



Online-Magazin

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

Fachbeiträge in dieser Ausgabe

STRUKTURDYNAMIK

Eine effiziente numerische Methodik zur Platzierung von Dehnungsmessstreifen in der experimentellen Spannungs- und Lebensdaueranalyse

MATERIALMODELLIERUNG

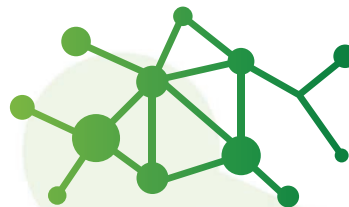
Materialkarten für FVK-Werkstoffe auf Basis von realen und virtuellen Messungen

SYSTEMMODELLIERUNG

Domänenübergreifende Auswirkungsanalyse mit Hilfe des Artefakt-Modells

TOPOLOGIE-OPTIMIERUNG

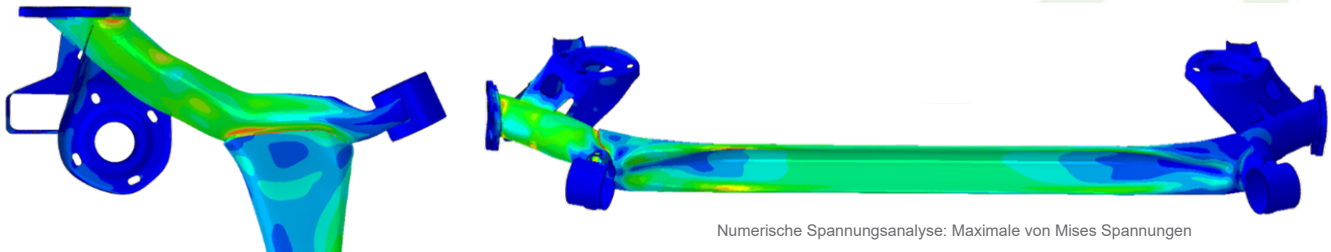
Additive Fertigung von Aluminiumstrukturen im SLM-Prozess: Berücksichtigung der Prozesscharakteristiken in einer Topologieoptimierung zur Unterstützung der Designfindung



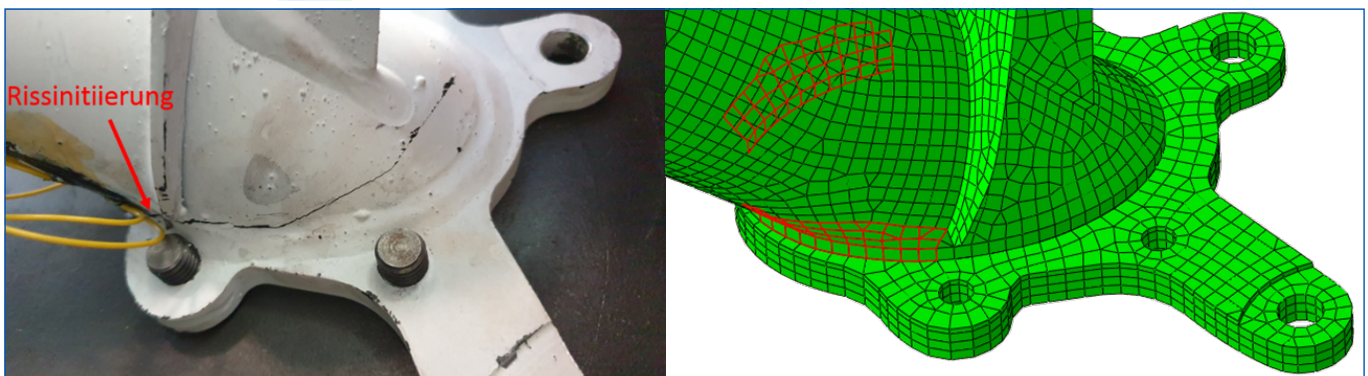
**NAFEMS
REGIONAL
CONFERENCES 2022**

We're getting ready for NRC22
the **NAFEMS Regional Conference program.**

www.nafems.org/nrc22



Numerische Spannungsanalyse: Maximale von Mises Spannungen



Rissinitiiierung; Links: Schadensbild bei Versuchsende, Rechts: Numerische Vorhersage

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

Sponsoren dieser Ausgabe:



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

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

eine numerische Simulation beginnt traditionell mit der Wahl eines Modells, mit dem man das zu lösende Problem hinreichend genau beschreibt. Natürlich weicht die Realität immer mehr oder weniger von diesem Modell ab. Das ist unkritisch, solange sich das System stabil verhält. Bei Systemen mit geringer Stabilität können jedoch schon kleine Abweichungen zu erheblichen Änderungen im Verhalten führen. Viel Aufwand ist betrieben worden, um diese Abweichungen in die Simulation einzubeziehen. Insbesondere in den letzten Jahren werden dafür zunehmend die Möglichkeiten der sogenannten Künstlichen Intelligenz (KI) eingesetzt. Neuronale Netze werden etabliert, die aus Beispielen lernen und damit das ursprüngliche Modell der Realität besser anpassen können. Zusätzliche Schwierigkeiten müssen bewältigt werden, wenn die Anforderungen an das zu untersuchende System sich ändern, wie es bereits in einem Beitrag zum Heft 60 dieses Magazins behandelt wurde. Da neuronale Netze wenig kognitive Fähigkeiten haben, ist es für den Erfolg von ausschlaggebender Bedeutung, dass die gewählten Beispiele das Spektrum der in der Realität auftretenden Fälle möglichst vollständig umfassen. Dieser Problematik wird zukünftig erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden müssen.



*Prof. Dr.-Ing.
Klaus Rohwer*

Generell sollten Dehnmessstreifen zur Begutachtung von Strukturen dort platziert werden, wo hohe Beanspruchungen zu erwarten sind. Um diese Bereiche für Bauteile unter Schwingbeanspruchung zu finden, wird im ersten wissenschaftlichen Beitrag dieses Heftes die Superposition modaler Spannungsfelder in Verbindung mit einem analytisch konsistenten Wichtungsfaktor vorgeschlagen. Der zweite Beitrag behandelt die Modellierung von Faserverbunden. Für das Matrixmaterial werden Viskoplastizität und Schädigung berücksichtigt, die Fasern werden linear elastisch modelliert. Damit wird ein Mikroskalenmodell aufgestellt, das durch Zugversuche validiert wird. Virtuelle Analysen mit unterschiedlichen Dehnraten erlauben dann die makroskopische Modellierung des Verbundes. Der dritte Beitrag thematisiert die Problematik semantischer Lücken zwischen unterschiedlichen Fachrichtungen, die die Modellierung eines Gesamtsystems erschweren kann. Bei deren Überwindung hilft ein Modell, das die wesentlichen Artefakte und deren Verbindungen beschreibt. Es ermöglicht auch, die Auswirkung einer Erweiterung des ursprünglichen Einsatzspektrums abzuschätzen. Der vierte Beitrag stellt heraus, dass additive Fertigungsverfahren eine vorher nicht gekannte Flexibilität im Design erlauben. Das selektive Laserschmelzen führt jedoch zu Strukturbereichen mit unterschiedlicher Porendichte. Um das im Optimierungsprozess angemessen zu berücksichtigen, wird vorgeschlagen, in jedem Optimierungsschritt die Unterschiede in den Steifigkeiten für die einzelnen Bereiche getrennt zuzuweisen.

Ich bin zuversichtlich, dass aus diesem weit gefächerten Angebot auch für Sie etwas Interessantes dabei ist.

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



www.cadfem.net/de



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



www.dynamore.de



www.intes.de



www.siemens.com

Vorwort des Editor-in-Chief.....	2
Sponsoren	3
Inhalt / Impressum	4
NAFEMS Events	
Übersicht: Konferenzen, Schulungen.....	5
Seminar: Advances in Structural Dynamic Simulation	6
Seminar: ML und AI in der Strömungsmechanik/Strukturanalyse	8
Seminar: Generative Design und Optimierung	10
Konferenz: NAFEMS DACH Regionalkonferenz 2022.....	11
Konferenz: NAFEMS Regionalkonferenzen 2022.....	12
Seminar: Designer-Oriented Simulation: Putting Simulation Upfront..	14
Überblick NAFEMS Events	15
NAFEMS Trainings	
Überblick: Classroom online, Learning Hub, e-learning,	16
Verification and Validation in Engineering Simulation	18
Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie.....	20
Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear	21
Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation.....	22
Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung.....	23
NAFEMS Literatur	
Benchmark Magazin	24
Invitation to Tender.....	25
Neuigkeiten	26
Veranstaltungskalender	
Fachbeiträge	
Strukturdynamik	
Eine effiziente numerische Methodik zur Platzierung von Dehnungsmessstreifen in der experimentellen Spannungs- und Lebensdaueranalyse	35
C. Strzalka, D. Marinkovic, M. Zehn (TU Berlin)	
Materialmodellierung	
Materialkarten für FVK-Werkstoffe auf Basis von realen und virtuellen Messungen	44
H. Grimm-Strele, M. Kabel, H. Andrä (Fraunhofer ITWM); T. Schweiger, J. Lienhard (Fraunhofer IWM)	
Systemmodellierung	
Domänenübergreifende Auswirkungsanalyse mit Hilfe des Artefakt-Modells	55
M. Brandstätter (Prostep/FOM Hochschule); C. Bühler, K. Steinkirchner (Prostep); M. Mayer (FOM Hochschule)	
Topologie-Optimierung	
Additive Fertigung von Aluminiumstrukturen im SLM-Prozess: Berücksichtigung der Prozesscharakteristiken in einer Topologieoptimierung zur Unterstützung der Designfindung	65
J. Holoch, S. Lenhardt, A. Albers (Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK)	
PSE	
Über NAFEMS	
Join - Übersicht und Ziele	75
Mitglied werden / Mitgliedsmodelle	78
Technische Arbeitsgruppen	80
Veranstaltungen	81
PSE - Professional Simulation Engineer Zertifizierung	74/82
Training	83
Resource Centre / Publikationen	84

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) 176 - 217 984 01
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) 176 217 984 01
magazin@nafems.de

Anzeigenpreise

Preisliste vom 01.01.2022

Verteilung / Bezug

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

Copyright © 2022, Werbos GbR.

Nachdruck – auch auszugsweise -,
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

NAFEMS Konferenzen/Seminare in DACH

Advances in Structural Dynamic Simulation (war zunächst in München geplant) Seminar, www.nafems.org/dyn22	29. - 30. März	Online
Machine Learning und Artificial Intelligence in der Strömungsmechanik und der Strukturanalyse Seminar, www.nafems.org/mlai22	16. - 17. Mai	Wiesbaden
Generative Design und Optimierung Seminar, www.nafems.org/gen22	18.-19. Mai	Wiesbaden
NAFEMS DACH Regionalkonferenz 2022 Konferenz, www.nafems.org/dach22	04. - 06. Oktober	Bamberg

Bitte beachten Sie:

Die geplanten on-site Seminare und die Regionalkonferenz werden gemäß den lokalen Covid-19-Bestimmungen durchgeführt. Sollte eine Vor-Ort-Veranstaltung nicht möglich sein, werden wir die Veranstaltung entweder verschieben oder auf eine reine Online-Veranstaltung umstellen.

Weitere NAFEMS Seminare und Konferenzen ausserhalb von DACH finden Sie unter www.nafems.org/events.

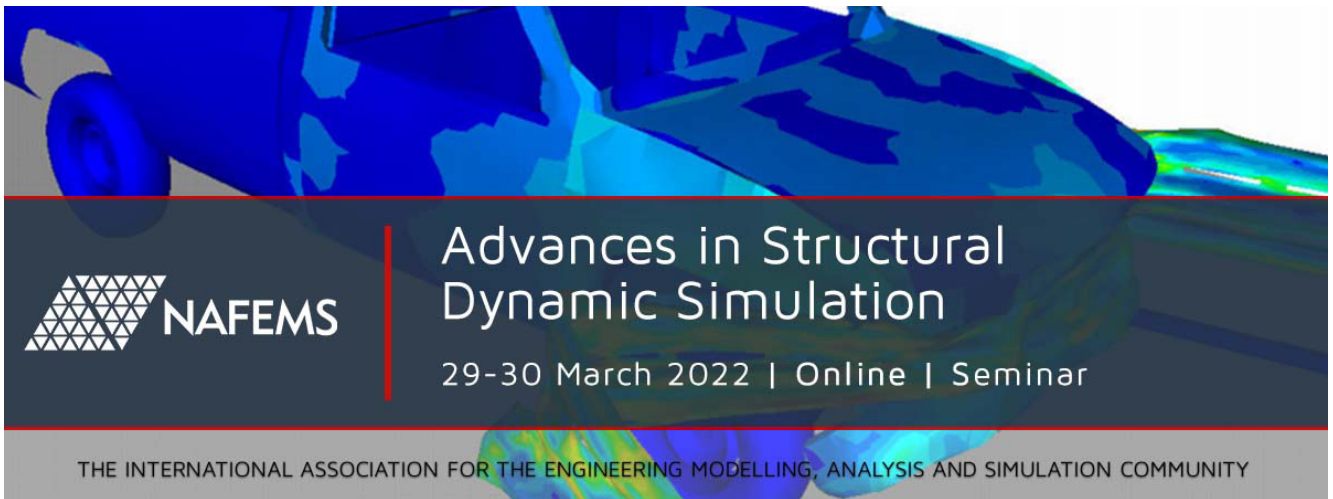
Schulungen in DACH 2022

Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation 2-tägig, Online, www.nafems.org/fem22-1	09.-10. März	Online
Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie (7. Ausgabe, 2020) 2-tägig, Online, www.nafems.org/fkm22-1	05. - 06. April	Online
Verification and Validation in Engineering Simulation 2,5-tägig, Online, www.nafems.org/vandv22-1	10. - 12. Mai	Online
Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear 2-tägig, Online, www.nafems.org/fkm-nonlin22-2	09. - 10. Nov.	Online
Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung www.nafems.org	Auf Anfrage	Online

Eine Beschreibung der Schulungsinhalte finden Sie auf Seiten 18 - 25.

Weitere Schulungen und Kurse ausserhalb von DACH finden Sie unter www.nafems.org/events.





NAFEMS, the International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community is hosting an international seminar designed to showcase Structural Dynamic Simulation.

Structural dynamic simulations at all stages of product development and research are part of the standard procedures in almost all areas of industry. The numerical methods that are used to simulation dynamic events are relatively mature but new capabilities are constantly appearing that allows more complex behaviour to be represented. Higher operating loads, rotational speeds, speeds, lightweight structures, extreme application requirements (natural disasters, accidents, and terrorist attacks), comfort properties (acoustics and vibrations), etc. require a safe and economical design of machines, transport systems, components, plants and buildings with the help of structural dynamic simulations. In addition to the functional, comfort and safety aspects, there are also stricter occupational safety and health regulations that give rise to structural dynamic analyses of constructions.

The use of model reduction techniques allows larger models to be analysed in a time efficient manner, helping dynamic analysis to be more easily integrated into the design process. Model updating technologies and validation with measurements allows high qualified modelling for

the simulation methods. Theory, software, and hardware (e.g., HPC and measurement systems) developments have opened up many possibilities for realistic modelling and simulations in structural dynamics. In particular, the combination of FEM, MBD, DEM and acoustic programs, that could incorporate a wide variety of physical and nonphysical inputs, has considerably expanded the possibilities of mapping real relationships of entire systems and complex structures. The boundaries between the different dynamic simulation toolkits have become blurred and the engineer now has a range of options to choose from when tackling a problem. As the range of applications that can be tackled by the different toolkits increased, it provides the opportunity to chain different methods together, to go beyond component and part simulation and start to analyse the whole dynamic system.

The online seminar will be of interest to all engineers using software codes to solve structural dynamic problems. Presenters will be demonstrating how their organisation uses Dynamic Simulation.

Dynamic Simulation comes with unique challenges and the event will:

- investigate how AI/ML techniques can help interrogate and make sense of the huge data set of results produced by dynamic simulation.

- demonstrate how to optimise in a dynamic environment
- establish how organisations are integrating their dynamic simulation and test capabilities

This online seminar provides an opportunity to gain an appreciation for the wide range of methods that organisations are leveraging it design better products that operate in dynamic environments. The seminar will include a keynote presentation, several technical presentations, sponsor presentations, round table discussions and exhibits.

Your NAFEMS team

Delegate fee

Not-NAFEMS members: 175 Euro
 NAFEMS members using 2 seminar credits: free*
 NAFEMS member with no seminar credits: 300

Conference language

English

Hardware and software exhibition

Please request further information.

Contact

roger.oswald@nafems.org

**VORTRAGPROGRAMM:
 SIEHE NÄCHSTE SEITE**



Informationen und Anmeldung

www.nafems.org/dyn22

Agenda *

29 March 2022

12:30

Welcome & Introduction

M. Zehn (Vice Chair NAFEMS Council, TU Berlin); A. R. Oswald (NAFEMS)

12:45

Keynote presentation: Reduction Techniques for Large Non-Linear Finite Element Models: Recent Developments

D. J. Rixen (Technical University Munich)

13:30

Analysis of Numerical Crash Simulation Data using Data Science

N. Ballal (Fraunhofer EMI)

13:55

Quo Vadis Crash Simulation: Do we Still Need the Physical Twin?

A. Haufe (DYNAmore)

14:20 BREAK

14:35

New Concept of Geometry-Based Finite Element Model Generation for Crash Simulation within the Graph- and Heuristic-Based Topology Optimisation

T. Pohl (Stellantis)

15:00

Dynamics of Prestressed Assemblies

R. Helfrich (Intes)

15:25

X-Ray Computed Tomography Based Finite Element Modelling of Short Fibre Injection Moulded Structural Automotive Interior Parts

R. M. Auenhammer (Chalmers Univ. of Technology / Technical Univ. of Denmark); A. Prajapati (Univ. of Manchester / Volvo Car); L. P. Mikelsen (Technical Univ. of Denmark); R. Gutkin (Volvo Car / Chalmers Univ. of Technology); L. E. Asp (Chalmers Univ. of Technology)

16:00 BREAK

16:40

Machine Learning Methods for Model Updating of FEM Models in Vibroacoustics

T. Gohlke, M. Bopp, A. Albers (Karlsruhe Institute of Technology IPEK); N. Wagner (Intes); S. Slavetinsky (Renumics)

17:05

A New Gear Contact Method for the Tooth Contact Analysis of Spiral Bevel Gear Drives in Multi-body Simulations

M. Vivet, T. Tamarozzi (Siemens PLM Software / KU Leuven); J. Verhoogen, P. Jiránek (Siemens PLM Software)

17:30

Wrap-up Day1

M. Zehn (Vice Chair NAFEMS Council, TU Berlin)

17:35 End of day 1

30 March 2022

12:30

Welcome & Introduction Day 2

M. Zehn (Vice Chair NAFEMS Council, TU Berlin)

12:35

A Simplification and Optimization Approach for Vehicle Crashworthiness Analysis: Application on the NCAP MPDB Crash Test

P. Lualdi, M. Schäffer, R. Sturm (German Aerospace Center (DLR))

13:00

Using Implicit Solution to Simulate Explicit Problems in Aerospace

J. Bold (Boeing Research & Technology – Europe)

13:25

Analysis and Verification of a Pyroshock Simulation Test System

A. I. Kucukbayram (STFC RAL Space); M. B. Ozer (Middle East Technical University (METU))

13:55

Model-Based Structure Monitoring Approach for Remaining Service Life Estimation and Data-Driven Damage Localization

A. Mösenbacher (Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH)

14:20 BREAK

14:35

Sponsor Presentations

15:05 BREAK

15:20

All Torque, No Action: Development of a Technique to Efficiently Model the Preloaded Bolted Joint Behaviour of Structures with Large Numbers of Bolts

H. Stevens, M. Good (Frazer-Nash Consultancy)

15:55

Dynamic Analysis in the Frequency or the Time Domain?

C. Katz (Sofistik)

16:20

Cross-Domain Impact Analysis using the Artefact-Model

M. Brandstätter; C. Bühler, K. Steinkirchner (Prostep); M. Mayer (FOM Hochschule)

16:45

An Accurate Finite-Element Representation of Pharmaceutical Powder Compaction

D. van der Haven, J. A. Elliott (University of Cambridge); F. Ørtoft, K. Naelapää, I. Fragkopoulos (Novo Nordisk)

17:10

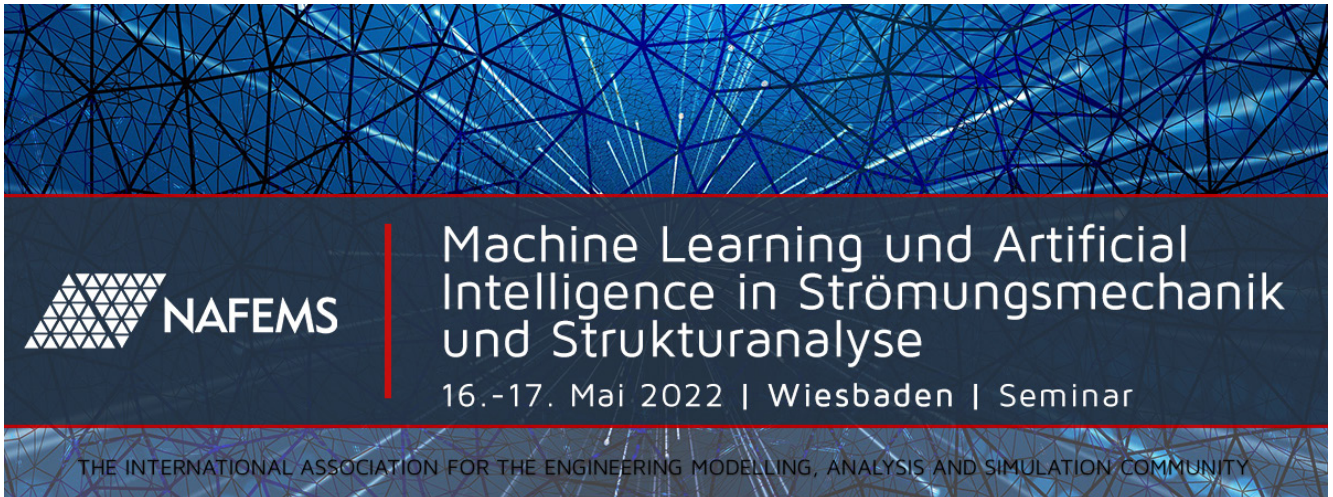
Seminar Wrap-up

M. Zehn (Vice Chair NAFEMS Council, TU Berlin)

17:30 End of seminar

(time zone: CEST, central european summer time = UTC+2 (Berlin)).

* Preliminary agenda - the event agenda is subject to change.



Die numerische Simulation hat sich über die vergangenen Jahrzehnte als wichtiges Werkzeug in der Produktentwicklung etabliert. Die Anforderungen und Wünsche an die Simulationsmodelle hinsichtlich physikalischer Mechanismen (Mehrphasenströmungen, Kopplung unterschiedlicher Phänomene, z. B. elektro-magnetischer Felder, strukturmechanischer Anregungen, hochfrequenter Schwingungen) sowie Größe der Probleme führen zu hohen Rechenzeiten.

Auch auf dem Gebiet strömungs- und strukturmechanischer Probleme wird heute auf Ansätze mit Artificial Intelligence (AI) und Machine Learning (ML) gesetzt. Dies zeigt sich u. a. an der Anzahl der Veröffentlichungen, die in den letzten 10 Jahren stetig steigend sind. Die Anwendungsgebiete reichen dabei von Optimierungsaufgaben in multidimensionalen Parameterräumen, von der Auswertung der Daten aus Simulation und Messung aus Strukturbeanspruchungen über die

Beschleunigung von hochauflösenden Turbulenzmodellen, bis hin zur Beschreibung mehrphasiger Strömungen.

Im Rahmen dieses Seminars werden Anwendungsgebiete, Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von ML- und AI-Methoden in numerischen Simulationsanwendungen, insbesondere im industriellen Einsatz, in unterschiedlichen Branchen und Unternehmensgrößen diskutiert.

Wir freuen uns auf Ihre Anmeldung.

NAFEMS DACH CFD Advisory Board / NAFEMS DACH Steering Committee

Ihr NAFEMS CAB (CFD Advisory Board) und DACH Steering Committee

Organization

Veranstaltungsort / Hotel

Hotel Oranien Wiesbaden
Wiesbaden

Fachausstellung und Sponsoring

Fläche: 600 Euro – bitte fordern Sie nähere Informationen an.

Teilnahmegebühr

Nicht-NAFEMS-Mitglieder: 620 Euro
NAFEMS-Mitglieder mit 3 „seminar credits“: frei*
NAFEMS-Mitglied ohne „seminar credits“: 420 Euro

Covid-19

Das Seminar wird gemäß den lokalen Covid-19-Bestimmungen durchgeführt. Sollte eine Vor-Ort-Veranstaltung nicht möglich sein, werden wir die Veranstaltung verschieben oder auf eine reine Online-Veranstaltung umstellen.

**VORTRAGPROGRAMM:
SIEHE NÄCHSTE SEITE**

->

Informationen und Anmeldung
www.nafems.org/mlai22

Vortragsprogramm *

Montag, 16. Mai 2022

13:30

Begrüßung und technische Einführung

Mitglieder des NAFEMS CFD Advisory Boards

13:45

Maschinelles Lernen in der virtuellen Produktentwicklung

C. Woll (GNS Systems)

14:15

Vergleich parametrisierter und parameterfreier KI-Modelle für industrielle Entwicklungsprozesse

M. Bauer (Navasto)

14:45

Gaußkovarianznetzwerke zur stichprobeneffizienten Regression hochdimensionaler Simulationsergebnisse

N. Friedlich, D. Roos (Hochschule Niederrhein)

15:15 PAUSE

16:00

Kriging-basierte Surrogat-Modellierung zur Unsicherheitsbewertung beim Datenmapping in integrierten CAE-Prozessketten

M. Meyer, A. Oeckerath, H. Marvast, R. Becker (Fraunhofer SCAI)

16:30

Bewertung von Methoden des Maschinellen Lernens für die Vorhersage von Durchbruchkurven

D. Fokina, O. Iliev, P. Toktaliev (Fraunhofer ITWM); I. Oseledets (Skoltech)

17:00

Identifikation von Reinigungsmechanismen mittels Methoden des maschinellen Lernens

C. Golla (TU Dresden)

17:30

Get together - Getränke und Snacks in der Ausstellung

Dienstag, 17. Mai 2022

08:30

Generierung von Entwürfen zur lokalen Steifigkeitserhöhung crashbelasteter Extrusionsprofile durch Reinforcement Learning

J. Trilling, A. Schumacher (Bergische Universität Wuppertal); M. Zhou (Altair Engineering)

09:00

Understanding Scatter and its Origins within Crash Simulation Results

D. Borsotto, S. Mertler, C. Thole (Sidact)

09:30

Physics Informed Neural Networks als multidimensionale Metamodelle von CFD Simulationen

J. Harmening, F. Pioch (Westfälische Hochschule); D. Schramm (Universität Duisburg-Essen)

10:00 PAUSE

10:30

Überführen von CFD-Ergebnissen in ML-Modelle

G. Klepp (IFE Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe)

11:00

Kundenadaptierte KI-Lösungen zur optimalen Ausnutzung vorhandener Simulations- / Versuchsreihen

C. Rockel, A. Gutierrez, A. Schuck (CFD Schuck Ingenieurgesellschaft)

11:30

Ein Surrogat-Ansatz zur schnellen Berechnung der Partikelabscheidung auf einer Einzelfaser mit Hilfe von CFD und Machine Learning

A. Zargarán, C. Voss, U. Janoske (Bergische Universität Wuppertal)

12:00

Morpheus AI. Surrogate toolbox zur Designprozess-Beschleunigung

B. Nouri (Siemens Energy Global)

12:30 MITTAGSPAUSE

13:30

Shape-Feature Ansatz zur lokal präzisen Vorhersage von CFD Simulationen

D. Steffes-lai, R. Iza-Teran, C. Gscheidle (Fraunhofer SCAI)

14:00

Portieren eines komplexen Brennstoffzellen-Stack-Modells auf einen HiL-Prüfstand zur Unterstützung der Steuergeräteentwicklung unter Einsatz natürlicher und künstlicher Intelligenz

S. Schmidt (MicroNova); H. Tielbörger (Siemens Digital Industries Software)

14:30

Automatisierte Erstellung von echtzeitfähigen Vorhersagemodellen zur Batteriesimulation mittels CFD

H. Tielbörger (Siemens Digital Industries Software)

15:00

Wrap-up/Diskussion

Mitglieder des NAFEMS CFD Advisory Boards

ca. 15:15

Ende der Veranstaltung

* Vorläufiges Vortragsprogramm. Änderungen vorbehalten.



Generative Design und Optimierung

18.-19. Mai 2022 | Wiesbaden | Seminar

THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR THE ENGINEERING MODELLING, ANALYSIS AND SIMULATION COMMUNITY

CALL FOR PAPERS - VERLÄNGERT

Bitte Titel und kurzen Abstract bis 14. März (verlängert) an roger.oswald@nafems.org senden

Generative Design (dt. Generative Gestaltung) ist eine iterative Entwurfsmethodik in Architektur, Produktdesign und Produktentwicklung, bei der Designentwürfe für bestimmte Anforderungen über Regeln oder Algorithmen erzeugt, bewertet und modifiziert werden, um schließlich ein Optimum oder eine Selektion an Entwürfen hinsichtlich der jeweiligen Aufgabenstellung zu erhalten. Hierdurch werden auch nicht-intuitive Lösungen generiert, die oft eine wesentlich höhere Zielerfüllung als konventionelle Lösungen aufweisen. In Verbindung mit leistungsfähigen Simulationsverfahren kann der Entwurfsprozess im Vergleich zu traditionellen Konstruktionsmethoden deutlich verkürzt werden.

In der virtuellen Produktentwicklung hat sich die Bezeichnung Generative Design als Oberbegriff für eine CAD-integrierte Lösung von Verfahren zur Topologie- und Gestaltoptimierung etabliert. Insbesondere durch Berücksichtigung von unterschiedlichen Fertigungsrestriktionen während der Optimierung können leicht Szenarien mit verschiedenen Produktionsmöglichkeiten erstellt werden, aus denen der Anwender dann ein Trade-off zwischen Performance und Herstellungskosten ableiten kann. Essenziell sind hierbei die Möglichkeiten der Geometrie-Rückführung und Feature-Erkennung, beispielsweise durch eine passende parametrische Flächenmodellierung

oder durch Verwendung von Skelettierungsalgorithmen zur Erstellung von Balkentragwerken.

Als Simulationsdisziplinen haben sich Strukturmechanik und CFD im Generative Design etabliert. Neben einfachen linearen Steifigkeitsoptimierungen werden je nach Implementierung auch funktionale Nebenbedingungen und nicht-lineare strukturmechanische Analysen unterstützt. Bei CFD können komplexe Strömungskanäle mit minimalem Druckverlust oder gleichförmigen Strömungsprofilen ausgelegt werden.

In dem Seminar sollen erfolgreiche Anwendungen aus der Industrie, neue Ergebnisse aus der Forschung und aktuelle Implementierungen in der Softwareentwicklung vorgestellt werden und ein Austausch über aktuelle Fragestellungen und zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten im Bereich des Generative Designs stattfinden. Auch neuartige Lösungen einzelner Teilaufgaben sind interessant, sofern die Einbettung in den gesamten Prozess aufgezeigt werden kann. Neben der technischen Lösung an sich ist insbesondere auch die Integration in den Entwicklungsprozess und die Erfahrung der beteiligten Stakeholder interessant.

Abgerundet wird die Veranstaltung durch eine Ausstellung von Anbie-

tern auf dem Gebiet von Simulation und Produktentwicklung, die einen Überblick über verfügbare kommerzielle Lösungen geben. Wir freuen uns über Ihre Vortragsanmeldung mit Abstract bis spätestens 14. März 2022 (verlängert) an roger.oswald@nafems.org.

Ihr NAFEMS DACH Steering Committee

Organization

Veranstaltungsort / Hotel
Hotel Oranien Wiesbaden
Wiesbaden

Fachausstellung und Sponsoring
Fläche: 600 Euro – bitte fordern Sie nähere Informationen an.

Teilnahmegebühr

Nicht-NAFEMS-Mitglieder: 620 Euro
NAFEMS-Mitglieder mit 3 „seminar credits“: frei*
NAFEMS-Mitglied ohne „seminar credits“: 420 Euro

Covid-19

Das Seminar wird gemäß den lokalen Covid-19-Bestimmungen durchgeführt. Sollte eine Vor-Ort-Veranstaltung nicht möglich sein, werden wir die Veranstaltung verschieben oder auf eine reine Online-Veranstaltung umstellen.

Informationen und Anmeldung
www.nafems.org/gen22



Fachkonferenz für Berechnung & Simulation im Engineering

4.- 6.Oktober 2022 | Bamberg | Deutschland

THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR THE ENGINEERING MODELLING, ANALYSIS AND SIMULATION COMMUNITY

Call for Papers - Abstracts bitte bis 20. Juni an info@nafems.de senden



Nach den erfolgreichen Konferenzen der letzten Jahre - zuletzt als Online-Konferenz - mit jeweils über 100 Fachpräsentationen zu den Themen FEM, CFD, MKS, SDM etc. möchten wir Sie nun herzlich zur sechsten deutschsprachigen NAFEMS Konferenz einladen, die vom 4. - 6. Oktober in Bamberg stattfinden wird. Es erwarten Sie wieder interessante Keynote-Vorträge sowie Beiträge von Anwendern unterschiedlicher Soft- und Hardwareprodukte aus Industrie, Forschung und Hochschulen. Eine große Ausstellung begleitet die Konferenz.



Mit dieser Fachkonferenz bietet Ihnen NAFEMS eine Plattform, auf der neue Techniken und Tools präsentiert werden sollen und den Teilnehmern die Möglichkeit geboten wird, auf breiter Basis erfolgreiche Anwendungen und Trends mit Spezialisten aus Forschung und im besonderen Maße aus der Industrie zu diskutieren.



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

Gestalten Sie mit - reichen Sie einen Vortrag ein!

Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie mit einem Fachvortrag aktiv an der Gestaltung der Konferenz und damit zu deren Erfolg beitragen würden. Wir wünschen uns Beiträge zu innovativen Anwendungen und ebenso Darstellungen über neue Techniken und Methoden zur Sicherung der Ergebnisqualität, zur Verbesserung des Datenmanagements und der Systemintegration sowie über Fortschritte in der Aus- und Weiterbildung auf diesem Gebiet. Wir freuen uns auf Ihren Abstract, den Sie bitte bis zum 20. Juni 2022 an info@nafems.de senden.

Weitere Regionalkonferenzen

- UK
7. - 8. Juni, Milton Keynes, GBR
- AMERICAS
21. - 23. Juni, Indianapolis, USA
- IBERIA
6. Oktober, Madrid, ESP
- EASTERN EUROPE
19. - 20. Oktober, Prague, CZE
- NORDIC
25. - 26. Oktober, Göteborg, SWE
- FRANCE
23. - 24. November, Paris, FRA

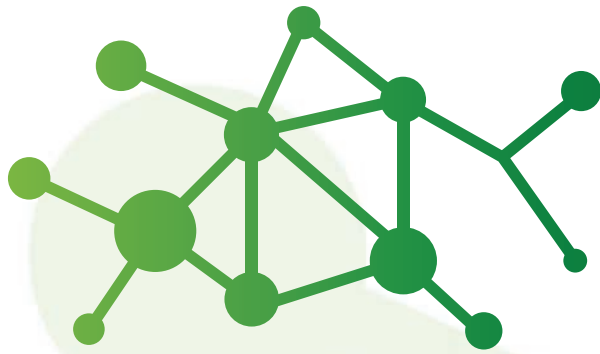


Begleitende Ausstellung

Ausstellungs- und Sponsoringinfos finden Sie auf der Konferenzwebseite.

Informationen und Anmeldung

www.nafems.org/dach22



NAFEMS REGIONAL CONFERENCES 2022

We're getting ready for NRC22
the **NAFEMS Regional Conference program.**

Spanning multiple regions with a series of conferences dedicated to the engineering modelling, analysis and simulation community in your area, the NRC22 program is where NAFEMS comes to you.

Get involved and be a part of it, as we bring the community back together for this series of outstanding user conferences, covering every aspect of simulation.

Calls for presentations, sponsorship opportunities, and early-bird registration are available now.

visit nafems.org/nrc22 today!

NRC 22

NAFEMS REGIONAL CONFERENCES

IBERIA

Madrid | Spain
March 24 2022

UK

Milton Keynes | UK
June 7-8 2022

AMERICAS

Indianapolis, IN | USA
June 21-22 2022

DACH

Bamberg | Germany
October 4-6 2022

NORDIC

Gothenburg | Sweden
October 25-16 | 2022

EASTERN EUROPE

Prague | Czech Republic
October 2022

FRANCE

Paris | France
November 23-24 2022

#nrc22



NAFEMS

Designer-Oriented Simulation: Putting Simulation Upfront

30 - 31 May 2022 | Online | Seminar

THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR THE ENGINEERING MODELLING, ANALYSIS AND SIMULATION COMMUNITY

CALL FOR PAPERS

Bitte Titel und kurzen Abstract bis 28. März an roger.oswald@nafems.org senden

Through real-world user experiences, demonstrating the business advantage of carrying out simulation much earlier in the design process, the aim of this event is to learn what to do differently in your design process and also the pros of cons of this approach.

Early deployment of simulation will reduce guessing and thus eliminate costly mistakes in design. It is also well known that late design changes are expensive, so by deploying simulation early in the process different solutions can be explored and compared before committing to the final design. There are of course challenges in implementing that and this event will focus on the best ways forward on this.

The seminar will include a keynote presentation, several technical presentations, sponsor presentations, round table discussions and exhibits. It is also planned to have a panel discussions on “pros” and “cons”. The event would be of interest to managers responsible for CAE within their team or CAE practitioners.

We look forward to your abstract submission.

Your NAFEMS NORDIC team

The seminar is open to both members and non-members of NAFEMS.

Abstract submission

Please send a short page abstract to roger.oswald@nafems.org latest **28 March 2022**. Abstracts shall be marked with author's name, organization, address, fax, phone numbers and email address. It is possible to stream in presentations.

Author notification

Approx. 2 weeks after submission deadline. Authors whose abstracts are accepted will be asked to prepare an extended abstract (typically 1-4 pages) and a PowerPoint presentation. Full written papers will not be required. Extended abstracts must be submitted latest 8 May 2022. Templates will be provided (ppt and word) with the author notifications.

Presentation length

25 minutes incl. discussion.

Seminar language

English

Informationen und Anmeldung

www.nafems.org/dos22

Mehr NAFEMS Events finden Sie unter www.nafems.org/events

- About ▾
- Join ▾
- Community ▾
- NWC21 ▾
- Analysis Agenda
- Training ▾
- Events ▾
- Professional Development ▾
- Resources ▾
- Contact ▾
- Careers ▾

Events

Home ▸ Events

NAFEMS Events

NAFEMS provides the engineering analysis community with as many as fifty seminars, conferences, workshops and open forums throughout the world each year. As the only truly independent organisation dedicated to engineering analysis and simulation NAFEMS' events are widely held to encompass the broadest and most accurate view of the community available.

Due to Covid-19, all of our near-term face-to-face training courses and events during the next several months will be either postponed or transferred to a web-based platform.

New NAFEMS Community Events:

Webinars

Talking Shop Series

Looking for training courses? [Click here.](#)

[Browse the event archives by year](#)

Find Events

Upcoming Events ▾

All Event Types ▾

All Countries ▾

<p>8 Mar 2022</p> <p>Systems Modeling & Simulation Community Meeting</p> <p style="text-align: right;">WebEx, Online</p> <p>Technical Community Event</p>	<p>9 Mar 2022</p> <p>Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</p> <p style="text-align: right;">Webex, Online</p> <p>Training Course</p>	<p>17 Mar 2022</p> <p>Python: The Key to Generate Complex FE Models</p> <p style="text-align: right;">WebEx, Online</p> <p>Webinar</p>
<p>22 Mar 2022</p> <p>El cálculo de tensión en el MEF y su precisión</p> <p style="text-align: right;">Webex, Online</p> <p>Webinar</p>	<p>29 Mar 2022</p> <p>Advances in Structural Dynamic Simulation</p> <p style="text-align: right;">Zuddi, Online</p> <p>Seminar</p>	<p>5 Apr 2022</p> <p>V&V: Verification & Validation des Simulations pour l'ingénierie</p> <p style="text-align: right;">Webex, Online</p> <p>Training Course</p>
<p>5 Apr 2022</p> <p>Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie</p> <p style="text-align: right;">online, Online</p> <p>Training Course</p>	<p>8 Apr 2022</p> <p>Georgia Tech's Aerospace Systems Design Laboratory – Developing the Next Generation Workforce...</p> <p style="text-align: right;">WebEx, Online</p> <p>Webinar</p>	<p>10 May 2022</p> <p>Verification and Validation in Engineering Simulation</p> <p style="text-align: right;">Webex, Online</p> <p>Training Course</p>
<p>16 May 2022</p> <p>Machine Learning und Artificial Intelligence in Strömung / Struktur</p> <p style="text-align: right;">Wiesbaden, Germany</p> <p>Seminar</p>	<p>17 May 2022</p> <p>Practical Introduction to Finite Element Analysis</p> <p style="text-align: right;">Coventry, UK</p> <p>Training Course</p>	<p>18 May 2022</p> <p>Generative Design und Optimierung</p> <p style="text-align: right;">Wiesbaden, Germany</p> <p>Seminar</p>
<p>30 May 2022</p> <p>Designer-Oriented Simulation: Putting Simulation Upfront</p> <p style="text-align: right;">Zuddi, Online</p> <p>Seminar</p>	<p>7 Jun 2022</p> <p>NAFEMS UK Conference 2022</p> <p style="text-align: right;">Milton Keynes, UK</p> <p>Regional Conference</p>	<p>21 Jun 2022</p> <p>NAFEMS Americas Conference 2022</p> <p style="text-align: right;">Indianapolis, USA</p> <p>Regional Conference</p>
<p>27 Sep</p> <p>Practical Introduction to Finite Element Analysis</p>	<p>4 Oct</p> <p>DACH Regionalkonferenz 2022</p>	<p>6 Oct</p> <p>NAFEMS Iberia Conference 2022</p>

Traditionelle Trainingsmethoden ändern sich. NAFEMS stellt sich der Herausforderung und bietet Ihnen eine Reihe von Schulungsoptionen, die vorwiegend online verfügbar sind und dieselben internationalen, unabhängigen Standards einhalten.

e-learning

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 .

[VIEW YOUR OPTIONS](#)

virtual classrooms

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.

[FULL DETAILS](#)

custom classes

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.

[CREATE YOUR COURSE](#)

learning modules


ONLINE, SELF-PACED LEARNING WITH TUTOR SUPPORT. LEARN AT YOUR OWN PACE, WITH EXPERIENCED GUIDANCE ON-HAND ALL THE WAY.

[VIEW THE MODULES](#)

learning hub

GUIDED LEARNING, EXCLUSIVE TO NAFEMS MEMBERS. FROM KEY CONCEPTS TO DETAILED LEARNING, THERE'S SOMETHING FOR EVERYONE.

[Access the Hub \(members only\)](#)



2 Mar 2022	Metals Material Modelling: Creep	eLearning, Online	eLearning
3 Mar 2022	Understanding Solid Mechanics: Stress Analysis Approaches	eLearning, Online	eLearning
9 Mar 2022	Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation	Webex, Online	Training Course
9 Mar 2022	Elements of Turbulence Modeling	eLearning, Online	eLearning
18 Mar 2022	Composite Finite Element Analysis	eLearning, Online	eLearning
22 Mar 2022	Non-Linear FEA	eLearning, Online	eLearning
23 Mar 2022	Next Steps with Multibody Dynamics Simulation	eLearning, Online	eLearning
31 Mar 2022	Advanced Dynamic FEA	eLearning, Online	eLearning
5 Apr 2022	V&V: Vérification & Validation des Simulations pour l'ingénierie	Webex, Online	Training Course
5 Apr 2022	Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie	online, Online	Training Course
5 Apr 2022	Metals Material Modelling: Welding Simulation and Residual Stresses	eLearning, Online	eLearning
6 Apr 2022	CFD for Structural Designers & Analysts	eLearning, Online	eLearning
21 Apr 2022	Practical Understanding of Systems Modelling and Simulation	eLearning, Online	eLearning
22 Apr 2022	How to Effectively Communicate Innovative Ideas	WebEx, Online	Professional Development
28 Apr 2022	Fatigue & Fracture Mechanics in FEA	eLearning, Online	eLearning
10 May 2022	Verification and Validation in Engineering Simulation	Webex, Online	Training Course
11 May 2022	Introduction to Practical CFD	eLearning, Online	eLearning
17 May 2022	Practical Introduction to Finite Element Analysis	Coventry, UK	Training Course

learn from anywhere.... always

online training that suits how you work



e-LEARNING

- | | |
|-------------|---|
| 10 Feb 2022 | 10 Steps to Successful Explicit Dynamic Analysis |
| 10 Feb 2022 | Introduction to Dynamics using FEA |
| 2 Mar 2022 | Metals Material Modelling: Creep |
| 3 Mar 2022 | Understanding Solid Mechanics: Stress Analysis Approaches |
| 9 Mar 2022 | Elements of Turbulence Modeling |
| 18 Mar 2022 | Composite Finite Element Analysis |
| 22 Mar 2022 | Non-Linear FEA |
| 22 Mar 2022 | Next Steps with Multibody Dynamics Simulation |
| 31 Mar 2022 | Advanced Dynamic FEA |
| 5 Apr 2022 | Metals Material Modelling: Welding Simulation and Residual Stresses |
| 6 Apr 2022 | CFD for Structural Designers & Analysts |
| 28 Apr 2022 | Fatigue & Fracture Mechanics in FEA |
| 11 May 2022 | Introduction to Practical CFD |

work
home
anywhere

 **NAFEMS** nafems.org/e-learning

www.nafems.org/e-learning

NAFEMS Schulung

Dieser Kurs wurde bereits über 50 Mal in ganz Europa gehalten!

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

10. - 12. Mai 2022 (tbc), 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

Tutors



Jean-Francois Imbert

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



Philippe Pasquet

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

Informationen und Anmeldung
www.nafems.org/vandv22-1

NAFEMS Schulung

Festigkeitsnachweis in die FKM-Richtlinie (7. Ausgabe, 2020)

5. - 6. April 2022 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Im Seminar wird die aktuelle 7. Ausgabe (2020) der Richtlinie behandelt. Die Unterschiede zur 6. Ausgabe werden vergleichend dargestellt.

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

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 Kirchoff, 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 Kirchoff 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.

Informationen und Anmeldung
www.nafems.org/fkm22-1

NAFEMS Schulung

Festigkeitsnachweis in die FKM-Richtlinie Nichtlinear

9. - 10. November 2022 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens

In der Richtlinie sind Nachweise der statischen Festigkeit und der Betriebsfestigkeit geregelt. Beim statischen Nachweis ist gefordert, dass an keiner Stelle des Bauteils eine werkstoffspezifische Grenzdehnung überschritten wird. Die vorhandenen Dehnungen sind mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente unter Beachtung physikalischer und geometrischer Nichtlinearität zu bestimmen.

Der Betriebsfestigkeitsnachweis basiert auf dem Örtlichen Konzept (Kerbdehnungskonzept), auf welches detailliert eingegangen wird. Das Örtliche Konzept versetzt den Anwender in die Lage, auf Basis rein elastizitätstheoretischer Finite-Element-Berechnungen einen Betriebsfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung des elastisch-plastischen Materialverhaltens zu führen. Der Nachweis ist sowohl im LCF als auch im HCF Bereich anwendbar und führt für Stahl, Stahlguss und Aluminium-Knetlegierungen zu statistisch abgesicherten Anrisslebensdauern.

Das Seminar wendet sich primär an Ingenieure, die Probleme der statischen und der Betriebsfestigkeit in Versuchs- oder Berechnungsabteilungen bearbeiten oder die Lebensdauer von Anlagen überwachen und die dabei bisher nur die traditionellen Konzepte, wie zum Beispiel die „FKM-Richtlinie linear“, einsetzen.

In diesem Seminar werden Hintergrundinformation zur neuen Richtlinie vermittelt und ihre Anwendung demonstriert. Die Teilnehmer werden in die Lage versetzt, Nachweise unter Zugrundelegung der Richtlinie durchführen zu können.

Gliederung

- > Einführung und statischer Festigkeitsnachweis
- > Hintergrundwissen zur Theorie und Anwendung des Örtlichen Konzepts
- > Anwendung des Örtlichen Konzepts anhand von Beispielen
- > Betriebsfestigkeit mit der FKM-Richtlinie nichtlinear: Konzept
- > Betriebsfestigkeit mit der FKM-Richtlinie nichtlinear: Lebensdauer im Detail
- > Betriebsfestigkeit mit der FKM-Richtlinie nichtlinear: Sicherheitskonzept
- > Betriebsfestigkeit mit der FKM-Richtlinie nichtlinear: Mehrachsigkeit und Proportionalität
- > Statischer Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie nichtlinear
- > Konzept der Nachweisführung
- > Statischer Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie nichtlinear: Übung
- > Betriebsfestigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie nichtlinear
- > Betriebsfestigkeitsnachweis eines Lagergestells

Die neue Richtlinie ist beim VDMA Verlag erhältlich. Bei Interesse klicken Sie bitte den folgenden Link an: [Richtlinie nichtlinear](#)

Referenten

Der Theorieteil des Seminars wird von Frau Dr.-Ing. Melanie Fiedler, einer Autorin der Richtlinie Nichtlinear, gehalten.

Der Praxisteil des Seminars wird von Herrn Dipl.-Ing. (FH) Tim Kirchhoff vorgestellt. Herr Kirchhoff ist seit 2007 bei der ihf Ingenieurgesellschaft mbH 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 die ihf Ingenieurgesellschaft mbH als KMU im Redaktionskreis der FKM-Richtlinie und im Industriekreis des Fachkreises.

Informationen und Anmeldung
www.nafems.org/fkm-nonlin22-2

Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation

9. - 10. März 2022, online (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



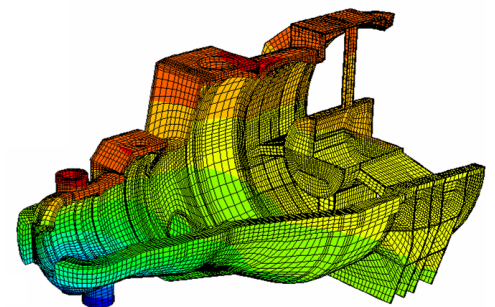
Prof. Dr.-Ing. Armin Huß verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Technischen Mechanik, Technischen Schwingungslehre und der Anwendung der Finiten Elemente Methode, davon über 20 Jahre Praxis-Erfahrung als freiberuflicher Ingenieur für die Anwendung der FEM in den unterschiedlichsten 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/fem22-1

NAFEMS Schulung

Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

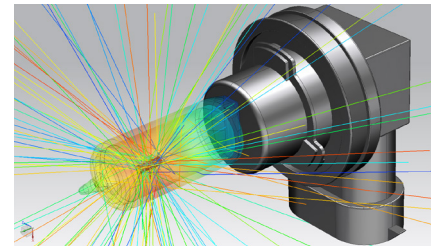
Die Schulung vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung (CFD). Neben der Funktionsweise von Programmen, die anhand zahlreicher einfacher Beispiele erläutert wird, steht die Vermittlung des gesamten Lösungsprozesses im Vordergrund. Mit Hilfe von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

Inhalte

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

Problemen / Fehlerquellen beim Lösungsprozess

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



Referent



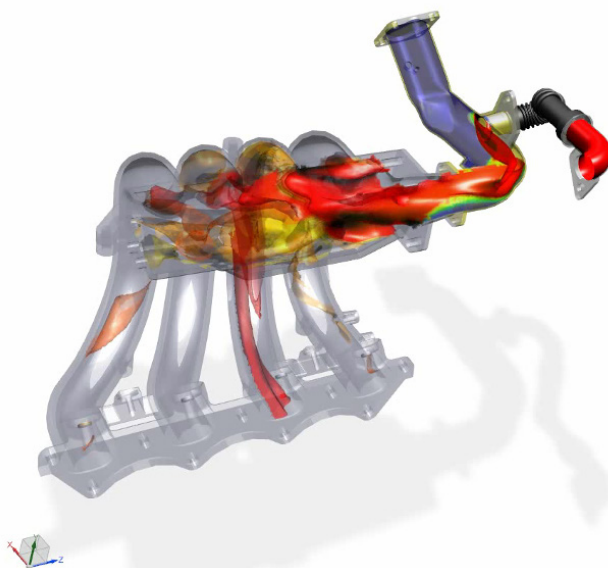
Prof. Dr.-Ing. Ganguolf Kohnen hat über 25 Jahre Erfahrung mit CAE-Anwendungen mit Schwerpunkten auf dem Gebiet der Strömungsberechnung CFD in Lehre, Forschung und Industrie. Herr Kohnen leitet den Bereich Maschinenbau und Virtual Engineering an der Hochschule Baden-Württemberg Mosbach.

Kurssprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

Inhouse-Kurs

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

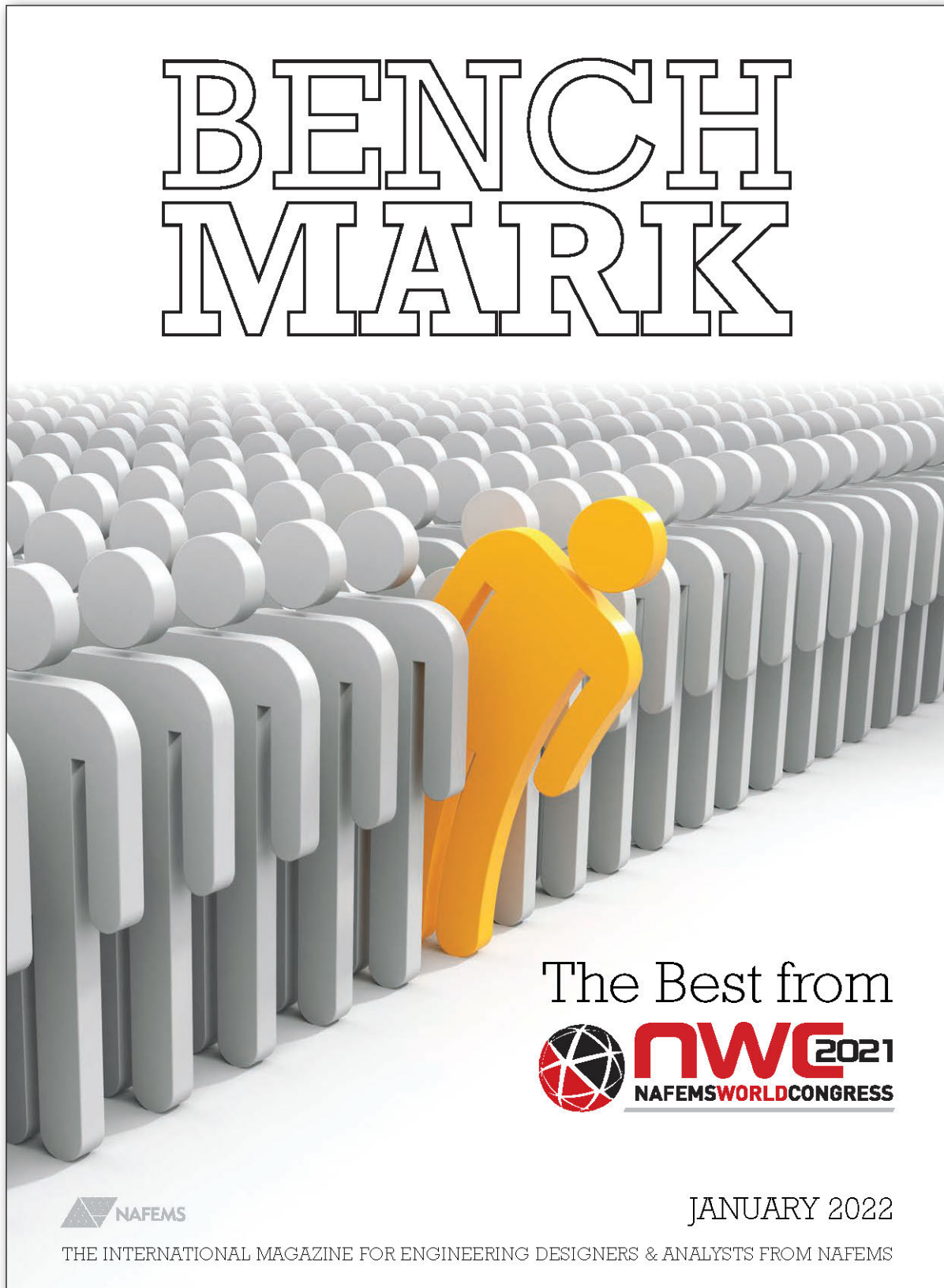


Internationales NAFEMS Magazin

Benchmark Magazin, Ausgabe Januar 2022

Die internationale NAFEMS Zeitschrift „Benchmark“ erschien zuletzt im Januar 2022.
Download für Mitglieder und Abonnenten sowie Informationen zum Abonnement finden Sie unter:

www.nafems.org/publications/benchmark



invitation²TENDER



Code Verification Exemplar

The NAFEMS Simulation Governance & Management Working Group (SGMWG) would like to commission a "Code Verification Exemplar" in the field of solid mechanics. The exemplar would demonstrate the methodology for performing rigorous code verification. Although this exemplar would be in the field of solid mechanics, the methodology demonstrated would apply to any field of computational simulation, for example, fluid dynamics, electromagnetics, and structural mechanics.

Goal of the Completed Exemplar

Rigorous code verification requires that a series of numerical solutions is computed on continually refined meshes so that the observed order of accuracy of the numerical solution can be determined. The most refined meshes must be in the asymptotic convergence region of the numerical solution to the mathematical model of the system of interest. The observed order of accuracy, also referred to as the observed order of convergence, is determined by examining the rate of change of the numerical error of the solution as a function of the mesh size. Mathematically, the observed order of accuracy is the value of the exponent p of the first term in the power series expansion of the numerical error in terms of the mesh size h , i.e., Ch^p . The observed order of accuracy can be found by plotting the logarithm of the numerical error of each solution as a function of the logarithm of the representative mesh size of each solution. The slope of the straight line in the asymptotic region on this log-log plot is the observed order of accuracy of the numerical solution. An exact solution of the mathematical model must be available so that the numerical error in quantities of interest (QOI), either the local error in the solution domain or the global error over the entire solution domain, can be computed exactly. Typical QOI are the local displacement or strain energy and the total strain energy in the structure. The numerical solution error is a combination of the discretization error within the solution domain of the original mathematical model, the numerical error due to the imposition of boundary conditions and external loading of the original mathematical model, and the numerical error due to integration of the numerical solution.

This procedure for rigorous code verification goes beyond the traditional technique of assessing numerical accuracy used in NAFEMS benchmarks. The traditional technique compares the numerical solution for QOI on a moderately refined mesh with a "target" or "reference" solution. There are two technical difficulties with this traditional approach. First, the finest mesh may not be refined sufficiently to be in the asymptotic convergence region. Second, the target solution may not be sufficiently accurate to assess the accuracy of the numerical solution. Most importantly, the traditional technique does not determine the observed order of accuracy of the numerical method. The observed order of accuracy is much more sensitive to any shortcoming in any aspect of the numerical solution procedure, e.g., mesh size, numerical error in imposition of the boundary conditions given in the original mathematical model, and numerical error in the imposition of the structural loading given in the original mathematical model. Because of the effectiveness of the observed order of accuracy method for testing software, the SGMWG is seeking the development and documentation of an exemplar using this method. For a detailed discussion of the methodology for determining the observed order of accuracy, see Knupp, P. and K. Salari (2002), *Verification of Computer Codes in Computational Science and Engineering*, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida, and Oberkampf, W. L. and C. J. Roy (2010), *Verification and Validation in Scientific Computing*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Guidance for Proposals

Each proposal should consist of:

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

The total cost is not expected to exceed £2K (GBP), and it is expected that the document will be completed within 6 months from NAFEMS approval. The length of the document is not anticipated to exceed 20 A4 pages.

All proposals should be sent to NAFEMS at sgmwg@nafems.org to arrive **no later than April 1st 2022**. Further details are available from the SGMWG chairman who are contactable using sgmwg@nafems.org.

Visit nafems.org/tenders for further details and more in-depth guidance.

For full details visit nafems.org/tenders
or contact the NAFEMS Technical Officer technical@nafems.org

Autoform

AutoForm-AutoComp – Kompensationsmethodik für die Rückfederungskompensation

AutoForm Engineering GmbH präsentiert ihre neu entwickelte Software AutoForm-AutoComp. Mit dieser Software können Anwender verschiedene Kompensationsstrategien schnell bewerten und vergleichen und dann die für ihre Bedürfnisse am besten geeignete auswählen. Als Ergebnis können die endgültige Werkzeuggeometrie und sämtlich Prozessparameter effizient definiert werden, so dass die Teilegeometrie innerhalb der geforderten Toleranzen und mit einer minimalen Anzahl von Korrekturschleifen im physikalischen Tryout zu liegen kommt. Mit der zunehmenden Verwendung moderner Werkstoffe wie hochfester Stähle und Aluminium bringt die Nutzung der effektivsten Kompensationsstrategie den Anwendern greifbare Vorteile. AutoForm-AutoComp ermöglicht Anwendern, schnell die effektivste Kompensationsstrategie zu bewerten und auszuwählen. Mit der Software AutoForm-AutoComp werden die Kompensationsschleifen automatisch im Hintergrund ausgeführt. Anwender können die Anzahl der Iterationen auswählen, den Status dieser Iterationen überprüfen und sofort auf dem Bildschirm visualisieren.

Mittels AutoForm-AutoComp können die endgültige Werkzeuggeometrie und die Prozessparameter viel schneller definiert werden, so dass die Teilegeometrie innerhalb der erforderlichen Toleranzen und mit einer minimalen Anzahl von Korrekturschleifen im Tryout gewährleistet ist. Die zielgerichtete Anwendung von AutoForm-AutoComp führt zu einer verbesserten Planungssicherheit in der Werkzeugentwicklung, im Werkzeugbau und im Tryout sowie zu einer Minimierung des Risikos späterer, kostspieliger Änderungen an Werkzeugen oder Prozessen. Dr. Markus Thomma, CMO der AutoForm-Gruppe, erklärt: „In den letzten Jahren hat sich die Rückfederungskompensation zu einem der wichtigsten Themen im Rohbau entwickelt. Wir freuen uns, dass wir

unseren Kunden eine neue Software anbieten können, die sie in diesem Bereich unterstützt. AutoForm-AutoComp hilft den Anwendern bei der effizienten Bewältigung von Problemen bei der Rückfederungskompensation. Die Software ermöglicht es ihnen, die effektivste Kompensationsstrategie auszuwählen und führt zu einer schnelleren und zuverlässigeren Methodenplanung.“

www.autoform.com

BETA CAE Systems

Neue Softwareversionen

BETA CAE Systems gab die Veröffentlichung seiner Software-Suite v22.1.0 und SPDRM 1.5.3 bekannt.

www.beta-cae.com

CADFEM

Cadferm Ansys Extensions: Update 2022 R1

Kurz nach Erscheinen von Ansys 2022 R1 sind nun auch die Cadferm Ansys Extensions darauf angepasst. Die Extensions sind Spezialtools, über die in Ansys besondere Ingenieuraufgaben gelöst werden können: U.a. Schraubenbewertungen nach VDI 2230, FKM-Nachweise, Gleit- und Wälzlagerauslegungen. Diese Tools und die entsprechenden Seminare gibt es nur bei Cadferm.

Neue Version 2022 R1

Seit 1. Februar hat Ansys die neue Version 2022 R1 offiziell freigegeben. Die wichtigsten Highlights aus Strukturmechanik, Strömungsmechanik und Elektromagnetik (LF, HF) stellen Cadferm Experten in vier Live-Webinaren vor.

www.cadferm.net

CARHS

Der SafetyCompanion 2022

Im Dezember ist der SafetyCompanion 2022 erschienen. Er gibt wieder einen aktuellen und umfassenden Überblick über die weltweiten Anforderungen in der Fahrzeugsicherheit. Das so genannte SafetyWissen wurde wieder komplett aktualisiert und an vielen Stellen erweitert. So wurden z.B. die neuen Euro NCAP Bewertungen für Child Presence Detection (CPD) und AEB / Lane Support zum Schutz motorisierter Zweiräder (PTW) aufgenommen. Der SafetyCompanion zeichnet sich durch ein hohes Maß an Interaktivität aus: Die Wissensseiten sind per QR Code bzw. Link mit den entsprechenden Einträgen in der Wissensplattform SafetyWissen.com verlinkt und in der PDF Version des SafetyCompanion gelangt man bei allen referenzierten Vorschriften und Protokollen einfach per Mausklick zum jeweiligen Dokument auf SafetyWissen.com. Der SafetyCompanion 2022 enthält 90 Seiten mit SafetyWissen in Form von Tabellen, Grafiken und Übersichten.

www.carhs.de

COMSOL

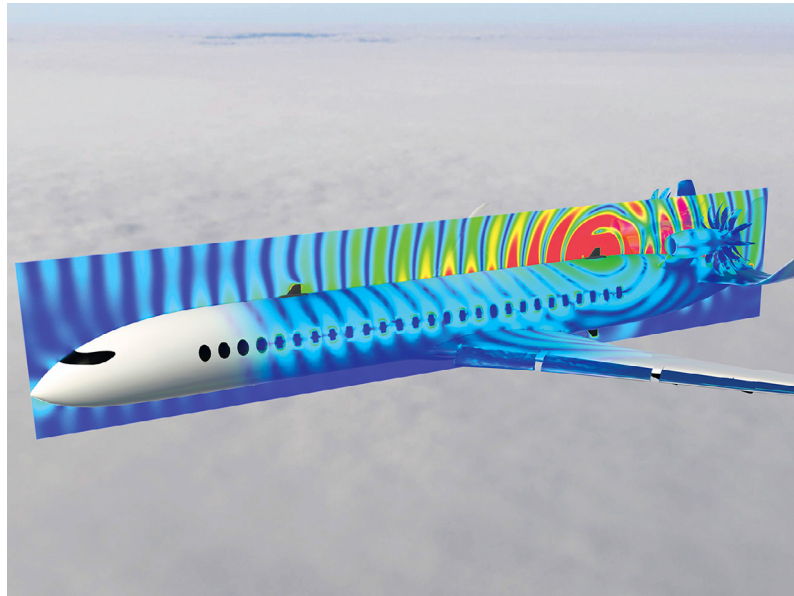
Comsol veröffentlicht Version 6.0

Die führende Multiphysik-Simulationssoftware wird um eine Funktion für die Modellverwaltung sowie um ein Modul für die Analyse der Unsicherheitsquantifizierung erweitert und umfasst darüber hinaus wichtige Neuerungen und Leistungsverbesserungen.

Comsol, führender Anbieter von Softwarelösungen für Multiphysik-Modellierung hat Version 6 der Comsol Multiphysics-Software veröffentlicht. Die neue Version bietet jetzt den Model Manager, eine neue Arbeitsumgebung in ComsolMultiphysics, die eine effiziente Verwaltung von Simulationsdaten und Zusammenarbeit ermöglicht. Ebenfalls neu in der Version 6.0 ist das Uncertainty Quantification

SIMULIA EUROCENTRAL RUM

3–5 May, 2022
Hanau, Germany



EVENT HIGHLIGHTS:

- User presentations
- Technology updates on key technologies: Abaqus, fe-safe, Isight, Tosca, Simpack, CST Studio Suite, Opera, PowerFLOW, XFlow, Wave6
- Face-to-face networking with Dassault Systèmes technical experts & your peers!

Register now to attend in person or online:
go.3ds.com/ECAL-RUM

Module, ein neues Zusatzprodukt für Comsol Multiphysics, das probabilistische Designmethoden zur Quantifizierung der Unsicherheit in Analysen und vorgegebenen Sicherheitsmargen verwendet. Darüber hinaus umfasst Version 6 wichtige Löser-Verbesserungen, welche die Leistung in Bereichen wie Wärmestrahlung und Modellen mit nichtlinearem Materialverhalten um Faktor 10 beschleunigen. Mit der Version 6 verspricht Comsol, die Produktivität von Ingenieuren, ihren Teams und ihren Unternehmen in den Bereichen Produktdesign, Prozessentwicklung und Fertigung zu steigern.

www.comsol.com

INSTAL

Instal-News

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

www.4innovative-engineers.com

HEXAGON

Neue Innovations-Plattform für Start-ups

Die Plattform „Sixth Sense“ unterstützt Start-ups dabei, deren fortschrittliche Technologien und Produkte weiterzuentwickeln und zu kommerzialisieren. So kann der Weg für mehr offene Innovation im Bereich der intelligenten Fertigung geebnet und komplexe Probleme der Branche gelöst werden.

Horizontal spacer

Hexagons Geschäftsbereich Manufacturing Intelligence, der Lösungen für die virtuelle Produktentwicklung, Produktion und Qualitätstechnologie bereitstellt, kündigte ein revolutionäres Konzept zur Unterstützung von Start-ups an.

Die offene Innovationsplattform Sixth Sense bringt Start-ups und branchenführende Unternehmen zusammen, um transformative Lösungen zu schaffen, von denen alle

Anwender profitieren. Die Plattform fördert die gemeinsame Nutzung von Ressourcen, Daten und Ideen, um den Fortschritt zu beschleunigen sowie reale Herausforderungen zu meistern, wie die Klimaneutralität. Zu den Themenbereichen gehören zudem Nachhaltigkeit, Big Data, maschinelles Lernen, künstliche Intelligenz, Sensoren und Robotik. Die erste thematische Herausforderung von Sixth Sense - künstliche Intelligenz (KI) für eine nachhaltige, intelligente Fertigung - umfasst die oben genannten Bereiche und fordert Start-ups dazu auf, Bewerbungen einzureichen sowie sich für die diversen Themen und Veranstaltungen zu registrieren.

Yamaha Motor gewinnt Preis für die innovative Anwendung von Multiphysiksimulation zur Lärmreduzierung bei unbemannten Hubschraubern

Yamaha Motor gewinnt den MSC Nastran Excellence Award 2021 für die Anwendung einer leistungsstarken Fluid-Struktur-Akustik-Co-Simulation zur Anpassung des Rotorblattdesigns und zur Minimierung des Lärms für den Einsatz in Wohngebieten und in der Landwirtschaft. Horizontal spacer

Der MSC Nastran Excellence Award vergeben von Hexagon Manufacturing Intelligence prämiiert technische und konstruktive Innovationen von MSC Nastran-Anwendern weltweit. Die Struktursimulationssoftware MSC Nastran ist seit den Apollo-Missionen der NASA der Industriestandard für Struktursimulationen und wird wegen seiner Stärken in der hochpräzisen Finite-Elemente-Analyse (FEA) in allen Branchen eingesetzt. Die eingereichten Projekte wurden von einem Expertengremium des Bereichs CAE Structures bei Hexagon geprüft.

Yamaha Motor erhielt den ersten Platz für die kreative Anwendung von MSC Nastran bei der Entwicklung unbemannter Hubschrauber, die in Wohngebieten eingesetzt werden. Durch die Einbeziehung von Fluid-Struktur-Akustik-Cosimulationsverfahren in die Konstruktionsabläufe erhielt das Unternehmen wichtige Erkenntnisse. So konnte

die Geräuscentwicklung während des Betriebs weiter reduziert werden. Die Multiphysik-Analysen, ermöglicht durch die Kombination von MSC Nastran, Cradle CFD und Actran-Akustiksimulation, eröffneten Yamaha Motor Innovationswege, um verschiedene Geschäftsszenarien für unbemannte Hubschrauber zu entwickeln und diese während des gesamten Konstruktionsprozesses bis hin zu den Entwicklungsprozessen zu berücksichtigen.

MSC Nastran spielt eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der akustischen Leistung von Autos, Flugzeugen und anderen schädlichen Lärmquellen und trägt so zu einer ruhigeren, angenehmeren und nachhaltigeren Umwelt bei. Lärmeindämmung gilt als ein wichtiger Faktor für die soziale und ökologische Nachhaltigkeit, denn Lärm hat negative Auswirkungen auf die biologische Vielfalt. Da unsere Städte und Industrieanlagen immer größer und komplexer werden, ist die Lärminderung für die Lebensqualität zunehmend entscheidend.

www.hexagon.com

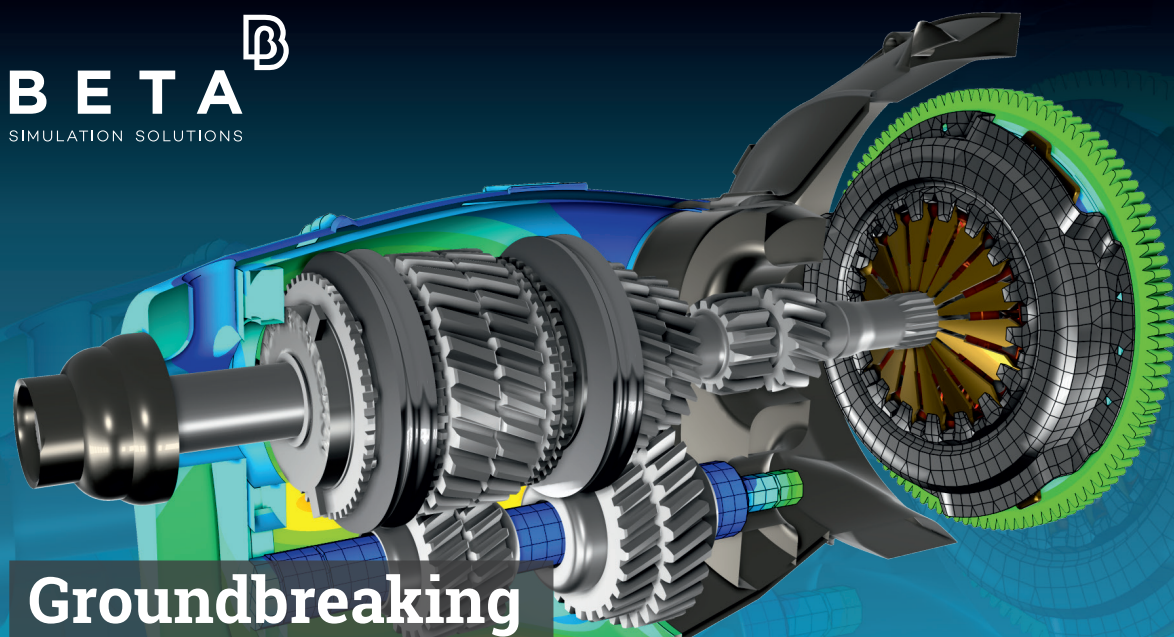
PROSTEP

Prostep bezieht neue Geschäftsräume in Böblingen

Die Prostep AG führt die Aktivitäten ihrer verschiedenen Büros im Raum Stuttgart in einer neuen Geschäftsstelle in Böblingen zusammen. Ausschlaggebend für Wahl der neuen, modernen Geschäftsräume waren der attraktive Standort, die gute Verkehrsanbindung, die kurzen Wege zu Automobilhersteller Mercedes-Benz, für den Prostep zahlreiche, große Software-Entwicklungsprojekte realisiert, und die räumliche Nähe zur Prostep-Tochter BHC. Sie sitzt im selben Gebäude, was die Zusammenarbeit bei gemeinsamen Kundenprojekten rund um die E/E- und Software-Entwicklung und die PLM/ALM-Integration erleichtert.

Die attraktiven Räumlichkeiten in der Konrad-Zuse-Straße 5 in Böblingen erlauben die Umsetzung von flexibleren Arbeitsmodellen, die die

BETA
SIMULATION SOLUTIONS



Groundbreaking Simulation Solutions

Unleash the full power

physics on screen

www.beta-cae.com

Arbeit von zu Hause und Büroarbeit miteinander kombinieren. Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern stehen einheitlich ausgestattete, leistungsfähige und ergonomische Computer-Arbeitsplätze zur Verfügung, egal an welchem Arbeitsplatz sie arbeiten. Dadurch bietet das Flex-Office-Konzept Raum für zusätzliches Personal. Prostep will im laufenden Jahr weitere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter einstellen. Auf den 324 Quadratmetern Bürofläche gibt es außerdem Räume für Meetings, Besprechungen und Schulungen sowie Freiräume zur Entspannung. Was die neue Geschäftsstelle besonders attraktiv macht ist ihre zentrale Lage in der Nähe des Bahnhofs Böblingen im aufstrebenden Wohn- und Mischgebiet Flugfeld zwischen Böblingen und Mercedes-Benz Werk Sindelfingen. „Mit dem Umzug in die neuen Geschäftsräume machen wir deutlich, dass Kundennähe und insbesondere die Nähe zu unserem Kunden Mercedes-Benz gerade in

Corona-Zeiten weiterhin eine wichtige Rolle spielt“, sagt Rainer Zeifang, CTO Daimler Projects. „Außerdem tragen wir den Ansprüchen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an einen attraktiven und zeitgemäßen Arbeitsplatz Rechnung.“

SICOS BW

EU-Projekte öffnen Türen für Zukunftstechnologien

Zukunftsthemen und -Technologien werden immer komplexer und folglich für Unternehmen zunehmend schwieriger zu bewältigen. Die Sicos BW GmbH setzt als Beratungsunternehmen und Experte für den Einsatz von High Performance Computing (HPC), Data Analytics und Künstlicher Intelligenz (KI) in der Industrie daher stark auf die Mitwirkung in EU-Projekten. „Das Wissen rund um Höchstleistungsrechnen und Datennutzung ist EU-weit sehr hoch, muss

aber für die Unternehmen leichter zugänglich und nutzbar gemacht werden“, sagt Dr. Andreas Wierse, Geschäftsführer von Sicos BW. Und weiter: „Wir freuen uns, dass wir zwei hierauf ausgerichtete EU-Projekte mit unserer Expertise unterstützen dürfen.“ Derzeit ist Sicos BW an den EU-Projekten Excellerat und EuroCC beteiligt.

Excellerat – Kompetenz für die europäische Maschinenbauindustrie Das Excellerat -Projekt bündelt Fachwissen darüber, wie Datenmanagement, Datenanalysen, Visualisierung, simulationsgestütztes Design und Co-Design mit Höchstleistungsrechnern dem Ingenieurwesen zugutekommen können. „Im Fokus steht hierbei das Exascale Computing, das hochkomplexe und kostspielige technische Probleme lösen und bereits in der Entwicklungsphase verbesserte Lösungen schaffen kann“, so Wierse. „Ziel von Excellerat ist es deshalb, die europäische Industrie in puncto

Exascale-Technologien gut aufzustellen.“ Hierfür führt das Projekt die wichtigsten Akteure aus Industrie, Forschung und HPC zusammen, um geeignete Angebote für die entsprechenden Bedürfnisse zu fördern und verfügbar machen zu können. EuroCC – Europaweit den passenden Experten finden Ziel des EU-Projekts „National Competence Centres in the framework of EuroHPC“ (EuroCC) ist es, die 33 beteiligten EU- und assoziierten Länder auf ein einheitlich hohes Level in den Technologiefeldern HPC, High Performance Data Analytics und KI zu heben. Ermöglichen sollen dies nationale Kompetenzzentren, die die landesspezifischen Angebote und Fähigkeiten in den Technologiebereichen erfassen, bewerten, koordinieren und netzwerkweit zugänglich machen – für Wissenschaft, Industrie und öffentliche Verwaltung gleichermaßen. „Indem Unternehmen europaweit leichter Zugang zu Experten finden, wollen wir die Hürden zur Nutzung der Zukunftstechnologien maßgeblich senken“, so Wierse zur Zielsetzung des Projekts.

www.sicos-bw.de

SIEMENS PLM

Siemens beschleunigt CFD-Simulation mit Simcenter STAR-CCM+ und Nvidia GPU Technologie

Simcenter STAR-CCM+2022.1 nun die CUDA unterstützte GPU (Graphics Processing Units)-Beschleunigung von CFD-Simulationen. Für Entwicklungsbereiche jeder Größe bedeutet das schnellere Produktentwicklungszyklen bei geringeren Hardware-Investitionen. Siemens Digital Industries Software verkündete am 23.02.2022 seine Zusammenarbeit mit Nvidia, um eine neue Ära von Computational Fluid Dynamics (CFD)-Simulationen einzuleiten. Als Teil des Xcelerator-Portfolios für Software und Services, ermöglicht Simcenter STAR-CCM+2022.1 nun die CUDA unterstützte GPU (Graphics

Processing Units)-Beschleunigung von CFD-Simulationen. Für Entwicklungsbereiche jeder Größe bedeutet das schnellere Produktentwicklungszyklen bei geringeren Hardware-Investitionen.

„Siemens und Nvidia öffnen die Tür zu einer völlig neuen Ära der Beschleunigung von CFD-Berechnungen mit Simcenter STAR-CCM+. Mit GPU-unterstützter Simulations-Technologie können Benutzer Berechnungszeiten reduzieren und das bei deutlich niedrigeren Kosten pro Simulation.“ sagt Stamatina Petropoulou, Technical Product Management, Siemens Digital Industries Software. „Diese Technologie wird es Ingenieuren aus den Bereichen externe Aerodynamik, Luftfahrt, Gebäudetechnik und Infrastruktur, etc. ermöglichen, mehr Simulationen bei vergleichbaren Hardware-Investitionen durchzuführen, mit einer signifikant gesteigerten Kosteneffizienz von GPUs gegenüber CPUs.“

In einer Reihe von Industrie relevanten Simulationen im Bereich externer Fahrzeug-Aerodynamik konnten die Berechnungsingenieure von Siemens und Nvidia aufzeigen, wie die Nutzung von GPUs die Hardwarekosten um bis zu 40% und den Energieverbrauch auf 10% des CPU-Äquivalents reduzieren kann, bei annähernd identischen Simulationszeiten von GPUs und CPUs. Während CPU-basierte Berechnungen in Verbindung mit einem parallelisierten CFD-Code eine hohe Beschleunigung absoluter Rechenzeiten ermöglichen, bringen sie oft jedoch auch eine hohe Investition in Hardware oder geeignete Berechnungskapazitäten bei Cloud-Anbietern mit sich. Die GPU-Technologie stellt damit einen Paradigmenwechsel dar. Siemens ist mit einigen der etabliertesten Partner in diesem Bereich führend auf dem Gebiet.

„Siemens Simcenter STAR-CCM+ wird CFD-Simulationen mittels der Nvidia GPU-Technologie mit seiner CUDA-Plattform und Bibliotheken eine unglaubliche Beschleunigung verleihen“, sagt Niveditha Krishnamoorthy, Developer Relations Manager, Nvidia. „Durch Verwendung

der Nvidia GPU-Architektur können Simcenter STAR-CCM+-Benutzer jetzt mehr Simulationen schneller durchführen, und so entscheidende Einblicke zur Verbesserung des Designs und des Betriebes Ihrer Produkte gewinnen, ohne Kompromisse bei der Genauigkeit einzugehen.“

Daimler Truck setzt auf Siemens Xcelerator, um die Zukunft des CO2-neutralen Verkehrs zu gestalten

Siemens Digital Industries Software gibt heute bekannt, dass Daimler Truck die Siemens-Software Simcenter STAR-CCM+ für die Entwicklung der nächsten Generation CO2-neutraler Fahrzeuge einsetzt. Mit Simcenter, das zum Xcelerator-Portfolio von Siemens gehört, erhält Daimler Truck eine hochmoderne CFD (Computational Fluid Dynamics)-Lösung. Mit dieser Lösung transformiert das Unternehmen seinen CAE-Entwicklungsprozess in eine Multiphysik-Entwicklungsumgebung auf Basis eines umfassenden digitalen Zwillings. Daimler Truck plant, Simcenter zur Verbesserung des aerodynamischen Verhaltens sowie zur Erforschung und Optimierung innovativer Antriebs- und Energiemanagementsysteme für die Elektromobilität einzusetzen, beispielsweise in den Bereichen Batteriekühlung und Wasserstofftechnologie. Die Software wird auch die Entwicklung von Verbrennungsmotoren und Abgassystemen sowie die damit verbundene CO2-Reduzierung unterstützen. Zusätzlich zur Software werden Siemens und Daimler Truck gemeinsam junge Ingenieure ausbilden, die als hochqualifizierte Simulationsspezialisten dazu beitragen werden, dass Daimler Truck seine Marktführerschaft behaupten kann. „Wir sind stolz darauf, Daimler Truck als neuestes Mitglied in unserer ständig wachsenden Kundenfamilie zu haben“, sagte Edwin Severijn, Sr. VP und General Manager, EMEA, Siemens Digital Industries Software. „Die Digitalisierung ist entscheidend für nachhaltige industrielle Innovationen im Transportsektor. Indem Simcenter STAR-CCM+ Einblicke in die reale Leistung von Produkten

bietet, kann es Innovationen für eine bessere Zukunft beschleunigen.“ Die Daimler Truck AG ist der weltweit größte Hersteller von Lkw und Bussen, mit führenden Positionen in Europa, Nordamerika und Asien und mit mehr als 35 Hauptstandorten rund um den Globus. Mit mehr als 100.000 Mitarbeitern vereint sie sieben Marken unter einem Dach: Freightliner, Western Star, Thomas Built Buses, Mercedes-Benz, Setra, BharatBenz und FUSO.

Siemens erweitert das Xcelerator-Portfolio in der neuesten Version von NX mit KI-Funktionen

Siemens Digital Industries Software stellt heute die neueste Version seiner branchenführenden NX-Software vor, die Teil des Xcelerator-Portfolios von Software und Services ist. Die neueste Version der NX-Software nutzt fortschrittliche Technologien wie künstliche Intelligenz (KI) und erweiterte Simulationsfunktionen. Siemens investiert zudem in erhebliche Produktivitäts- und Leistungsverbesserungen, um Konstrukteuren, Ingenieuren und Unternehmen schnellere Innovation zu ermöglichen.

„In der neuesten Version von NX verbindet Siemens Digital Industries Software die Topologie-Optimierung von den Anforderungen über die Bauteilgenerierung bis hin zur additiven Fertigung und Endbearbeitung nahtlos. Convergent Modeling und die automatische modellbasierte Definition von PMI lassen sich gemeinsam mit der aufgabenbasierten Kollaboration nutzen“, so Dr. Ken Versprille, Executive Consultant bei CIMdata. „Die Anwender werden die ergonomische Benutzungsoberfläche begrüßen, die den Anwender durch jeden Schritt des Prozesses führt.“

Zu den Highlights der neuen Version der NX-Software zählen:

- › Der neue NX Topology Optimizer hilft bei der Erstellung von Teilen ausschließlich auf Basis der Funktions- und Bauraumanforderungen. Dabei entstehen vollständig editierbare, konvergente Körper, die manuell kaum zu entwerfen und zu konstruieren wären. Die typischen, unvermeidlichen Konstruktionsänderungen lassen sich schnell umsetzen, Optimierungen und alle nachgelagerten Funktionen automatisch aktualisieren - das spart Zeit und Aufwand und maximiert die Wiederverwendung von intelligenten Konstruktions- und Engineeringdaten.
- › Der Design Space Explorer kombiniert die gezielte Untersuchung des Designraums mit generativem Engineering, um Konstrukteure bei der automatischen Optimierung eines Designs zu unterstützen, wenn mehrere Ziele erreicht werden sollen. Die Konstrukteure definieren das Optimierungsproblem mit allen Parametern, Einschränkungen und Zielen, anhand derer NX dann mit der Simcenter HEEDS-Software eine multikriterielle Parameteroptimierung durchführt. Der Konstrukteur kann aus einer Reihe von realisierbaren Konstruktionsalternativen auswählen, für deren Erzeugung sonst ein Simulationsspezialist erforderlich gewesen wäre.
- › Die verbesserte künstliche Intelligenz (KI) und das maschinelle Lernen (ML) in den Befehlen Selection Prediction und Select Similar nutzen die Formerkennung, um geometrisch ähnliche Komponenten schnell zu identifizieren. Der NX Voice Command Assist ermöglicht es dem Benutzer, durch mehrstufige Menüs und Operationen zu

navigieren, Befehle aufzurufen und dem System einzelne Wörter oder ganze Sätze zur Ausführung allgemeiner Aufgaben beizubringen. Fragen Sie NX zum Beispiel: „Haben wir etwas Ähnliches schon einmal gemacht?“, führt NX eine Formsuche mit der Geolus-Technologie von Siemens durch.

- › Gitterstrukturen lassen sich jetzt in NX mit Hilfe der Simcenter-3D-Simulation in einer gemeinsamen Umgebung aufbauen und optimieren. Damit entfallen die traditionellen erforderlichen mehrfachen Schleifen der Konstruktionsanalyse. Die Optimierung der Bauteilausrichtung ermöglicht eine effiziente Ausnutzung des Arbeitsraums der Maschine bzw. des 3D-Druckers, auch unter Berücksichtigung des Aspekts der thermischen Verformung. Siemens liefert für die additive Fertigung auch weiterhin innovative Funktionen für die Optimierung des gesamten Design- und Fertigungsprozesses unserer Kunden.

www.siemens.com/software

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.

NAFEMS Kurs: Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation	09.-10.03.	Online	www.nafems.org/fem22-1	NAFEMS
NAFEMS Seminar: Advances in Structural Dynamic Simulation	29.-30.03.	Online	www.nafems.org/dyn22	NAFEMS
NAFEMS Kurs: Festigkeitsnachweis FKM (7. Ausgabe, 2020)	05.-06.04.	Online	www.nafems.org/fkm22-1	NAFEMS
Simulia Regional User Meeting - Eurocentral	03.-05.05.	Hanau, D	go.3ds.com/ECAL-RUM	Dassault Simulia
NAFEMS Kurs: Verification and Validation in Engineering Simulation	10.-12.05.	Online	www.nafems.org/vandv22-1	NAFEMS
NAFEMS Seminar: Machine Learning und Artificial Intelligence in Strömung/Struktur	16.-17.05.	Wiesbaden, D	www.nafems.org/mlai22	NAFEMS
FLOW-3D World Users Conference 2022	16.-18.05.	München, D	www.flow3d.com	Flow 3D
NAFEMS Seminar: Generative Design und Optimierung	18.-19.05.	Wiesbaden, D	www.nafems.org/gen22	NAFEMS
NAFEMS Seminar: Designer-Oriented Simulation: Putting Simulation Upfront	30.-31.05.	Online	www.nafems.org/dos22	NAFEMS
automotive CAE Grand Challenge	05.-06.06.	Hanau, D	www.carhs.de	Carhs
ISNVH Int. Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress	22.-24.06.	Graz, A	www.isnvh.at	ViF/SAE
4a Technology Days	27.-29.06.	Schladming, A	www.technologietag.4a.at	4a Engineering
Permas Web-Anwenderkonferenz	29.06.-14.07.	Online	www.intes.de	Intes
GSVF 2022	31.08.-01.09.	Graz, A	www.v2c2.at	ViF
NAFEMS UK Regional Conference	07.-08.06.	Milton Keynes, UK	www.nafems.org/events	NAFEMS
NAFEMS AMERICAS Regional Conference	21.-23.06.	Indinapolis, USA	www.nafems.org/events	NAFEMS
NAFEMS DACH Regional Conference	04.-06.10.	Bamberg, D	www.nafems.org/dach22	NAFEMS
NAFEMS IBERIA Regional Conference	06.10.	Madrid, EPS	www.nafems.org/nrc22	NAFEMS
NAFEMS EASTERN EUROPE Regional Conference	19.-20.10.	Prague, CZ	www.nafems.org/nrc22	NAFEMS
NAFEMS NORDIC Regional Conference	25.-26.10.	Göteborg, SWE	www.nafems.org/nordic22	NAFEMS

LS-DYNA Forum 11.-13.10.	Bamberg, D	www.dynamore.de	DYNAmore
NAFEMS Kurs: Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear 08.-09.11.	Online	www.nafems.org/fkm-nonlin22-2	NAFEMS
International Symposium Human Modeling in Automotive Engineering 16.-17.11.	Wiesbaden, D	www.carhs.de	Carhs
Simvec 22.-23.11.	Baden-Baden, D	www.vdi-wissensforum.de	VDI
NAFEMS France Regional Conference 23.-24.11.	Paris, F	www.nafems.org/events	NAFEMS
ASAM-Konferenz 29.-30.11.	tbd, D	www.asam.net	ASAM



NAFEMS REGIONAL CONFERENCES 2022

We're getting ready for NRC22
the **NAFEMS Regional Conference program.**

Spanning multiple regions with a series of conferences dedicated to the engineering modelling, analysis and simulation community in your area, the NRC22 program is where NAFEMS comes to you.

Get involved and be a part of it, as we bring the community back together for this series of outstanding user conferences, covering every aspect of simulation.

Calls for presentations, sponsorship opportunities, and early-bird registration are available now.

visit nafems.org/nrc22 today!

Weitere Veranstaltungen: www.nafems.org/events



Technical Communities

NAFEMS Technical Communities have one simple aim – to connect you with others who have the same interest in a particular area of analysis and simulation. Hosted by our Working Groups, each community gives you access to;

- exclusive discussion forums,
- online workshops,
- invitation-only webinars,
- open working group meetings,
- early access to invitations to tender,
- and much, much more.

All you need to take part is an interest in the technology and a desire to learn more.

You can join as many communities as you want - these vibrant forums will allow you to engage as much, or as little, as you like, when you want to.

nafems.org/communities

Community

Home ▸ Community

- Regional Groups
- Technical Groups
- Technical Communities
- Vendor Network
- Academia
- Technical Fellows
- Diversity and Inclusion
- Consultancies & Software
- The Analysis Agenda
- Talking Shop Series
- Get Involved

Your Community

This is your community. Now more than ever, we're working harder to deliver more opportunities for you to stay connected during these challenging times.

Our **webinar programme** has been stepped up, we're introducing new more **interactive online sessions**, and our **working groups** are opening up some of their meetings to the wider community as we come together as one.

You can also continue to submit **articles** for **BENCHMARK Magazine**, as well as taking a look at our invitations to tender for new **books and documents** for the analysis community.

Do you have an idea you want to share? **Leave us some feedback.**



- [Webinars](#)
- [Technical Community Meetings](#)
- [Stay Connected](#)

Eine effiziente numerische Methodik zur Platzierung von Dehnungsmessstreifen in der experimentellen Spannungs- und Lebensdaueranalyse

Carsten Strzalka, Dragan Marinkovic, Manfred Zehn (TU Berlin)

1 Einleitung

Im Produktentwicklungsprozess haben numerische Methoden, wie die Finite-Elemente-Methode (FEM), einen hohen Stellenwert erlangt. Mit ihr können vergleichende Untersuchungen in frühen Entwicklungsstadien durchgeführt und kostenintensive experimentelle Untersuchungen reduziert werden. Bei der Entwicklung moderner technischer Strukturen führen Massenreduzierung und eine hohe Ausnutzung der Tragfähigkeit zu einer höheren Empfindlichkeit gegenüber dynamischer Beanspruchung und Versagen, was die Anforderungen an die Genauigkeit von Simulationsergebnissen und die experimentelle Validierung erhöht [1]. Insbesondere bei dynamisch belasteten Strukturen sind Bereiche, die für detailliertere Analysen und experimentelle Validierung relevant sind, im Voraus oft unbekannt und müssen durch aufwendige numerische Untersuchungen abgeschätzt werden [2]. Um diesen Aufwand zu reduzieren, wird in diesem Beitrag eine effiziente numerische Methodik zur a priori Detektion hochbeanspruchter Strukturbereiche mittels Superposition modaler Spannungsfelder beschrieben. Die Ergebnisse der vorgestellten Methodik dienen zum einen der geeigneten Platzierung von Dehnungsmessstreifen in experimentellen Spannungsanalysen, zum anderen können redundante Messpunkte reduziert und die Kosten für experimentelle Untersuchungen gesenkt werden. Die Anwendung des vorgestellten Ansatzes wird an der experimentellen Lebensdaueranalyse einer Verbundlenker-Hinterachse aus der Automobilindustrie demonstriert und mit numerischen Spannungsanalysen validiert.

2 Modale Superposition

Eine durch die Finite-Elemente-Methode diskretisierte Struktur wird durch ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen beschrieben. Mit der Systemsteifigkeitsmatrix \mathbf{K} und der Systemmassenmatrix \mathbf{M} ergibt sich mit den Vektoren der Knotenbeschleunigungen $\ddot{\mathbf{d}}(t)$, der Knotengeschwindigkeiten $\dot{\mathbf{d}}(t)$ sowie den Knotenverschiebungen $\mathbf{d}(t)$ und dem Vektor der externen Anregungen $\mathbf{F}(t)$ die finite Grundgleichung der Dynamik (1). Zur Berücksichtigung dissipativer Kräfte ist dabei die Annahme geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung für das Gesamtsystem über die Dämpfungsmatrix \mathbf{C} üblich [3].

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{d}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

Um das dynamische Verschiebungsfeld FE-diskretisierter Strukturen zu approximieren, kann das System in den Modalraum transformiert werden. Auf diese Weise wird das Verschiebungsfeld durch die lineare Superposition der Eigenvektoren des Systems und generalisierte Koordinaten $q_j(t)$ beschrieben. Eigenvektoren $\boldsymbol{\varphi}_j$ und Eigenwerte ω_{0j}^2 des ungedämpften Systems ergeben sich dabei aus der Lösung des Eigenwertproblems (2), wobei für schwach gedämpfte Systeme mit den reellen Eigenvektoren des ungedämpften Systems hinreichend genaue Ergebnisse erzielt werden können [4].

$$\left(\mathbf{K} - \omega_{0j}^2 \mathbf{M}\right) \boldsymbol{\varphi}_j = 0 \quad (2)$$

Mit den als Spalten der Modalmatrix \mathbf{X} angeordneten Eigenvektoren wird die Transformation des Systems in den Modalraum durchgeführt (3).

$$\mathbf{d}(t) = \sum_j^r \boldsymbol{\varphi}_j q_j(t) = \mathbf{X}\mathbf{q}(t) \quad (3)$$

Unter der Annahme modaler Dämpfung werden dabei die Bewegungsgleichungen durch die Orthogonalitätseigenschaften der Eigenvektoren entkoppelt [5] und es gilt:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{M} \mathbf{X} = \text{diag}(m_j) \quad \mathbf{X}^T \mathbf{C} \mathbf{X} = \text{diag}(c_j) \quad \mathbf{X}^T \mathbf{K} \mathbf{X} = \text{diag}(k_j) \quad (4)$$

Das entkoppelte System von Bewegungsgleichungen stellt sich mit den generalisierten Massen m_j , den generalisierten Dämpfungskonstanten c_j und den generalisierten Steifigkeiten k_j wie folgt dar:

$$\begin{bmatrix} m_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1(t) \\ \vdots \\ \ddot{q}_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & c_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1(t) \\ \vdots \\ \dot{q}_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ \vdots \\ q_r(t) \end{bmatrix} = \mathbf{X}^T \mathbf{F}(t) \quad (5)$$

2.1 Modale Spannungsfelder

Um den numerischen Aufwand beim Post-Processing resultierender Spannungen in linearen Systemen zu reduzieren, wurden in den vergangenen Jahrzehnten Ansätze zur Überlagerung modaler Beanspruchungsfelder entwickelt [6-12]. Aus den Eigenvektoren des Systems, die modale Verschiebungsfelder darstellen, werden die modalen Dehnungen Ψ_j aus der Ortsableitung mittels Anwendung des Differentialoperators \mathbf{D} auf Element-Ebene berechnet. Es gilt symbolisch:

$$\Psi_j = \mathbf{D}\phi_j \quad (6)$$

Für linear-elastisches Materialverhalten sind die modalen Spannungen über die Hookesche Matrix \mathbf{H} mit den Dehnungen verknüpft. Wie auch die Eigenvektoren, stellen diese modalen Dehnungs- und Spannungsfelder charakteristische dynamische Systemeigenschaften dar. Am einfachen Balkenbeispiel aus Abb. 1 können die modalen Felder anschaulich für die erste Eigenform des Systems als Kontour-Plot dargestellt werden.

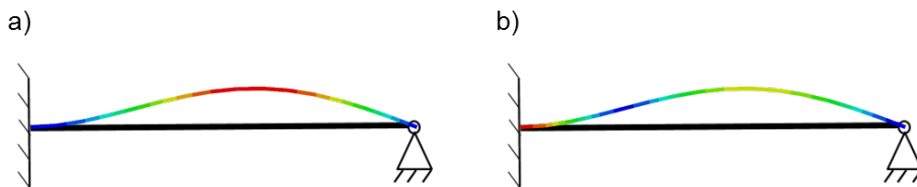


Abb. 1 Modale Felder der ersten Eigenform: a) Verschiebung, b) v. Mises Spannung

Durch lineare Überlagerung der modalen Dehnungsfelder wird die dynamische Dehnungsantwort der Struktur $\epsilon(t)$ und die zugehörige Spannungsantwort $\sigma(t)$ bestimmt [13]:

$$\epsilon(t) = \sum_{j=1}^r q_j(t) \Psi_j \quad \sigma(t) = \sum_{j=1}^r q_j(t) \mathbf{H} \Psi_j \quad (7)$$

2.2 A Priori Superposition

Für eine geeignete Platzierung von Dehnungsmessstreifen in der experimentellen Spannungsanalyse ist die Kenntnis der Lage hochbeanspruchter Strukturbereiche von großem Interesse. Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, diese Bereiche auf Basis der im vorigen Abschnitt dargestellten Theorie im Vorfeld, d. h. a priori zu bestimmen [14]. Aus jeder Zeile von Gl. (5) kann hierzu die Frequenzbereichslösung der generalisierten Koordinaten für eine harmonische Anregung $\mathbf{F}(t) = \hat{\mathbf{F}} e^{i\Omega t}$ herangezogen werden. Mit der modalen Last \hat{f}_j für jede Mode,

$$\hat{f}_j = \phi_j^T \hat{\mathbf{F}} \quad (8)$$

ist die frequenzabhängige Amplitude der generalisierten Koordinaten $\hat{q}_j(\Omega)$ gegeben durch:

$$\hat{q}_j(\Omega) = \frac{1}{(-\Omega^2 + 2\vartheta_j \omega_{0j} i \Omega + \omega_{0j}^2)} \omega_{0j}^2 \frac{\hat{f}_j}{k_j} \quad (9)$$

Aus der Lösung der modal entkoppelten Bewegungsgleichungen kann damit mit dem Frequenzverhältnis η_j und der modalen Dämpfung ϑ_j für jede Mode die stationäre Spannungsantwort geschrieben werden als:

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = \sum_{j=1}^r \mathbf{H}\boldsymbol{\Psi}_j \boldsymbol{\varphi}_j^T \frac{((1 - \eta_j^2) - i2\vartheta_j\eta_j)}{k_j((1 - \eta_j^2)^2 + 4\vartheta_j^2\eta_j^2)} \hat{\mathbf{F}} e^{i\omega t} \quad (10)$$

Die maximalen modalen Anteile können für den Resonanzfall aus der Ableitung der reell-wertigen Vergrößerungsfunktion $V(\eta_j)$ jeder Mode ausgewertet werden.

$$V(\eta_j) = \frac{1}{k_j \sqrt{(1 - \eta_j^2)^2 + 4\vartheta_j^2\eta_j^2}} \quad (11)$$

Für das unterkritisch gedämpfte System gilt für $\vartheta_j \leq \frac{\sqrt{2}}{2}$:

$$\eta_{\text{res},j} = \sqrt{1 - 2\vartheta_j^2} \quad (12)$$

Mit den Maxima der modalen Vergrößerungsfunktionen kann die maximale Antwortamplitude der generalisierten Koordinaten $\hat{q}_{j,\text{max}}$ wie folgt geschrieben werden:

$$\hat{q}_{j,\text{max}} = \frac{\boldsymbol{\varphi}_j^T \hat{\mathbf{F}}}{k_j 2\vartheta_j \sqrt{1 - \vartheta_j^2}} \quad (13)$$

Die maximale Spannungsantwort kann damit aus Gl. (10) approximiert werden:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{max}} = \sum_{j=1}^r \mathbf{H}\boldsymbol{\Psi}_j \frac{\boldsymbol{\varphi}_j^T \hat{\mathbf{F}}}{k_j 2\vartheta_j \sqrt{1 - \vartheta_j^2}} \quad (14)$$

Hieraus ergibt sich ein Wichtungsfaktor Γ_j , durch den die jeweiligen modalen Beiträge zur Gesamtschwingung für eine a priori Überlagerung von modalen Feldern approximiert werden können (15). Die Annahme, dass alle modalen Maxima gleichphasig auftreten, führt zu einer oberen Schranke für die maximale dynamische Beanspruchung der Struktur [15]. Die zeitliche Veränderlichkeit des Lastsignals kann damit vernachlässigt werden, wobei der Lastvektor $\hat{\mathbf{F}}$ auf einen konstanten Vektor der Lastrichtungen \mathbf{f} reduziert wird. Unter der Voraussetzung, dass durch den Frequenzinhalt des Lastsignals alle Eigenformen in Resonanz angeregt werden, ähnelt die Überlagerung aller Amplitudenmaxima den Annahmen der etablierten Antwortspektrenmethode [16].

$$\Gamma_j = \frac{\boldsymbol{\varphi}_j^T \mathbf{f}}{k_j 2\vartheta_j \sqrt{1 - \vartheta_j^2}} \quad ; \quad \boldsymbol{\sigma}_{\text{max}} = \sum_{j=1}^r \mathbf{H}\boldsymbol{\Psi}_j \Gamma_j \quad (15)$$

3 Anwendung

Zur Validierung des entwickelten Ansatzes wird das numerische Modell einer Verbundlenker-Hinterachse untersucht. Das vollständige FE-Modell besteht aus ca. 44 000 linearen Schalenelementen und 5 000 Solids mit insgesamt über 300 000 Freiheitsgraden. Die Rand- und Lastbedingungen sind in Abb. 2 dargestellt. Das System wird über die Überlagerung der ersten 50 Eigenvektoren in einem Frequenzbereich bis ca. 1700 Hz approximiert.

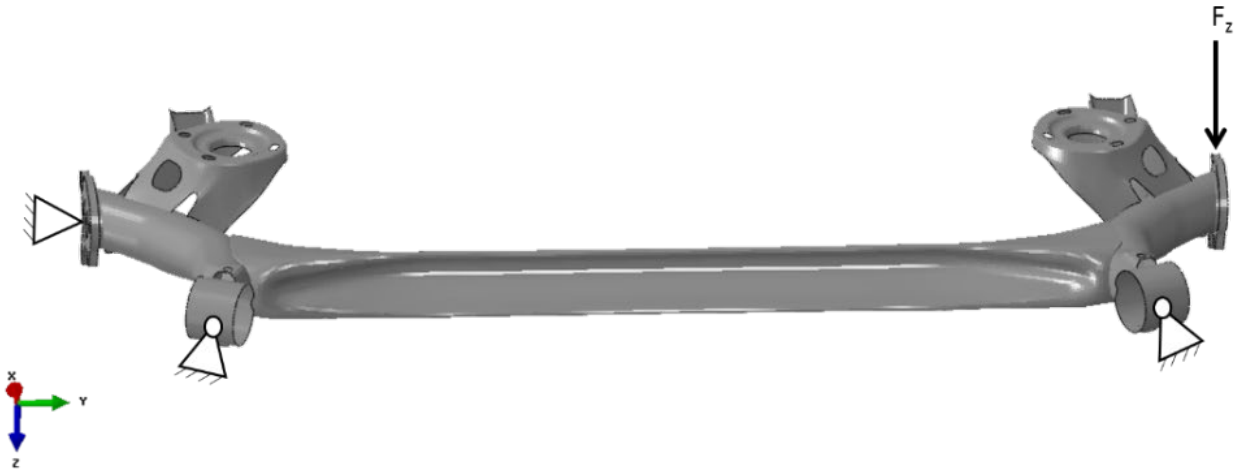


Abb. 2 Rand- und Lastbedingungen der untersuchten Struktur

Während die modalen Lasten allein keine konkreten Rückschlüsse auf dominante Moden und damit zusammenhängende relevante Beanspruchungen zulassen, zeigt der entwickelte Wichtungsfaktor eine klare Dominanz der ersten Eigenform und des daraus resultierenden modalen Spannungsfeldes (siehe Abb. 3).

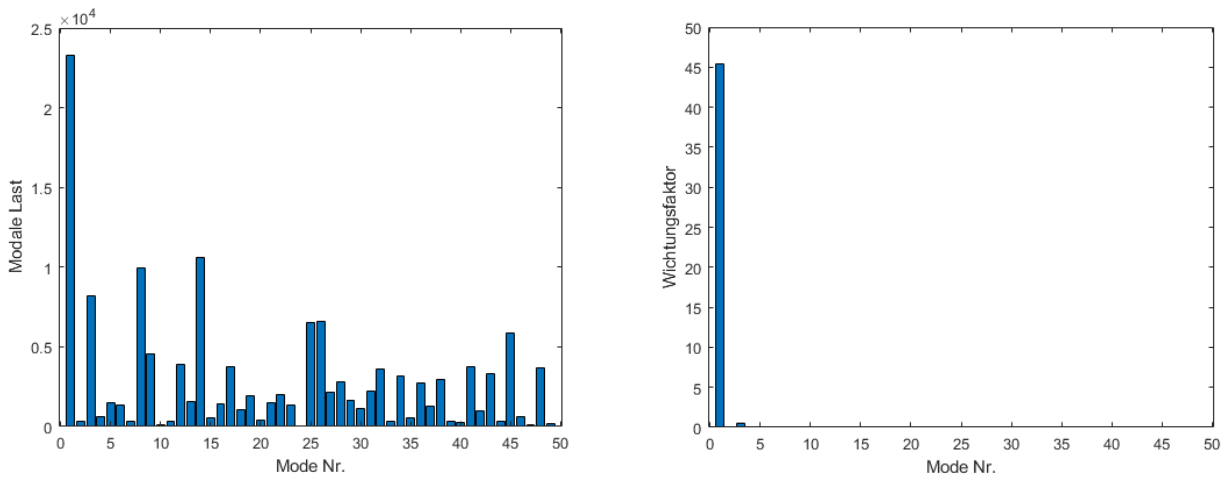


Abb. 3 Links: Modale Lasten, rechts: entwickelter Wichtungsfaktor I_j

Aus den Ergebnissen der beschriebenen Methodik können potenziell hochbeanspruchte Bereiche mit geringem Rechenaufwand für ein Set von gegebenen Rand- und Lastbedingungen detektiert werden. Für die modale Superposition wird im gezeigten Anwendungsfall das modale von Mises-Spannungsfeld berücksichtigt (siehe Abb. 4).

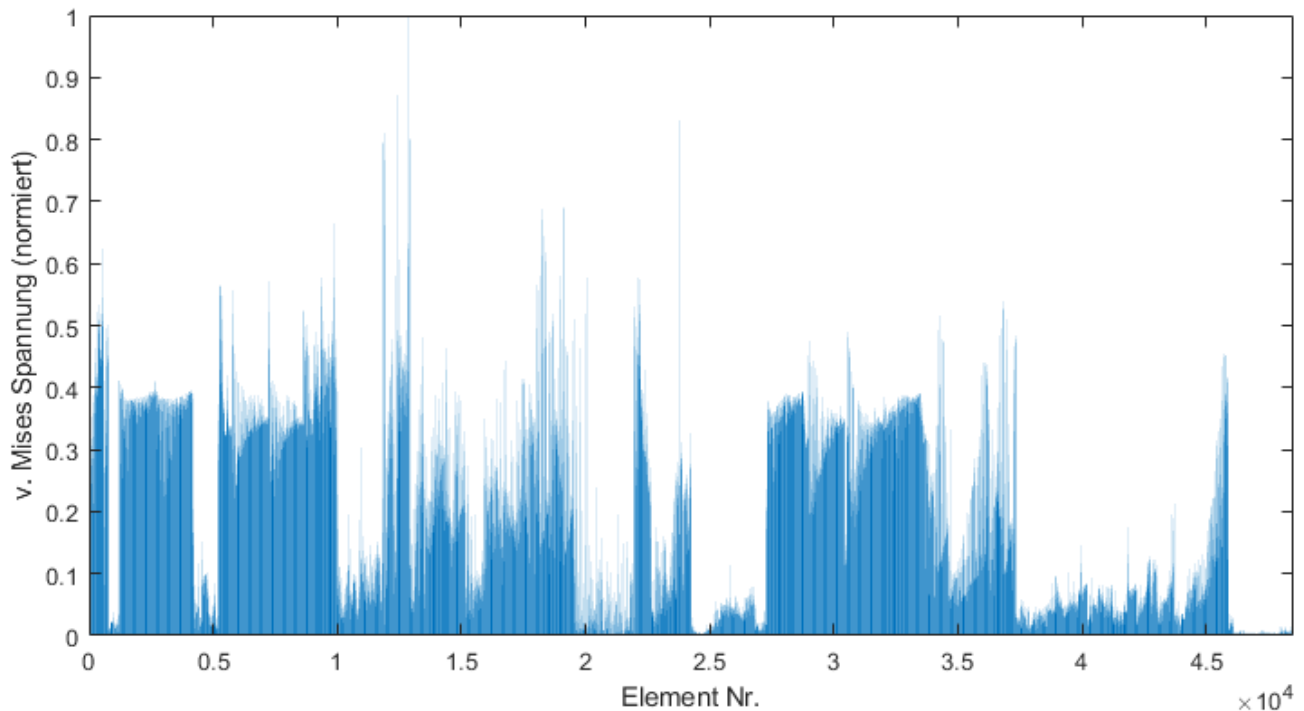


Abb. 4 Überlagerte Elementspannungen, normierte Darstellung

Für die Filterung hochbeanspruchter Strukturbereiche kann dieses überlagerte Spannungsfeld auf Element-Ebene ausgewertet werden. In der normierten Darstellung der Elementspannungen werden dazu beispielsweise über einen Grenzwert von 50 % der maximal auftretenden Spannung die hochbeanspruchten Elemente gefiltert und als Element-Set auf der Struktur hervorgehoben (siehe Abb. 5).

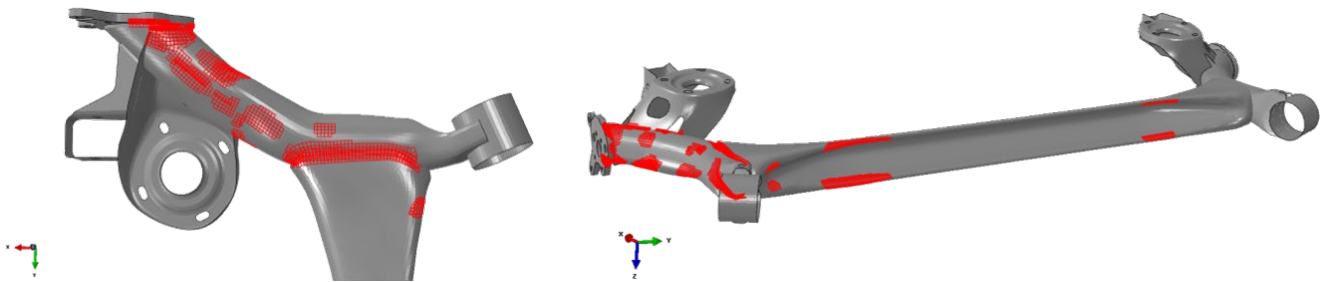


Abb. 5 Detektierte hochbeanspruchte Strukturbereiche

3.1 Experimentelle Spannungsanalyse

Basierend auf den numerischen Ergebnissen aus dem vorigen Abschnitt werden Dehnmessstreifen für die experimentelle Spannungsanalyse angebracht. Die numerische Vorhersage ergibt dabei fünf potenziell hochbeanspruchte Strukturregionen, zwei im Bereich des Torsionsrohres (Pos. 1 und Pos. 2) sowie weitere zwei auf dem Längslenker (Pos. 3 und Pos. 4) und eine am Übergang zur Achszapfenaufnahme (Pos. 5). Als weitere Information kann aus der numerischen Methodik eine für diesen Lastfall auftretende Symmetrie der Beanspruchung festgestellt werden, und damit lassen sich weitere Messpunkte reduzieren. Die resultierenden Dehnungen werden folglich an fünf Messpunkten aufgenommen, wobei zur Ermittlung der Hauptdehnungen über Messrossetten in jeweils drei Richtungen unter einem Winkel von jeweils 60° zueinander gemessen wird, wie in Abb. 6 dargestellt.



Abb. 6 Messpunkte der Dehnungsmessung

Die Belastung der Struktur erfolgt über den in Abb. 7 gezeigten Versuchsaufbau auf der Hydropulsanlage des Fachgebiets für Strukturmechanik und Strukturberechnung am Institut für Mechanik der TU Berlin. Der eingesetzte weggesteuerte Hydropulszylinder der Firma Schenck hat eine maximale Nennlast von 20kN, der Hub des Zylinders beträgt im durchgeführten Versuch 25 mm. Die Last wird einseitig in eine Achszapfenaufnahme der Verbundlenkerachse eingeleitet, während die gegenüberliegende Achszapfenaufnahme über eine starre Konstruktion fixiert ist. Die Lasteinleitung erfolgt dabei über zwei Kreuzgelenke, um die Zwangskräfte und damit verbundene Querkräfte auf den Hydropulszylinder gering zu halten. Der Achskörper ist über die herstellerseitig vorgesehenen Gummi-Metall-Hinterachsager mit der Umgebung gekoppelt, um eine realitätsnahe Beanspruchung zu gewährleisten.

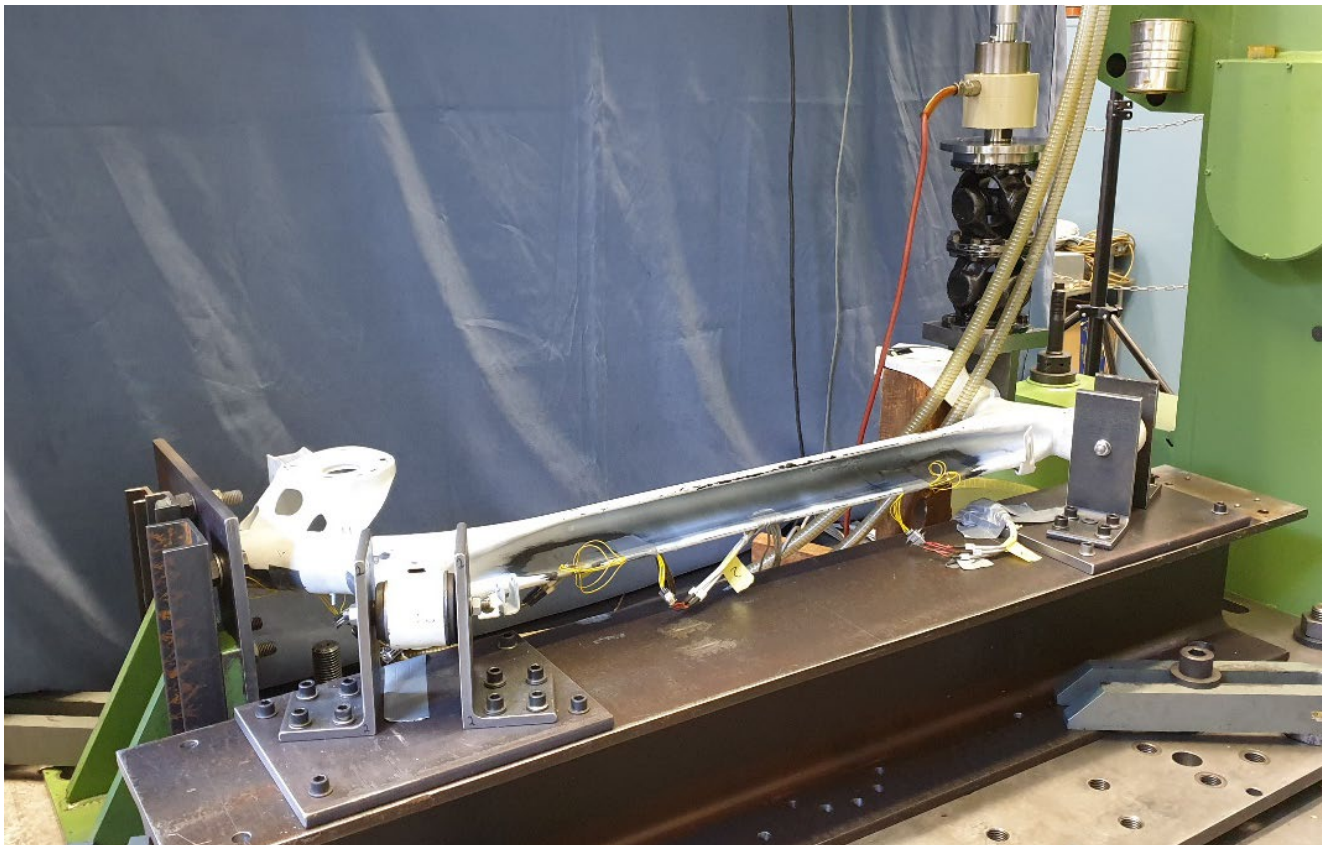


Abb. 7 Versuchsaufbau

Zur Validierung der numerischen Vorhersage werden aus den experimentell ermittelten Dehnungswerten der drei Messrichtungen α , β und γ die Hauptdehnungen für den ebenen Spannungszustand nach Gl. (16) bestimmt und den numerischen Ergebnissen gegenübergestellt (in Abb. 8 exemplarisch für Messposition 1 und 5 dargestellt).

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\gamma}{3} \pm \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\beta)^2 + (\varepsilon_\beta - \varepsilon_\gamma)^2 + (\varepsilon_\alpha - \varepsilon_\gamma)^2} \quad (16)$$

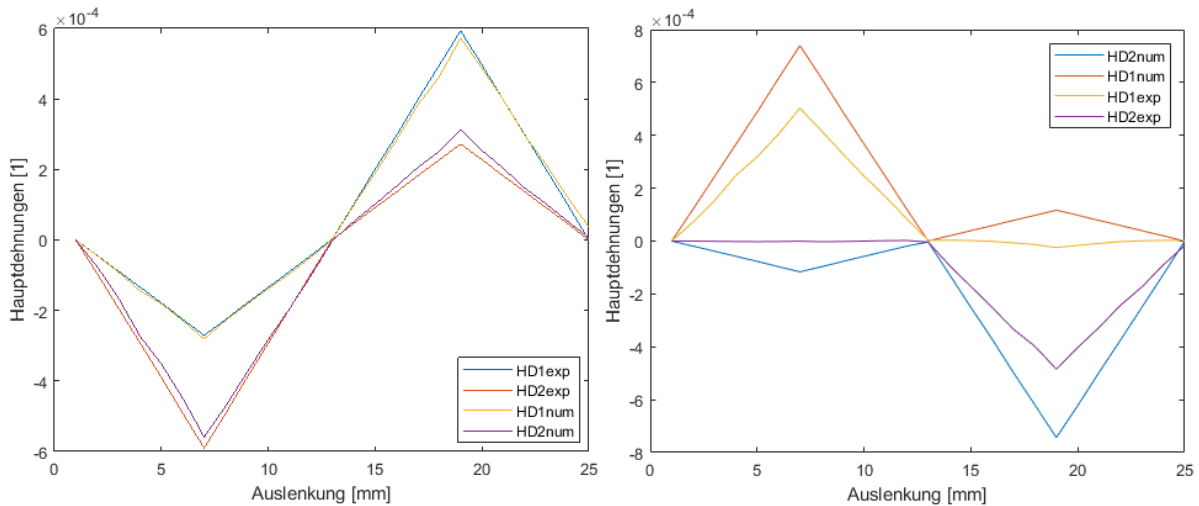


Abb. 8 Gegenüberstellung der Hauptdehnungen links: Messposition 1, rechts: Messposition 5

Für einen einfachen Vergleich der Beanspruchungen aller Messpunkte wird im Folgenden die von Mises Vergleichsspannung aus den gemessenen Hauptspannungen gebildet und lediglich die auftretenden Maxima herangezogen. Das Beanspruchungsbild der numerischen Simulation ist in Abb. 9 dargestellt.

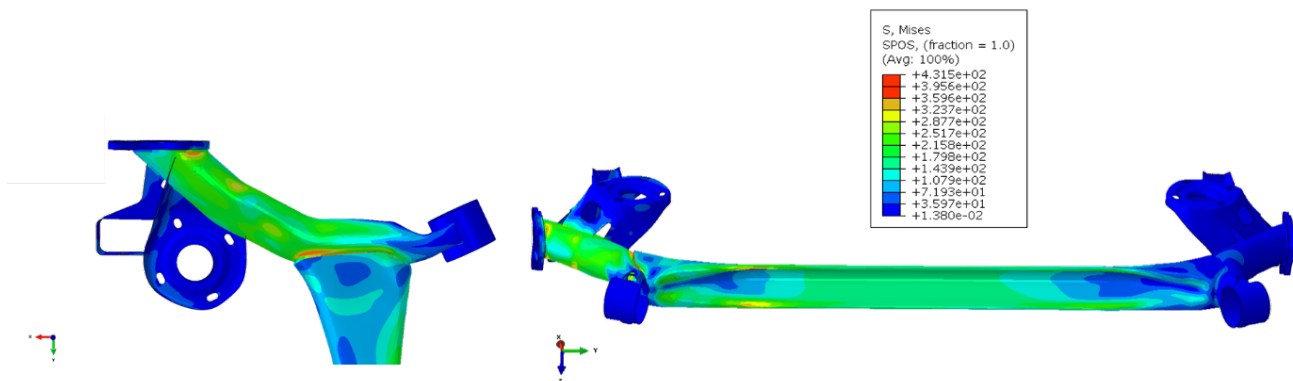


Abb. 9 Numerische Spannungsanalyse: Maximale von Mises Spannungen

Wie in Abb. 10 dargestellt, zeigen die Ergebnisse an den Positionen 1 und 2 eine gute Korrelation zwischen numerischer Simulation und Messung, während an den Positionen 3-5 Spannungssingularitäten aus der numerischen Modellierung der Schweißnahtbereiche sowie Steifigkeitsunterschiede der fest eingespannten Randbedingungen zu Abweichungen zu den experimentellen Ergebnissen führen.

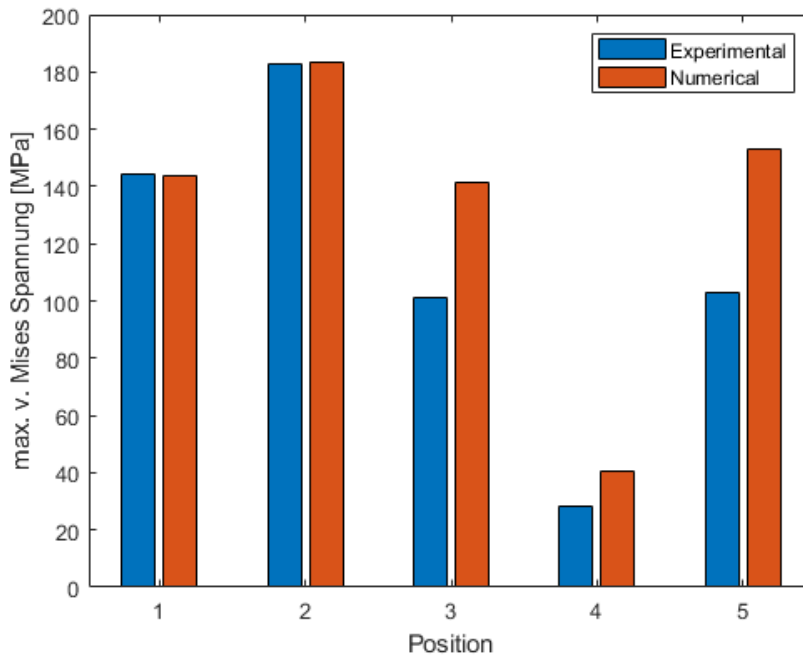


Abb. 10 Korrelation der maximalen v. Mises Spannung aller Messpositionen

3.2 Experimentelle Lebensdaueranalyse

Zur Untersuchung der ertragbaren Lastzyklen wird die Struktur mit der im vorigen Abschnitt gegebenen Amplitude zyklisch bis zum Versagen belastet. Die Lastfrequenz der sinusförmig aufgetragenen Amplitude beträgt $f = 2$ Hz. Die Rissbildung tritt dabei im Bereich der festen Einspannung an der Schweißnaht zwischen Längslenker und Achszapfenaufnahme auf. Abbildung 11 zeigt den bei Versuchsende nach ca. 280 000 Zyklen angewachsenen Riss.

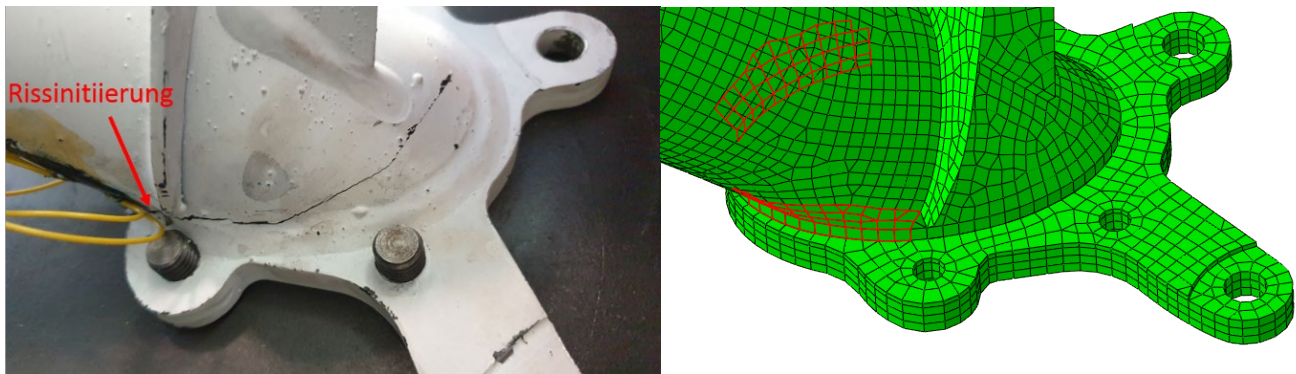


Abb. 11 Rissinitiierung; Links: Schadensbild bei Versuchsende, Rechts: Numerische Vorhersage

Die Betrachtung der durch die beschriebene Methodik im Vorfeld detektierten hochbeanspruchten Bereiche zeigt dabei, dass sich ebenfalls mit hinreichender Genauigkeit die Position potenzieller Rissinitiierung bestimmen lässt (siehe Abb.11).

4 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der a priori Detektion hochbeanspruchter Strukturbereiche über einen Superpositionsansatz modaler Beanspruchungsfelder. Zur Bestimmung der maximalen Beiträge dominanter Moden wurde aus der Frequenzbereichslösung der entkoppelten Bewegungsgleichungen ein analytisch konsistenter Wichtungsfaktor für eine a priori Überlagerung entwickelt. Zur Validierung wurde das industrielle Modell einer Verbundlenker-Hinterachse untersucht, um geeignete Bereiche für die Platzierung von Dehnungsmessstreifen in einer experimentellen Spannungsanalyse zu bestimmen. Bei der Überlagerung modaler von Mises-Spannungsfelder zeigt der Vergleich von beschriebener Methodik und experimentellen Untersuchungen eine gute Korrelation. Die so approximierten Spannungsfelder liefern mit geringem Rechenaufwand wertvolle Informationen über hochbeanspruchte Strukturbereiche zur optimalen Platzierung von Dehnungsmessstreifen. Mit der beschriebenen Methodik können somit kostenintensive dynamische Berechnungen reduziert werden. Ferner können auch Positionen potenzieller Rissinitiierung detektiert werden, was die Ergebnisse der durchgeführten experimentellen Lebensdaueranalyse bestätigen.

5 Literatur

- [1] B.R. Miao, Y.X. Luo, Q.M. Peng, Y.Z. Qiu, H. Chen, Z.K. Yang, Multidisciplinary design optimization of lightweight carbody for fatigue assessment, *Materials & Design*, 194, 2020, 108910.
- [2] Paz, Mario. *Structural dynamics: theory and computation*, Springer Science & Business Media, 2012
- [3] Craig, R., Kurdila, A., *Fundamentals of Structural Dynamics*. 2nd edn., John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.
- [4] Marinković, D., Zehn, M., Consideration of stress stiffening and material reorientation in modal space based finite element solutions, *Physical Mesomechanics*, 21(4), 2018, 341-350.
- [5] Mršnik, M., Slavič, J., Boltežar, M., Vibration fatigue using modal decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 98, 2018, 548-556.
- [6] Huang, L., Agrawal, H., Kurudiyara, P., *Dynamic Durability Analysis of Automotive Structures*. SAE transactions, 1998, 474-480.
- [7] Braccesi, C., Cianetti, F., Tomassini, L., An innovative modal approach for frequency domain stress recovery and fatigue damage evaluation, *International Journal of Fatigue*, 91, 2016, 382-396.
- [8] Lu, Y., Xiang, P., Dong, P., Zhang, X., Zeng, J., Analysis of the effects of vibration modes on fatigue damage in high-speed train bogie frames, *Engineering Failure Analysis*, 89, 2018, 222-241.
- [9] Albuquerque, C., Silva, A. L., de Jesus, A. M., Calçada, R., An efficient methodology for fatigue damage assessment of bridge details using modal superposition of stress intensity factors, *International Journal of Fatigue*, 81, 2015, 61-77.
- [10] Gu, Z., Mi, C., Wang, Y., Jiang, J., A-type frame fatigue life estimation of a mining dump truck based on modal stress recovery method, *Engineering Failure Analysis*, 26, 2012, 89-99.
- [11] Horas, C. S., Correia, J. A. F. O., De Jesus, A. M. P., Calçada, R., Aenlle, M. L., Kripakaran, P., Fernandez-Canteli, A., Application of modal superposition technique in the fatigue analysis using local approaches, *Procedia Engineering*, 160, 2016, 45-5.
- [12] Tran, V. X., Geniaut, S., Galenne, E., Nistor, I., A modal analysis for computation of stress intensity factors under dynamic loading conditions at low frequency using extended finite element method, *Engineering Fracture Mechanics*, 98, 2013, 122-136.
- [13] Yam, L. Y., Leung, T. P., Li, D. B., Xue, K. Z., Theoretical and experimental study of modal strain analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 191(2), 1996, 251-260.
- [14] Strzalka, C., Zehn, M., The influence of loading position in a priori high stress detection using mode superposition. *Reports in Mechanical Engineering*, 1(1), 2020, 93-102.
- [15] Strzalka, C., Marinkovic, D., Zehn, M. Stress Mode Superposition for a Priori Detection of Highly Stressed Areas: Mode Normalisation and Loading Influence. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2021; 7(3): 1698-1709.
- [16] Clough, R.W., Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1975.

Materialkarten für FVK-Werkstoffe auf Basis von realen und virtuellen Messungen

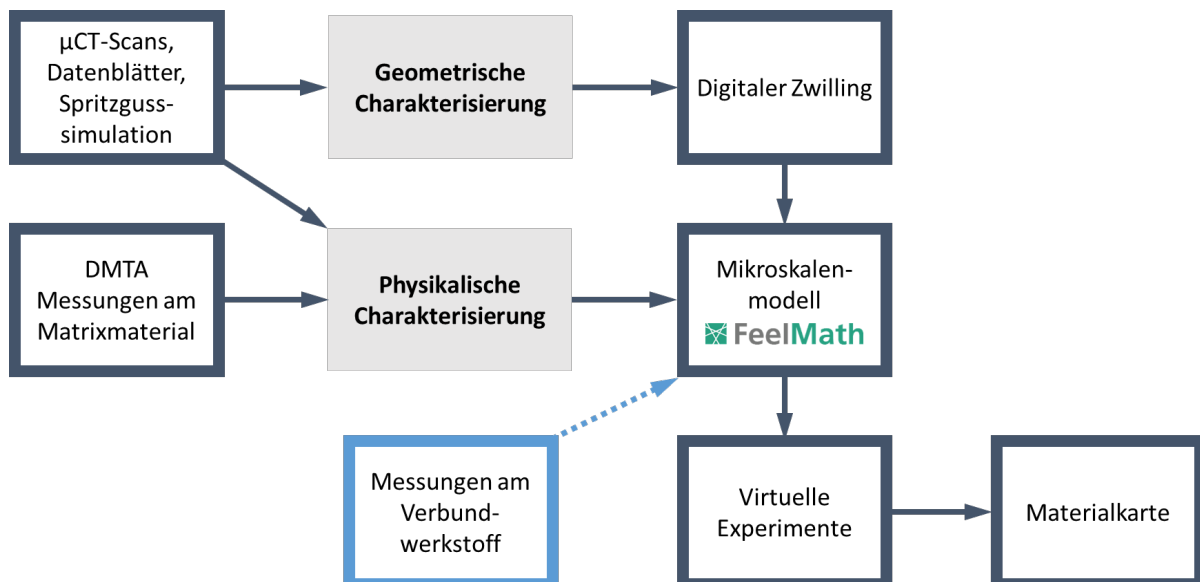
Hannes Grimm-Strele, Matthias Kabel, Heiko Andrä (Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern)

Timo Schweiger, Jörg Lienhard (Fraunhofer IWM, Freiburg)

1 Einleitung

In dieser Arbeit wird eine Methode zur Kalibrierung einer Standard-LS-DYNA-Materialkarte für ein langfaserverstärktes thermoplastisches Material anhand von virtuellen Messungen vorgestellt. Diese Messungen werden durch ein Mikroskalenmodell gewonnen, das mit einfachen Messungen am Matrixmaterial kalibriert und durch wenige Messungen am Verbundwerkstoff validiert wird. Die resultierende Materialkarte kann das Materialverhalten des Verbundwerkstoffes sowohl für Zug- als auch für Scherbelastungen sowie für einen Durchstoßversuch mit guter Genauigkeit vorhersagen.

Abb. 1: schematische Darstellung des Vorgehens zur Erstellung einer Materialkarte.



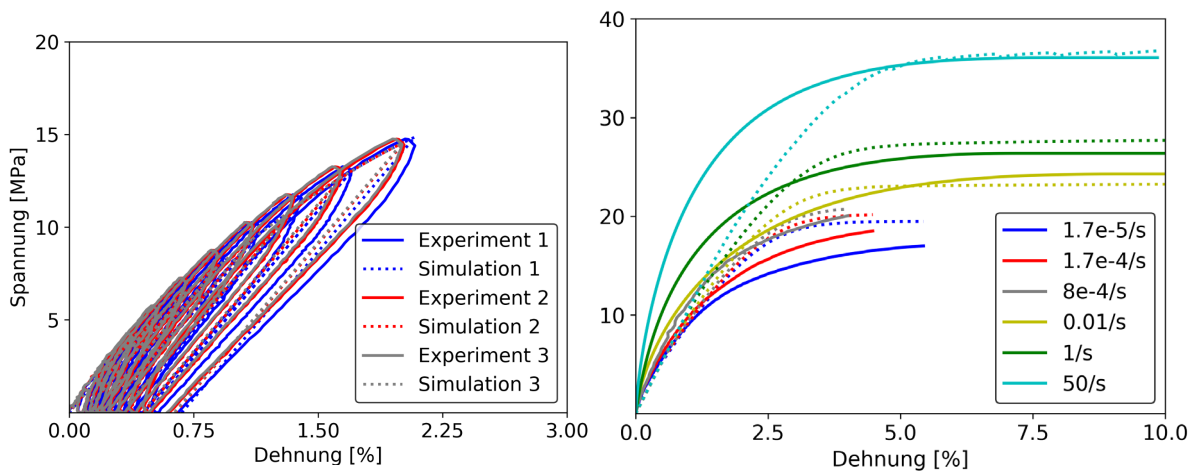
2 Mikroskalenmodell

2.1 Modellkalibrierung

Im Mikroskalenmodell liegen Fasern und Matrixmaterial geometrisch aufgelöst vor, und für jedes Material kann ein eigenes Materialmodell vorgeschrieben werden. Wie in [1, 2, 5] beschrieben, kann ein isotropes Materialmodell für das Matrixmaterial anhand einfacher Experimente kalibriert werden. In dieser Arbeit sollen Viskoplastizität und Schädigung berücksichtigt werden. Für die Fasern wird linear-elastisches Verhalten angenommen.

Das Materialmodell für die Matrix wird in zwei Schritten kalibriert. Zunächst werden Belastungs-Entlastungstests bei konstanter Dehnrates durchgeführt. Damit werden Parameter für Plastizität und Schädigung kalibriert [2]. Ein dehnratenabhängiger Term kann anschließend mittels Zugversuchen über einem möglichst weiten Dehnratenbereich kalibriert werden [1, 5].

Abb. 2: Kalibrierung des Materialmodells für das Matrixmaterial. Links: Parameter für Plastizität und Schädigung werden anhand von Belastungs-Entlastungs-Tests bestimmt. Rechts: Kalibrierung der Dehnratenabhängigkeit anhand von Zugversuchen. Durchgezogen: Messungen, gepunktet: Simulationen.

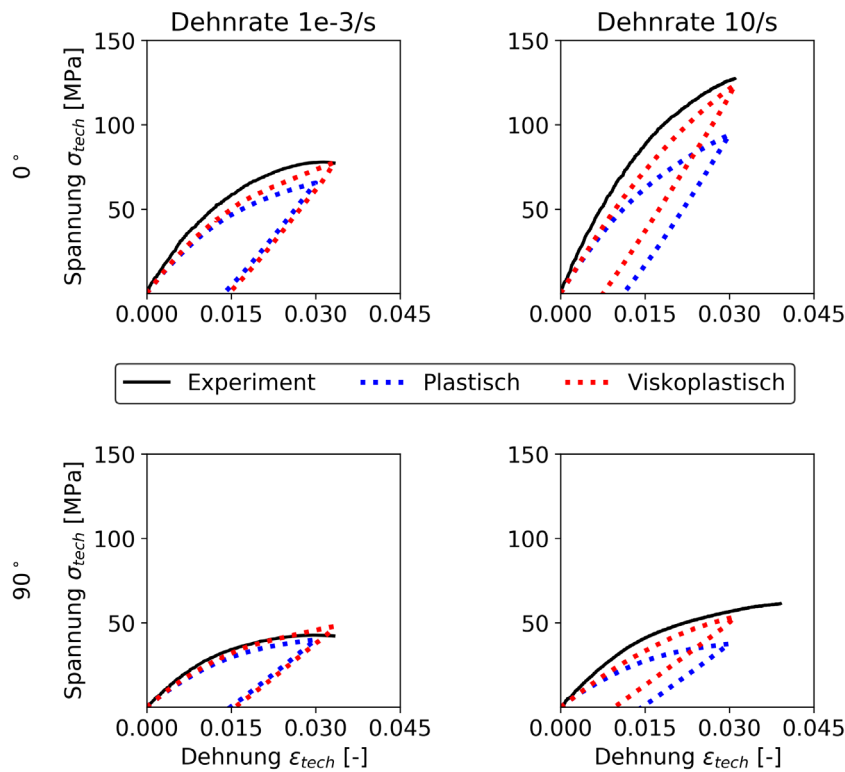


Anhand des Datenblatts des Verbundwerkstoffs, μ CT-Scans und einer Veraschung wird die Geometrie des Verbundwerkstoffs charakterisiert. Der Faservolumengehalt wird auf 13 % festgelegt. Aus der Veraschung des Verbundwerkstoffs geht hervor, dass der Faserdurchmesser 20 μ m und die (volumengemittelte) Faserlänge 2,7 mm beträgt.

Mit dem Algorithmus von [9] können Volumenelemente mit beliebigen Faserorientierungstensenoren erzeugt werden. Zur Validierung des Materialmodells des Verbundwerkstoffs wird ein digitaler Zwilling des Verbundwerkstoffs mit der aus den μ CT-Scans ermittelten Faserorientierung erzeugt. Die Struktur wird mit Voxeln der Seitenlänge 1,25 μ m diskretisiert und eine Domänengröße von 5,4 mm x 5,4 mm x 2,7 mm gewählt. Anschließend wird das Mikroskalenmodell durch Zugversuche am Verbundwerkstoff validiert. Wie in Abbildung 3 dargestellt, stimmen die richtungsabhängigen Dehnungs-Spannungs-Kurven aus den Simulationen mit dem viskoplastischen Materialmodell für die Matrix (rot) gut mit den Messungen (schwarz) überein. Mit einem zeitunabhängigen plastischen Modell (blaue Kurven) können nur Messungen mit niedriger Dehnrade reproduziert werden. Auch bei gleicher (globaler) Dehnrade ergeben sich Unterschiede zwischen dem plastischen und dem viskoplastischen Modell, da das viskoplastische Modell von der lokalen Dehnrade in jedem Element abhängt. Die Simulation wird dabei mit dem am ITWM entwickelten Löser FeelMath [4, 6, 7], integriert als ElastoDict-Modul in die GeoDict-Software [8], durchgeführt. Es wurde überprüft, dass die Schwankungen in der mechanischen Antwort abhängig von der Realisierung des Volumenelements gering sind, d.h. die Größe des Volumenelements ist ausreichend.

Werden die Simulationen statt auf dem digitalen Zwilling direkt auf der Geometrie der μ CT-Scans durchgeführt, werden die Spannungen überschätzt. Aufgrund der unzureichenden Auflösung werden einige Fasern im Scan fälschlicherweise als verbunden erkannt, was zu einer Überschätzung der Steifigkeit des Verbundwerkstoffs führt. Im digitalen Zwilling berühren sich keine Fasern, so dass die berechnete Steifigkeit mit den Messungen gut übereinstimmt.

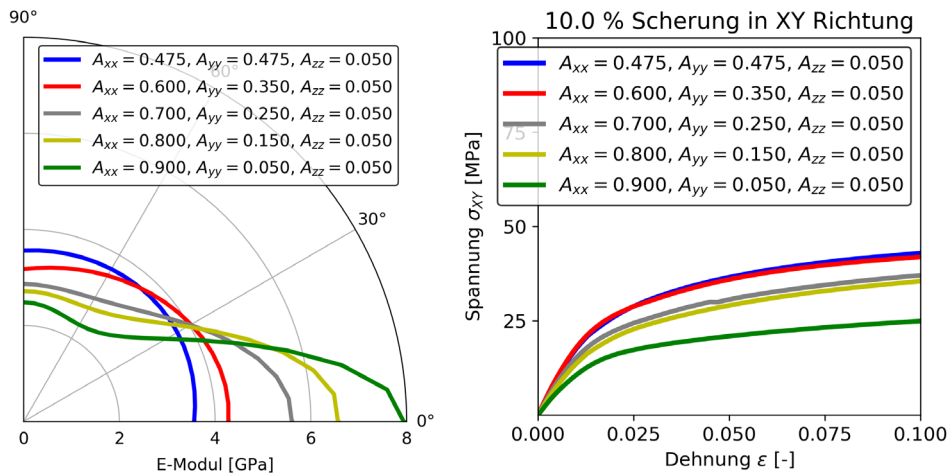
Abb. 3: Validierung des Mikroskalenmodells anhand von Zugversuchen am Verbundwerkstoff.



2.2 Virtuelle Messungen

Sobald das Mikroskalenmodell kalibriert ist, kann es verwendet werden, um „virtuelle Experimente“ mit dem Verbundwerkstoff durchzuführen. Es werden fünf Volumenelemente erzeugt, in denen die Faserorientierung von nahezu unidirektional bis zu planar-isotrop variiert [9]. Die Faserorientierungen der Volumenelemente sind in der Legende von Abbildung 4 aufgeführt. Mit diesen Faserorientierungen wird der typische Bereich der im Bauteil vorkommenden Faserorientierungen abgedeckt, aber jede andere Orientierung könnte ebenso berücksichtigt werden. Im Prinzip kann fast jeder Lastpfad virtuell berechnet werden. In dieser Arbeit wurden Zug- und Scherversuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 links für die winkelabhängige Steifigkeit und rechts für die Scherversuche dargestellt. Es ist offensichtlich, dass die Faserorientierung einen starken Einfluss auf das Materialverhalten hat. Während eine planar-isotrope Faserorientierung zu einer planar-isotropen Materialantwort führt, ist die Steifigkeit des Modells mit der nahezu unidirektionalen Orientierung ($A_{xx} = 0,9$, $A_{yy} = 0,05$) in x-Richtung etwa viermal höher als in y-Richtung.

Abb. 4: Winkelabhängige Steifigkeit und Spannungs-Dehnungskurven für eine Scherbelastung für die fünf Volumenelemente.



In den Zugversuchen wurden neben der Abhängigkeit von der Faserorientierung auch der Einfluss der Dehnrates untersucht. In Abbildung 5 werden die Spannungs-Dehnungskurven für einen Zugversuch in 0° Richtung (x-Richtung) dargestellt, in Abbildung 6 für einen Zugversuch in 90° Richtung (y-Richtung), jeweils für die drei Dehnraten 0,001/s, 10/s und 200/s.

Abb. 5: Dehnratenabhängige Spannungs-Dehnungskurven für Zugbelastungen in 0° Richtung.

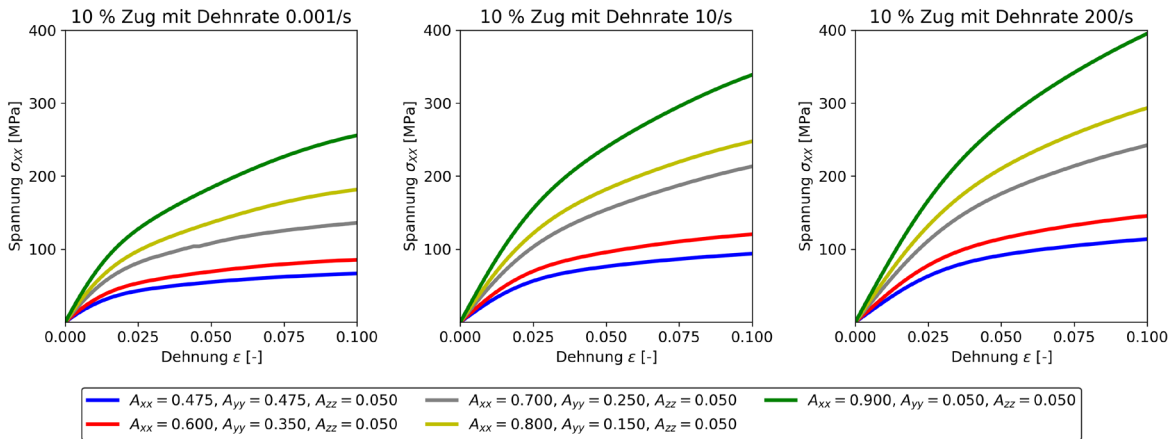
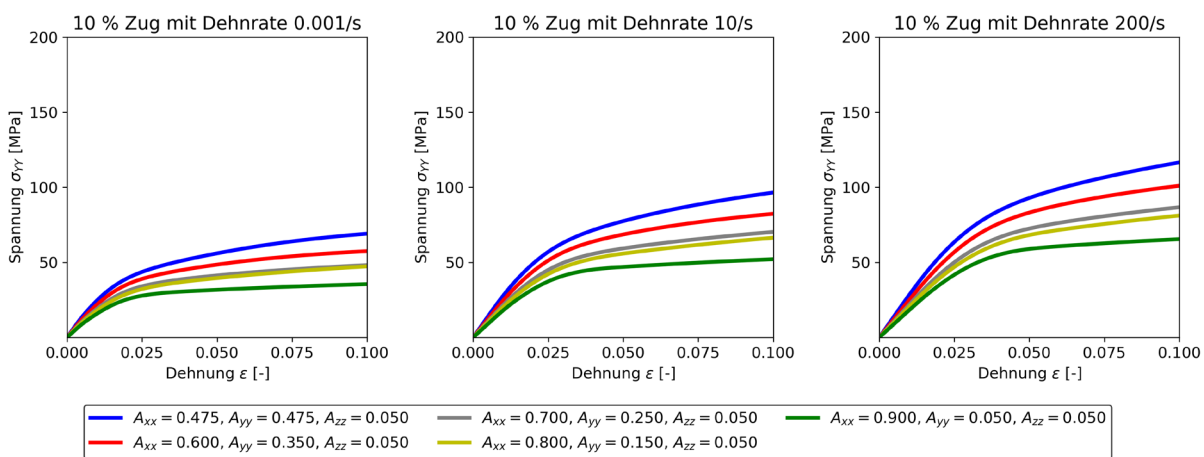


Abbildung 6: Dehnratenabhängige Spannungs-Dehnungskurven für Zugbelastungen in 90° Richtung.



Die in den virtuellen Messungen erzeugten Daten können nun, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, zur Kalibrierung einer makroskopischen Materialkarte verwendet werden.

3 Kalibrierung der Materialkarte auf Basis der virtuellen Versuche

Für die makroskopische Modellierung von faserverstärktem Kunststoff soll ein Materialmodell kalibriert werden, das in der kommerziellen FEM-Software LS DYNA als Standardmodell implementiert ist. Das Faser-Matrix-Gemisch wird hierbei als Kontinuum beschrieben, wodurch die notwendige numerische Effizienz gewährleistet wird. Das Materialmodell ***MAT_ANISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC** oder ***MAT_157** ist darauf ausgelegt, in möglichst einfacher Weise elastisch und plastisch anisotropes Materialverhalten abbilden zu können und ist dadurch besonders geeignet für die Anforderungen. Die Elastizität wird als linear angenommen, und der volle anisotrope Elastizitätstensor mit 21 freien Parametern kann spezifiziert werden. Zunächst werden drei senkrechte Richtungen mit unterschiedlichen Elastizitätskoeffizienten betrachtet, mit

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{31}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix}$$

und neun zu bestimmenden unabhängigen Elastizitätskoeffizienten. Da die Elastizität in Dickenrichtung im Crashfall nur sehr geringen Einfluss hat, nehmen wir weiter an, dass die zweite und dritte Richtung die gleiche Steifigkeit besitzen. Es ergibt sich transversalisotrope Elastizität mit

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\mu_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix}$$

und fünf unabhängigen Elastizitätskoeffizienten ($E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}$ und μ_{12}). Die Plastizität wird mit einer anisotropen Fließfläche nach Hill modelliert. Hierbei können Fließspannungen in drei Zug- und drei Scherrichtungen definiert werden. Demselben Argument wie oben folgend, beschränken wir uns auf transversalisotrope Plastizität und verwenden die Vergleichsspannung

$$\sigma_{Hill} = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G((\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2) + 2L\sigma_{23}^2 + 2M(\sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2)}.$$

Aus den vier freien Parametern lassen sich die Fließspannungen $\sigma_{11}^y, \sigma_{22}^y, \sigma_{12}^y$ und σ_{23}^y berechnen mit

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^y &= \frac{1}{\sqrt{2G}} \\ \sigma_{22}^y &= \frac{1}{\sqrt{F+G}} \\ \sigma_{12}^y &= \frac{1}{\sqrt{M}} \text{ und} \\ \sigma_{23}^y &= \frac{1}{\sqrt{L}}. \end{aligned}$$

Die Fließkurve kann in *MAT_157 allgemein definiert werden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird hier die vordefinierte Funktion

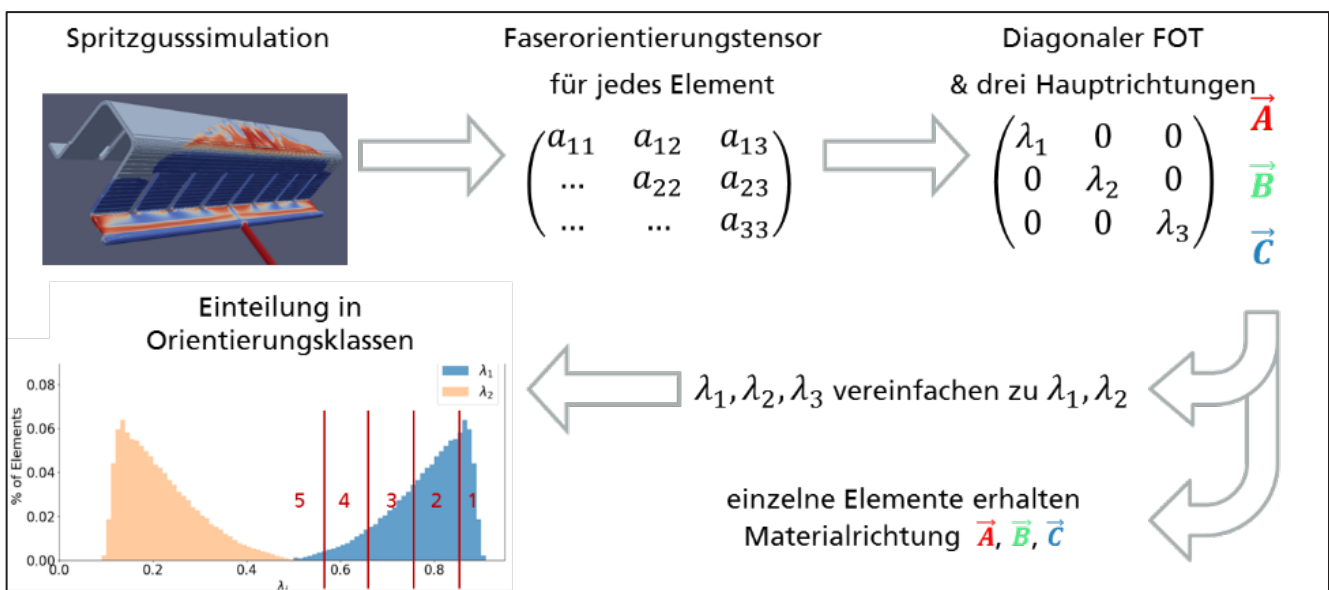
$$\sigma = \sigma_0 + Q_{r1}[1 - e^{-C_{r1}\varepsilon_{pl}}] + Q_{r2}[1 - e^{-C_{r2}\varepsilon_{pl}}]$$

genutzt mit den Verfestigungsparametern Q_{r1}, Q_{r2}, C_{r1} und C_{r2} . Die Anfangsfließspannung σ_0 entspricht dabei dem Fließbeginn, der über den Spannungszustand und σ_{Hill} berechnet wird. Die Fließfunktion selbst ist also nicht anisotrop, sondern nur der Fließbeginn.

Es ist schon vielfach beschrieben worden, dass die Faserorientierung bei spritzgegossenen Bauteilen mit faserverstärkten Kunststoffen über die Dicke variiert. Auch ist die Geometrie des Bauteils für den Fluss des Materials und folglich für die Faserorientierung entscheidend. Die Faserorientierung beeinflusst wiederum das Materialverhalten maßgeblich. Angenommen die Fasern sind in einem Punkt des Bauteils alle parallel ausgerichtet. Dann ergibt sich an diesem Punkt eine maximale Anisotropie. Sind die Fasern aber isotrop orientiert, so muss auch das makroskopische Materialverhalten isotrop sein. Diesen Übergang und die Abhängigkeit des Materialverhaltens von der lokalen Faserorientierung (Struktur-Eigenschafts-Beziehung) muss ein genaues Materialmodell abbilden können.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die lokale Faserorientierung z.B. durch eine Spritzgusssimulation vorliegt und jedem Element im Bauteil ein Faserorientierungstensor (FOT) zugeordnet ist. Das Materialmodell *MAT_157 kann jedoch keine lokalen Informationen verarbeiten. Wenn man von den Vorteilen und der Effizienz des Materialmodells profitieren will, muss eine Methode definiert werden, um die lokale Information indirekt zu nutzen. Diese Methode wird im Folgenden vorgestellt. Abbildung 7 zeigt eine Übersicht der Vorgehensweise.

Abb. 7: Schematische Darstellung zur Miteinbeziehung der Faserorientierungsverteilung im Bauteil in einem implementierten Materialmodell ohne lokale Abhängigkeiten, wie *MAT_157.



In einem ersten Schritt wird der FOT diagonalisiert. Wir erhalten die drei Eigenwerte λ_1, λ_2 und λ_3 der Größe nach geordnet ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$) und normiert ($\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$). Ihnen zugeordnet sind drei Hauptrichtungen $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$. Als zweites werden die Hauptrichtungen den einzelnen Elementen als lokales Koordinatensystem bzw. als Materialrichtung zugewiesen mit dem Keyword *ELEMENT_SOLID_ORTHO. Nimmt man die Spritzgusssimulation eines typischen Bauteils (z.B. des in Abbildung 7 dargestellten U-Profiles) und betrachtet man die Größe der Eigenwerte als Häufigkeitsverteilung in Abbildung 8, fällt auf, dass λ_3 in fast jedem Element kleiner als 0,1 ist. Eine Vereinfachung der Situation auf $\lambda_3 \rightarrow 0$ ist naheliegend, und deren Sinnhaftigkeit konnte durch RVE-Simulationen validiert werden. Dabei wurde gezeigt, dass die dritte Hauptrichtung nur eine gleichmäßige Verschiebung der Materialeigenschaften zur Folge hat, welche automatisch durch eine Skalierung der Materialparameter ausgeglichen wird. Durch die Vereinfachung auf nur zwei Eigenwerte müssen diese normiert werden mit

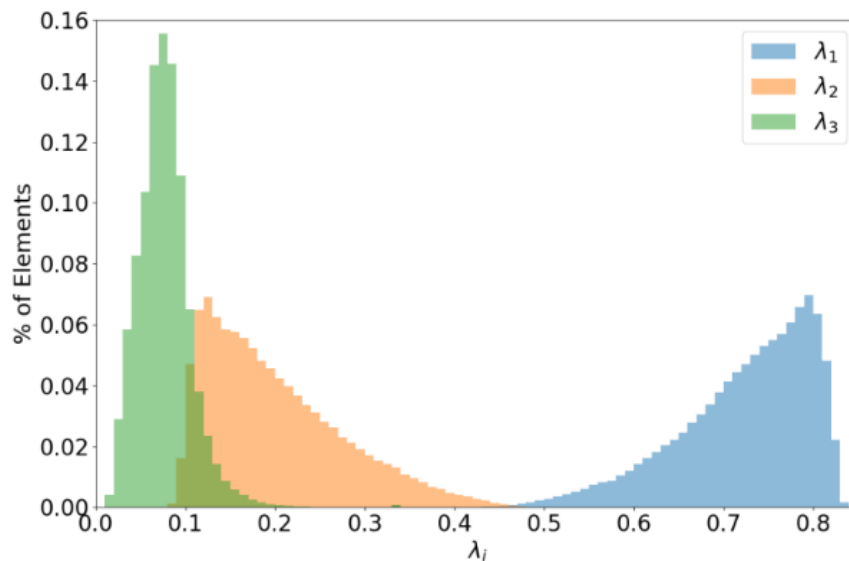
$$\lambda_1 \rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \text{ und}$$

$$\lambda_2 \rightarrow \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \text{ sodass}$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1$$

gilt. Dadurch kann die Faserverteilung nur anhand des Parameters λ_1 eindeutig beschrieben werden. λ_1 hat nun die Bedeutung eines Orientierungsgrades. Wenn $\lambda_1 = 1$, sind die Fasern vollständig parallel ausgerichtet in die Hauptrichtung \vec{A} . Im anderen Extremfall ist $\lambda_1 = 0,5$, und die Fasern sind in der von \vec{A} und \vec{B} aufgespannten Ebene isotrop verteilt.

Abb. 8: Häufigkeitsverteilung der Eigenwerte des FOT in einem typischen spritzgegossenen Bauteil. Die prozentuale Häufigkeit, mit der die Größe des Eigenwerts vorkommt, ist aufgetragen über die Größe des Eigenwerts. Während der kleinste Eigenwert (grün) am häufigsten den Wert 0,08 annimmt, sind die Verteilungen des höchsten (blau) und des mittleren Eigenwerts (orange) fast spiegelsymmetrisch.



Mit diesem Orientierungsgrad wird die Abhängigkeit des Materialverhaltens von der Faserorientierung beschrieben. Da die Materialparameter in dem implementierten Materialmodell *MAT_157 nicht durch eine lokale Variable kontinuierlich angepasst werden können, wird der Orientierungsgrad in einem nächsten Schritt diskretisiert (siehe Abbildung 7 links unten). Die Elemente werden anhand ihres Orientierungsgrads λ_1 in Orientierungsklassen eingeteilt (hier 5 Klassen). Jeder Klasse wird eine Materialkarte zugeordnet, die jeweils ein Parameterset enthält.

Reale Experimente durchzuführen, an denen die 5 Materialmodelle angepasst werden können, wäre herausfordernd und sowohl zeit- als auch kostenaufwändig. Zum einen müsste die Faserorientierung so beeinflusst werden, dass Proben mit den entsprechenden Orientierungsgraden verlässlich und mit geringer Streuung produziert werden können. Zum anderen müsste für jede der Materialkarten eine große Anzahl an Versuchen durchgeführt werden, um die vielen Materialparameter korrekt zu charakterisieren.

Virtuelle Messungen, so wie sie oben beschrieben wurden, haben diese Einschränkungen nicht. Die Faserorientierung kann in den generierten Strukturen exakt definiert werden. Viele Versuche können virtuell mit einem akzeptablen numerischen Aufwand an diesen Strukturen durchgeführt werden.

Die Parameter einer Materialkarte werden jeweils an den virtuellen Messungen mit dem entsprechenden Orientierungsgrad kalibriert. Die virtuellen Messungen bestehen jeweils aus einem Zug in Faserrichtung, einem Zug in 90°-Richtung dazu und einer Scherung. Die Elastizitätskoeffizienten E_1 , E_2 und μ_{12} werden als die mittlere Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurven im elastischen Bereich definiert. Das Ende des elastischen Bereiches wiederum wird durch den Punkt abgeschätzt, an dem sich diese Steigung am stärksten ändert, was ein Beginn des plastischen Fließens andeutet. Die Fließspannungen σ_{11}^y , σ_{22}^y und σ_{12}^y werden durch die Spannung bestimmt, an dem die virtuellen Messungen um 0,2% Dehnung vom elastischen Verhalten abweichen. Zuletzt werden die Verfestigungsparameter Q_{r1} , Q_{r2} , C_{r1} und C_{r2} angepasst. Hierzu werden aus den drei virtuellen Messungen Fließkurven bestimmt, indem die plastische Dehnung berechnet wird aus der Differenz zwischen totaler Dehnung und elastischer Dehnung. Die Verfestigungsparameter können somit optimiert werden durch Minimierung der Differenz zu den drei Messungen.

In Abbildung 9 und in Abbildung 10 ist der Vergleich zwischen den virtuellen Messungen (mit durchgezogenen Linien) und entsprechenden 1-Element-Simulationen mit dem Makro-Modell (mit gestrichelten Linien) dargestellt. Über die Farbgebung wird die Faserorientierung bzw. der Orientierungsgrad angegeben. Während in Abbildung 9 die Messungen von uniaxialem Zug in 0° und in 90° zur Haupt-Faser-Richtung verglichen werden, sind in Abbildung 10 die Scherdeformationen zu sehen. Die Abbildungen zeigen, dass das gesamte Materialverhalten gut mit den automatisch bestimmten Parametern beschrieben werden kann. Das elastische und plastische Verhalten stimmt über alle Faserorientierungen und alle Deformationen hinweg gut überein. Dies belegt, dass die automatische Anpassung an die virtuellen Messungen die optimalen Materialparameter identifiziert.

Abb. 9: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven zwischen den virtuellen Messungen am Mikromodell (durchgezogene Linien) und den Simulationen am homogenisierten Makromodell *MAT_157 (gestrichelte Linien). Die Zellen wurden mit uniaxialem Zug in 0° und in 90° belastet. Die Farbgebung zeigt die einzelnen Faserorientierungen an.

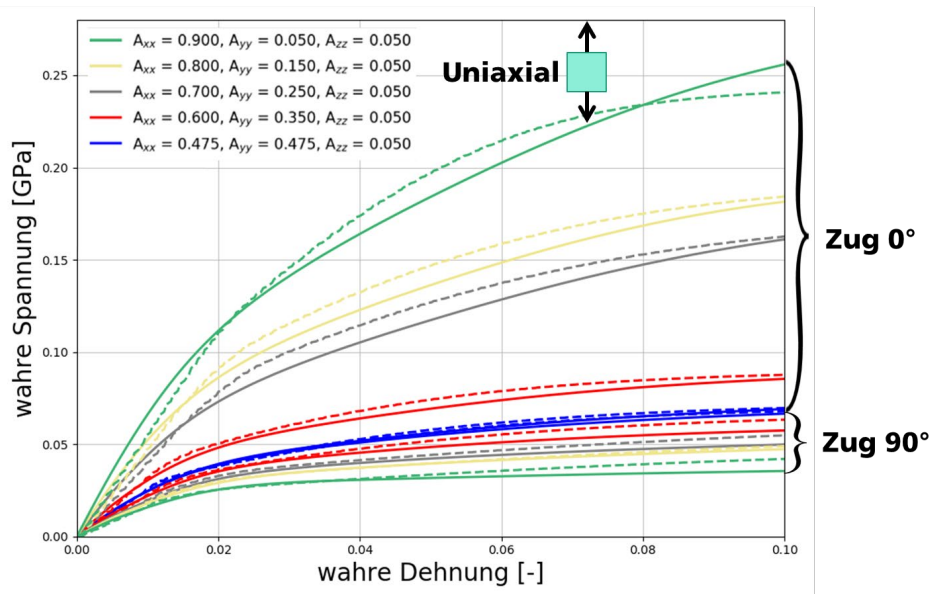
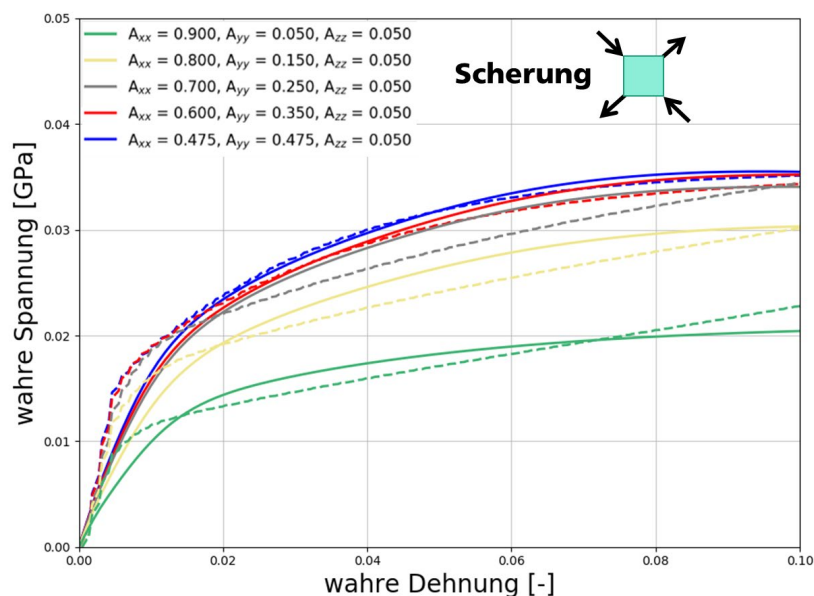


Abb. 10: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven zwischen den virtuellen Messungen am Mikromodell (durchgezogene Linien) und den Simulationen am homogenisierten Makromodell *MAT_157 (gestrichelte Linien). Die Zellen wurden mit Scherung belastet. Die Farbgebung zeigt die einzelnen Faserorientierungen an.

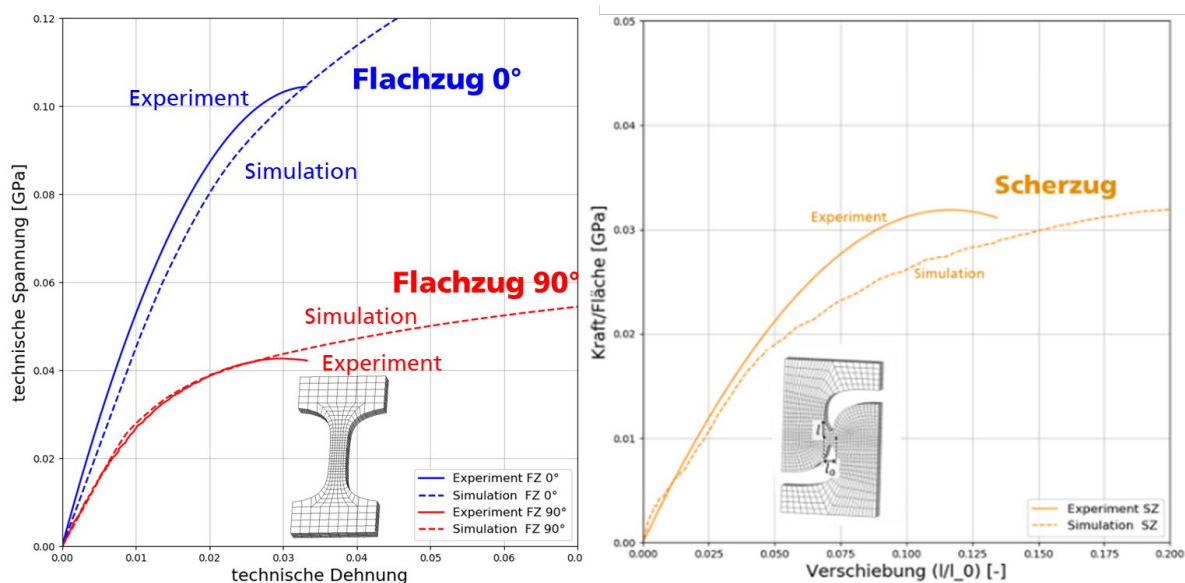


Nach dem Vergleich des Makromodells mit den Daten, an denen es angepasst wurde, soll im Folgenden ein Vergleich mit realen Experimenten erfolgen. Diese Experimente waren nicht Basis für die Anpassung des Mikromodells. Also wird hier eine echte Validierung betrachtet, und es wird geprüft, wie das Modell den langfaserverstärkten Thermoplasten beschreiben kann.

Es wurden Flachzugversuche (für nahezu uniaxialen Spannungszustand) durchgeführt mit Zug in Spritzgussrichtung und 90° dazu. Zu beachten ist dabei aber, dass die Proben aus spritzgegossenen Teilen gefertigt wurden. Dadurch sind in jeder Probe mehrere Faserorientierungen vorhanden. Typischerweise bilden sich drei Orientierungsschichten aus. Die Randschichten sind in Fließrichtung ausgerichtet, und die Fasern der Mittelschicht sind hauptsächlich transversal dazu ausgerichtet. Die Experimente, die in Abbildung 11 links mit durchgezogenen Linien dargestellt sind, sind repräsentative Beispiele der Versuchsreihe. Die Simulationen (mit gestrichelten Linien) wurden mit dem angepassten Makromodell *MAT_157 durchgeführt. Die lokale Faserorientierung basiert auf einer Spritzgussimulation und wurde mit der oben beschriebenen Methode berücksichtigt. Die Übereinstimmung zu den Experimenten ist sehr gut. Sowohl die anisotrope elastische Steifigkeit als auch das plastische Fließen wird passend vorhergesagt. Schädigung und Versagen ist hier nicht implementiert.

Außerdem wurden Scherzugproben getestet und simuliert (siehe Abbildung 11, rechts). Hier stimmt das elastische Verhalten erneut überein. Das plastische Fließen setzt in der Simulation etwas zu früh ein und das Material wird ein wenig zu weich vorhergesagt. Der Grund hierfür ist, dass das Materialmodell *MAT_157 auf eine Verfestigungskurve für alle Deformationen beschränkt ist.

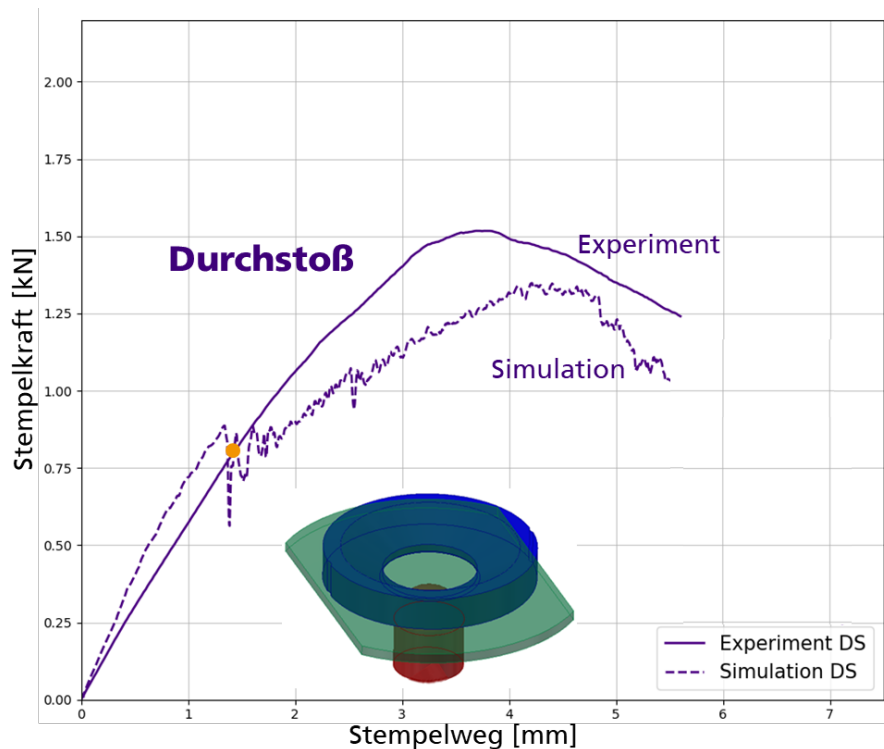
Abb. 11: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven der Flachzugversuche in 0° und 90° zur Spritzgussrichtung (links) und der Scherzugversuche (rechts) zwischen den Experimenten (durchgezogene Linien) und den Simulationen (gestrichelte Linien).



Schließlich wird ein annähernd biaxialer Belastungszustand getestet anhand eines Durchstoßversuches (siehe Abbildung 12). Hierbei drückt ein Stempel mit halbkugelförmiger Spitze durch die ringförmig eingespannte Probe. Initiales Versagen an der Oberfläche kann schon weit vor dem Kraftmaximum beobachtet werden (am orangenen Punkt bei ca. 1,4 mm und 0,8 kN). Das Kraftsignal in der Simulation stimmt vorher gut mit dem Experiment überein. Um das Versagensverhalten abbilden zu können, wurde für diese Simulation ein entsprechendes Versagensmodell hinzugefügt. Damit kann das initiale Versagen genau getroffen werden. Auch der weitere Kraftanstieg, während sich der Riss ausbreitet, wird von dem Modell zufriedenstellend beschrieben.

Anhand dieser Validierung konnte gezeigt werden, dass das Materialmodell, das auf Basis der virtuellen Messungen automatisch angepasst wurde, reale Versuche beschreiben kann. Die Vorhersagefähigkeit wurde am einachsigen Zug in 0° und 90°, am Scherzug und am biaxialen Zug überprüft.

Abb. 12: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven des Durchstoßversuchs zwischen dem Experiment (durchgezogene Linie) und der Simulation (gestrichelte Linie). Der Punkt des initialen Versagens im Experiment ist orange markiert.



4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird gezeigt, wie mit Hilfe eines Mikroskalenmodells eine Standardmaterialkarte für einen LFT-Verbundwerkstoff berechnet wird. Die Kalibrierung des Mikroskalenmodells erfordert einfache Messungen am Matrixmaterial und Zugversuche am Verbundwerkstoff zur Validierung. Außerdem muss die Geometrie des Verbundwerkstoffs durch μ CT-Scans charakterisiert werden. Alternativ können auch Spritzgussimulationen verwendet werden.

Mit dem kalibrierten Mikroskalenmodell können virtuelle Messungen durchgeführt werden, die zur Kalibrierung einer Standardmaterialkarte, z. B. *MAT_157, verwendet werden können. Mit der so gewonnenen Materialkarte kann das richtungsabhängige Verhalten des Verbundwerkstoffs sowohl für Zug- und Scherversuche, aber auch einen Durchstoßversuch sehr genau vorhergesagt werden. Dieser konnte in vorangegangenen Arbeiten mit hohem experimentellem Aufwand nicht in der hier dargestellten Qualität prognostiziert werden.

Bei der Kalibrierung des Mikroskalenmodells wird von spezifischen Materialgesetzen für das Matrixmaterial und die Glasfasern ausgegangen. In [3] haben die Autoren gezeigt, wie Mikroskalenmodelle an Mikroproben kalibriert werden und wie dabei auch der Herstellungsprozess und die Faser-Matrix-Wechselwirkung berücksichtigt werden. Der nächste Schritt besteht nun darin, diesen Ansatz anzuwenden, um die Genauigkeit der Materialkarten zu verbessern.

5 Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19532 N der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

6 Literatur

- [1] Andrä, H., Andrieux, F., Discher, D., Dobrovolskij, D., Grimm-Strele, H., Hauber, M., Huberth, F., Lienhard, J., Niedziela, D., Kabel, M., Schladitz, K., Schweiger, T., Steiner, K., and Sun, D. 2020. *Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashesimulation*. FAT-Schriftenreihe 331. FAT.
- [2] Andrä, H., Dobrovolskij, D., Schladitz, K., Staub, S., and Müller, R. 2019. Modelling of Geometrical Microstructures and Mechanical Behaviour of Constituents. In *Multi-scale Simulation of Composite Materials*, S. Diebels and S. Rjasanow, Eds. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [3] Fliegenger, S., Kennerknecht, T., and Kabel, M. 2017. Investigations into the damage mechanisms of glass fiber reinforced polypropylene based on micro specimens and precise models of their microstructure. *Composites Part B: Engineering* 112, 327–343.
- [4] Grimm-Strele, H. and Kabel, M. 2019. Runtime optimization of a memory efficient CG solver for FFT-based homogenization: implementation details and scaling results for linear elasticity. *Comput Mech* 64, 5, 1339–1345.
- [5] Grimm-Strele, H., Kabel, M., Andrä, H., Staub, S., Lienhard, J., Schweiger, T., and Herd, O. 2021. Efficient Characterization and Modelling of the Nonlinear Behaviour of LFT for Crash Simulations. In *14th WCCM-ECCOMAS Congress*. CIMNE. <https://dx.doi.org/10.23967/wccm-eccomas.2020.130>.
- [6] Kabel, M., Fink, A., and Schneider, M. 2017. The composite voxel technique for inelastic problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 322, 396–418.
- [7] Kabel, M., Fliegenger, S., and Schneider, M. 2016. Mixed boundary conditions for FFT-based homogenization at finite strains. *Comput Mech* 57, 2, 193–210.
- [8] Math2Market GmbH. *GeoDict*. <http://www.geodict.de>. Abgerufen am 6. Oktober 2021.
- [9] Schneider, M. 2017. The sequential addition and migration method to generate representative volume elements for the homogenization of short fiber reinforced plastics. *Comput Mech* 59, 2, 247–263.

Domänenübergreifende Auswirkungsanalyse mit Hilfe des Artefakt-Modells

Prof. Dr. Markus Brandstätter^{1,2}, Dr.-Ing. Christian Bühler¹, Kim Steinkirchner¹,
Prof. Dr. Manuel Mayer²

¹ PROSTEP AG
² FOM Hochschule

Zusammenfassung

Moderne technische Systeme bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten, die von Ingenieurteams verschiedener Fachrichtungen (Domänen) erstellt, simuliert und getestet werden. Dabei kann das „Model-based Systems Engineering (MBSE)“ [MBSE01], [MBSE02] interdisziplinäre Entwicklerteams bei der phasen- und disziplinenübergreifenden Entwicklung komplexer technischer Systeme unterstützen, angefangen bei der Stakeholder Analyse, über die Identifikation der Anwendungsfälle der Stakeholder bis hin zur Erstellung des (deskriptiven) phasen- und domänenübergreifenden SysML-Systemmodells [SYSML01], [SYSML02]. Außerdem kann das deskriptive SysML-Systemmodell so erweitert werden, dass beispielsweise eine Auslegungsrechnung von Systemparametern oder die Absicherung des Modells mittels (numerischer) Simulation erfolgen kann [NAFEMS18]. Sowohl bei der Erstellung des SysML-Systemmodells, als auch bei der Simulation und Absicherung, kommt es in der Praxis immer wieder zu diversen Problemen. Einerseits sind diese technischer Natur, wie z.B. dass Schnittstellen nicht zusammen passen oder dass Komponenten nicht nach den Vorgaben entwickelt wurden, da diese nicht eindeutig spezifiziert waren. Andererseits kommt es oft zu Verständnisproblemen zwischen den an der Entwicklung beteiligten Ingenieuren, die sich z.B. dadurch äußern, dass das Elektrotechnik-Team die Modelle des Software-Teams nicht lesen und verstehen kann. Für das gemeinsame Systemverständnis ist das Lesen und Verstehen der domänenspezifischen Modelle, zumindest auf einem bestimmten Abstraktionsgrad, notwendig. Dieser Effekt wird als die Überwindung der „Semantischen Lücke“ [SEM01], [SEM02] bezeichnet. Wie in [NAFEMS18], [PVM19], [TdSE02] gezeigt, kann die Lösung des domänenübergreifenden Verständnisproblems mit Hilfe des Artefakt-Modells [TdSE01] adressiert werden. Im Artefakt-Modell sind die wesentlichen Artefakte, die für die phasen- und domänenübergreifende Systementwicklung notwendig sind, sowie deren Verbindungen untereinander explizit modelliert und beschrieben.

Ein weiteres Einsatzgebiet des Artefakt-Modells ist die domänenübergreifende Auswirkungsanalyse von Änderungen am zentralen phasen- und domänenübergreifenden SysML-Systemmodell. In dieser Veröffentlichung soll als Beispielmodell ein einfaches SysML-Systemmodell eines „Mars Rovers“ [SMARTSE] dienen, das auf der Grundlage des Artefakt-Modells aus [TdSE01] bzw. [NAFEMS18] erstellt wurde. Für diese Veröffentlichung soll hier beispielhaft angenommen werden, dass der Stakeholder „Scientist“ als möglichen neuen Anwendungsfall eine größere Umgebung in kürzerer Zeit auf dem Mars erkunden möchte, als dies im ursprünglichen Modell modelliert, simuliert und abgesichert wurde. Die Modellierung, Auslegung/Simulation und Absicherung des Rover-Modells erfolgte für eine maximale Geschwindigkeit von 0.5 m/s. Die neue gewünschte maximale Geschwindigkeit des Rovers soll 1.0 m/s betragen. Zur Abschätzung der Auswirkungen der Geschwindigkeitserhöhung auf sämtliche Komponenten/Baugruppen des Systems, aber auch Operations-Prozesse und Prozeduren, muss das phasen- und domänenübergreifende SysML-Systemmodell analysiert und angepasst werden. Bei der Analyse des SysML-Systemmodells kann das Artefakt-Modell unterstützen. Im Artefakt-Modell sind z.B. die Verbindungen der Anwendungsfälle mit den Anforderungen, und diese mit der technischen Realisierung und der (numerischen) Auslegung und Simulation, aber auch die Zusammenhänge zur Prozessebene, explizit modelliert [NAFEMS18]. Da das SysML-Systemmodell auf der Grundlage des Artefakt-Modells erstellt wurde, enthält es ebenfalls alle Verbindungen zwischen den unterschiedlichen Artefakten des Systems. Somit kann die domänenübergreifende Auswirkung der Änderung des Anwendungsfalls nachverfolgt werden und auf Grundlage des „Änderungs- bzw. Abhängigkeitsgraphen“ eine Entscheidung getroffen werden, ob die Änderung umgesetzt werden soll oder nicht, und welche Modellbestandteile (Komponenten, Simulationsmodelle etc.) von der Änderung betroffen sind und angepasst oder neu entwickelt werden müssen.

1 Einleitung

Moderne technische Systeme bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten, die von Ingenieurteams verschiedener Fachrichtungen (Domänen) erstellt, simuliert und getestet werden. Dabei kann das „Model-based Systems Engineering (MBSE)“ [MBSE01], [MBSE02] interdisziplinäre Entwicklerteams bei der phasen- und disziplinenübergreifenden Entwicklung komplexer technischer Systeme unterstützen, angefangen bei der Stakeholder Analyse, über die Identifikation der Anwendungsfälle der Stakeholder bis hin zur Erstellung des (deskriptiven) phasen- und domänenübergreifenden SysML-Systemmodells [SYSML01], [SYSML02]. Außerdem kann das deskriptive SysML-Systemmodell erweitert werden, dass beispielsweise eine Auslegungsrechnung von Systemparametern oder die Absicherung des Modells mittels (numerischer) Simulation erfolgen kann [SIM01] und [NAFEMS18].

Sowohl bei der Erstellung des SysML-Systemmodells, als auch bei der Simulation und Absicherung, kommt es in der Praxis immer wieder zu diversen Problemen. Einerseits sind diese technischer Natur, wie z.B. die Inkompatibilität von Schnittstellen oder dass Komponenten nicht nach den Vorgaben entwickelt wurden, da diese z.B. nicht eindeutig und widerspruchsfrei spezifiziert waren. Andererseits kommt es oft zu Verständnisproblemen zwischen den an der Entwicklung beteiligten Entwicklern die sich z.B. dadurch äußert, dass das Elektrotechnik-Team die Modelle des Software-Teams nicht lesen und verstehen kann, oder das Business-Team die Sprache und Modelle der Ingenieur-Teams nicht versteht [TdSE02]. In beiden Fällen kann es zu Dissonanzen während des Systementwicklungsprozesses kommen, die vermieden werden sollten. Für das gemeinsame Systemverständnis ist das Lesen und Verstehen der domänenspezifischen Modelle, zumindest auf einem bestimmten Abstraktionsgrad, notwendig. Dieser Effekt wird als die Überwindung der „Semantischen Lücke“ [SEM01], [SEM02] bezeichnet. Wie in [NAFEMS18], [PVM19], [TdSE02] gezeigt, kann die Lösung des domänenübergreifenden Verständnisproblems mit Hilfe des Artefakt-Modells [TdSE01] adressiert werden. Ein weiteres Einsatzgebiet des Artefakt-Modells ist die domänenübergreifende Auswirkungsanalyse von Änderungen am zentralen phasen- und domänenübergreifenden SysML-Systemmodell [TdSE01].

In dieser Veröffentlichung soll als Beispielmodell ein einfaches SysML-Systemmodell eines „Mars Rovers“ [SMARTSE] dienen, das auf der Grundlage des Artefakt-Modells aus [TdSE01] bzw. [NAFEMS18] erstellt wurde. In diesem Modell wird eine Änderung von einem Stakeholder initiiert und die Auswirkung dieser Änderung soll domänenübergreifend nachvollziehbar dargestellt werden. Um die Vorgabe dieser Veröffentlichung einzuhalten, werden in dieser Veröffentlichung nur die technischen Auswirkungen der Änderung betrachtet.

1.1 Das Artefakt-Modell

Wie in der Einleitung beschrieben, dient das (generische) Artefakt-Modell zum einen zur Überwindung der „Semantischen Lücke“ [SEM01], [SEM02] zwischen den Domänen und zum anderen zur expliziten Modellierung aller Artefakte und deren Zusammenhänge, die für die interdisziplinäre Systementwicklung benötigt werden. Dabei basiert das generische Artefakt-Modell auf den Erfahrungen aus unterschiedlichen Projekten, aus denen die allgemeinen, immer gleichen Artefakte und deren Beziehungen extrahiert und zu einem generischen Modell generalisiert wurden.

Die Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem in [TdSE01] und [NAFEMS18] vorgestellten generischen Artefakt-Modell, erweitert um Artefakte, die für die (numerische) Simulation benötigt werden. In diesem Ausschnitt sind die grundlegenden Artefakte und die Verbindungen zwischen den Artefakten modelliert, die für die Erstellung des Beispielsystem „Mars Mover“ [SMARTSE], und insbesondere für die numerische Simulation des „Mars Rovers“, genutzt wurden. Beispielsweise ist in Abbildung 1 der Zusammenhang zwischen einem „Modell“ und den „Anforderungen“ beschrieben. Ein „Modell“ basiert auf einer oder mehreren „Anforderung(en)“. Ein „Simulations-Modell“ ist eine Spezialisierung (Ableitung) eines „Modell(s)“. Demnach gilt für das „Simulations-Modell“, dass es ebenfalls auf einer oder mehreren „Anforderung(en)“ basiert. Außerdem ist im generischen Artefakt-Modell der Zusammenhang zwischen einem „Modell“ und einem expliziten „Testfall“ modelliert – ein „Modell“ wird durch keinen oder einen „Testfall“ geprüft. Durch die Ableitungsbeziehung zwischen dem „Modell“ und dem „Simulations-Modell“ wird dieser Zusammenhang vererbt. Ein „Simulations-Modell“ basiert demnach auf einem „Anwendungsfall“ und dient zur Absicherung eines „Testfall(s)“. Des Weiteren wird eine „Komponente“ durch ein oder mehrere „Modell(e)“ modelliert und kann durch kein oder mehrere „Simulations-Modell(e)“ simuliert werden.

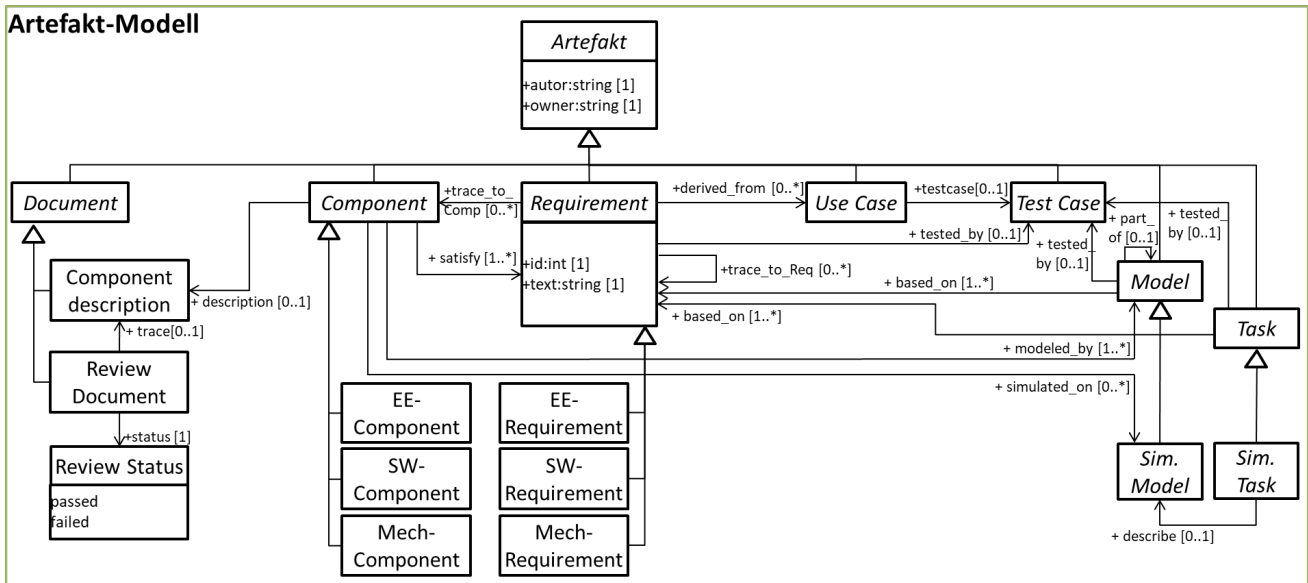


Abb. 1: Auszug aus dem generischen Artefakt-Modell nach [TdSE01] und [NAFEMS18], erweitert um Artefakte für die (numerische) Simulation und deren Absicherung

1.2 Erweiterung des Artefakt-Modells um Business- und Technische Artefakte

Das generische Artefakt-Modell kann durch seinen generischen Aufbau für beliebige weitere Einsatzszenarien individuell angepasst und erweitert werden. Beispielsweise wurde das Artefakt-Modell in [TdSE02], [PVM19], [ART01] um „Business-Artefakte“ und deren Verbindung zu „Technischen Artefakten“ [ART02] erweitert. Mit Hilfe dieser Erweiterung konnte eine durchgängige phasen- und domänenübergreifende Modellierung, angefangen bei den Business-Entscheidungen über die Modellerstellung bis hin zur Absicherung des zu entwickelnden Systems, demonstriert werden.

Business-Artefakte

Die Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus der Erweiterung des generischen Artefakt-Modells um Business-Artefakte (in Anlehnung an [PVM19]). Das Business-Artefakt wirtschaftliches „Gut“ hat eine Vererbungsbeziehung zum allgemeinen übergeordneten „Artefakt“, von dem alle Artefakte des Artefakt-Modells erben (nicht dargestellt). Es enthält die beiden Attribute „zuVerkaufen“ und „zukaufteil“, die im Allgemeinen ein „Gut“ aus betriebswirtschaftlicher Sicht charakterisieren. Das „Gut“ besteht aus den beiden Business-Artefakten „Lieferant“ und „Zahlungsbedingungen“. Außerdem ist der betriebswirtschaftliche Zusammenhang zwischen einem Lieferanten und den Zahlungsbedingungen explizit, mit Hilfe der gerichteten Assoziation „legt fest“, modelliert worden.

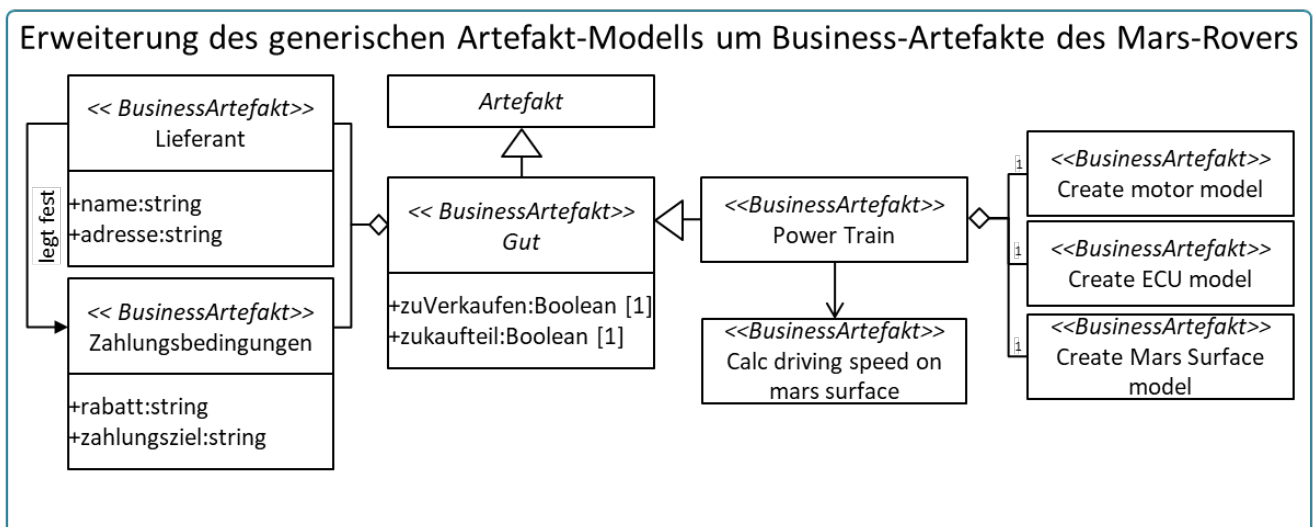


Abb. 2: Auszug aus der Erweiterung des generischen Artefakt-Modells um Business-Artefakte für die Erstellung eines „Mars Rovers“ (in Anlehnung an [PVM19])

Das Business-Artefakt „Gut“ wiederum ist die Basis für das Business-Artefakt „Power Train“. Es repräsentiert die betriebswirtschaftlichen Aspekte eines „Power Trains“ des zu entwickelnden „Mars Rovers“. Außerdem hat das Business-Artefakt eine Beziehung zum Business-Artefakt „Calc driving speed on martian surface“. Durch diese explizit modellierte Beziehung wird sichergestellt, dass für die Durchführung der (numerischen) Simulation der Geschwindigkeit des Rovers auf der Marsoberfläche betriebswirtschaftliche Mittel zur Verfügung stehen müssen. Gleiches gilt für die Erstellung der notwendigen Teilmodelle des „Power Trains“ für die Durchführung der (numerischen) Simulation.

Technische Artefakte

In den frühen Phasen des Systementwicklungsprozesses wird ein System aus Sicht des Kunden, in enger Abstimmung von Experten aus Business und der Technik ausgelegt und entwickelt. Dabei kommt es immer wieder zu Verständigungsproblemen und Dissonanzen, hervorgerufen durch die „Semantische Lücke“ [SEM01], [SEM02]. Durch die Einführung sowohl der „Business-Artefakte“, als auch der „Technischen-Artefakte“ konnte die „Semantische Lücke“ verkleinert und sowohl das domänenübergreifende Verständnis gefördert als auch die Kommunikation zwischen den Domänen verbessert werden.

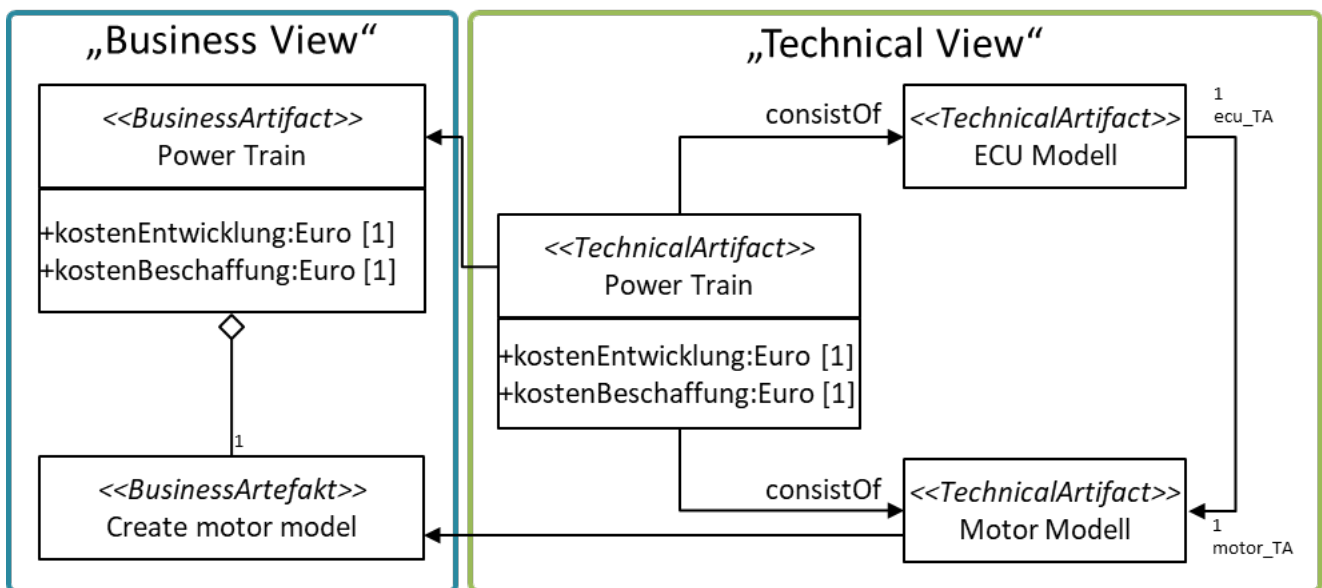


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung des Zusammenhangs zwischen „Business-Artefakten“ und „Technischen-Artefakten“

Die Abbildung 3 zeigt auf der linken Seite das vereinfachte Business-Artefakt „Power Train“ mit seinen, für das gemeinsame Systemverständnis zwischen dem Business und der Technik, spezifischen Attributen „kostenEntwicklung“ und „kostenBeschaffung“. Um eine wirtschaftliche Entscheidung treffen zu können, ob der „Power Train“ selbst entwickelt oder durch den Einkauf beschafft werden soll, hinterlegt das Business die beiden kalkulierten Werte im Business-Artefakt. Auf der rechten Seite ist das technische Artefakt „Power Train“, ebenfalls mit den Attributen „kostenEntwicklung“ und „kostenBeschaffung“, dargestellt. Hier hinterlegt die „Technik“ ihre Kosten, die sie für die Erstellung des Artefakts „Power Train“ kalkulieren, oder was eine Beschaffung aus ihrer Sicht kosten würde. Durch die Verbindung der beiden Artefakte wird sichergestellt, dass beide Parteien miteinander in Kontakt treten, ein gemeinsames Verständnis entwickeln und z.B. die hinterlegten Kosten abstimmen können.

1.3 Anwendung des Artefakt-Modells auf Simulations-Artefakte

In [NAFEMS18] wurde demonstriert, wie das Artefakt-Modell speziell für die Belange der (numerischen) Simulation erweitert und eingesetzt werden kann. Dabei wurde insbesondere der domänenübergreifende Zusammenhang zwischen der „Business Sicht“ und der „Technischen- bzw. Simulationssicht“, anhand eines Fensterheber-Beispiels aufgezeigt. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse aus [NAFEMS18] aufgegriffen und erweitert.

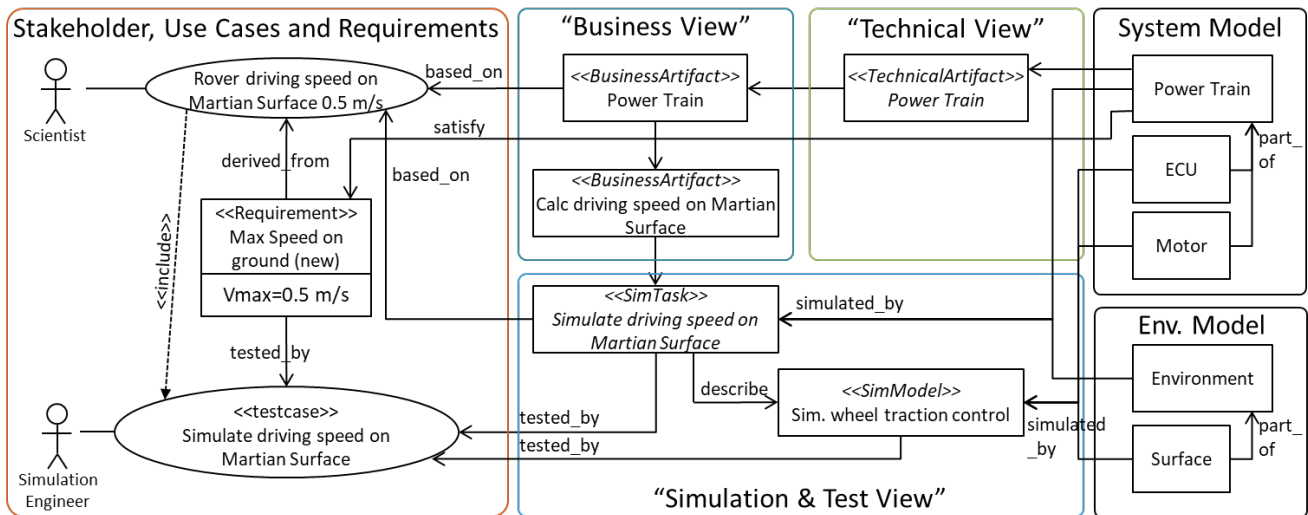


Abb. 4: Explizite Modellierung des Zusammenhangs zwischen Business-, technischer- und System-Sicht auf das zu entwickelnde System des „Mars Rovers“ (in Anlehnung an [NAFEMS18])

Die Abbildung 4 zeigt die domänenübergreifenden Zusammenhänge zwischen der Business-, der technischen- und der Simulations-Sicht auf das zu entwickelnde System des „Mars Rovers“. Alle Verbindungen zwischen den Artefakten basieren auf dem generischen Artefakt-Modell, das um die Belange des Business, der Technik und der (numerischen) Simulation erweitert wurde. Die Abbildung 5 zeigt rechts den Zusammenhang zwischen dem Business-Artefakt „Calc driving speed on Martian Surface“ und dem „SimTask Simulate driving speed on Martian Surface“ sowie dem Simulationsmodell „Sim. wheel traction control“. Außerdem ist die Repräsentation des Simulationsmodells als Simulationsblock dargestellt, der seinerseits als FMI [FMI01] repräsentiert ist.

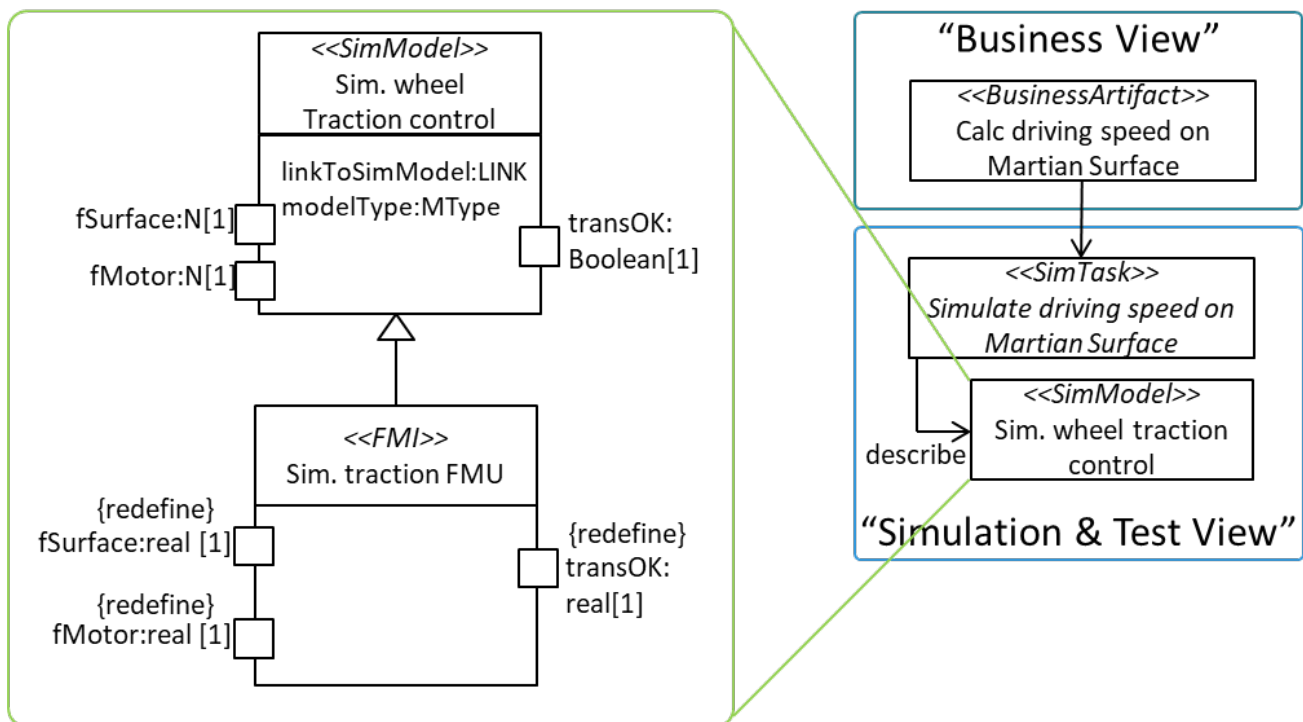


Abb. 5: Verbindung zwischen Business- und Simulations-Sicht, sowie dem Simulations-Modell für die Simulation der „Wheel Traction Control“

1.4 Instanziierung des Artefakt-Modells

Mit Hilfe des generischen phasen- und domänenübergreifenden Artefakt-Modells können allgemein gültige Zusammenhänge zwischen Artefakten explizit modelliert und dargestellt werden. Dabei enthält das generische Artefakt-Modell alle möglichen Artefakte und Beziehungen, die zwischen diesen Artefakten möglich sind. Aus

diesem Grund ist das Artefakt-Modell ein so genanntes „150%-Modell“, mit dem „alle Klassen von Systemen“ modellierbar sind. Soll ein konkretes Modell eines Systems, ein 100%-Modell, erstellt werden, so kann dies entweder mit Hilfe der Instanziierung des generischen Artefakt-Modells erfolgen oder indem nur die Artefakte aus dem generischen Modell ausgewählt werden, die für die Erstellung des 100%-Modells notwendig sind. Beide Modellbildungsvarianten werden vom Artefakt-Modell unterstützt. Zu bevorzugen ist die Modellerstellung mit Hilfe der Instanziierung, da so eine höhere Flexibilität erreicht wird und eine strikte Trennung zwischen Modell und Instanz eingehalten wird.

Die Abbildung 6 zeigt links einen Auszug aus dem generischen Artefakt-Modell. Im Modell ist die Kardinalität „0 bis 1“ an der gerichteten Relation „tested_by“, über die Vererbung zwischen den Artefakten „Sim. Modell“ und „Test Case“, angegeben. Somit kann ein Modell entweder durch einen „Test Case“ abgesichert werden oder nicht. Auf der rechten Seite ist eine mögliche Instanziierung des Artefakt-Modells dargestellt. Zwischen den Instanzen der Artefakte „Sim. wheel traction control::SimModel“ und „Simulate driving speed on Martian Surface::Test Case“ ist die Ausprägung der Relation „tested_by“ modelliert worden um anzuzeigen, dass das Modell mittels eines „Test Case“ abgesichert werden soll. Durch die „0“ an der Relation im generischen Modell hätte ebenso modelliert werden können, dass das Simulationsmodell nicht durch einen „Test Case“ abgesichert werden soll.

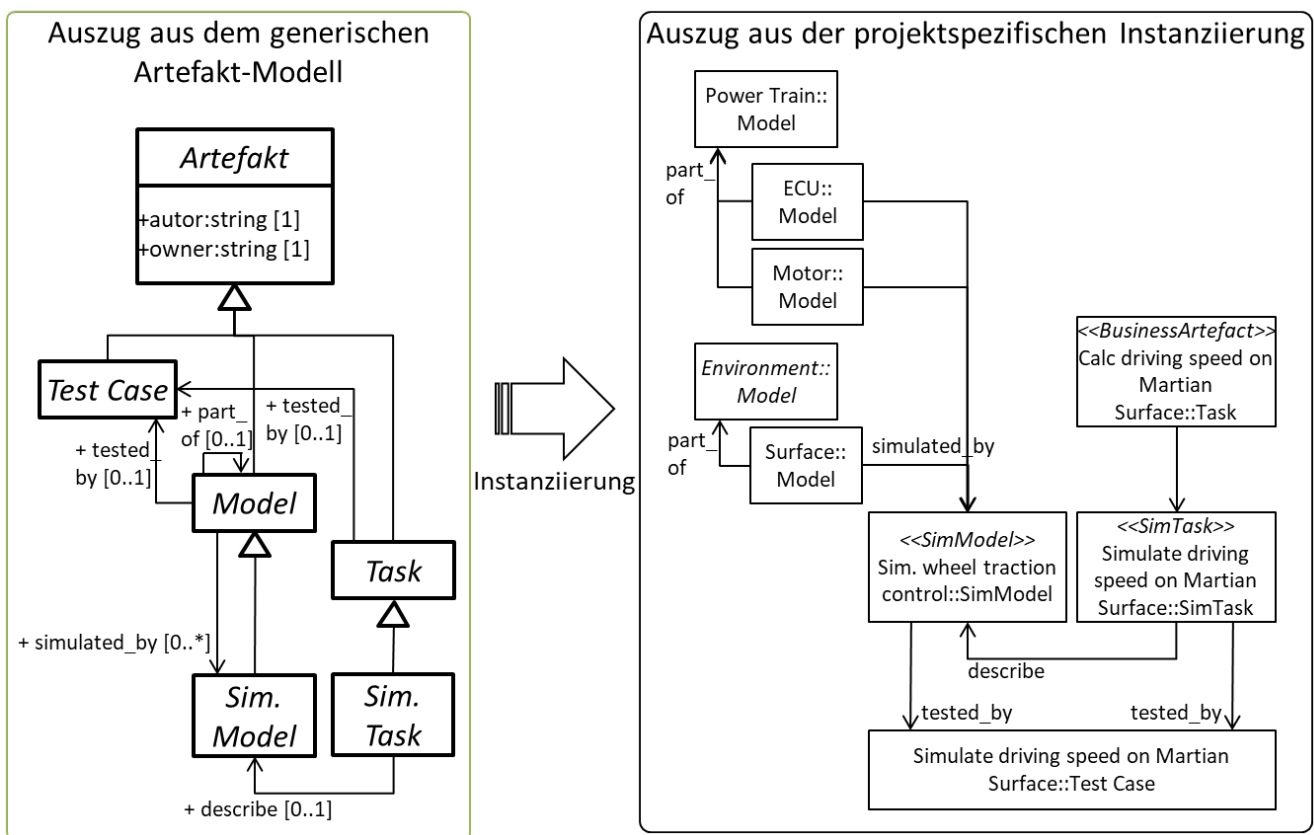


Abb. 6: Beispiel für die Instanziierung des generischen Artefakt-Modells

Aus der Erprobung des Artefakt-Modells in unterschiedlichen Projekten ergeben sich zwei wesentliche Erkenntnisse. Zum einen die Notwendigkeit der vollständigen und durchgängigen Dokumentation des Modells und aller Erkenntnisse, die aus dem Modell gewonnen werden können, wie beispielsweise der phasen- und domänenübergreifende Zusammenhang zwischen Artefakten. Zum anderen die Nachverfolgbarkeit der Auswirkungen einer Änderung am phasen- und domänenübergreifenden Systemmodell bzw. am Instanzmodell, initiiert z.B. durch die Erkenntnisse aus einer (numerischen) Simulation / Erprobung einer Komponente des Systems oder durch einen an der Entwicklung des Systems beteiligten Stakeholder und dessen Änderungswunsch. Der zweite Anwendungsfall, die Änderung eines Anwendungsfalls durch einen Stakeholder, wird im Kapitel 2 erläutert.

2 Auswirkungsanalyse

Der Stakeholder „Scientist“ möchte mit einem Rover die Oberfläche des Mars erkunden. In der frühen Phase der Systementwicklung (Phase 0/A [ESA01], [ESA02]) legt er beispielsweise fest, dass der Rover mit einer Geschwindigkeit von 0.5 m/s auf der Marsoberfläche fahren soll (Abbildung 4 und Abbildung 7 links). Auf Basis dieses Anwendungsfalls bzw. der daraus abgeleiteten Anforderung wird der initiale Entwurf des Rover-Modells in der Phase 0/A, basierend auf dem generischen Artefakt-Modell, erstellt und mit Hilfe der numerischen Simulation die Einhaltung der Anforderungen an das Rover-Modell überprüft (vgl. [NAFEMS18]). Während der Systementwicklung, z.B. der Phase 1 stellt sich heraus, dass der Stakeholder „Scientist“ seinen ursprünglichen Anwendungsfall von 0.5 m/s auf 1.0 m/s ändern möchte, um in kürzerer Zeit eine größere Fläche auf der Marsoberfläche erkunden zu können (Abbildung 7 rechts). Zur Abschätzung der Auswirkungen der Geschwindigkeitserhöhung auf sämtliche Komponenten/Baugruppen des Systems, aber auch Operations-Prozesse und Prozeduren, muss das phasen- und domänenübergreifende SysML-Systemmodell analysiert und gegebenenfalls angepasst werden.

Der Änderungswunsch des ursprünglich in der Phase 0/A modellierten Anwendungsfalls durch den Stakeholder „Scientist“ wird in der Phase 1 nicht aus dem phasen- und domänenübergreifenden SysML-Systemmodell gelöscht, sondern die Änderung wird im Systemmodell modelliert und dokumentiert, so dass diese jederzeit nachvollzogen werden kann. Dazu wird die Ersetzung des in der Phase 0/A entstandenen Anwendungsfalls durch den neuen im Systemmodell explizit modelliert. In der Abbildung 7 (rechts) ist die Ersetzungs-Verbindung „replacedBy“ zwischen den beiden Anwendungsfällen dargestellt. Aus dem Artefakt-Modell ist bekannt, dass ein „Anwendungsfall“ eine oder keine Verbindung zu einer „Anforderung“ besitzt, ebenso wie die „Anforderung“ eine oder keine Verbindung zu einem „Testfall“ aufweist. Daraus kann gefolgert werden, dass die Änderung des „Anwendungsfalls“ ebenso eine Änderung der „Anforderung“ und evtl. des „Testfalls“ nach sich ziehen wird. Aus diesem Grund ist in der Abbildung 7 (rechts) ebenfalls eine „replacedBy“ Verbindung zwischen den beiden „Anforderungen“ modelliert, da die Phase 0/A-Anforderung, die mit dem Phase 0/A-Anwendungsfall verbunden war, ersetzt wird. Es wird im Beispiel angenommen, dass der zuvor verwendete Testfall auch für die neue Anforderungen herangezogen werden kann und nicht geändert werden muss. Abschließend muss die Verbindung von der Phase 1 Anforderung zum ursprünglichen Testfall hergestellt werden. Nachdem alle Anpassungen am Systemmodell vorgenommen wurden, folgt im nächsten Schritt die weitere Analyse der Änderung, die durch die Anpassung des Anwendungsfalls entstanden ist.

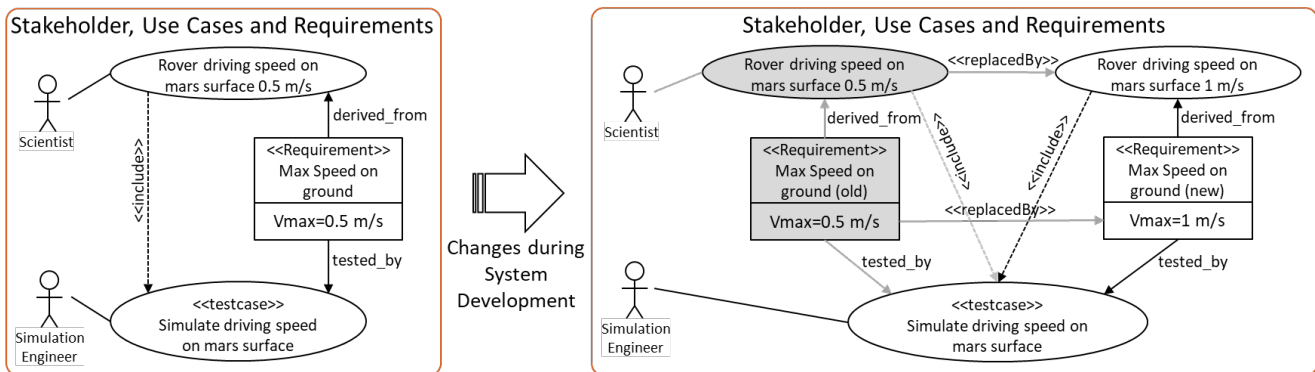


Abb. 7: Anpassungen / Änderungen während des Systementwicklungsprozesses

Durch die explizite Modellierung aller Änderungen am phasen- und domänenübergreifenden Systemmodell, ohne die veralteten Stände zu löschen, im Beispiel die Änderung des Anwendungsfalls, kann die phasen- und domänenübergreifende Auswirkung der Änderung lückenlos nachverfolgt und dokumentiert werden. Auf Grundlage des „Änderungs- bzw. Abhängigkeitsgraphen“ kann dann eine Entscheidung getroffen werden, ob die Änderung umgesetzt werden soll oder nicht, und welche Modellbestandteile (Komponenten, Simulations-Modelle etc.) und Domänen von der Änderung betroffen sind.

Die Auswirkungen einer Änderung am phasen- und domänenübergreifenden Systemmodell kann in zwei Klassen unterteilt werden – direkte und indirekte Auswirkungen. Die Abbildung 8 zeigt, in blauer Hintergrundfarbe, die Artefakte des Systems, die potenziell direkt von der Änderung des Anwendungsfalls durch den Stakeholder „Scientist“ betroffen sind, während die grau hinterlegten Artefakte indirekt von der Änderung betroffen sind. Die indirekt betroffenen Artefakte sind im Beispiel die beiden den Arbeitsauftrag initiiierenden Artefakte aus der Business- und der Technik-Sicht auf das System. Die Business-Sicht muss informiert werden, dass es einen

Änderungswunsch des „Scientist“ gibt, denn sie muss, im Allgemeinen, die finanziellen Mittel für die Anpassung genehmigen und bereitstellen. Die Technik-Sicht muss ihrerseits über die Änderungen am technischen Modell informiert werden, denn sie hat die übergreifende technische Sicht auf das System und muss ebenfalls die Freigabe für die Änderung genehmigen, oder existierende Modelle anpassen, wozu sie die Freigabe und die finanziellen Mittel aus dem Business benötigt. Die direkt betroffenen Artefakte des Systemmodells sind im Beispiel die Simulations-Modelle, die angepasst werden müssen, ebenso die Modelle des Systems.

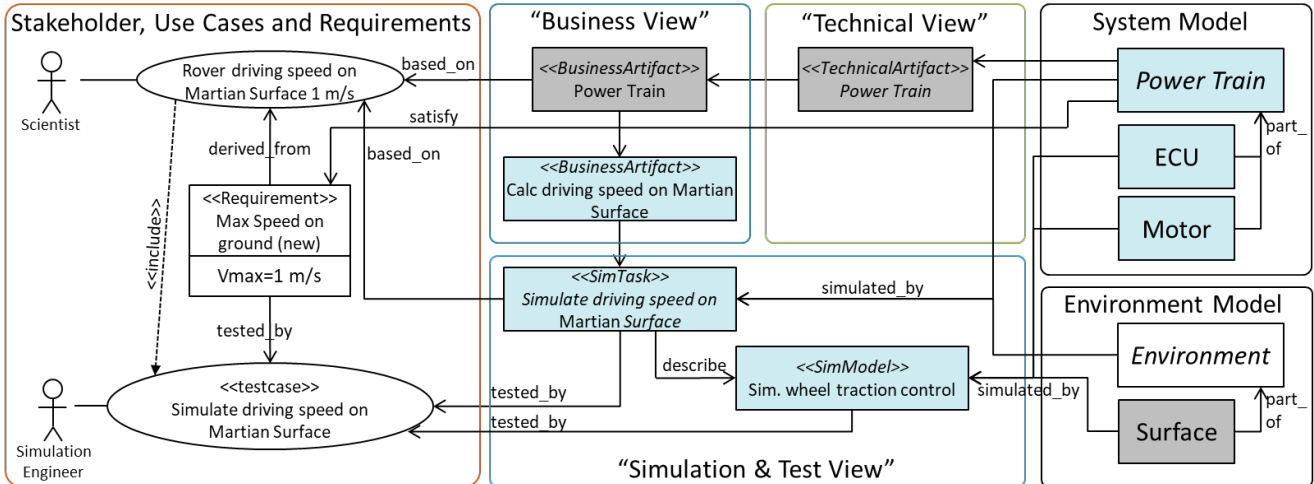


Abb. 8: Auswirkungsanalyse – Ansicht eines Simulationsingenieurs auf das zu entwickelnde System „Mars Rover“

Werden bei der Systementwicklung neben den „Blöcken“ des Systems in einem Block-Definitionsdiagramm, wie z.B. in der Abbildung 8 dargestellt, die Instanzen der Blöcke explizit modelliert, so kann ebenfalls eine Nachverfolgbarkeit der Änderungen dargestellt werden. Die Abbildung 9 zeigt das vereinfachte Instanzmodell des „Mars Rovers“, das aus dem generischen Artefakt-Modell durch die Instanziierung der Artefakte entstanden ist (vgl. Abbildung 8).

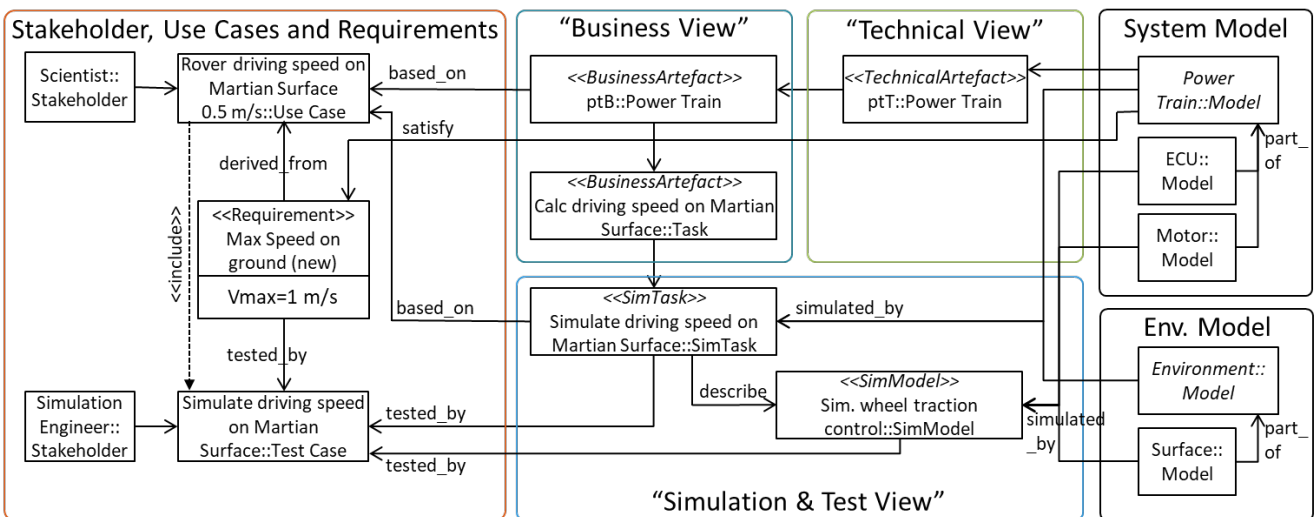


Abb. 9: Instanzmodell der domänenübergreifenden Artefakte des Systems „Mars Rover“

Im Allgemeinen wird eine Geschwindigkeitserhöhung, wie vom Stakeholder „Scientist“ gewünscht, durch die elektrischen Motoren des Rovers realisiert werden. Die Steuerung der Motoren wird durch die ECU („electronic control unit“ - Steuergerät) erfolgen. Diese muss die höhere Geschwindigkeit ebenfalls steuern können. Um sicherzustellen, dass die Motoren und die ECU dem neuen Anwendungsfall genügen, müssen diese (numerisch) simuliert werden. Dafür ist die Anpassung der Simulations-Modelle notwendig. Eine Sonderrolle im Modell hat die Oberfläche des Mars. Es kann sein, dass das Modell der Oberfläche nicht für leicht höhere Geschwindigkeiten des Rovers angepasst werden muss, so wie dies im obigen Beispiel der Fall ist.

Anhand der Nachverfolgbarkeit der Verbindungen kann die Auswirkung einer Änderung, z.B. die Änderung des Anwendungsfalls (siehe Abbildung 8) durch den Stakeholder „Scientist“, auf das Systemmodell lückenlos und domänenübergreifend nachvollzogen werden. Ebenfalls fließen die parametrisierten Zusammenhänge zwischen den Attributen der Modellklassen (ECU, Motor, Surface) und die Ergebnisse des Testfalls, der zur Absicherung des Modells dient, in die übergreifende Auswertungsanalyse mit ein (nicht dargestellt in der Abbildung 8).

Für alle an der Entwicklung des Systems „Mars Rover“ beteiligte Stakeholder kann eine, wie in Abbildung 7 und Abbildung 9 gezeigte, Änderungsnachverfolgung vorgenommen werden. So lassen sich, mit geringem Aufwand, die Auswirkungen eines Änderungswunsches eines Stakeholders am phasen- und domänenübergreifenden Systemmodell nachvollziehen, und man kann eine Aussage darüber treffen, ob ein Änderungswunsch umgesetzt wird oder nicht und welche Auswirkungen die Änderung auf alle an der Entwicklung beteiligten Stakeholder und Domänen hat.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe des erweiterten Artefakt-Modells können Änderungen und deren domänenübergreifende Auswirkungen auf das phasen- und domänenübergreifende SysML-Systemmodell nachvollzogen werden, sofern das Systemmodell bzw. das Instanzmodell nach den Vorgaben des Artefakt-Modells erstellt wurde. Die Darstellung der Auswirkungen ist, aufgrund der eingeschränkten Darstellungsmöglichkeiten vieler SysML-Werkzeuge, nur eingeschränkt möglich. Besonders deutlich wird dies, wenn im Systemmodell „sämtliche Phasen“ der Systementwicklung abgebildet sind. Ein Ansatz zur Überwindung der eingeschränkten Darstellungsmöglichkeiten ist mit Hilfe von Auswirkungsgraphen in einer Graph-Datenbank möglich [GDB13]. Dazu muss das SysML-Systemmodell zunächst in ein Graph-Datenbankschema überführt werden. Anschließend kann das Ergebnis der Transformation als Auswirkungsgraph gefiltert und angezeigt werden.

Ein ähnlicher Ansatz wird von der PROSTEP AG mit dem Werkzeug „OpenCLM“ [OpenCLM01] verfolgt. Mit Hilfe von „OpenCLM“ lassen sich die unterschiedlichen Entwicklungsartefakte, die im Artefakte-Modell vorhanden sind und für die Systemgestaltung eingesetzt werden, ebenfalls tracken, ohne dass dafür ein übergreifendes SysML-Systemmodell vorhanden sein muss. Des Weiteren kann das Tracking über sämtliche Phasen der Systementwicklung nachvollzogen werden.

Die Überführung eines Artefakt-Modells in eine Graph-Datenbank und die Evaluierung der Filter- und Darstellungsmöglichkeiten wird in einem nächsten Schritt implementiert und untersucht werden, ebenso die sich durch die Darstellung eines Auswirkungsgraphen ergebenden Möglichkeiten der Bewertung von Änderungswünschen an ein System.

4 Literatur

- [ART01] Haber, V.: „Die Möglichkeiten und Grenzen der SysML - Eine Betrachtung der Prozessmodellierung und Businessicht“, Masterarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, 2019
- [ART01] Hofmann, T.: „Die Grenzen und Möglichkeiten der SysML-Modellierung. Eine Betrachtung der Systemmodellierung und Techniksicht“, Masterarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, 2019
- [GDB13] Robinson, I., Webber, J., Eifrem, E.: „Graph Databases“, O’Reilly Media Inc., 2013, ISBN: 978-1-449-35626-2
- [ESA01] ESA, „How a mission is chosen“, https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/How_a_mission_is_chosen, 2021
- [ESA02] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: „Raumfahrt-Projektmanagement, Projektphaseneinteilung und -planung“, <https://www.dlr.de/qp/Portaldata/44/Resources/dokumente/einrichtung/ecss-m-30ag.pdf>, 1996
- [FMI01] „Functional Mock-up Interface“, <https://fmi-standard.org/>, 2021
- [TdSE01] Dr. Brandstätter, M., Roder, K., „Ein „Artefaktmodell“ zur Verbesserung der Prozessmodellierung“, TdSE 2017
- [TdSE02] Haber, V., Hofmann, T., „The collaboration of business and technology: Seeing MBSE with fresh eyes“, EMEASEC/TdSE 2018
- [MBSE01] INCOSE, „INCOSE SE Vision 2020“, INCOSE-TP-2004-004-02, Sep. 2007
- [MBSE02] „SEBoK“, [http://sebokwiki.org/wiki/Model-Based_Systems_Engineering_\(MBSE\)_\(glossary\)](http://sebokwiki.org/wiki/Model-Based_Systems_Engineering_(MBSE)_(glossary)), 2021

- [NAFEMS18] Brandstätter, M., Bühler, C.: "Using the "Artifact Model" to model CAE artifacts in the MBSE process", NAFEMS, in proceeding: "Bessere Produkte mit Modellbasiertem Systems Engineering (MBSE) und CAE", 2019
- [OpenCLM01] PROSTEP AG, <https://openclm.prostep.com/>, 2021
- [PVM19] Dr. Markus Brandstätter, Veronica Haber, Tamara Hofmann, Kim Steinkirchner, Christian Bühler, „Ganzheitliche (System-)Modellierung mit Hilfe des Artefaktmodells“, Gesellschaft für Informatik e.V., in proceeding „Projektmanagement und Vorgehensmodelle 2019“, 2019
- [SEM01] „Content-Based Image Retrieval at the End of the Early Years“, Arnold W. M. Smeulders, Marcel Worring, Simone Santini, Amarnath Gupta, Ramesh Jain, In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Bd. 22, Nr. 12, 2000, S. 1349–1380, doi:10.1109/34.895972
- [SEM02] „Bridging the Semantic Gap with Computational Media Aesthetics“, Chitra Dorai, Svetha Venkatesh: In: IEEE MultiMedia. Bd. 10, Nr. 2, 2003, S. 15–17, doi:10.1109/MMUL.2003.1195157.
- [SIM01] Henri Sohier, Pascal Lamothe, Sahar Guermazi, Mouadh Yagoubi, Pascal Menegazzi, Aldo Maddaloni, „Improving simulation specification with MBSE for better simulation validation and reuse“, Systems Engineering. 2021;1–14., <https://doi.org/10.1002/sys.21594>, 2021
- [SMARTSE] „Smart Systems Engineering (SmartSE)“, <https://www.prostep.org/projekte/smart-systems-engineering/>, 2021
- [SYSML01] OMG, „SysML Org“, <http://www.omg.sysml.org/>, 2018
- [SYSML02] OMG, „ABOUT THE OMG SYSTEM MODELING LANGUAGE SPECIFICATION VERSION 1.5“, <https://www.omg.org/spec/SysML/About-SysML/>, 2018

Autoren

Prof. Dr. Markus Brandstätter^{1,2}, Dr.-Ing. Christian Bühler¹, Kim Steinkirchner¹,
Prof. Dr. Manuel Mayer²
1{markus.brandstaetter, christian.buehler, kim.steinkirchner}@prostep.com
PROSTEP AG, Systems Engineering, Taunusstraße 42, 80807 München
2{markus.brandstaetter, manuel.mayer}@fom.de
FOM Hochschule, Arnulfstraße 30, 80335 München

Additive Fertigung von Aluminiumstrukturen im SLM-Prozess: Berücksichtigung der Prozesscharakteristiken in einer Topologieoptimierung zur Unterstützung der Designfindung

Jan Holoch, Sven Lenhardt, Albert Albers

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe

1 Zusammenfassung

Die Erwartungshaltung gegenüber neuen Produkten ist nicht nur, dass diese eine kraftflussgerechte Gestaltung aufweisen, sondern auch eine hohe Designflexibilität und Individualität besitzen. Für letztere Erwartungen können additive Fertigungsverfahren wie beispielsweise das selektive Laserschmelzen (SLM) zum Einsatz kommen. Dabei stellt die Topologieoptimierung inklusive Redesign eine Möglichkeit zur Erzeugung kraftflussgerechter Strukturen dar.

Beim SLM handelt es sich um ein additives Fertigungsverfahren, welches ein Bauteil schichtweise in zwei Schritten generiert. Im ersten Schritt wird zunächst die Außenkontur des Bauteils geformt und im zweiten Schritt der innenliegende Bereich des Volumens konsolidiert. Durch diese schrittweise Aufteilung kann eine vergleichsweise hohe Konturtreue realisiert werden. Gleichzeitig bewirkt dies jedoch, dass sich aufgrund verschiedener Abkühlraten drei Bereiche (Kontur, Interface und Schraffur) mit unterschiedlichen Materialeigenschaften einstellen. Um diese Bereiche inklusive Materialeigenschaften in einer Topologieoptimierung zu berücksichtigen, wird derzeit eine Methode entwickelt, welche die Topologieoptimierung nach jeder Iteration unterbricht und das geglättete Zwischenergebnis automatisiert in die drei Bereiche unterteilt. Deren Materialeigenschaften werden anschließend zugewiesen sowie der Optimierung als Input für die Berechnung der nächsten Iteration übergeben.

Im vorliegenden Beitrag wird eine 2D-Topologieoptimierung untersucht, die den drei Bereichen unterschiedliche isotrope Materialeigenschaften nach jeder Iteration zuweist. Nach dieser Zuweisung wird die Optimierung fortgesetzt und das beschriebene Vorgehen solange wiederholt, bis die Optimierung ihr Abbruchkriterium erreicht. Damit wird der Einfluss einer solchen Unterbrechung und schichtweisen Veränderung der Materialeigenschaften auf das Ergebnis der Topologieoptimierung an einem einfachen 2D-Bauteil analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Geometrie mit möglichst großer Oberfläche entsteht, wenn im Vergleich zum Schraffurbereich im Konturbereich Materialeigenschaften mit höherem E-Modul und im Interfacebereich Materialeigenschaften mit niedrigerem E-Modul zugewiesen werden. Des Weiteren geht aus den Ergebnissen hervor, dass die korrekte Berücksichtigung der drei Bereiche in jeder Iteration der Topologieoptimierung durch die Vorgabe einer minimalen Wandstärke sichergestellt werden kann. Durch die Einbeziehung einer globalen Festigkeitsrestriktion wird es möglich, die Überschreitung einer zulässigen Maximalspannung im Konturbereich zu verhindern.

2 Motivation

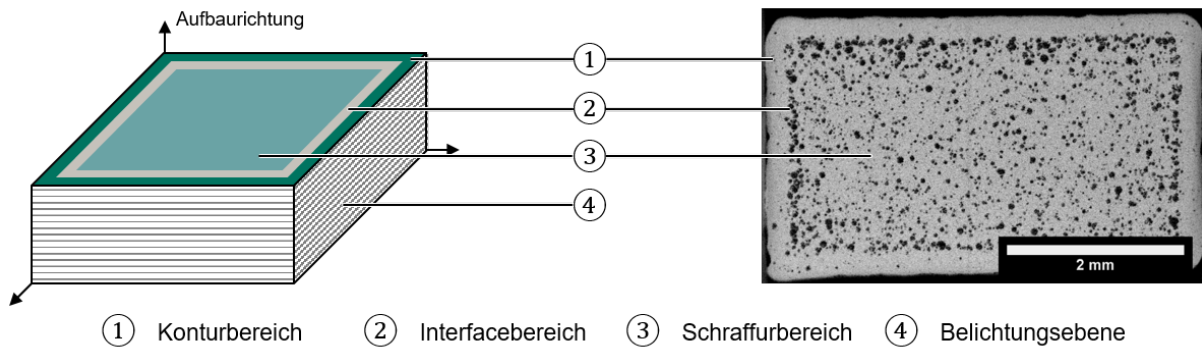
Aktuelle Trends fordern von Produkten, dass diese individueller sowie mit einer höheren Designflexibilität produziert werden können und gleichzeitig eine kraftflussgerechte Struktur aufweisen [1]. Hierfür eignen sich additive Fertigungsverfahren, da diese in einem schichtweisen Prozess Bauteile erzeugen und im Vergleich zu konventionellen Herstellprozessen keine formgebenden Werkzeuge benötigen [2]. Ein solches Fertigungsverfahren ist das SLM; es ermöglicht, kraftflussgerechte Strukturen zu fertigen, die sich zumeist in komplexen Designs widerspiegeln und weist dabei gleichzeitig eine hohe Materialausnutzung auf [3]. Damit kraftflussgerechte Strukturen für einen definierten Lastfall generiert werden können, kommen häufig numerische Optimierungsmethoden wie die Topologieoptimierung zum Einsatz. Die Verknüpfung additiver Fertigungsverfahren mit numerischen Optimierungsmethoden stellt daher eine Möglichkeit dar, bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung simulativ ge-

stützt, kraftflussgerechte Produktdesigns zu generieren. Deshalb befindet sich derzeit eine Topologieoptimierungsmethode in Entwicklung, mit dem Ziel, die vom SLM hervorgerufenen Materialeigenschaften abzubilden und in einer Topologieoptimierung iterativ zu berücksichtigen.

3 Stand der Forschung

3.1 Selektives Laserschmelzen (SLM)

Das SLM ist ein pulverbettbasiertes additives Fertigungsverfahren, das Bauteile Schicht für Schicht generiert. Dazu wird Pulver in jeder Belichtungsebene (siehe Abb. 1 a)) aufgetragen und anschließend durch einen Laser in zwei Schritten aufgeschmolzen. Im ersten Schritt wird die spätere Oberfläche (Konturbereich) und im zweiten Schritt der Innenbereich (Schraffurbereich) des entstehenden Bauteils gefertigt. Durch dieses schrittweise Vorgehen kann eine hohe Endkonturtreue direkt im Prozess erzielt werden [4]. Dieses Vorgehen führt bei industriell relevanten Prozessgeschwindigkeiten jedoch gleichzeitig aufgrund lokal unterschiedlicher Abkühlraten innerhalb des Bauteils zur Bildung von Poren [5]. Im sogenannten Interfacebereich, welcher sich zwischen Kontur- und Schraffurbereich (siehe Abb. 1 a)) ausbildet, entstehen diese Poren vermehrt. Vergleichend dazu bilden sich im Schraffurbereich deutlich weniger und im Konturbereich annähernd keine Poren aus (siehe Abb. 1 b)) [6].



a) Schematische Darstellung der drei SLM-spezifischen Bereiche

b) Visualisierung der Porenverteilung mittels CT-Scan

Abb. 1: SLM-spezifische Porenverteilung und die sich daraus ergebenden Bereiche (in Anlehnung an [7])

Im SLM entstehen somit drei Bereiche (Kontur, Interface und Schraffur), die sich durch eine unterschiedliche Porositätsverteilung ergeben. Diese führt wiederum zu variierenden mechanischen Materialeigenschaften. Hierbei gilt, eine Zunahme der Porosität resultiert in einer Verringerung der mechanischen Materialeigenschaften (E-Modul und Schubmodul) [7].

3.2 Topologieoptimierung

Zur Erzeugung eines initialen Entwurfs einer kraftflussgerechten Struktur werden häufig numerische Optimierungsmethoden wie die Topologieoptimierung eingesetzt. Diese ermöglicht die Identifikation von Lastpfaden sowie Kraftflüssen in einem definierten Design-Bereich und basiert auf der Finite-Elemente-Methode (FEM). Während der einzelnen Optimierungszyklen wird der Design-Bereich iterativ derart angepasst, dass eine lastgerechte Bauteilstruktur bei gleichzeitiger Verringerung des Volumens als Ergebnis der Topologieoptimierung entsteht [8]. Grundsätzlich lassen sich bei dichte-basierten Topologieoptimierungen zwei unterschiedliche Optimierungsansätze zur Minimierung bzw. Maximierung einer Zielfunktion, wie beispielsweise das Minimieren der Verzerrungsenergie bei definierter Volumenreduktion, einsetzen. Der optimalitätskriterienbasierte Ansatz stützt sich hierbei auf ein speziell für eine vorgegebene Zielfunktion definiertes Optimalitätskriterium. Im Vergleich hierzu beruht der sensitivitätsbasierte Ansatz auf der Berechnung und Auswertung von Sensitivitäten. Dieser Ansatz hat zum Vorteil, dass in einem Optimierungsproblem zusätzliche Restriktionen wie eine globale Festigkeitsrestriktion oder minimale Wandstärke mitberücksichtigt werden können [9]. Die Materialmodelle werden in beiden Ansätzen zu meist als isotrop und homogen über das Bauteil verteilt angenommen [10].

4 Problemstellung und Zielsetzung

Das SLM bietet ein großes Potential hinsichtlich Designflexibilität. Aufgrund des beschriebenen, schrittweisen Vorgehens beim Fertigungsprozess entstehen jedoch drei unterschiedlich stark porenbehaftete Bereiche im gefertigten Bauteil. Diese unterschiedliche Porenverteilung wirkt sich negativ auf die mechanischen Materialeigenschaften aus und beeinflusst somit auch dessen Gesamtsteifigkeit. Des Weiteren führt diese unterschiedliche Porenverteilung dazu, dass keine homogene Materialverteilung über das gesamte Bauteil vorliegt, sondern ausschließlich lokal in einem der jeweiligen drei Bereiche. Hierdurch ist deren direkte Berücksichtigung in einer standardisierten Topologieoptimierung nicht möglich.

Aus diesem Grund wird eine Topologieoptimierungsmethode entwickelt, welche die Materialeigenschaften, die sich aus den drei porenbehafteten Bereichen ergeben, während der Optimierung in jedem Designzyklus abbildet und zur Berechnung der Zielfunktion verwendet. Diese Berücksichtigung ermöglicht es, die Synergien zwischen SLM und Topologieoptimierung zielführend zu nutzen. Die Grundstruktur der Optimierungsmethode wurde bereits unter Berücksichtigung von lediglich zwei porenbehafteten Bereichen entwickelt und deren Einfluss auf das Ergebnis einer 2D-Topologieoptimierung herausgearbeitet [11]. Der hier vorliegende Beitrag widmet sich daher der Weiterentwicklung der Optimierungsmethode auf die beschriebenen drei porenbehafteten Bereiche im 2D. Außerdem wird darauf aufbauend der Einfluss verschiedener Parameter wie die zusätzliche Berücksichtigung einer minimalen Wandstärke sowie einer globalen Festigkeitsrestriktion untersucht und deren Auswirkung auf die Optimierungsergebnisse analysiert.

5 2D-Topologieoptimierungsmethode

Das initiale Finite-Elemente (FE) Modell, welches die relevanten Randbedingungen beinhaltet und das zu fertige Bauteil beschreibt, dient als Ausgangslage für die in Abaqus ablaufende Topologieoptimierung [11]. Damit die sich aus den porenbehafteten Bereichen ergebenden Materialeigenschaften während dieser Optimierung einbezogen werden können, ist es notwendig, die Optimierung in jedem Designzyklus zu unterbrechen [12]. Dabei wird zunächst während jeder Unterbrechung das aktuelle Zwischenergebnis der Optimierung mittels Tosca Structure geglättet und als FE-Netz exportiert (siehe Abb. 2 a)). Darauf aufbauend wird dieses geglättete FE-Netz mithilfe von Abaqus in eine 2D-Geometrie übersetzt (siehe Abb. 2 b)). Anschließend erfolgt die Berechnung von zwei Offsets auf Basis der übersetzten 2D-Geometrie (siehe Abb. 2 c)). Diese Offsets beschreiben jeweils die Grenzen zwischen zwei der porenbehafteten Bereiche: Die türkisfarbenen Polygone definieren die Grenzen zwischen Kontur- und Interfacebereich, während die grauen Polygone die Grenzen zwischen Interface- und Schraffurbereich festlegen. Anhand dieser Grenzen wird zuletzt die 2D-Geometrie partitioniert und die drei porenbehafteten Bereiche sowie deren Materialeigenschaften anhand einer Materialdatenbank zugewiesen (siehe Abb. 2 d)) [11].

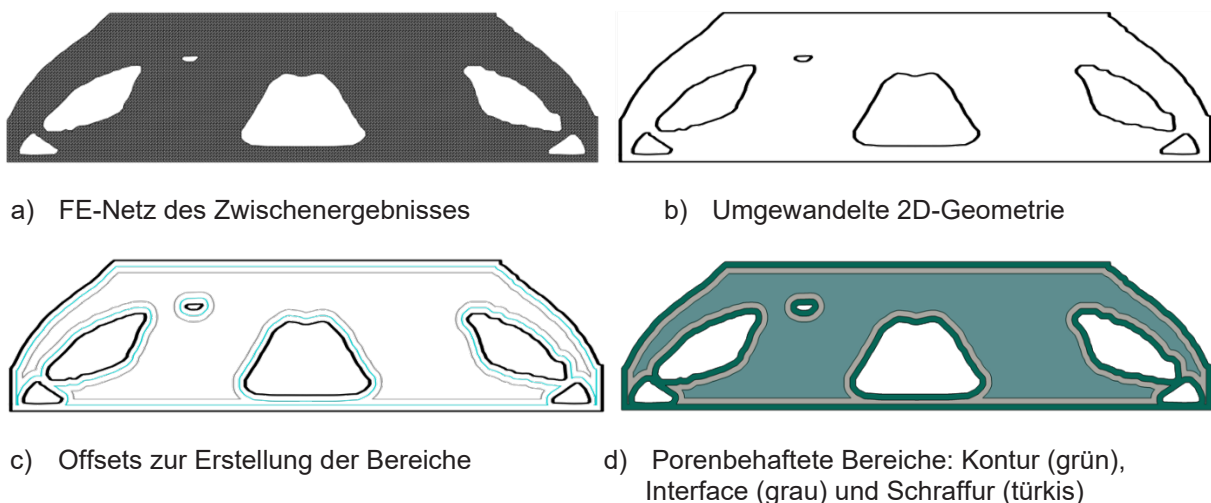


Abb. 2: Ablauf zur Bestimmung der porenbehafteten Bereiche

Da die Topologieoptimierung stets das initiale FE-Netz (siehe Abb. 3 a)) zur Berechnung der nächsten Iteration heranzieht, werden die auf Basis des Zwischenergebnisses bestimmten porenbehafteten Bereiche sowie deren Materialeigenschaften auf das initiale FE-Netz übertragen. Hierzu kommt die Software MpCCI Mapper zum Einsatz, welche vom Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen (SCAI) entwickelt wurde und die Materialeigenschaften des Zwischenergebnisses (siehe Abb. 2 d)) auf das initiale FE-Netz der Topologieoptimierung (siehe Abb. 3 b)) überträgt. Die drei porenbehafteten Bereiche werden durch das Mapping an den jeweils definierten Stellen auf das initiale FE-Netz übertragen (siehe Abb. 3 b)) und zur Berechnung der nächsten Iteration herangezogen. Die Regionen, an denen das Zwischenergebnis keine FE enthält, entsprechen jenen Stellen im ursprünglichen Bauteil, die zur Kraftleitung lediglich einen geringen Beitrag leisten und somit durch die Topologieoptimierung entfernt werden. Diese Stellen werden während des Mapping durch einen E-Modul von näherungsweise 0 MPa (blau markierte Elemente in Abb. 3 b)) im initialen FE-Netz abgebildet. [11]

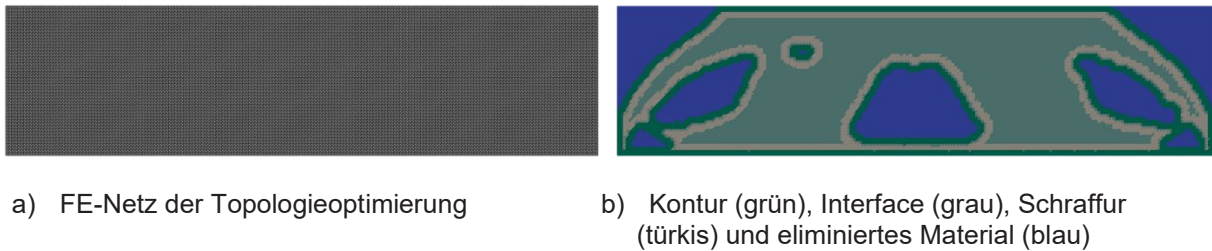


Abb. 3: Übertragung der porenbehafteten Bereiche sowie deren Materialeigenschaften auf das initiale FE-Netz der Topologieoptimierung

Das beschriebene Vorgehen wird in jeder Iteration durchgeführt, bis das Konvergenzkriterium oder eine definierte Anzahl an Iterationen erreicht ist und somit ein optimiertes Design vorliegt. Die dafür notwendigen und zuvor erläuterten Schritte sowie der Ablauf der entwickelten, prozessbasierten Topologieoptimierung sind in Abb. 4 dargestellt.

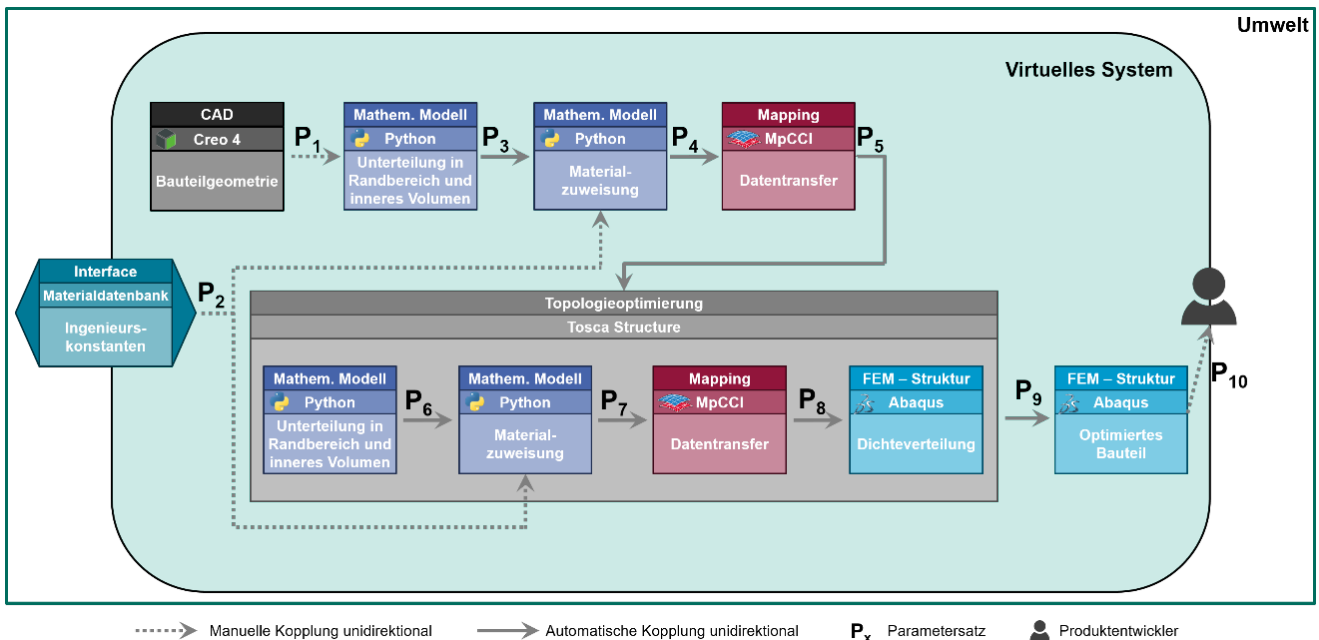


Abb. 4: Methode zur Topologieoptimierung unter Berücksichtigung von im SLM hervorgerufenen, porenbehafteten Bereiche

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Modellaufbau

Um den Einfluss der im SLM entstehenden drei Bereiche in der Topologieoptimierung zu untersuchen, kommt ein einfacher 2D-Biegebalken als FE-Modell zum Einsatz. Dieser ist durch eine Fest-Los-Lagerung an den unteren beiden Eckpunkten gelagert und wird durch eine vorgegebene Kraft F in Höhe von 1000 N mittig auf der oberen Kante des Balkens belastet (siehe Abb. 5).

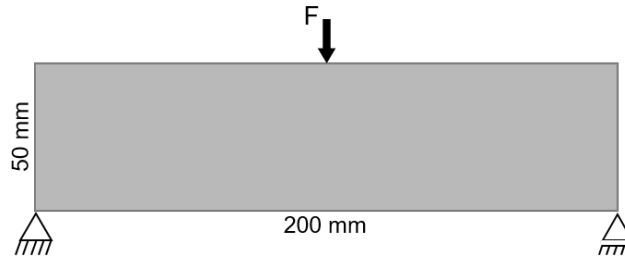


Abb. 5: 3-Punkt-Biegebalken inkl. Abmaßen, Lagerung und Belastung

Der sensitivitätsbasierte Ansatz wird für die Optimierung gewählt, da hierdurch zusätzliche Randbedingungen wie eine minimale Wandstärke oder eine globale Festigkeitsrestriktion einbezogen werden können. Zur Vernetzung des FE-Modells werden Dreieckselemente mit quadratischer Ansatzfunktion gewählt. Die globale Elementkantenlänge wird als 0,5 mm definiert, da der Kontur- und Interfacebereich mit jeweils 1 mm Dicke vorgegeben werden und somit durch die Wahl von 0,5 mm als Elementkantenlänge gewährleistet werden kann, dass in jedem der porenbehafteten Bereiche mindestens zwei Elemente über die Dicke hinweg vorliegen. Als Material wird im Schraffurbereich AlSi10Mg mit einem E-Modul von 70 GPa und Schubmodul von 26 GPa eingesetzt. Der Konturbereich weist einen ca. 3,5 % höheren E-Modul und Schubmodul (72,5 GPa und 27 GPa) auf. Der Interfacebereich wird hingegen mit einem ca. 10 % niedrigeren E-Modul und Schubmodul (63 GPa und 23,5 GPa) definiert. Dieses Verhältnis konnte aus Versuchen zur Materialcharakterisierung abgeleitet werden. Da in diesem Beitrag der grundsätzliche Einfluss der iterativen Berücksichtigung der drei Bereiche im Fokus steht, werden die jeweiligen Materialeigenschaften als isotrop angenommen.

6.2 Optimierungsparameter

Als Zielfunktion kommt für die Optimierung die Maximierung der Steifigkeit bei vorgegebener Volumenreduktion auf ein relatives Endvolumen von 40 % zum Einsatz. Dabei werden die drei nachfolgenden Fälle untersucht:

- Optimierungsfall 1: Optimierung ausschließlich auf Steifigkeit
- Optimierungsfall 2: Optimierung auf Steifigkeit unter Berücksichtigung einer minimalen Wandstärke
- Optimierungsfall 3: Optimierung auf Steifigkeit unter Berücksichtigung einer Festigkeitsrestriktion und einer minimalen Wandstärke

Als Benchmark für die drei Optimierungsfälle wird eine Standard-Topologieoptimierung nach dem Stand der Technik ohne Wissen aus den Experimenten zum Fertigungsprozess bzw. den drei porenbehafteten Bereichen verwendet. Dieser Benchmark wird auch ohne die Berücksichtigung einer minimalen Wandstärke durchgeführt, da diese sich erst aus den Experimenten ergab.

Bei den Optimierungsfällen 2 und 3 wird für die entwickelte Optimierungsmethode eine minimale Wandstärke als Restriktion eingesetzt. Diese wird mit 5 mm angenommen und lässt sich darauf zurückführen, dass an jeder Stelle im Bauteil über die Dicke hinweg zweimal der Kontur- und Interfacebereich sowie ein dazwischenliegender Schraffurbereich existieren muss, um die aus dem SLM resultierenden Bereiche korrekt abzubilden. Für den Optimierungsfall 3 unter Festigkeitsrestriktion wird eine maximal zulässige Spannung von 230 MPa angenommen, die sich aus Experimenten ergab.

Alle drei Optimierungsfälle werden sowohl anhand der vorgestellten Optimierungsmethode unter iterativer Berücksichtigung der drei porenbehafteten Bereiche inklusive dazugehörigen Materialeigenschaften als auch ohne deren Berücksichtigung, mittels einer Standard-Topologieoptimierung (Benchmark), durchgeführt. Letztere erhält hierbei die isotropen Materialeigenschaften des Schraffurbereichs als Input.

6.3 Statische FE-Analyse

Um die Ergebnisse der Topologieoptimierungen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ vergleichen zu können, wird im Anschluss an jede abgeschlossene Topologieoptimierung eine statische FE-Analyse durchgeführt. Als Input hierfür dienen die resultierenden Designs, die sich aus den Optimierungen ergeben. Als Randbedingungen und Lasten kommen dieselben wie zuvor für die Optimierungen zum Einsatz. Für jede statische FE-Analyse werden analog zum Vorgehen aus Kapitel 5 die porenbehafteten Bereiche erfasst und mithilfe von MapLib die sich daraus ergebenden Materialeigenschaften auf ein FE-Netz übertragen. Dieses FE-Netz weist im Vergleich zu den Optimierungen eine feinere Vernetzung auf, da dadurch Ungenauigkeiten beim Mapping reduziert werden können [7].

Neben den resultierenden Designs der entwickelten Optimierungsmethode bekommen auch die Designs der Standard-Topologieoptimierung die porenbehafteten Bereiche inklusive Materialeigenschaften nun zugewiesen, um auch hier den Fertigungsprozess abzubilden. Dies geschieht ebenfalls analog zum beschriebenen Vorgehen aus Kapitel 5. Zum quantitativen Vergleich der Designs aus den Topologieoptimierungen wird die Strain Energy herangezogen, welche der vom System aufgenommenen elastischen Energie entspricht [7]. Bei einer vorgegebenen Kraft ist eine geringere Strain Energy mit einer größeren Bauteilsteifigkeit gleichzusetzen. Des Weiteren wird für den Optimierungsfall 3 die maximal vorherrschende Spannung in den resultierenden Designs untersucht. Dadurch kann beurteilt werden, ob sowohl die Standard-Topologieoptimierung als auch die entwickelte Optimierungsmethode zu keiner Überschreitung der zulässigen Spannungen führt.

6.4 Optimierungsergebnisse

Die Ergebnisse der drei Optimierungsfälle werden nachfolgend vorgestellt. Dabei werden jeweils die resultierenden Designs der Standard-Topologieoptimierungen sowie der unter Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche gegenübergestellt und unter Einbeziehung der Ergebnisse aus den statischen FE-Analysen diskutiert. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Standard-Topologieoptimierungen (siehe Abb. 6 a) und 8 a)) bereits die für die statischen FE-Analysen notwendigen Materialzuweisungen der drei Bereiche (Kontur: grün, Interface: grau, Schraffur: türkis) enthält, auch wenn diese in der Optimierung selbst keine Berücksichtigung fanden. Diese dienen der besseren Veranschaulichung und Bewertung der Ergebnisse.

Optimierungsfall 1

Zunächst werden die resultierenden Designs von Optimierungsfall 1 für die Standard-Topologieoptimierung (siehe Abb. 6 a)) sowie die Topologieoptimierung unter Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche (siehe Abb. 6 b)) visualisiert und diskutiert.

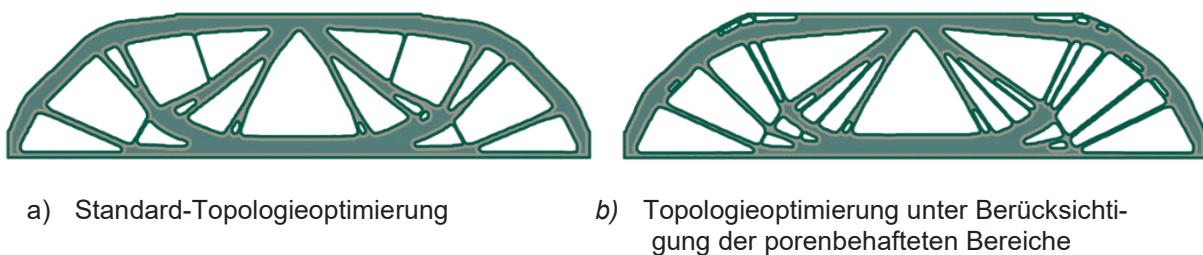


Abb. 6: Resultierende Designs für Optimierungsfall 1 inkl. Darstellung der SLM-spezifischen Materialbereiche

Aus dem Ergebnis der Standard-Topologieoptimierung (siehe Abb. 6 a)) geht hervor, dass diese eine Art Fachwerkstruktur als optimiertes Design erzeugt. Zudem wird ersichtlich, dass viele große und nur wenige kleine Aussparungen entstehen. Dies lässt sich auf den einachsigen Biegelastfall zurückführen und spiegelt ein klassisches Design für Biegebeanspruchungen wider [8]. Im Gegensatz hierzu zeigen die Ergebnisse der Optimierung unter iterativer Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche (siehe Abb. 6 b)), dass deutlich vermehrt kleine Aussparungen und zusätzlich viele sehr dünne Streben im Vergleich zur Standard-Topologieoptimierung erzeugt werden. Diese beiden Auffälligkeiten tragen dazu bei, dass die Oberfläche des Designs vergrößert wird und somit mehr Material im Konturbereich vorliegt. Diese Vergrößerung der Oberfläche lässt sich auf die verbesserten Materialeigenschaften im Konturbereich zurückführen und wird daher vom Optimierer bevorzugt. Außerdem wird der Anteil des Interfacebereichs, der den niedrigsten E-Modul aufweist, durch die sehr dünnen Streben, welche lediglich aus Konturbereich bestehen, reduziert. Es lässt sich somit festhalten, dass in Optimierungsfall 1 ein Maximieren des Konturbereichs bei gleichzeitigem Minimieren des Interfacebereichs stattfindet. Dieses Vorgehen

des Optimierers ist plausibel, da verbesserte Materialeigenschaften zu einer verbesserten Gesamtsteifigkeit im Bauteil führen.

Durch die statische Analyse kann dieser Effekt der verbesserten Gesamtsteifigkeit verdeutlicht werden. Hierbei ergibt sich für die volumenspezifische Strain Energy [mJ/mm^3] eine Steigerung der Gesamtsteifigkeit des optimierten Balkens unter Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche um ca. 2 % bei gleichbleibendem Materialeinsatz, lediglich durch dessen gezielte Verteilung im Balken.

Als Folge der vorgestellten restriktionsfreien Optimierung und der damit verbundenen Vergrößerung der Oberfläche, entstehen jedoch vermehrt Regionen im Balken, die ausschließlich aus Konturbereich bestehen. Dies führt dazu, dass die im SLM stets hervorgerufenen drei Bereiche nicht im gesamten Balken eingehalten werden und spiegeln somit die Realität nicht wider. Um diesen Unterschied gegenüber dem realen Fertigungsprozess einzuschränken, wird in Optimierungsfall 2 eine minimale Wandstärke von 5 mm (siehe Kapitel 6.2) definiert. Dadurch soll gewährleistet werden, dass stets alle drei porenbehafteten Bereiche im optimierten Design vertreten sind.

Optimierungsfall 2

Der Einfluss einer solchen minimalen Wandstärke zeigt das resultierende Design des Balkens unter Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche (siehe Abb. 7). Aus dem Ergebnis geht hervor, dass wie bereits zuvor eine Art Fachwerkstruktur erzeugt wird, im Vergleich zu Abb. 6 b) jedoch mit deutlich dickeren Streben und weniger Aussparungen. Dies lässt sich auf die Vorgabe der minimalen Wandstärke zurückführen. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass durch die Vorgabe der minimalen Wandstärke in fast allen Regionen im resultierenden Design die drei porenbehafteten Bereiche vorliegen und somit die Realität abgebildet wird. Lediglich an wenigen Ausnahmen (siehe schwarze Markierungen in Abb. 7) existiert kein Schraffurbereich. Dies könnte durch die minimale Wandstärke in Verbindung mit der vorgegebenen Volumenreduktion auf 40 % verursacht werden, denn durch diese Vorgaben hat der Optimierer einen geringeren Spielraum zur Verteilung des Volumens und füllt zunächst die Hauptlastpfade. Dadurch bleibt für weniger stark belastete Bereiche nicht genügend Volumen, um die vorgegebene Wandstärke zu erreichen. Durch die Anpassung der Volumenreduktion auf bspw. 45 % lässt sich dieses Phänomen beseitigen.



Abb. 7: Resultierendes Design für Optimierungsfall 2 inkl. Darstellung der SLM-spezifischen Materialbereiche für die Topologieoptimierung unter Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche

Die Auswertung der statischen FE-Analyse zeigt, dass durch die Vorgabe der minimalen Wandstärke nun eine ca. 1 % höhere volumenspezifische Strain Energy gegenüber dem Ergebnis aus Abb. 6 a) erzeugt wird und somit die Gesamtsteifigkeit abnimmt. Dies ist nachvollziehbar, da der Optimierer deutlich weniger Spielraum zur Verteilung des Volumens durch die minimale Wandstärke zur Verfügung hat. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass das Ergebnis aus Abb. 6 a) viele Regionen enthält, welche lediglich aus Konturbereich bestehen, welcher eine höhere Materialsteifigkeit aufweist.

Optimierungsfall 3



a) Standard-Topologieoptimierung

b) Topologieoptimierung unter Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche

Wie bereits bei den beiden zuvor dargestellten Optimierungsfällen, entsteht erneut eine Art Fachwerkstruktur als Ergebnis der Optimierung. Abb. 8 a) ähnelt stark dem Ergebnis aus Abb. 6 a), beinhaltet jedoch eine geringere Anzahl an sehr dünnen Streben sowie kleinen Aussparungen. Dies ist auf die vom Optimierer angestrebte, homogenere Verteilung der Spannung zurückzuführen. Außerdem weist das Ergebnis aus Abb. 8 a) ebenfalls Regionen auf, die lediglich aus Konturbereich oder der Kombination aus Kontur- und Interfacebereich bestehen. Das Ergebnis aus Abb. 8 b), welches unter Berücksichtigung einer minimalen Wandstärke erzeugt wurde, weist wie das Ergebnis aus Abb. 7 ausschließlich dicke Streben und nur wenig kleine Aussparungen auf. Des Weiteren zeigt Abb. 8 b), dass durch die vorgegebene minimale Wandstärke ebenfalls wie in Abb. 7 fast alle Regionen aus den drei porenbehafteten Bereichen aufgebaut sind. Beim Vergleich der beiden Ergebnisse aus Abb. 8 fällt auf, dass das resultierende Design in Abb. 8 b) keine gerade untere Kante aufweist, sondern Einkerbungen besitzt. Aus der Auswertung der statischen FE-Analysen geht hervor, dass wie bereits bei Optimierungsfall 2 das Ergebnis des entwickelten Optimierungsverfahrens (siehe Abb. 8 b)) eine höhere volumenspezifische Strain Energy (ca. 3 %) im Vergleich zur Standard-Topologieoptimierung (siehe Abb. 8 a)) aufweist und somit ebenfalls eine geringere Gesamtsteifigkeit besitzt. Dies lässt sich ebenfalls auf die vorgegebene minimale Wandstärke beim entwickelten Optimierungsverfahren zurückführen. Werden jedoch die in den resultierenden Designs auftretenden maximalen Spannungen ausgewertet, wird ersichtlich, dass durch die iterative Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche während der Optimierung der maximal zulässige Spannungswert von 230 MPa nicht überschritten wird. Im Vergleich hierzu zeigt die statische FE-Analyse des Designs aus der Standard-Topologieoptimierung (siehe Abb. 8 a)), dass an einigen Stellen im Bauteil der maximale Spannungswert überschritten wird. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass durch das Mapping der drei porenbehafteten Bereiche auf das Design der Standard-Topologieoptimierung vor allem durch den Konturbereich höhere E-Module am Rand vorliegen und dadurch die maximal zulässige Spannung überschritten wird. Somit lässt sich festhalten, dass durch die direkte Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche in der Topologieoptimierung einer Überschreitung der maximal zulässigen Spannung entgegengewirkt werden kann.

7 Fazit und Ausblick

Während das SLM eine hohe Designflexibilität aufweist, bringt dieses prozessbedingt jedoch drei porenbehaftete Bereiche im Endbauteil mit sich. Um diese bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung gezielt bei der Wahl eines Designs zu berücksichtigen, stellt dieser Beitrag eine 2D-Topologieoptimierungsmethode vor. Hierbei werden die porenbehafteten Bereiche inklusive deren Materialeigenschaften, im Beitrag als isotrop angenommen, iterativ in einer 2D-Topologieoptimierung berücksichtigt. Hierzu ist es notwendig, die Optimierung zunächst nach jeder Iteration zu unterbrechen und das geglättete Zwischenergebnis zu exportieren. Anschließend erfolgt darauf aufbauend die Berechnung der drei porenbehafteten Bereiche sowie die Zuweisung der Materialeigenschaften. Zuletzt werden die Materialeigenschaften auf das ursprüngliche Optimierungsnetz gemappt und stehen somit dem Optimierer für die Berechnung der nächsten Iteration zur Verfügung.

Dieser Beitrag zeigt, dass durch die vorgestellte Methode die gezielte Berücksichtigung der Bereiche zuverlässig auf beliebige Bauteile anwendbar ist. Diese Berücksichtigung führt zu einer Maximierung der Oberfläche eines Bauteils. Dies resultiert in steiferen Designs unter gleichem Materialeinsatz im Vergleich zu einer Standard-Topologieoptimierung, sofern rein auf Steifigkeit ohne Restriktion optimiert wird. Um stets alle drei porenbehafteten Bereiche in der Optimierung vorliegen zu haben, kann die Restriktion einer minimalen Wandstärke eingeführt werden. Hierdurch wird weiterhin die Oberfläche maximiert. Allerdings führt diese Restriktion zu einer Beschränkung in der Freiheit des Optimierers und die Steifigkeit fällt gegenüber der Standard-Topologieoptimierung geringer aus. Wird in den Optimierungen zusätzlich noch eine globale Festigkeitsrestriktion eingeführt, kann festgehalten werden, dass zwar erneut geringere Steifigkeiten mit dem entwickelten Optimierungsverfahren erzeugt werden, allerdings werden die maximal zulässigen Spannungen im Vergleich zur Standard-Topologieoptimierung nicht überschritten. Dies führt zu dem Schluss, dass durch die Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche der Fertigungsprozess bereits in der Optimierung einbezogen und somit näher zur Realität abgebildet werden kann. Des Weiteren wird durch diese Berücksichtigung ein Design erzeugt, welches die maximal zulässigen Spannungen nicht überschreitet.

Künftig werden die Materialeigenschaften der porenbehafteten Bereiche nicht als isotrop angenommen, sondern mit den Ergebnissen aus experimentellen Versuchen modelliert. Außerdem sollen entstehende Überhänge bei der Bauteilfertigung gesondert betrachtet und modelliert werden. Darüber hinaus soll untersucht werden, ob sich die Erkenntnisse aus den 2D-Optimierungen auch auf 3D-Optimierungen übertragen lassen.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „SLM-Topo: Entwicklung einer prozessspezifischen Topologieoptimierungsmethode für die additive Fertigung von Leichtbaustrukturen am Beispiel des SLM-Verfahrens“ (Projektnummer: 399233791), das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird. Die Unterstützung durch die DFG wird dankbar anerkannt.

8 Literatur

- [1] Brecher, C., Kozielski, S., Schnapp, L. (2011). Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. In: *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland*. Springer: Berlin, Heidelberg, 47–70.
- [2] Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B. (2016). Design for Additive Manufacturing. Trends, opportunities, considerations, and constraints. In: *CIRP annals 65*, 737–760.
- [3] Lippert, R. B. (2018). Restriktionsgerechtes Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile für das selektive Laserstrahlschmelzen. TEWISS Verlag.
- [4] Gebhardt, A. (2016). Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. Hanser Verlag: München.
- [5] Kruth, J.-P., Badrossamay, M., Yasa, E., Deckers, J., Thijs, L., Humbeeck, J. (2010). Part and material properties in selective laser melting of metals. In: *16th International Symposium on Electromachining, I-SEM 2010*.
- [6] Holoch, J., Czink, S., Spadinger, M., Dietrich, S., Schulze, V., Albers, A. (2020). SLM-Topo – Prozessspezifische Topologieoptimierungsmethode für im Selektiven Laserschmelzen gefertigte Leichtbaustrukturen: In: *Industrie 4.0 Management (04)*. 45–49.
- [7] Holoch, J., Lenhardt, S., Albers, A. (2021). Investigation on the influence of different modeling of multiple surface layers on a 3D topology optimization. In *NAFEMS World Congress*. Salzburg.
- [8] Bendsøe, M. P., Sigmund, O. (2003). *Topology Optimization. Theory, Methods and Applications*: Springer Science & Business Media.
- [9] Dassault Systèmes (2017). SIMULIA User Assistance 2017. https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/DSSIMULIA_Established.htm. Accessed 10 July 2021.
- [10] Harzheim, L. (2014). *Strukturoptimierung. Grundlagen und Anwendungen*: Verlag Europa-Lehrmittel.
- [11] Holoch, J., Träger, L., Albers, A. (2020). SLM-Topo – Einfluss unterschiedlicher Modellierung von Rand-schicht und innerem Volumen auf eine 2D-Topologieoptimierung: In: *NAFEMS Virtuelle DACH Konferenz*. 106–109.
- [12] Albers, A., Holoch, J., Dietrich, S., Spadinger, M. (2018). SLM-Topo – A topology optimization method for additive manufacturing of lightweight design structures using the selective laser melting process: In: *NAFEMS Nordic Seminar: Exploring the Design Freedom of Additive Manufacturing through Simulation*. Helsinki.



Professional Simulation Engineer

It's Time
to Get Certified

nafems.org/pse



Join Us

WE ARE NAFEMS

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
- Education and Training
- Geotechnics
- High Performance Computing
- Impact, Shock & Crash
- Manufacturing Process Simulation
- Multibody Dynamics
- Multiphysics
- Optimisation
- Simulation Data Management
- Simulation Governance and Management
- Stochastics
- Systems Modeling & Simulation

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

Werden auch Sie mit Ihrem Unternehmen NAFEMS-Mitglied!

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

Mitglieder erhalten unter anderem:

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

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

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

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

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

Establish best practice in engineering simulation

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

Promote collaboration and communication

Act as an advocate for the deployment of simulation

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

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

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

Why Join?

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

Better Collaboration

BUILD LASTING BUSINESS ALLIANCES

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

EXCHANGE KNOWLEDGE & EXPERIENCE

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

LEARN ABOUT THE RESOURCES AVAILABLE

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

ENHANCE YOUR COMPANY'S VISIBILITY WORLDWIDE

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

Increased Productivity

OPTIMIZE THE DESIGN PROCESS

Learn about potential pitfalls and pick up time saving techniques.

MINIMISE COSTLY PHYSICAL TESTING

Increase confidence in your company's engineering simulation capabilities.

Improved Quality

BE COMMITTED TO THE HIGHEST STANDARDS

NAFEMS membership reinforces your focus on best practice.

BENCHMARK YOUR ORGANISATION'S SIMULATION PROCESS

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

Enhanced Innovation

DEVELOP YOUR SKILLS WITH THE LATEST ENGINEERING SIMULATION TECHNIQUES

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

BE AT THE FOREFRONT

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

PRODUCE BETTER-ENGINEERED PRODUCTS WITH ENHANCED CUSTOMER SATISFACTION

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

Membership Levels

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

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

Technical Working Groups

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

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

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

Technical working groups currently include:

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

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

Nafems Events

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

World Congress

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

Conferences

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

Seminar

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

Webinars

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

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

PSE

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

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

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



THE PSE CERTIFICATION STANDARD

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

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

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

PSE CERTIFICATION HAS BEEN DESIGNED TO:

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

NAFEMS Training

CLASSROOM COURSES | E-LEARNING | IN-HOUSE TRAINING

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

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

QUALITY

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

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.

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.

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

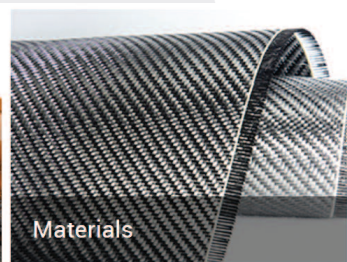
There are currently over 1,500 resources in the centre with this number growing weekly. NAFEMS Members have access to numerous types of resource as part of their membership, including presentations from previous events, conference papers, webinar archives, and much more.



Analysis Management



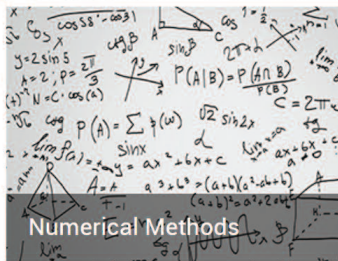
Industry & Products



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.

Analysis Management Robust Design Durability Multi-Scale Multi-Body Additive Manufacturing Dynamics & Testing Simulation Data Management Optimization Composites Manufacturing Processes Interoperability Analysis Management FEA CFD HPC Robust Design Durability Dynamics & Testing Composites Manufacturing Processes Simulation Data Management FSI Acoustics Analysis Management FEA CFD HPC Robust Design Durability Dynamics & Testing Composites Manufacturing Processes Simulation Data Management Linear Joints & Connections CFD FEA Composites CFD HPC FSI FEA CFD HPC FSI Interoperability Linear Fatigue & Fracture Multi-Body Joints & Connection Methods Additive Manufacturing CFD Robust Design Nonlinear Fatigue & Fracture Stochastics Dynamics & Testing Electromagnetics FSI HPC Fatigue & Fracture Optimization Nonlinear Durability Stochastics HPC Nonlinear Durability Stochastics Optimization

We are NAFEMS



The International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community

nafems.org