



# Online-Magazin

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

## Fachbeiträge

### STRÖMUNGSMECHANIK

CFD Analysen zum Flugverhalten einer Drohnenkonfiguration unter Verwendung eines Lattice-Boltzmann Verfahrens

### ELEKTROMAGNETISMUS

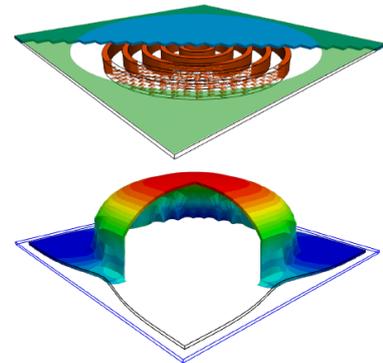
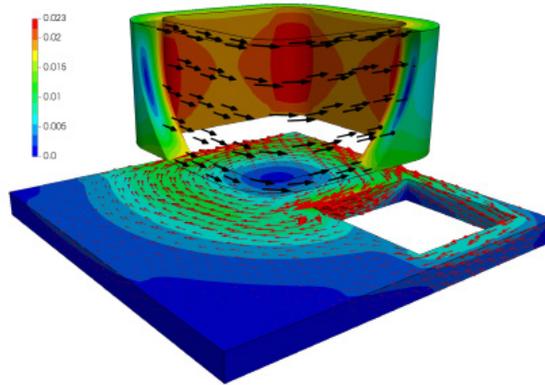
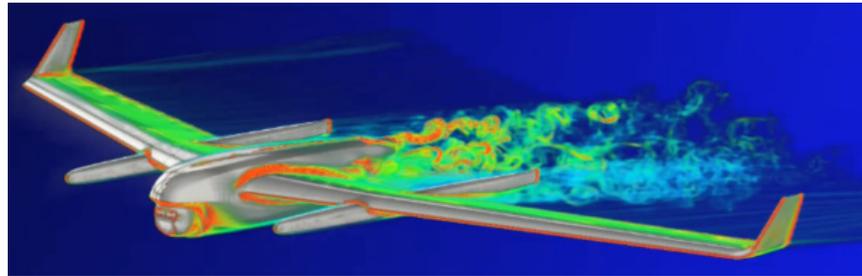
Elektromagnetische Feldsimulation sich bewegender Bauteile

### SYSTEMOPTIMIERUNG

Konstruktionsnahe Optimierungsmethode gekoppelt mit 1D Simulation

### ABSTRAKTE MODELLIERUNG

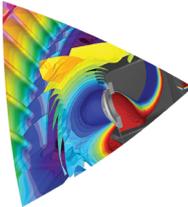
Abstrakte Modellierung – der effizientere Weg CFD/CAE – Prozesse robust zu automatisieren



WIR FREUEN UNS AUF IHR KOMMEN:  
DIE NEUEN KONFERENZTERMINE 2020

ABSTRACT SUBMISSION DEADLINE:  
3. NOVEMBER 2020

**NAFEMS20**  
**DACH KONFERENZ**  
Fachkonferenz für Berechnung & Simulation im Engineering  
12.-15. Oktober, München-Taufkirchen



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



incorporating the

**IST INTERNATIONAL**  
**CONFERENCE ON CAE**  
**INTEROPERABILITY 2020**  
VMAP 15-16 Oct 2020 | Munich-Taufkirchen



**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,

seit jeher sind Menschen daran interessiert, eine möglichst zuverlässige Vorhersage über die Folgen geplanter Aktionen zu bekommen, schon um unliebsame Erfahrungen zu vermeiden; hier sei nur an das Orakel von Delphi erinnert, das häufig konsultiert, aber nicht immer richtig verstanden wurde. Auch bei jeder Simulation ist es das primäre Ziel, ein Ergebnis vorherzusagen, allerdings mit mehr Substanz als es ein Blick in die Kristallkugel oder das beliebte Bleigießen zu Sylvester erlauben. Grundlage ist immer ein Modell, das die zu analysierende Situation hinreichend zuverlässig beschreiben sollte. Deshalb gehen Erfahrungen und Erkenntnisse aus ähnlich gelagerten Fällen in das Modell ein. Leider wird der Modellfindung nicht immer die nötige Aufmerksamkeit geschenkt. Dabei ist dieser Vorgang entscheidend für den Erfolg der weiteren Bemühungen: Das Modell muss die zu untersuchenden Effekte hinreichend fein abbilden; es sollte andererseits möglichst einfach konzipiert sein, um den folgenden Rechenaufwand in Grenzen zu halten. Es lohnt sich also, bei der Modellauswahl sorgfältig vorzugehen und nicht gewohnheitsmäßig bekannte Ansätze zu übernehmen. Modelle werden häufig durch Differentialgleichungen beschrieben. Da zudem die Randbedingungen komplex sind, wird man zu numerischen Methoden greifen müssen, um das Problem untersuchen zu können; man spricht dann von einer numerischen Simulation.



*Prof. Dr.-Ing.  
Klaus Rohwer*

Die vier Fachbeiträge in diesem Heft stellen eindrucksvolle Beispiele solcher numerischen Simulation dar. Der erste Beitrag aus der Strömungsmechanik entwickelt einen Multi-Relaxationszeit Kollisionsoperator, bei dem die Kollision der Partikel nicht im Geschwindigkeitsraum sondern im Impulsraum erfolgt. Die Berücksichtigung von Starrkörper-Bewegungen mittels 6DOF Solver erlaubt es, die Auswirkungen von Flugmanövern auf die Stabilität von Drohnen bereits in der Entwicklungsphase abzuschätzen. Im nächsten Beitrag aus dem Bereich Elektromagnetismus wird gezeigt, wie Wirbelstromprobleme durch Kopplung von finiten Elementen mit Randelementen analysiert werden können. Dem Nachteil einer längeren Rechenzeit stehen die Vorteile gegenüber, dass keine künstlichen Randbedingungen eingeführt werden müssen und bei Bewegung von Bauteilen nicht neu vernetzt werden muss. Der dritte Beitrag kommt aus der Systemoptimierung. Das eindimensionale Systemmodell wird ergänzt durch detailliertere Modelle der Komponenten; damit kann das gesamte System der Klimaanlage eines Flugzeugs effizienter optimiert werden. Besonders interessant scheint mir der vierte Beitrag zur abstrakten Modellierung zu sein. Wie in der abstrakten Kunst löst man sich dabei von einer bestimmten Geometrie und arbeitet mit Platzhaltern; damit wird eine zuverlässige Simulationen auch für nicht CAE/CFD Spezialisten möglich. Allerdings ist zu hinterfragen, ob das Modell dann für die jeweilige Anwendung noch optimal ist.

Ich hoffe, dass unter den Beiträgen auch für Sie etwas Nützliches dabei ist und wünsche Ihnen beim Lesen viel Vergnügen und eine Unterstützung Ihrer Arbeit.

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.cadfer.net/de](http://www.cadfer.net/de)



[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 Regionalkonferenzen 2020 .....6  
 NAFEMS World Congress 2021 - Call for Papers .....7  
 NAFEMS DACH Konferenz 2020.....8  
 VMAP International Conference on CAE Interoperability 2020.....9

**NAFEMS Trainings**  
 Onsite Trainings ..... 14  
 Übersicht ..... 15  
 Verification and Validation in Engineering Simulation ..... 16  
 Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie..... 18  
 Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis..... 19  
 Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation.....20  
 Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung .....21

**NAFEMS Literatur**  
 Invitation 2 Tender ..... 22  
 Benchmark Magazin .....23

**Neuigkeiten** .....25

**Veranstaltungskalender** .....37

**Fachbeitrag: Strömungsmechanik**  
**CFD Analysen zum Flugverhalten einer Drohnenkonfiguration unter Verwendung eines Lattice-Boltzmann Verfahrens**  
 G. Oettl, J. Iseler (Dassault Systèmes Deutschland) ..... 38

**Fachbeitrag: Elektromagnetismus**  
**Elektromagnetische Feldsimulation sich bewegender Bauteile**  
 T. Rüberg, L. Kielhorn, J. Zechner (Tailsit) ..... 51

**Fachbeitrag: Systemoptimierung**  
**Konstruktionsnahe Optimierungsmethode gekoppelt mit 1D Simulation**  
 P. Korth (Diehl Aviation Laupheim)..... 60

**Fachbeitrag: Abstrakte Modellierung**  
**Abstrakte Modellierung – der effizientere Weg CFD/CAE–Prozesse robust zu automatisieren**  
 A. Patil, D. Evans, K. Peters, S. T. Patil (Novus Nexus) ..... 67

**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

**Werbeanzeigen**  
 Beta CAE Systems..... 31  
 Dassault Systèmes Simulia.....27  
 DYNAmore .....29  
 Engineering Systems Internatioal .....33  
 VMAP Projekt.....10-13  
 Win-Verlag.....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 01.01.2020

**Verteilung / Bezug**

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

**Copyright © 2020, Werbos GbR.**

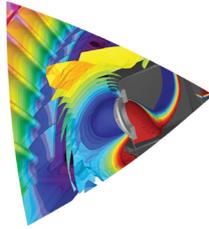
Nachdruck – auch auszugsweise -, Ver-  
 vielfältigung oder sonstige Verwertung  
 ist nur mit schriftlicher Genehmigung  
 unter ausdrücklicher Quellenangabe  
 gestattet. Gekennzeichnete Artikel  
 stellen die Meinung des Autors, nicht  
 unbedingt die Meinung der Redak-  
 tion dar. Für unverlangt 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/Seminare in DACH

### NAFEMS20 DACH KONFERENZ



Fachkonferenz für Berechnung  
& Simulation im Engineering

12.-15. Oktober, München-Taufkirchen

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

12.-15. Oktober 2020

München



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

15.-16. Oktober 2020

München



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

14. - 18. Juni 2021

Salzburg

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

## Schulungen in DACH

**Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie**

2-tägig, Webex

[www.nafems.org/fkm20-juli](http://www.nafems.org/fkm20-juli)

14. - 15. Juli

Online

**Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation**

2-tägig, Webex

[www.nafems.org/fem20-juni](http://www.nafems.org/fem20-juni)

24. Juni + 1. Juli 2020

Online

**Verification and Validation in Engineering Simulation**

[www.nafems.org/vandv20-2](http://www.nafems.org/vandv20-2)

12.-13. Okt.

Wiesbaden oder Online

**Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung**

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

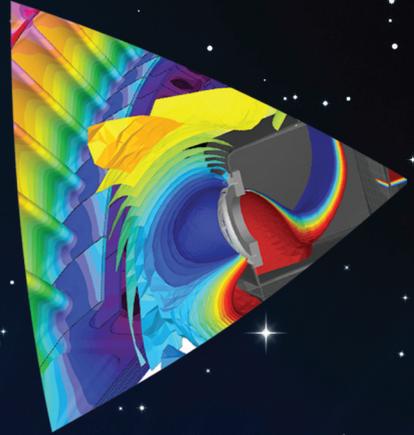
Herbst

Online

NVH (in Vorbereitung)

Eine Beschreibung der Schulungsinhalte finden Sie auf Seiten 16 - 21. 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).

# NAFEMS20 Regional Conferences



As with many face to face events, our 2020 Regional Conference program has now been widely postponed.

Further information on the conference program will be announced when available on [nafems.org](http://nafems.org)

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

# Call for Papers



# nwC 2021

## NAFEMSWORLD CONGRESS

14-18 JUNE | SALZBURG | AUSTRIA

**A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION**

incorporating the

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

[nafems.org/congress](http://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 der 3. November 2020.

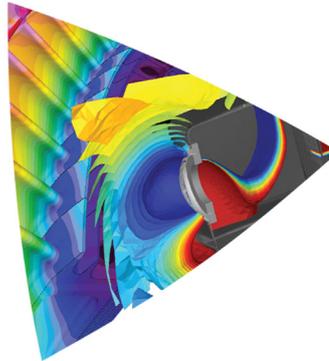
Weitere Informationen finden Sie unter [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress).



Die Entscheidung, in welchem Rahmen die verschobene NAFEMS DACH Konferenz nun stattfinden kann, wird Ende Juli getroffen. Momentan sehen wir zwei Optionen: Entweder die Konferenz wird als face-2-face Konferenz stattfinden - Basis hierfür ist ein hybrider Ansatz, d.h. teilweise werden Vorträge per Video/online eingespielt, oder aber die Konferenz läuft komplett virtuell. Wie auch immer, wir werden uns an die geltenden Richtlinien und Empfehlungen halten und freuen uns auf Sie.

Einladung und vorläufiges Vortragsprogramm

# NAFEMS20 DACH KONFERENZ



Fachkonferenz für Berechnung  
& Simulation im Engineering

12.-15. Oktober, München-Taufkirchen

- Plenarvorträge:  
IABG, Mendler Engineering Technology, Opel Automobile, ZF  
Deutscher Wetterdienst DWD, Future Matters, Charité Berlin, TU München
- Über 100 Fachvorträge in 34 Sessions
- Kurztrainings/Workshop: Mehrphasenströmungen, Einführung SPDM
- Umfangreiche Hard- und Softwareausstellung
- Networking, Erfahrungs- und Informationsaustausch
- Für NAFEMS Mitglieder (frei\*) und für Nichtmitglieder
- Folgekonferenz: VMAP International Conference on CAE Interoperability

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

Platin Sponsor



Gold Sponsoren



Silber Sponsoren



Medienpartner



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

Selbiges, was für die NAFEMS DACH Konferenz gilt, gilt auch für die verschobene VMAP Konferenz. Die Entscheidung, in welchem Rahmen diese stattfinden kann, wird ebenfalls Ende Juli getroffen. Auch hier sehen wir zwei Optionen: Entweder die Konferenz wird als face-2-face Konferenz stattfinden - Basis hierfür ist ein hybrider Ansatz, d.h. teilweise werden Vorträge per Video/online eingespielt, oder aber die Konferenz läuft komplett virtuell. Wir werden uns an die geltenden Richtlinien und Empfehlungen halten und freuen uns auf Sie.

## Invitation and preliminary conference agenda



We invite you to attend the 1<sup>st</sup> VMAP International Conference on CAE Interoperability 2020 which will be held from 15 - 16 October 2020 in Munich, Germany, following directly on from the NAFEMS DACH Regional Conference at the same venue.

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.

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.

### Conference websites:

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



# VMAP

**VMAP is a vendor-neutral standard for CAE data storage and transfer to enhance interoperability in virtual engineering workflows.**

- a defined international standard
- software library available to read/write VMAP data files
- supported by a strong VMAP Standards Community

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

Further features:

- meta and user data
- coordinate and unit systems
- parameters for (material) models
- tutorials and test cases
- geometry and discretization
- result and state variables
- based on HDF5

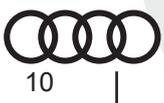
## **CAE Tool implementations (to date):**

VMAP has been directly integrated into 4a FiberMap/MicroMec, Beta CAE Ansa, DYNAMore Envyo (supporting LS-DYNA), e-Xstream Digimat, SCAI MpCCI Mapper and Simcon CADMould.

VMAP has been linked via an external wrapper with Autodesk Moldflow, ESI Visual Environment, inuTech Diffpack, MSC Marc, OpenFOAM and Simulia Abaqus.

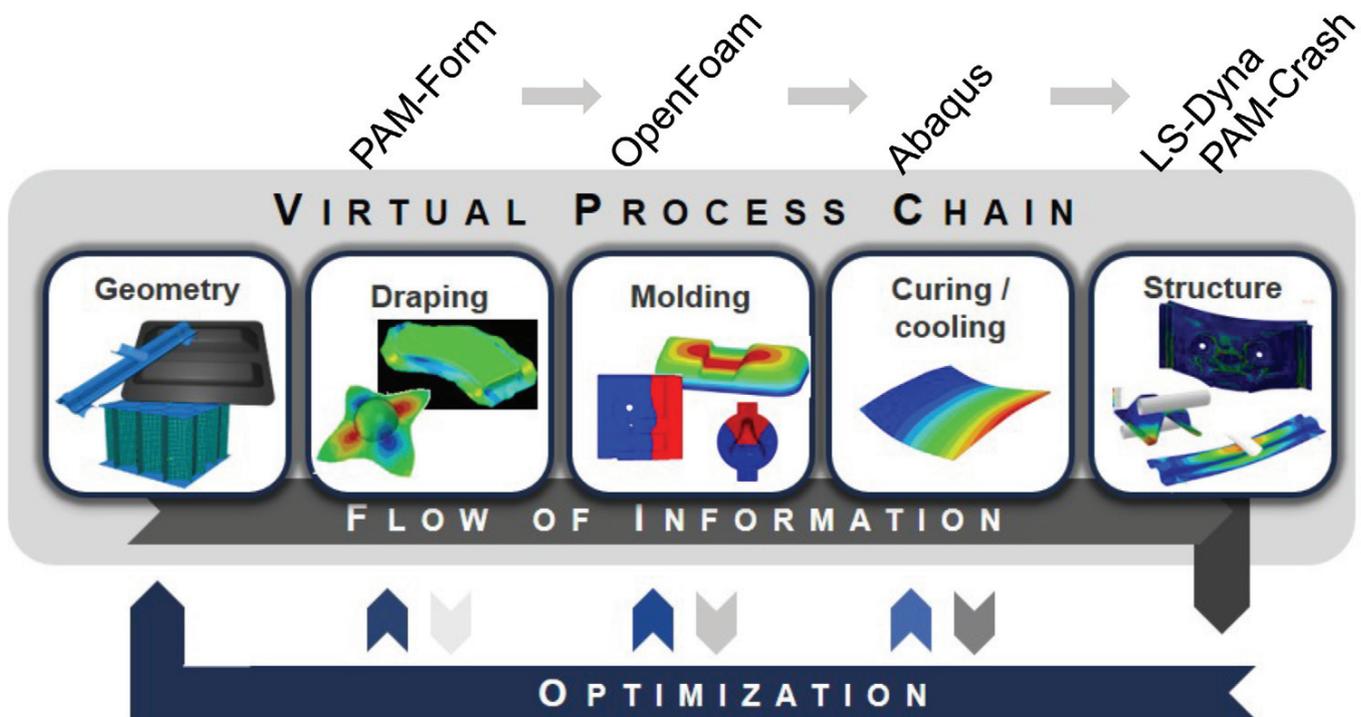
Implementations are under development for ANSYS Mechanical, Autodesk FUSION 360Platform and Forge (Transvalor).

*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 (VMAP-SC) has been established to drive the standards and software development effort during and after the initial project. The VMAP-SC is controlled by its ByLaws and decides on future VMAP work and development projects. We are open to all experts and entities who require successful VMAP standards and tools so please contact us. [vmap.eu.com/community](http://vmap.eu.com/community)

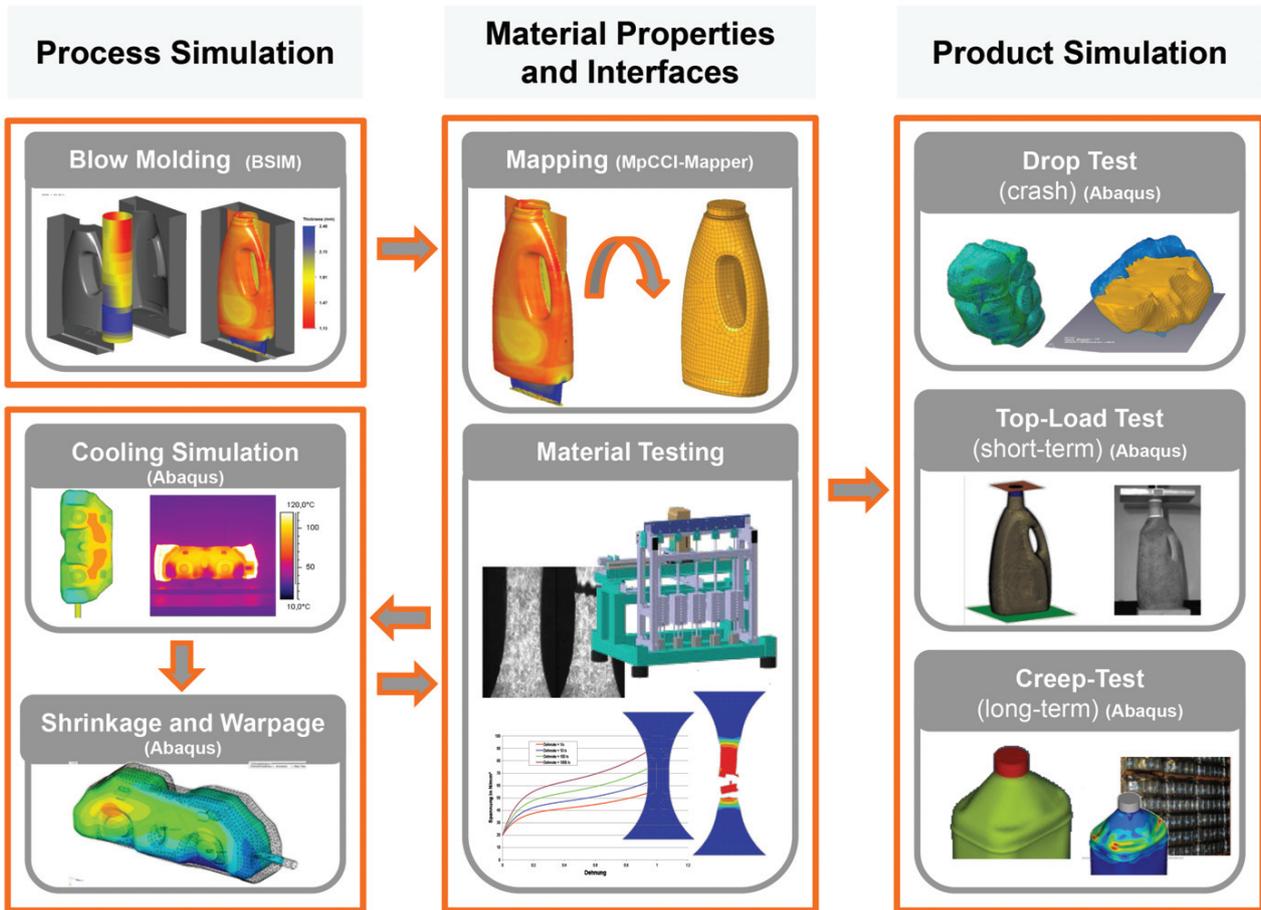
## Complex workflow? Difficult material data transfer?

The more simulation processes that are looked at, the better the VMAP Standard will be in a shorter period. Please contact us if you would to discuss your process and consider it for inclusion into VMAP.

[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).



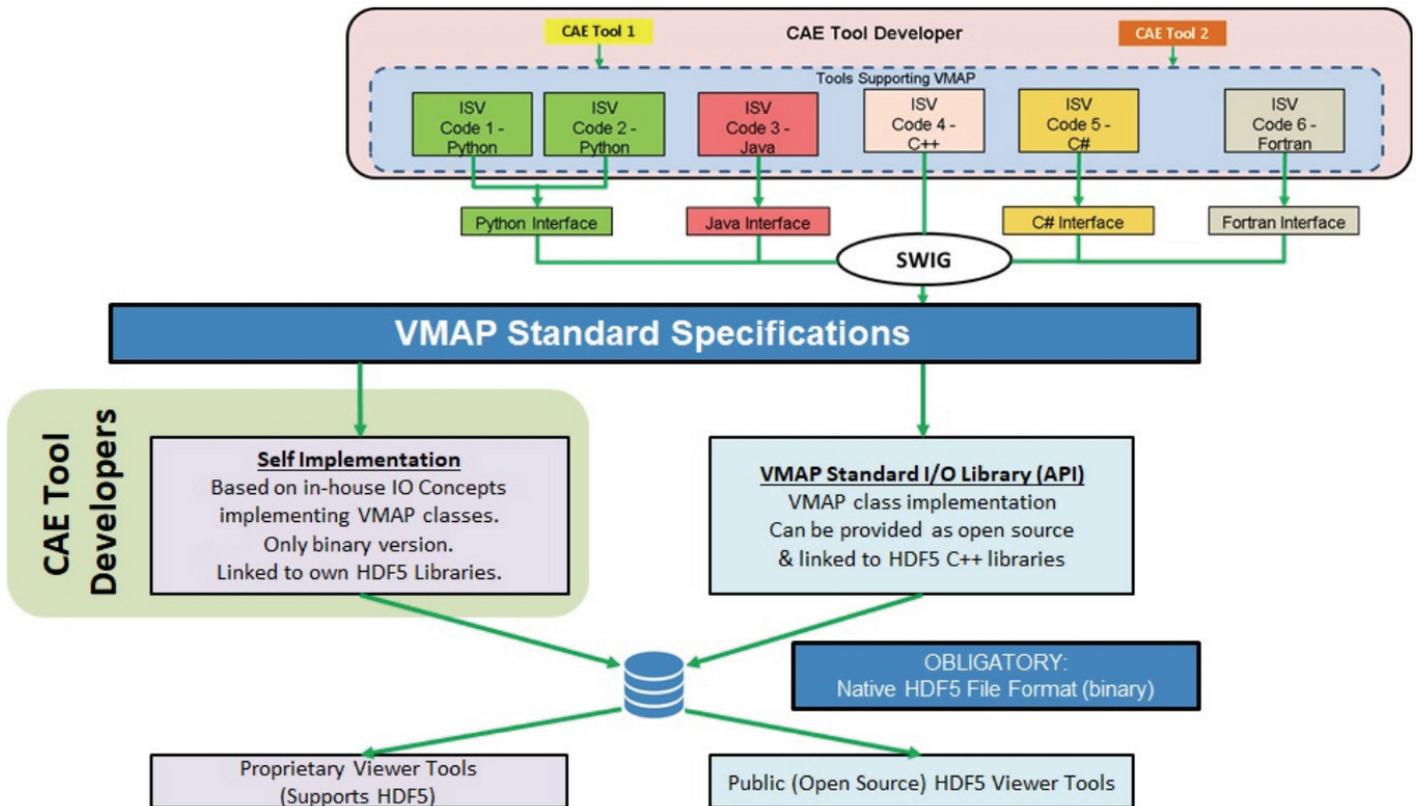
## VMAP help for software developers

To enable quick and efficient incorporation of the VMAP standards into any CAE software VMAP provides a set of Input/Output software tools to read/write directly with the VMAP standard database implemented on top of **HDF5** (hdfgroup.org).

These tools should be placed in a **SWIG** wrapper (swig.org) that enables 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 of the HDF5 VMAP standard database.

Included in the tools provided for developers are 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 \(itea3.org/project/vmap.html\)](https://itea3.org/project/vmap.html). The 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. <https://itea3.org>

# Onsite Training



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



NAFEMS has been providing the engineering analysis, modelling & simulation community with world-class, code-independent training since 1983. Our unique position as an international non-profit, with no affiliation to any software code or provider, means that we are the only organisation in a position to cater for the specific training needs of everyone involved in engineering analysis.

You can be safe in the knowledge that all of our training solutions are backed by the experience that comes with nearly 40 years as a pillar of the simulation community.

#### ORGANISATIONS WHICH HAVE BENEFITED FROM THIS TRAINING SO FAR INCLUDE:

- Honda
- Messier-Dowty
- Assystem
- Atkins Global
- Delphi
- Puget Sound
- Worley Parsons
- ASML
- Jaguar Land Rover
- Rolls Royce and many more

## COURSE PROGRAMME

### INTRODUCTORY

- Why do Engineering Simulation?
- Basic FEA
- Practical FEA
- Introduction to Practical CFD
- Introduction to Dynamics using FEA
- CFD for Structural Designers and Analysts
- FEA Day to Day

### MID-LEVEL

- 10 Steps to Successful Explicit Dynamic Analysis
- Practical Modeling of Joints and Connections
- Introduction to Non-Linear FEA
- Composite FEA
- Fatigue & Fracture Mechanics in FEA
- Structural Optimization in FEA

### ADVANCED

- Verification & Validation of Computational Models
- Elements of Turbulence Modeling
- Verification & Validation of Models and Analyses
- Advanced Dynamic FEA
- Verification & Validation in Scientific Computing

To discuss how any of these options could work for you and your company, please contact NAFEMS on [training@nafems.org](mailto:training@nafems.org) or call +44(0)1355 225688

Es sind schwierige Zeiten. Traditionelle Trainingsmethoden ändern sich. NAFEMS stellt sich der Herausforderung und bietet Ihnen eine Reihe von Schulungsoptionen, die alle remote, alle von zu Hause aus verfügbar sind und dieselben internationalen, unabhängigen Standards einhalten.

<h3>e-learning</h3> <p>WORLD-CLASS ONLINE TRAINING FROM THE EXPERTS ON A RANGE OF TOPICS. YOU AND YOUR TEAM CAN USE A COMBINATION OF LIVE SESSIONS, DISCUSSION FORUMS, AND RECORDED SESSIONS TO LEARN .</p> <p><a href="#">VIEW YOUR OPTIONS</a></p>	<h3>virtual classrooms</h3> <p>OUR BEST-IN-CLASS PUBLIC TRAINING COURSES, NOW BEING DELIVERED ENTIRELY ONLINE. COMPLETE COURSES DELIVERED IN FULL DAY SESSIONS OVER THE COURSE OF ONE OR MORE DAYS.</p> <p><a href="#">FULL DETAILS</a></p>	<h3>custom classes</h3> <p>OUR CUSTOM CLASSES COVER WHATEVER TOPICS YOU NEED, WITH EXAMPLES RELATED TO YOUR INDUSTRY, IN A PRIVATE, ONLINE DELIVERY FORMAT THAT SUITS YOU AND YOUR TEAM PRECISELY.</p> <p><a href="#">CREATE YOUR COURSE</a></p>
<h3>learning modules</h3> <p>ONLINE, SELF-PACED LEARNING WITH TUTOR SUPPORT. LEARN AT YOUR OWN PACE, WITH EXPERIENCED GUIDANCE ON-HAND ALL THE WAY.</p> <p><a href="#">VIEW THE MODULES</a></p>	<h3>learning hub</h3> <p>GUIDED LEARNING, EXCLUSIVE TO NAFEMS MEMBERS. FROM KEY CONCEPTS TO DETAILED LEARNING, THERE'S SOMETHING FOR EVERYONE.</p> <p><a href="#">Access the Hub (members only)</a></p>	

<p><b>16</b> Jun 2020</p> <p>Practical Introduction to FEA</p> <p>WebEx, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>17</b> Jun 2020</p> <p>Webex-Kurs: Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung</p> <p>Webex, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>17</b> Jun 2020</p> <p>Metals Material Modelling: Creep</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>
<p><b>24</b> Jun 2020</p> <p>Webex-Kurs: Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</p> <p>Training Course</p>	<p><b>1</b> Jul 2020</p> <p>Introduction to Practical CFD</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>2</b> Jul 2020</p> <p>Introduction to Dynamics using FEA</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>
<p><b>14</b> Jul 2020</p> <p>Webex-Kurs: Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie</p> <p>WebEx, Germany</p> <p>Training Course</p>	<p><b>14</b> Jul 2020</p> <p>Basic Finite Element Analysis</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>17</b> Jul 2020</p> <p>Structural Optimization in FEA</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>
<p><b>5</b> Aug 2020</p> <p>Elements of Turbulence Modeling</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>19</b> Aug 2020</p> <p>Practical Modelling of Joints and Connections</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>20</b> Aug 2020</p> <p>Advanced Dynamic FEA</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>
<p><b>28</b> Aug 2020</p> <p>Non-Linear FEA</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>8</b> Sep 2020</p> <p>Composite Finite Element Analysis</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>15</b> Sep 2020</p> <p>Practical Introduction to FEA</p> <p>Manchester, UK</p> <p>Training Course</p>
<p><b>16</b> Sep 2020</p> <p>CFD for Structural Designers &amp; Analysts</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>6</b> Oct 2020</p> <p>Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis</p> <p>Coventry, UK</p> <p>Training Course</p>	<p><b>12</b> Oct 2020</p> <p>Verification and Validation in Engineering Simulation</p> <p>Wiesbaden, Germany</p> <p>Training Course</p>

## NAFEMS Schulung

*Dieser Kurs wurde bereits über 40 Mal in ganz Europa gehalten!*

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

12. - 13. Oktober in Wiesbaden oder online (Webex) / 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

**Informationen und Anmeldung**

12.-13. Oktober in Wiesbaden: [www.nafems.org/vandv20-2](http://www.nafems.org/vandv20-2)

**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..*

## NAFEMS Schulung

# Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie

14. - 15. Juli 2020 online (Webex) / 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-juli](http://www.nafems.org/fkm20-juli)

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

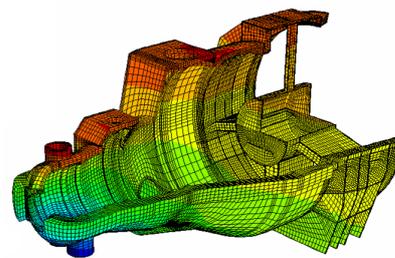
English

### 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



24. Juni + 1. Juli 2020 Online (2-tägig, Webex) / 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.

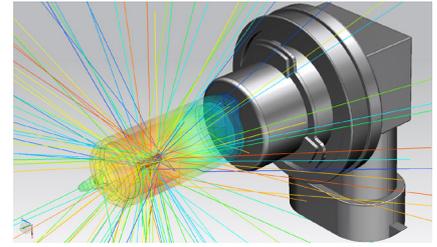
### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/fem20-juni](http://www.nafems.org/fem20-juni)

## NAFEMS Schulung

# Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

Herbst als online-Kurs (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar



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

### Inhalte

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

Problemen / Fehlerquellen beim Lösungsprozess

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

### Referent



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

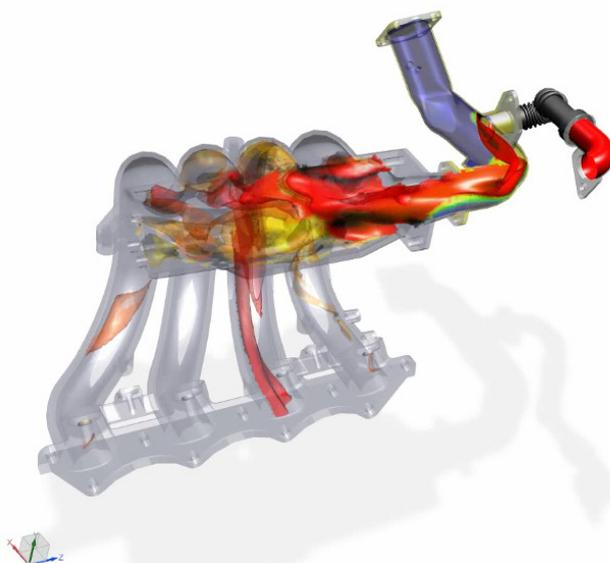
*der Strömungsberechnung CFD in Lehre, Forschung und Industrie. Herr Kohnen leitet den Bereich Maschinenbau und Virtual Engineering an der Hochschule Baden-Württemberg Mosbach.*

### Kurssprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

### Inhouse-Kurs

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



# invitation<sup>2</sup> TENDER



## Quantifying the Benefits of Engineering Simulation

The NAFEMS Business Impact Working Group (BIWG) wishes to commission a new document and associated video interviews with the suggested title "Quantifying the Benefits of Engineering Simulation".

The deliverables are expected to include a document describing the various approaches that can be used to justify the greater use of simulation, including examples of how best to present the justification. It is envisaged that this document will be published on the NAFEMS web site and, potentially, as a stand-alone, printed document.

A document with various justifications for adopting simulation identified by members of the BIWG is available for potential authors to view. These justifications should form the core of the document. Members of the BIWG will support the development of the content and it is recommended that calls are set up with various members of the BIWG, particularly the Chairman, to get more information and a greater understanding before writing the document.

### Format

It is suggested that the document is broken down into the various different justifications with a description of each and an example of how to structure an ROI calculation. The document is anticipated to be about 40 A5 sized pages.

### Video Interviews

To complement the document, a series of video interviews is envisaged with managers of engineering simulation teams in large companies that have experience justifying the use of engineering simulation within their companies.

Each interview will feature one member of the BIWG who will discuss one of the different justifications and comment about how they have justified the use of simulation in their companies.

For each interview, the author should contact the BIWG member and agree a "script" for the interview that is consistent with the content and examples in the document. This script can also be approved by the interviewee's company if required.

The interviews themselves will be recorded by NAFEMS.

### Intended Readership

- Senior practitioners of engineering simulation (engineers and scientists) and managers of engineering simulation teams that want to educate senior executives on the benefits of engineering simulation and justify the expanded use of engineering simulation in their companies.
- Engineers and engineering managers that want to introduce engineering simulation into their companies and need advice on how best to do so.

### Guidance for Proposals

Each proposal should consist of:

- The proposed structure of the document with the titles of the sections to be developed
- Work plan including milestones and interim deliveries for early review
- Cost
- The authors' credentials, curriculum vitae, etc. Proposals from single authors and consortia will be considered.

Proposals should be sent to [business-impact@nafems.org](mailto:business-impact@nafems.org)

Extended details available at [nafe.ms/BIWG-Quantify](http://nafe.ms/BIWG-Quantify)

### Potential authors should submit the following:

- A brief description of the main topics to be covered
- Chapter and section headings with an approximate number of pages per chapter
- Timescale for completing the book
- Cost
- CVs of the authors (Maximum two-pages per author)
- The NAFEMS Professional Simulation Engineer Competencies that the publication is anticipated to address. Contact the NAFEMS Technical Officer for further details.

For full details visit [nafe.ms/tenders](http://nafe.ms/tenders)  
or contact the NAFEMS Technical Officer [nafe.ms/2NuJKno](http://nafe.ms/2NuJKno)

Internationales NAFEMS Magazin

## Benchmark Magazin, Ausgabe April 2020

Die internationale NAFEMS Zeitschrift „Benchmark“ erschien zuletzt im April 2020.

Download für Mitglieder und Abonnenten sowie Informationen zum Abonnement finden Sie unter:

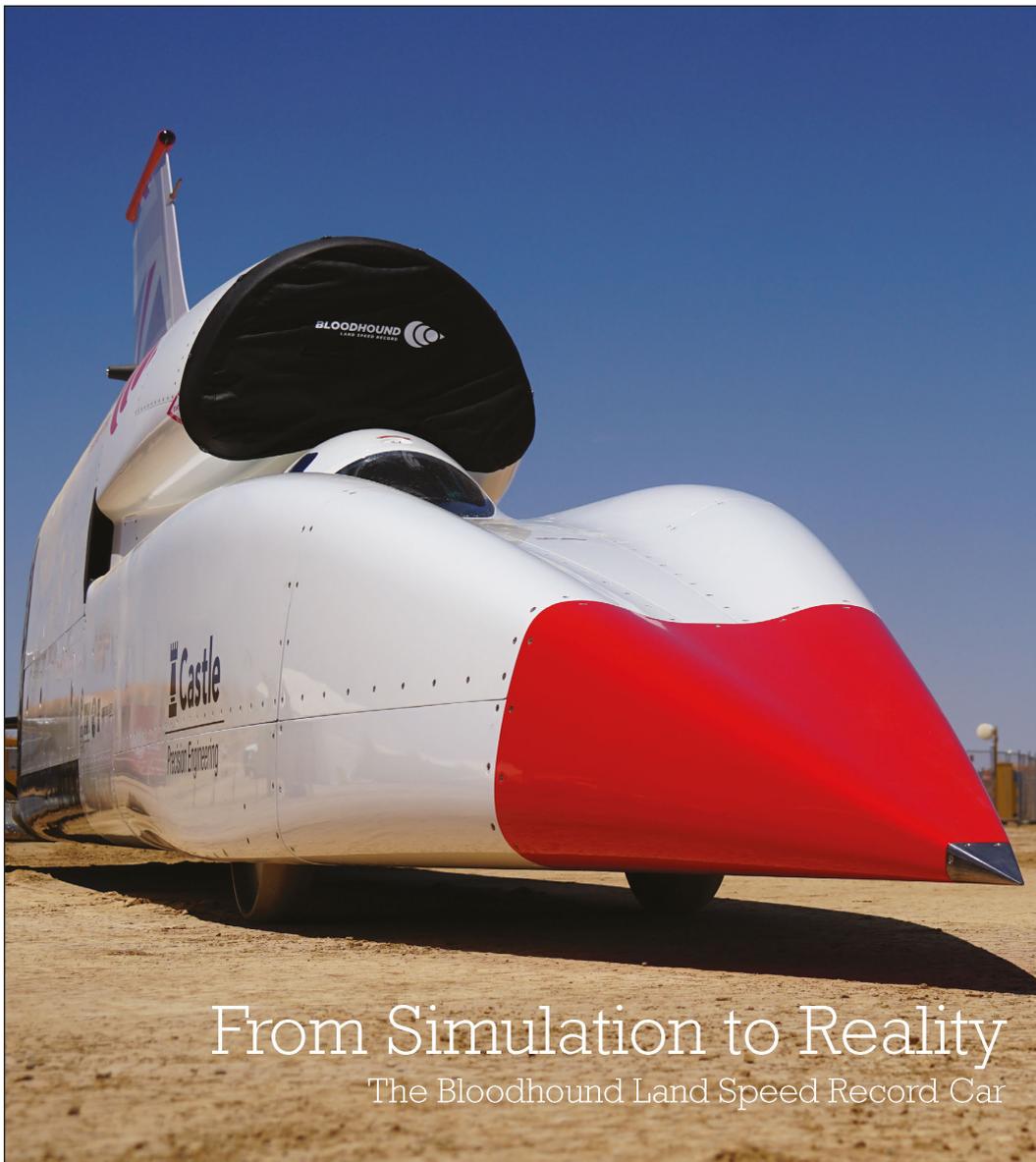
[www.nafems.org/publications/benchmark](http://www.nafems.org/publications/benchmark)

# BENCH MARK

### April 2020 issue . . .

- Things Have Changed
- Overcoming COVID-19 Obstacles
- The Need for Speed to Reconcile Rationalism and Empiricism in a Data Rich World
- Electromagnetic Design and Physical Validation of a Micro Wind Turbine Energy System
- What is System CFD?
- Strength Reduction Technique with Finite Element Method for Slopes Without Stabilisation Measures
- Faster than the Wind - Americas Cup Wing Design Process

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



From Simulation to Reality  
The Bloodhound Land Speed Record Car

# DIGITAL ENGINEERING MAGAZIN

LÖSUNGEN FÜR KONSTRUKTEURE, ENTWICKLER UND INGENIEURE + INDUSTRIE 4.0 | INTERNET DER DINGE



Wir sind immer für Sie da - auch im Homeoffice!

Und jetzt, während der Corona-Krise, bieten wir unser

DIGITAL ENGINEERING Magazin

kostenfrei als ePaper an

Einfach hier lesen oder herunterladen



**WIN**  
VERLAG

Solutions to Market

**#stayathomereadandlearn**

## ALTAIR

### Bedeutendste Software-Update seiner Geschichte bekannt

Altair hat das bedeutendste Software-Update seiner Geschichte veröffentlicht. Alle Altair Software Produkte wurden aktualisiert und bieten nun ein noch besseres Nutzererlebnis und zahllose neue Funktionen, darunter neue, intuitive Workflows, die es den Anwender\*innen ermöglichen, ihre Produktentwicklung zu verbessern, um ihre Produkte schneller zur Marktreife zu bringen.

### Altair übernimmt WRAP Software

Altair hat die Übernahme des WRAP Softwaregeschäftes vom schwedischen Unternehmen WRAP International AB bekannt gegeben. WRAP ist ein weltweit führender Anbieter von Softwaretechnologien zur Frequenzverwaltung und Funknetzplanung für zivile und militärische Organisationen.

### Inspire beschleunigt das simulationsgetriebene Design

Altair hat eine neue Version von Altair Inspire, die vollständig integrierte Design- und Simulationslösung des Unternehmens für generatives Design, vorgestellt, welche die Erstellung, Optimierung und Untersuchung innovativer, struktureffizienter Bauteile und Baugruppen beschleunigt. Die neueste Version bietet eine noch leistungsstärkere und zugänglichere Arbeitsumgebung und ermöglicht damit einen simulationsgetriebenen Designansatz, der Markteinführungszeiten verkürzt, Entwicklungszeiten reduziert und die Produktleistung optimiert.

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

## BETA CAE Systems

### BETA CAE Systems stellt Neere vor, die neue Plattform für Remote Arbeit

Das Ziel von weltweit agierenden Unternehmen ist es, nach effektiven Wegen zu suchen, um Produktentwicklungsprozesse zu rationalisieren. Der dazu notwendige Einsatz von Remote Kommunikations- und

Kollaborationssoftware im sich zurzeit stetig ändernden globalen, industriellen Umfeld ist bereits an seine Grenzen gestoßen. Zudem verschieben die aktuellen und außergewöhnlichen Umstände diese Grenzen weiter, da Unternehmen sich der Herausforderung stellen müssen, die Kontinuität von Arbeitsprozessen trotz des Einsatzes von Home-Office sicherzustellen. Die Bereitstellung von effektiven und professionellen Remote Kommunikations- und Kollaborationswerkzeugen ist somit wichtiger denn je geworden.

Mitglieder von Teams an unterschiedlichen Standorten und Fachrichtungen benötigen ein effizientes Medium, über das sie kommunizieren, Pläne erstellen oder Problemlösungen diskutieren können. Insbesondere auf dem Gebiet der Simulation im Ingenieurwesen ist die Entwicklung von Analysemodellen und die Auswertung von Ergebnissen auf verschiedenen Entwicklungsstadien bisher nicht so effizient wie erforderlich. Gleichzeitig bringt das Arbeiten und Kommunizieren aus der Distanz mit unzuverlässigen und unsicheren Plattformen Risiken und Vorbehalte mit sich.

BETA CAE Systems bringt Neere auf den Markt, eine neue Software mit dem Ziel, aktuelle Anforderungen zu erfüllen und Remote Arbeit und Kollaboration auf ein neues Niveau zu heben. Unser Ziel ist es, der Industrie die Möglichkeit zu bieten, sowohl in Unternehmen gespeicherte Daten und Informationen zu mobilisieren und verfügbar zu machen, als auch den Austausch von Wissen und Erfahrungen in einer geschützten Umgebung zu gewährleisten. Gleichzeitig beabsichtigen wir, neue Tools und Praktiken anzubieten, die die Fähigkeiten und die Effektivität von Methoden der Zusammenarbeit zu erweitern.

Neere ist eine lokal installierte, webbasierte Remote Kommunikations- und Kollaborationssoftware, die speziell auf Ingenieure zugeschnitten ist. Es erlaubt sowohl Remote als auch Teamarbeit und steigert die Produktivität durch die direkte Einbindung von Benutzern

aus aller Welt in eine sichere, unternehmensweite Webplattform für unterschiedliche Betriebssysteme. Diese Umgebung beinhaltet ein vollständiges Toolset zum Freigeben und Steuern von mobilen und Desktop-Workstations über einen Webbrowser. Es kontrolliert die Zugriffssteuerung und ermöglicht das Ausführen von Software, das Kommunizieren über Chats, Sprache sowie Live-Videos und gewährleistet somit den gemeinsamen Gedankenaustausch in virtuellen Umgebungen.

Neere ist in den BETA Produkten ANSA, META und META VR integriert und bietet eine vollständige Plattform für die Zusammenarbeit, die einen mühelosen Austausch von Wissen realisiert. Teams mit interdisziplinären Mitgliedern erlaubt es, bei technischen Meetings in Echtzeit zusammenarbeiten und somit Innovationen zu fördern und die virtuelle Produktentwicklung zu beschleunigen.

„Neere kommt genau zum richtigen Zeitpunkt. Auf der Grundlage unserer langjährigen Erfahrung mit der Art und Weise, wie unsere weltweiten Kunden und Partner arbeiten und unter Berücksichtigung derer Anforderungen und Engpässe haben wir ein Instrument geschaffen, welches die Effizienz und Wertschöpfung ihrer Teams auf einer vertrauenswürdigen Basis sicherstellt.“, sagt Sam Saltiel, CCO von BETA CAE Systems. „Es ist bemerkenswert, dass eine große Anzahl unserer geschätzten Kunden Neere bereits übernommen und eingesetzt hat als es sich noch in einer frühen Entwicklungsphase befand“. Neere ist weltweit bei BETA CAE Systems und seinen Geschäftspartnern erhältlich.

### Neue Versionen

Beta CAE Systems veröffentlichte kürzlich die neue Version 20.1.2 der ANSA, Epilysis, META und Komvos software suite.

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

## CADFEM

### Neue Ausgabe des Cadfem Journals erschienen

Die neue Ausgabe des Cadfem Journals ist da. Erfahren Sie in der jüngsten Ausgabe der Cadfem Journal, wie bei der Krones AG durch eine Customization der Ansys-Software eine sehr hilfreiche App entstanden ist. Über sie kann die Form und die Wanddicke von Krones PET-Flaschen von überall schnell und zuverlässig optimiert werden. Viele weitere Beiträge, unter anderem vom Armaturenhersteller Hansgrohe, von Liebherr oder zur Zusammenarbeit von Cadfem und SAP im Bereich der prädiktiven Wartung ergeben auch bei der neuen Ausgabe des Cadfem Journals ein gewohnt umfassendes Informationspaket zur Simulation. Wir wünschen Ihnen eine erkenntnisreiche Lektüre.

Bitte beachten Sie: Das aktuelle Heft gibt es nur als eBook oder pdf, natürlich kostenlos und barrierefrei.

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

## CARHS

### Der automotive CAE Companion 2020/21 als PDF verfügbar

Der neue automotive CAE-Companion liefert auf über 60 Seiten CAE-Wissen von Experten zu wertvollen Informationen zu Theorie und Anwendung der numerischen Simulation in der CAE-basierten Fahrzeugentwicklung. Zusätzlich informiert er Sie detailliert über unsere mehr als 70 Seminare und Konferenzen im CAE und Engineering.

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

## COMSOL

### Erster Online Comsol Day übertrifft alle Erwartungen

Der zum ersten Mal virtuell stattgefundenene Comsol Day am 5. Mai 2020 stieß auf äußerst positive Resonanz und übertraf die Erwartungen der Veranstalter bei Weitem. Die nationale Veranstaltung, die eine Plattform für den Gedankenaustausch zu Themen wie Elektroma-

gnetik, chemische Reaktionen und Batteriesimulation bot, verzeichnete über 350 Anmeldungen, darunter rund 75% Live-Teilnehmer.

Die Teilnehmer des Online-Events hatten die Gelegenheit, sich zu einer Vielzahl von Anwendungs- und Modellierungsthemen weiterzubilden. Eine Podiumsdiskussion mit Dr. Dirk Kähler (Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie), Lars Dammann (Comsol), Fabian Scheuren (Scheuren Simulation & Consulting GmbH) und Bojan Jokanović (SGL Carbon) bot Einblicke aus erster Hand über die Vorteile und Herausforderungen beim Einsatz von Simulations-Apps. Weitere Highlights der virtuellen Veranstaltung waren spannende Keynote-Vorträge zu Produktdesign und Forschung von Referenten der Comsol Community. Wie das Prinzip der chemischen Konversion von Hüttengasen funktioniert, verdeutlichte Dr.-Ing. Stefan Schlüter, Bereich Prozesse Fraunhofer UMSICHT, am Beispiel der Methanol- und Harnstoffsynthese. Toni Lopez, Lumileds GmbH, berichtete über Perspektiven der Multiphysik-Modellierung für hochauflösende LED-Licht-Engines.

„Es war mein erster Comsol Day im Online-Format“, sagte Toni López von Lumileds Germany GmbH. „Dies ist ein großartiges Beispiel für die Anpassung an unsere neue Zeit mit sehr interessanten Neuerungen wie der Förderung des Fernaustauschs von Modellen über Apps.“

„Tolles Format für alle Nutzer - Der Comsol Day ist durch die Aufgliederung in parallele Sessions und die damit erreichte Themenvielfalt sowohl für Einsteiger als auch für fortgeschrittene Comsol User wertvoll“, sagte Fabian Scheuren von Scheuren Simulation & Consulting GmbH und Teilnehmer der Podiumsdiskussion. „Wer in die Simulation mit Comsol Multiphysics einsteigen will, sollte dieses Event auf jeden Fall besuchen.“

Sie haben auch Interesse mehr über die neuesten Möglichkeiten und Anwendungsbeispiele der Comsol Simulationswelt zu erfahren? Der nächste Online Comsol Day findet bereits am 9. Juni 2020 statt,

die Teilnahme ist kostenfrei. Die Teilnehmer erwarten umfassende Multiphysik-Modellierungstrainings sowie aufschlussreiche Vorträge und Diskussionen von Simulationsexperten aus der Comsol Community. Hier geht es zu Anmeldung. Bitte beachten Sie bei Ihrer Anmeldung, dass die einzelnen Comsol Days unterschiedliche Themenschwerpunkte setzen.

Weitere Termine und Informationen finden Sie unter <https://www.comsol.de/comsol-days>

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

## DASSAULT SYSTEMS

### Multibody System Simulation Software Simpack – Release v2021

Simpack, Teil der Simulia Produktpalette von Dassault Systèmes ist die führende Multibody System Simulation (MBS) Software für mechanische und mechatronische Designs im Bereich Virtual Prototyping und 3D-Simulation.

Simpack steht für nichtlineare Mehrkörpersimulation für Analysen von System-Dynamik, Bauteil-Lebensdauer unter dynamischer Last und Komfort/NVH Verhalten im hochfrequenten Bereich. Neben der Berücksichtigung flexibler Körper (lineare und nichtlineare Deformation) und detaillierter Kontaktabbildung sind eine Vielzahl anwendungsspezifischer Module und Modellierungselemente (z.B. Gear Pair, Lagermodellierung, Rail-Wheel Contact, Reifen-Modellierung...) vorhanden. Die Simulation von Automobilen, Motoren und Antriebssträngen, Nutz-, Schienen- und Luftfahrzeugen sowie von Windkraftanlagen stellen nur einige Anwendungsgebiete von Simpack dar.

Simpack ist über die Power'By Funktionalität an 3DEXperience, die einheitliche Software-Plattform von Dassault Systèmes angebunden. Diese ermöglicht dem Nutzer Simpack Simulationsergebnisse zu Kollaborationszwecken zu speichern. Außerdem kann der Nutzer eine vorhandene 3D Design Produkt Struktur in Simpack öffnen und um

eine MBS Modellierung erweitern. Ende Mai wurde das neue Release „Simpack 2021“ veröffentlicht. Neben Usability Verbesserungen in Simpack Pre und Post enthält das Release auch zahlreiche funktionale Erweiterungen im den Bereichen (Electric) Drivetrain, Powertrain, Rad/Schiene und allgemeiner Kontaktmodellierung.

Hier die wichtigsten funktionalen Erweiterungen im Überblick:

- Verbessertes Handling für Stillstand Simulation im Rad/Schiene Kontakt und modal reduzierte flexible Tracks
- Benutzerdefinierte Rollen-Profile und erweiterte Ausgabeoptionen für Wälzlagersimulation
- Importer für REXS Getriebe Austauschdaten
- Global thermal Balance für EHD Simulationen
- Erweitertes Elektromagnetik Interface zur Hochlaufsimulation für elektrische Antriebsstränge

Erfahren Sie mehr auf unseren Produkt- und Release-Webseiten.

Simpack Product: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/simpack/>

Latest Release: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/simpack/latest-release/>

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

## DYNAMORE

### Bleiben Sie auf dem Laufenden - mit den Online-Angeboten von DYNAMore

Die durch das Coronavirus verursachte Situation stellt uns alle vor zahlreiche Herausforderungen. Auch DYNAMore hat seine Dienstleistungen rund um LS-Dyna der aktuellen Lage angepasst und das Online-Angebot mit Webinaren und Seminaren erweitert.

Da derzeit keine Präsenzseminare stattfinden können, werden bis zum Ende der durch das Coronavirus verursachten Ausnahmesituation verschiedene Online-Schulungen von DYNAMore angeboten. „Unsere Seminare und Schulungen sind für unsere Kunden und uns sehr wichtig. Deshalb haben wir uns dazu

entschlossen, möglichst viele Inhalte als Online-Kurse und Webinare anzubieten“, erklärt Dr. Maik Schenke, verantwortlich für die Schulungsorganisation bei DYNAMore.

Zusätzlich zu den schon angebotenen Webinaren wird es ab sofort in regelmäßigen Abständen Webinare zu diversen Themen rund um LS-Dyna und LS-Opt geben. Die Teilnahme an den ungefähr einstündigen Webinaren, die unter dem Motto „DYNAMore Express“ auf der Webseite unter [www.dynamore.de/de/fortbildung/seminare](http://www.dynamore.de/de/fortbildung/seminare) zu finden sind, ist kostenlos.

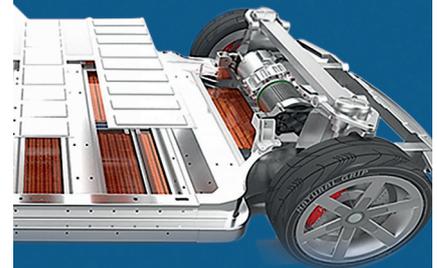
Ein weiteres kostenloses Angebot ist ein mehrteiliges Webinar des Kurses „Einführung in LS-Dyna“. Die Webinar-Reihe fasst die wichtigsten Themen des Einführungsseminars kompakt zusammen. Das Angebot richtet sich an Simulationsingenieure ohne Vorkenntnisse und gibt eine schnelle Einführung in LS-Dyna und LS-PrePost. Der Fokus des Webinars liegt auf den Grundlagen der Simulationstechnik, außerdem wird ein Einblick in die Struktur der LS-DYNA-Inputdecks sowie häufig verwendete Elementtypen und Kontaktdefinitionen vermittelt. Anhand praktischer Beispiele werden die erlernten technischen Hintergründe vertieft. Weitere Informationen und die Anmeldung unter [www.dynamore.de/web-Isdyna-kompakt](http://www.dynamore.de/web-Isdyna-kompakt)

Neben den kostenfreien Angeboten wird der Kurs „Einführung in LS-Dyna“ zukünftig auch dauerhaft als Online-Seminar angeboten. Hierzu haben wir das dreitägige Seminar in Stuttgart aufgezeichnet. Die Aufzeichnung entspricht inhaltlich also dem tatsächlich gehaltenen Seminar. Insgesamt sind es elf Kapitel, die einzeln angeschaut werden können. Die Anmeldung verläuft genau wie bei einem herkömmlichen Seminar über die DYNAMore Webseite unter [www.dynamore.de/intro-Isdyna-komplett](http://www.dynamore.de/intro-Isdyna-komplett). Nach Eingang der Seminargebühren erhalten die Teilnehmer die Seminarunterlagen per Post zugeschickt. Den Zugang für die Videos erhält man mit der Seminarbestätigung.

Außerdem steht der Kurs „Crashworthiness Simulation with LS-

**3S DASSAULT SYSTEMES**

## SIMULATION FOR ELECTRIC VEHICLES



- eSeminars
- Papers
- Case Studies
- **Coming Events**

## Discover Solutions for Electric Vehicle Engineering

Visit our Website  
[go.3ds.com/TrustTheDrive](http://go.3ds.com/TrustTheDrive)



3DEXPERIENCE

Dyna“, gehalten von Paul Du Bois, ebenfalls als Online-Seminar zur Verfügung. Auch hier wurde das viertägige Seminar in Stuttgart aufgezeichnet, so dass inhaltlich keine Unterschiede zum tatsächlichen Kurs bestehen. Die Anmeldung und mehr Informationen sind hier zu finden: [www.dynamore.de/crash-online](http://www.dynamore.de/crash-online).

Beide Online-Seminare sind auf englischer Sprache gehalten. Aus umsatzsteuerrechtlichen Gründen stehen die kostenpflichtigen Online-Seminare nur kommerziellen Kunden zur Verfügung. Studenten und Privatpersonen sind von der Nutzung ausgeschlossen.

Über weitere neue Angebote und andere Neuigkeiten rund um unsere Produkte und Dienstleistungen informieren wir regelmäßig in unserer Infomail, dem DYNAMore Newsletter. Anmeldung unter [www.dynamore.de/newsletter](http://www.dynamore.de/newsletter).

Wir hoffen, dass für alle LS-Dyna Nutzerinnen und Nutzer das passende Webinar oder Seminar dabei ist und unser Online-Angebot auf positive Resonanz stößt. Kommen Sie gut durch diese besondere Zeit und bleiben Sie gesund.

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

### IMDEA Materials und Hexagon entwickeln Zukunftstechnologien für Metallherstellung und Produktdesign mit 10X ICME

e-Xstream engineering, Teil der Hexagon Manufacturing Intelligence Division, gibt seine Partnerschaft mit dem IMDEA Materials Institute bekannt. In der 10X Integrated Computational Material Engineering (ICME) Lösung wird die branchen-

weit erste Mikrostrukturmodellierung für Metalle unterstützt.

Integrated Computational Materials Engineering (ICME) wird die Fertigung, wie wir sie kennen, verändern. Es ist eine Entwicklungslösung, die mehrere Simulationsdisziplinen umfasst und einen Schritt weitergeht, um die Herausforderungen der OEMs (Original Equipment Manufacturer) wie Zeit, Kosten oder Verfügbarkeit von Daten bei der Herstellung des 'perfekten' Bauteils anzugehen. ICME löst die Grenzen zwischen Materialentwicklung, Design- und Fertigungsprozessen auf und optimiert das Bauteil durch Integration von Herstellung, Material- und Produktverhalten.

Das renommierte IMDEA Materials Institut in Madrid bringt seine Erfahrung ein, um die Genauigkeit und den Umfang von ICME bei der Modellierung der Mikrostruktur von Metallen zu erweitern – in der kommerziellen Fertigung ein bisher weitgehend unerforschtes Gebiet. Trotz der industriellen Reife der Metalltechnik berücksichtigen die meisten Firmen derzeit die Mikrostruktur nicht bei der Herstellung, was später das Verhalten und die Widerstandsfähigkeit des Bauteils stark beeinträchtigen kann.

Mit genaueren Modellen können OEMs die Qualität ihrer Metallbauteile verbessern, Abfall reduzieren und effizientere, durchgängige Design- und Entwicklungsprozesse konzipieren. Dabei erfolgt der Großteil der Entwicklungsarbeit per Simulation, um Prototypen und echte Versuche zu sparen. Die Optimierung der Bauteile durch effektiveren Materialeinsatz hilft den Metallherstellern im Wettbewerb mit neueren Materialien wie Verbundwerkstoffen und Keramik.

Roger Assaker, CEO von e-Xstream engineering, sagt: "Es ist die Breite und Tiefe der Hexagon 10X ICME Lösung, die es ermöglicht, die Fertigungsindustrie zu revolutionieren. Heute liegt der Schwerpunkt bei polymerbasierten Verbundwerkstoffen. Doch mit der Unterstützung von Partnern wie IMDEA Materials – einem echten Pionier auf dem Gebiet – wollen wir die Vorteile von ICME

nutzen, um Design und Innovation mit jedem Material zu verbessern, dessen Eigenschaften noch nicht genug berücksichtigt und genutzt werden und das den Herstellern helfen kann, bessere Produkte zu erzielen."

IMDEA Materials forscht an topaktueller Materialwissenschaft und ist ein Markenzeichen für herausragende Leistungen in der Materialentwicklung. Seine unvergleichlichen Einblicke in die Modellierung des elastoplastischen Verhaltens von Basislegierungen auf Kristallebene werden ICME für Metalle ergänzen und die multiskalare Modellierung in Digimat erweitern, welche eine Grundlage der 10X ICME Lösung darstellt.

Beim Umformen und Verarbeiten von Metallbauteilen entstehen vielfältige Mikrostrukturen im Bauteil, charakterisiert durch Korngröße, -form und -orientierung. Mit den im 10X ICME Ökosystem integrierten IMDEA-Materialmodellen gewinnen Anwender das Verständnis, warum sich diese Strukturen bilden und wie sie sich auf das Verhalten des finalen Bauteils auswirken. Diese Einsichten können dann verwendet werden, um die in der Lösung integrierten Design-, Entwicklungs- und Testfunktionalitäten zu erweitern und die Hersteller frühzeitig in der Produktentwicklung bei bewussten Entscheidungen zu unterstützen – beispielsweise um 3D-Druckprozesse im Hinblick auf bessere Materialeigenschaften der Metalle zu gestalten.

Laurent Adam, Leiter der Forschung & Entwicklung bei e-Xstream engineering sagt: "In unserer Partnerschaft mit IMDEA Materials werden wir weiter an der Verbesserung der Bausteine für Metall-ICME zusammenarbeiten. Zurzeit konzentriert sich unsere Forschung & Entwicklung auf die Vorhersage, wie diese modernen Metallwerkstoffe sich unter bestimmten Belastungen, wie dem Kriechen, verhalten, und auf die Entwicklung effizienter numerischer Methodik für die Materialschädigung."

Ignacio Romero, Direktor des IMDEA Materials Instituts, kommen-

tiert: "Bis jetzt war ICME zum großen Teil eine akademische Übung. Einer der Grundpfeiler von IMDEA ist die Zusammenarbeit mit der Industrie, die Weitergabe unseres Wissens über hochentwickelte Werkstoffe, um Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen, und Technologieführerschaft zu behaupten. Wir sind begeistert, dass unsere Ergebnisse zur ersten industrialisierten ICME-Lösung beitragen. Wie unsere Forschung zeigt, hat dieser Ansatz großes Potential, die Fertigungsindustrie insgesamt voranzubringen.

Die Erfahrung unserer Wissenschaftler deckt einen weiten Bereich von Simulationstechniken in verschiedenen Skalen ab, von der atomaren Ebene bis hin zum Kontinuum, unterstützt von Hochleistungsberechnung sowie hochmodernen Laboratorien für mikroskopische Charakterisierung und mechanische Tests vor Ort. Wir freuen uns auf die Ergebnisse der gebündelten Kompetenzen von uns, Hexagon und e-Xstream."

**FTI verkürzt Markteinführungszeit von Blechteilen**

Forming Technologies (FTI), Teil der Hexagon Manufacturing Intelligence Division, stellt neue Funktionalitäten für die virtuelle Fertigung vor. Mit der FormingSuite Software von FTI lässt sich die Prozesssimulation für die Blechumformung effizienter aufsetzen – dank CAD-Interoperabilität und Hexagon-3D-Scans.

Die FormingSuite Software ermöglicht es Herstellern die Werkzeug- und Materialkosten in der Blechverarbeitung besser abzuschätzen sowie die Designumsetzung zu beurteilen. So können sie kostspielige Produktänderungen vermeiden und die Markteinführungszeit verringern. Mit den neuen Features in der Version FormingSuite 2020 können Kosteningenieur, Entwickler und Werkzeugbauer schon frühzeitig im Designprozess produktiv zusammenarbeiten und genauere virtuelle Tests durchführen.

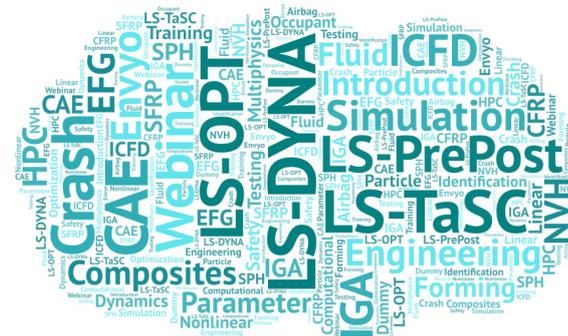
Stanzwerkzeuge werden während der Testphase häufig durch Abschleifen und Tuschieren verändert, bevor sie in den produktiven Einsatz



**WISSEN AUF EINEN KLICK.**

**Das Online-Schulungsangebot von DYNAMore**

Ob ausführlich, zeitsparend oder kompakt - die drei unterschiedlichen Online-Schulungsangebote von DYNAMore bieten für jeden Anspruch und jedes Anwendungsgebiet die ideale Lösung.



**Video-Seminare**

Unsere praktischen Video-Seminare bieten maximale Flexibilität bei kompletten Inhalten. Sie sind das ideale Schulungsangebot für Ingenieure, die eine vollständige Schulung erhalten wollen, jedoch auf Anreise und Übernachtung verzichten möchten.

**Einführung in LS-DYNA**

Dieses Seminar bietet einen umfassenden und vielseitigen Einblick in die Anwendungen von LS-DYNA. Es richtet sich an Berechnungsingenieure, die LS-DYNA als FE-Code zur Simulation von allgemeinen nichtlinearen Fragestellungen verwenden möchten. Vorkenntnisse sind nicht erforderlich.

- Umfang: 3 Seminar-Tage (11 Kapitel und 11 Übungen)
- Tutoren: Dr. Maik Schenke (DYNAMore), Dr. Steffen Mattern (DYNAMore)
- Termine: jederzeit
- Gebühr: 1.575,- Euro zzgl. ges. MwSt.

[www.dynamore.de/c2076d](http://www.dynamore.de/c2076d)

**Crashworthiness Simulation with LS-DYNA**

Das Seminar richtet sich an erfahrene Berechnungsingenieure, die bereits über Kenntnisse in der Anwendung von LS-DYNA oder anderen expliziten FE-Programmen verfügen. Den Teilnehmern werden unterschiedliche Modellierungsmöglichkeiten vorgestellt. Es wird gezeigt, wie LS-DYNA für die Crashesimulation in der Automobilindustrie eingesetzt wird und welche Vereinfachungen wann sinnvoll sind.

- Umfang: 4 Seminar-Tage (15 Kapitel)
- Tutor: Paul Du Bois (Consultant)
- Termine: jederzeit
- Gebühr: 2.400,- Euro zzgl. ges. MwSt.

[www.dynamore.de/c2011d](http://www.dynamore.de/c2011d)

**Webinar-Reihe „LS-DYNA Kompakt“**

Die Webinare unserer Reihe „LS-DYNA Kompakt“ fassen die wichtigsten Punkte eines Themas zusammen und geben in geringer Zeit einen ersten Überblick in die jeweilige Thematik.

**LS-DYNA Kompakt**

Mehrteilige Webinare, die den Inhalt eines Präsenzseminars kompakt behandeln.

- Dauer: ca. 2 Stunden je Einheit
- Termine: regelmäßig
- Gebühr: 200,- Euro zzgl. ges. MwSt. pro Einheit.

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

**Webinar-Reihe „DYNAMore-Express“**

Mit unseren kostenfreien Webinaren können sich Interessierte schnell und unkompliziert über aktuelle Trends und Entwicklungen über LS-DYNA informieren.

**DYNAMore Express**

Etwa einstündige, kostenfreie Webinare, die über aktuelle Themen informieren.

- Dauer: ca. 1 Stunde
- Termine: regelmäßig
- Gebühr: keine
- Youtube: <https://bit.ly/3bqPb2A> (Playlist DYNAMore Express).

[www.dynamore.de/ex2020](http://www.dynamore.de/ex2020)

**kostenfrei**

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

gehen, so dass die ursprüngliche CAD-Konstruktion somit nicht mehr stimmt. Anwender können nun erstmals FormingSuite mit den 3D-Messsystemen von Hexagon verbinden, um jedes Werkzeug rasch zu scannen und diese Änderungen zu erfassen. Danach werden die echten Fertigungsparameter zurück in den virtuellen Test – die Simulation – integriert und die gescannten Daten fließen direkt in die Berechnung mit ein, um den Stanzvorgang exakt zu validieren.

Einige Hersteller benötigen in ihren Transferpressen zwei verschiedene Formplatinen. Diese sind mit Schwenkwerkzeugen, Taktförderern und rotierenden Stationen ausgestattet, so dass auch rechteckige, trapezförmige, schräg zugeschnittene und parallelogrammförmige Bleche sowie Formplatinen in derselben Presse mit großem Pressentisch verarbeitet werden können.

Eine neue Methode vereinfacht das Aufsetzen von Modellen für die Kosten- und Werkzeugoptimierung für Prozesse mit zwei individuellen Coils. Außerdem sparen Ingenieure Zeit, indem sie Herstellungskonzepte in FormingSuite optimieren und dann die Stanzmatrizengeometrie vom Stufenwerkzeug sowie das Layout des Folgeverbundwerkzeugs direkt in ihr CAD-System exportieren, als Basis für ihre Konstruktion. Mit den neuen Features können Hersteller Prozesssimulationen genauer und einfacher aufsetzen: wiederkehrende Aufgaben lassen sich automatisieren und die Designtools bieten flexiblere Möglichkeiten. Mit dem neuen leistungsfähigen Sketch Web Tool können Ingenieure schnell und exakt eigene Blechformen abseits der Standardformen zeichnen. Außerdem erhöht die automatische und benutzerdefinierte Netzverfeinerung beim Schneiden die Modellgenauigkeit. Beim Evaluieren der Materialausnutzung können Designänderungen nun automatisch auf die gegenüberliegende, symmetrische Seite des Teils angewendet werden. All diese Erweiterungen, kombiniert mit verfeinerten Methoden für die Berechnung und Kostenkalkulation in der Software, ermöglichen den

Herstellern, schon in der Planungsphase bessere Fertigungsentscheidungen zu treffen.

Andy Melang, Business Development Manager bei Ultratech, sagt dazu: „Einer unserer Kunden kam mit einer kleinen Halterung zu uns, die nachträglich zu einem neuen Gestell hinzugefügt werden sollte. Die Werkzeuge für die Herstellung des Gestells wurden größtenteils in China gebaut, doch wegen der knappen Zeit wurde die Arbeit jetzt lokal durchgeführt. Unser Kunde benötigte eine schnelle Lösung, da das Werkzeug in 12-16 Wochen gebaut werden musste. Dank FormingSuite Costoptimizer Professional konnten wir ihm in nur wenigen Stunden, ohne zeitraubende zusätzliche Beratung durch unseren Werkzeugkonstrukteur, die Kostenaufstellung sowie die Gesamtkosten schicken. Auf diese Weise stellten wir nicht nur unsere schnelle Reaktionsfähigkeit, sondern auch unsere Professionalität unter Beweis.“

„Etwa 70 % aller kostenrelevanten Entscheidungen werden schon in der Entwurfsphase getroffen. Wenn man die Fertigung optimiert, bringt das einen hohen Gewinn bei der Massenproduktion“, so Hendrik Schafstall, CEO von simufact engineering GmbH. „Unser Ziel bleibt es, intuitiv und gut zugänglich für alle Anwender zu sein, die besseres Prozesswissen benötigen, das müssen keine CAE-Experten sein. Die neuen Features in FormingSuite verbessern die Produktivität und die Wettbewerbsfähigkeit unserer Kunden, weil sie schon vorab bessere Entscheidungen treffen und damit ihre Produkteinführungszeit verkürzen können.“

FormingSuite 2020 ist jetzt auf der FTI-Website forming.com für Kunden verfügbar, es gibt auch kostenlose Testlizenzen.

### **Neue Lösung verdoppelt das Tempo der technischen Innovation**

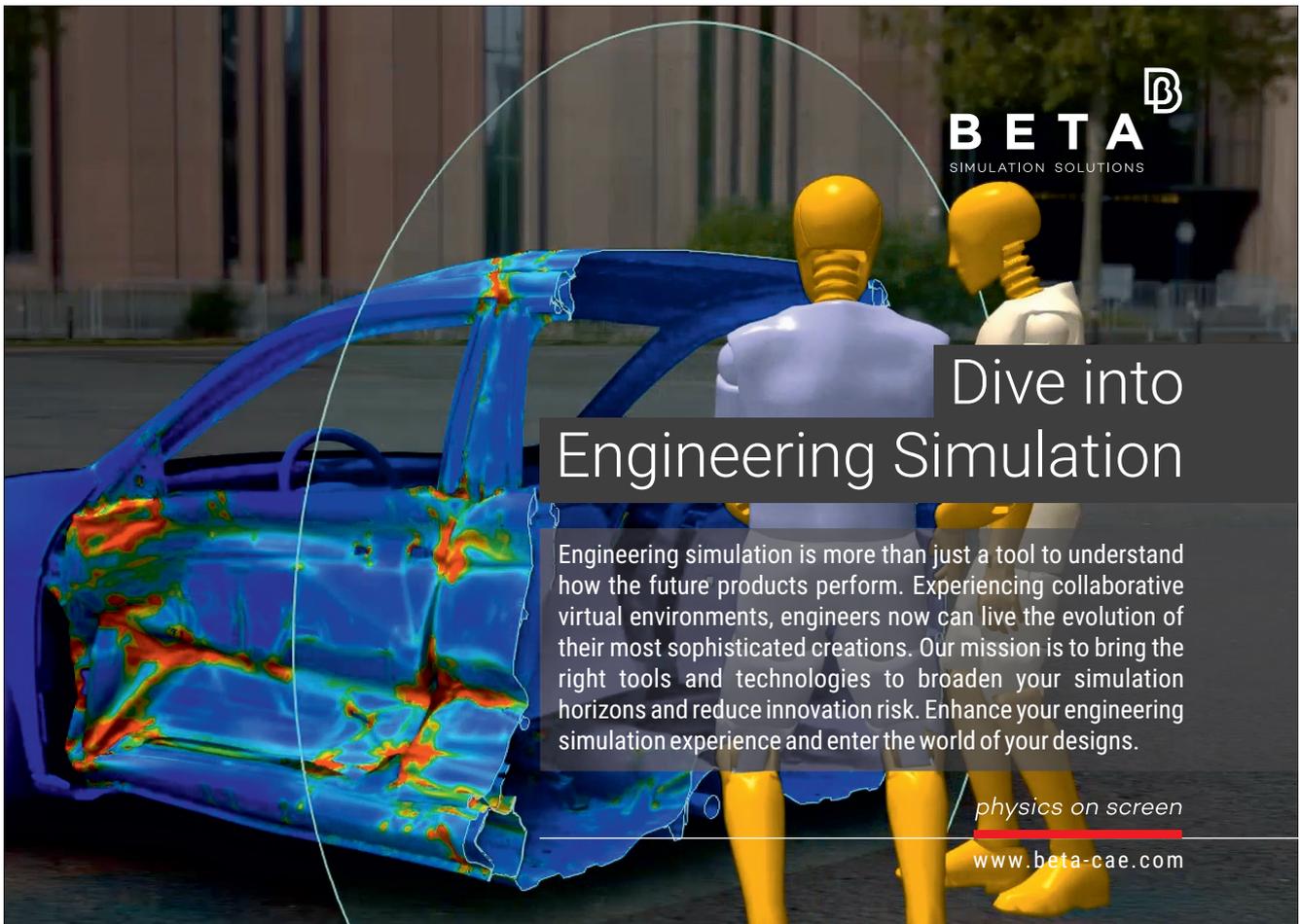
e-Xstream engineering, Teil der Hexagon Manufacturing Intelligence Division, hat die neue 10X Integrated Computational Material Engineering (ICME) Lösung vorgestellt, welche

die wissenschaftliche Forschung mit führender Software, Prüf- und Messtechnologien verbindet. Damit werden Neuentwicklungen deutlich beschleunigt, die Hersteller können Bauteile dank Simulation durchgängig virtuell entwerfen, entwickeln und testen.

Integrated Computational Material Engineering (ICME) ist eine Zukunftstechnologie, die eine optimale Verbindung von Materialien und Fertigungsprozessen gewährleistet und damit die Produktentwicklung innovativer und effizienter macht.

10X ICME von Hexagon bietet der Industrie das umfassendste und durchgängigste Lösungsportfolio, um das ganze ICME-Potential zu nutzen. Es ist die erste industrialisierte ICME-Lösung, mit welcher die Firmen die ideale Kombination von Materialien und Fertigungsprozessen ausschöpfen können, um Neues zu entwickeln und die Performance zu maximieren, und dadurch Kosten und Produktdurchlaufzeiten zu reduzieren. Durch die Integration von Konstruktion, Entwicklung und Test können die Hersteller schon zu einem frühen Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess informierte Entscheidungen treffen, mit denen die Qualität verbessert oder Abfall reduziert wird. So werden Daten nutzbar für effizientere, zusammenhängendere Konstruktions- und Entwicklungsworkflows.

Mit ICME können hochentwickelte Materialien wie Kohlefaser-Verbundwerkstoffe ausgewählt und ihr ganzes Potential genutzt werden, da mit besseren Daten und besserer Modellierung die Genauigkeit und damit das Vertrauen in Materialsimulationen steigen. Dank 10X ICME lässt sich nun vorhersagen, wie Kombinationen von komplexen Materialien, z.B. Faserverbund, und Fertigungsmethoden vom Spritzguss bis zum 3D-Druck sich durchgehend auswirken, auf die Geschwindigkeit bis hin zur Nachhaltigkeit zukünftiger Flugzeuge und Autos. Es sind weniger Materialtests nötig, und Messungen werden mit Simulation korreliert, so dass die Hersteller ihre Simulationen einfacher validieren können. Ein weiterer Vorteil ist die



**BETA**  
SIMULATION SOLUTIONS

## Dive into Engineering Simulation

Engineering simulation is more than just a tool to understand how the future products perform. Experiencing collaborative virtual environments, engineers now can live the evolution of their most sophisticated creations. Our mission is to bring the right tools and technologies to broaden your simulation horizons and reduce innovation risk. Enhance your engineering simulation experience and enter the world of your designs.

*physics on screen*  
[www.beta-cae.com](http://www.beta-cae.com)

gute Auswahl an Materialdaten: den Ingenieuren stehen genaue Werte zur Verfügung statt nur Näherungswerte. Damit bleibt mehr Spielraum, die Konstruktion zu optimieren.

Die digitale Integration durchgängiger Lieferketten reduziert auch den Materialabfall, da Anwender wesentlich weniger auf umfangreiche Prototypentests zurückgreifen müssen und Überdimensionierung vermieden wird. Ein einziger materialzentrierter 'digitaler Zwilling' der gesamten Fertigungslinie, von der Materialentwicklung bis zum fertigen Bauteil, ermöglicht es Firmen, die Funktionsfähigkeit des finalen Produktes schon in der Entwurfsphase vorherzusagen. Hier bieten sich auch Methoden, auf den Daten basierend die Verbundmaterialien weiter an spezielle Ziele wie Wiederverwertbarkeit oder Energieeffizienz anzupassen.

10X ICME sorgt für mehr Innovationen: bahnbrechende neue Technologien wie leichtgewichtige

Nurflügler oder ultraleise elektrische Fahrzeuge lassen sich nun viel schneller entwickeln. Die Lösung ist bereits bei einem großen Flugzeughersteller und Autoherstellern (OEMs) im Einsatz, um die Zeit von einem neuen Designkonzept bis zur Umsetzung zu reduzieren. Die ersten Kundenprojekte mit diesem neuen Ansatz werden in der Hälfte der Zeit und zu einem Drittel der Kosten abgeschlossen.

Die 10X ICME Lösung basiert auf 10 Säulen, welche die verschiedenen ICME-Technologien vom Ökosystem bis zu speziellen Anwendungsfällen abdecken. Hersteller können die Säulen wählen, die heute für sie am relevantesten sind, und ihre Lösung nach ihrem Bedarf anpassen, wenn sich Bedarf für weitere Disziplinen und Prozesse zeigt.

In enger Zusammenarbeit mit Originalherstellern (OEMs) und Materialherstellern für ihre industriellen Anwendungen entwickelt, nutzt 10x ICME die aktuellste Material-

forschung, die Messtechnik von Hexagon, die Materialsimulationstechnologien von e-Xstream und ein wachsendes Netzwerk von Industriepartnern. Es integriert die Lieferketten von Materialzulieferern, Softwaretools, Produktionsanlagen und Messtechnik, um Daten bestmöglich zu verwenden und viele Fertigungsumgebungen realistisch abzubilden.

Dr. Waruna Seneviratne, Direktor beim National Institute for Aviation Research (NIAR), erklärt: „Bei unserer Entwicklung multifunktionaler Materialien und Prozesse ist es entscheidend, dass wir verstehen, wie molekulare Veränderungen die Struktureigenschaften beeinflussen. Auch wenn es unpraktisch ist, Mikroskalenmodelle auf Strukturlevel zu entwickeln, ist die multiskalare Modellierung, die wertvolle Informationen für die folgenden Modelle auf nächsthöherem Level liefert, maßgeblich für das Verständnis von Konstruktionsproblemen, die

Optimierung von Strukturen und die Risikominderung, bis hinauf zum fertigen Design und zur Zertifizierung.“ Dr. Jan-Anders Mansson, Distinguished Professor für Werkstoff- und Verfahrenstechnik an der Purdue University, sagt: „Wir arbeiten mit Hexagon und e-Xstream zusammen, um innovative Messtechnik, digitale Technologie und Materialwissenschaft zu integrieren, eingebettet in unsere experimentelle Fertigung mit der modernen Smart Factory Hardware und Software von Hexagon. Das Ziel ist jetzt, eine digitale Parallele zu dem gesamten durchgängigen Workflow von Konstruktion bis Fertigung zu entwickeln. Dann können wir herein- und herauszoomen, vom Makro- zum Mikrolevel, von der Serienfertigung bis zur einzelnen Zelle.“

Roger Assaker, CEO, e-Xstream engineering, kommentiert: „Indem wir OEMs, Universitäten, Materialhersteller und Technologiepartner in einem businessorientierten Ökosystem zusammengebracht haben, konnten wir die einzigartige, durchgängige 10X ICME Lösung entwickeln, mit der die Early Adopters ihre Projekte in der Hälfte der Zeit und zu einem Drittel der Kosten abschließen konnten. Wir glauben, die Verbindung von Materialeinblicken mit der Strukturentwicklung wird die Industrie 4.0 beschleunigen. Neue Produkte werden effizient, sicher und nachhaltig, bevor überhaupt der erste Prototyp gebaut ist.“

Guillaume Boisot, Leiter Business Development bei e-Xstream engineering, ergänzt: „ICME wird es Autoherstellern ermöglichen, den Einsatz von Verbundwerkstoffen in ihren Entwicklungsprozessen zu optimieren, so dass leichtere und effizientere Fahrzeugdesigns entstehen, sowie materialzentrische Innovationen für neue Mobilitätslösungen. Schon wenn wir nur die vorhandenen Fahrzeugdesigns betrachten, wird der optimierte Einsatz von Faserverbundwerkstoffen den Herstellern durchschnittlich 22,5 kg Materialabfall pro Fahrzeug einsparen – das sind 2,1 Millionen Tonnen weniger Verbundmaterialien, die weltweit pro Jahr in neuen Autos

verbaut werden. Hier liegt also eine riesige Chance, Abfall zu reduzieren und den Verkehr effizienter zu machen.“

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

## MVOID-GROUP

### Mvoid-Release 2.3 ist verfügbar!

Mvoid Technologies GmbH, die Experten für akustische virtuelle Produktentwicklung für Automotive, Professional und Consumer Audio, bringen die neueste Version 2.3 der Mvoid-Methodik (Automotive Audio und Professional Audio) auf den Markt. Die neue Version ist ab sofort verfügbar.

Die Mvoid-Version 2.3 erweitert die Produktpalette um die Prozessebene sechs im Bereich Automotive Audio. Diese Prozessebene ermöglicht die Messung von physikalischen Audioprodukten und ist Schlüsselement für die Erstellung von digitalen Zwillingen. Darüber hinaus wurden in der neuen Version (Automotive Audio und Professional Audio) zusätzliche Funktionen in den Mvoid-Prozessstufen eins bis fünf integriert. Diese bieten eine verbesserte Genauigkeit, erhöhen die Benutzerfreundlichkeit und ermöglichen eine engere Kopplung aller Funktionen.

Die Mvoid-Prozessebene sechs konzentriert sich auf Messungen an physischen Audio-Prototypen und -Produkten. Auf der sechsten Prozessebene wird ein mehrkanaliges akustisches Messsystem verwendet, das vollständig in Mvoids VRtool integriert ist. Es garantiert einen reibungslosen Übergang von virtuellen Prototypen zu physischen Prototypen. Sogar die Erstellung eines digitalen Zwillings des Audiosystems ist möglich.

Die Mvoid-Messmethode definiert einen robusten, wiederholbaren Prozess, der einen genauen und detaillierten Einblick in die mechanischen und performanten Merkmale von Audiokomponenten und -systemen bietet, einschließlich der akustischen Interaktion im Raum vor Ort. Der Messprozess in Mvoid-Level sechs ist entscheidend für das Ver-

ständnis der Fertigungs- und Montageausführung der Konstruktion und konvergiert die Implementierung der virtuellen Produktentwicklung in reale Audioprodukte durch einen robusten Validierungsprozess.

So kann beispielsweise die Fertigungsabweichung überwacht und bei Bedarf angepasst werden, um die Produktionsabweichung zu einem Referenzziel zu minimieren oder sind Analysen von Leistungsabweichungen bei Serienfahrzeugen abbildbar. Darüber hinaus werden Möglichkeiten der Wartung von Soundsystemen in Fahrzeugen durch einen digitalen Zwilling eröffnet. Mehr Information über den digitalen Zwilling finden Sie in unserem Fachbeitrag „Digital Twin: Use Case Automotive Audio“.

Optimierungen und zusätzliche Funktionen in Mvoid-Prozessebenen 1 – 5 im Überblick

- Erzeugung und Export von Ballonplots: Die neue Release 2.3 ermöglicht die Erzeugung und den Export von Ballonplots in Prozessebene 3 und 4 für eine verbesserte Visualisierung der Richtcharakteristik. Die Methode zeigt den Schalldruck oder die Schallleistung auf der Oberfläche in Kugelform farblich an.
- Ray-Tracing mit erweiterter Quellenmodellierung: Ray-Tracing-Methoden mit erweiterter Quellenmodellierung sorgen für eine noch genauere Raumakustik. Das neu integrierte Open-Source-Format CF2 ermöglicht eine Richtungsauflösung von 5 Grad und Frequenzbänder von 1/3 Oktave. Quellen können genauer definiert werden (räumlich und im Frequenzbereich).
- Automatisierte Simulationsergebnisse: Die automatische Nachbearbeitung berechnet die Schallleistung über der Frequenz für einen bestimmten oder alle ausgewählten Orte. Die Akustik-Experten erhalten sozusagen auf Knopfdruck eine Auswertung über den Schall bzw. Frequenz an einem bestimmten Punkt.

Möchten Sie mehr über die Version 2.3 von Mvoid erfahren? Unsere Experten beantworten gerne Ihre



## SMART VIRTUAL PROTOTYPING

Deeper data analytics. Animated systems. Virtual sensors for intelligent products. A fully immersive experience.

As a leading innovator in Virtual Prototyping, ESI brings your innovations to life through a realistic virtual experience of your product, as manufactured. This helps engineers secure a reliable solution in the virtual world, and save time in the real one.

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

ESI software and services  
enable your digital  
transformation

Fragen. Senden Sie eine E-Mail an [info@mvoid-group.com](mailto:info@mvoid-group.com).  
[www.mvoid-group.com](http://www.mvoid-group.com)

**TRANSVALOR**

**Simulationssoftware für den Gießereisektor: Thercast NxT 2.0**

Transvalor S.A., Marktführer in der Entwicklung und Vermarktung von Simulationssoftware für die Materialumformung, gibt die Einführung einer neuen Version seiner Thercast-Software bekannt. Wir freuen uns, die Einführung der neuen Version von Thercast bekannt zu geben. Ursprünglich hauptsächlich im Stahlsektor zur Untersuchung des Blockgießens und des Stranggießens verwendet, wird diese Lösung nun auf dem Markt für Gießereiteile eingeführt und bietet Gießern ein neues Simulationswerkzeug für eine höhere Leistung der Formteile.

Thercast kann bei den unterschiedlichsten Gießtechnologien angewendet werden, indem alle Gießphasen bis zum Ende der Verfestigung simuliert werden. Diese neue Version bietet prozessspezifische Simulationsmodelle wie Sand- oder Kokillenguss, Druck- / Niederdruckguss, Präzisionsguss mit Wachsausschmelzverfahren, Schleuderguss usw.

Die in ihrer Art einzigartige Software kann alle physikalischen und metallurgischen Phänomene kombinieren, indem sie sowohl die „Strömungsmechanik“ als auch die „Festkörpermechanik“ löst. Zu jeder Zeit während des Gießens und zu jedem Zeitpunkt im Teil bestimmt die Software genau den lokalen Zustand des Metalls (flüssig, pastös oder fest) und managed alle Wechselwirkungen mit den Komponenten der Form (Kerne, Stifte usw.). Dieser Ansatz bietet eine erhöhte Zuverlässigkeit bei der Vorhersage von Formfehlern (Schrumpfungen, Lunkern, Risse usw.) und garantiert, dass dynamische Ablösungen/Zwischenräume in der Wand berücksichtigt werden. Eine einzige Benutzeroberfläche für alle Gießereiprozesse erleichtert die Dateneinstellung und die Analyse der Ergebnisse und ermöglicht bei-

spielsweise die Visualisierung der Schrumpfung, der Porositäten oder sogar der Entwicklung der Materialfront mit einem einzigen Klick.

Einzigartige und berufsorientierte Funktionalitäten

- > Beim Hochdruckguss zeichnet sich Thercast durch eine Definition der Druckschiene aus, die den realen Bedingungen entspricht und eine genaue Darstellung des in die Kammer strömenden Metalls liefert. Dies ermöglicht es, alle Phänomene, die mit jeder Phase des Prozesses zusammenhängen, von der Anfangsdosierung über das Füllen des Hohlraums bis zur endgültigen Aufrechterhaltung des Drucks zum Ausgleich des Schrumpfens genau zu simulieren.
- > Beim Sand- oder Kokillenguss ermöglicht die Integration von Gießereifiltern die genaue Darstellung der Strömung von flüssigem Metall und insbesondere der Reduzierung turbulenter Strömungen.
- > Die neue Version von Thercast ermöglicht es auch, die Einlässe präzise zu konfigurieren, um den gesamten Prozess besser darzustellen.
- > Die neue Lösung der selbstanpassenden Remeshing-Force (vollständig optimierte Recheneffizienz) spart Präzision und Rechenzeit. Diese Funktionalität bietet die Möglichkeit, Defekte und deren Ausbreitung genau zu erkennen, aber auch turbulente Strömungen perfekt zu modellieren.

Dieses spezielle Verfahren erfordert die Herstellung einer Keramikform, die als „Schale“ bezeichnet wird und es ermöglicht, mehrere Teile in Form eines Bündels aus einem Wachsmo- dell zu formen. Dank einer speziellen Funktionalität kann der Benutzer mit Thercast diese Schale einfach aus dem CAD-Modell des Clusters erstellen, indem die Gesamtdicke der aufeinanderfolgenden Schichten berücksichtigt wird, die während der Sandstrahlphasen abgeschlossen wurden.

Thercast berücksichtigt auch die thermischen und mechanischen Wechselwirkungen, die durch Selbststrahlung entstehen. Es stellt die Wärmeübertragung durch Strah-

lung genau dar und ist sehr nützlich für die Untersuchung von Gießerei- prozessen mit mehrteiligen Guss- clustern oder für die Untersuchung der Abkühlphasen. Das optimierte Modell in dieser neuen Version ist viel schneller und wirkt sich daher sehr positiv auf die Gesamtberechnungszeit aus.

Dank seiner thermomechanischen Flüssigkeits- / Feststoff-Kopplung ermöglicht Thercast die Untersuchung aller Arten von Phänomenen im Strangguss: Strömungen in der Tasche und im Verteiler, Primär- und Sekundärkühlung, Soft-Reduction, Verformung im Kontakt mit den Walzen usw.

Transvalor hat auch eine neue Methode namens „Global Slice Computation“ (Kontinuierliche Scheibenberechnung) entwickelt, um die Rechenzeiten beim Gießen erheblich zu verkürzen. Diese Methode hat sich insbesondere für einen industriellen Fall der Soft-Reduction bewährt, dessen Berechnungszeit von 7 Wochen auf 5 Tage reduziert wurde.

Mit dieser neuen Version startet Transvalor die Modularisierung seines Angebots entsprechend den verwendeten Prozessen und dem vom Benutzer gewünschten Funktionsniveau. Thercast kann auch mit anderer Transvalor-Software verwendet werden, um die gesamte Fertigungskette zu simulieren. Typischerweise Forge zum Freiformschmieden oder Walzen langer Produkte und Simheat zur Wärmebehandlung von Gussteilen.

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

**SICOS BW**

**Sicos BW baut Weiterbildungsbereich für KMU aus**

Die Sicos BW GmbH, KMU-fokussierter Berater rund um die Themen Simulation und Höchstleistungsrechnen sowie Big und Smart Data, verstärkt ihr Engagement im Weiterbildungsbereich kontinuierlich. Mit Nicole Dobner (27) und Daniela Posch (30) unterstützen nun zwei Expertinnen für die Weiterbildungsbereiche High Performance Com-



Professional Simulation Engineer

A New Standard for  
Simulation Engineers

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

puting (HPC) und Data Analytics das inzwischen achtköpfige Team. „KMU müssen in der Lage sein, gewinnbringende Zukunftstechnologien wie Simulationstechnologien oder Smart Data-Technologien auch effektiv zu nutzen“, sagt Dr. Andreas Wierse, Geschäftsführer der Sicos BW GmbH. „Wir stoßen entsprechende Weiterbildungsangebote an, zunehmend auch online, und/oder unterstützen diese – beispielsweise, indem wir dafür Sorge tragen, dass die Lerninhalte KMU-gerecht ausgewählt und aufbereitet werden.“ Mit der Supercomputing-Akademie, dem Projekt „Data Literacy und Data Science für den Mittelstand“ sowie „Digital Mountains“ ist Sicos BW aktuell an drei erfolgreichen KMU-Weiterbildungsprogrammen beteiligt:

- Die Supercomputing-Akademie ist ein Weiterbildungsangebot, das im Rahmen des Projekts „Modulare Weiterbildung zum HPC-Experten (MoeWE)“ angeboten wird. Gefördert wird es durch das Ministerium für Soziales und Integration Baden-Württemberg aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds (ESF) sowie dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg. In unterschiedlichen Modulen vermittelt die Akademie im arbeitnehmerfreundlichen Blended-Learning-Format berufsbegleitend Kenntnisse rund um Anwendung, Management oder Programmierung im Supercomputing. Kooperationspartner sind das Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS), die Universität Freiburg, die Universität Ulm sowie Sicos BW. Das Angebot ist in der Förderphase noch bis Ende 2020 für Teilnehmer kostenfrei. [www.supercomputing-akademie.de](http://www.supercomputing-akademie.de)
- Mit dem Projekt „Data Literacy und Data Science für den Mittelstand: Weiterbildung und Qualifizierung“ stärken neun Hochschulen aus Baden-Württemberg die Kompetenzen kleiner und mittlerer Unternehmen bei der Erfassung und Auswertung massiver Datenmengen. Im Rahmen des Projekts gibt es zahlreiche, praxisbezogene Schulungs- und

Qualifizierungsangebote; auch hier wird ein Blended-Learning-Angebot entwickelt. Neben der federführenden Universität Ulm und der Technischen Hochschule Ulm sind das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Universität Mannheim sowie die Hochschulen Furtwangen, Albstadt-Sigmaringen und Biberach, die Hochschule der Medien in Stuttgart und die Duale Hochschule Baden-Württemberg am Projekt beteiligt. Sicos BW ist Mitinitiator und unterstützt als externer Partner. Finanziert wird das Projekt, wie auch MoeWE, von den beiden Ministerien sowie dem ESF. [www.dataakademie.de](http://www.dataakademie.de)

- Das in der Region Schwarzwald-Baar-Heuberg angesiedelte Projekt „Digital Mountains“ begleitet Gründer und Entscheider aus Industrie, Gesundheits-, Bildungs-, sowie Feuerwehr- und Rettungswesen bei der digitalen Transformation ihres Unternehmens oder Bereiches. Im Rahmen des Handlungsfelds „Aus- und Weiterbildung“ bereitet es Beschäftigte auf die notwendigen Veränderungen vor; konkret vermittelt das KIT Wissen aus dem Bereich Data Analytics und Künstlicher Intelligenz (KI). Sicos BW ist als Mitinitiator Mitglied des Konsortiums, das sich aus diversen Unternehmen und Institutionen aus der Region zusammensetzt; die Finanzierung erfolgt über das Wirtschaftsministerium BW, die PE-Stiftung sowie die ortsansässige IHK. [www.digital-mountains-hub.de](http://www.digital-mountains-hub.de)

Sicos BW unterstützt seit annähernd zehn Jahren speziell kleine und mittlere Unternehmen dabei, einen Zugang zu Simulation und Höchstleistungsrechnen sowie Big und Smart Data-Themen zu finden – neutral und kostenfrei.

[www.sicos-bw.de](http://www.sicos-bw.de)

## VMAP

### ITEA-Projekt VMAP veröffentlichte Version 0.4 seines Interoperabilitätsstandards

Nach der Freigabe der ersten öffentlichen Version des CAE-Datenschnittstellenstandards im Januar, hat das ITEA VMAP-Projekt nun mit der Veröffentlichung der Version 0.4 des Interoperabilitätsstandards mit der Erstellung von Anwendungsfällen außerhalb des Projekts begonnen.

VMAP ist ein offener und kostenloser Standard für die Übertragung von Material- und Konstruktionsinformationen zwischen Simulationen innerhalb einer computergestützten Prozesskette. Dies bietet Ingenieuren, die Simulationen in ihren Entwurfsprozess durchführen, eine schnelle Lösung, um Informationen von einer Berechnung zur anderen zu übertragen, ohne Schnittstellen erstellen zu müssen.

Der große Vorteil von VMAP besteht darin, dass der Open-Source-Standard von einer Softwarebibliothek mit Eingabe-/Ausgabertools zum Lesen/Schreiben der VMAP-Datendateien begleitet wird und somit eine schnelle Entwicklung von Übertragungsvorgängen zwischen verschiedenen Softwarepaketen in einem Simulationsworkflow ermöglicht.

Die VMAP-Projektziele werden von Audi, Bosch, EDAG, Rikutec und Philips erarbeitet, die die aktuelle Version in ihren Simulationsprozess-Workflows verwenden.

VMAP ist kostenlos und wird von der internationalen VMAP Standards Community unterstützt, die sich aus unabhängigen Softwareanbietern (ISVs), Entwicklern, Wissenschaftlern und anderen Unternehmen zusammensetzt. Diese Community bietet der CAE-Branche eine Fokusgruppe, um Leitlinien bereitzustellen, zusammenzuarbeiten, VMAP weiterzuentwickeln und zu warten.

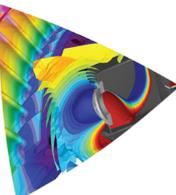
[www.vmap.eu.com](http://www.vmap.eu.com)

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

<b>NAFEMS Kurs: Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</b>	24.06. + 01.07.	Online	<a href="http://www.nafems.org/fem20-juni">www.nafems.org/fem20-juni</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS Kurs: Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie</b>	14.-15.07.	Online	<a href="http://www.nafems.org/fkm20-juli">www.nafems.org/fkm20-juli</a>	NAFEMS
<b>PERMAS Web-Conference-Serie: Dynamics</b>	17.06.	Virtuell	<a href="http://www.intes.de">www.intes.de</a>	Intes
<b>Realize LIVE</b>	23.-24.06.	Virtuell	<a href="http://www.mentor.com">www.mentor.com</a>	Mentor
<b>SafetyWeek</b>	28.-30.07.	Würzburg, D	<a href="http://www.carhs.de">www.carhs.de</a>	Carhs
<b>Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug</b>	01.-02.09.	Virtuell	<a href="http://www.gsvf.at">www.gsvf.at</a>	VIF/TU Graz
<b>NAFEMS East Europe Conference 2020</b>	23.-24.09.	Virtuell	<a href="http://www.nafems.org/2020">www.nafems.org/2020</a>	NAFEMS
<b>automotive CAE Grand Challenge</b>	29.-30.09.	Hanau, D	<a href="http://www.carhs.de">www.carhs.de</a>	Carhs
<b>NAFEMS Kurs: Master Course V&amp;V: Verification and Validation in Engineering Simulation</b>	12.-13.10.	Wiesbaden, D	<a href="http://www.nafems.org/vandv20-2">www.nafems.org/vandv20-2</a>	NAFEMS

**NAFEMS20  
DACH KONFERENZ**

Fachkonferenz für Berechnung & Simulation im Engineering



12.-15. Oktober, München-Taufkirchen

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



**IST INTERNATIONAL  
CONFERENCE ON CAE  
INTEROPERABILITY 2020**

VMAP 15-16 Oct 2020 | Munich-Taufkirchen

[www.vmap.eu.com](http://www.vmap.eu.com) ITEA VMAP

<b>OpenFOAM Conference</b>	13.-15.10.	Virtuell	<a href="http://www.esi-group.com">www.esi-group.com</a>	ESI
<b>Comsol Conference</b>	14.-15.10	Virtuell	<a href="http://www.comsol.com">www.comsol.com</a>	Comsol
<b>ISNVH: Integrating Seamlessly NVH</b>	03.-05.11.	Graz, A	<a href="http://www.isnvh.com">www.isnvh.com</a>	VIF
<b>NAFEMS UK Conference 2020</b>	09.-10.11.	Milton Keynes, UK	<a href="http://www.nafems.org/2020">www.nafems.org/2020</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS Nordic Conference 2020</b>	16.-17.11.	Göteborg, S	<a href="http://www.nafems.org/nordic20">www.nafems.org/nordic20</a>	NAFEMS
<b>Human Modeling and Simulation in Automotive Engineering</b>	19.-20.11.	Wiesbaden, D	<a href="http://www.carhs.de">www.carhs.de</a>	Carhs
<b>NAFEMS France Conference 2020</b>	25.-26.11.	Paris, F	<a href="http://www.nafems.org/2020">www.nafems.org/2020</a>	NAFEMS

**Verschoben:**

<b>NAFEMS India Conference 2020</b>	tba	Bangalore, IND	<a href="http://www.nafems.org/2020">www.nafems.org/2020</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS ASEAN Conference 2020</b>	tba	Singapore	<a href="http://www.nafems.org/2020">www.nafems.org/2020</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS Iberia Conference 2020</b>	tba	Barcelona, ESP	<a href="http://www.nafems.org/2020">www.nafems.org/2020</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS Seminar: CFD-Methoden in der Entwicklung alternativer Antriebssysteme</b>	2021	D	<a href="http://www.nafems.org/cfd20">www.nafems.org/cfd20</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS Seminar: Integration von Simulation und Test in der Produktentwicklung</b>	2021	D	<a href="http://www.nafems.org/simtest20">www.nafems.org/simtest20</a>	NAFEMS

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

# CFD Analysen zum Flugverhalten einer Drohnenkonfiguration unter Verwendung eines Lattice-Boltzmann Verfahrens

Dr. Gerhard Oettl, Dr. Jens Iseler

Dassault Systèmes Deutschland GmbH

Viele industrielle Fragestellungen aus dem Bereich der numerischen Strömungssimulation (CFD) sind mittels traditioneller Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Löser nur unter hohem Zeitaufwand umsetzbar, sobald komplexere Geometrien und Bewegungsabläufe in Form von Rigid Body Dynamics oder Fluid-Struktur Interaktion (FSI) vorliegen.

Partikel-basierte Methoden stellen für solche Fragestellungen eine interessante Alternative dar. Unter den verfügbaren Ansätzen repräsentiert die Lattice-Boltzmann Methode (LBM) einen prominenten Vertreter. Lattice-Boltzmann Löser zeichnen sich insbesondere durch die einfache Handhabung komplexer Geometrien und einen vergleichsweise geringen Rechenaufwand für Large Eddy Simulationen (LES) aus. Aufgrund dieser Vorteile einerseits und der deutlich gesunkenen Hardwarekosten andererseits haben Lattice-Boltzmann Methoden an Akzeptanz gewonnen – speziell im Bereich der Außenaerodynamik.

## 1 Einleitung

Das Betrachten realer Strömungsprobleme unter Berücksichtigung dynamischer Vorgänge und dem Auflösen turbulenter Strukturen erfordert Strömungslöser, welche im Vergleich zu traditionellen Methoden schneller und stabiler sind. Zudem sollte der Vorgang der Modelldefinition stark vereinfacht werden, um auch Geometrien mit hohem Detaillierungsgrad berücksichtigen zu können.

Lattice-Boltzmann Methoden können diesen Anforderungen gerecht werden: Das Verwenden einer kartesischen Lattice-Struktur anstatt eines körperangepassten Rechennetzes ermöglicht eine hohe Zeitersparnis beim Erstellen des CFD Modells. Weiterhin können Transportvorgänge wegen der zugrundeliegenden diskreten Formulierung sehr genau abgebildet werden – die numerische Dissipation ist im Vergleich zu klassischen RANS-Verfahren verschwindend gering. Sämtliche Strömungsgrößen können lokal berechnet werden – Informationen der benachbarten Knoten werden nicht benötigt. Lattice-Boltzmann Verfahren lassen sich zudem hervorragend parallelisieren und sind daher prädestiniert für Large Eddy Simulationen (LES).

In der hier vorgestellten Studie wird das Lattice-Boltzmann Verfahren XFlow verwendet, um das Flugverhalten einer Drohnenkonfiguration zu analysieren. In einem ersten Schritt wird das Strömungsverhalten der Drohne für unterschiedliche Zuströmwinkel betrachtet, die Ergebnisse werden zu Validierungszwecken mit Messdaten aus Windkanaltests verglichen. In weiterer Folge wird ein Flugmanöver unter Verwendung eines 6DOF Löser simuliert und anhand der Resultate die Flugstabilität geprüft.

## 2 Numerische Vorgehensweise

Ein kurzer Überblick zeigt zunächst die wesentlichen Eckpunkte der numerischen Formulierung auf: (i) Die Lattice-Boltzmann Methode, (ii) die Octree Gitterstruktur, (iii) das verwendete Schema der Turbulenzmodellierung, (iv) die Wandfunktion und (v) die Berücksichtigung dynamischer Geometrien.

### 2.1 Lattice-Boltzmann Methode

Prinzipiell lässt sich das Strömungsverhalten mit Hilfe von mikroskopischen, mesoskopischen oder makroskopischen Modellen beschreiben. Während makroskopische Modelle auf der Annahme basieren, dass

das Fluid als Kontinuum betrachtet werden kann, berücksichtigen mikroskopische und mesoskopische Modelle den Teilchencharakter der Strömung. Mit Teilchencharakter ist hierbei die Moleküldynamik – sprich die Brown'sche Bewegung gemeint. Bei Anwendung einer konsistenten Modellbildung kann davon ausgegangen werden, dass Methoden, welche auf kleinen Skalen basieren, allgemeingültiger sind. Folglich lassen sich makroskopische Strömungsgrößen mittels mesoskopischer Modelle beschreiben – ein Herleiten mesoskopischer Größen auf Basis von makroskopischen Ansätzen ist hingegen nicht möglich.

Verfahren, welche auf mesoskopischen Modellen basieren, erfordern keine Kenntnis über den exakten Zustand aller Moleküle. Vielmehr werden Wahrscheinlichkeiten für diese Zustände betrachtet. Der Zustand eines Moleküls ist dabei durch die Position und den Geschwindigkeitsraum charakterisiert. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) erlaubt die Zustandsbeschreibung im Kontext mesoskopischer Modelle. Des Weiteren lässt sich mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion auf makroskopische Größen schließen. Die zugrundeliegende Transportgleichung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f$  ist die Boltzmann Gleichung:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{e} \cdot \nabla f + \frac{F}{m} \nabla f = \Omega \quad . \quad (1)$$

Sie trifft eine Aussage über die zu erwartende Anzahl von Partikeln in einem bestimmten Raum und zu einem bestimmten Zeitpunkt. Eine zeitliche Änderung dieser Anzahl folgt aus der Advektion oder einer Kollision von Partikeln bzw. dem Auftreten externer Kräfte  $F$ . Ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f$  bekannt, so kann mittels der statistischen Momente auf die makroskopischen Größen geschlossen werden. Die so erhaltenen Größen genügen der Massen- und Impulserhaltung (hier nicht gezeigt).

Lattice-Boltzmann Methoden basieren auf einem mesoskopischen Ansatz und daher auf den Gesetzmäßigkeiten der statistischen Physik/Thermodynamik. Die zugrundeliegende Erhaltungsgleichung ist die Boltzmann Gleichung. Historisch gesehen ist die Lattice-Boltzmann Methode aus der Lattice Gas Automata (LGA) Methode hervorgegangen. Der LGA Ansatz ermöglicht es, die Bewegung (Advektion + Kollision) einer diskreten Anzahl von Partikeln abzubilden. Makroskopische Größen wie Druck und Geschwindigkeit werden aus der Verteilung der Partikel abgeleitet. Charakteristisch für diese Methoden ist die einheitliche und kartesische Anordnung der Rechenknoten bzw. -elemente – auch Lattices genannt. Die betrachteten Partikel sind mit einer Bewegungsrichtung  $\mathbf{e}_i$  ausgestattet, die es ihnen erlaubt, zum neuen Zeitschritt einen Nachbarknoten zu erreichen (streaming step). Erreichen mehrere Partikel einen Knoten, so kollidieren diese und ändern ihre Flugrichtung unter Berücksichtigung der Massen- und Impulserhaltung. Dieses Ereignis wird collision step genannt. Auf diese Kollision erfolgt dann wiederum eine Advektion. Da sich ein Partikel stets an einem der Latticeknoten befindet und die Partikel mit einer bestimmten Richtung ausgestattet sind, ergibt sich eine endliche Zahl an möglichen Zuständen. Lattice Gas Automata Methoden wurden bereits in den 70er Jahren entwickelt. Zwar konnte mit solchen Methoden eine reibungsbehaftete Strömung simuliert werden, dennoch wiesen sie ein statistisches Rauschen auf.

Als Folge daraus wurden Lattice-Boltzmann Methoden (LBM) entwickelt, welche auf einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_i$  basieren. Die Kollision wurde anfangs mit dem sogenannten BGK Kollisionsoperator modelliert, später mit komplexeren Ansätzen. Das prinzipielle Zeitschema bestehend aus streaming step und collision step und die Gitteranordnung sind hingegen gleichgeblieben. Das Schema der LBM kann folglich als diskrete Approximation der Boltzmann Gleichung interpretiert werden. Die in LBM zu lösende Gleichung lautet:

$$f_i(\mathbf{r} + \mathbf{e}_i, t + dt) = f_i(\mathbf{r}, t) + \Omega_i(f_1, \dots, f_b), \quad i = 1, \dots, b \quad . \quad (2)$$

$\Omega_i$  entspricht dem Kollisionsoperator, welcher den Post-Kollisionszustand unter Berücksichtigung der Massen- und Impulserhaltung berechnet. Die makroskopischen Größen werden mittels der statistischen Momente von  $f_i$  berechnet:

$$\rho = \sum_{i=1}^b f_i \quad \text{und} \quad \rho \mathbf{v} = \sum_{i=1}^b f_i \mathbf{e}_i \quad . \quad (3)$$

Das Moment nullter Ordnung entspricht der makroskopischen Dichte, die Momente erster Ordnung liefern den Impuls in den drei Koordinatenrichtungen. Momente höherer Ordnung können ebenfalls berechnet werden und ergeben Größen höherer Ordnung.

Der Kollisionsoperator wird üblicherweise als eine Relaxation der PDFs hin zu einem Gleichgewichtszustand modelliert. Häufig wird eine Näherung mit einfacher Relaxationszeit (SRT) basierend auf Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) verwendet:

$$\Omega_i^{\text{BGK}} = \frac{1}{\tau} (f_i^{\text{eq}} - f_i) \quad (4)$$

wobei  $\tau$  die Relaxationszeit beschreibt und  $f_i^{\text{eq}}$  die lokale Gleichgewichtsfunktion darstellt, zu der hin die Relaxation erfolgt. Die lokale Gleichgewichtsfunktion wird generell von einer Maxwell-Boltzmann Verteilung abgeleitet und hängt nur von makroskopischen Größen ab [2]. Obwohl der SRT Ansatz nach wie vor in vielen Lösern eingesetzt wird, bewirkt er eine Beschränkung auf moderate Mach-Zahlen. Zudem kann die Viskosität nicht beliebig klein gewählt werden [3].

Aufgrund der vorliegenden Limitierungen des SRT Ansatzes wurde ein Multi-Relaxationszeit Kollisionsoperator (MRT) entwickelt. Hier wird die Kollision nicht im Geschwindigkeitsraum sondern im Impulsraum umgesetzt. Untersuchungen haben gezeigt, dass der MRT Ansatz im Vergleich zum klassischen BGK Operator ein höheres Maß an Stabilität liefert. Grund hierfür ist die Tatsache, dass die einzelnen Relaxationszeiten individuell so angepasst werden können, dass eine ausreichend hohe numerische Stabilität vorliegt. Der Übergang in den Impulsraum ergibt sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion mit den Geschwindigkeitskomponenten:

$$\mu_{x^k y^l z^m} = \sum_{i=1}^b f_i e_{ix}^k e_{iy}^l e_{iz}^m \quad (5)$$

wobei  $k, l$ , und  $m$  die Ordnungen der Momente in  $x, y$ , und  $z$  Richtung bezeichnen. Die Beziehung zwischen den Momenten und den PDFs kann man in Matrixform ausdrücken:  $\mu_i = M_{ij} f_j$  wobei  $M_{ij}$  die Transformationsmatrix darstellt. Die Anzahl der Momente  $\mu_i$  ist auf die Anzahl der diskreten Geschwindigkeiten begrenzt. Analog zu (4) kann der MRT Kollisionsoperator als Relaxation im Impulsraum mit anschließender inverser Transformation in den Geschwindigkeitsraum formuliert werden:

$$\Omega_i^{\text{MRT}} = M_{ij}^{-1} \hat{S}_{ij} (\mu_i^{\text{eq}} - \mu_i) \quad (6)$$

wobei  $\hat{S}_{ij}$  die diagonale Relaxationsmatrix (das Äquivalent zu  $1/\tau$  im SRT Kollisionsoperator) und  $\mu_i^{\text{eq}}$  den Gleichgewichtszustand von  $\mu_i$  bedeuten [4].

Der Kollisionsoperator in XFlow basiert auf einem MRT Schema. Im Gegensatz zum klassischen MRT Ansatz ist der Operator jedoch im zentralen Impulsraum definiert:

$$\tilde{\mu}_{x^k y^l z^m} = \sum_{i=1}^b f_i (e_{ix} - u_x)^k (e_{iy} - u_y)^l (e_{iz} - u_z)^m \quad (7)$$

Die Verschiebung der Partikelgeschwindigkeiten um den Vektor der makroskopischen Geschwindigkeiten bewirkt eine Verbesserung hinsichtlich der numerischen Stabilität und dem Einhalten der Galilei Invarianz [5, 6]. Des Weiteren können Mach-Zahlen von bis zu 0.6 berücksichtigt werden. Zudem weist der Kollisionsoperator nur eine geringe Zunahme der numerischen Diffusion bei Vorgabe niedriger Viskositätswerte auf.

## 2.2 Octree Gitterstruktur

Das im Strömungslöser implementierte Lattice Schema stellt eine D3Q27 Octree Struktur dar. Mit 27 Geschwindigkeitsrichtungen weist der Löser eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden auf – verbreiteter sind Ansätze mit 19 Geschwindigkeitsrichtungen. Das Verwenden von 27 Geschwindigkeitsrichtungen liefert ein Schema mit höherer räumlicher Genauigkeitsordnung (4. Ordnung) bei geringfügig größerem Rechenaufwand. Das Verwenden einer Octree Struktur ermöglicht es, eine Lattice Struktur mit unterschiedlichen Auflösungen zu erzeugen. Folglich können Bereiche mit hohen Gradienten feiner diskretisiert werden. Höhere Auflösungen kann man basierend auf Geometrien oder benutzerdefinierten Regionen (Box, Kugel, Zylinder, Ring) realisieren. Die unterschiedlichen Auflösungen sind in der Octree Struktur hierarchisch angeordnet. Sowohl das räumliche als auch das zeitliche Maß halbieren sich hierbei pro Auflösungslevel, wie in Abb. 1 zu sehen ist. Das so erzielte Local Time Stepping gewährleistet, dass für jede Lattice Abmessung ein entsprechend dem CFL-Kriterium geeigneter Zeitschritt vorliegt.

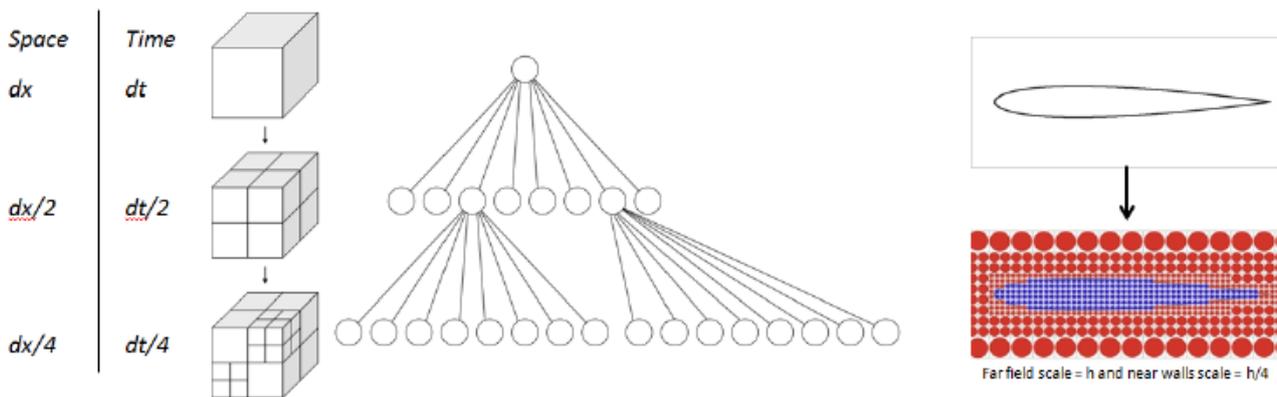


Abb. 1: Octree Lattice Struktur mit unterschiedlichen Auflösungen

### 2.3 Turbulenzmodellierung

Der Beitrag der Turbulenz wird in XFlow mittels einer Large Eddy Simulation (LES) berechnet: Energietragende Wirbel werden somit direkt simuliert, ausschließlich die kleinskaligen Anteile werden modelliert. Das Modellieren der kleinskaligen Turbulenz erfolgt mit Hilfe von Subgridmodellen, welche Werte für die turbulente Wirbelviskosität  $\nu_t$  liefern. Implementiert sind das Smagorinsky sowie das Wall-Adapting Local Eddy (WALE) [7] Subgridmodell. Für das WALE Subgridmodell wird die turbulente Viskosität wie folgt berechnet:

$$\nu_t = \Delta_f^2 \frac{(G_{\alpha\beta}^d G_{\alpha\beta}^d)^{3/2}}{(S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta})^{5/2} + (G_{\alpha\beta}^d G_{\alpha\beta}^d)^{5/4}} \quad (8)$$

mit  $S_{\alpha\beta} = (g_{\alpha\beta} + g_{\beta\alpha})/2$ ,  $G_{\alpha\beta}^d = \frac{1}{2}(g_{\alpha\beta}^2 + g_{\beta\alpha}^2) - \frac{1}{3}\delta_{\alpha\beta}g_{\gamma\gamma}^2$  und  $g_{\alpha\beta} = \partial u_\alpha / \partial x_\beta$ .  $\Delta_f = C_w \Delta x$  bezeichnet den Filter mit der Konstante  $C_w$ .  $S_{\alpha\beta}$  entspricht dem Dehnraten Tensor. Der Tensor  $g_{\alpha\beta}$  kann bei Lattice-Boltzmann Verfahren als Moment zweiter Ordnung lokal berechnet werden.

Anders als bei Finite Volumen Verfahren (FVM) wird keine Information von benachbarten Knoten für die Berechnung von  $g_{\alpha\beta}$  benötigt. Daher sind die Lattice-Boltzmann Verfahren den Finite Volumen Verfahren hinsichtlich des Rechenaufwands und der Arbeitsspeichernutzung für Large Eddy Simulationen überlegen.

### 2.4 Wandfunktion

Der in XFlow verwendete LES Turbulenzansatz repräsentiert einen Wall-Modeled Large Eddy Simulation (WMLES) Ansatz. Ein Auflösen der viskosen Unterschicht ist daher nicht zwingend notwendig. Dies führt aufgrund der Isotropie der Lattice Struktur je nach Anwendungsfall bzw. Reynoldszahl zu einer deutlichen Einsparung an Rechenaufwand. Die implementierte Wandfunktion basiert auf der Arbeit von Shih et al. [8] und ist in der Lage, Druckgradienten zu berücksichtigen:

$$\frac{U}{u_c} = \frac{\tau_w}{\rho u_c^2} \frac{u_\tau}{u_c} f_1 \left( y^+ \frac{u_\tau}{u_c} \right) + \frac{dp_w/dx}{|dp_w/dx|} \frac{u_p}{u_c} f_2 \left( y^+ \frac{u_p}{u_c} \right) \quad (9)$$

mit  $y^+ = u_c y / \nu$ ,  $u_c = u_\tau + u_p$ ,  $u_\tau = \sqrt{|\tau_w| / \rho}$ ,  $u_p = [(v/\rho)|dp_w/dx|]^{1/3}$ . In diesen Gleichungen stellt  $y^+$  den normierten Wandabstand dar,  $x$  ist die lokale Strömungsrichtung tangential zur Wand,  $u_\tau$  ist die Schubspannungsgeschwindigkeit,  $\tau_w$  die turbulente Wandschubspannung und  $dp_w/dx$  repräsentiert den Druckgradienten an der Wand. Die Interpolationsfunktionen  $f_1$  und  $f_2$  sind in [8] angegeben. Das Berücksichtigen des Druckgradienten ist hierbei optional. Der Nutzer kann daher wahlweise auf eine klassische Formulierung ohne Druckgradient oder auf eine Nicht-Gleichgewichts Wandfunktion zurückgreifen.

## 2.5 Dynamische Geometrie

Aufgrund des vorliegenden WMLES Ansatzes und der implementierten Octree Gitterstruktur können Fragestellungen mit bewegten Bauteilen ohne größere Nutzinteraktion innerhalb eines akzeptablen Zeitrahmens bearbeitet werden. XFlow unterstützt sowohl eine erzwungene Bewegung als auch eine aus angreifenden Fluidkräften resultierende Starrkörperbewegung (Rigid Body Dynamics).

Eine erzwungene Körperbewegung wird mittels einer zeitabhängigen Funktion für Position und Winkel umgesetzt. Bei Rigid Body Dynamics Simulationen werden die vom LBM Solver gelösten Strömungsgleichungen mit einem 6DOF Solver gekoppelt, der Starrkörper mit bis zu sechs Freiheitsgraden berücksichtigen kann.

Bei beiden Bewegungsformen wird die Gitterstruktur zu jedem Zeitinkrement aktualisiert. Hierbei wird überprüft, welche Lattice Knoten dem Fluid- bzw. dem Solidbereich angehören. Weiterhin müssen die diskreten Geschwindigkeiten zu jedem Zeitinkrement neu projiziert werden, um den dimensionslosen Wandabstand zu bestimmen.

## 3 Applikation: Simulation einer Drohnenkonfiguration

Als Anwendungsbeispiel dient ein von *Dassault Systèmes* entworfenes Drohnen Design. Die untersuchte Drohne vereint in sich zwei Eigenschaften: Einerseits die Möglichkeit, vertikal abzuheben und zu landen und andererseits das Verwenden von Tragflächen für Cruise-Bedingungen. Eine solche Drohne kann beispielsweise auf Wartungsschiffen eingesetzt werden, um Windkraftanlagen zu inspizieren.

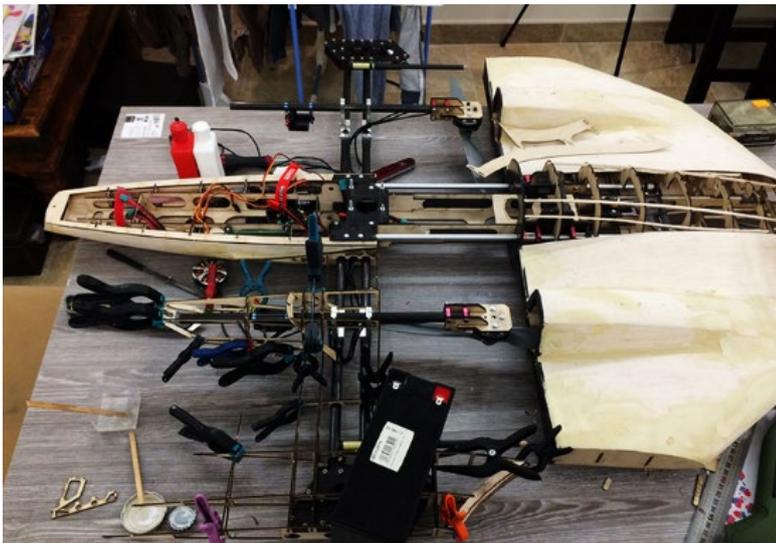


Abb. 2: Von Dassault Systèmes entwickeltes Drohnen Design (links) und Anwendung (rechts)

Für die nachfolgend besprochenen Strömungsanalysen wird ein vereinfachter Prototyp der Drohne ohne Rotoren betrachtet (Abb. 3). Wie dem Bild zu entnehmen ist, enthält die Drohne anstatt von Höhen- und Seitenrudern sogenannte Elevons direkt an den Tragflügeln, um Längs- und Querneigungen vorzunehmen.

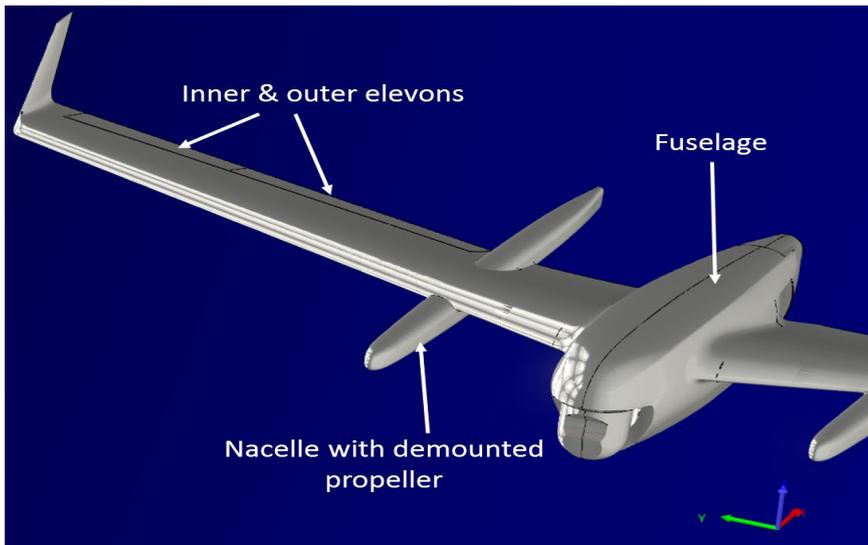


Abb. 3: Vereinfachtes Drohnen Modell für CFD Analysen

## 4 Analyse mit fixierter Geometrie

Zu Validierungszwecken wurden zunächst Simulationen mit einer fixierten Drohnengeometrie durchgeführt und die Resultate mit Ergebnissen der Windkanaltests verglichen. Die Tests wurden vom National Institute for Aviation Research an der Wichita State University durchgeführt. Die Zuströmgeschwindigkeit betrug für alle Tests 22.352m/s. Mit einer mittleren Sehnenlänge  $MAC=0.493m$  ergab sich damit eine Zuström Reynolds Zahl von  $Re=754000$ .

### 4.1 Aufbau des CFD Modells

Abb. 4 zeigt die Lattice-Struktur nahe der mittleren Tragflügelteufe. Eine hohe Auflösung wurde im Bereich der Wände und im Nachlaufbereich gewählt. Die  $y^+$  Werte lagen hierbei überwiegend zwischen 100 und 150. Die Turbulenzmodellierung erfolgte mittels des WALE Subgridmodells. Das Strömungsverhalten im wandnächsten Bereich wurde mit Hilfe der Nicht-Gleichgewichts Wandfunktion approximiert. Diese Wandfunktion berücksichtigt im Gegensatz zur klassischen Formulierung vorliegende Druckgradienten und kann damit Ablösebereiche umströmter Körper genau prognostizieren. Das Fluid wurde als isothermes einphasiges Gas betrachtet. Für die Variation des Nick- und Rollwinkels kam aus Gründen der Symmetrie ein Halbmodell zum Einsatz. Die Lattice-Struktur für das Halbmodell enthielt insgesamt 15 Mio. Elemente. Der physikalische Zeitschritt betrug  $1.3e-3$  Sekunden.

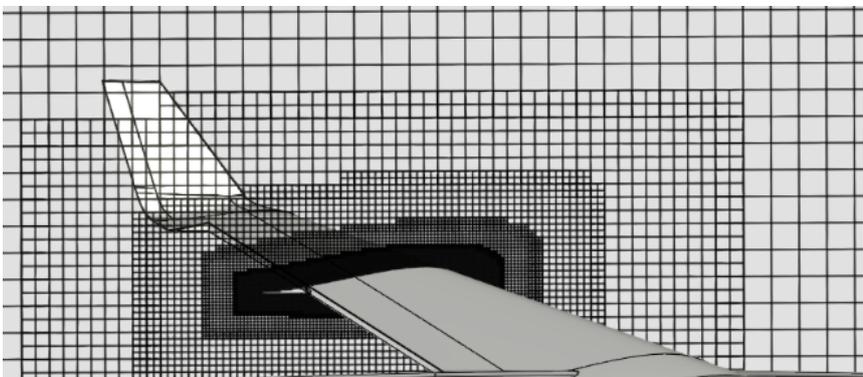


Abb. 4: Gitterstruktur für Simulation mit fixierter Geometrie

#### 4.2 Vergleich von experimentellen und numerischen Ergebnissen

Abb. 5 zeigt die Variation des Auftriebsbeiwertes als Funktion des Anströmwinkels  $\alpha$ . Ergebnisse aus dem Experiment (grüne Dreiecke) werden der Simulation (blaue Rauten) gegenübergestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung für kleine und moderate Anströmwinkel – in diesem Bereich nimmt der Auftriebsbeiwert linear mit dem Anstellwinkel zu. Für hohe Anströmwinkel ergibt sich aufgrund von Strömungsablösungen an den Tragflügeln eine nichtlineare Korrelation.

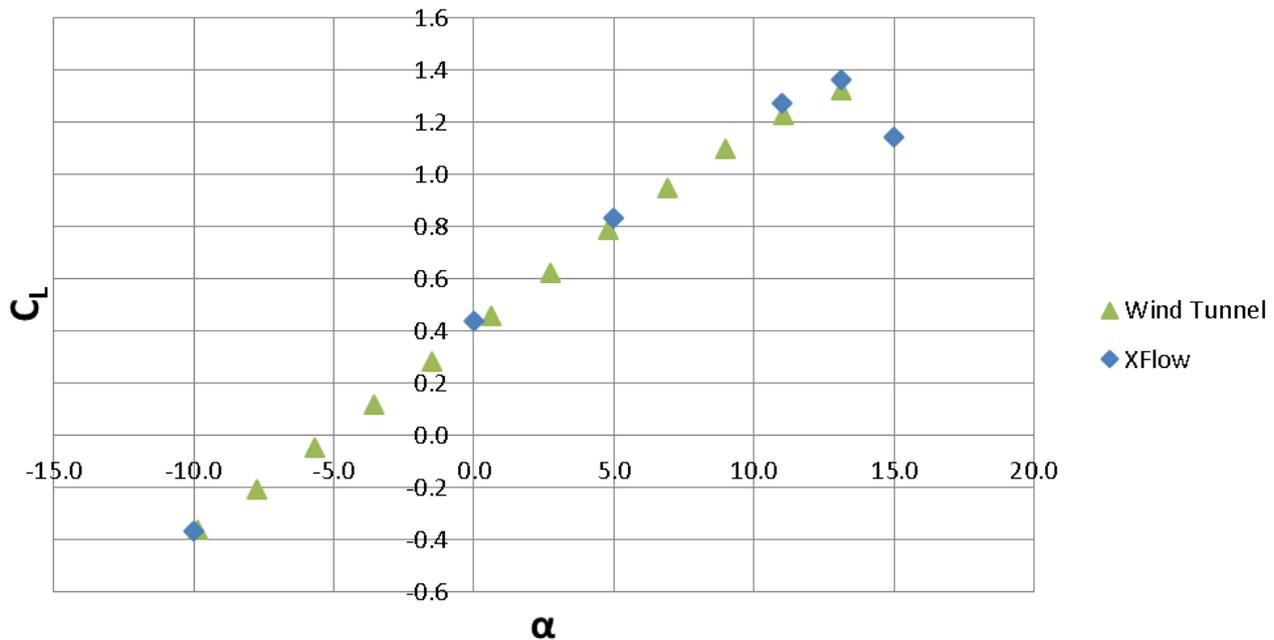


Abb. 5: Auftriebsbeiwert  $C_L$  aus Experiment (Dreiecke) und Simulation (Rauten) vs. Anstellwinkel  $\alpha$

Der verwendete CFD Löser ist folglich in der Lage, das Strömungsverhalten auch im Poststall Bereich wiederzugeben (letzte blaue Raute in Abb. 5). Abb. 6 zeigt die Vorticity-Verteilung für den entsprechenden Anströmwinkel. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass in Rumpfnähe und im Bereich der Pylone großskalige Wirbelungen auftreten.

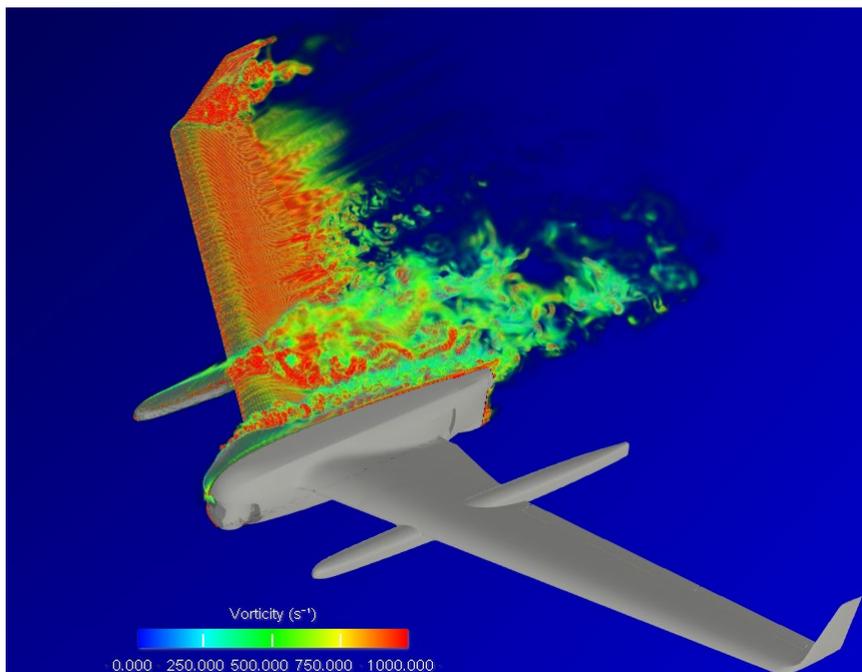


Abb. 6: Wirbelstärke bei einem Anstellwinkel von 15°

Die Verteilung des Widerstandsbeiwertes als Funktion des Anströmwinkels  $\alpha$  ist in Abb. 7 dargestellt. Auch hier zeigt sich für die meisten Anstellwinkel eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch (Dreiecke) und Simulation (Rauten).

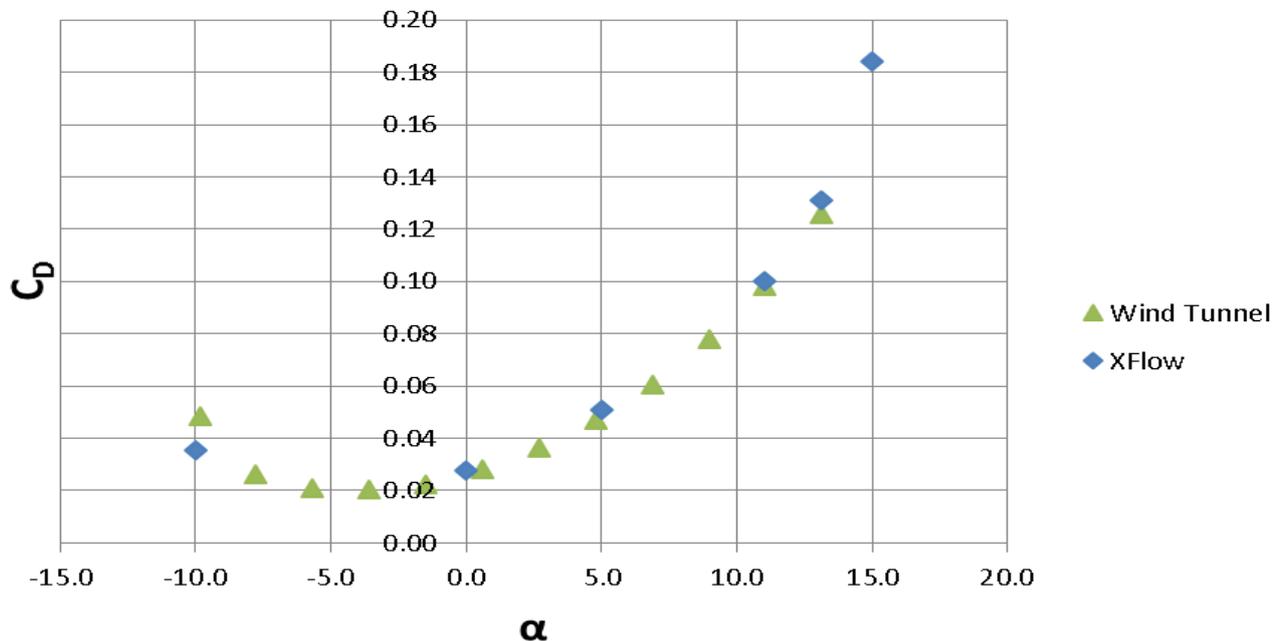


Abb. 7: Widerstandsbeiwert  $C_D$  aus Versuch (Dreiecke) und Simulation (Rauten) vs. Anstellwinkel  $\alpha$

## 5 Simulation einer Anstellwinkelschwingung unter Verwendung von Starrkörperdynamik

Der zweite Teil der Untersuchung widmet sich der Simulation eines Flugmanövers – der Anstellwinkelschwingung. Während dieses Manövers wird der stationäre Zustand der Drohne infolge einer kurzzeitigen Bewegung des Ruders gestört. Infolgedessen führt die Drohne eine Nickbewegung aus. In der Regel nimmt die Amplitude solcher Schwingungen infolge von Dämpfungseffekten mit der Zeit ab. Entsprechend geht die Bewegung der Drohne bei gut gewählter Schwerpunktlage nach einer gewissen Zeitspanne wieder in einen Horizontalflug über. Eine genaue Vorhersage eines solchen Flugmanövers versetzt Entwickler in die Lage, Drohnen oder Flugzeug Designs auch für komplexe Flugbedingungen virtuell zu testen und ihre Flugstabilität früh in der Entwicklungsphase einzuschätzen.

### 5.1 Aufbau des CFD Modells

Die Wahl von Randbedingungen, Fluid Material und Turbulenzmodellierung erfolgte analog zur Simulation bei festgehaltener Drohne. Angepasst wurde jedoch die Diskretisierung des Rechengebiets. So kam eine adaptive Netzverfeinerung zu Einsatz, um die zeitlich und räumlich variierenden Gebiete hoher Vorticity ausreichend fein aufzulösen.

Als Initialisierung diente die Strömungslösung, bei welcher Auftriebs- und Schwerkraft im Gleichgewicht stehen. Der Rumpf der Drohne wird unter Vorgabe von Masse und Trägheitstensor als Starrkörper modelliert. Schubkraft und Gravitationskraft werden als externe Kräfte definiert. Die Einschränkung der Drohnenbewegung auf einen Freiheitsgrad (Rotation um die Querachse) resultierte in einem moderaten Rechenaufwand.

### 5.2 Diskussion der Ergebnisse

Für die Simulation einer Nickschwingung kann man wahlweise entweder einen vollständigen (aktiven) oder einen verkürzten (passiven) Ansatz wählen. Beim verkürzten Ansatz startet man die Simulation mit einer Drohne, welche bereits den maximalen Nickwinkel erreicht hat. Der Zeitabschnitt, in welchem das Ruder schlagartig ausgelenkt wird und sich im Anschluss der maximale Nickwinkel einstellt, wird hier nicht berücksichtigt. Anhand des passiven Ansatzes kann mit moderatem Rechenaufwand geprüft werden, ob die aufgeprägte Oszillation abklingt oder verstärkt wird. Der aktive Ansatz hingegen setzt bereits bei der stationären Gleichgewichtslage an. Ruderbewegung und das daraus resultierende Anheben des vorderen Drohnenbereichs wird direkt simuliert. Der maximale Nickwinkel ergibt sich damit als Ergebnis der Simulation und muss nicht

vorgegeben werden. Der aktive Ansatz ist daher näher an der Realität, allerdings verbunden mit erhöhtem Rechenaufwand.

Um mögliche Unterschiede bei der Vorhersage der Flugstabilität aufzuzeigen, wurden für das betrachtete Drohen Design beide Ansätze in Betracht gezogen. Bei der verkürzten Analyse betrug der maximale Nickwinkel  $5^\circ$ . Abb. 8 zeigt die geneigte Anfangsposition zum Zeitpunkt  $t=0.0s$  und die darauffolgende Schwingung der Drohne für einzelne Zeitpunkte.



Abb. 8: Anstellwinkelschwingung einer Drohne für verkürzten Ansatz

Beispielhaft für das Strömungsverhalten ist die Wirbelstärke zum Zeitpunkt  $t=0.6s$  in Abb. 9 zu sehen. Gebiete hoher Vorticity sind in Rumpfnähe, im Bereich der Pylone und im Nachlauf erkennbar. Die Verwirbelungen nahe der Pylone sind bedingt durch ihren Einfluss auf die Flügelanströmung. So führt die Blockagewirkung der Pylone zu einer lokalen Änderung der Zuströmrichtung.

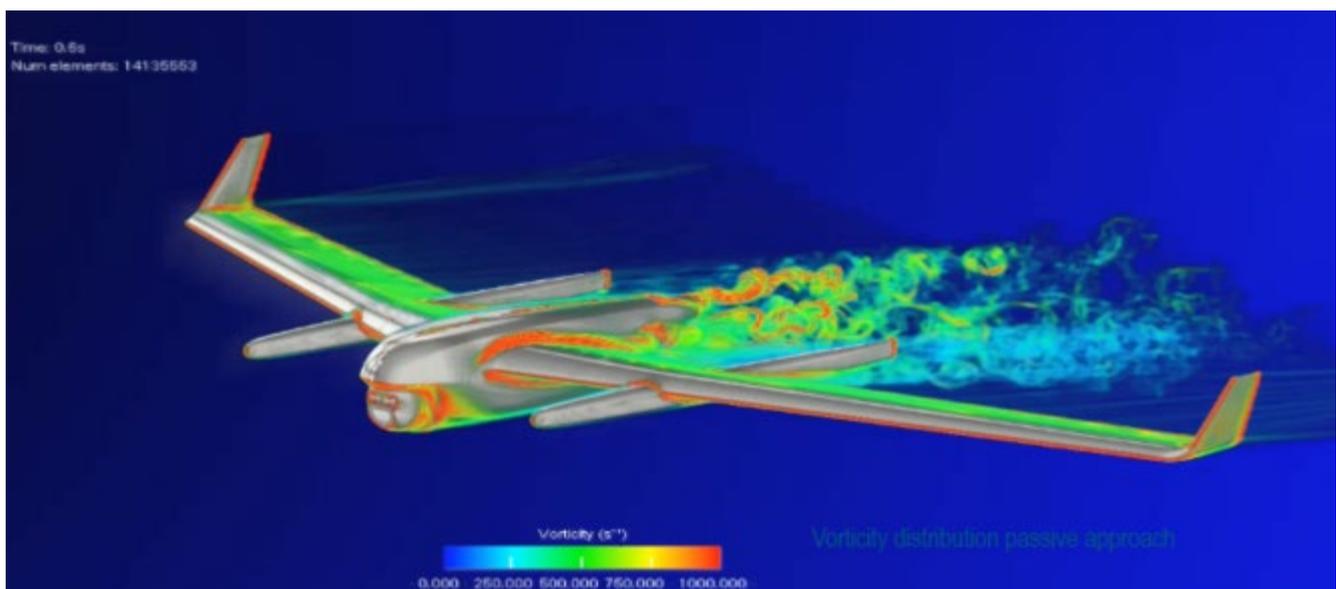


Abb. 9: Verteilung der Wirbelstärke für verkürzten Ansatz zum Zeitpunkt  $t=0.6s$

Die zeitliche Entwicklung des Nickwinkels ist in Abb. 10 wiedergegeben. Die Darstellung zeigt, dass für die betrachtete Drohnenkonfiguration eine stabile und somit abklingende Oszillation vorliegt. Die Frequenz der gedämpften Schwingung liegt bei ca. 1.2Hz.

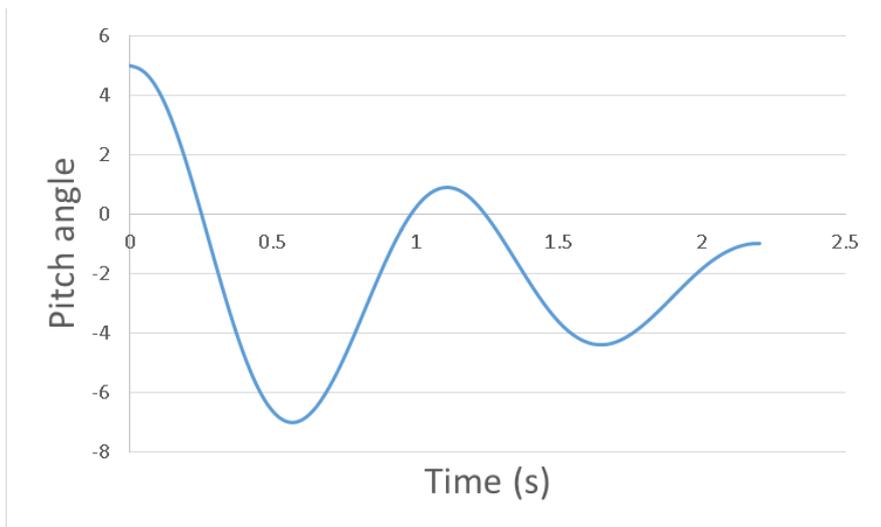


Abb. 10: Zeitliche Entwicklung des Nickwinkels für verkürzten Ansatz

Der vollständige Ansatz ist so umgesetzt, dass für die Elevons eine zeitabhängige Auslenkung vorgegeben wurde – Flugzeugrumpf und Tragflügel fungierten als Starrkörper, welche sich infolge der angreifenden Fluidkräfte bewegen. Abb. 11 gibt die vorgegebene Rotation der Elevons wieder: Während der ersten 0.1s werden sie um  $3.5^\circ$  ausgelenkt, verharren dann für 0.4s in dieser Position und gehen schließlich in weiteren 0.1s in die Ausgangsposition zurück.

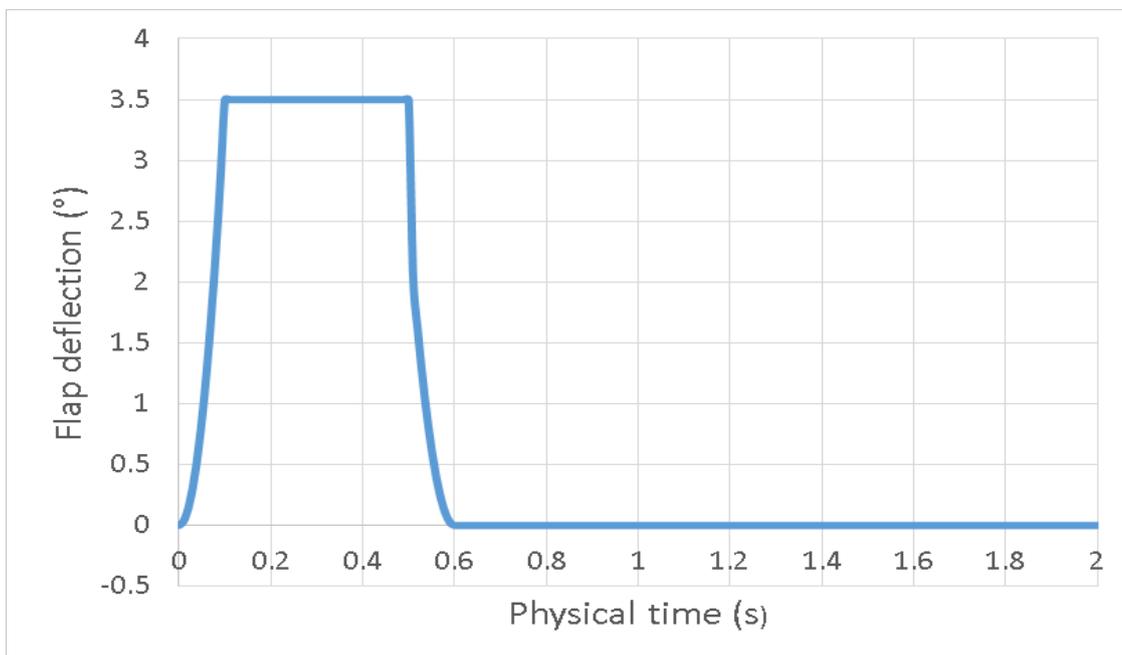


Abb. 11: Vorgegebene Elevon-Rotation für den vollständigen Ansatz

Abb. 12 zeigt die Drohne kurz nach Beginn der Simulation (linkes Bild) sowie beim Erreichen des maximalen (mittiges Bild) und minimalen Nickwinkels in Form der Vorticity-Verteilung. Die sehr ausgeprägten Wirbelstrukturen in Rumpfnähe, nahe der Flügelspitzen und im Bereich der Pylone deuten auf großflächige Ablösungen hin. Auch bei minimalem Nickwinkel kommt es zur Ausbildung von Bereichen hoher Vorticity, allerdings sind diese nicht so ausgeprägt wie im mittigen Bild.

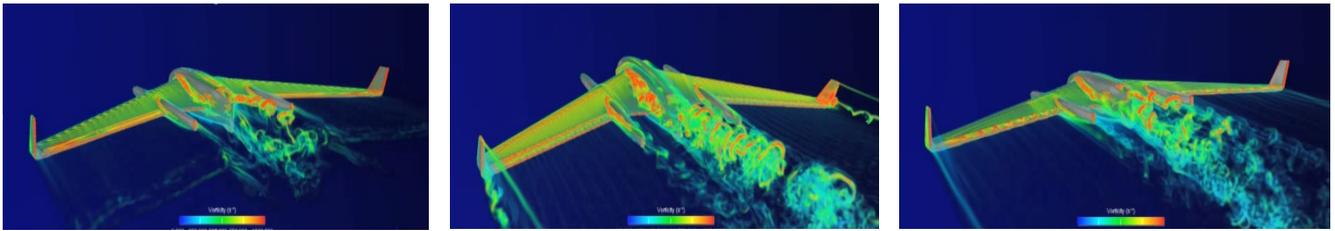


Abb. 12: Wirbelstärke für vollständigen Ansatz zu verschiedenen Zeitpunkten

Abb. 13 zeigt die Verteilung der axialen Geschwindigkeitskomponente für einen Schnitt nahe des Pylons bei maximalem Nickwinkel. Die Ablösebereiche mit negativen Geschwindigkeitswerten befinden sich zu diesem Zeitpunkt erwartungsgemäß überwiegend an der Saugseite.

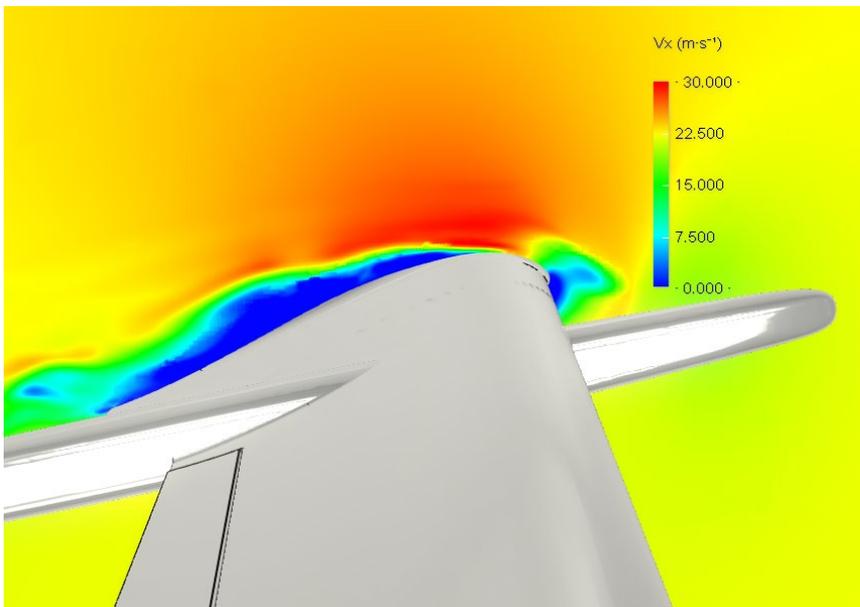


Abb. 13: Geschwindigkeitsverteilung bei maximalem Nickwinkel

In Abb. 14 links ist die zeitliche Entwicklung des Nickwinkels für den vollständigen Ansatz dargestellt und dem Verlauf des verkürzten Ansatzes gegenübergestellt. Wie auch im Falle des verkürzten Ansatzes beschreibt die Drohne eine gedämpfte Schwingung. Die Frequenz ist im Vergleich zur vorausgegangenen Simulation mit 1.1Hz geringfügig kleiner.

Abschließend kann daher festgehalten werden, dass für die betrachtete Drohnenkonfiguration die verkürzte Stabilitätsanalyse ein sehr ähnliches Schwingungsverhalten aufweist. Unter der Annahme, dass der maximale Nickwinkel bekannt ist, kann somit in kürzerer Rechenzeit auf die Flugstabilität geschlossen werden.

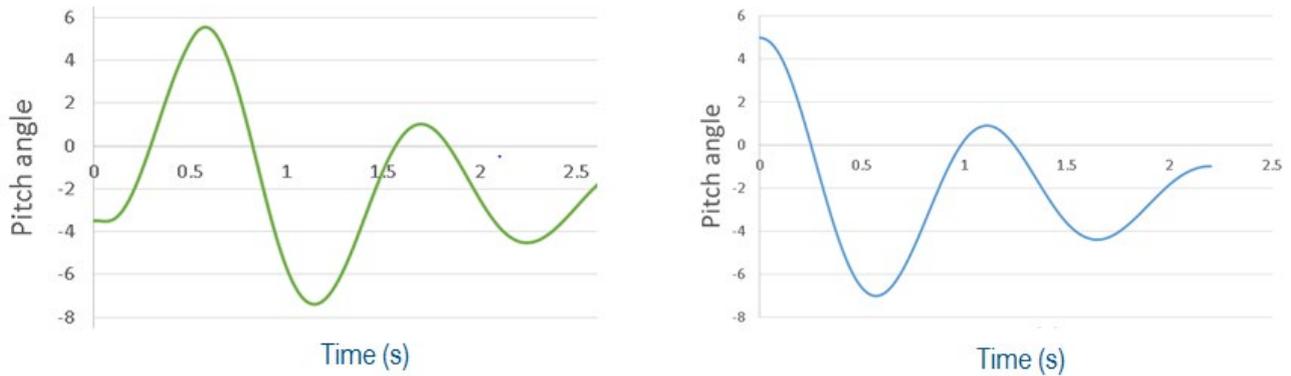


Abb. 14: Zeitliche Entwicklung des Nickwinkels für vollständigen (links) und verkürzten Ansatz (rechts)

## 6 Zusammenfassung

Transiente Simulationen von beweglichen Systemen in hochturbulenten Strömungen sind seit jeher eine herausfordernde Aufgabe in der Strömungssimulation. Obwohl RANS Löser basierend auf Finite Volumen Verfahren die bevorzugte Wahl für das Durchführen solcher Strömungssimulationen darstellen, weisen diese Methoden einige Limitierungen auf:

So muss bei RANS Verfahren in aller Regel ein körperangepasstes Rechennetz mit guter Elementqualität bereitgestellt werden, um einerseits numerische Stabilität während der Simulation zu gewährleisten und andererseits realistische Vorhersagen zum Strömungsverhalten zu erzielen. Gerade für Fragestellungen mit bewegten Bauteilen und/oder kleinen Spaltmaßen stellt dies eine große Herausforderung dar. Außerdem weisen diese Verfahren potentiell Ungenauigkeiten durch den Einsatz von Turbulenzmodellen für das gesamte Spektrum auf – insbesondere für Strömungen mit starker Umlenkung und/oder großflächigen Ablösungen. Zudem ist das Skalierungsverhalten von RANS Lösern bei hoher Kern- und Knotenzahl im Vergleich zu Lattice-Boltzmann Verfahren oftmals weniger performant. Grund hierfür ist der schlanke und simple Aufbau von LBM Codes. Zudem müssen Finite Volumen Verfahren im Gegensatz zu LB Methoden den nichtlinearen und nichtlokalen Konvektionsterm der Impulsgleichung lösen. Dies erfolgt unter Zugabe künstlicher numerischer Viskosität, um die Stabilität des Verfahrens zu wahren. Je nach Anwendungsfall kann das zu einem signifikanten Dämpfen, mitunter auch zu einem Verfälschen der Lösung führen.

Lattice-Boltzmann Verfahren weisen diese Limitierungen nicht auf. Hinsichtlich der Diskretisierung basieren solche Löser auf einer kartesischen Gitterstruktur, die vollständig automatisiert erzeugt wird. 27 Freiheitsgrade pro Knoten ermöglichen zudem eine ausreichende Genauigkeit und verhindern das Auftreten von Lattice Artefakten. Aufgrund der Tatsache, dass alle physikalischen Größen lokal berechnet werden (Information von Nachbarknoten wird nicht benötigt), kann kostengünstig eine Large Eddy Simulation realisiert werden. Der einzige nichtlineare Term der zu lösenden Erhaltungsgleichung ist der lokale Kollisionsoperator. Da die Erhaltungsgleichung außerdem direkt und nicht iterativ gelöst wird, kann ein hohes Maß an Genauigkeit erreicht werden. Konsequenterweise haben sich LBM Verfahren inzwischen als interessante Alternative zu traditionellen RANS Verfahren entwickelt und erlauben Simulationen, die noch vor einigen Jahren als zu komplex angesehen worden wären.

Die hier vorgestellte Studie hat gezeigt, dass mittels der Lattice-Boltzmann Methode XFlow das Strömungsverhalten einer Drohne zuverlässig prognostiziert werden kann. Über einen großen Bereich verschiedener Anströmwinkel hinweg liefert das Verfahren sehr ähnliche Resultate für Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte bezüglich vorliegender Messergebnisse.

Die Berücksichtigung von vordefinierten bzw. strömungsinduzierten Starrkörper-Bewegungen mittels 6DOF Solver ermöglicht es zudem, Flugmanöver zu simulieren. Eine genaue Vorhersage eines solchen Manövers versetzt Entwickler in die Lage, die Flugstabilität von Konfigurationen früh in der Entwicklungsphase einzuschätzen.

Für die diskutierte Drohne wurde beispielhaft eine Anstellwinkelschwingung betrachtet und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen eine realistische gedämpfte Oszillation mit einer Frequenz von etwa 1Hz. Anhand von Volumetric Field Darstellungen der Vorticity wird deutlich, dass bei maximalen Nickwinkeln bereits großflächige Ablösungen und komplexe Wirbelstrukturen an den Tragflächen vorliegen. Der Einsatz von LES ist daher essentiell, um das Strömungsverhalten für solche oder komplexere Manöver realistisch abzubilden.

## 7 Literatur

- [1] Chen, S. and Doolen, G.: "Lattice Boltzmann method for fluid flows", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 30, No. 1, 1998, 329-364.
- [2] Dassault Systèmes Simulia: XFlow 2018 Theory Guide, 2018.
- [3] Guo, Z., Zheng, C. and Zhao, T.S.: "A lattice bgk scheme with general propagation", Journal of Scientific Computing, 16(4), 2001, 569-585.
- [4] D'Humières, D.: "Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann models in three dimensions", Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 360, No. 1792, 2002, 437-451.
- [5] Geier, M., Greiner, A. and Korvink, J.G.: "A factorized central moment lattice Boltzmann method" The European Physical Journal Special Topics, 171(1), 2009, 55-61.
- [6] Premnath, K.N. and Banerjee, S.: "On the three-dimensional central moment lattice Boltzmann method", Journal of Statistical Physics, 143(4), 2011, 747-794.
- [7] Ducros, F., Nicoud, F. and Poinso, T.: "Wall-adapting local eddy-viscosity models for simulations in complex geometries", Proceedings of 6<sup>th</sup> ICFD Conference on Numerical Methods for Fluid Dynamics, 1998, 293-299.
- [8] Shih, T.H., Povinelli, L.A., Liu, N.S., Potapczuk, M.G. and Lumley, J.L.: "A generalized wall function", TM 113112 NASA Technical Report, 1999.

# Elektromagnetische Feldsimulation sich bewegender Bauteile

T. Rüberg, L. Kielhorn, J. Zechner

TAILSIT

Die numerische Simulation elektromagnetischer Felder mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) erfordert eine Vernetzung der Umgebung (oft Luft oder Schutzgas) des zu untersuchenden Bauteils. Da diese Vernetzung nur einen Teil der Umgebung abdecken kann, wird ein künstlicher Rand mit unphysikalischen Randbedingungen eingeführt. Bewegen sich zudem einzelne Teile gegeneinander, erfordert dies oft eine Neuvernetzung, die mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden ist. Alternativ zur FEM kann die Randelementmethode (BEM) für die Simulation der Umgebung eingesetzt werden. Hierfür wird nur ein Oberflächennetz benötigt und auf eine Neuvernetzung gänzlich verzichtet. Potenzielle Anwendungen schließen die Simulation von Magnetumformung, Magnetschweißen und induktiver Erwärmung ein.

In dieser Arbeit stellen wir das Verfahren der FEM-BEM-Kopplung für Wirbelstromprobleme vor. Hierbei werden die Vor- und Nachteile dieses Ansatzes erläutert und aufgeführt, wie mit speziellen Lösungsmethoden und Beschleunigungsverfahren eine robuste und optimal skalierende Implementierung erreicht wurde. Die Genauigkeit wird anhand von etablierten Benchmarkproblemen aufgezeigt.

## 1 Einführung

Als plakatives Anwendungsbeispiel für die vorgestellte Simulationstechnologie dient der Querschnitt eines Aktuators, wie in Abb. 1 dargestellt. Das linke Bild stellt die gegebene Geometrie dar, wobei sich der Kolben (grün) für die Funktion des Aktuators bewegen kann. Vereinfacht betrachtet erzeugt die Spule (braun) ein Magnetfeld, welches die Position des Kolbens kontrolliert. Für eine akkurate Beschreibung des agierenden Magnetfeldes muss ein gewisser Teil der Umgebung, in der Regel Luft, berücksichtigt werden (Mitte, oben), welche im Rahmen einer reinen FEM Simulation vernetzt wird (rechts oben). Offensichtlich würde jetzt eine Bewegung des Kolbens zu einer großen Verzerrung der finiten Elemente in den angrenzenden Luftspalten führen. In der Regel ist dadurch eine kostspielige Neuvernetzung notwendig, um diese Bewegung in die Simulation mit einzuschließen. Alternativ kann die BEM verwendet werden, um den Außenraum des Aktuators akkurat zu erfassen, so dass die Umgebung nicht vernetzt werden muss (Mitte, unten). Somit kann sich der Kolben frei bewegen (rechts unten), ohne dass eine neue Vernetzung notwendig wird.

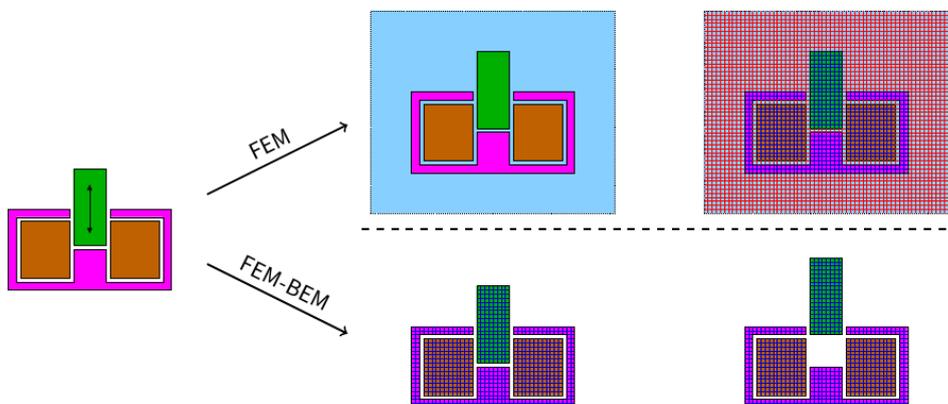


Abb. 1: Konzepte der numerischen Simulation eines Aktuators (links): FEM Analyse (obere Reihe) mit berücksichtigter Luftumgebung (links) und Vernetzung (rechts); FEM-BEM Analyse (untere Reihe) mit Vernetzung (links) und freier Beweglichkeit (rechts)

Wie anhand dieses Beispiels aufgezeigt, kann der Einsatz der BEM erhebliche Vorteile bei bestimmten Aufgabenstellungen bringen. Es kann auf die Vernetzung der Luftumgebung vollständig verzichtet werden, wodurch sich der Anwender ausschließlich mit der Modellierung des Elektrogeräts befassen kann. Es tritt zudem kein Modellierungsfehler durch das Einfügen eines künstlichen Randes auf. Aufgrund dieser Eigenschaften scheint die BEM stets von Vorteil zu sein. Da jedoch die Berechnungszeiten ansteigen, muss im Einzelfall abgewogen werden, ob sich diese Methodik lohnt.

Für die numerische Untersuchung sich bewegender Bauteile hingegen liegen die Vorteile der Verwendung von BEM klar auf der Hand. Insbesondere im Fall linearer Bewegungen (keine Rotationen) muss bei einer reinen FEM-Analyse aufwändig neu vernetzt werden. Der theoretische Unterbau der hier präsentierten Arbeit basiert auf [3] und [8].

## 2 FEM-BEM Kopplung

### 2.1 FEM für Magnetostatik

Das hier betrachtete physikalische Problem ist das der Magnetoquasistatik mit zeitlich veränderlicher Stromanregung. Die elektrischen Gleichungen entfallen für dieses Teilmodell und die benötigten Maxwell-Gleichungen in differentieller Form lauten dann [6]

$$\mathbf{curl} \mathbf{H} = \mathbf{J}(t), \quad \mathbf{div} \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{B}) = \frac{1}{\mu(\mathbf{B})} \mathbf{B} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r(\mathbf{B})} \mathbf{B}. \quad (1)$$

Diese sind das Ampèresche Gesetz mit der magnetischen Feldstärke  $\mathbf{H}$  und der Stromdichte  $\mathbf{J}$ , die Quelfreiheit der magnetischen Flussdichte  $\mathbf{B}$  und das Materialgesetz, das  $\mathbf{H}$  und  $\mathbf{B}$  verknüpft. Hierbei bezeichnet  $\mu$  die magnetische Permeabilität, welche in die relative Permeabilität  $\mu_r$  und Permeabilität des Vakuums  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m aufgespalten werden kann. Es ist zu beachten, dass  $\mu_r$  im Allgemeinen von  $\mathbf{B}$  abhängt, wodurch das Materialgesetz einen nichtlinearen Charakter erhält. Um die zweite Gleichung in (1) zu erfüllen, wird üblicherweise der Ansatz  $\mathbf{B} = \mathbf{curl} \mathbf{A}$  mit einem Vektorpotenzial  $\mathbf{A}$  gemacht. Somit ergibt sich die partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung

$$\mathbf{curl} \left[ \mu_r^{-1} \mathbf{curl} \mathbf{A} \right] = \mu_0 \mathbf{J}(t). \quad (2)$$

Diese Gleichung beschreibt zunächst die reine Magnetostatik. Auf die explizite Darstellung der Abhängigkeit  $\mu_r$  von  $\mathbf{B}$  wird hier und im Folgenden verzichtet. Im Falle elektrisch leitfähiger Materialien kann aber die Stromdichte in eingepreßte und induzierte Ströme zerlegt werden,

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_i = \mathbf{J}_s + \sigma \mathbf{E}, \quad (3)$$

wobei hier mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes die induzierten Ströme durch die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  und das elektrische Feld  $\mathbf{E}$  dargestellt wurden. Mit Hilfe des Faradayschen Induktionsgesetzes lässt sich nun der Zusammenhang  $\mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{A}$  herstellen (modulo Eichpotenzial), so dass wir die Wirbelstromgleichung erhalten,

$$\mu_0 \sigma \partial_t \mathbf{A} + \mathbf{curl} \left[ \mu_r^{-1} \mathbf{curl} \mathbf{A} \right] = \mu_0 \mathbf{J}_s(t). \quad (4)$$

Für die Herleitung einer FEM gilt es zunächst, ein einhüllendes Gebiet zu definieren. Als Beispiel wird die Situation aus Abb. 2 hergenommen, in der ein leitfähiges Gebiet  $\Omega_L$  und eine Spule  $\Omega_S$  dargestellt sind. Diese sind in das Berechnungsgebiet  $\Omega$  eingebettet, dessen Rand mit  $\Gamma$  bezeichnet wird.

Mit Hilfe der Methode der gewichteten Residuen und der Wichtungsfunktion  $\mathbf{A}'$  gilt nun

$$\begin{aligned}
 0 &= \int_{\Omega} \left\{ \mu_0 \sigma \partial_t \mathbf{A} + \mathbf{curl} \left[ \mu_r^{-1} \mathbf{curl} \mathbf{A} \right] - \mu_0 \mathbf{J}_s \right\} \cdot \mathbf{A}' dx \\
 &= \int_{\Omega} \mu_0 \sigma \partial_t \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}' dx + \int_{\Omega} \mu_r^{-1} \mathbf{curl} \mathbf{A} \cdot \mathbf{curl} \mathbf{A}' dx - \int_{\Omega} \mu_0 \mathbf{J}_s \cdot \mathbf{A}' dx \\
 &\quad + \int_{\Gamma} (\mu_r^{-1} \mathbf{curl} \mathbf{A} \times \mathbf{n}) \cdot (\mathbf{n} \times \mathbf{A}' \times \mathbf{n}) ds \\
 &=: m_{\sigma}(\partial_t \mathbf{A}, \mathbf{A}') + a_{\mu_r}(\mathbf{A}, \mathbf{A}') - \ell(\mathbf{A}') + \langle \mu_r^{-1} \gamma_N \mathbf{A}, \gamma_D \mathbf{A}' \rangle_{\Gamma}
 \end{aligned} \tag{5}$$

In dieser Gleichung bezeichnet  $\mathbf{n}$  den Normalenvektor am Rand  $\Gamma$ , siehe Abb. 2. Die Darstellung in der letzten Zeile von Gl. (5) dient ausschließlich der kürzeren Schreibweise. Des Weiteren können die Integrationsbereiche in den Definitionen von  $m_{\sigma}$  und  $\ell$  auf die Gebiete  $\Omega_L$  bzw.  $\Omega_S$  reduziert werden.

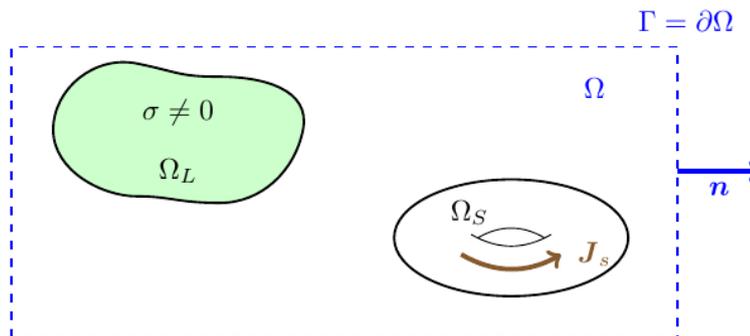


Abb. 2: Einhüllendes Gebiet  $\Omega$  mit leitfähigem Gebiet  $\Omega_L$  und Spule  $\Omega_S$

Für die FEM wird das Gebiet  $\Omega$  vernetzt, und es werden elementweise Ansatzfunktionen verwendet, die der Approximation des Vektorpotenzials  $\mathbf{A}$  dienen. Hierfür wird üblicherweise in 3D auf sogenannte Nédélec-Funktionen zurückgegriffen [11], die die Stetigkeitsbedingungen der Felder korrekt abbilden. Zu beachten ist, dass der Rand  $\Gamma$  künstlich eingeführt wurde, um das Rechengebiet einzuschränken. Die Wahl der Lage dieses Randes ist Teil der Modellierungsaufgabe. Zudem entsteht auf dem Rand ein weiterer Term, siehe  $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\Gamma}$  in Gl. (5), der gesondert behandelt werden muss. Hierzu führen wir das Feld

$$\boldsymbol{\lambda} := \mu_r^{-1} \gamma_N \mathbf{A} = \mathbf{H} \times \mathbf{n} \tag{6}$$

ein, das dem tangentialen  $\mathbf{H}$ -Feld auf der Oberfläche  $\Gamma$  entspricht. Im Rahmen einer reinen FEM Analyse ist es üblich, diesen Randterm auf eine der folgenden Arten zu umgehen:

1. Homogene Dirichlet-Bedingungen ( $\gamma_D \mathbf{A} = \mathbf{0}$ ). Hierbei werden alle unbekannt Koeffizienten der Approximation von  $\mathbf{A}$ , die zum Rand  $\Gamma$  gehören, a priori zu Null gesetzt und aus der Gleichung entfernt. Der Randterm verschwindet, und die Modellierung entspricht physikalisch der Bedingung  $\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = 0$ .
2. Homogene Neumann-Bedingungen ( $\gamma_N \mathbf{A} = \mathbf{0}$ ). Das tangential Magnetfeld wird künstlich zu Null gesetzt, und der Randterm erhält dadurch ebenfalls den Wert Null. In Abb. 3 ist das Ergebnis einer solchen Vorgehensweise im linken Bild dargestellt, wobei das rechte Bild den wahren Verlauf zeigt. Offensichtlich verlaufen die Feldlinien in der Nähe des künstlichen Randes  $\Gamma$  unterschiedlich.
3. Sogenannte absorbierende Randbedingungen werden eingeführt, die den Modellierungsfehler gegenüber den vorherigen Herangehensweisen reduzieren.

Es ist bekannt, dass die auftretenden Magnetfelder ein gewisses Abklingverhalten vorweisen, so dass die Lage des künstlichen Randes  $\Gamma$  bei großem Abstand zum Leiter und zur Spule keine Rolle mehr spielt. Allerdings ist es nicht offensichtlich, wie groß dieser Abstand zu wählen ist, und es wird ein enormer Zeitaufwand für die Vernetzung und Analyse dieser Umgebung eingesetzt.

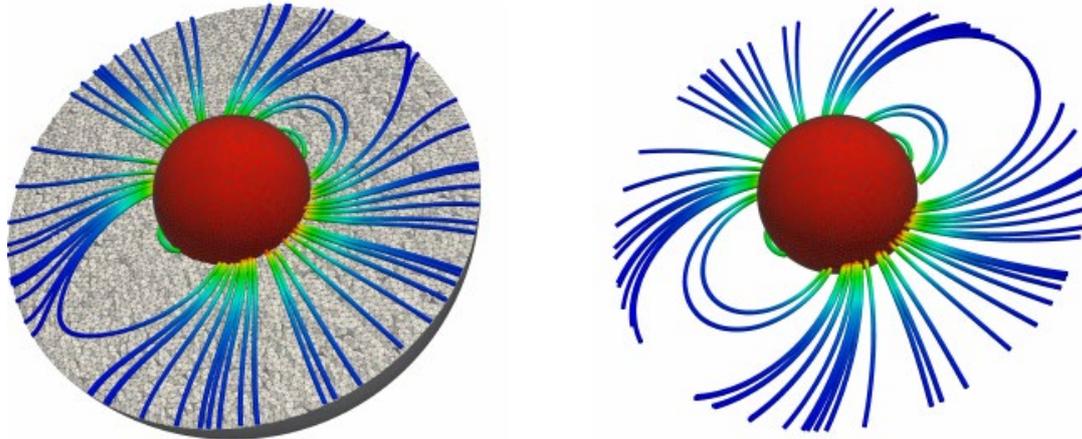


Abb. 3: Künstliche Randbedingungen (links) und wahrer Verlauf der Feldlinien (rechts)

Im Weiteren sei hier beispielsweise der zweite Weg ( $y_{\mathcal{N}}\mathbf{A}=\mathbf{0}$ ) gewählt und man erhält das System nichtlinearer Gleichungen

$$\underline{M}\partial_t\mathbf{a} + \underline{G}(\mathbf{a}) - \underline{f} = \mathbf{0}, \tag{7}$$

wobei  $\underline{G}$  nichtlinear von  $\mathbf{a}$  abhängt und im Falle linearen Materialverhaltens durch  $\underline{G} = \underline{C} \mathbf{a}$  mit der **curl-curl**-Steifigkeitsmatrix  $\underline{C}$  ausgedrückt werden kann. Zur Lösung der Gl. (7) wird ein Zeitschrittverfahren (zum Beispiel das implizite Eulerverfahren) und ein Newton-Verfahren zur Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems verwendet. Aufgrund der teilweise extremen Größenordnungsunterschiede in der Relation zwischen  $\mathbf{B}$ - und  $\mathbf{H}$ -Feld wird das Newtonverfahren noch durch ein Liniensuchverfahren erweitert, das dem Algorithmus mehr Robustheit verleiht.

### 2.2 Kopplung mit der Methode der Randelemente

Im Folgenden wird der Randterm in Gl. (5) exakt behandelt. Damit spielt die Lage des Randes  $\Gamma$  keine Rolle mehr, und der oben erwähnte Modellierungsfehler verschwindet vollständig. Außerdem kann  $\Gamma$  mit der Oberfläche der Geometrie der Festkörper zusammenfallen, so dass gar keine Luft vernetzt werden muss. Dafür benötigen wir einen Zusammenhang zwischen dem tangentialen Vektorpotenzial  $y_D\mathbf{A}$  und dem tangentialen Magnetfeld  $\lambda$ , der den gesamten Außenraum,  $\mathbb{R}^3 \setminus \Omega$ , des Gebiets berücksichtigt. Mit Hilfe der Formel von Stratton-Chu [6] kann das Vektorpotenzial  $\mathbf{A}$  an jedem Punkt des Außenraums durch seine Randdaten ( $y_D\mathbf{A}$ ,  $\lambda$ ) dargestellt werden. Dieses gilt unter der Annahme, dass sich das Material im Außenraum homogen und linear verhält. Für Luft oder Vakuum gilt der Zusammenhang  $\mathbf{B}=\mu_0\mathbf{H}$ , so dass diese Anforderung in der Regel erfüllt ist. Wird der Auswertungspunkt der Stratton-Chu Formel auf den Rand geschoben und wiederum das Verfahren der gewichteten Residuen eingesetzt, so ergibt sich folgendes Gleichungssystem [3]

$$\begin{aligned} \langle \lambda^+, \mathbf{v} \rangle_\Gamma &= -\langle \mathcal{W}\gamma_D^+\mathbf{A}, \mathbf{v} \rangle_\Gamma + \langle \mathcal{K}'\lambda^+, \mathbf{v} \rangle_\Gamma \\ 0 &= \langle \mathcal{K}\gamma_D^+\mathbf{A}, \lambda' \rangle_\Gamma - \langle \mathcal{V}\lambda^+, \lambda' \rangle_\Gamma. \end{aligned} \tag{8}$$

In dieser Gleichung stellen  $\mathcal{V}$ ,  $\mathcal{K}$ ,  $\mathcal{K}'$  und  $\mathcal{W}$  das Einfachschichtpotenzial, das Doppelschichtpotenzial, das adjungierte Doppelschichtpotenzial (beide mit Sprungterm) beziehungsweise den hypersingulären Operator dar. Des Weiteren sind  $\mathbf{v}$  und  $\lambda'$  geeignete Wichtungsfunktionen, und das hochgestellte  $(\ )^+$  bedeutet, dass die damit bezeichneten Größen zum Außenraum gehören. Zur Veranschaulichung des Konzepts von Randintegraloperatoren sei hier das Einfachschichtpotenzial explizit dargestellt

$$\langle \mathcal{V}\lambda^+, \lambda' \rangle_\Gamma = \int_\Gamma \int_\Gamma \frac{1}{4\pi|x-y|} \lambda^+(y) \cdot \lambda'(x) ds_y ds_x. \tag{9}$$

Um das System (8) in die FEM Methode einzubinden, werden noch folgende Transmissionsbedingungen benötigt

$$\gamma_D\mathbf{A} = \gamma_D^+\mathbf{A} \quad \text{und} \quad \lambda = \lambda^+, \tag{10}$$

die die Stetigkeit der Felder  $\gamma_D \mathbf{A}$  und  $\lambda$  über den Rand ausdrücken. Die Gleichsetzung der Wichtungsfunktion  $\nu$  mit  $\gamma_D \mathbf{A}'$  ergibt durch Einsetzen von (8) in (5) das Gesamtsystem

$$m_\sigma(\partial_t \mathbf{A}, \mathbf{A}') + a_{\mu_r}(\mathbf{A}, \mathbf{A}') - \langle \mathcal{W} \gamma_D \mathbf{A}, \gamma_D \mathbf{A}' \rangle_\Gamma + \langle \mathcal{K}' \lambda, \gamma_D \mathbf{A}' \rangle_\Gamma = \ell(\mathbf{A}') \tag{11}$$

$$\langle \mathcal{K} \gamma_D \mathbf{A}, \lambda' \rangle_\Gamma - \langle \mathcal{V} \lambda, \lambda' \rangle_\Gamma = 0.$$

Die Unbekannten dieses symmetrischen Gleichungssystems sind die Daten  $(\mathbf{A}, \lambda)$ . Es kann gezeigt werden, dass  $\text{div}_\Gamma \lambda = 0$  gelten muss und ebenso dass  $\text{div}_\Gamma \lambda' = 0$  eine Voraussetzung für die Herleitung des Systems (8) ist [3]. Hierfür wird der spezielle Ansatz gemacht

$$\lambda = \text{curl}_\Gamma \varphi + \sum_{l=1}^L \alpha_l \eta_l. \tag{12}$$

In dieser Darstellung ist  $\varphi$  ein skalares Potenzial, das mit stückweise stetigen Ansatzfunktionen diskretisiert wird. Die Vektorfelder  $\eta_l$  hingegen sind quellfrei ( $\text{div}_\Gamma \eta_l = 0$ ) und lassen sich nicht durch skalare Potenziale repräsentieren. Ihre Existenz und Anzahl ist von der Topologie der Oberfläche  $\Gamma$  abhängig. Auf einem Torus gilt beispielsweise  $L=2$ , und es existieren zwei umlaufende Vektorfelder  $\eta_l$ , eines toroidal und eines poloidal verlaufend. Die Generierung dieser Vektorfelder wird automatisiert durchgeführt [4]. Bei gegebener Vernetzung kann der Ansatz (12) durch

$$\lambda = \underline{\mathbf{G}}\varphi + \underline{\mathbf{H}}\alpha =: \underline{\mathbf{L}}\psi \tag{13}$$

diskretisiert werden. Insgesamt ergibt sich das Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{M}} & \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{0}} \end{bmatrix} \partial_t \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{a}} \\ \underline{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{G}}(\underline{\mathbf{a}}) \\ \underline{\mathbf{0}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{R}} & \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{L}} \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} -\underline{\mathbf{W}} & \underline{\mathbf{K}}^\top \\ \underline{\mathbf{K}} & -\underline{\mathbf{V}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{R}} & \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{L}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{a}} \\ \underline{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{f}} \\ \underline{\mathbf{0}} \end{bmatrix}. \tag{14}$$

Hier stellt  $\underline{\mathbf{R}}$  die diskrete Entsprechung der Abbildung  $\mathbf{A} \rightarrow \gamma_D \mathbf{A}$  dar. Nach Anwendung einer Zeitschrittmethode und des Newton-Verfahrens wird in jedem Zeitschritt und jeder Newton-Iteration ein lineares Gleichungssystem gelöst.

### 2.3 Optimale Komplexität

Eine naive Implementierung der BEM führt zu vollbesetzten Matrizen, wie durch die Darstellung (9) erkennbar ist. Es ist also jeder Oberflächenfreiheitsgrad mit jedem anderen gekoppelt. Dies führt dazu, dass bei  $N$  Freiheitsgraden auf der Oberfläche  $\Gamma$  der Speicheraufwand bei  $N^2$  liegt und das direkte Lösen der Gleichung einen Zeitaufwand der Größenordnung  $N^3$  hat. Die zur Verfügung stehenden Rechenressourcen sind demnach schnell erschöpft, insbesondere bei der Untersuchung drei-dimensionaler Aufgabenstellungen mit komplexen Geometrien. Durch iterative Lösungsverfahren mit guter Vorkonditionierung kann der Zeitaufwand für das Lösen zwar auf die Ordnung von  $N^2$  reduziert werden, aber auch diese Komplexität gilt es zu vermeiden. Da beim iterativen Lösen nur die Wirkung der Matrix auf einen Vektor zu ermitteln ist, wird diese hier mit deutlich günstigeren Verfahren angenähert.

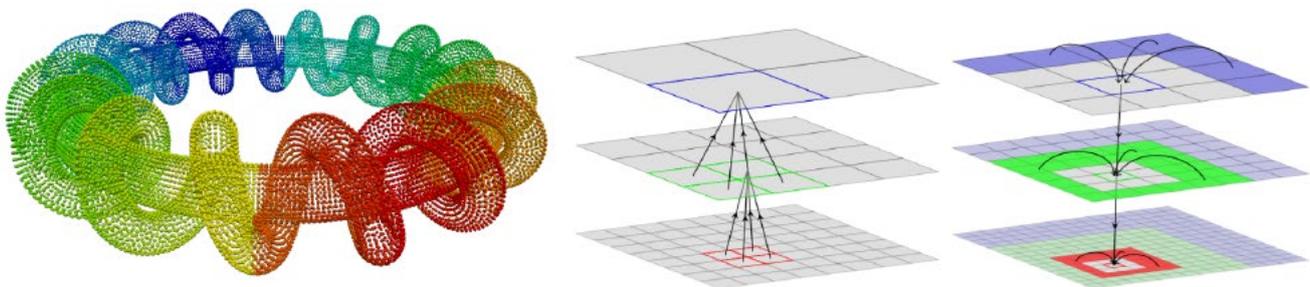


Abb. 4: Geometrische Zuordnung von Freiheitsgraden zu bestimmten Clustern gleicher Zerteilungstiefe (links) und Transfer-Operationen des schnellen Multipolverfahrens (rechts)

Als Mittel der Wahl stellt sich das Schnelle Multipolverfahren (FMM) heraus [2], dessen Mechanismus hier kurz erläutert wird. Zunächst wird die Oberfläche der betrachteten Geometrie hierarchisch in sogenannte Cluster zerlegt, bis eine vorgegebene minimale Clustergröße erreicht ist. Sind Freiheitsgrade voneinander weit entfernt, so wird deren Wirkung aufeinander über die Wirkung der zugehörigen Cluster ausgedrückt. Je größer der Abstand, desto größere Cluster werden hierfür verwendet. Liegen Freiheitsgrade jedoch nah beieinander, wird keine Approximation verwendet und die Wirkung direkt berechnet. Eine schematische Darstellung der Situation ist in den Bildern der Abb. 4 gegeben. Die Rechtfertigung für diese Näherungsverfahren ist durch den Integralkern der Form  $|x-y|^{-1}$ , siehe Gl. (9), gegeben, da dieser für große Abstände von  $x$  und  $y$  entsprechend kleine Werte annimmt. Für die technischen Details des Verfahrens sei auf die Literatur verwiesen, und es sei betont, dass ein Matrix-Vektor-Produkt mit der FMM für die gegebene Problemstellung der Magnetostatik mit einem Aufwand der Größenordnung  $N$  durchgeführt werden kann.

Neben dem Aufwand der Anwendung der Matrix spielt das Vorkonditionieren des Systems (14) eine große Rolle. Optimalerweise führt es dazu, dass die Anzahl der benötigten Iterationen für die Lösung des linearen Gleichungssystems praktisch unabhängig von seiner Größe ist. In dieser Arbeit wird ein Block-Diagonal-Schema der Form

$$\underline{P} = \begin{bmatrix} \underline{P}_{\text{FEM}} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{P}_{\text{BEM}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

verwendet. Für den FEM-Anteil wird auf das AMS-Verfahren [5] in Kombination mit einem algebraischen Multigridverfahren zurückgegriffen. Der andere Diagonalblock für den BEM-Anteil wird mittels *operator preconditioning* [12] realisiert.

### 3 Simulationsergebnisse

Die numerische Lösung der Wirbelstromgleichung mit einer FEM-BEM Kopplung, wie in Kapitel 2 beschrieben, wurde in C++ implementiert. Diese Implementierung verwendet Nédélec-Funktionen verschiedener Ansatzordnungen für alle üblichen 3D-Elemente (Tetraeder, Hexaeder, Prisma und Pyramide). Zur Validierung der Software wurden unter anderem einige Benchmarks der COMPUMAG Gesellschaft verwendet, siehe <https://www.compumag.org/wp/team/>. Ausgewählte Simulationsergebnisse unserer Software befinden sich auf <https://www.tailsit.com/tseddy.de.shtml>. Hier wird exemplarisch das TEAM 7 Problem herausgegriffen, siehe Kapitel 3.1.

Des Weiteren werden Problemstellungen präsentiert, bei denen die Wirkung von Magnetkräften auf einzelne Bauteile mit dem mechanischen Verhalten einzelner Bauteile gekoppelt wird. Hierfür wird das System (14) gelöst, und mit Hilfe der berechneten Felder werden die relevanten Kraftgrößen ermittelt, die wiederum zu einer Verformung des Systems führen. In den ersten beiden Beispielen, Kapitel 3.2 und 3.3, bewirkt die Kraftresultierende eine Starrkörperbewegung, und im letzten Beispiel in Kapitel 3.4 wird ein Metallblech plastisch verformt.

#### 3.1 TEAM 7: Induktion

In diesem Benchmark wird eine Spule mit Wechselstrom angeregt (50 Hz oder 200 Hz). Dieser Strom generiert ein alternierendes Magnetfeld, das Strom in einer darunterliegenden Leiterplatte induziert. Für dieses akademische Testbeispiel existieren Messdaten [1] für den induzierten Strom entlang einer Linie. Die Geometrie des Problems mit der Darstellung des Magnetfeldes und induziertem Strom ist im linken Bild der Abb. 5 gegeben. Wie im rechten Bild dargestellt gibt es eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten, die die Genauigkeit der Implementierung belegen. Für die Berechnung wurden lediglich die Spule und die Leiterplatte vernetzt.

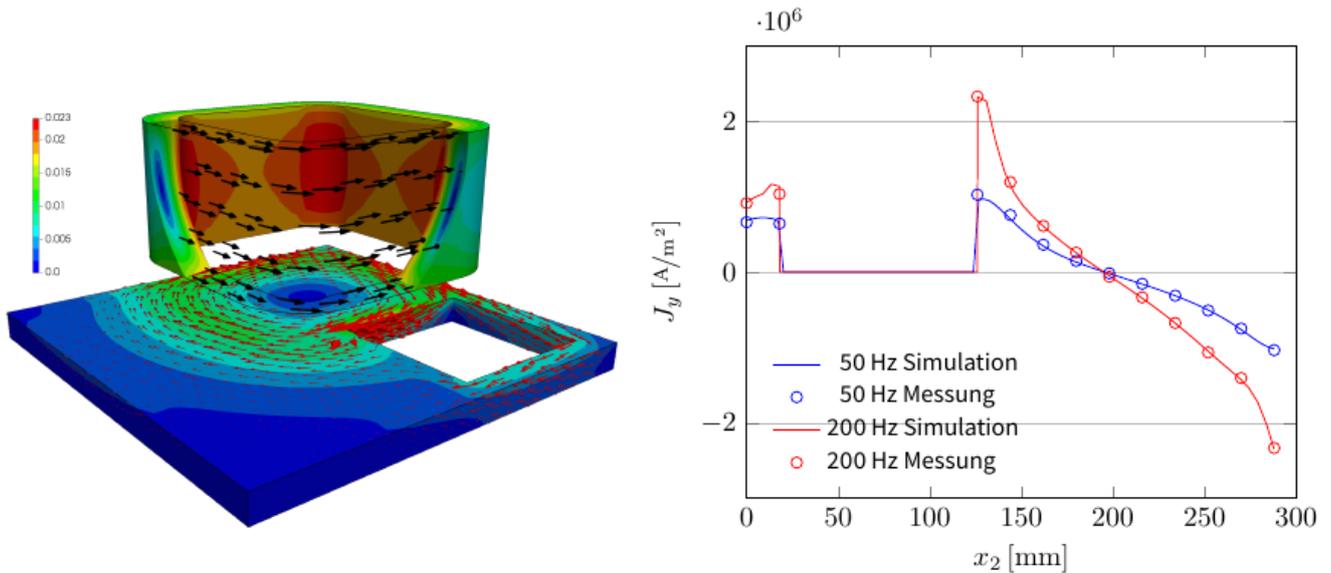


Abb. 5: TEAM 7. Magnetfeldstärke  $|B|$  und induzierte Ströme (links), Vergleich des induzierten Stroms für die Anregungsfrequenzen 50 Hz und 200 Hz entlang einer vorgegebenen Linie (rechts)

### 3.2 Fallender Magnet im Kupferrohr

Ein klassisches Experiment aus dem Physikunterricht demonstriert das Wirkungsprinzip einer Wirbelstrombremse. Ein Magnet fällt durch ein Kupferrohr und, anstatt wie im freien Fall zu beschleunigen, schwebt er mit konstanter Geschwindigkeit nach unten, solange er sich innerhalb des Rohres befindet. Das Wirkungsprinzip ist im linken Bild in Abb. (6) dargestellt. Der fallende Magnet bewirkt ein sich veränderndes Magnetfeld, wodurch im leitfähigen Rohr Strom induziert wird (Faradaysches Gesetz). Die ober- und unterhalb des Magneten kreisförmig umlaufenden Ströme erzeugen wiederum ein Magnetfeld (Ampèresches Gesetz), welches den Magneten bremst. Die Bilder in der Mitte der Abb. (6) zeigen den induzierten Strom zu verschiedenen Zeitpunkten und das rechte Bild stellt die Fallgeschwindigkeit dar, die konstant ist, solange der Magnet sich im Inneren des Rohres befindet. Als Referenz wird hier das vereinfachte analytische Modell aus [10] verwendet. Für die Berechnung wurden ausschließlich der Magnet und das Rohr vernetzt. Die Interaktion der beiden Bauteile findet durch die BEM statt. Es kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Fallgeschwindigkeit der numerischen Simulation und dem analytischen Modell festgestellt werden. Da letzteres auf stark vereinfachenden Annahmen basiert, kann eine Deckungsgleichheit nicht erwartet werden.

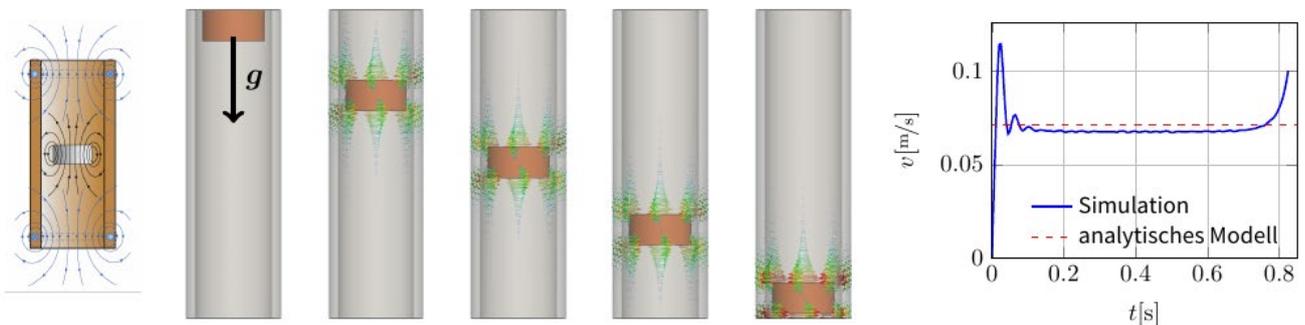


Abb. 6. Fallender Magnet. Wirkungsprinzip (links), Simulationsergebnisse (Mitte), Fallgeschwindigkeit (rechts)

### 3.3 TEAM 28: Magnetschweben

Ein weiteres Beispiel für die Wirkung der Kräfte aufgrund von Magnetfeldern ist das Magnetschweben, bei dem die Schwerkraft eines leitenden Körpers aufgehoben wird. Hierfür wird das TEAM 28 Problem herangezogen [7]. Der Aufbau des Versuchs ist im linken Bild der Abb. 7 zu sehen: eine leitende Scheibe wird über zwei konzentrischen Spulen mit gegenläufiger Wechselstromanregung positioniert. Ähnlich wie beim fallenden

Magneten induziert das wechselnde Magnetfeld der Spulen Ströme in der Leiterplatte, die wiederum ein entgegenwirkendes Magnetfeld generieren. Das mittlere Bild in Abb. 7 zeigt diese Ströme zum Zeitpunkt  $t=1s$  und im rechten Bild wird der zeitliche Verlauf der vertikalen Position der schwebenden Platte mit Messergebnissen verglichen. Im Vergleich zu den Messdaten weist die numerische Lösung eine Abweichung von unter 5% für den Langzeitzustand der Platte sowie größerer Oszillationen auf dem Weg dahin auf. Im realen Versuch treten offensichtlich dämpfende Effekte auf, die vom numerischen Modell nicht erfasst wurden.

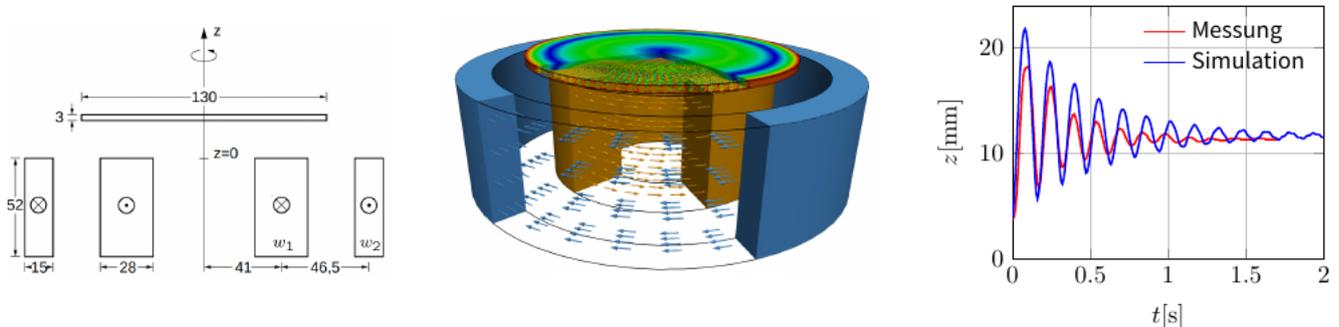


Abb. 7: TEAM 28. Aufbau (links), Ergebnis zu  $t=1s$  (Mitte) und Vergleich mit Messdaten (rechts)

### 3.4 Magnetumformung

Eine weitere, interessante Anwendung der Wirkung von Magnetkräften ist die magnetische Metallumformung. Mit den oben dargestellten Abstoßprinzipien kann Metall berührungsfrei verformt werden. Ein beispielhafter Versuchsaufbau ist im linken Bild von Abb. 8 dargestellt. Das Werkstück (blau) wird über Spulen (rot) platziert, und seine Verformung ist durch das grün dargestellte Objekt eingeschränkt. Den Spulen wird nun schlagartig ein großer Wechselstrom (in der Größenordnung von Megaampère) zugeführt, der schnell abklingt. Dadurch wird das Werkstück mit sehr hoher Geschwindigkeit weggedrückt und verformt sich entsprechend. Für dieses Beispiel wurde eine FEM-basierte Software zur Berechnung großer plastischer Verformungen implementiert und mit den Magnetkräften der Felder aus System (14) gekoppelt.

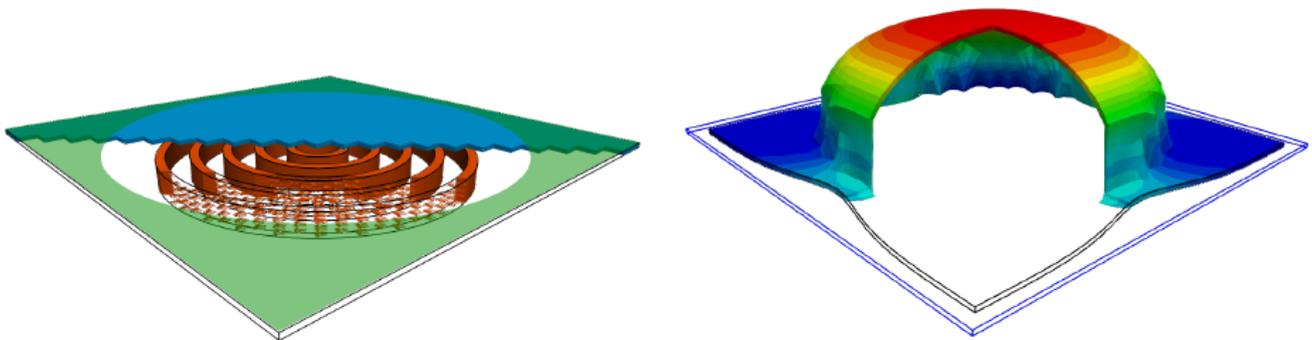


Abb. 8: Magnetumformung. Aufbau (links) und verformter Zustand (rechts)

## 4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine symmetrische Kopplungsformulierung zwischen FEM und BEM für Wirbelstromprobleme präsentiert. Durch die Verwendung des schnellen Multipolverfahrens und iterativen Lösungsverfahren im Zusammenhang mit geeigneten Vorkonditionierern hat die vorgestellte Methode eine optimale Komplexität. Das heißt, dass der Speicher- und Zeitaufwand linear von der Anzahl der Freiheitsgrade abhängt. Die Korrektheit der Rechenergebnisse wurde anhand von klassischen Benchmarks gezeigt. Mittels der Berechnung von Magnetkräften kann das Verfahren an mechanische FEM Löser angebunden werden, so dass sich ein breites Anwendungsspektrum ergibt. Als Beispiele hierfür wurden eine Wirbelstrombremse, Magnetschweben und Magnetumformung präsentiert.

Eine FEM-BEM Kopplung wurde auch in das Software-Paket LS-DYNA implementiert [9], um Magnetumformungen und auch Magnetschweißen zu simulieren. Die dort verwendete Methode basiert allerdings auf einer indirekten Randintegraldarstellung und einer iterativen Kopplungsstrategie, die sich als wenig robust erwiesen hat. Aus diesem Grund wurde der hier vorgestellte Ansatz kürzlich in LS-DYNA implementiert und steht in naher Zukunft den Nutzern zur Verfügung.

## 5 Literatur

- [1] Fujiwara, Koji und Takayoshi Nakata: Results for benchmark problem 7 (asymmetrical conductor with a hole). *COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 9(3):137–154, 1990.
- [2] Greengard, Leslie und Vladimir Rokhlin: A new version of the fast multipole method for the Laplace equation in three dimensions. *Acta Numerica*, 6:229–269, 1997.
- [3] Hiptmair, Ralf: Symmetric coupling for eddy current problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 40(1):41–65, 2002.
- [4] Hiptmair, Ralf und Jörg Ostrowski: Generators of  $H_1(h;Z)$  for Triangulated Surfaces: Construction and Classification. *SIAM Journal on Computing*, 31(5):1405–1423, 2002.
- [5] Hiptmair, Ralf und Jinchao Xu: Nodal auxiliary space preconditioning in  $H(\text{curl})$  and  $H(\text{div})$  spaces. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 45(6):2483–2509, 2007.
- [6] Jackson, John David: *Classical Electrodynamics*. Wiley, New York, 3. Auflage, 1999.
- [7] Karl, Hans, Joachim Fetzer, Stefan Kurz, Gunther Lehner und Wolfgang M Rucker: Description of TEAM workshop problem 28: An electrodynamic levitation device. In: *Proc. of the TEAM Workshop, Graz, Austria*, Seiten 48–51, 1997.
- [8] Kielhorn, Lars, Thomas Rüberg und Jürgen Zechner: Simulation of electrical machines: a FEM-BEM coupling scheme. *COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 36(5):1540–1551, 2017.
- [9] L'Eplattenier, Pierre, Grant Cook, Cleve Ashcra, Mike Burger, Jose Imbert und Michael Worswick: Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic Simulations. *Steel Research International*, 80(5):351–358, 2009.
- [10] Levin, Yan, Fernando L da Silveira und Felipe B Rizzato: Electromagnetic braking: A simple quantitative model. *American Journal of Physics*, 74(9):815–817, 2006.
- [11] Monk, Peter: *Finite Element Methods for Maxwell's Equations*. Oxford University Press, 2003.
- [12] Steinbach, Olaf und Wolfgang L Wendland: The construction of some efficient preconditioners in the boundary element method. *Advances in Computational Mathematics*, 9(1-2):191–216, 1998.

# Konstruktionsnahe Optimierungsmethode gekoppelt mit 1D Simulation

Patricia Korth

Diehl Aviation Laupheim GmbH

Im Rahmen des CleanSky2 Projektes entwickelt Diehl Aviation eine innovative Auslegungsmethode für Flugzeug-Klimaanlagen. CleanSky2 ist eine öffentlich-private Partnerschaft zwischen der Europäischen Kommission und der Luftfahrtindustrie, mit dem Ziel durch neue Technologien CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> sowie Lärm-Emissionen von Flugzeugen wesentlich zu reduzieren. Diehl Aviation bringt durch die Erfahrung als Hersteller von Klimaanlagen und Kabinenausstattung einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg. Durch Nutzung von Systemsimulation gekoppelt mit Geometrieoptimierung wird eine präzise Analyse von Klimaanlagen mit reduziertem Aufwand ermöglicht. Dabei soll nicht nur die Strömung im System bestimmt werden, sondern gleichzeitig auch die Akustikeinflüsse auf die Passagiere, sowie Gewicht und Kosten des Systems.

Bei der 1D-Systemsimulation wird für jedes Bauteil ein Modell verwendet und diese miteinander zu einem System verknüpft und simuliert. Dadurch lassen sich beliebig viele Varianten einer Klimaanlage simulieren und vergleichen. Durch Integration von Geometrieoptimierung in die Bauteilmodelle können die Bauteile nach Wahl eines Systemaufbaus passend zum System ausgelegt werden. Somit ist es möglich, während der Auslegung einer Klimaanlage das Gesamtsystem hinsichtlich der Strömung zu optimieren und Akustik, Gewicht und Kosten zu reduzieren, anstatt dies im Nachhinein durch Anpassen von Bauteilen zu realisieren. Dadurch werden wesentlich Simulations- und Konstruktionsaufwand reduziert, da ansonsten nach jeder Bauteiländerung der Einfluss auf das System untersucht werden müsste.

## 1 Einleitung

Durch den Einsatz von Optimierungsmethoden und 1D-Simulation in den frühen Phasen eines Produktentwicklungsprozesses ist es möglich, die Leistungsfähigkeit von Systemen und deren Komponenten in vielen Bereichen zu verbessern. Die Simulation unterstützt die Konstrukteure in ihrer Arbeit erheblich, so dass sie sich nicht allein auf Erfahrung und komplexe Komponententests verlassen müssen.

Für die Verbesserung von Komponenten und Systemen wurden zwei Methoden entwickelt und kombiniert, die im Folgenden vorgestellt werden. Diese können sowohl unabhängig von Komponenten als auch von der Berechnungssoftware eingesetzt werden. Die Methoden sollen auf eine Klimaanlage angewendet und im Rahmen des Clean Sky 2 [1] Projektes "NADiA" weiterentwickelt werden, um eine innovative Entwicklungsmethode für Klimaanlagen zu erreichen.

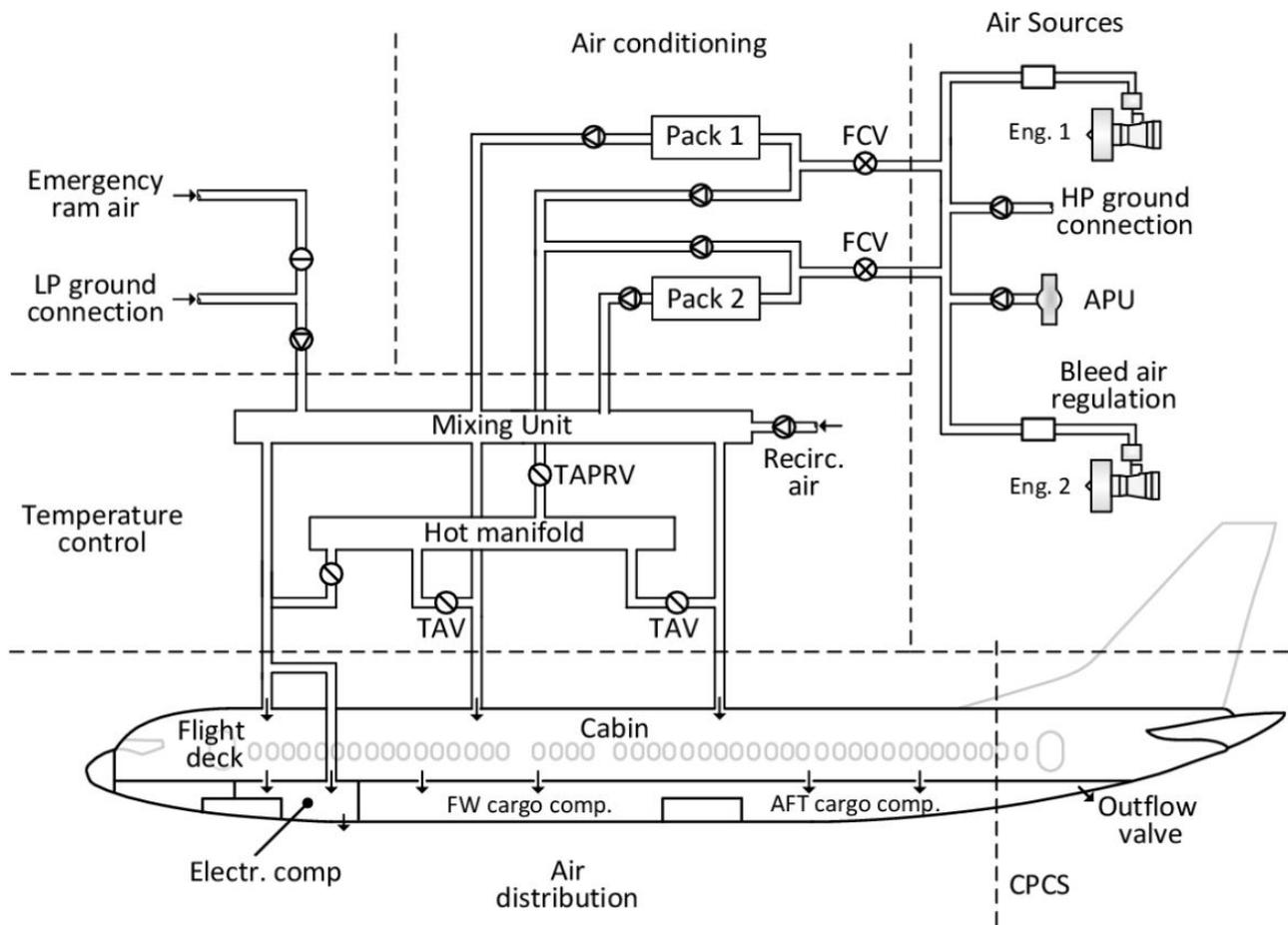


Abb. 1: Klimaanlage eines konventionellen Flugzeuges [2]

Klimaanlagen in Flugzeugen müssen in einem weiten Bereich von Randbedingungen einen gleichbleibenden Komfort für die Passagiere gewährleisten. Viele Komponenten mit unterschiedlicher Komplexität müssen zusammenwirken, um ein ausgewogenes System zu schaffen. Durch die Entwicklung einer innovativen Auslegungsmethode für das Gesamtsystem können Zeit und Kosten bei der Komponentenauslegung eingespart und gleichzeitig die Systemleistung gesteigert werden.

Für einfache Geometrien wie z.B. Rohrleitungssysteme existieren bereits einige Systemauslegungsmethoden, die jedoch meist auf Standardkomponenten und deren Volumenstromverteilung, Wärme- und Druckverluste beschränkt sind [3]. Die hier vorgestellte Methode erlaubt dagegen die freie Wahl der Zielgrößen des Systems. Die Eigenschaften können nicht nur Daten direkt aus der Simulation enthalten, wie z.B. Strömung oder Akustik, sondern auch zusätzliche Faktoren wie Gewicht und Materialkosten. Damit wird ein breites Spektrum an Systemeigenschaften in der Bauteilentwicklung abgedeckt.

Die 1D-Simulationsmethode erlaubt es, ein Rohrsystem mit einem eigenen Bauteilkatalog auf Basis von CFD-Simulationen oder experimentellen Daten zu erweitern, so dass das gesamte Klimasystem abgebildet werden kann und nicht auf eine einfache Geometrie beschränkt ist. Die Systemsimulation besteht aus 1D-Modellen auf Basis von Modelica [4]. Diese können unabhängig von der Software über das FMU (Functional Mock-Up Unit) Format ausgetauscht werden. Durch die Kopplung der Simulation mit der Geometrieoptimierung können die Komponenten auch auf Systemebene optimiert werden, so dass beim Durchlaufen einer großen Anzahl verschiedener Designpunkte eine optimale Komponentenkombination für das System gefunden werden kann.

## 2 Entwicklungsmethoden

Bei der Konstruktion eines Systems durchläuft es viele verschiedene Varianten mit wechselnden Bauteilvarianten oder variierenden Randbedingungen. Für jede Systemversion wäre eine separate 3D-Simulation oder ein Test notwendig, um die Eigenschaften des Systems zu bewerten. Da jede Komponente das Gesamtsystem oder andere Komponenten beeinflusst, müsste sie nach jeder Komponentenoptimierung wieder in das Gesamtsystem integriert und das Gesamtsystem erneut simuliert oder getestet werden. Es wäre daher ein wesentlicher Vorteil, die Geometrieoptimierung in die Systemsimulation zu übertragen, so dass nur ein Simulationsmodell verwendet und optimiert wird.

Die Simulation des Gesamtsystems kann bei einer großen Geometrie zu vielen Elementen und einer langen Simulationszeit führen. Bei der Geometrieoptimierung wird eine hohe Anzahl von Modellvarianten durchlaufen, die durch Algorithmen gesteuert werden. Dies bedeutet bei komplexen Modellen einen hohen Rechenaufwand. Die 3D-Systemsimulation hat zudem den Nachteil, dass einzelne Komponenten nicht ausgetauscht und das System nicht erweitert werden kann, ohne dass ein geschlossenes Volumen neu erstellt und neu vernetzt werden muss. Gegenüber der 3D-Simulation bietet die 1D-Simulation somit viele Vorteile für die Systemanalyse.

Bei der 1D-Simulation wird jedes Bauteil mit einem mathematischen Modell beschrieben. Die einzelnen Komponenten werden dann zu einem integrierten System verbunden. Der Einfluss der Einzelkomponenten auf das Gesamtsystem kann so wesentlich schneller abgeschätzt werden als bei einer isolierten Analyse. Zudem können Komponenten ausgetauscht werden, ohne das Gesamtsystem erneut in 3D zu simulieren. Sehr einfache Komponenten, wie z.B. Rohre, können mit der Theorie dargestellt werden, ohne dass 1D-Modelle aus der CFD-Simulation erstellt werden müssen. Dadurch wird der Aufwand der 3D-Systemsimulation erheblich reduziert. Dies ermöglicht die Optimierung und Berechnung vieler Bauteilvarianten auf Systemebene.

Durch den Einsatz von Optimierungsmethoden und 1D-Simulation werden insbesondere Konstrukteure wesentlich unterstützt. Sie müssen nicht mehr jedes Bauteil iterativ einzeln anpassen, sondern erhalten ein simulationsgestütztes, für das System optimiertes Bauteil. Die angewandten Methoden der Geometrieoptimierung und 1D-Simulation sowie deren Kopplung werden im Folgenden vorgestellt.

### 2.1 Geometrieoptimierung

Für die Optimierung von Bauteilen gibt es verschiedene Ansätze, die meist auf einer geometrischen Parametrisierung des CAD-Modells oder auf einer Netzverformung beruhen [5]. Bei der Kopplung der Geometrieoptimierung an die 1D-Simulation kann die Methode der Geometrieoptimierung und die Art der Parametrierung frei gewählt werden, sofern mathematische Modelle aus den gewonnenen Daten extrahiert werden können. Hier entschied man sich für ein 2D-Netz-Morphing.

Die Parametrisierung des Oberflächennetzes bietet folgende Vorteile:

1. Das Netz kann "frei" verformt werden. Jede beliebige Änderung ist möglich.
2. Geometrische Parameter wie Längen, Durchmesser u. ä. können ebenfalls gesteuert werden
3. Es ist keine CAD-CAE-Anbindung notwendig

Der Nachteil der Methode ist jedoch der eingeschränkte Lösungsraum durch die Parameterdefinition des Anwenders. Es ist Erfahrung erforderlich, um die richtigen Bereiche zu identifizieren, in denen sich die Geometrie ändern soll. Da nur das Netz verformt wurde, muss das Netz nach der Geometrieoptimierung auch wieder in ein CAD-Modell übertragen werden.

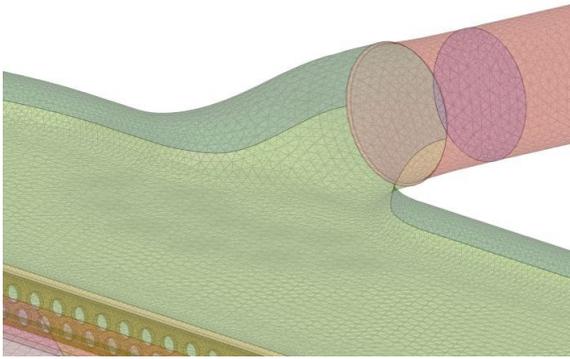


Abb.2.1: Originale Vernetzung

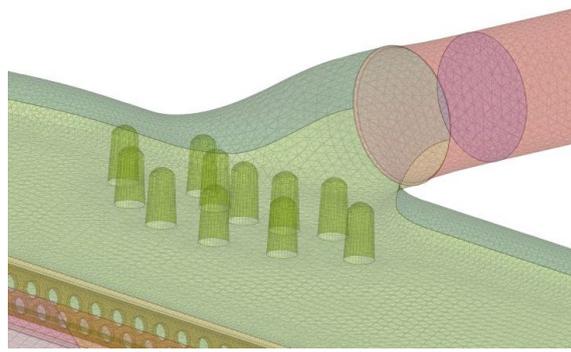


Abb.2.2: Verformtes Netz mit Beulen

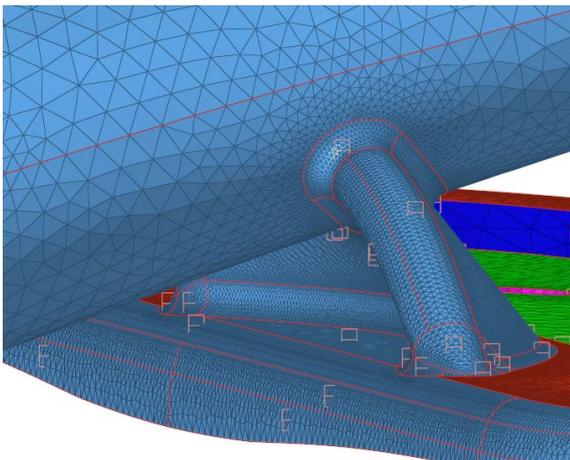


Abb.2.3: Originale Vernetzung

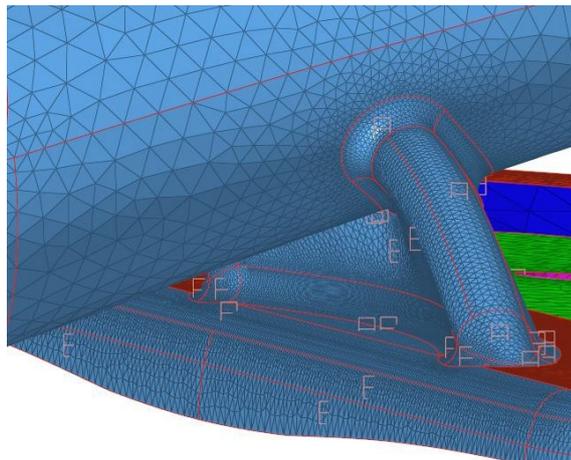


Abb.2.4: Angepasster Radius

Abb. 2: Beispiele für Netzverformung

In Abbildung 3 wird der Ablauf der Methode unabhängig vom gewählten Toolset dargestellt. Die gezeigte Methode ermöglicht sowohl die Bauteiluntersuchung mittels Sensitivitätsstudien als auch die Geometrieoptimierung.

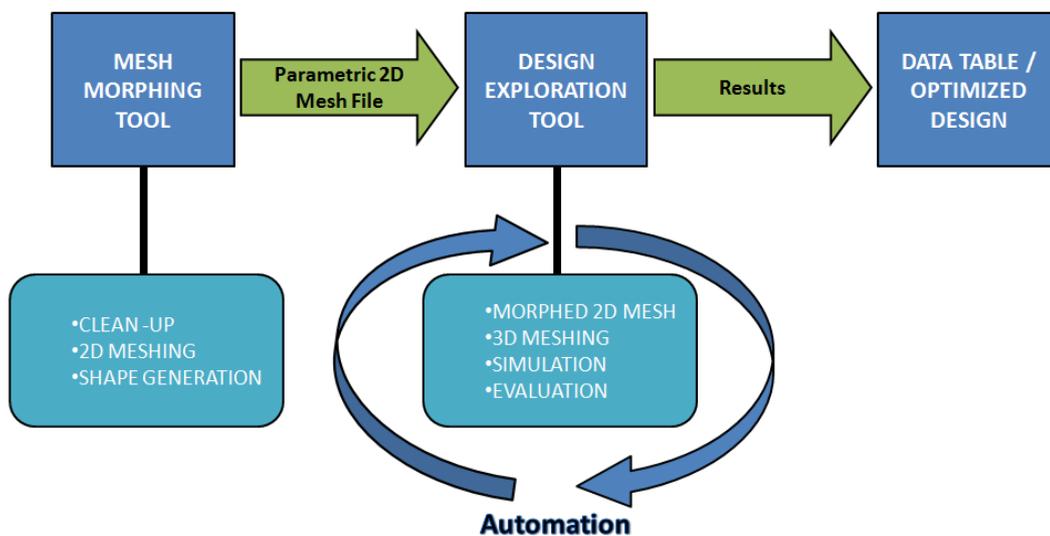


Abb. 3: Ablauf der automatisierten Netzverformung

In dem Vernetzungswerkzeug wird die bereinigte Geometrie zunächst flächenvernetzt. Auf dem Netz wird manuell eine Netzdeformation erzeugt und als Form gespeichert. Die Formen werden dann in eine parametrisierte Oberflächennetzdatei exportiert.

Diese Datei wird wiederum von einer Optimierungssoftware in einem automatisierten Prozess verwendet. Eine algorithmusgesteuerte Parametervariation erzeugt ein neues verformtes Oberflächennetz. Das Oberflächennetz wird volumenvernetzt und mit vordefinierten Simulations- und Randbedingungen durch Kopplung eines CFD-Solvers simuliert. Die Ergebnisse aus dem CFD-Solver werden in das Design-Explorationstool zurückgeführt. So ist es möglich, entweder über "Design of Experiment"-Algorithmen eine Datentabelle zu generieren, in der jede Geometrievariante mit Ein- und Ausgabewerten gespeichert wird, oder die Geometrie über Zielfunktionen und Optimierungsalgorithmen zu optimieren.

Besonders hervorzuheben ist, dass bei dieser Methode Geometrieparameter und Simulationsparameter gleichzeitig als Variablen verwendet werden können. So ist es z.B. möglich, den Einfluss der Materialwerte auf die Strömung zu ermitteln oder die Bauteilkosten z.B. über die Materialdicke zu berechnen und zu optimieren.

Um die Optimierung zu validieren, wurden die Druckverluste und Geschwindigkeitsprofile von Bauteilen in experimentellen Untersuchungen bei Diehl Aviation untersucht. Zunächst wurde eine Basisvariante getestet und die Simulationsparameter soweit angepasst, dass die Ergebnisse validiert werden konnten. Anschließend wurde die Basisvariante mit einer Geometrieoptimierung verformt und ein optimierter Prototyp hergestellt. Dieser Prototyp wurde erneut experimentell untersucht. Mit beiden Varianten konnte durch die Simulation eine gute Darstellung des Tests erreicht werden.

## 2.2 1D Simulation

Die 1D-Simulation ermöglicht die Untersuchung von Systemen in multiphysikalischen Bereichen mit einem reduzierten Rechenaufwand. Die verwendete Modellierungssprache ist Modelica [4]. In Modelica steht eine große Anzahl von Open-Source-Bibliotheken zur Verfügung, die auch für die Simulation von Rohrsystemen genutzt werden können. Durch die Erstellung eigener Modelle kann der bestehende Komponenten-katalog auf ein spezifiziertes Systemmodell erweitert werden.

Um selbst erstellte Modelle zu integrieren, müssen diese in Modelica-Module programmiert oder als FMUs importiert werden. Je nach verwendetem Toolset stehen verschiedene Integrationsmöglichkeiten zur Verfügung. Die universellste Methode ist die direkte Speicherung der Datentabellen oder die Umformung der Datentabellen in mathematische Funktionen. Diese Datentabellen können aus der Simulation heraus erstellt werden, es ist aber auch möglich, durch Experimente erzeugte Daten zu verwenden. Einige Programme bieten auch die Möglichkeit, aus den Datentabellen automatisch reduzierte Ordnungsmodelle zu generieren, die als FMUs exportiert werden können. Auch die Verwendung von Antwortflächen zur Abbildung des Bauteilverhaltens in einem 1D-Modell ist möglich. Durch die Verwendung von geometrischen Parametern als Eingangsgrößen kann die 1D-Simulation leicht mit einer Geometrieoptimierung gekoppelt werden. Durch die Einbeziehung von Materialdaten und Dichten ist es zudem möglich, die Gewichts- und Kostenberechnung in ein 1D-Modell zu integrieren.

Ein Beispiel für ein 1D-Systemsimulationsmodell ist in Abbildung 4 dargestellt. Das Bauteilverhalten eines Luftauslasses (CAO) ist in einem Bauteilmodell hinterlegt. Dieses Modell verwendet eine mathematische Formel, um die Eingänge mit den Ausgängen zu verbinden. Die Eingangsgrößen sind der Volumenstrom und der Totaldruck. Die Ausgangsgrößen sind die Summe der Totaldruckverluste des Systems, der Druckverlust über die Komponente und der Volumenstrom.

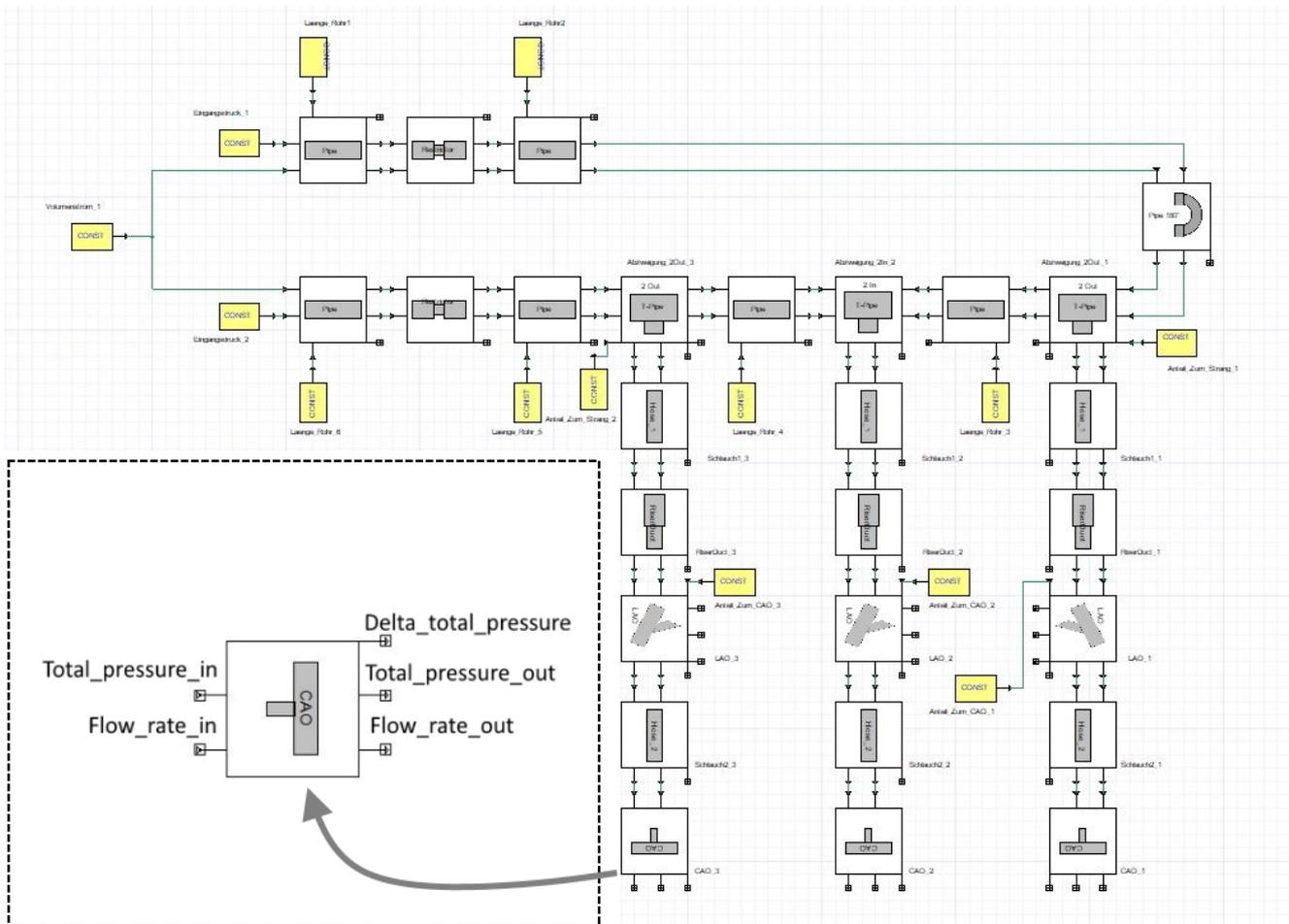


Abb. 4: Beispiel für 1D Systemsimulationsmodell

Die sogenannten Pins dienen dazu, die einzelnen Komponenten zu einem Gesamtsystem zu verbinden, wie in Abbildung 4 dargestellt. Dieses verfügt wiederum über eigene Systemeingangs- und -ausgangsvariablen. Dies sind z.B. die Rohrdicken und -längen, der Volumenstrom und der Umgebungsdruck. Bei der Systemsimulation ergeben sich unterschiedliche Volumenstromverteilungen auf die einzelnen Abzweige und Luftauslässe und ein unterschiedlicher Gesamtdruckverlust. Durch die Kopplung der Systemeingangs- und -ausgangsgrößen an Optimierungswerkzeuge kann die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems verbessert werden. In diesem Beispiel kann untersucht werden, welche Rohrgrößen notwendig sind, um einen bestimmten Gesamtdruckverlust nicht zu überschreiten, dabei die maximalen Geschwindigkeiten im System einzuhalten und möglichst an jedem Ausgang den gleichen Volumenstrom zu erreichen.

Die Modelle werden in Zukunft um weitere Faktoren wie Kosten und Gewicht, aber auch Thermik und Akustik erweitert. Zusätzlich wird durch die Kopplung von geometrischen Einflüssen auch die Optimierung komplexerer Komponenten auf Systemebene ermöglicht. Können bestimmte Bauteile nicht über 1D-Modelle in das System integriert werden, so können stattdessen 3D-Modelle über Co-Simulation eingesetzt werden.

### 3 Fazit

Durch die Kopplung von Geometrieoptimierung mit 1D-Simulation ist es möglich, Bauteile systemintegriert zu konstruieren sowie weitere wichtige Faktoren wie Kosten und Gewicht zu berücksichtigen. Wenn die Methode in einer frühen Entwicklungsphase integriert wird, kann die Systemleistung in einer Weise verbessert werden, die mit einer isolierten Bauteilanalyse nicht erreichbar wäre oder wesentlich größere Aufwendungen erfordern würde.

Die Methode ist universell anwendbar, sodass beliebige physikalische Bereiche abgedeckt werden können. Die Wahl der Ein- und Ausgangsgrößen der Modelle ist frei. Die Methode ist auch nicht auf ein bestimmtes Simulationswerkzeug oder bestimmte Komponenten beschränkt. Einzelne Komponenten können im System frei hinzugefügt oder ausgetauscht werden. Die Untersuchung vieler Systemzustände ist in kurzer Zeit möglich. Durch die Verwendung des FMU-Formats können Modelle mit Kunden/Partnern ausgetauscht und gleichzeitig Informationen geschützt werden.

Durch Systemsimulation gekoppelt mit Geometrieoptimierung wird eine große Anzahl von Bauteilvarianten eingespart, da automatisch ein für das System geeignetes Bauteil ermittelt wird. Dies reduziert die Arbeitszeit und verbessert gleichzeitig das Gesamtsystem auf ein gewünschtes Ziel.

### 4 Literatur

- [1] Clean Sky 2 JU, Bruessel, accessed 7 October 2019, <https://www.cleansky.eu/>
- [2] Bender D., Exergy-based analysis of aircraft environmental control systems and its integration into model-based design, 2018
- [3] Böswirth L., Bschorer S., Buck T.: "Technische Strömungslehre", Springer Vieweg, 2014
- [4] Modelica Association, Linköping, accessed 5 September 2019, <https://www.modelica.org/>
- [5] Dumas L. (2008) CFD-based Optimization for Automotive Aerodynamics. In: Thévenin D., Janiga G. (eds) Optimization and Computational Fluid Dynamics. Springer, Berlin, Heidelberg

# Abstrakte Modellierung – der effizientere Weg CFD/CAE-Prozesse robust zu automatisieren

Amol Patil, Davis Evans, Karlheinz Peters, Santosh T. Patil

Novus Nexus, Inc.

**Angesichts eines weltweit wachsenden Wettbewerbs sind Hersteller aller Branchen gefordert, neue und verbesserte Produkte so schnell und wirtschaftlich wie möglich zu entwickeln. Gleichzeitig werden ihre Produkte und Systeme immer komplexer. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist eine verstärkte und effiziente Nutzung virtueller Tests in allen Phasen der Entwicklung ein Schlüsselfaktor, um Produkte, die auf Anhub wie gewünscht funktionieren, zeitnah zu entwickeln und wettbewerbsfähig zu bleiben. Automatisierte Prozesse, die schnell und einfach implementiert werden können und dazu robust arbeiten, ermöglichen den besten Nutzen aus virtuellen Tests zu ziehen. Hier kommt abstrakte Modellierung ins Spiel, die einen leicht und schnell zu implementierenden Weg für die Automation von „CAD-zu-Solver“ Prozessen bietet. Abstrakte Modellierung verbindet dabei nicht nur mit höchster Zuverlässigkeit Design- und Simulationswelten, sie hilft auch unproduktive Tätigkeiten von Analysten zu reduzieren, Simulationsprozesse zu beschleunigen, die Verwendung von Best Practices sicher zu stellen und wertvolles Unternehmenswissen zu bewahren.**

**In diesem Beitrag wird erläutert, was abstrakte Modellierung ist, warum mit ihr Automatisierungen schneller und einfacher zu realisieren sind als mit herkömmlichen Methoden, wie sie „Demokratisierung“ von Simulation fördert und wie sie für "Simulations-Applikationen" verwendet werden kann. Der charakteristische Ablauf eines automatisierten Simulations-Prozesses auf Basis der abstrakten Modellierung - Erstellung abstrakter sowie simulationsfertiger CAD-Modelle und automatische Vorbereitung aller Solver-Eingabedateien - wird erläutert. Abstrakte Modellierung ermöglicht somit die Initiierung zuverlässige Simulationen durch nicht CAE/CFD Spezialisten und eine Entlastung der Analysten von unproduktiver Routinearbeit.**

**Weitere Diskussionspunkte sind die Fähigkeiten abstrakter Modellierung, a) Probleme durch nicht genügend verfügbare CFD-Spezialisten zu mildern, b) die Verlässlichkeit von Simulationsergebnissen zu gewährleisten (z. B. sind Ergebnisse immer vergleichbar, insbesondere wenn sie von verschiedenen Personen zu verschiedenen Zeiten durchgeführt werden) und c) Simulationsergebnisse für kritische Entwurfsentscheidungen rechtzeitig zur Verfügung zu stellen.**

## 1 Einführung

Während die meisten Menschen von abstrakter Kunst gehört haben, ist das Konzept der 3D-Simulationen im Zusammenhang mit abstrakter Modellierung vielen Analysten unbekannt. Welche Rolle kann Abstraktion spielen, wenn wir Teile oder Baugruppen entwerfen, deren spezifische Geometrien maßgeblich bestimmen, wie sich ein Produkt verhält?

Traditionelle Kunst und Simulation haben ein gemeinsames Ziel: Beide versuchen, Objekte so realistisch wie möglich zu erfassen. Kunst verwendet Gemälde oder Skulpturen, Simulation virtuelle Modelle für ihre Darstellung der Realität. Je näher die Ergebnisse der Realität kommen, desto besser. Aber sobald wir "abstrakt" in die Gleichung bringen, haben Kunst und Simulation nicht mehr die gleichen Ziele. Abstrakte Kunst ist Kunst, die nicht versucht, eine Realität darzustellen, sondern stattdessen imaginäre Formen, Farben und gestische Markierungen verwendet, um ihre Wirkung zu erzielen. [1] Als eigenständige Kunstdisziplin befreit sie der Künstler von der objektiven Realität und ermöglicht es ihnen zu experimentieren und ihrer Vorstellungskraft freien Lauf zu lassen. Simulation hingegen ist immer an reale Objekte gebunden, 3-D Simulationen an die exakte Form von Produkten, was bedeutet, dass abstrakte Modellierung – am Ende – mit Geometrien umgehen muss und geplante Formen nicht ignorieren kann. Weshalb kann Modellierung dann abstrakt sein?

Wie bereits erwähnt, erfolgen 3D-Simulationen mit definierten Geometrien. Ein Analyst erhält oft viele Geometrie-Variationen, um mit ihnen immer wieder die gleichen Tests durchzuführen, bis die am besten geeignete Option gefunden ist. Das bedeutet auch, dass er die Simulation für jede Geometrievariante immer wieder vorbereiten muss – eine mühsame, unproduktive Aufgabe, die die Ausführung von Simulationen verlangsamt und Zeit beansprucht, die besser für höherwertige Tätigkeiten wie das Erstellen aussagekräftigerer Simulations-Reports zur besseren Unterstützung von Entwicklungsentscheidungen aufgewendet werden sollte. Abstrakte Modellierung behebt diese Ineffizienz (und mehr), indem Simulations-Setups erstellt werden, die wiederverwendbar sind, da sie unabhängig von einer bestimmten Geometrie sind und stattdessen mit Platzhaltern arbeiten. Wenn ein abstraktes Modell später mit Geometrie in Form eines CAD-Modells kombiniert wird, werden alle erforderlichen Solver-Eingabedateien automatisch erstellt. Im Gegensatz zur abstrakten Kunst besteht das Ziel der abstrakten Modellierung darin, die Simulation realer Objekte zu unterstützen, nur der erste Schritt beinhaltet eine Trennung von Simulations-Setup und realen Geometrien damit dieses Setup für beliebige Geometrien wiederverwendbar wird.

## 2 Wettbewerbsdruck durch Simulation begegnen: Chance und Herausforderung

Der weltweit wachsende Wettbewerb verlangt, dass Hersteller aller Branchen neue und verbesserte Produkte so schnell und wirtschaftlich wie möglich entwickeln. Kunden erwarten immer bessere Funktionalität, wodurch Produkte und Systeme immer komplexer werden. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist eine verstärkte und effiziente Nutzung von Simulation in allen Phasen der Entwicklung ein Schlüsselfaktor, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Automatisierte Prozesse, die schnell und einfach implementiert werden können und dazu robust arbeiten, ermöglichen es, den besten Nutzen aus virtuellen Tests zu ziehen.

Leider ist die Realität in vielen Organisationen so, dass CAD-Konstrukteure und andere Entwickler keinen direkten Zugriff auf CFD und andere CAE-Tools haben, um das Verhalten der von Ihnen entworfenen Produkte jederzeit gut zu verstehen. Gleichzeitig verbringen Analysten 30% – 70% ihrer Zeit für die Vorbereitung von Simulationen mit sich wiederholenden Setups. Feedback zur Leistung ihrer Modelle erhalten Designer dadurch oft (zu) spät, was zu Terminverzögerungen, unnötigen Kosten und Qualitätsproblemen führen kann.

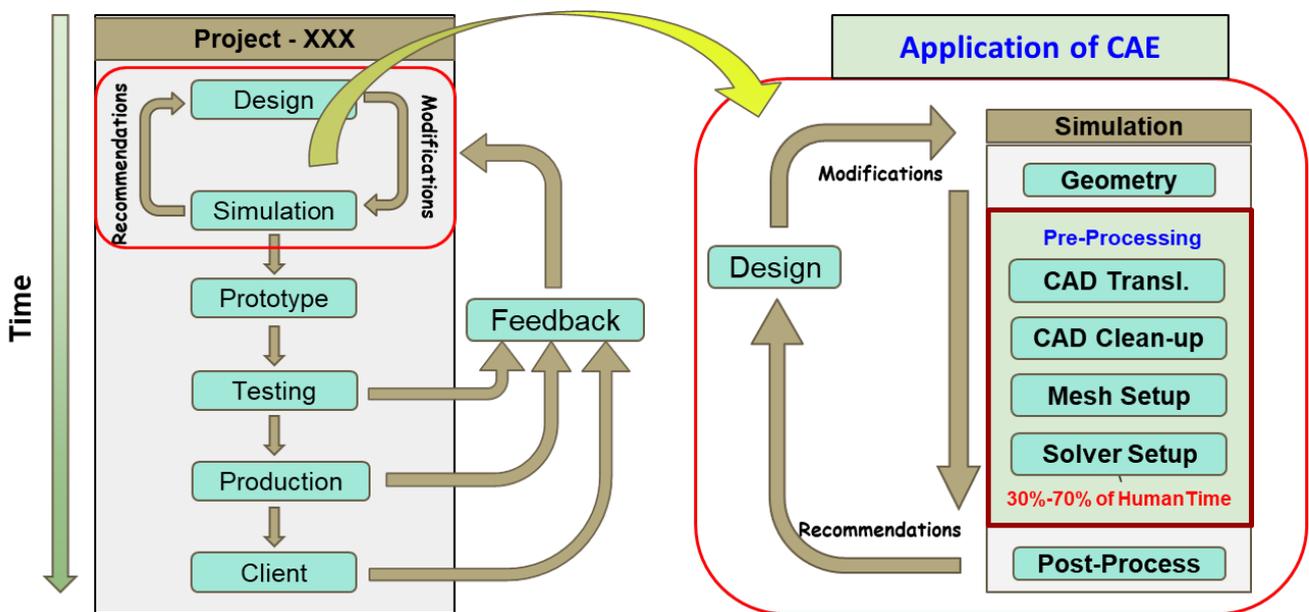


Abb. 1: Die Bedeutung von Simulation im Produktlebenszyklus

Laut einer Umfrage von Tech-Clarity, einem Marktforschungsunternehmen, sehen 96% der Befragten Vorteile, wenn ihre CAD-Designer direkten Zugang zu Simulationswerkzeugen haben. Zu den erwarteten Vorteilen gehören:

- Frühere Erkennung von Problemen
- Geringere Anzahl von Prototypen
- Weniger Nacharbeit
- Mehr Innovation

Gleichzeitig sind aber 65% der Befragten der Ansicht, dass ihre Designer nicht so viele Simulationen durchführen, wie sie sollten. Der direkte Zugriff auf Simulationswerkzeuge wird behindert durch:

- Mangelndes Simulations-Know-how
- Komplexität von Simulationswerkzeugen - zu schwer zu bedienen
- Zu lange Simulationszeiten

Die obige Erhebung bestätigt zwei wichtige Punkte. Erstens ist Simulation eine Schlüsseltechnologie für Unternehmen, um weiter wettbewerbsfähig zu bleiben. Sie macht Entwicklungsprozesse effizienter, schafft überlegene Produkte und ermöglicht mehr und schnellere Innovationen. Zweitens wird Simulation noch nicht in dem Maße verwendet, wie es sein sollte. Mangelnde Ressourcen und mangelndes Wissen halten Unternehmen davon ab, das volle Potenzial der Simulation auszuschöpfen. In den folgenden Kapiteln wird gezeigt, wie abstrakte Modellierung Entwicklungsorganisationen helfen kann, diese Simulationsherausforderungen zu bewältigen. Nachfolgend wird CAENexus von der Firma Novus Nexus, Inc. (speziell FluidNexus für CFD) für UI-Screenshots und als Beispiel für die Implementierung abstrakter Modellierungen verwendet.

### 3 Abstrakte Modellierung aus der Nähe betrachtet

Wie bereits erläutert, werden 3D-CFD-Simulationen immer für bestimmte Geometrien durchgeführt. Das abstrakte Einrichten einer CFD-Simulation erfordert die Berücksichtigung potenzieller Geometrien durch Platzhalter. Bei der CAENexus werden diese Platzhalter als "Klassen" bezeichnet. Wie Geometrie haben diese Klassen Dimensionen (2D oder 3D für CFD) und werden in der Regel von Benutzern nach ihrem Material oder ihrer Funktion benannt. CAD-Teile oder deren Flächen beziehen sich auf Klassen, die mittels Textattributen Klassen in einem abstrakten Modell referenzieren. Dadurch kann ein solches abstraktes Modell mit beliebiger Geometrie wiederverwendet werden.

#### 3.1 Warum abstrakte Modellierung

CFD-Analysten führen häufig die gleiche CFD-Simulation für viele unterschiedliche Geometrieinstanzen durch. Bei der Einrichtung einer CFD-Analyse, z.B. zur Berechnung interner Durchflussraten, gibt es physikalische und Material-bezogene Aspekte, die für alle Produktvariationen gelten. Gleichzeitig gibt es Unterschiede zwischen den Variationen, gewöhnlich in der Geometrie oder auch in der Funktionalität. Die zwei einfachen Modelle in Abbildung 2 sind hierzu einfache Beispiele.

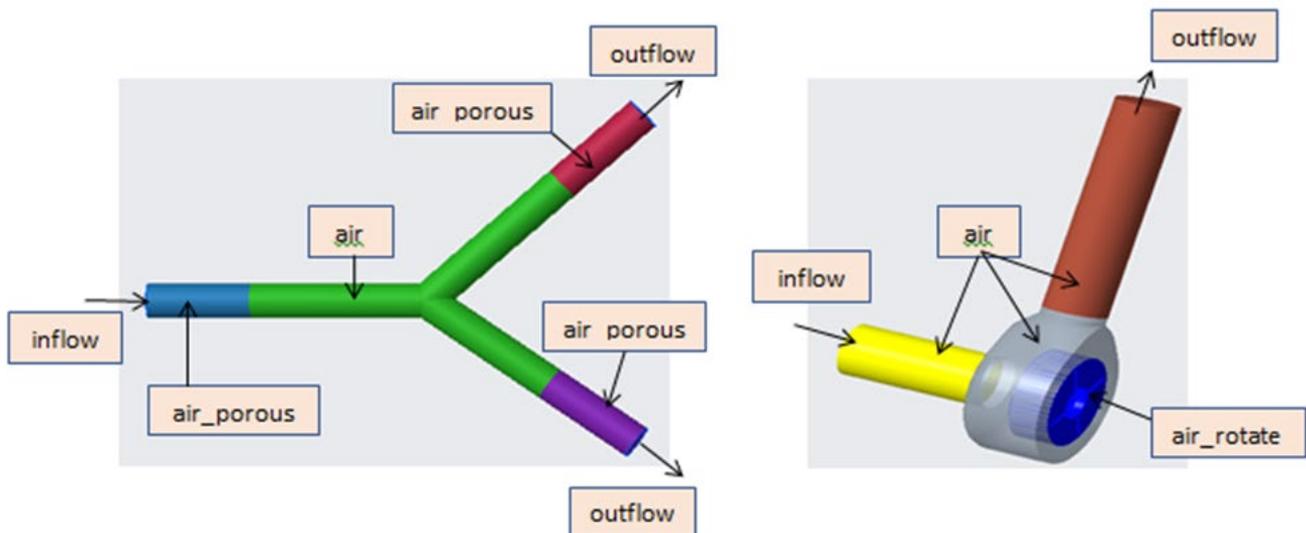


Abb. 2: Geometriebeispiele

Beide Modelle bestehen aus Luft (-Räumen) und anderen Bereichen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften. Das erste Modell weist neben Luft poröses Material auf, das andere eine rotierende Vorrichtung. Für jeden Simulationslauf müssen Materialparameter, Zufluss, Abfluss und/oder Wandbedingungen spezifiziert werden. In einer herkömmlichen Simulationsumgebung muss der Analytiker diese Setups jedes Mal wiederholen, wenn sich das Geometriemodell ändert. Dieser Prozess ist nicht nur zeitaufwändig, sondern kann auch zu nicht vergleichbaren Ergebnissen führen, wenn die Simulationseinrichtung nicht konsistent durchgeführt wird, z. B. wenn sich Netzstrategien oder ausgewählte Turbulenzmodelle zwischen Simulationsläufen ändern.

Methoden wie Scripting oder Templates stellen etablierte Möglichkeiten zur Automatisierung von CFD- und anderen CAE-Prozessen dar. Der Aufwand, diese Skripts zu erstellen, zu testen und zu verwalten, ist aber sehr hoch. Komplexe Geometrien und damit verbundene Änderungen sind schwer zu unterstützen – wenn überhaupt. CYON Research veröffentlichte ein Whitepaper [3], in dem sie die CAE-Automatisierung in drei Kategorien einteilen: einfach, schwierig und haarig. Automatisierungsansätze waren netzbasierte Templates, modellbasierte Templates und abstrakte CAE-Modellierung. Gemäß der Studie können alle Ansätze einfache Fälle behandeln, schwierige Fälle erfordern entweder modellbasierte Templates oder abstrakte Modellierung, während abstrakte Modellierung die einzige Option zum Automatisieren haariger Fälle ist. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass nur abstrakte Modellierung die Automation durchgehend von einfachen bis zu den haarigen Fällen unterstützt.

Im Gegensatz zu Templates sind abstrakte Modelle völlig unabhängig von bestimmten Geometrie-Formen und -Topologien. Die Verwendung von Klassen und deren Beziehungen (mehr hierzu weiter unten) als Geometrieplatzhalter ermöglicht schnelle, einfache und äußerst robuste Automatisierung von Simulationsprozessen. Der Aufwand hierfür ist vergleichbar mit dem beim traditionellen Aufsetzen einer Simulation für ein CAD-Teil und damit deutlich schneller als eine Automatisierung via Skript oder Template. Abstrakte Modelle sind außerdem leicht zu verstehen, zu warten und zu erweitern, was sie zu einem idealen Werkzeug macht, um „Best Practices“ für Simulationen zu gewährleisten, zu teilen und zu bewahren. Abstrakte modellierungsbasierte Automatisierung befreit Analysten von sich wiederholenden unproduktiven Tätigkeiten und stellt sicher, dass jede Simulation richtig durchgeführt wird, unabhängig davon, wer sie wann oder wo macht. Eine solche Automatisierung hilft so bei der Demokratisierung der Simulation und ermöglicht CAD-Designern ohne CFD-Know-how, zuverlässige Simulationen zu starten. Durch eine höhere Effizienz von Simulationsprozessen und immer vergleichbaren Simulationsergebnissen führt abstrakte Modellierung zu einer erheblichen Reduzierung von Entwicklungszeit und Kosten.

Flexibilität ist eine weitere Stärke abstrakter Modelle. Sie können mit beliebig vielen Klassen und Materialien erstellt werden, mehr als für eine spezifische Simulation benötigt wird, und damit breitere Anwendungen abdecken. Wenn ein solches abstraktes Modell mit einem CAD-Modell kombiniert wird, das sich auf eine Teilmenge verfügbarer Klassen bezieht, werden für die Simulationseingabe nur die Klassen/Materialien berücksichtigt, die im CAD-Modell referenziert sind, nebst zugehöriger Physik.

Wie gesehen bietet abstrakte Modellierung mehrere Vorteile, die zu Kosten- und Zeiteinsparungen bei der Produktentwicklung führen:

- Eine einfachere, schnellere Möglichkeit, den Prozess von CAD bis Solver-Eingang zuverlässig zu automatisieren
- Erhöhung der Analystenkapazität für wertsteigernde Aufgaben
- Versetzt CAD-Designern in die Lage, zuverlässiger Simulationen mit immer vergleichbaren Ergebnissen zu starten
- Best-Practice und Know-how Erfassungs- und Management-Werkzeug

## 3.2 Abstrakte Modellierung - Bausteine

### 3.2.1 Abstraktes Modell

Ein abstraktes Modell besteht aus abstrakten Klassen mit ihren "abgeleiteten Elementen", abstrakten Beziehungen mit deren "abgeleiteten Elementen" (child entities) sowie allen zugehörigen CAE-Attributen. Der Begriff "abgeleitete Elemente" bezieht sich auf bestimmte Teilmengen innerhalb des abstrakten Modells wie Interfaces, Begrenzungsflächen, etc. Es gibt aber noch KEINE spezifische Geometrie, die abstrakten Klassen oder Beziehungen und ihren abgeleiteten Elementen zugeordnet ist. Aus diesem Grund wird auch keine Geometrie in der Benutzeroberfläche des abstrakten Modells angezeigt.

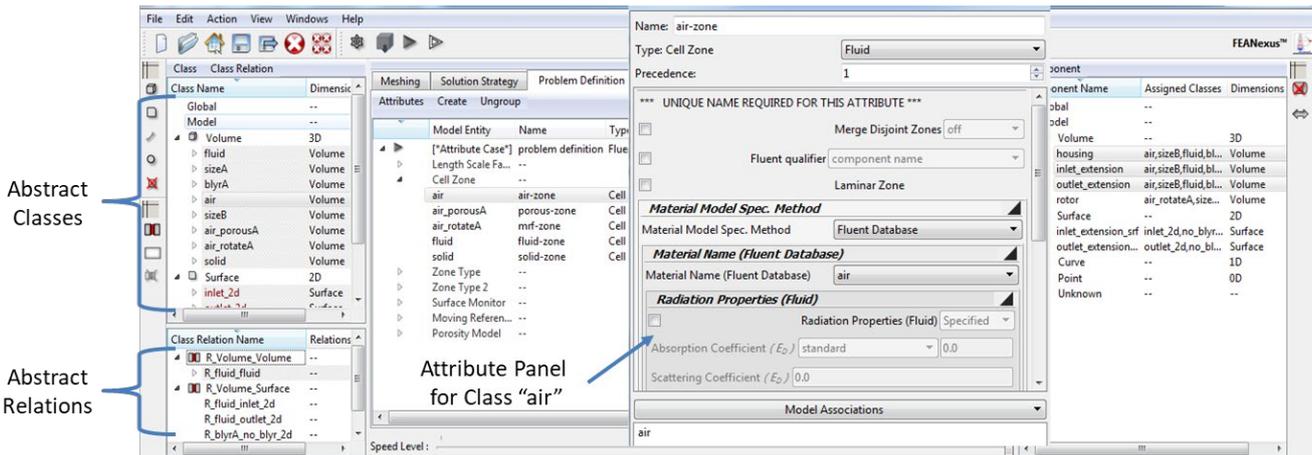


Abb. 3: CAENexus Benutzeroberfläche für abstraktes Modell

Eine Beziehung zwischen zwei abstrakten Klassen definiert eine gemeinsame Entität dieser Klassen. Beziehungen ermöglichen es, CAE-Attribute gemeinsamen Entitäten, z.B. einer Seite eines Interfaces, zuzuordnen. Beziehungen sind ein Schlüssel, um die Nutzung des abstrakten Modells mit beliebigen Geometrien sicher zu stellen, unabhängig von deren Topologie.

CAE-Attribute werden für abstrakte Klassen, Beziehungen oder abgeleitete Elemente definiert, abhängig davon, wo sie später auf der realen Geometrie angewendet werden müssen.

### 3.2.2 CAE-fähiges CAD-Modell

Um ein abstraktes Modell mit realer Geometrie zu verbinden, muss das CAD Modell dafür vorbereitet sein. Dies erfolgt indem der Benutzer mit Hilfe des Attributsystems der CAD-Software Text-Parameter auf 3D- und 2D-Teilen definieren. Diese Text-Parameter werden SCLASS\* und SCOMP genannt, es sind Schlüsselwörter, mit deren Hilfe das abstrakte Modell die Attribute von Klassen und deren Beziehungen auf die konkrete Geometrie übertragen kann. SCLASS\* steht für "Simulation CLASS" und SCOMP steht für "Simulation COMPonent". Die Werte der SCLASS\*-Text-Parameter müssen mit den abstrakten Klassennamen identisch sein, wie sie im abstrakten Modell definiert sind. Abbildung 4 zeigt eines der Beispielm Modelle mit in PTC Creo® erstellten SCLASS\*- und SCOMP-Parametern.

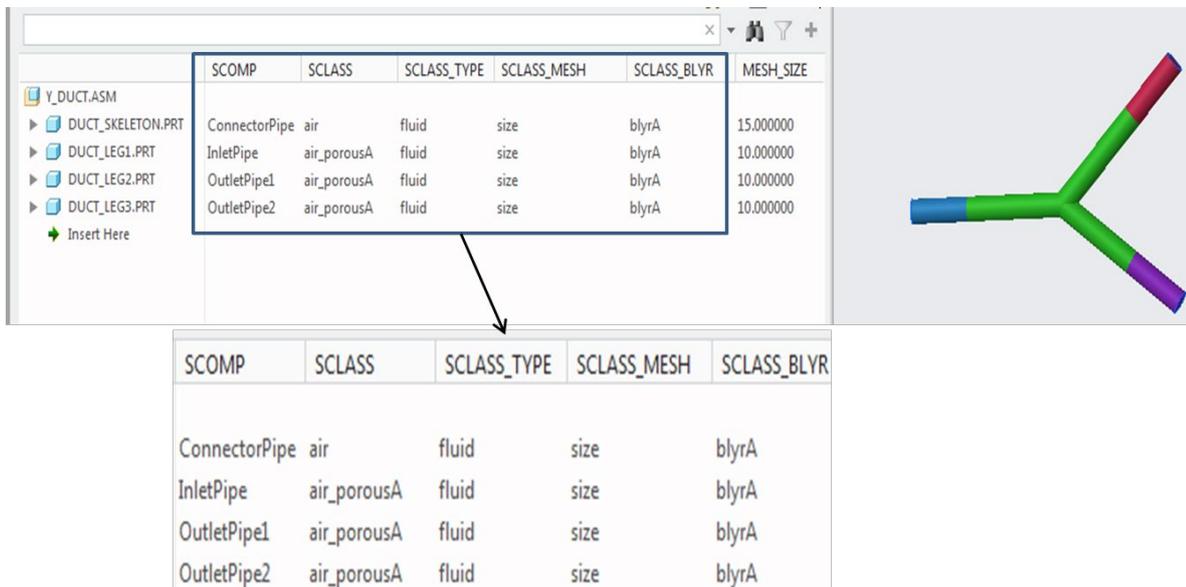


Abb. 4: Beispiel für Text-Parameter in einem CAD-Modell

Die SCOMP-Parameterwerte sind für jedes Teil eindeutig und stellen Komponentennamen dar. Die zugehörigen SCLASS\*-Parameter dieses Beispiels sind SCLASS, SCLASS\_MESH, SCLASS\_TYPE, SCLASS\_BLYR usw. Die Werte der SCLASS\_TYPE sind fluid, solid, void usw., während die Werte von SCLASS das jeweilige Material angeben, z. B. Luft (air), air\_porousA usw. Die Werte von SCLASS\_BLYR sind blyrA (oder andere), womit der Aufbau und die Zellgrößen von Grenzschichten bestimmt werden. Diese Text-Parameter erlauben es, alle Aspekte der Simulation darzustellen, die in CFD-Anwendungen üblich sind.

### 3.2.3 Vereinigung abstrakter Modelle mit CAD-Modellen

Um die Simulationseingabe zu erstellen, wird ein abstraktes Modell (mit abstrakten Klassen, Beziehungen und verwandten Attributen) mit dem gewünschten CAD-Modell kombiniert. Das Ergebnis dieser Kombination wird in der CAENexus-Terminologie als "Simulationsmodell" bezeichnet. Das Simulationsmodell stellt den Zustand dar, in dem abstrakte Klassen und ihre Beziehungen mit realer Geometrie verbunden und Attribute von abstrakten Entitäten auf reale geometrische Entitäten übertragen wurden.

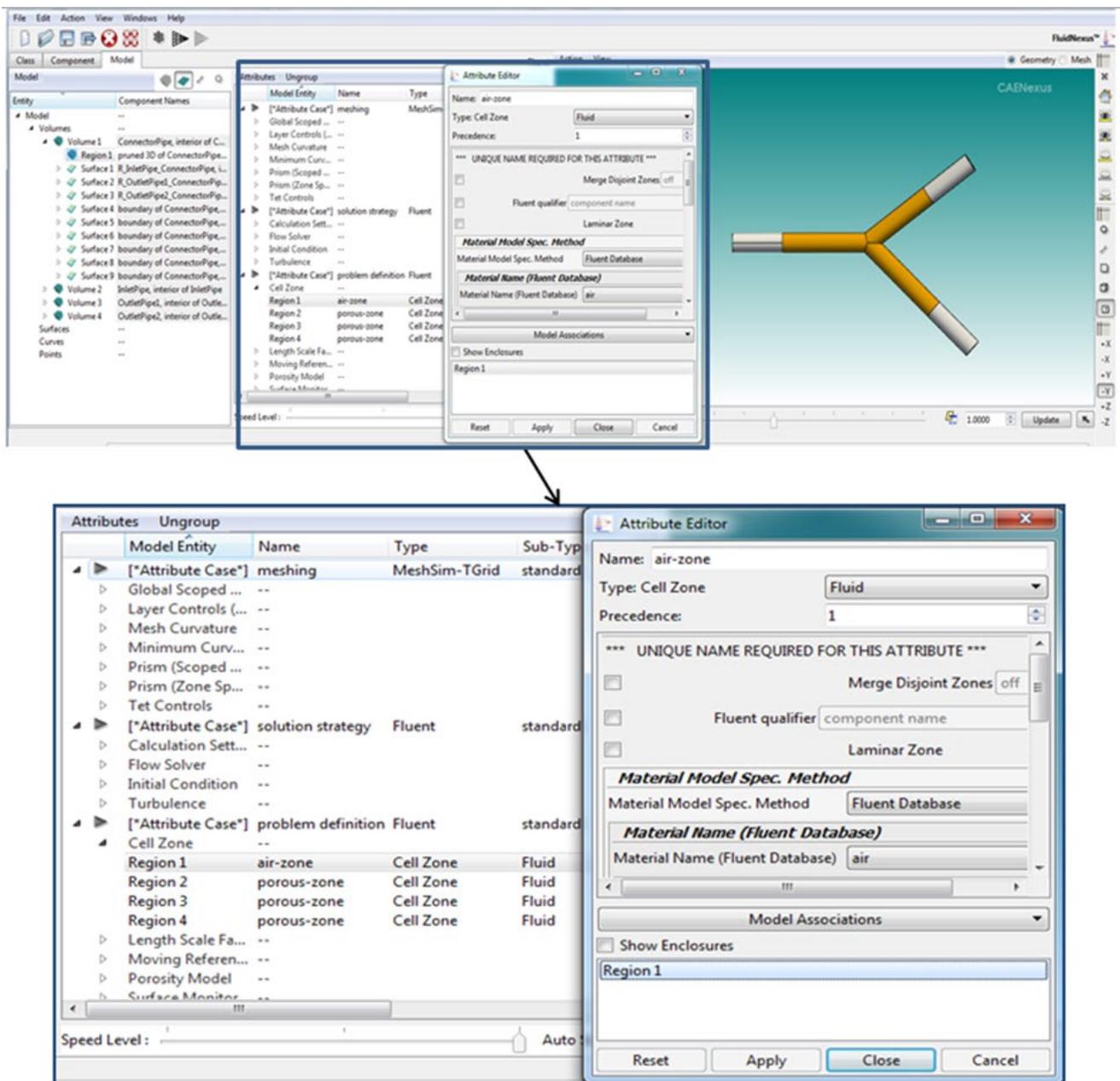


Abb. 5: Simulationsmodell Geometrie 1

Das in Abbildung 5 dargestellte Simulationsmodell hebt Geometrie hervor (gelb dargestellt), die der Klasse "air" entspricht. Alle Attribute der "air"-Klasse sind jetzt auf diese Region 1 als reale Geometrie übertragenen. In ähnlicher Weise werden Attribute aller Klassen, Klassenbeziehungen und Komponenten mit ihren abgeleiteten Elementen auf die reale Geometrie übertragen.

Wenn dasselbe abstrakte Modell mit anderen CAD-Modellen mit SCLASS\*-Parameterwerten wie air, size, BlyrA usw. kombiniert wird, zeigt das entsprechende Simulationsmodell die Geometrie an, die diesen Klassen zugeordnet ist.

Das Simulationsmodell in Abbildung 6 unten wurde erstellt, indem dasselbe abstrakte Modell mit dem zweiten CAD-Beispiel kombiniert wurde.

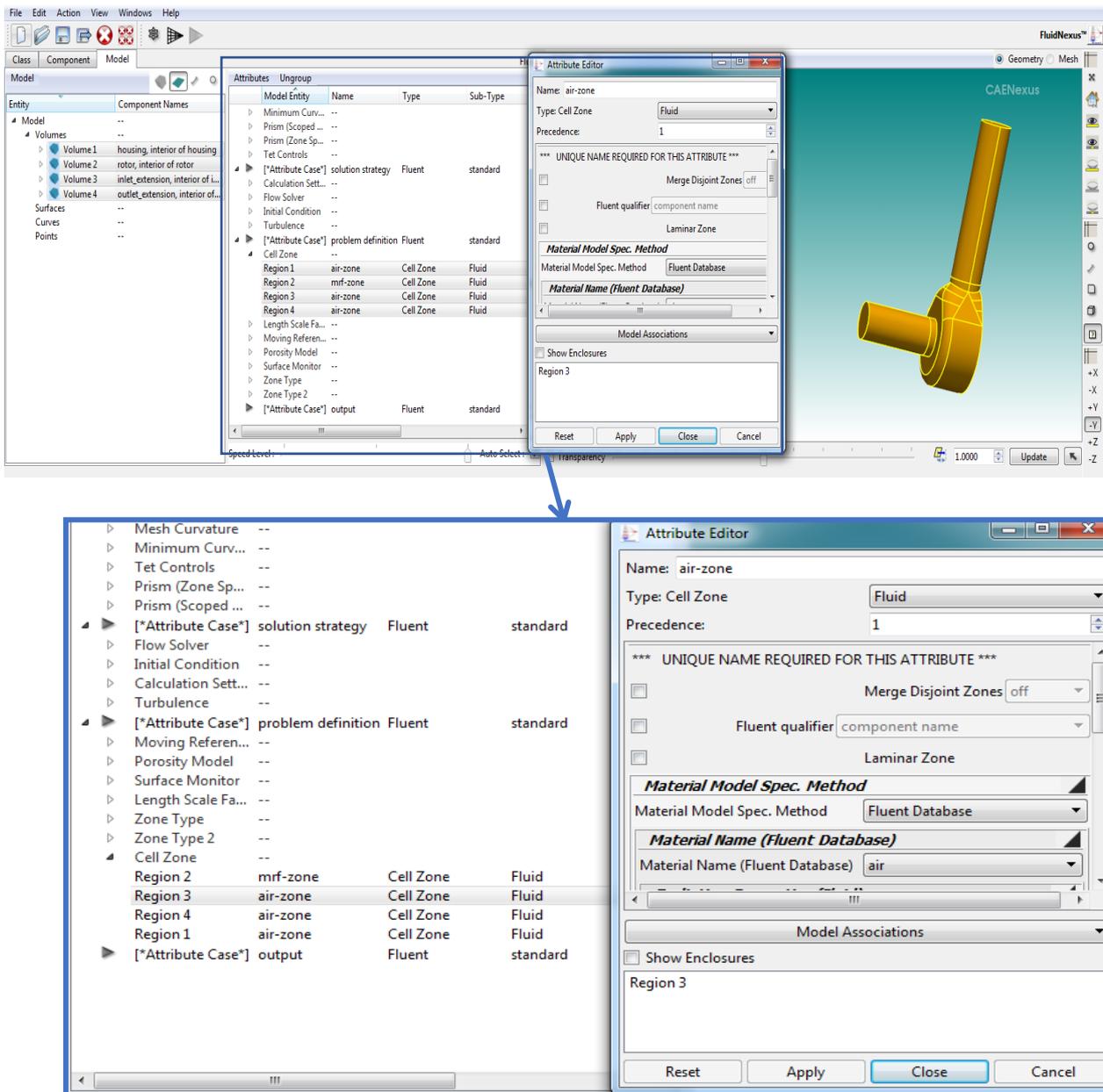


Abb. 6: Simulationsmodell Geometrie 2

Aus den beiden obigen Beispielen ergibt sich:

- a. Das abstrakte Modell enthält eine Klasse "air", unabhängig von einer bestimmten Geometrie.
- b. Wenn ein abstraktes Modell mit einem CAD-Modell kombiniert wird, das den Text-Parameter "air" auf einem oder mehreren Teilen enthält, wird ein Simulationsmodell erstellt, bei dem die Klasse "air" allen betroffenen Teilen zugewiesen wird. Die Attribute einer "air"-Klasse werden auf die reale Geometrie übertragen.
- c. Diese Erläuterung für die „air“-Klasse und ihren Attributsatz ist repräsentativ für die Fähigkeit von CAENexus, Simulationsmodelle automatisch zu generieren und alle Klassen und Attribute aus einem abstrakten Modell auf reale Geometrien eines beliebigen CAE-fähigen CAD-Modells zu übertragen.

### 3.3 Zugriff auf Simulationsparameter von CAD

Wie gezeigt, kann ein abstraktes Modell mit CAD-Modellen unterschiedlicher Formen und Komplexität arbeiten, ohne vom Benutzer geändert werden zu müssen. Aber wie kann ein solches abstraktes Modell Änderungen von Parametern verarbeiten, die normalerweise als Klassenattribute angegeben werden, z. B. unterschiedliche Flussgeschwindigkeiten oder Gittergrößen? Eine offensichtliche Möglichkeit besteht darin, den Attributwert im abstrakten Modell zu ändern und verschiedene Versionen zu nutzen. CAENexus bietet aber auch eine flexiblere Möglichkeit, die keine Bearbeitung des abstrakten Modells erfordert. Benutzer können Simulationsparameter auf dem CAE-fähigen CAD-Modell definieren und die Standardparameter im abstrakten Modell für bestimmte Fälle ändern. Im folgenden CAD-Modell hat ein Benutzer Simulationsparameter als "MESH\_SIZE" und "ANG\_VEL\_Z" angegeben.

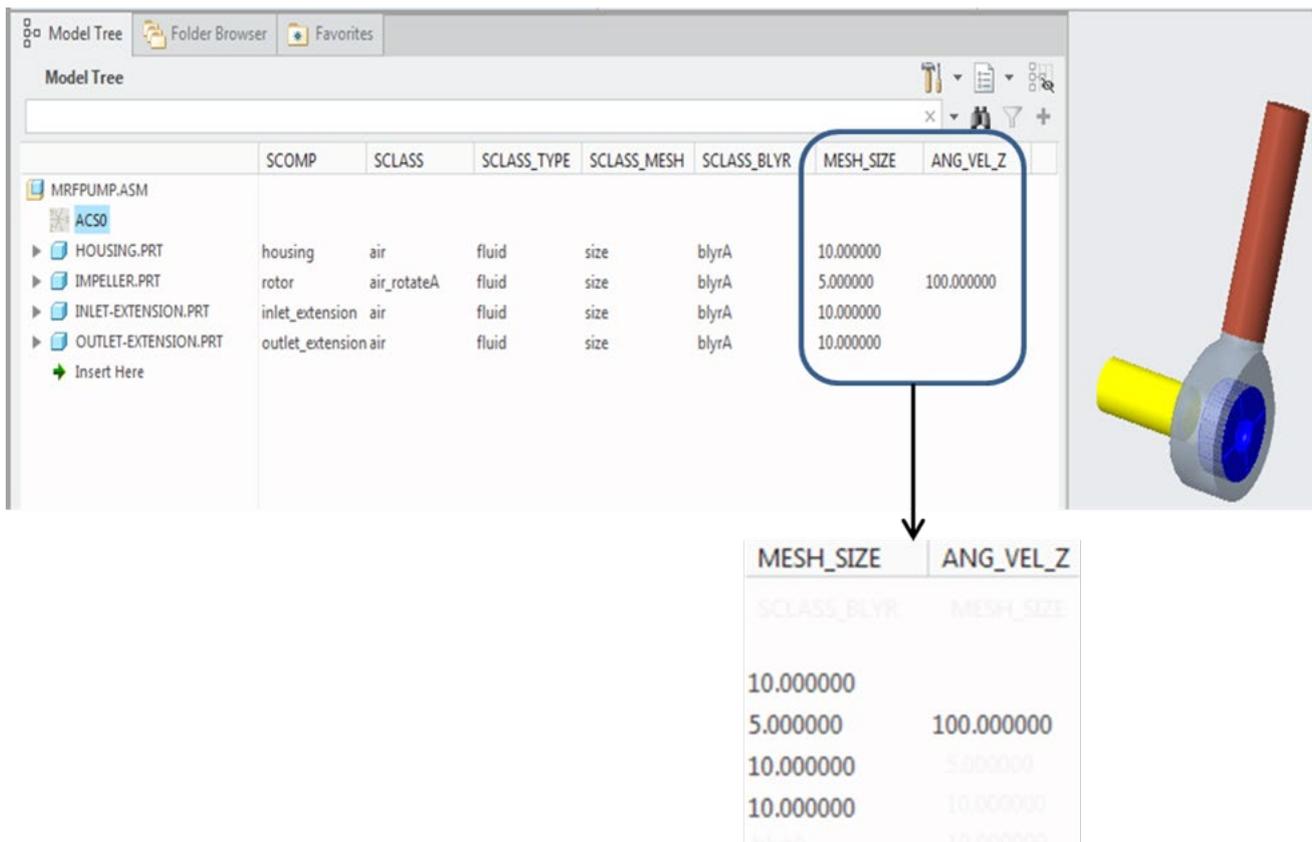


Abb. 7: Attributparameter im CAD-Modell

CAENexus überprüft das CAD-Modell auf Parameter bestimmter Attribute, wenn diese im abstrakten Modell durch einen "doubleParamFromCAD"-Ausdruck angegeben wurden. Wenn solche Attributparameter im CAD-Modell definiert sind, werden die Standardwerte aus dem abstrakten Modell durch die Werte aus CAD ersetzt. Findet CAENexus keine Parameter auf dem CAD-Modell, werden die Standardwerte genutzt.

### 3.4 Automation durch Abstrakte Modellierung

Automation durch abstrakte Modellierung führt die zuverlässige Erstellung von Gittern und allen notwendigen Solver-Eingabedateien durch, ohne dass ein Analyst involviert sein muss. Um dies zu erleichtern, sind zwei unterschiedliche Rollen nötig:

- a. CAE-Analyst: CAE-Ingenieure erstellen das abstrakte Modell, mit allen erforderlichen abstrakten Klassen, Beziehungen, untergeordneten Entitäten und die dazu gehörenden CAE-Parameter.
- b. CAD-Ingenieur: CAD-Ingenieure erstellen CAE-fähige CAD-Modelle und fügen in der Regel die erforderlichen SCLASS\* und SCOMP Text-Parameter hinzu. Das Hinzufügen von Text-Parametern kann auch von einem Analysten mit Zugriff auf das CAD-System erfolgen.

Sobald ein abstraktes Modell erstellt und getestet wurde, kann eine Vielzahl von Simulationen ohne weitere Involvement von Analysten ausgeführt werden. CAD-Ingenieure „füttern“ es einfach mit CAE-fähigen CAD-Modellen. Der Zeitaufwand des Analytikers für Pre-Prozessing reduziert sich damit auf die einmalige Erstellung eines abstrakten Modells, das als Kern des automatisierten dreistufigen Prozesses von CAENexus dient: Simulationsmodell generieren, Netzmodell generieren und Solver-Deck exportieren.

Bei CAENexus/FluidNexus wird die Robustheit dieses dreistufigen Prozesses durch den direkten Einsatz des CAD-Systems zur Netzgenerierung verbessert. Da keine CAD-Konvertierungen erfolgen müssen, werden zeitaufwändige, nicht produktive Aktivitäten wie Geometrie-Aufarbeitung oder Beseitigung von Problemen bei der Geometrieübersetzung vermieden.

Basierend auf dem Feedback von FluidNexus-Anwendern, verbessert die Methodik und Automatisierung auf Basis abstrakter Modellierung die Effizienz von Simulationsprozessen um das 5-7-fache. Zusammen mit anderen Simulations- und Datenmanagement-Prozessen kann die Effizienz insgesamt um das 7-10-fache gesteigert werden.

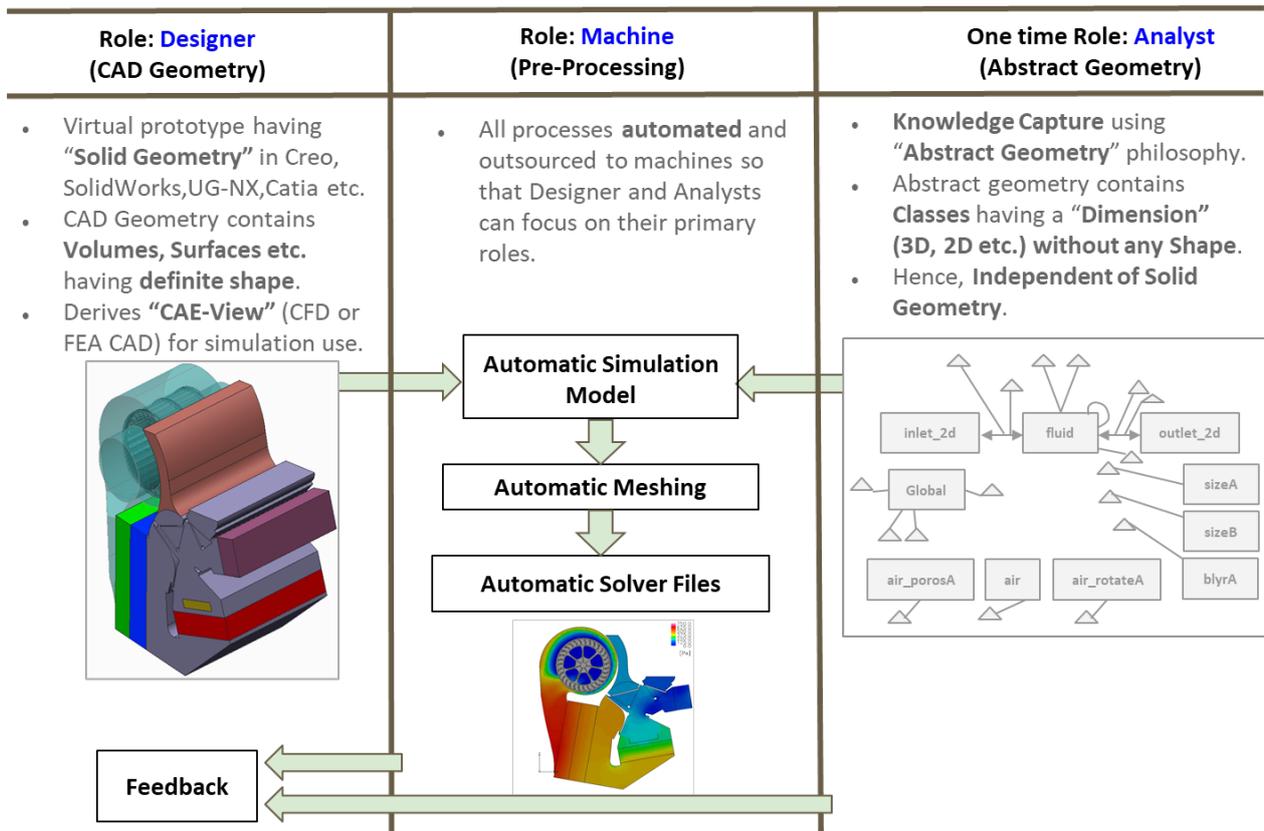


Abb. 8: Automatischer dreistufiger Prozess

3.4.1 Simulation Driven Design

FluidNexus-Anwender haben hervorragende Effizienzgewinne realisieren können, indem sie mit einer CAD-Darstellung der CFD-Geometrie anstelle der Fertigungsversion ihres Produkts beginnen. Sie leiten das CAD-Fertigungsmodell erst ab, nachdem die CFD-gesteuerte Optimierung und Validierung durchgeführt wurde.

4 Abstrakte Modellierung und Simulations-Apps

Bisher wurde beschrieben, wie abstrakte Modellierung eine deutlich bessere Nutzung von Simulationsressourcen fördert und Simulationen demokratisiert. All dies wird durch einfach und schnell zu implementierende Automation des Prozesses von CAD zu Solver-Eingaben erreicht, insbesondere wegen der Fähigkeit, zuverlässig mit beliebigen Geometrien zu arbeiten. Dieselbe Funktion macht abstrakte Modellierung zu einer idealen Grundlage für Simulations-Apps, die einfach – ohne CAE-Kenntnisse – zu bedienende Simulationslösungen für spezielle Aufgaben darstellen.

CFD-bezogene Simulationsanwendungen könnten externe Aerodynamik (virtueller Windkanal), Flüssigkeitsmischung, Pumpendesign, Elektronik-Kühlung, usw. sein. Die Standardnutzung abstrakter Modelle, nämlich es nicht-Simulationsspezialisten zu ermöglichen, Simulationen auszuführen, kann bereits als Teil-Funktionalität einer Simulations-App betrachtet werden. In der Regel verfügt eine Simulations-App über:

- eine anwendungsspezifische Benutzeroberfläche (oft Browser basierend) inklusive der Möglichkeit, CAD-Modelle hochzuladen,
- einen Prozess zur automatischen Vorbereitung aller Solver-Eingabedateien auf Basis benutzerdefinierter Parameter (z. B. gewünschte Windgeschwindigkeit), Geometrie und Simulations-Setup,
- den Solver(n) zur Durchführung von Simulationen und
- eine Möglichkeit, Reports mit wichtigen Ergebnissen zu generieren.

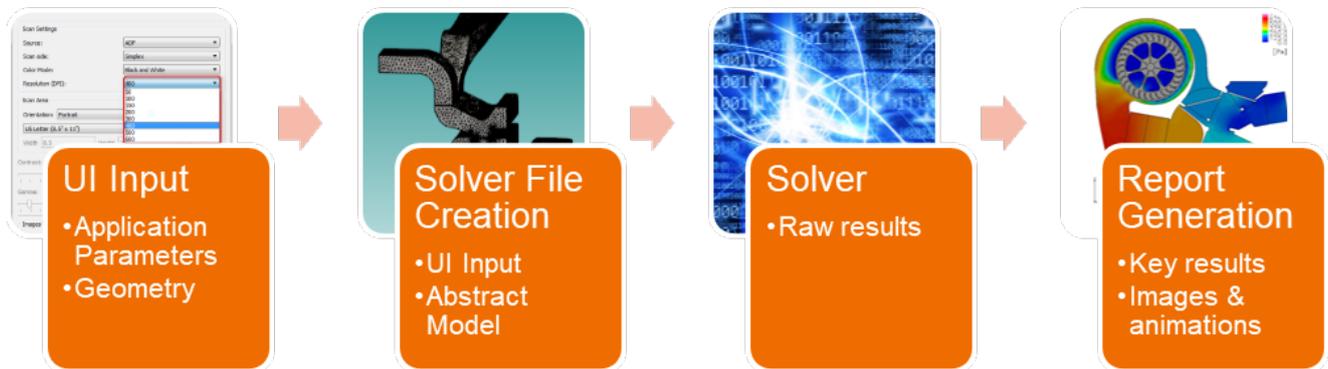


Abb. 9: Komponenten einer Simulations-App

Die Fähigkeiten der abstrakten Modellierung können vorteilhaft genutzt werden, um in Simulations-Apps den Prozess zur automatischen Vorbereitung aller Solver-Eingabedateien auf Basis benutzerdefinierter Parameter (z. B. gewünschte Windgeschwindigkeit), Geometrie und Simulations-Setup zu realisieren. Die Berücksichtigung von Parametern, die über das User Interface vorgegeben sind, erfordern kleinere Erweiterungen, z. B. durch Python-Skripte.

## 5 Schlussfolgerungen

Während abstrakte Kunst mal mehr und mal weniger geliebt wird, sollte die abstrakte Modellierung mit ihrer einzigartigen Kombination von Vorteilen, für alle Organisationen die Produkte entwickeln von Interesse sein. Zu diesen Vorteilen gehören:

- ⇒ Demokratisierung von Simulation für eine intensivere Nutzung von Simulationsressourcen durch CAD-Designer, die selbstständig zuverlässige Simulationen starten und dadurch bessere Entscheidungen bei der Entwicklung fällen können
- ⇒ Systematische Erfassung und Wiederverwendung von Simulations-Know-how und Best Practices
- ⇒ Konsistente, stets vergleichbare Simulationsergebnisse unabhängig davon, wo oder von wem Simulationen durchgeführt werden
- ⇒ Deutlich verbesserte Effizienz des CAD-zu-CAE-Solver-Eingabeprozesses durch robuste Automatisierung
- ⇒ Einfachere und schnellere Implementierung von automatisierten Prozessen als mit anderen Methoden

In einer Zeit wachsender weltweiter Konkurrenz und zunehmender Produktkomplexität spart abstrakte Modellierung erhebliche Zeit und Kosten und hilft Anwendern, optimierte Produkte zu entwickeln. Sie erhalten bessere Ergebnisse von ihrer Investition in Engineering-Software, gewinnen Kapazitäten für aussagekräftigere Reports, um die Qualität von Designentscheidungen zu verbessern. Nebenbei vermeiden sie gravierende Know-how-Verluste, wenn erfahrene Simulationsspezialisten zu einem anderen Arbeitgeber oder in den Ruhestand gehen.

## 6 Literatur

- [1] <https://www.tate.org.uk/art/art-terms/a/abstract-art>
- [2] TechClarity Infographic: "Making Products More Competitive by Empowering Design Engineers", 2019
- [3] Cyon Research White Paper: "Classes of MCAE Software: Clarifying the Market" 2008, 23 pages

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 (PD Tec)
- 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

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

**Werden auch Sie  
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/join](http://www.nafems.org/join)**

**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

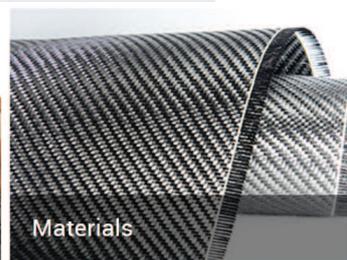
There are currently over 1,500 resources in the centre with this number growing weekly. NAFEMS Members have access to numerous types of resource as part of their membership, including presentations from previous events, conference papers, webinar archives, and much more.



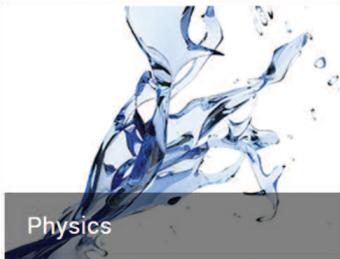
Analysis Management



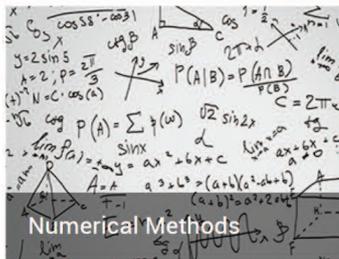
Industry & Products



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 (2/2020)

- 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
  - FEM Trainingskurs (Juni/Juli, Online)
  - FKM Trainingskurs (Juli, Online)
  - CFD Trainingskurs (tba, Online)
  - NAFEMS DACH Konferenz (Oktober)
  - V&V Master Trainingskurs (Oktober, Wiesbaden)
  - NAFEMS World Congress (Juni 2021, Salzburg)
- 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: \_\_\_\_\_

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 (2/2020)

- Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:**
- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft                | <input type="checkbox"/> FEM Trainingskurs (Juni/Juli, Online)         |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“           | <input type="checkbox"/> FKM Trainingskurs (Juli, Online)              |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare                      | <input type="checkbox"/> CFD Trainingskurs (tba, Online)               |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse                | <input type="checkbox"/> NAFEMS DACH Konferenz (Oktober)               |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS e-learning                    | <input type="checkbox"/> V&V Master Trainingskurs (Oktober, Wiesbaden) |
| <input type="checkbox"/> Professional Simulation Engineer PSE | <input type="checkbox"/> NAFEMS World Congress (Juni 2021, Salzburg)   |
| <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: \_\_\_\_\_

