsicht auf Drehmomentverluste. Aus diesem Grund wird SPH vor allem für konzeptuelle Untersuchungen oder Anwendungen, bei denen die generelle Einschätzung der Strömungsverteilung ausreichend ist, verwendet. Der Nachteil des Finite-Volumen-Verfahrens ist der hohe Preprocessing-Aufwand, da gewisse Änderungen an der Geometrie vorgenommen werden müssen, um die benötigten (bewegten) Berechnungsnetze generieren zu können. Aufgrund dieser Nachteile etablieren sich SPH-Methoden als vielversprechende Alternative für Getriebeanwendungen. Aktuelle Untersuchungen versuchen die Nachteile der SPH-Methoden zu minimieren, um diese für mehr als grundlegende konzeptuelle Untersuchungen einsetzen zu können, wofür aber die Berücksichtigung zusätzlicher physikalischer Effekte notwendig ist.

## 1 Einführung

Aufgrund des stetigen Wunsches nach effizienteren Antriebssträngen gewinnt die Simulation von Ölströmungen in Getrieben mittels CFD immer mehr an Bedeutung. Klassische CFD-Codes mit dem Finite-Volumen-Ansatz (FV) verfügen über ein breites Anwendungsgebiet wie Aerodynamik, Verbrennungs- oder Mehrphasensimulation. Getriebe stellen für klassische, gitterbasierte CFD-Solver ein herausforderndes Anwendungsgebiet dar. Der Grund hierfür sind die notwendigen bewegten Berechnungsnetze, die spezielle Vernetzungsansätze wie die sliding- oder overset-mesh-Methode voraussetzen. In den letzten Jahren kamen viele partikelbasierte CFD-Codes auf den Markt. Diese Codes erlauben dem/der AnwenderIn, komplexe Getriebegeometrien in relativ kurzer Zeit zu simulieren, ohne vorher aufwändige Berechnungsnetze generieren zu müssen.

Die Ziele für Getriebeimulationen beinhalten in der Regel eine oder mehrere der unten genannten Punkte:

- Ölverteilung: Einschätzung der Ölverteilung im Getriebe, um Bereiche zu identifizieren, die nicht ausreichend mit Öl versorgt werden. Auch Effekte wie Ölverschäumung sollten in der Simulation berücksichtigt werden können.
- Drehmomentverluste: Einschätzung der hydrodynamischen Verluste (infolge von Druck- und Scherkräften), die durch das Öl verursacht werden.
- Durchflussraten: Einschätzung der Durchflussmenge durch Versorgungskanäle innerhalb eines Getriebes.
- Durchlaufzeit: Wie bei allen Simulationsaufgaben ist es von Interesse, die Durchlaufzeiten (Preprocessing, Simulation, Postprocessing) so gering wie möglich zu halten.

Das Ziel dieser Abhandlung ist es, eine Übersicht über die Vor- und Nachteile verschiedener Simulationsansätze zu geben (siehe Fallbeispiel A) und ein Beispiel für einen Workflow innerhalb eines SPH-basierten Tools zu zeigen (siehe Fallbeispiel B). Die Codes, die verglichen wurden, sind AVL FIRE™ für den FV-Ansatz und PreonLab für den SPH-Ansatz.

## 2 Theorie

Die Basis die FV- und SPH-Codes stellen die Navier-Stokes-Gleichungen dar, welche in differentieller Form wie folgt aussehen:

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho_i} \nabla p_i + \nu \nabla^2 \mathbf{v}_i + \frac{\mathbf{F}_i}{m_i}$$

Die zeitliche Änderung eines durchströmten Kontrollvolumens ist gleich der Summe der externen Kräfte aufgrund von Druckunterschieden, Scherkräften und anderer volumetrischer Kräfte wie der Schwerkraft, die auf das Volumen wirken [4]. Finite-Volumen CFD-Codes diskretisieren die Navier-Stokes Gleichungen unter Verwendung der Eulerschen Betrachtungsweise, in welcher Berechnungsgrößen (z.B. Geschwindigkeit, Temperatur, etc.) an fixen Punkten im Raum berechnet werden. Diese fixen Punkte repräsentieren die Mittelpunkte von beliebig geformten Kontrollvolumina bzw. Berechnungszellen. All diese Kontrollvolumina repräsentieren die Geometrie in Form eines Berechnungsnetzes. Ein Vorteil der Finite-Volumen-Methode ist deren konservative Natur sowie die Möglichkeit, komplexe Geometrien simulieren zu können. [1]

Ein Nachteil der Finite-Volumen-Solver sind Strömungen, die nicht orthogonal zu den Randflächen einer Berechnungszelle fließen und so zu numerischer Diffusion führen [5], was vor allem dann unerwünscht ist, wenn die Grenzfläche zwischen Öl und Luft aufgelöst werden soll, was bei Getriebeanwendungen wünschenswert ist. Es gibt Ansätze, solche Grenzflächen besser abzubilden, wie etwa die Volume-of-Fluid-Methode [2], welche aber die Rechenzeit aufgrund hoher Anforderungen an die Netzauflösung und niedriger möglicher Zeitschritte beträchtlich verlängern. Ein weiterer Nachteil der Finite-Volumen-Methode ist, dass das Berechnungsnetz im Falle von bewegten Komponenten angepasst werden muss. Hierzu existieren verschiedene Ansätze wie die overset- oder sliding-mesh-Methode, wobei beide Methoden das System komplexer machen und den Aufwand in Preprocessing und Simulation stark erhöhen. Bei der sliding-mesh-Methode etwa muss das System vereinfacht und Zahnräder auseinandergeschoben werden, damit sie nicht ineinandergreifen. Dies kann das Ergebnis der Simulation beeinflussen.

Partikelbasierte Methoden verwenden eine Lagrangesche Betrachtungsweise, bei der sich Kontrollvolumina frei innerhalb des Rechengebiets bewegen [3]. Dieser Ansatz hat gegenüber dem Finite-Volumen-Verfahren einige Vorteile, schafft aber auch neue Herausforderungen. Einer der Vorteile ist eine verkürzte Preprocessing-Zeit, da kein Berechnungsnetz erstellt werden muss [6]. Dies kann die Arbeitszeit um einige Stunden oder sogar Tage verkürzen. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass die Geometrie keiner speziellen Vorbereitung wie etwa einer Verkleinerung oder Verschiebung der Zahnräder bedarf. Die Zahnräder können ineinandergreifen und mittels eines Starrkörpersolvers kann einem einzelnen Zahnrad auch eine Drehzahl zugewiesen werden, während die Drehzahlen aller anderen Zahnräder durch den Starrkörpersolver berechnet werden.

Ein Nachteil partikelbasierter Codes ist, dass sie im Vergleich zu den schon langen etablierten FV-Codes kürzer am Markt verfügbar und daher weniger ausgereift sind. Ein weiterer Nachteil ist, dass für Medien mit stark unterschiedlichen Dichten, wie beispielsweise Öl und Luft, keine stabile Mehrphasensimulation möglich ist. Dies kann zwar teilweise durch den Einsatz von Strömungswiderstandsmodellen anstatt der Modellierung von Luft ausgeglichen werden, jedoch können Effekte wie etwa Luft einschließen im Getriebeöl nicht dargestellt werden.

### 3 Fallbeispiel A: Zweistufiges Verteilergetriebe

#### 3.1 Geometrie und Randbedingungen

Ein zweistufiges, schrägverzahntes Verteilergetriebe wie, in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt, bildet die Basis für dieses Fallbeispiel. Vier verschiedene Codes mit verschiedenen Ansätzen (FV, SPH und Lattice-Boltzmann-Methode/LBM) wurden miteinander verglichen [7]. Die Zahnräder 1 und 3 haben jeweils 32 Zähne, während Zahnrad 2 über 52 Zähne verfügt, wobei der Schrägungswinkel  $20^\circ$  beträgt. Der Achsabstand zwischen den Zahnrädern beträgt jeweils 137 mm.



Abb. 1: Getriebegehäuse

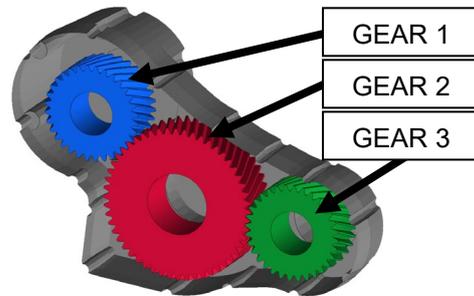


Abb. 2: Schnitt durch das Getriebe

Da bei der Finite-Volumen-Methode die Zahnräder nicht ineinandergreifen dürfen, muss der Achsabstand, wie in Abb. 3 dargestellt, auf 149 mm erhöht werden. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass Drehmomentenverluste sowie die Ölverteilung hauptsächlich durch die Zahnräder beeinflusst wird, weswegen die Wellen für diese Untersuchung nicht berücksichtigt wurden. Die Drehzahl von Zahnrad 2 beträgt 500 U/min, was zu einer Drehzahl von 812.5 U/min für die kleineren Zahnräder führt.

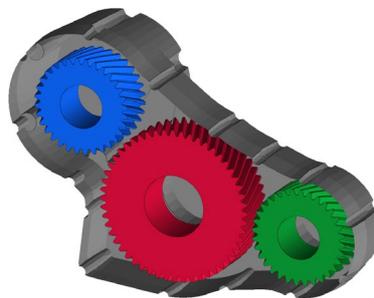


Abb. 3: Getriebe mit vergrößertem Achsabstand

#### 3.2 Vergleich der Workflows

##### 3.2.1 Finite-Volumen-basierte Codes

Für FV-CFD Simulationen wird für gewöhnlich der sliding-mesh-Ansatz genutzt, was bedeutet, dass jedes Zahnrad von einem zylindrischen Teil des Berechnungsnetzes umgeben wird. Zahnräder müssen entweder verkleinert oder auseinandergeschoben werden, damit sie nicht ineinandergreifen. Beim Vernetzen dieser Geometrie gilt es, folgende Dinge zu berücksichtigen:

- Den Abstand zwischen den Zahnradspitzen und dem Rand des bewegten Teils des Berechnungsnetzes
- Das *interface* zwischen dem bewegten und statischen Teil des Berechnungsnetzes

Theoretisch können mit dieser Methode komplexe Getriebe simuliert werden, in der Praxis ist der Aufwand jedoch zu hoch. Anstatt das gesamte Getriebe zu simulieren, werden einzelne Zahnräder betrachtet und die

einzelnen Drehmomentverluste zu einem Gesamtverlust aufaddiert. Planetengetriebe wurden zwar mit sich bewegenden Planetenträgern, aber ohne Relativbewegung zwischen Planetenrädern und Planetenträger simuliert.

### 3.2.2 Partikelbasierte Codes

Da für diesen Ansatz kein Berechnungsnetz nötig ist, beträgt die Preprocessing-Zeit nur einen Bruchteil der Zeit, die beim FV-Ansatz nötig ist. Lediglich Überschneidungen zwischen bewegten Geometrieteile sollten vermieden werden, da ansonsten während der Simulation Partikel aus dem System gelöscht werden können. Während der FV-Ansatz in der Praxis auf relativ simple Geometrien und Getriebe beschränkt ist, können mit Partikelcodes komplexe Getriebegeometrien mit geringem Aufwand simuliert werden. Fallbeispiel B zeigt den Workflow anhand eines Planetengetriebes.

### 3.3 Durchlaufzeiten

Tab. 1 zeigt die Durchlaufzeiten verschiedener Tools für die Simulation von 10 Umdrehungen von Zahnrad 2. Alle Simulationen wurden auf einem Rechner mit 12 CPUs durchgeführt, mit Ausnahme von SPH-Code 2, der auf einem Grafikprozessor (GPU) läuft. Im Durchschnitt sind die Durchlaufzeiten bei partikelbasierten Codes niedriger als bei Finite-Volumen-Codes, was vor allem an der verkürzten Preprocessing-Zeit durch den Wegfall der Netzgenerierung liegt. Ein Vergleich der Rechenzeiten zeigt, dass partikelbasierte Codes im Schnitt schneller als FV-Codes sind, die Rechenzeiten von Code zu Code aber stark variieren. PreonLab zeigt mit einer Gesamtdurchlaufzeit von 8 Stunden die beste Performance.

Tab. 1: Durchlaufzeiten verschiedener Tools

	Methode	Preprocessing	Berechnung
AVL FIRE™	FV	5.5 h	180.0 h
PreonLab	SPH	2.0 h	6.0 h
LBM Code	LBM	4.0 h	138.0 h
SPH Code 2 (GPU)	SPH	2.0 h	200.0 h

### 3.4 Vergleich der Drehmomentverluste

Der letzte Vergleich dieses Fallbeispiels stellt die hydrodynamischen Verluste der verschiedenen Codes gegenüber. Es wurden die Drehmomentverluste aller Zahnräder verglichen, was in Abb.4 ersichtlich ist. Für diesen Vergleich wurden FIRE™ Resultate als Referenz verwendet. Sowohl Druckverluste als auch Verluste durch Scherkräfte wurden berücksichtigt. Die Ergebnisse unterscheiden sich stark, so neigen SPH-basierte Codes dazu, Ergebnisse mit höherem Drehmomentverlust zu produzieren als FV-Codes. LBM-Codes sagen Ergebnisse mit geringen Verlusten voraus.

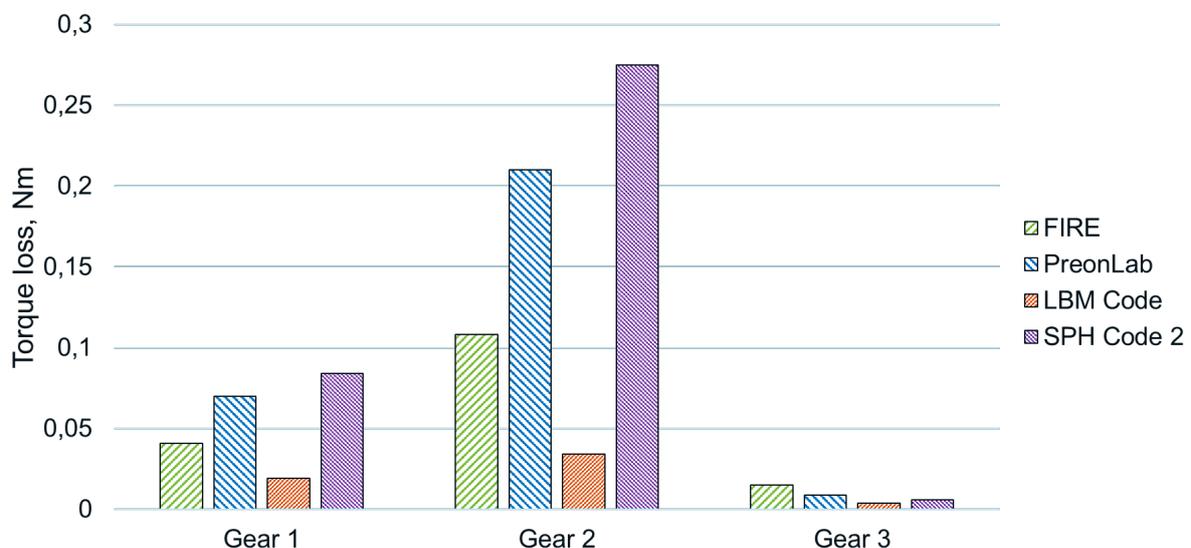


Abb. 4: Ergebnisse Drehmomentverlust

### 3.5 Oil distribution results

Abb. 5 - Abb. 8 zeigen die Ölverteilungen im Getriebe für jeden der verglichenen Codes. Die Ölverteilung wurde nach zwei Umdrehungen von Zahnrad 2 verglichen. Wie aus den Bildern ersichtlich ist, können wichtige Effekte wie Ölspritzer am oberen Ende des Gehäuses nach links und rechts von allen Codes erfasst werden. Mehrphasen-Effekte wie eingeschlossene Luftbläschen im Öl können im Regelfall von partikelbasierten Codes nicht erfasst werden, während Finite-Volumen-Codes dazu in der Lage sind.

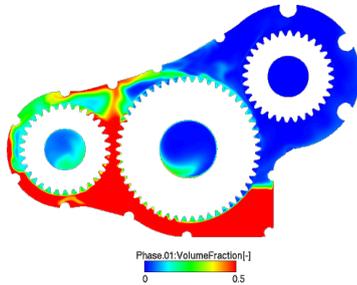


Abb. 5: AVL FIRE™ Ergebnisse @ 720°

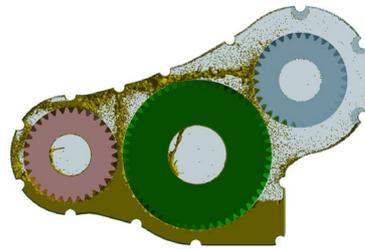


Abb. 6: PreonLab Ergebnisse @ 720°

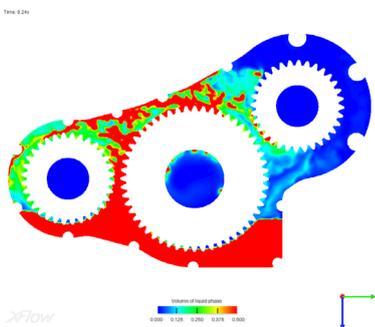


Abb. 7: LBM Code Ergebnisse @ 720°

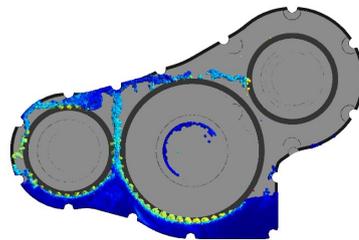


Abb. 8: SPH Code 2 Ergebnisse @ 720°

## 4 Fallbeispiel B: Planetengetriebe

### 4.1 Einführung

Das zweite Fallbeispiel – welches mit dem partikelbasierten Code PreonLab berechnet wurde – beschäftigt sich mit einem Planetengetriebe (dargestellt in Abb. 9) aus einer Windkraftanlage [8], in welchen das Getriebe dazu eingesetzt wird, die Drehzahl des langsam drehenden Rotors (16 U/min) auf die gewünschte Drehzahl des schnell drehenden Generators mit 1600 U/min zu übersetzen. Da die Ausfallzeit einer solchen Anlage oft mit Getriebeproblemen zusammenhängt und das Getriebe ca. 40 % des Gesamtpreises ausmacht, ist eine verlässliche Simulation von großer Wichtigkeit. Aus diesem Grund ist ein SPH-Code gut für derartige Anwendungen geeignet.

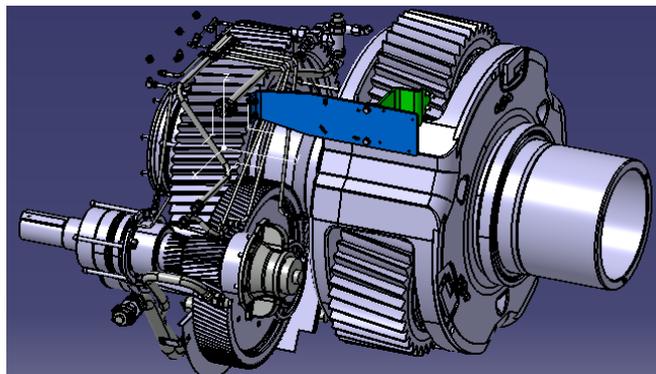


Abb. 9: Geometrie des Planetengetriebes

Folgende Untersuchungen standen im Fokus dieses Fallbeispiels:

1. Simulation der Ölverteilung in der gesamten Geometrie wie in Abb. 10 dargestellt: Ziel dieser Simulation ist es, das Ölschwappen im Getriebe zu analysieren, wobei Öfüllstand und Betriebsbedingungen gegeben sind. Weiters soll sichergestellt werden, dass alle Komponenten ausreichend mit Öl versorgt werden.
2. Die Versorgung der einzelnen Ölverteilerleitungen wie in Abb. 11 dargestellt. Ziel ist es, das Öl, welches durch die sieben Versorgungsleitungen bei einem gegebenen Einlassstrom bei Rohr 4 fließt, zu analysieren. Die sieben Leitungen versorgen verschiedene Wellen sowie den Eingriffsbereich der Zahnräder mit Öl.

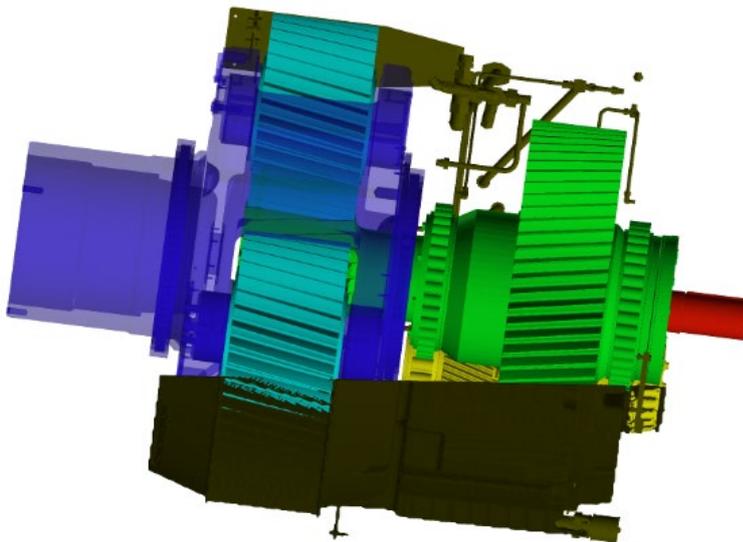


Abb. 10: Berechnungsgebiet

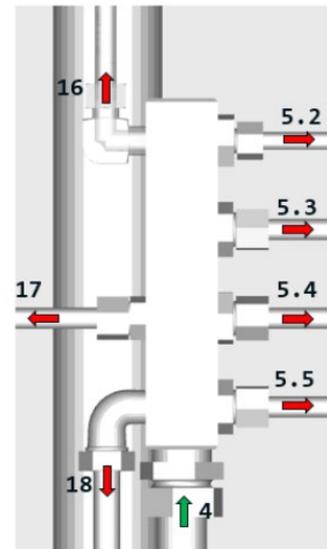


Abb. 11: Berechnungsgebiet für Fall 2

Da das untersuchte Getriebe etwa 2 m lang ist und die Versorgungsleitungen nur etwa einen Durchmesser von 1 cm haben, wurden Simulationen mit unterschiedlichen Partikelgrößen, 2 mm und 5 mm, durchgeführt.

#### 4.2 Berechnungsfall 1 – Ölverteilung im Getriebe

Die in Berechnungsfall 1 verwendeten Simulationseinstellungen finden sich in Tab. 2.

Tab. 2: Simulationseinstellungen Fall 1

Eigenschaft	Wert
Dichte	900 kg/m <sup>3</sup>
Dynamische Viskosität	0.0224 Pa·s
Partikelgröße	5 mm
Simulationszeit	15 s

Die Zahnräder werden am Beginn der Simulation aus Stabilitätsgründen gleichmäßig beschleunigt, anstatt mit voller Geschwindigkeit zu starten. Diese Rampe ist in Abb. 12 ersichtlich. In den ersten 0,5 Sekunden setzt sich der initiale Ölspiegel, es gibt keine Bewegung der Zahnräder. Danach werden die Komponenten beschleunigt, bis sie ihre nominelle Drehzahl nach einer Sekunde erreicht haben. Über die gesamte Simulationszeit vollendet die langsamere Welle vier Umdrehungen und die schnellere 400 Umdrehungen.

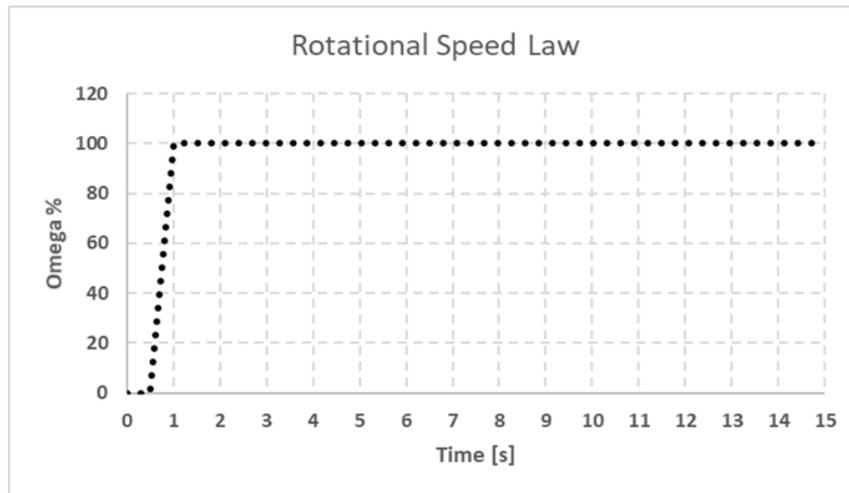


Abb. 12: Drehzahlrampe

Abb. 13 und Abb. 14 zeigen beispielhafte Ergebnisse für die Ölverteilung und Benetzung der einzelnen Bauteile. Wie Abb. 14 zeigt, gibt es Bereiche, die nicht von Öl benetzt werden. In diesem Fall stellt das jedoch kein Problem dar, da diese Zonen mittels der Ölleitungen versorgt werden, was in dieser Simulation nicht berücksichtigt wurde.

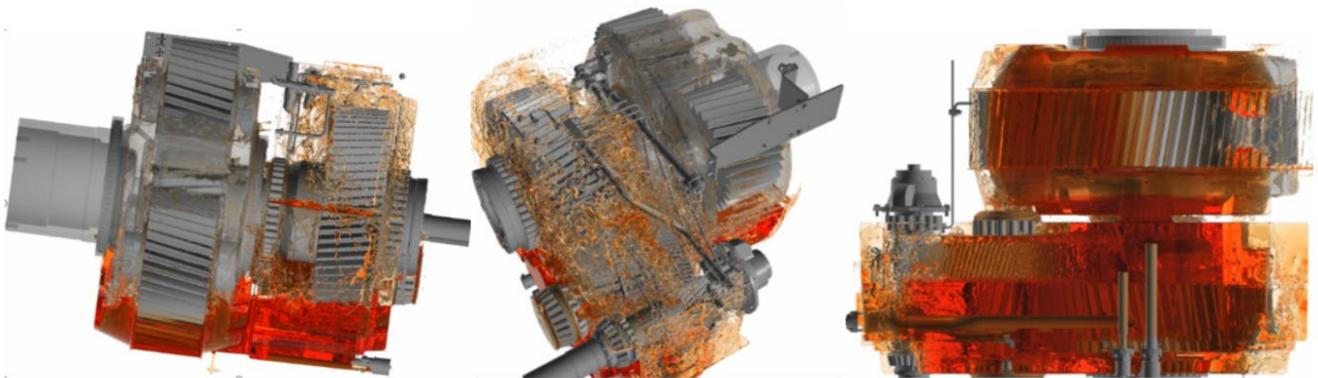


Abb. 13: Ergebnisse Ölverteilung



Abb. 14: Ergebnisse Benetzung

Abb. 15 zeigt Ölsammler und Ölkanäle, welche die Lager der Planetenräder versorgen. In diesen Bereichen sind Sensoren angebracht, um den Durchfluss zu messen, was in Abb. 16 ersichtlich ist. Die Kurven zeigen periodisches Verhalten und eine fast identische Durchflussrate durch beide Ölsammler.

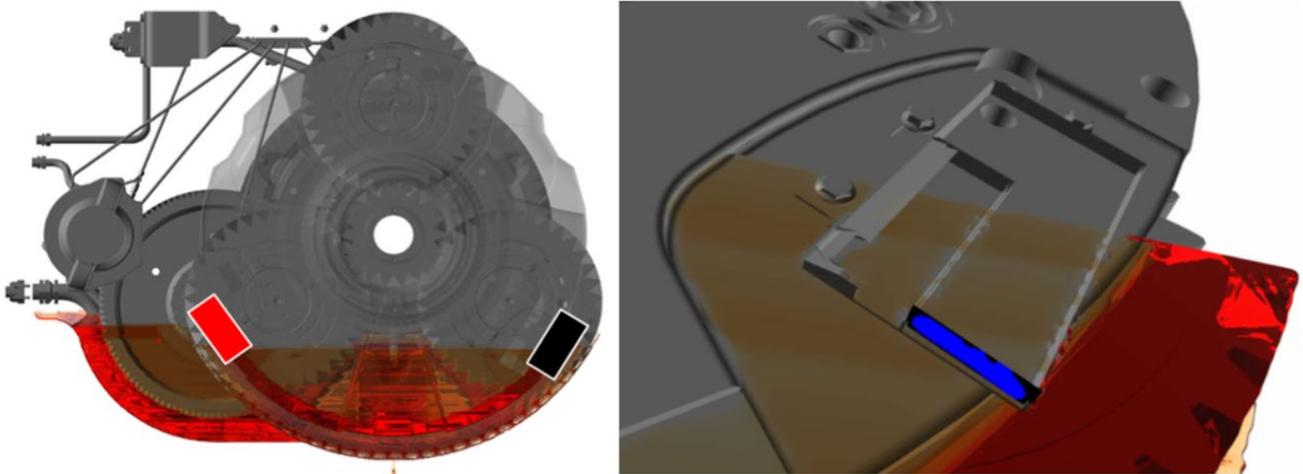


Abb. 15: Lage der Ölsammler

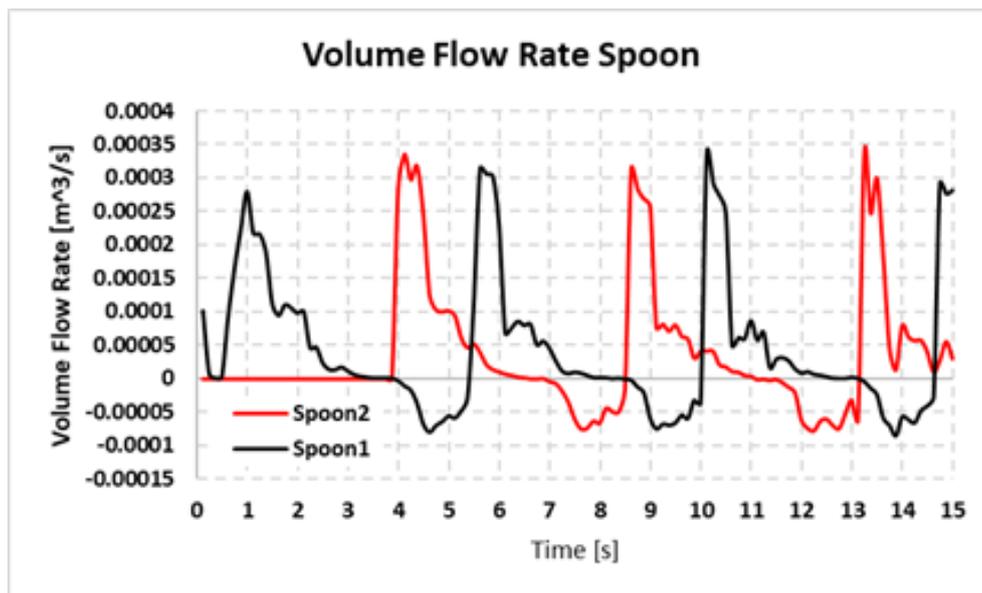


Abb. 16: Durchfluss durch die Ölsammler

Die Durchlaufzeiten dieser Simulation sind in Tab. 3 ersichtlich. Berücksichtigt sind die Zeiten, die notwendig sind, um die Kinematik zu definieren, die Simulation aufzusetzen die Berechnung durchzuführen. Es wurde ein Rechner mit 16 CPUs verwendet. Eine gute Skalierung der Simulationsgeschwindigkeit wurde bei Rechnern mit einer größeren Anzahl an CPUs beobachtet.

Tab. 3: Durchlaufzeiten Berechnungsfall 1

Schritt	Zeit, h
Preprocessing	2.0
Simulationszeit (7,5 s)	144.0
Gesamt	146.0

### 4.3 Berechnungsfall 2 – Ölverteiler

Im zweiten Berechnungsfall soll untersucht werden, wieviel Öl durch die einzelnen Leitungen im Ölverteiler (Abb. 17) transportiert wird. Der Verteiler hat eine Zuflussleitung und mehrere Versorgungsleitungen, die die verschiedenen Lager und Zahnräder im Getriebe mit Öl versorgen.

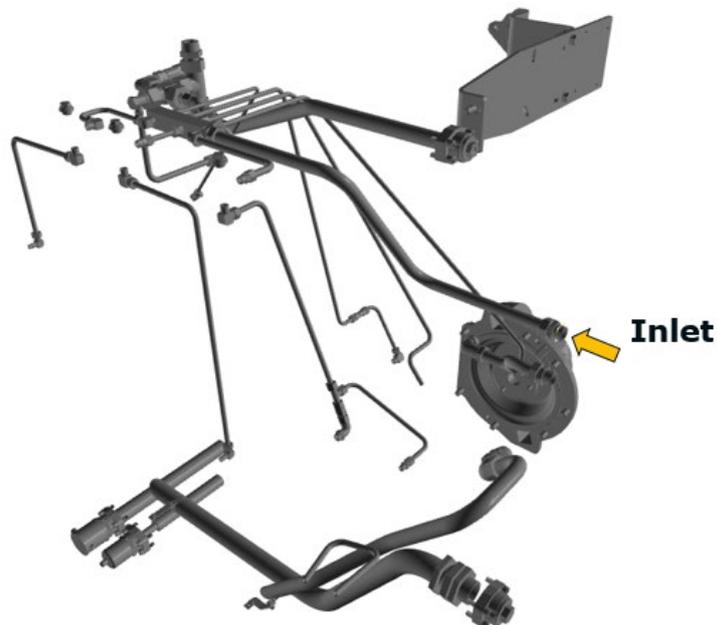


Abb. 17: Ölversorgungsleitungen

Die Simulationseinstellungen für Berechnungsfall 2 sind in Tab. 4 ersichtlich:

Tab. 4 – Simulationseinstellungen für Berechnungsfall 2

<b>Eigenschaft</b>	<b>Wert</b>
Dichte	903 kg/m <sup>3</sup>
Dynamische Viskosität	0.0226 Pa·s
Partikelgröße	2 mm
Simulationszeit	4.6 s

Für die Strömungsuntersuchung in den Leitungen wurde eine kleinere Partikelgröße von 2 mm gewählt, wobei berücksichtigt wurde, dass der kleinste Radius in den Leitungen 1 cm beträgt und ausreichend Partikel in diesem kleinsten Querschnitt Platz finden sollen. Um die Ergebnisse zu analysieren, wurden Durchflusssensoren im System angebracht. Die prozentuelle Verteilung des Ölvolumenstroms ist in Abb. 18 dargestellt.

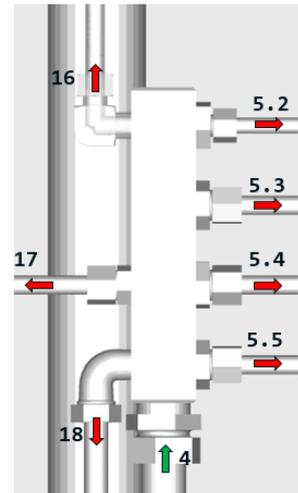
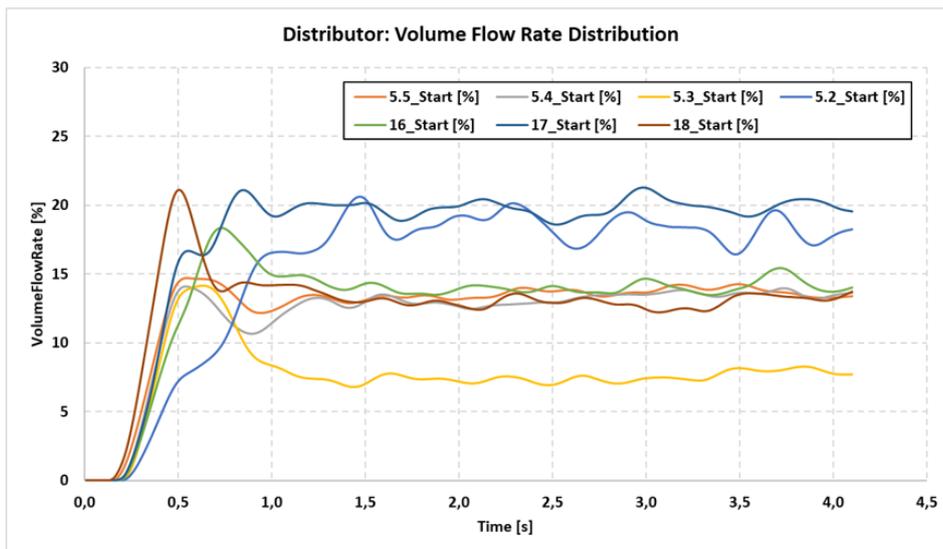


Abb. 18: Volumenstromverteilung

Die Durchlaufzeiten dieser Simulation sind in Tab. 3 ersichtlich. Berücksichtigt sind die Zeiten, die notwendig sind, um die Kinematik zu definieren, die Simulation aufzusetzen und die Berechnung durchzuführen. Wie für Fall 1, wurde ein Rechner mit 16 CPUs verwendet.

Tab. 5: Durchlaufzeiten Berechnungsfall 2

Schritt	Zeit, h
Preprocessing	2.0
Simulationszeit (4.8 s)	67.0
Gesamtzeit	69.0

## 5 Fazit

Im Rahmen dieser Abhandlung wurden Simulationen von Getrieben mittels klassischer CFD- sowie partikelbasierter SPH-Methoden durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass SPH-Codes Vorteile im Hinblick auf die Durchlaufzeiten haben, was sie zu einer attraktiven Lösung für Getriebeanwendungen macht. Mit Codes wie PreonLab können derartige Simulationen effizient und in einem Bruchteil der Zeit, die andere SPH- und FV-Codes benötigen, durchgeführt werden. Auch komplexe Geometrien wie Planeten- und Fahrzeuggetriebe können innerhalb eines Tages aufgesetzt werden, was einen wesentlich geringeren Zeitaufwand als bei FV-Codes bedeutet.

Der Vorteil von FV-Codes ist deren Genauigkeit, da die Simulationsergebnisse in der Regel näher an Messergebnissen liegen als die Ergebnisse partikelbasierter Codes. Des Weiteren erlauben sie neben der Bewertung von Verlusten und Ölverteilung auch einen detaillierten Einblick in das temperaturabhängige Verhalten des Öls. FV-Codes eignen sich gut für die späte Entwicklungsphase sowie für Analysen nach Produktionsbeginn von Getrieben.

Partikelbasierte Codes sind sehr gut für frühe Design-Phasen geeignet, in denen noch kein Prototyp gebaut wurde, da es möglich ist, sehr schnell verschiedene Geometrievarianten zu simulieren und zu entscheiden, welches Design das Beste ist. FV-Codes können anschließend ergänzend dazu eingesetzt werden, Feinabstimmungen vorzunehmen und präzisere Daten zum Verlust des Drehmoments zu erhalten. Zusammenfassend ergänzen sich beide Simulationsansätze und sollten in verschiedenen Stufen der Entwicklungsphase angewendet werden.

## 6 Literatur

- [1] AVL List GmbH, „AVL FIRE M User Manual,“ 2018.
- [2] C. W. Hirt and B. D. Nichols, „Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries,“ *Journal of Computational Physics* 39, p. 201–225, 1981.
- [3] M. Ihmsen, J. Orthmann, B. Solenthaler, A. Kolb and M. Teschner, „SPH Fluids in Computer Graphics,“ *Eurographics 2014 - State of the Art Reports*, pp. 21-42, 2014.
- [4] E. Krause, Fluid Mechanics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [5] J. H. Ferziger and M. Peric, Numerische Strömungsmechanik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [6] FIFTY2 Technology GmbH, PreonLab 3.1.2 Manual, 2018.
- [7] W. Baier and G. Maier, „Investigations with CFD and Particle Based Code In Transmission Development for Efficiency and Oil Distribution,“ *AVL International Simulation Conference*, 2017.
- [8] F. Testa, „Guidelines for Transmission Simulation Using Both Traditional FVM and new SPH Approaches,“ *International CAE Conference*, 2018.

# Integrierte Systemsimulation einer Fräsmaschine

Reinhard Helfrich, Bertold Kirchgäßner, Gerhard Nötzel-Steidle

INTES GmbH, Stuttgart

Das dynamische Systemverhalten ist für die Entwicklung von Werkzeugmaschinen wesentlich. Die Genauigkeit der Bewegung von Werkstücken und Werkzeugen ist absolut entscheidend für die erreichbare Genauigkeit der bearbeiteten Werkstücke. Schnelle Positionierungen mit geringer Schwingungsneigung und große Schnitttiefen ohne Rattern sind gleichermaßen wichtig.

Das System Werkzeugmaschine besteht aus Strukturteilen, Antrieben der verschiedenen Achsen, deren Regelung und rotierenden Spindeln. Hohe Beschleunigungen der Strukturteile und die Interaktion von Werkstück und Werkzeug verursachen Schwingungen der Maschine, die durch alle Systemkomponenten ausreichend gedämpft werden müssen. Am Ende muss die Maschine den Anforderungen an Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit genügen, wie sie auch durch hohe Geschwindigkeit bei gleichzeitig großen Schnitttiefen beschrieben werden.

Die Methode der Finiten Elemente (FEM oder FE-Methode) ist eine Standardmethode zur numerischen Schwingungsberechnung in vielen Anwendungsgebieten. Daher liegt es nahe, diese Methode auch für Werkzeugmaschinen einzusetzen. Allerdings muss das reine Strukturmodell einer Werkzeugmaschine durch Antriebskomponenten und Antriebsregelung in geeigneter Weise ergänzt werden. Dann können alle bekannten Berechnungsarten wie reelle und komplexe Eigenwertanalyse, Frequenzganganalyse und transiente Analyse zur Berechnung einer Werkzeugmaschine herangezogen werden. Darüber hinaus sind neuere Berechnungsverfahren erforderlich, um die Stabilität des Fräsprozesses numerisch zu erfassen und Rattern vorherzusagen.

Schließlich spielt auch die Gewichtsoptimierung bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen eine wichtige Rolle. Dabei muss das Schwingungsverhalten der Maschine die gewünschten Eigenschaften einhalten. Dabei kann eine Topologie-Optimierung zur Gewichtsoptimierung oder eine Optimierung der Regelparameter zur Schwingungsoptimierung eingesetzt werden.

Im Folgenden dient ein einfaches Modell einer Fräsmaschine zur Demonstration der verschiedenen Berechnungs- und Optimierungsmethoden.

## 1 Einführung

In der langen Geschichte der Werkzeugmaschinen lag der Schwerpunkt immer auf der schnellstmöglichen Produktion hochgenauer Teile. Die Genauigkeit wird durch Maschinenschwingungen beeinflusst, die zum einen aus schnellen Bewegungen der Maschine und zum anderen aus den Werkzeugeingriffen in das Werkstück resultieren. Gleichzeitig versucht man, das Gesamtgewicht der Maschine aus Kostengründen zu reduzieren, was allerdings die Schwingungsanfälligkeit erhöht.

Die numerische Schwingungsanalyse ist eine Standardaufgabe der FEM in der Strukturberechnung. Dazu ist es allerdings erforderlich, dass das Modell einer Werkzeugmaschine neben der Struktur selbst auch andere Bestandteile abbildet:

- **Antriebskomponenten:** Für alle Achsen der Maschine müssen Führungsschienen, Kugelgewindetriebe, Elektromotoren und Übersetzungsverhältnisse zusätzlich modelliert werden. Das geschieht im Wesentlichen mit Hilfe von Balken-, Feder- und Dämpferelementen sowie geeigneten linearen Zwangsbedingungen (d.s. MPC).
- **Antriebsregelung:** Die Kombination aus Sensor, Aktuator und Steuerelektronik wird als Regler betrachtet. Diese werden als spezielle finite Elemente bereitgestellt. Dabei haben lineare Regler den Vorteil, dass sie direkt mit den klassischen dynamischen Berechnungsmethoden wie

Eigenwertberechnung oder Frequenzganganalyse verwendet werden können. Dagegen können nichtlineare Regler nur im Zeitbereich Verwendung finden.

- **Fräsprozess:** Die Interaktion zwischen Fräser und Werkstück beeinflusst wesentlich die Stabilität des Prozesses. Ein geeignetes Kraftmodell muss zur Verfügung stehen, um die Stabilität des Prozesses in der Zeit sicherzustellen.

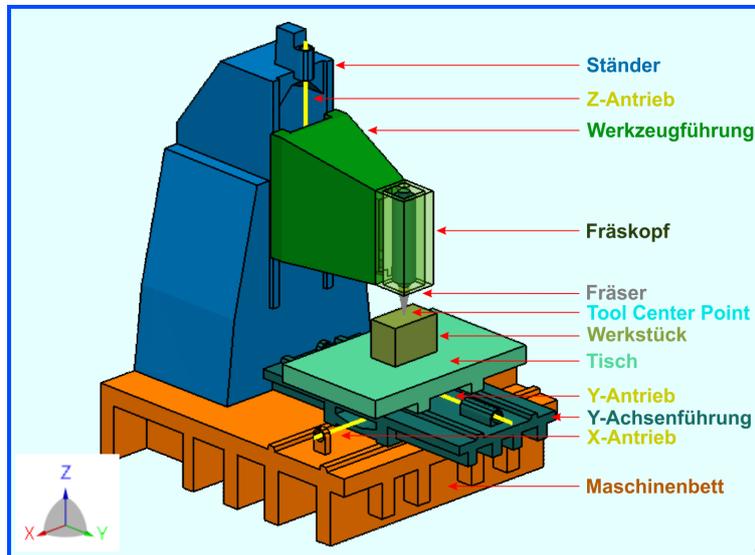


Abb. 1: Modell einer Fräsmaschine

Für das FE-Modell einer Werkzeugmaschine existieren zwei grundsätzlich verschiedene Betrachtungsweisen:

- **Blick auf den Maschinenentwurf:** Hier steht das dynamische Verhalten der Maschine im Vordergrund. Zu diesem Zweck ist es unverzichtbar, alle relevanten Maschinenkomponenten einschließlich einer bekannten Antriebsregelung ins FE-Modell aufzunehmen.
- **Blick auf den Reglerentwurf:** Hier wird für eine bestehende Maschine der geeignete Regler gesucht, der das dynamische Verhalten wunschgemäß beeinflusst. Dazu wird die Maschine oft mit dynamischen Reduktionsverfahren kondensiert, um die elastischen Eigenschaften beim Reglerentwurf zur Verfügung zu haben.

Im Folgenden konzentrieren wir uns auf den Maschinenentwurf und nutzen die FEM zur dynamischen Systemsimulation. Frühere Arbeiten auf diesem Gebiet sind u.a. in [1], [2] und [3] dokumentiert und in [4], [5], [6], [7] und [8] veröffentlicht worden.

Zur Demonstration der verwendeten Methoden wird das Modell einer einfachen Fräsmaschine verwendet. Das Modell und seine Komponenten werden in Abb. 1 gezeigt. Danach werden die Modellierung und die Wirkung von Reglern in FE-Modellen beschrieben, gefolgt vom dynamischen Maschinenverhalten im Frequenz- und Zeitbereich. Insgesamt kommen hier drei Regler für die beiden Bewegungsachsen des Werkstücks (X,Y) und die Bewegungsachse des Werkzeugs (Z) zum Einsatz. Anschließend wird die Erstellung einer Stabilitätskarte und die Ermittlung von Ratter-Frequenzen vorgestellt. Nachfolgend wird der Einsatz der Optimierung für zwei Fälle beschrieben, die Optimierung von Regelparametern bei einer Analyse im Zeitbereich und die Topologie-Optimierung im Frequenzbereich.

## 2 Modell einer Fräsmaschine

Das Modell enthält die folgenden typischen Komponenten:

- **Strukturkomponenten:** Das Maschinenbett, die Antriebe von X-, Y- und Z-Achse, der Fräskopf und der Maschinenständer sind mit Volumenelementen modelliert (siehe Abb. 1).
- **Führungsschienen:** Diese sind zwar mit Volumenelementen modelliert, aber die Verbindung zwischen den Schienen sind über lineare Feder-Dämpfer-Kombinationen realisiert (siehe Abb. 2, 3 und 4 für X-, Y- und Z-Achse)

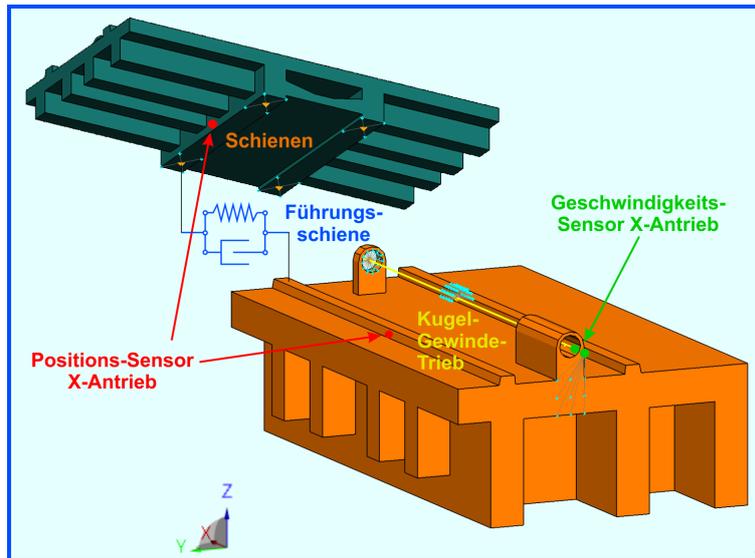


Abb. 2: Konfiguration des Antriebs der X-Achse mit Sensoren und Führungsschienen

- **Kugelgewindetriebe:** Diese werden durch Balkenelemente abgebildet (siehe Abb. 2, 3 und 4). Ihre Funktion ist es, die Translationsbewegung eines Schlittens durch eine Rotationsbewegung des Kugelgewindetriebs zu erreichen. Dies kann durch eine lineare Zwangsbedingung zwischen Rotation und Translation erreicht werden. Durchmesser und Steigung des Gewindes sind dabei entscheidend.

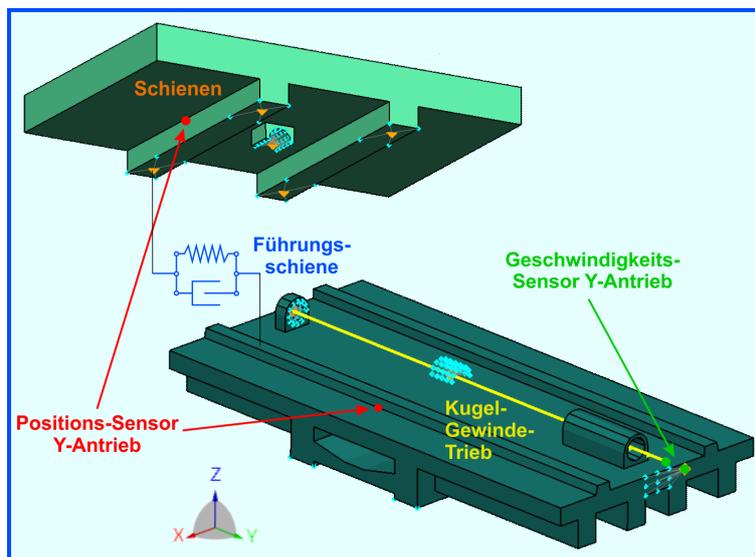


Abb. 3: Konfiguration des Antriebs der Y-Achse mit Sensoren und Führungsschienen

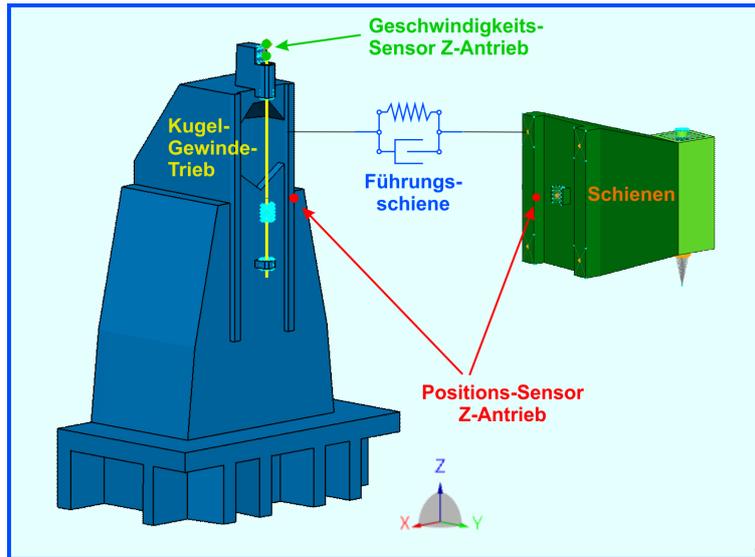


Abb. 4: Konfiguration des Antriebs der Z-Achse mit Sensoren und Führungsschienen

- Hauptspindel und Fräskopf:** Die Spindel wird oft ebenfalls mit Volumenelementen modelliert. Allerdings kann die Lagerung auch mit speziellen Elementen so ausgeführt werden, dass ihre Steifigkeit und Dämpfung von der Drehzahl der Spindel abhängen.

Zusätzliche Teile könnten noch integriert werden, wurden aber aus Vereinfachungsgründen weggelassen (wie die Elektromotoren). Das Maschinenbett ist mit Federn und Dämpfern flexibel gegen Grund gelagert. Die Masse beträgt 8.345 kg.

### 3 Antriebsregelung

Spezielle Elemente stehen für die Modellierung von Reglern zur Verfügung, wie der Kaskadenregler, dessen Blockdiagramm in Abb. 5 dargestellt ist. Dieser Regler umfasst einen Positions- und Geschwindigkeitsregler neben einigen Filtern und einer Stromregelung. Er ist für die typischen Regelungserfordernisse einer Werkzeugmaschine entwickelt worden und basiert auf der Erfahrung von Herstellern.

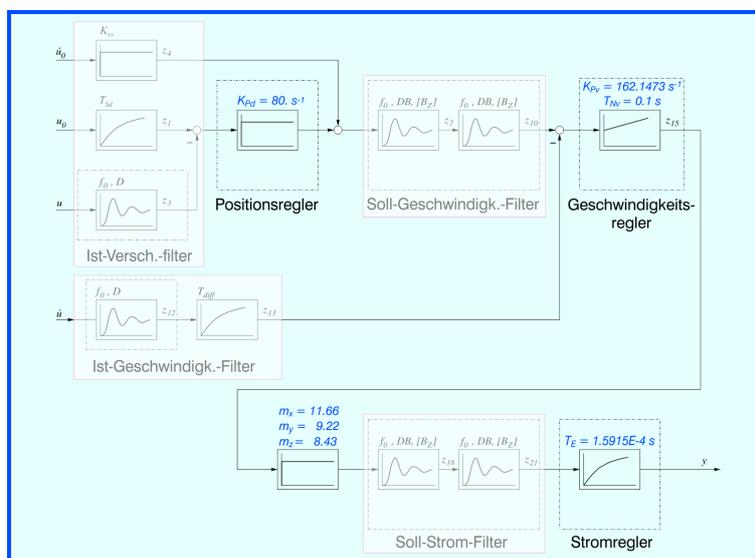


Abb. 5: Blockdiagramm des Kaskadenreglers CONTRL8

Ein solcher Regler führt auf ein System linearer Differentialgleichungen, welches direkt in die lineare Schwingungsberechnung mit der FEM eingebunden werden kann. Das so entstandene CONTRL8-Element erlaubt die Auswahl der benötigten Regler-Komponenten und die Vorgabe der Parameter dieser Komponenten. (siehe Abb. 5).

Die Wahl der Parameter sollte die Eigenschaften des realen Reglers einer Werkzeugmaschine möglichst gut wiedergeben. Das erfordert ausreichende Angaben aus der Regler-Entwicklung. Dann kann der Berechnungsingenieur die Maschinenentwicklung mit realitätsnahen Simulationen begleiten.

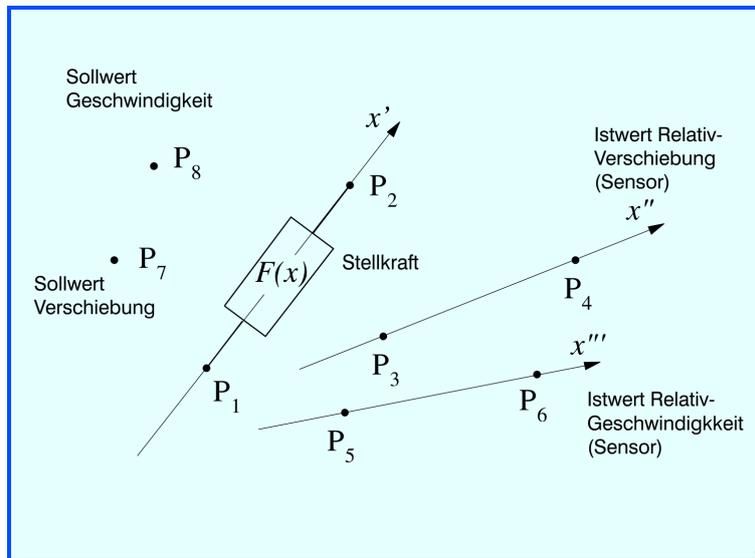


Abb. 6: FE-Modell des Reglerelements CONTRL8

Die Darstellung des Kaskadenreglers als finites Element ist in Abb. 6 gezeigt, wo die 8 Knoten des Elements folgende Bedeutung haben:

- Knoten 1 und 2: Dazwischen wirkt die Kraft des Aktuators.
- Knoten 3 und 4: Der Sensor erfasst die Relativverschiebung zwischen diesen Knoten.
- Knoten 5 und 6: Der Sensor erfasst die Relativgeschwindigkeit z.B. als Drehgeschwindigkeit an den Kugelgewindespindeln (siehe Abb. 2, 3, 4).
- Knoten 7: Zur Vorgabe eines Sollwerts für die Verschiebung (siehe weiter unten).
- Knoten 8: Zur Vorgabe eines Sollwerts für die Geschwindigkeit (wenn erforderlich).

Mit der Verfügbarkeit solcher Regler-Elemente kann eine integrierte und voll gekoppelte FE-Simulation durchgeführt werden.

Im Beispielmmodell werden drei Regler verwendet, einer für die Bewegung entlang der Spindelachse (Z-Achse) und zwei für die Bewegung des Werkstücks (X- und Y-Achse). Die Parameter aller drei Regler sind die gleichen mit Ausnahme des Parameters  $m$  für den Stromregler aufgrund der jeweils unterschiedlichen bewegten Massen.

Die Lage der Sensorknoten ist aus Abb. 2, 3, 4 ersichtlich. Zwei Sensorknoten sind nötig, um eine relative Verschiebung oder relative Geschwindigkeit abzugreifen. Jeweils ein Knoten befindet sich dabei auf dem Bett und ein weiterer auf dem Schlitten.

#### 4 Reelle Eigenformen und Frequenzganganalyse

Ein wichtiger Vorteil der Integration von Reglern in das FE-Modell einer Werkzeugmaschine liegt in der direkten Anwendbarkeit modaler Simulationsmethoden wie der Frequenzganganalyse. Dabei ist hier vor allem die Übertragungsfunktion zwischen dem Werkzeugmittelpunkt (oder Tool Center Point TCP) und dem Werkstück von Interesse. Beide Knoten haben dieselben Koordinaten, sind aber nicht gekoppelt. Abb. 7 und 8 zeigen die Frequenzgänge für eine Anregung am TCP in X-Richtung ohne und mit aktivem Regler. Genauso zeigen Abb. 9 und 10 die Frequenzgänge für eine Anregung am TCP in Y-Richtung ohne und mit aktivem Regler.

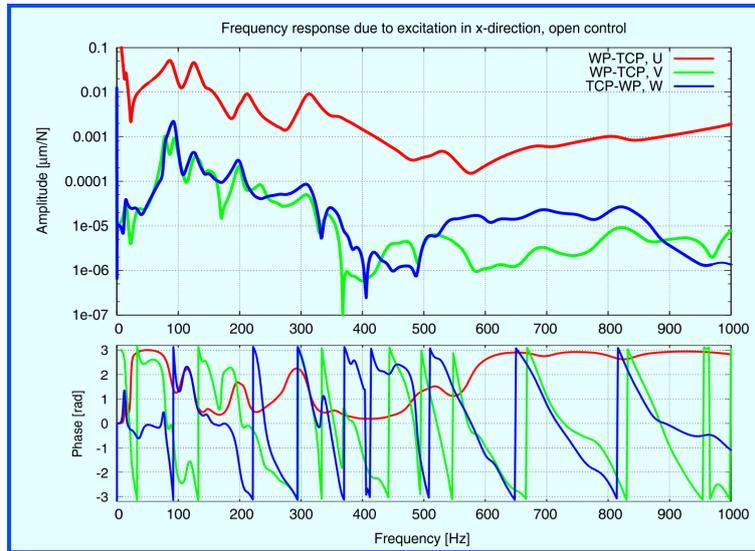


Abb. 7: Frequenzgang bei einer Anregung am TCP in X-Richtung ohne aktiven Regler

Die modale Basis der Simulation ist für die Analysen mit aktivem und nicht aktivem Regler gleich. Die 268 Moden bis 2500 Hz wurden berechnet. Die ersten zehn Eigenfrequenzen zeigt Tab. 1.

Nr. des Modes	Eigenfrequenz [Hz]
1	14.12
2	16.03
3	23.09
4	32.36
5	34.59
6	35.85
7	78.25
8	88.30
9	93.80
10	124.66

Tab. 1: Die ersten 10 Eigenfrequenzen der Maschine

Die ersten sechs Moden betreffen die Lagerung der Maschine gegen Grund. Elastische Moden der Maschine selbst treten ab der siebten Mode auf. Ein einheitliches modales Dämpfungsverhältnis von 0.03 wurde verwendet.

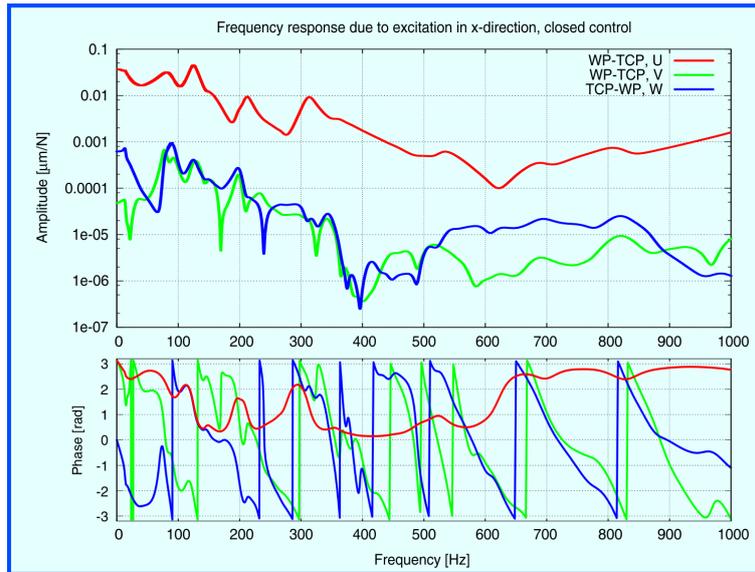


Abb. 8: Frequenzgang bei einer Anregung am TCP in X-Richtung mit aktivem Regler

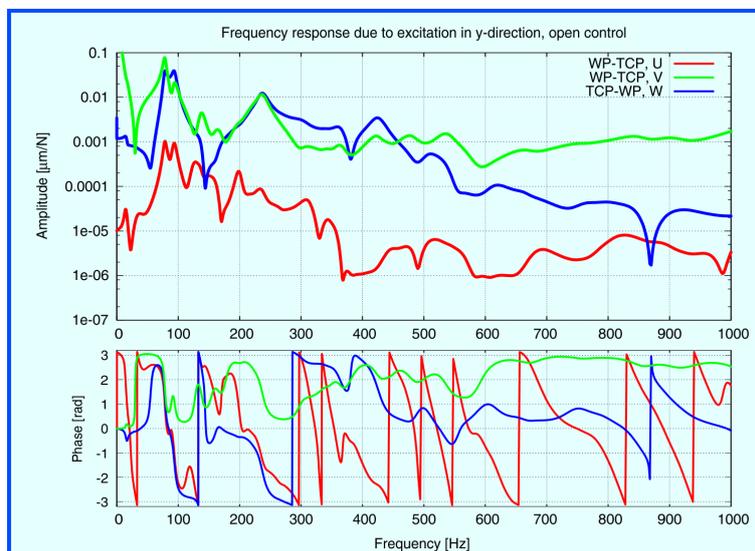


Abb. 9: Frequenzgang bei einer Anregung am TCP in Y-Richtung ohne aktiven Regler

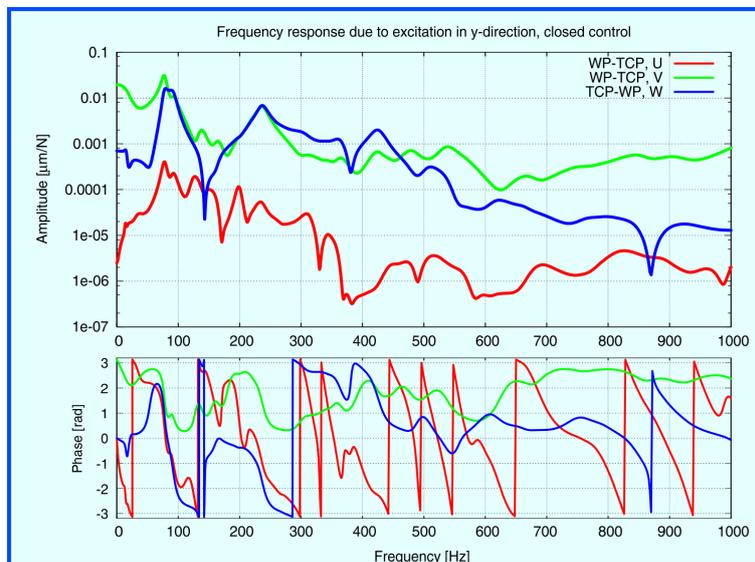


Abb. 10: Frequenzgang bei einer Anregung am TCP in Y-Richtung mit aktivem Regler

Die Berechnung des dynamischen Antwortverhaltens auf der Basis von Schwingungsmoden wird üblicherweise mit einer begrenzten Anzahl von Moden durchgeführt. Die vernachlässigten Moden könnten einen wichtigen Einfluss auf das Schwingungsverhalten haben. Deshalb werden üblicherweise zusätzliche statische Verschiebungsmoden verwendet, um das Schwingungsverhalten vor allem im niederen Frequenzbereich korrekt abzubilden. Geeignete statische Zusatzmoden werden z.B. aus den Elementkräften von Feder-, Dämpfer- und Regler-Elementen abgeleitet. Auf diese Weise werden die statischen Deformationen dieser Elemente im Modalraum berücksichtigt, obwohl die zugehörigen Eigenfrequenzen durch den ausgewählten Modalraum gar nicht erfasst sind. Das modale Dämpfungsverhältnis dieser Moden wird mit 1.0 angesetzt.

Vergleicht man das Antwortverhalten zwischen offenem und geschlossenem Regelkreis, so erkennen wir eine Verschiebung der ersten Antwortspitzen zu niederen Frequenzen, was der versteifenden Wirkung des Reglers zuzuschreiben ist. Eine komplexe Eigenwertanalyse kann die Eigenfrequenzen und Schwingungsformen auch mit der Dämpfungswirkung ermitteln. Für eine Spindelgeschwindigkeit von 3000 U/min sind die äquivalenten Dämpfungsraten der reellen Moden 7 bis 10 in Tab. 2 zusammengestellt.

Nr. des komplexen Modes	Frequenz [Hz]	Äquivalentes Dämpfungsverhältnis
83	77.43	0.054
85	84.77	0.152
87	91.77	0.071
89	124.86	0.059

Tab. 2: Dämpfungswirkung des Reglers für die reellen Moden 7 bis 10

Abb. 11 zeigt die Eigenschwingungsform des komplexen Modes bei 84.77 Hz im Vergleich zu der reellen Eigenschwingungsform bei 88.30 Hz.

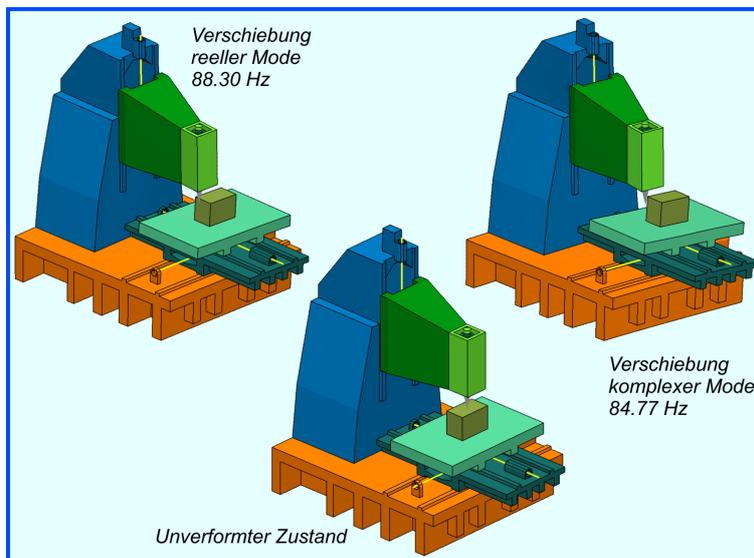


Abb. 11: Vergleich des reellen Modes bei 88.30 Hz und des komplexen Modes bei 84.77 Hz

Weil die Spindel rotiert, sollte auch die Wirkung der Rotation untersucht werden. In diesem Falle ist der Rotoreffekt zu vernachlässigen, wie das Campbell-Diagramm in Abb. 12 zeigt.

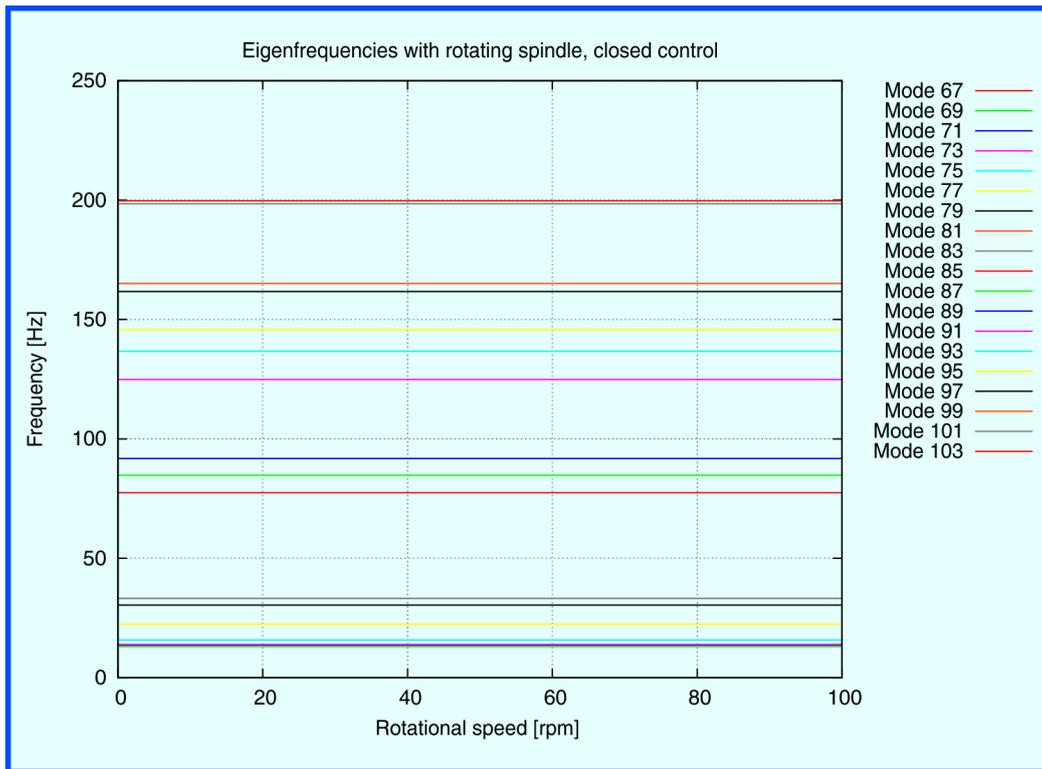


Abb. 12: Campbell-Diagramm

## 5 Transiente Analyse

Zur Beurteilung der Regelungsqualität ist z.B. eine Positionsänderung des Werkstücks im Zeitbereich hilfreich. Dabei lassen sich zwei Arten der Positionsänderung unterscheiden:

- Eine sprunghafte Positionsänderung in X-Richtung wie in Abb. 13 bei einer Spindelgeschwindigkeit von 3000 U/min gezeigt.
- Eine kontinuierliche Positionsänderung ohne Sprung über eine Sinusfunktion in X-Richtung wie in Abb. 14 bei einer Spindelgeschwindigkeit von 3000 U/min gezeigt.

Die Positionswerte für das Werkstück werden am Sensor abgelesen. Die Positionswerte des TCP sind vom Werkzeugmittelpunkt abgegriffen. Die Differenz ist klein und stammt von der Elastizität zwischen Sensor und TCP. Die anderen Achsen zeigen bei gleicher Erregungsrichtung kleinere überschießende Amplituden als die X-Richtung.

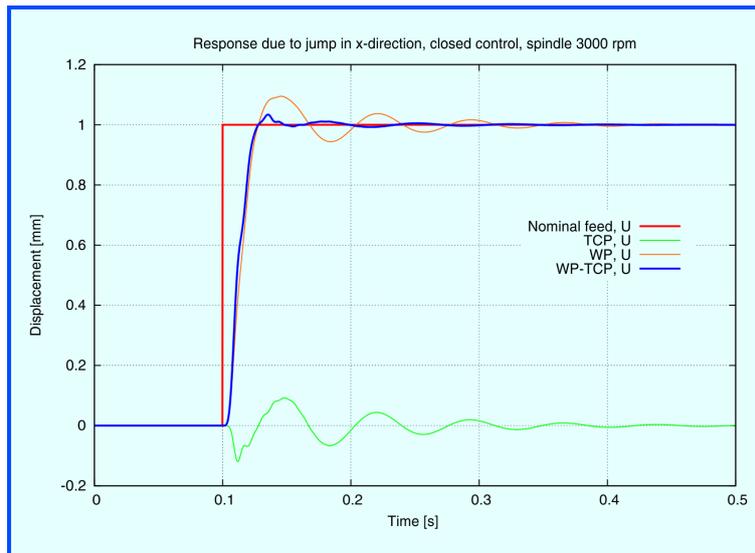


Abb. 13: Abrupter Positionssprung des Tisches in X-Richtung

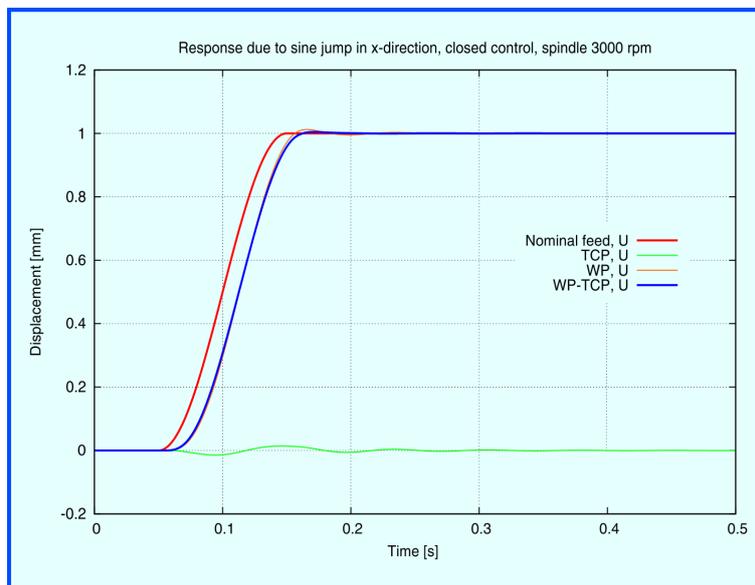


Abb. 14: Sinusförmige Positionsänderung in X-Richtung

Zusätzlich wird ein Kreisformtest durchgeführt, bei dem vom TCP eine Kreisbahn nachgefahren wird (siehe Abb. 15). Die Bewegung beginnt aus der Ruhe mit Ruckbegrenzung bis zum Erreichen einer Endgeschwindigkeit von 10 m/s.

## 6 Stabilität beim Werkzeugeingriff

Bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen ist für den Hersteller die Vorhersage von Instabilitäten von größter Wichtigkeit. Das Ziel ist, dass die Maschine mit hoher Genauigkeit bei hoher Geschwindigkeit stabil arbeitet. Die Quelle von Instabilitäten ist dabei der Werkzeugeingriff, wo die Energie für selbsterregte Schwingungen aus der Spindeldrehung und der Tischbewegung kommt.

Um diesen nichtlinearen Prozess mit einem FE-Modell zu berechnen, wurde ein Schnittkraftmodell entwickelt, das durch ein nichtlineares Kraftelement realisiert ist. Auf diese Weise kann eine modale oder direkte

Berechnung im Zeitbereich das Antwortverhalten ermitteln. Das Schnittkraftmodell hängt von der Schnitttiefe und dem Vorschub pro Umdrehung der Spindel ab. Es erfordert eine Reihe von Koeffizienten, welche die Interaktion von Werkzeug und Werkstück beschreiben. Das Schnittkraftmodell basiert auf den Arbeiten von Kienzle & Victor (siehe [9] und [10]).

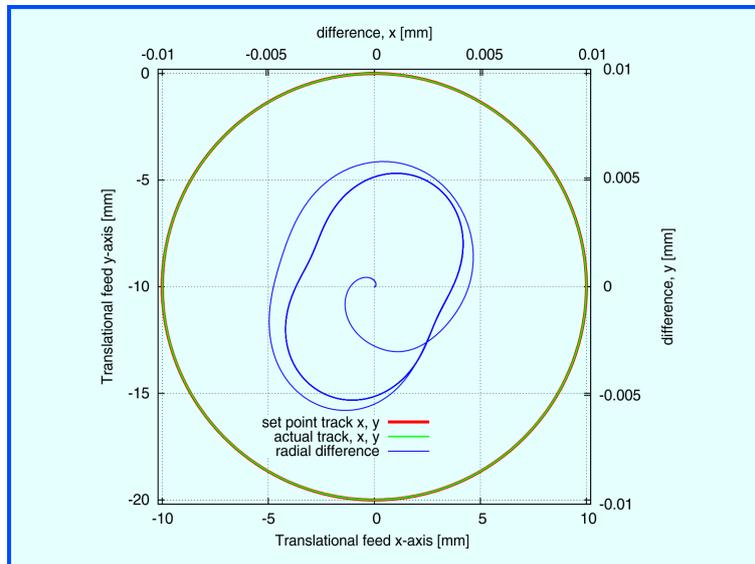


Abb. 15: Kreisformtest mit Radius 10 mm

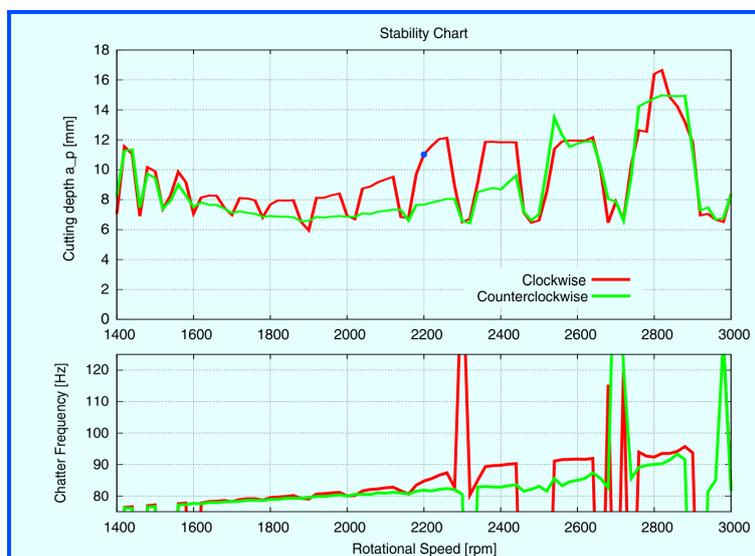


Abb. 16: Stabilitätskarte und Ratterfrequenzen

Wenn die angeregten Schwingungen nicht ausreichend gedämpft sind, kann sich bei einer bestimmten Drehgeschwindigkeit der Spindel eine Instabilität einstellen. Durch das Abfahren des Parameterfeldes für verschiedene Schnitttiefen und Drehgeschwindigkeiten erhält man eine Stabilitätskarte wie in Abb. 16. Dabei wurde der Fräsvorgang als Stirnfräsen einer Vollnut angesetzt. Während die Stabilitätskarte verschiedene Schnitttiefen und Drehgeschwindigkeiten umfasst, bleibt der Vorschub pro Umdrehung konstant (bei 0.72 mm/U). In der Stabilitätskarte liegt der stabile Bereich jeweils unter den abgebildeten Kurven, der instabile Bereich liegt darüber.

Ein wichtiger Effekt der Spindeldrehung ist die Abhängigkeit der Stabilität von der Drehrichtung. Aus Abb. 16 kann man ablesen, dass hier für die Rechtsdrehung höhere Schnitttiefen stabil zu erreichen sind als bei Linksdrehung.

Instabilitäten machen sich durch Rattern bemerkbar, die der Maschinenführer auch hören kann. Wie die Vorhersage der Ratterfrequenzen zeigt, liegen diese meist zwischen 70 und 100 Hz, was auch im Hörbereich des menschlichen Ohrs liegt (siehe Abb. 16). In einigen Fällen werden auch höhere Frequenzen erreicht.

Um ein Beispiel für stabiles und instabiles Verhalten zu zeigen, wählen wir einen Betriebspunkt, der auf der Stabilitätskurve des Rechtslaufs liegt (siehe den blauen Punkt in Abb. 16):

- Schnitttiefe 11.025 mm
- Drehgeschwindigkeit 2200 U/min

Abb. 17 zeigt die Kräfte am TCP beim stabilen Rechtslauf und Abb. 18 die Kräfte für den instabilen Linkslauf.

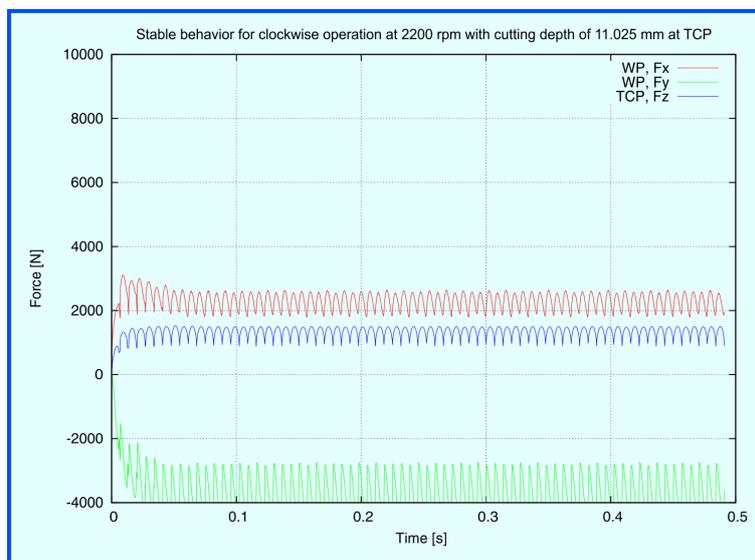


Abb. 17: Stabiles Verhalten bei Rechtsdrehung mit 2200 U/min

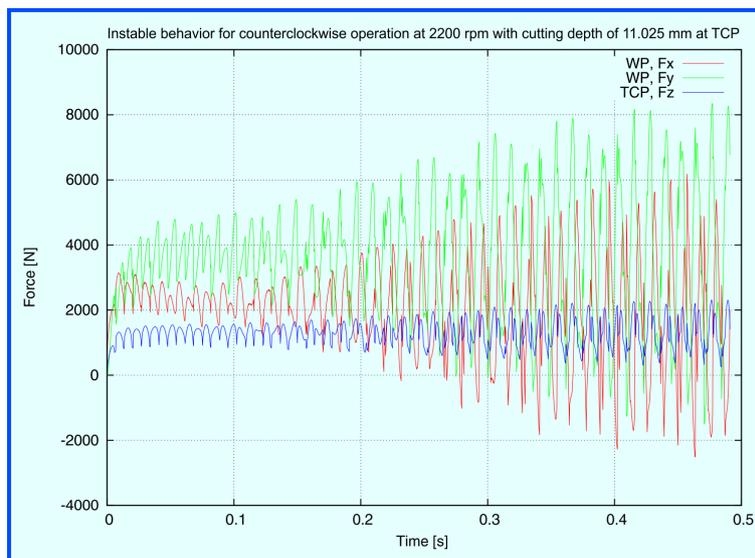


Abb. 18: Instabiles Verhalten bei Linksdrehung mit 2200 U/min

## 7 Optimierungsstrategie

Für die Optimierung von Werkzeugmaschinen gibt es mehrere Motivationen, u.a.

- Für ein besseres Schwingungsverhalten kann eine Optimierung der Regelparameter der drei Regler durchgeführt werden (siehe Abb. 5).
- Der Leichtbau von Werkzeugmaschinen erfordert innovative Formgebungen z.B. durch Topologie-Optimierung. Im Folgenden wird die Topologie von Tisch und X-Achse optimiert.

Die Auswahl der Lastfälle für die Optimierung wurde der Übersichtlichkeit wegen auf folgende Fälle beschränkt:

- Der Positionssprung, wie er in Abb. 13 dargestellt ist. Das führt auf eine Parameteroptimierung mit einer modalen Schwingungsanalyse im Zeitbereich.
- Der Frequenzgang, wie er in Abb. 8 und 10 gezeigt wird. Das führt auf eine Frequenzganganalyse mit Topologie-Optimierung.

Will man beide Optimierungsansätze kombinieren, so ergibt sich die Frage der Reihenfolge:

- Kombiniert man die Optimierung der Regelparameter und die Topologie-Optimierung im Frequenzbereich, dann erfüllt das Ergebnis nicht die Anforderungen aus dem Positionssprung.
- Die optimierten Regelparameter auf der Basis des Positionssprungs zeigen auch Verbesserungen im Frequenzgang.

Deswegen wird folgendes Verfahren ausgewählt:

- Optimierung der Regelparameter beim Positionssprung.
- Dann die Topologie-Optimierung im Frequenzbereich mit den optimierten Regelparametern.
- Die Optimierung der Regelparameter beim Positionssprung wird nochmals mit der geänderten Topologie durchgeführt.
- Abschließend wird nochmals eine Frequenzganganalyse mit den zuletzt optimierten Regelparametern durchgeführt.

### 8 Erste Optimierung der Regelparameter

Die Berechnung des Positionssprungs erfolgt mit einer modalen Schwingungsanalyse im Zeitbereich zwischen 0. und 0.2 s (siehe Abb. 13). Die Zielfunktion ist die Differenz zwischen dem Positionssprung und der Antwort der Maschine, wobei der Sprung zur Zeit 0.1 s erfolgt.

Regler	Parameter	Anfangswert	Optimierter Wert
X	$K_{Pd}$	$80 \text{ s}^{-1}$	$76.70 \text{ s}^{-1}$
	$K_{Pv}$	$162.1473 \text{ s}^{-1}$	$166.8293 \text{ s}^{-1}$
	$m_x$	11.66	12.47
	$T_E$	$1.5914\text{E-}4 \text{ s}$	$6.2778\text{E-}4 \text{ s}$
Y	$K_{Pd}$	$80 \text{ s}^{-1}$	$73.97 \text{ s}^{-1}$
	$K_{Pv}$	$162.1473 \text{ s}^{-1}$	$166.5899 \text{ s}^{-1}$
	$m_y$	9.22	9.80
	$T_E$	$1.5914\text{E-}4 \text{ s}$	$7.5000\text{E-}4 \text{ s}$
Z	$K_{Pd}$	$80 \text{ s}^{-1}$	$78.47 \text{ s}^{-1}$
	$K_{Pv}$	$162.1473 \text{ s}^{-1}$	$165.3772 \text{ s}^{-1}$
	$m_z$	8.43	8.82
	$T_E$	$1.5914\text{E-}4 \text{ s}$	$7.5000\text{E-}4 \text{ s}$

Tab. 3: Regelparameter zu Anfang und nach der Optimierung

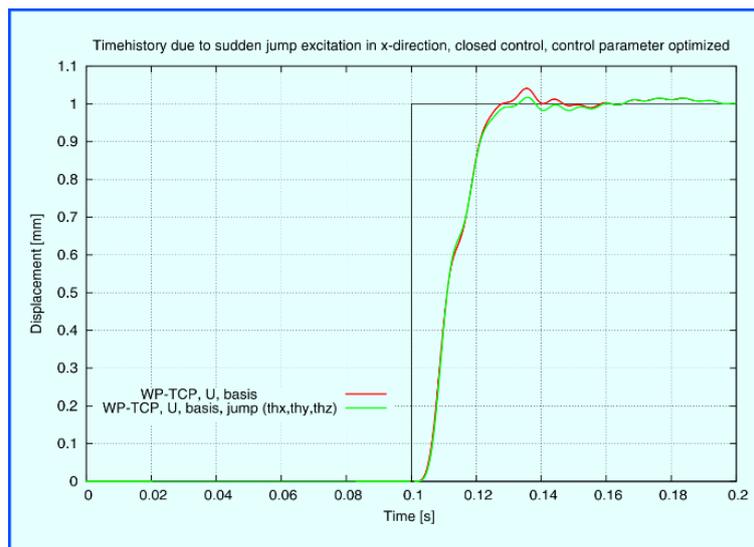


Abb. 19: Antwort auf einen Positionssprung in X-Richtung vor (rot) und nach (grün) der Parameteroptimierung

Von der Schwingungsantwort auf den Positionssprung sieht man, dass zwei Phasen wichtig sind: Zum einen sollte die Reaktion auf den Sprung möglichst schnell erfolgen, andererseits sollten die Überschwinger möglichst gering bleiben. Beide Ziele stehen etwas im Widerspruch. Eine kürzere Reaktionszeit wird die Überschwinger eher vergrößern, während eine längere Reaktionszeit kaum Überschwinger zulässt. Deshalb hält man die Reaktionszeit etwa gleich und konzentriert die Optimierung der Regelparameter auf die Überschwinger. Die sich ergebenden Regelparameter vor und nach der Optimierung sind in Tab. 3 zusammengestellt und Abb. 19 und 20 vergleicht das Antwortverhalten in X- und Y-Richtung vor und nach der Optimierung.

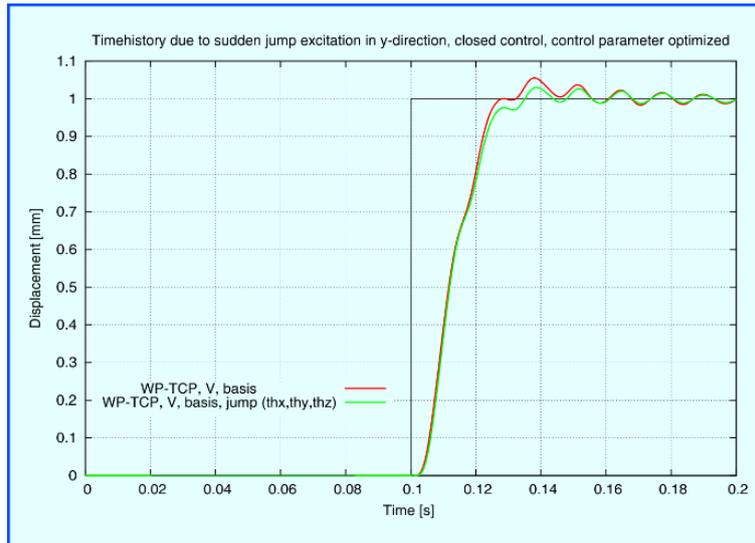


Abb. 20: Antwort auf einen Positionssprung in Y-Richtung vor (rot) und nach (grün) der Parameteroptimierung

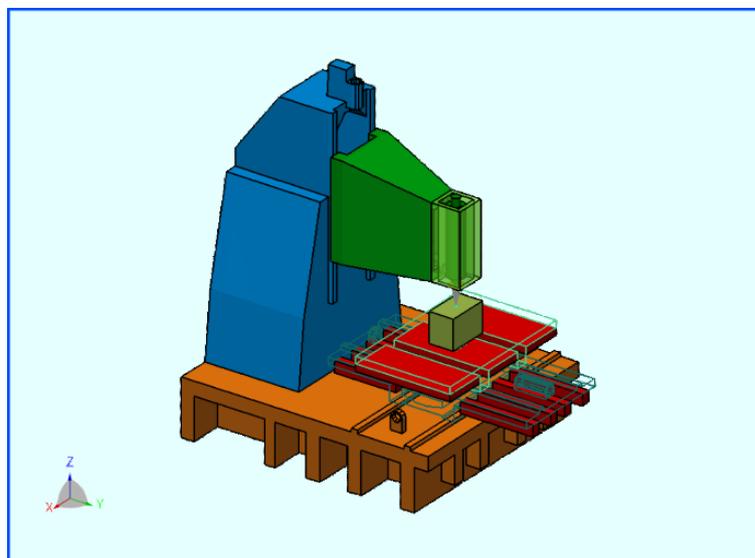


Abb. 21: Entwurfsbereich für die Topologie-Optimierung

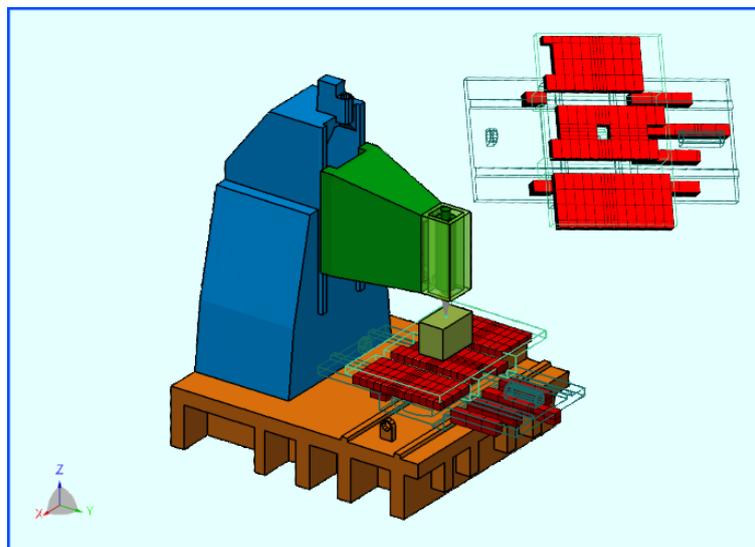


Abb. 22: Verbleibende Elemente nach der Topologie-Optimierung mit den zuvor optimierten Regelparametern

### 9 Topologie-Optimierung im Frequenzbereich

Teile von Tisch und X-Achse werden als Entwurfsbereich definiert (siehe Abb. 21), der von der Topologie-Optimierung verändert werden darf. Die ermittelten Regelparameter aus der vorherigen Optimierung des Positionssprungs werden verwendet (siehe Tab. 3). Das Ergebnis der Topologie-Optimierung ist in Abb. 22 gezeigt. Durch die Topologie-Optimierung kann das Gewicht der Teile um 115 kg reduziert werden, bei einem Ausgangsgewicht von 1251 kg (siehe den Gewichtsverlauf über die Iterationen der Optimierung in Abb. 23).

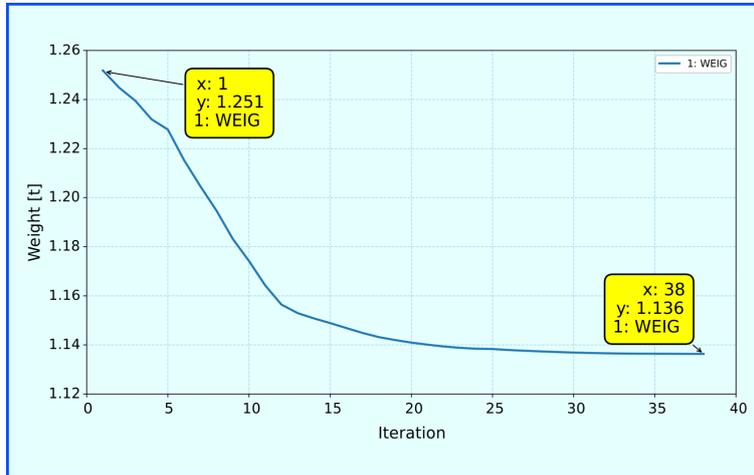


Abb. 23: Gewichtsverlauf während der Topologie-Optimierung

### 10 Zweite Optimierung der Regelparameter

Mit der geänderten Topologie und dem dadurch veränderten Gewicht werden nochmals die Regelparameter im Positionssprung optimiert. Tab. 4 zeigt die Veränderungen der Regelparameter bei beiden Optimierungen und Abb. 24 und 25 zeigen die Veränderungen in der Schwingungsantwort.

Regler	Parameter	Anfangswert	Erste Optimierung	Zweite Optimierung
X	K <sub>Pd</sub>	80 s <sup>-1</sup>	76.70 s <sup>-1</sup>	77.85 s <sup>-1</sup>
	K <sub>Pv</sub>	162.1473 s <sup>-1</sup>	166.8293 s <sup>-1</sup>	166.3304 s <sup>-1</sup>
	m <sub>x</sub>	11.66	12.47	12.40
	T <sub>E</sub>	1.5914E-4 s	6.2778E-4 s	7.0070E-4 s
Y	K <sub>Pd</sub>	80 s <sup>-1</sup>	73.97 s <sup>-1</sup>	60.79 s <sup>-1</sup>
	K <sub>Pv</sub>	162.1473 s <sup>-1</sup>	166.5899 s <sup>-1</sup>	158.3734 s <sup>-1</sup>
	m <sub>y</sub>	9.22	9.80	8.56
	T <sub>E</sub>	1.5914E-4 s	7.5000E-4 s	7.5000E-4 s
Z	K <sub>Pd</sub>	80 s <sup>-1</sup>	78.47 s <sup>-1</sup>	78.67 s <sup>-1</sup>
	K <sub>Pv</sub>	162.1473 s <sup>-1</sup>	165.3772 s <sup>-1</sup>	165.774 s <sup>-1</sup>
	m <sub>z</sub>	8.43	8.82	8.86
	T <sub>E</sub>	1.5914E-4 s	7.5000E-4 s	7.5000E-4 s

Tab. 4: Regelparameter zu Anfang und nach der ersten und zweiten Optimierung

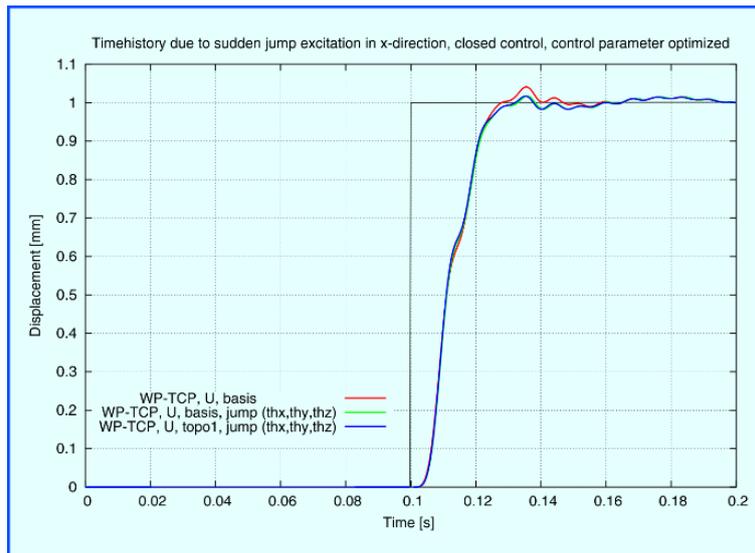


Abb. 24: Antwort auf einen Positionssprung in X-Richtung vor (rot), nach der ersten (grün) und nach der zweiten (blau) Parameteroptimierung

Mit diesen Regelparametern wurde nochmals der Frequenzgang ermittelt, so dass Abb. 26 und 27 die Amplituden des Abstands zwischen Werkstück und TCP für das Ausgangsmodell und für die erste und zweite Regler-Optimierung zeigen.

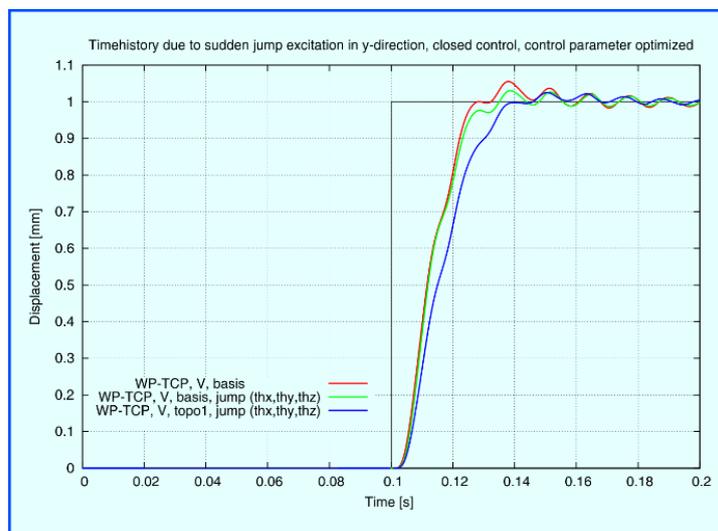


Abb. 25: Antwort auf einen Positionssprung in Y-Richtung vor (rot), nach der ersten (grün) und nach der zweiten (blau) Parameteroptimierung

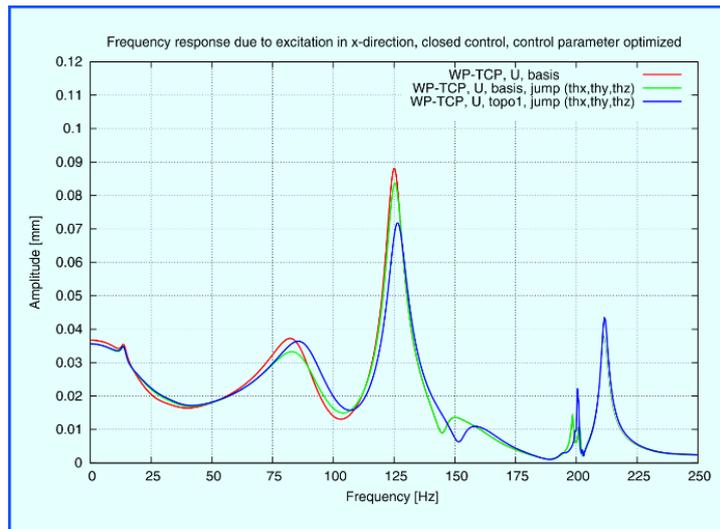


Abb. 26: Vergleich der Frequenzgänge in X-Richtung vor (rot), nach der ersten (grün) und nach der zweiten (blau) Parameteroptimierung

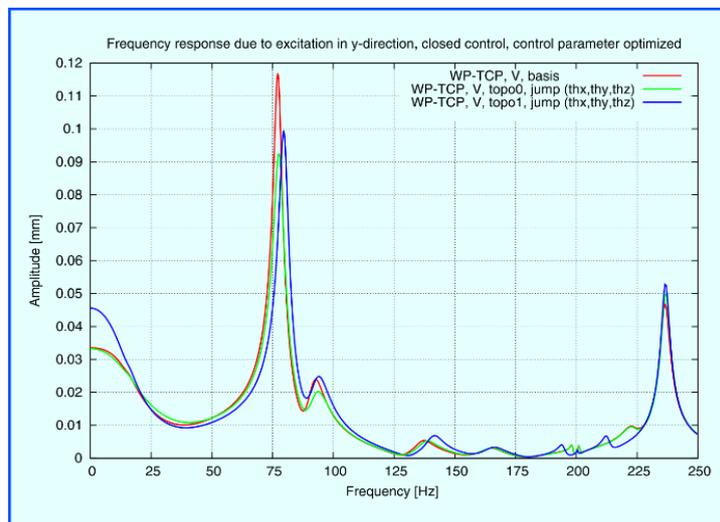


Abb. 27: Vergleich der Frequenzgänge in Y-Richtung vor (rot), nach der ersten (grün) und nach der zweiten (blau) Parameteroptimierung

## 11 Zusammenfassung

Die Berechnung von Werkzeugmaschinen kann in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- Ohne Werkzeugeingriff: Dabei stehen die Bewegungen der Teile zueinander und die dadurch verursachten Schwingungen im Mittelpunkt.
- Mit Werkzeugeingriff: Damit können Stabilitätskarten ermittelt werden.

In beiden Kategorien spielen die Regler eine wichtige Rolle. Typische Analysemethoden sind die Ermittlung reeller und komplexer Moden und des Schwingungsverhaltens im Zeit- und Frequenzbereich. Rotordynamische Effekte der Spindeln können ebenfalls berücksichtigt werden. Ebenso können statische Verschiebungsmoden in die modale Basis einbezogen werden. Modale Verfahren haben gegenüber direkten Verfahren den Vorteil günstigerer Laufzeiten bei der Berechnung.

Für die Verbesserung des Schwingungsverhaltens und für Leichtbaufragestellungen stehen darüber hinaus auch Optimierungsmethoden zur Verfügung, u.a.:

- Optimierung der Regelparameter, um ein bestimmtes Schwingungsverhalten zu erreichen.
- Topologie-Optimierung von Strukturteilen der Maschine, um Gewicht zu sparen. Die dadurch erhöhte Schwingungsneigung muss durch die Optimierung eingegrenzt werden.

Insgesamt spielt es für die Berechnung von Werkzeugmaschinen eine wichtige Rolle, dass Schwingungsberechnung, Regler und Optimierung in einer Analyse-Software zur Verfügung stehen. So sind alle erforderlichen Eigenschaften in einem Modell vorhanden und bieten Übersichtlichkeit und eine einfache Anwendung.

Alle hier dargestellten Berechnungsergebnisse wurden mit PERMAS ermittelt, das alle erforderlichen Komponenten enthält, um mit einem Modell alle genannten Berechnungen durchzuführen (siehe [1], [2] und [3]).

## 12 Literatur

- [1] PERMAS Version 17: Users' Reference Manual, INTES Publication No. 450, Stuttgart, 2018.
- [2] PERMAS Version 17: Examples Manual, INTES Publication No. 550, Stuttgart, 2018.
- [3] PERMAS Short Description Version 17, INTES, Stuttgart, 2018, [https://www.intes.de/kategorie\\_support/download/shortdescription](https://www.intes.de/kategorie_support/download/shortdescription)
- [4] B. Kirchgäßner, A. Schünemann, R. Helfrich: Optimizing the Dynamic System Behaviour of Machine Tools, Proceedings NAFEMS World Congress 2019, Quebec 17-20 June 2019.
- [5] B. Kirchgäßner, A. Schünemann, R. Helfrich: Integrated System Simulation of Machine Tools, Proceedings NAFEMS Seminar: Bessere Produkte mit Modellbasiertem Systems Engineering (MBSE) und CAE, Wiesbaden, November 2018.
- [6] B. Kirchgäßner, A. Schünemann, R. Helfrich: Integrated System Simulation of Machine Tools, Proceedings NAFEMS Seminar: The Role of CAE in System Simulation, Wiesbaden, November 2011.
- [7] B. Kirchgäßner, R. Helfrich: Structural Dynamics with Control in PERMAS, Proceedings NAFEMS Seminar Mechatronics in Structural Analysis, Wiesbaden, May 2004.
- [8] J. Berkemer, B. Kirchgäßner: Gekoppelte Simulation von Maschinendynamik und Antriebsregelung - Methode und Anwendung, Proceedings NAFEMS Seminar Mechatronics in Structural Analysis, Wiesbaden, May 2004.
- [9] Kienzle, O: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. VDI-Z 94 (1952), pp. 299-305.
- [10] Kienzle, O, Victor, H.: Spezifische Schnittkräfte bei der Metallbearbeitung. Werkstatttechnik und Maschinenbau 47 (1957) pp. 224-225.

# Finite Elemente basierte Qualitätssicherung in der digitalen Prozesskette von individuell gefertigten Orthopädieprodukten

Franziska Glas

Mecuris GmbH, München, Deutschland

**Erstmalig soll eine digitale Prozesskette zur Erstellung von individualisierten Orthesen und Prothesen etabliert werden, in der Produktsicherheit, Kundenzufriedenheit und geringer Herstellungsaufwand verankert sind. Basierend auf neuen, digitalen Technologien umfassen die Prozessschritte die Erfassung und Digitalisierung der Anwenderdaten, über die 3D-Konstruktion des individuellen Produkts und dessen virtuelle Prüfung, bis zur Produktion mittels additiver Fertigung.**

In der Prüfung der individuellen Produktgeometrien werden validierte, virtuelle Belastungs- und Funktionstests eingesetzt, die auf Finite Elemente Modellen beruhen. Diese anvisierte digital gestützte Hilfsmittelzertifizierung kann dabei richtungsweisend für den Umgang mit aktuellen und zukünftigen regulatorischen Anforderungen sein. Der Vorteil der virtuellen Prüfung basierend auf Simulationsmodellen besteht darin, dass variierende Produktvarianten und Belastungsfälle mit geringem Aufwand betrachtet werden können und die Bewertung der Produktsicherheit ermöglichen. Darüber hinaus kann eine virtuelle Funktionsprüfung die Produktfunktionalität sicherstellen, um eine hohe Anwenderakzeptanz zu erreichen.

**Mithilfe dieser Simulationsmodelle kann eine hohe Produktqualität in Sicherheit und Funktionalität in kürzester Zeit für jeden Anwender garantiert werden.**

## 1 Einleitung

In den USA arbeiten die Food and Drug Administration (FDA), Universitäten und Industrie bereits mit FE-Simulationen, um eine virtuelle Zertifizierung von Medizinprodukten zu verwirklichen (In Silico Versuche) [1,3]. Erstmals soll nun auch in Deutschland für den europäischen regulatorischen Rahmen eine digitale Prozesskette etabliert werden, welche die virtuelle Qualitätssicherung individualisierter Prothesen und Orthesen ermöglicht.

Ein Hauptvorteil der additiven Fertigung (3D-Druck) sind die Freiheiten in der geometrischen Gestaltung und somit auch Individualisierung der Produkte bei konstanten Werkzeugkosten. Allerdings birgt dieser Designspielraum eine große Herausforderung für die Beurteilung der Sicherheit und Funktion dieser individuellen Geometrie. In der Modellierung eines virtuellen Prüfstandes (FE-Simulationsmodell) müssen sich die Belastungs-Randbedingung an individuelle Parameter des Trägers anpassen, damit das individualisierte Produkt sowohl Sicherheitsansprüchen genügt als auch Akzeptanz beim Träger erreicht durch seine funktionellen Eigenschaften.

Im Fokus für die digitale Prozesskette stehen unter anderem die Modellierung und die Validierung eines solchen virtuellen Belastungstests gegenüber dem experimentellen Prüfstand. Für die Zertifizierung (additiv gefertigter) Prothesenfüße wird das Prüfverfahren nach DIN EN ISO 10328 verwendet, um die Sicherheit der Produkte mittels Dauerlast- und Überlasttests zu beurteilen [2]. Die Leistungsfähigkeit der Prothesenfüße während eines dynamischen Gangzyklus kann über die ISO/TS 16955 bewertet werden [4]. Im Gegensatz dazu gibt es im Bereich der Orthesen kein standardisiertes Testverfahren, weshalb dort speziell angefertigte Teststände verwendet werden.

## 2 Hintergrund und Motivation

Hinter der Vision der digitalen Prozesskette für individuelle 3D-gedruckte Hilfsmittel, steckt ein junges Medizintechnik-Unternehmen: Mecuris verbessert die medizinische Versorgung durch eine digitale Werkstatt zur Erstellung von digital maßgeschneiderten und 3D-gedruckte Schienen (Orthesen) und künstlichen Gliedmaßen (Prothesen). Dafür stellt das Unternehmen Sanitätshäusern die Mecuris Solution Plattform (MSP) mit 3D-Designs zur Verfügung. Aus Anwenderdaten wird automatisch die Anatomie erkannt, um ohne 3D-Konstruktionsvorkenntnisse Medizinprodukte digital in Form, Funktion und Design maßzuschneidern und anschließend in einem lokalen 3D-Druckzentrum herzustellen. Dank dieses Ablaufs können erstmalig individuelle Hilfsmittel CE-konform produziert und die Produktivität der Orthopädietechniker erheblich gesteigert werden. Jeder Mensch, der ein orthopädisches Hilfsmittel benötigt, soll dieses speziell an die eigenen Anforderungen, Ansprüche und auch Wünsche angepasst erhalten. Durch das Vereinen verschiedenster 3D-Technologien wird so die Versorgung mit individuellen, 3D-gedruckten Orthesen oder Prothesen in kürzester, manueller Arbeitszeit ermöglicht.

## 3 Aufbau der digitalen Prozesskette für individuelle Prothesen und Orthesen

Um in Anlehnung an europäische Standards und mit Blick auf die MDR (Medical Device Regulation) individuelle Medizinprodukte zu entwickeln, zu testen und zu zertifizieren, wird eine vollständige digitale Prozesskette entworfen. In dieser soll auch die Qualität einer jeden individuell gefertigten Prothese & Orthese gesichert werden durch Produkt- und somit Trägersicherheit, vor allem aber durch die Anpassung der funktionellen Eigenschaften. Die Compliance, die Akzeptanz einer Prothese oder Orthese durch den Träger, ist als wichtigster Parameter zu entnehmen. Das Vertrauen in beispielsweise einen neuen Prothesenfuß entsteht nicht nur durch Stand- und Dauerfestigkeit, sondern auch durch wichtige Funktionsparameter wie die Abrollkurve des Prothesenfußes, die das Laufverhalten ausschlaggebend beschreiben.

So werden verschiedene FE-Modelle aufgebaut, um ein Spektrum an virtuellen Prüfungen in die visionäre Prozesskette integrieren zu können, um schließlich ein jedes Produkt individuell funktional und sicher anpassen zu können.

## 4 Einsatz von Finite Elemente Analysen

Bereits die Entwicklung eines neuen Hilfsmittels wird von FE-Analysen begleitet, um ab dem ersten Entwurf den Ansprüchen eines jeden Trägers gerecht zu werden mit Fokus auf die funktionellen Eigenschaften. Später im Produktentwicklungsprozess werden weitere Simulationsmodelle auch zur Designoptimierung für die ISO-Zertifizierung (sicherheitsbasierter Belastungstest DIN EN ISO 10328) eingesetzt. Der Einsatz von FE-Analysen spart Zeit und Kosten durch die Reduktion von Prototypen oder fehlgeschlagenen Zertifizierungs-Tests. Weiterhin unterstützen FE-Analysen die Beurteilung von Medizinprodukten, z.B. in der Gewährleistung der Sicherheit oder Gebrauchstauglichkeit.

Nicht zuletzt helfen die Simulations- und Designoptimierungsmodelle auch in der finalen digitalen Prozesskette, da basierend auf einem hinterlegten parametrischen 3D-Modell und einer ausführlichen Designstudie die Anforderungen jedes Trägers in ein funktionales und sicheres Design umgesetzt werden können.

Die Eingabeparameter des 3D-Modells gehen aus einer engen Kooperation mit Trägern und Orthopädietechnikern hervor. Sind der gewünschte Anwendungsfall und Parameterkonfiguration bekannt, so können diese in eine Simulationsumgebung (hier ANSYS Workbench) implementiert werden.

Neben diesen biomechanischen Lastbedingungen sind bei der Modellierung auch die spezifischen Materialparameter additiv gefertigter Geometrien zu erforschen, um das Verhalten des Produkts akkurat darstellen zu können. Für ein besseres Verständnis der zahlreichen Komplexitäten einer FE-Analyse ist ein enger Kontakt mit Forschungspartnern und 3D-Druck Dienstleistern Voraussetzung.

## 5 Verifizierung und Validierung der Finite Elemente Modelle

Um FE-Simulationen in die digitale Prozesskette integrieren zu können, sind diese zu verifizieren und zu validieren.

### 5.1 Virtueller Belastungstest von Prothesenfüßen

Ein Projekt zur Validierung der FE-Simulation eines virtuellen Belastungstests nach DIN EN ISO 10328 wurde bereits durchgeführt [2]. Das Projekt brachte Experten aus den Bereichen Biomechanik, Orthopädietechnik, 3D-Druck, Zertifizierung, Validierung und Simulation zusammen mit dem Ziel, individuelle Prothesenfüße digital zu prüfen, bevor diese 3D-gedruckt in kürzester Zeit zur Verfügung gestellt werden können.

Grundlagen stellen die ISO-Norm der Prothetikprüfung (DIN EN ISO 10328 [2]) und das additive Fertigungsverfahren des selektiven Lasersinterns (SLS) mit dem Material PA2200 dar. Das Simulationsmodell wurde als statischer Lastfall mit den Randbedingungen aus der ISO-Norm modelliert (siehe Abbildung 2). Basierend auf Messkurven von Materialproben und der finalen Geometrie wurde das Materialverhalten mit einem Bilinear Isotropic Hardening Modell angenähert und auf Verhalten des Prothesenfußes kalibriert. Für die Messung der Dehnungen während der experimentellen Prüfung wurden Dehnmessstreifen (DMS) auf die 3D-gedruckten Prothesenfüßen appliziert und anschließend in der Simulation mit speziellen Netzverfeinerungen nachgestellt. Die Applikationsstellen wurden durch erste Simulationen und in Absprache der Experten ausgewählt. Sowohl die vorbereitenden als auch die ergebnisbringenden FE-Simulationen wurden mit ANSYS Workbench modelliert. Der Vergleich der Ergebnisdaten für die Validierung erfolgte in MATLAB. Messbare Ergebniswerte waren Kraftkurven der Prüfmaschine, Dehnungskurven der DMS und Vergleichswerte aus der Simulation (Kraft und Dehnung).

Im ersten Schritt wurden die experimentelle und virtuelle Verformung des Prothesenfußes verglichen, um die Ergebnisse des erstellten Simulationstools verifizieren zu können. Für die anschließende Validierung der Dehnungs- und Kraftwerte zwischen experimentellen Prüfaufbau und simulierter Prüfung wurde der Prothesenfuß in verschiedenen Variationen getestet (siehe Abbildung 1). Für die Variationen wurde die Feder aus glasfaserverstärktem Kunststoff (OG) und der Polyurethan Dämpfer (OD) für einzelne Versuche entfernt (vgl. REF und OGOD).

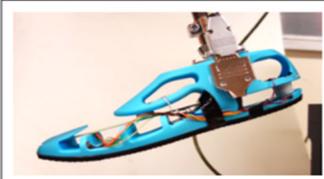
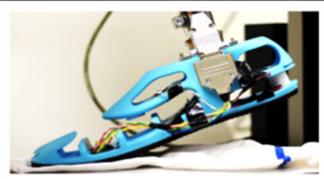
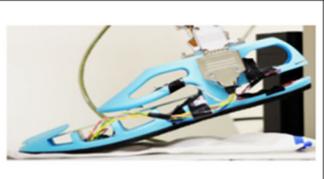
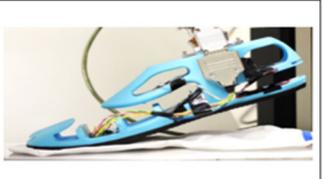
Referenz	Ohne GFK	Ohne Dämpfer	Ohne GFK + Ohne Dämpfer
REF	OG	OD	OGOD
			

Abb. 1: Produktvarianten zur Validierung des Simulationsmodells  
(von links: Referenz, ohne GFK, ohne Dämpfer, ohne GFK/Dämpfer)



Abb. 2: Experimentelle (links) und virtuelle Prüfung (mittig: Aufbau und rechts: Belastung) eines 3D-gedruckten Prothesenfußes

Durch das Testen der Prothesenfüße in verschiedenen Variationen der Komponenten konnte der Einfluss sowohl auf die Funktionalität des Prothesenfußes als auch auf die Abweichungen der Simulation vom experimentellen Teststand interpretiert werden. Beispielweise spielt der Dämpfer, der im Fersenbereich eingesetzt wird, eine große Rolle hinsichtlich der Verformung des Mittelfußes.

Erste Betrachtungen der Kurven der experimentellen und virtuellen Dehnungen zeigen Unregelmäßigkeiten der Übereinstimmung von Simulation und experimentellen Prüfstand. Es konnten Abhängigkeiten der Abweichung der Simulation von den Komponenten (GFK-Feder und PU-Dämpfer) des Prothesenfußes gefunden werden. Dies kann darauf hinweisen, dass die eingesetzten Materialmodelle das tatsächliche Belastungsverhalten der Komponenten nicht widerspiegeln. Möglicherweise ist auch das Materialmodell des Prothesenfußes aus Polyamid (PA) selbst nicht ausreichend genau für den gegebenen Belastungsfall. Im weiteren Verlauf des Projekts lag der Fokus neben der Verbesserung der Materialmodellierung auch auf der Rekonstruktion der Krafteinleitung und Kraftauswertung im virtuellen Modell. Außerdem wurden Modellierung und Vernetzung der DMS-Bereiche verfeinert. Durch die Verbesserung des Materialmodells war es möglich, auch Überlastprüfungen mit sehr hohen Kraftwerten virtuell nachzubilden. Der Vergleich der neu durchgeführten experimentellen Prüfung und Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung der virtuellen und experimentellen Verformungen und Dehnungen (siehe Abbildung 3).

Außerdem wurde als weiteres Projektziel die Einsetzbarkeit der DMS-Technik für die digitale Prozesskette zur virtuellen Zertifizierung von Medizinprodukten überprüft und bestätigt, was ein wichtiger Schritt zur Anerkennung von Simulationen in der Zulassung von Medizinprodukten darstellt [3]. Diese messtechnische Validierung von numerischen Simulationsmethoden für additiv gefertigte Medizinprodukte soll eine regulatorische Verankerung finden.

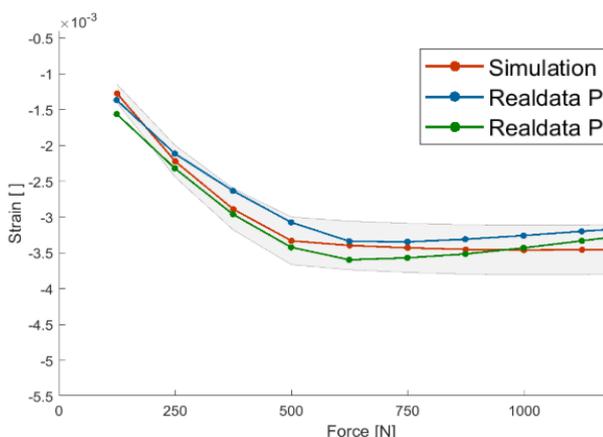


Abb. 3: Dehnungen im Fersenbereich bei Fersenbelastung bis zu 1250 N. Die virtuelle Dehnung (rot) wird inkl. der 10%-Abweichung der berechneten Werte (grau) dargestellt und mit zwei nacheinander getesteten Prüflingen (blau und grün) verglichen.

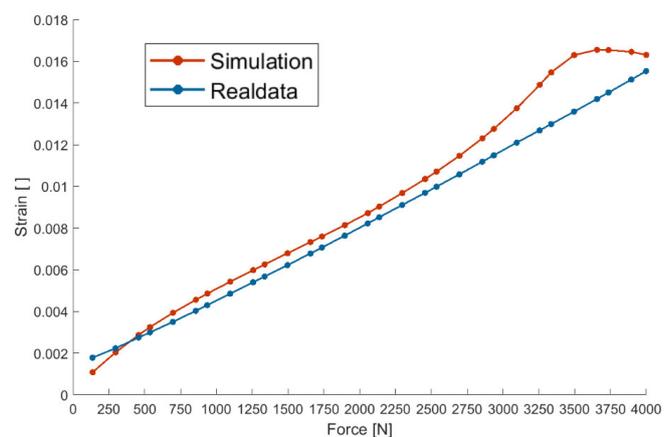


Abb. 4: Überlastprüfung bis 4000N – Vergleich der virtuellen (rot) und experimentellen (blau) Dehnung. Dargestellt wird die Dehnung im Vorfuß-Bereich bei Vorfuß-Belastung mit GFK-Komponente.

## 5.2 Virtueller Funktionstest von Prothesenfüßen

Neben der Sicherheitsbetrachtung durch Überlast- und Dauerlasttests können auch Simulationsmodelle zur Beurteilung der Funktion von Prothesenfüßen erstellt werden. In der simulationsgestützten funktionellen Entwicklung eines Prothesenfußes müssen Simulationsergebnisse mit den Anforderungen der Träger und Trägerinnen validiert werden. Die Leistungsfähigkeit des Produktes ist essentiell, da das komplexe biomechanische Zusammenspiel des menschlichen Knöchels in der Prothesenfußgeometrie abzubilden ist. Die Ergebnisse aus den funktionellen Simulationsmodellen müssen mit den Eindrücken aus dem Alltag der Träger validiert werden.

Um die Funktionsleistung von Prothesenfüßen beim Gehen darstellen zu können, stellt die Abrollkurve einen messbaren Parameter dar, der mit der Komfortwahrnehmung des Trägers korreliert. Über experimentelle Analysesysteme hinaus, können Finite-Elemente-Analysen mechanische Reaktionen komplexer Fußstrukturen ohne Prototypen-Fertigung bewerten. In diesem Projekt sollte die funktionelle Charakteristik des Prothesenfußes mit einem Finite-Elemente Modell analysiert werden, das die charakteristische Abrollkurve bestimmen kann.

Das Simulationsmodell (in ANSYS Workbench) ist angelehnt an den experimentellen Prüfstand der ISO/TS 16955 [4], der den menschlichen Gang auf Grundlage standardisierter Gangparameter imitiert (siehe Abbildung 5). Die wichtigsten Eingabeparameter sind der vertikale Kraftverlauf der Bodenreaktionskraft zwischen Prothesenfuß und Bodenebene und der korrelierende Winkelverlauf zwischen Bodenebene und Unterschenkelachse. In der Simulation wird das dynamische Fußverhalten während der Standphase in einer statischen Analyse über 20 Lastschritte aufgezeichnet und ermöglicht die Berechnung der Abrollkurve durch Auswertung der Kraft- und Momenten-Verläufe. Das Berechnungskonzept der Abrollkurve (in MATLAB) bezieht sich auf Kraftmessplattensysteme des Ganglabors.

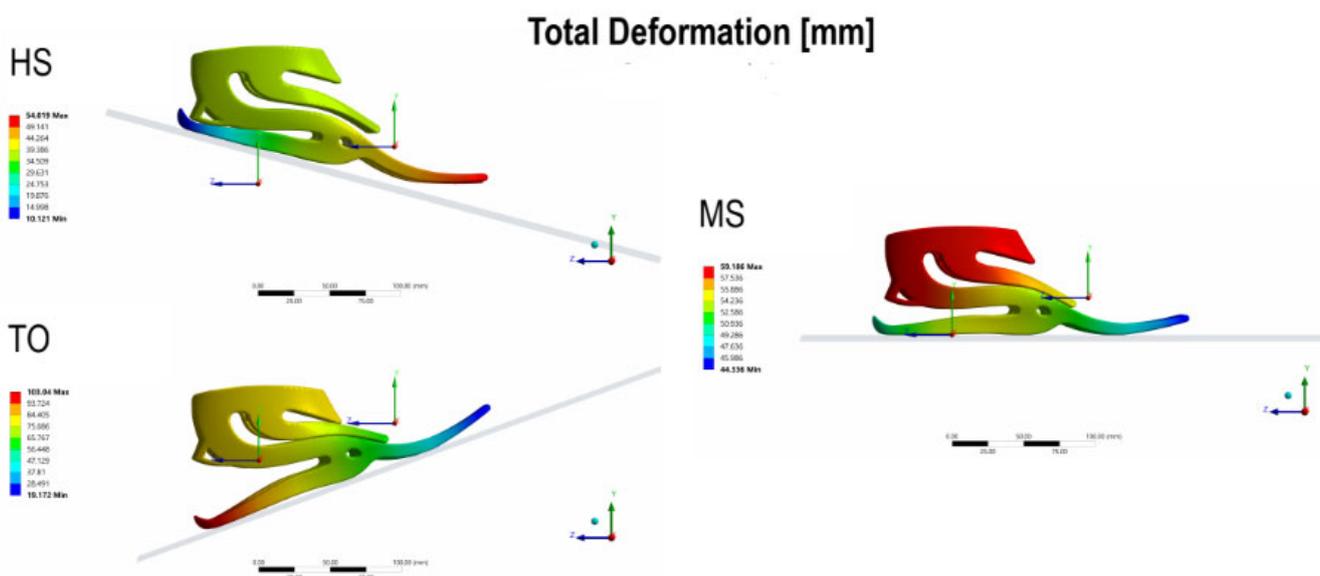


Abb. 5: Deformationsaufnahmen während des Abrollvorgangs im Simulationsmodell (HS = Heel Strike, MS = Mid Stance, TO = Toe Off)

Drei additiv hergestellte Prothesenfußgeometrien wurden in diesem Simulationsmodell getestet und anhand der ISO/TS 16955 Ergebnisse mit entsprechenden Prototypen validiert [4]. Die Abrollkurven des Simulationsmodells zeigen eine hohe Übereinstimmung mit dem experimentellen Prüfstand. Die Simulationsergebnisse können das markante Abrollverhalten der getesteten Prothesenfußvarianten vollständig abbilden (siehe Abbildung 6). Die Simulationsergebnisse müssen jedoch noch manuell manipuliert werden, um eine Validierung der virtuellen mit den experimentellen Ergebnissen zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass die Abweichungen weiter untersucht werden müssen, zum Beispiel indem die Randbedingungen der Simulation im Detail überprüft werden (Material, Vernetzung, Kontakte, Krafteinleitung, Freiheitsgrade), wie auch Messungenauigkeiten im experimentellen Prüfstand.

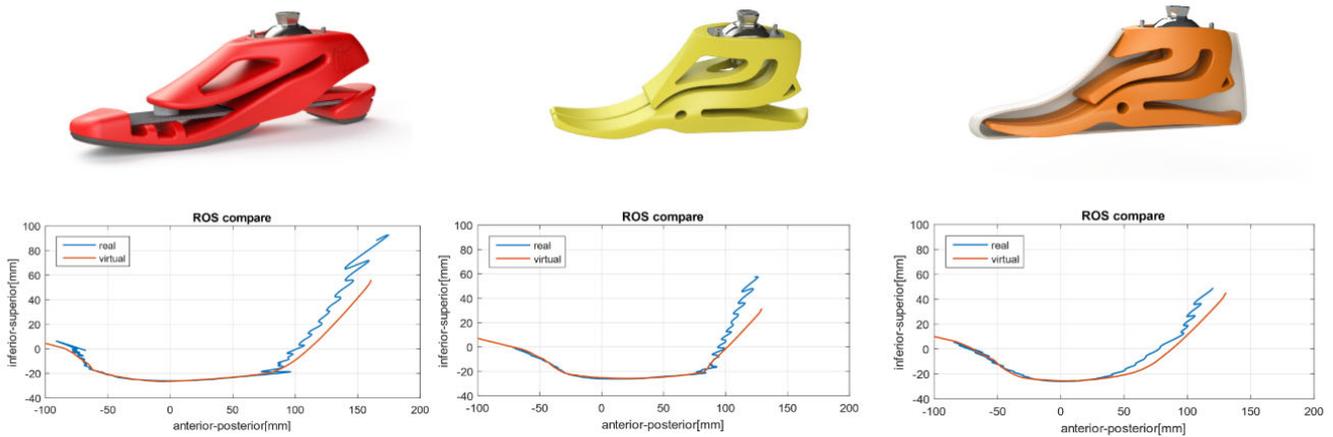


Abb. 6: Validierung der Abrollkurve: Virtuelle und experimentelle Tests zeigen eine hohe Übereinstimmung für alle Geometrien, insbesondere im Fersen- und Mittelfußbereich. Abweichungen sind noch im Vorfußbereich zu finden.

Dieses Simulationsmodell kann zur Designverbesserung von Prothesenfüßen in einer frühen Entwicklungsphase eingesetzt werden, anwenderunabhängig und ohne Prototypen. Funktionell optimierte Designs müssen dann von Trägern in Anwendertests validiert werden.

Mithilfe parametrischer Designs kann dieses Simulationsmodell zukünftig auch in der digitalen Prozesskette verwendet werden, in Ergänzung zu dem vorgestellten sicherheitsbasierten Simulationsmodell. Dabei können anwender-spezifische Randbedingungen durch die Datenerfassung einbezogen werden, um die Prothesenfußgeometrie individuell auf den Träger zu optimieren.

## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

Finite Elemente bieten eine leistungsstarke Methode, um virtuelle mechanische Analysen ohne Prototypen und experimentelle Prüfstände durchzuführen. Das Zukunftspotenzial der virtuellen Prüfstände liegt nicht nur in der Beschleunigung der Medizinproduktentwicklung, sondern auch in einer spezifischen Funktions- und Sicherheitsoptimierung jedes einzelnen Produkts, das die digitale Prozesskette durchläuft. Vorbild einer solchen digitalen Zertifizierung und Konformitätsbewertung stellt die Richtlinie der FDA dar, welche ein konkretes Verfahren vorschlägt, wie diese numerischen Simulationen die Konformitätsbewertung von Medizinprodukten unterstützen können [3]. Die vorgestellten Simulationsmodelle können gleichzeitig als automatisiertes Optimierungswerkzeug eingebunden werden, welches die individualisierte Produktgeometrie hinsichtlich bestmöglicher Funktion innerhalb der Sicherheitsgrenzen optimiert. Die Technologie der additiven Fertigung ermöglicht es, individuelle Produkte mit vertretbarem (manuellen) Arbeitsaufwand herzustellen und etabliert sich fortschreitend weiter im medizinischen Markt, der hohen Qualitäts- und Leistungsanforderungen entspricht. Finite Elemente basierte Qualitätssicherung kann also als essentieller Teil der digitalen Prozesskette genutzt werden, um individuelle, 3D-gedruckte Prothesen und Orthesen virtuell zertifiziert bereit zu stellen.

## 7 Literatur

- [1] Morrison, T.: "Advancing In Silico Medicine at FDA ", 28th Annual INCOSE international symposium, 2018
- [2] DIN EN ISO 10328:2016-10, Prothetik - Prüfung der Struktur von Prothesen der unteren Gliedmassen - Anforderungen und Prüfverfahren.
- [3] American Society of Mechanical Engineers: ASME (13.07.2006): Guide for verification and validation in computational solid mechanics.
- [4] ISO/TS 16955:2016-06, Prosthetics - Quantification of physical parameters of ankle foot devices and foot units.

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

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

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

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

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

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

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

Die Mitglieder sind:

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

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

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

Folgende Gruppen sind aktuell bei NAFEMS aktiv:

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

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

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

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

**Mitglieder erhalten unter anderem:**

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

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

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

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

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

Establish best practice in engineering simulation

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

Promote collaboration and communication

Act as an advocate for the deployment of simulation

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

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

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

## Why Join?

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

### Better Collaboration

#### BUILD LASTING BUSINESS ALLIANCES

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

#### EXCHANGE KNOWLEDGE & EXPERIENCE

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

#### LEARN ABOUT THE RESOURCES AVAILABLE

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

#### ENHANCE YOUR COMPANY'S VISIBILITY WORLDWIDE

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

### Increased Productivity

#### OPTIMIZE THE DESIGN PROCESS

Learn about potential pitfalls and pick up time saving techniques.

#### MINIMISE COSTLY PHYSICAL TESTING

Increase confidence in your company's engineering simulation capabilities.

### Improved Quality

#### BE COMMITTED TO THE HIGHEST STANDARDS

NAFEMS membership reinforces your focus on best practice.

#### BENCHMARK YOUR ORGANISATION'S SIMULATION PROCESS

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

### Enhanced Innovation

#### DEVELOP YOUR SKILLS WITH THE LATEST ENGINEERING SIMULATION TECHNIQUES

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

#### BE AT THE FOREFRONT

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

#### PRODUCE BETTER-ENGINEERED PRODUCTS WITH ENHANCED CUSTOMER SATISFACTION

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

## Membership Levels

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

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

## Technical Working Groups

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

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

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

### Technical working groups currently include:

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

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

## Nafems Events

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

### World Congress

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

### Conferences

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

### Seminar

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

### Webinars

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

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

## PSE

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

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

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



### THE PSE CERTIFICATION STANDARD

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

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

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

### PSE CERTIFICATION HAS BEEN DESIGNED TO:

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

NAFEMS Training

**CLASSROOM COURSES | E-LEARNING | IN-HOUSE TRAINING**

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

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

**QUALITY**

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

**FLEXIBILITY**

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

**VARIETY**

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

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

# Resource Centre

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

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

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

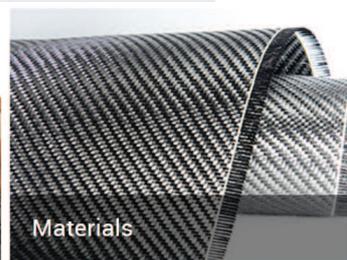
There are currently over 1,500 resources in the centre with this number growing weekly. NAFEMS Members have access to numerous types of resource as part of their membership, including presentations from previous events, conference papers, webinar archives, and much more.



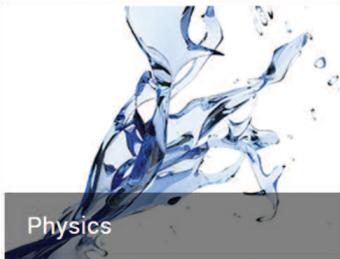
Analysis Management



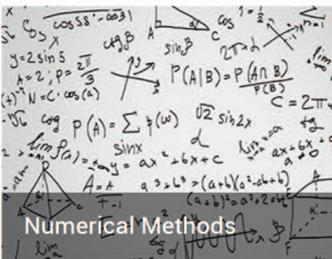
Industry & Products



Materials



Physics



Numerical Methods



All

## Nafems Publications

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

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

# BENCH MARK

# eLibrary

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

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

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

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 (4/2019)

- Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:**
  - NAFEMS Mitgliedschaft
  - NAFEMS Magazin „Benchmark“
  - NAFEMS Seminare
  - NAFEMS Trainingskurse
  - NAFEMS e-learning
  - Professional Simulation Engineer PSE
  - Internationale Arbeitsgruppen
  - CFD Seminar im November in Wiesbaden
  - E-Motor Seminar im November in Wiesbaden
  - NAFEMS Nordic Seminar im November in Billund
  - V&V Master Trainingskurs im November in München
  - FKM Trainingskurs im November in Wiesbaden
  - NAFEMS World Congress 2021
- Bitte nehmen Sie mich in Ihren Verteiler auf.**
- Senden Sie das NAFEMS Magazin bitte auch an meine/n Kollegen/in (Adresse unten).**
- Ich möchte folgendes zum NAFEMS Magazin anregen:**  
\_\_\_\_\_
- Ich interessiere mich für Werbe-/Stellenanzeigen - bitte senden Sie uns die Mediadaten zu.**

**Absender**

**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 (4/2019)

- Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:**
- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft                | <input type="checkbox"/> CFD Seminar im November in Wiesbaden            |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“           | <input type="checkbox"/> E-Motor Seminar im November in Wiesbaden        |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare                      | <input type="checkbox"/> NAFEMS Nordic Seminar im November in Billund    |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse                | <input type="checkbox"/> V&V Master Trainingskurs im November in München |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS e-learning                    | <input type="checkbox"/> FKM Trainingskurs im November in Wiesbaden      |
| <input type="checkbox"/> Professional Simulation Engineer PSE | <input type="checkbox"/> NAFEMS World Congress 2021                      |
| <input type="checkbox"/> Internationale Arbeitsgruppen        |  |
- Bitte nehmen Sie mich in Ihren Verteiler auf.**
- Senden Sie das NAFEMS Magazin bitte auch an meine/n Kollegen/in (Adresse unten).**
- Ich möchte folgendes zum NAFEMS Magazin anregen:**
- 
- Ich interessiere mich für Werbe-/Stellenanzeigen - bitte senden Sie uns die Mediadaten zu.**

**Absender**

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

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

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

Straße: \_\_\_\_\_

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

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

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

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

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

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

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

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

Straße: \_\_\_\_\_

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

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

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

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

