Bezug kostenlos - ISSN 2311-522X

Juni/Juli 2021 – Nr. 2/2021, 58. Ausgabe

NAFEMS

Online-Magazin

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

Über 540 eingereichte Abstracts!
Neu: Mit Automotive Symposium

nwc2021
NAFEMSWORLDCONGRESS
25-29 OCTOBER | SALZBURG | AUSTRIA
A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION

incorporating
spdm
INTERNATIONAL CONFERENCE
Simulation Process & Data Management

Multiphysics Simulation Conference

Fachbeiträge

STRUKTURDYNAMIK

- **Probabilistische Ermüdungs- und Zuverlässigkeitssimulation**

VIRTUELLE PRODUKT-ENTWICKLUNG

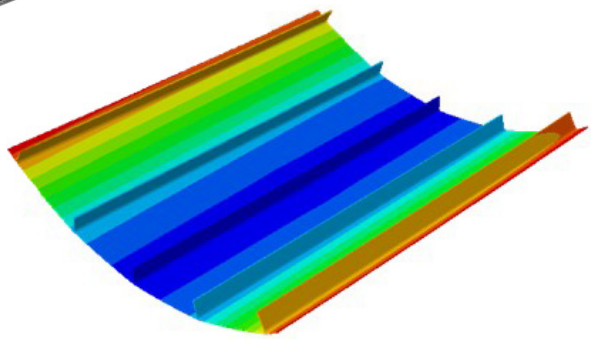
- **Strategie zur anwendergerechten Bestimmung kontextsensitiver neuronaler Netztopologien für Optimierungsaufgaben in der virtuellen Produktentwicklung**

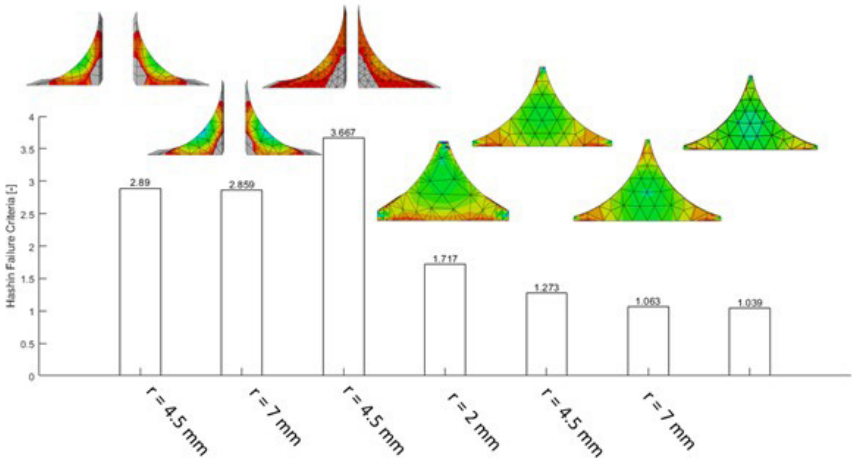
RAPID PROTOTYPING

- **Automatisierte Fertigbarkeits-prüfung im Rapid-Prototyping durch künstlich intelligente RBF-Netze**

COMPOSITES

- **Analyse von Eigenspannungen in Hochtemperatur-Faserverbund-bauteilen durch Simulation des Herstellungsprozesses**





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

Sponsoren dieser Ausgabe:

BETA SIMULATION SOLUTIONS
SIMULIA
esi get it right®
HEXAGON
MSC Software
CADFEM®
DYNAMORE
INTES

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

Prof. Dr.-Ing.
Klaus Rohwer

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

seit nunmehr über 15 Jahren stellen das Herausgeber-Team und die Redaktion jedes Jahr bis zu vier Ausgaben des NAFEMS Online Magazins ins Netz. Dieses Magazin ist für Sie frei verfügbar. Ihr Interesse zeigt uns, dass es für Sie wertvoll ist, auch wenn es nichts kostet. Aber natürlich ist die Herstellung nicht kostenfrei. Wir danken besonders den Sponsoren, ohne deren finanzielle Beiträge dieses Magazin nicht erscheinen könnte. Zentraler Kern des Magazins war von Beginn an eine Auswahl wissenschaftlicher Beiträge aus dem Bereich der numerischen Simulation. Das ist auch in diesem Heft der Fall. Der Kern wird ergänzt durch Informationen über NAFEMS Events, Neuigkeiten aus der Welt der Simulation und durch einen Veranstaltungskalender. Ich gehe davon aus, dass damit auch weiterhin für jeden von Ihnen etwas Lesenswertes dabei ist. Das bedeute aber nicht, dass die Zusammensetzung für alle Zeit festgelegt sein muss; wir sind für Verbesserungsvorschläge von Ihrer Seite offen.

Das vorliegende Heft Nr. 2/2021 enthält vier aktuelle Fachbeiträge. In der Strukturdynamik wird die Auslegung auf Betriebsfestigkeit traditionell deterministisch unter Verwendung angemessener Sicherheitsfaktoren durchgeführt. Demgegenüber zeigt der erste Beitrag die Vorteile einer Monte-Carlo Simulation mit Latin Hypercube Sampling, um simulierte Zuverlässigkeitstests auf Basis von Standardmodellen mit finiten Elementen zu erzielen. Für die virtuelle Produktentwicklung bietet der Einsatz künstlicher Intelligenz erhebliche Vorteile. In dem zweiten Beitrag wird dazu eine Strategie entwickelt, mit der man eine optimale Topologie des neuronalen Netzes erreicht. Auch der dritte Beitrag hat den Einsatz neuronaler Netze zum Inhalt. 3D-Drucktechniken erlauben erhebliche Freiheiten im Entwurf, aber gewisse Grenzen werden in jedem Fall durch die Fertigbarkeit gezogen. Neuronale Netze ermöglichen es, das Verhalten des zu fertigenden Produktes in ein Metamodell zu überführen, das diese Grenzen als Restriktionen einer Optimierungsaufgabe berücksichtigen kann. Der vierte Beitrag beschäftigt sich mit Eigenspannungen in Hochtemperatur-Faserverbundbauteilen. Faser-Kunststoff-Verbunde müssen unter besonders hohen Temperaturen ausgehärtet werden, wenn sie im Hochtemperaturbereich eingesetzt werden sollen. Abkühlung nach der Härtung und chemischer Schrumpf können bereits in der unbelasteten Struktur zu Schäden führen. Der Beitrag präsentiert ein Simulationsmodell, mit dessen Hilfe dieser Gefahr durch ein geeignetes Design entgegengewirkt werden kann.

Ich hoffe und wünsche mir, dass diese Auswahl auch Ihr Interesse weckt, Ihnen Anregungen bietet und vielleicht sogar bei Ihren aktuellen Problemen weiterhilft.

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:

BETA SIMULATION SOLUTIONS

www.beta-cae.com

CADFEM®

www.cadfem.net/de

SIMULIA

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

DYNA MORE

www.dynamore.de

esi get it right®

www.esi-group.com

INTES

www.intes.de

HEXAGON | MSC Software

www.mscsoftware.com

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

NAFEMS Events
Übersicht: Konferenzen, Schulungen, e-learnig Kurse 5
Integration von Simulation und Test in der Produktentwicklung 6
NAFEMS World Congress 2021 8

NAFEMS Trainings
Technical Communities 10
Classroom online, E-learning, Learning Hub 12
Verification and Validation in Engineering Simulation 14
Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie 16
NEU: Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear 17
Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation 18
NEU: Automatic Optimization for Efficient Development 19
Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis 20
Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung 21

NAFEMS Literatur
Benchmark Magazin 22

Analysis Agenda Survey 23

ITEA 3 VMAP Projekt 24

Neuigkeiten 26

Veranstaltungskalender 30

Fachbeiträge

Strukturdynamik
Probabilistische Ermüdungs- und Zuverlässigkeitssimulation ... 31
A. Halfpenny, A. Chabod, S. Vervoort (HBK);
M. Bonato (Valeo Thermal Systems)

Virtuelle Produktentwicklung
Strategie zur anwendergerechten Bestimmung kontext-sensitiver neuronaler Netztopologien für Optimierungs-aufgaben in der virtuellen Produktentwicklung 40
A. Nüßgen, M. Ruschitzka (TH Köln)

Rapid Prototyping
Automatisierte Fertigbarkeitsprüfung im Rapid-Prototyping durch künstlich intelligente RBF-Netze 47
F. Richter, M. Ruschitzka (TH Köln);
P. Gust, A. Schumacher (Univ. Wuppertal)

Composites
Analyse von Eigenspannungen in Hochtemperatur-Faser-verbundbauteilen durch Simulation des Herstellungs-prozesses 54
N. Gort, L. Amirova, M. Grob, C. Brauner (FH Nordwestschweiz)

Über NAFEMS
Übersicht und Ziele 66
Mitglied werden 68
Mitgliedsmodelle 69
Technische Arbeitsgruppen 70
Veranstaltungen 71
PSE - Professional Simulation Engineer Zertifizierung 65/72
Training 73
Resource Centre 74
Publikationen 75

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 01.01.2021

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

Copyright © 2021, Werbos GbR.
Nachdruck – auch auszugsweise -, Vervielfältigung oder sonstige Verwertung ist nur mit schriftlicher Genehmigung unter ausdrücklicher Quellenangabe gestattet. Gekennzeichnete Artikel stellen die Meinung des Autors, nicht unbedingt die Meinung der Redaktion 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 veröffentlichte Manuskripte bleibt. Eine Haftung für die Richtigkeit der Veröffentlichungen kann trotz Prüfung durch die Redaktion vom Herausgeber nicht übernommen werden.

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

ISSN 2311-522X

Konferenzen/Seminare in DACH

Integration von Simulation und Test in der Produktentwicklung

16. - 17. Juni 2021 Online-Interaktiv www.nafems.org/simtest21

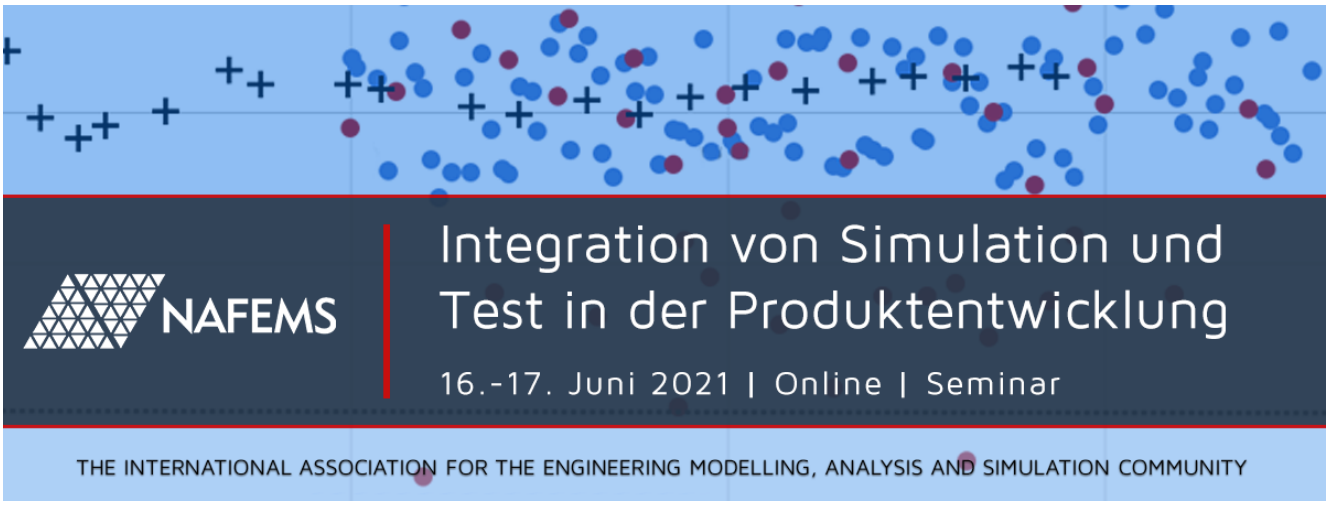
www.nafems.org/congress 25. - 29. Oktober 2021 Salzburg/Hybrid

Informationen zu allen NAFEMS Veranstaltungen finden Sie unter www.nafems.org/events

Schulungen in DACH

Verification and Validation in Engineering Simulation 2,5-tägig, Online, www.nafems.org/vandv21-2	29. Juni - 1. Juli 2021	Online
NEU: Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear 2-tägig, Online, www.nafems.org/fkm-nonlin21-1	30. Juni - 1. Juli 2021	Online
Automatic Optimization for Efficient Product and Process Development 1-tägig, Online, www.nafems.org/opt21-2	7. Juni 2021	Online
Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation 2-tägig, Online, www.nafems.org/fem21-2	25.-26. Nov. 2021	Online
Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie 2-tägig, Online	Herbst 2021	Online
Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear 2-tägig, Online,	Herbst 2021	Online
Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung www.nafems.org	Auf Anfrage	Online
Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis www.nafems.org	Auf Anfrage	Online

Eine Beschreibung der Schulungsinhalte finden Sie auf Seiten 18 - 25. Weitere Schulungen und Kurse, die web-basiert (e-learning bzw. Webinare) oder ausserhalb der deutschsprachigen Region stattfinden, finden Sie unter www.nafems.org/events.



„Wird die Simulation künftig den Test vollständig ersetzen?“ war eine Frage, die sich nach dem immer erfolgreicheren Einsatz und der rasanten Entwicklung numerischer Simulationsmethoden stellte. Heute wissen wir, dass sich beide Seiten sinnvoll in ihrer Kombination gegenseitig qualifizieren und ergänzen. Allerdings gibt es auch den immer wiederkehrenden Trend in Fach- und Managementkreisen und in der akademischen Ausbildung der Ingenieure, durch Simulationsmethoden teure Labore für experimentelle Untersuchungen zu reduzieren oder ganz einzusparen.

Beide Welten, Simulation und Test, sind eine Symbiose eingegangen, die immer neue Möglichkeiten erschließt, aber auch neue Anforderungen an die Systementwicklung, den Anwender und die Ausbildung stellt. Das Seminar soll einen Überblick geben zum Stand der Technik des Zusammenwirkens von Test und Simulation in der Produktentwicklung, das weit umfangreicher ist als die experimentelle Bestimmung von Parametern für die Simulation oder die reine Validierung der Ergebnisse.

Mit dem Seminar will NAFEMS dazu beitragen, sicherer und effizienter mit den vorhandenen Werkzeugen umzugehen und auf Trends und wichtige Entwicklungen eingehen. Ziel ist es, den aktuellen Stand der Technik und Trends zu diskutieren und einen offenen Dialog von Anwendern, Forschern und Lösungsanbietern zu fördern.

Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme.

Ihre NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH

Technische Leitung:
- Prof. Dr.-Ing. Manfred Zehn (TU Berlin, Vice Chairman of NAFEMS)
- Gerhard Göß (Schaeffler Technologies)

Beide sind Mitglieder des NAFEMS DACH Steering Committees

Informationen und Anmeldung
www.nafems.org/simtest21

Organisation

Teilnahmegebühren
Nicht-Mitglieder: Euro 380,- pP
NAFEMS-Mitglieder: frei*
* NAFEMS Mitglieder erhalten sog. „seminar credits“ pro Jahr. Für dieses Seminar werden zwei credits je Teilnehmer benötigt.
Falls bereits verwendet, können Mitglieder zu einem reduzierten Preis teilnehmen: Euro 230,- pP

Teilnahmegebühr für Studenten
Für Studenten steht ein begrenzte Anzahl an freien Seminarplätzen zur Verfügung. Die Annahme erfolgt in der Reihenfolge der Anmeldungen. Bitte Immatrikulationsbescheinigung beifügen.

Kosten für Stornierung
- Bis 6 Wochen vor Seminarbeginn: kostenfrei;
- bis 1 Woche vorher: 75 %;
- weniger als 1 Woche und bei Nichterscheinen: 100 %.

Ersatzteilnehmer können gestellt werden. Die Stornierung muß schriftlich erfolgen.

Tagungssprache
Deutsch (in Ausnahmen in englischer Sprache)

Virtuelle Fachausstellung und Sponsoring
Informationen hierzu finden Sie auf der Seminarwebseite www.nafems.org/simtest21

Alle Preis zzgl. ges. MwSt.

Vortragsprogramm *

Mittwoch, 16. Juni

11:30 **Begrüßung/Einführung**
M. Zehn (TU Berlin, Vice Chairman of NAFEMS); G. Göß (Schaeffler Technologies) - beide Mitglieder des NAFEMS DACH Steering Committees

Session 1
Keynote / Konzepte

11:50 **Keynote-Vortrag: PowderGenetics – ein ganzheitlicher Ansatz zur zuverlässigen Charakterisierung von Pulverwerkstoffen für eine konstante Bauteilqualität in der Additiven Fertigung**
M. Eiber (IABG)

12:30 **Einbindung der Simulation im Produktentwicklungsprozess**
S. Macho (HAWE Hydraulik SE)

13:00 **Ein Ansatz zur Validierung von Simulationsmodellen für die Optimierung von faserverstärkten Sickenmustern**
P. Haberkern, A. Albers (Karlsruher Institut für Technologie IPEK); M. Ott, W. Volk (Technische Univ. München)

13:30 Pause

Session 2
Konzepte

13:45 **Materialkarten für FVK-Werkstoffe auf Basis von realen und virtuellen Mikro-Zugversuchen**
H. Grimm-Strele, H. Andrä, M. Kabel, J. Lienhard, T. Schweiger (Fraunhofer ITWM)

14:15 **Einführung eines Testdatenmanagements bei Brose zur Umsetzung einer hybriden Validierung**
K. Schoft (Brose Fahrzeugteile); M. Krastel, M. Fischer (:em engineering methods)

14:45 **Combined Analysis of Crash-Simulations and Crash-Test Scans**
D. Borsotto, L. Jansen, C. Thole (Sidact)
15:15 Pause

Session 3
Konzepte

15:30 **Softwarelösung für Management und Analyse von Simulations- und Versuchsdaten**
G. Geißler, M. Liebscher (Scale)

16:00 **Light Materials 4 Mobility (LM4M) Resource-Efficient Light Weight Structures**
F. Huberth, J. Lienhard, T. Schweigert, B. Tillner, A. Menrath, I. Jahn (Fraunhofer IWM); D. Dörr (Simutence)

16:30 **Domänenübergreifende Auswirkungsanalyse mit Hilfe des Artefakt-Modells**
M. Brandstätter; C. Bühler, K. Steinkirchner (Prostep); M. Mayer (FOM Hochschule)

17:00 **Wrap-up Tag 1**

17:10 Ende Tag 1

Donnerstag, 17. Juni

11:30
Begrüßung Tag 2

Session 4 - Anwendungen

11:45 **Einsatz Maschineller Lernverfahren zum Model-Updating von FEM Modellen in der Vibroakustik**
T. Gohlke, M. Bopp, M. Behrendt, A. Albers (Karlsruher Institut für Technologie(IPEK); N. Wagner (Intes), S. Slavetinsky (Renumics)

12:15 **Zum Abgleich von Simulation und Test**
R. Helfrich (Intes)

12:45 **Simulation and Measurement of the Thermo-Elastic Distortion for Space Applications**
M. Dreier, H.-P. Gröbelbauer (Univ. of Applied Sciences Northwestern Switzerland (FHNW)); P. Böhler, G. Peikert (Zürich Univ. of Applied Sciences (ZHAW)); D. Piazza (Univ. of Bern)
13:15 Pause

Session 5
Anwendungen

13:30 **Non-Destructive Condition Evaluation of Transmission Components for a Second Product Life Based on Efficient Life Tests**
A. Kroner (Mercedes Benz)

14:00 **Eine effiziente numerische Methodik zur Platzierung von Dehnungsmessstreifen in der experimentellen Spannungs- und Lebensdaueranalyse**
C. Strzalka, D. Marinkovic, M. Zehn (Technische Univ. Berlin)

14:30 **Ressource-Efficient Gear Wheel Design under Regard of Early Planning of Reliability Demonstration Tests**
T. Herzig, M. Dazer, B. Bertsch (Univ. Stuttgart)

15:00 **Anforderungen an modernes Datenmanagement für NVH-Prognosen**
A. Balger (Siemens Industry Software); J. Payer (Virtual Vehicle Research)

15:30 Pause

Session 6
Diskussion

15:45 **Diskussion**

16:30 **Wrap-up Tag 2 / Verabschiedung**

16:45 Ende des Seminars

* Vorläufiges Vortragsprogramm. Änderungen vorbehalten.

NWC 2021

NAFEMS WORLD CONGRESS

25-29 OCTOBER | SALZBURG | AUSTRIA

A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION

INCORPORATING

spdm INTERNATIONAL CONFERENCE Simulation Process & Data Management

Multiphysics Simulation Conference

We're going again in 2021.

Nutzen Sie die Gelegenheit und kommen Sie nach Salzburg!

Über 540 eingereichte Abstracts!

On-site und online Fachausstellung

Trainings und Workshops

Panel Discussions / Networking

Neu: Automotive Symposium

CAE in Automotive Development: State of the Art, Technology Changes and Future Trends

THE FIRST HYBRID NAFEMS WORLD CONGRESS

On-site | Online | Get Involved

SPONSORS

PLATINUM

GOLD

SILVER

SPDM

This is your community, this is your Congress.

NWC21 will be a hybrid event and the first of its kind in the simulation community.

Based around the Congress Hub in Salzburg, Austria, one of the most technologically advanced conference centres in Europe, we will be able to combine the face-2-face event with virtual online components.

This includes live video streaming (in/out) of keynotes and sessions, online pre-recorded presentations, online communication and discussion facilities, live blogs, video live channels, and the integration of social media tools. Interaction and networking will be possible through video, audio and chat. The exhibition will be on-site in Salzburg and online around the world with interactive opportunities.

The Congress will be genuinely accessible to every single member of the analysis and simulation community.

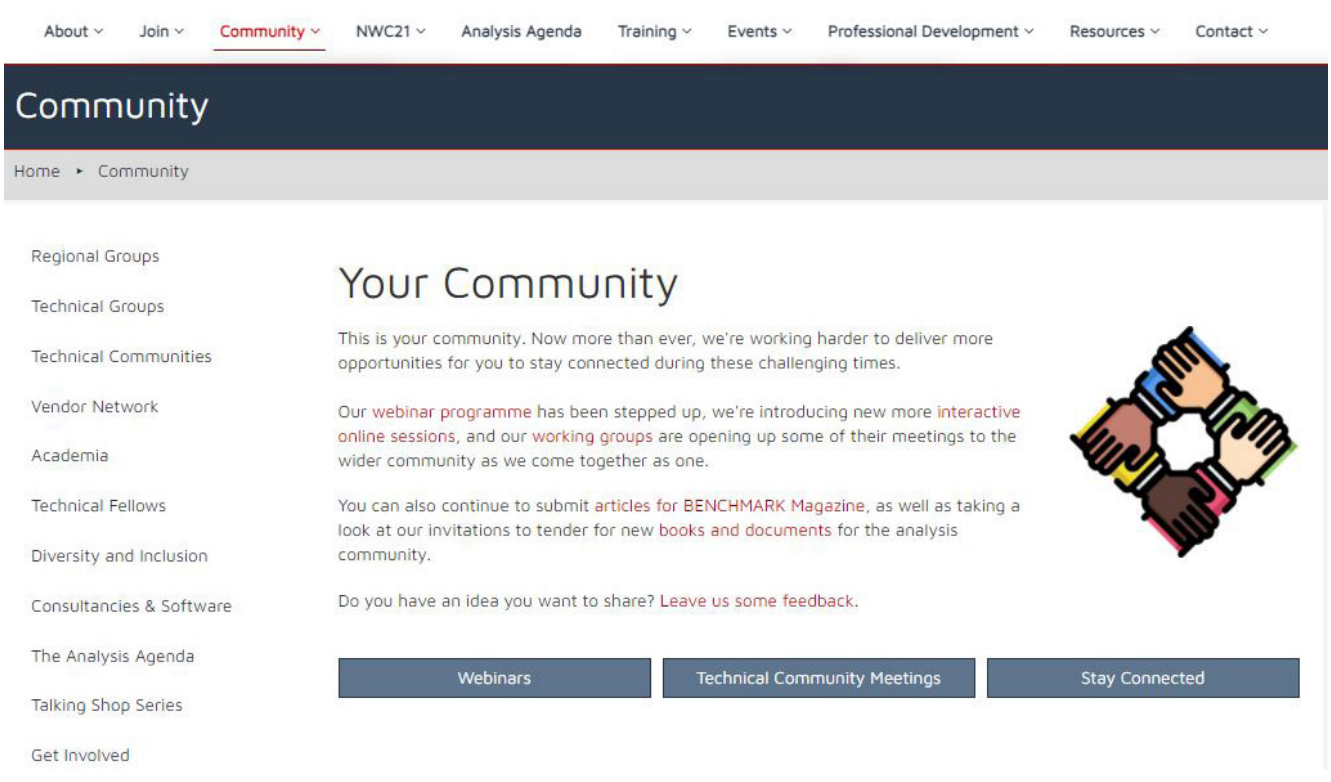
We will cover every aspect of engineering modelling, analysis and simulation. That includes core topics like FEA, CFD, and MBD, as well as examining the next steps for our community and the technology. We will also be hosting the 5th International SPDM conference, as well as our International Multiphysics Simulation conference as part of the event.

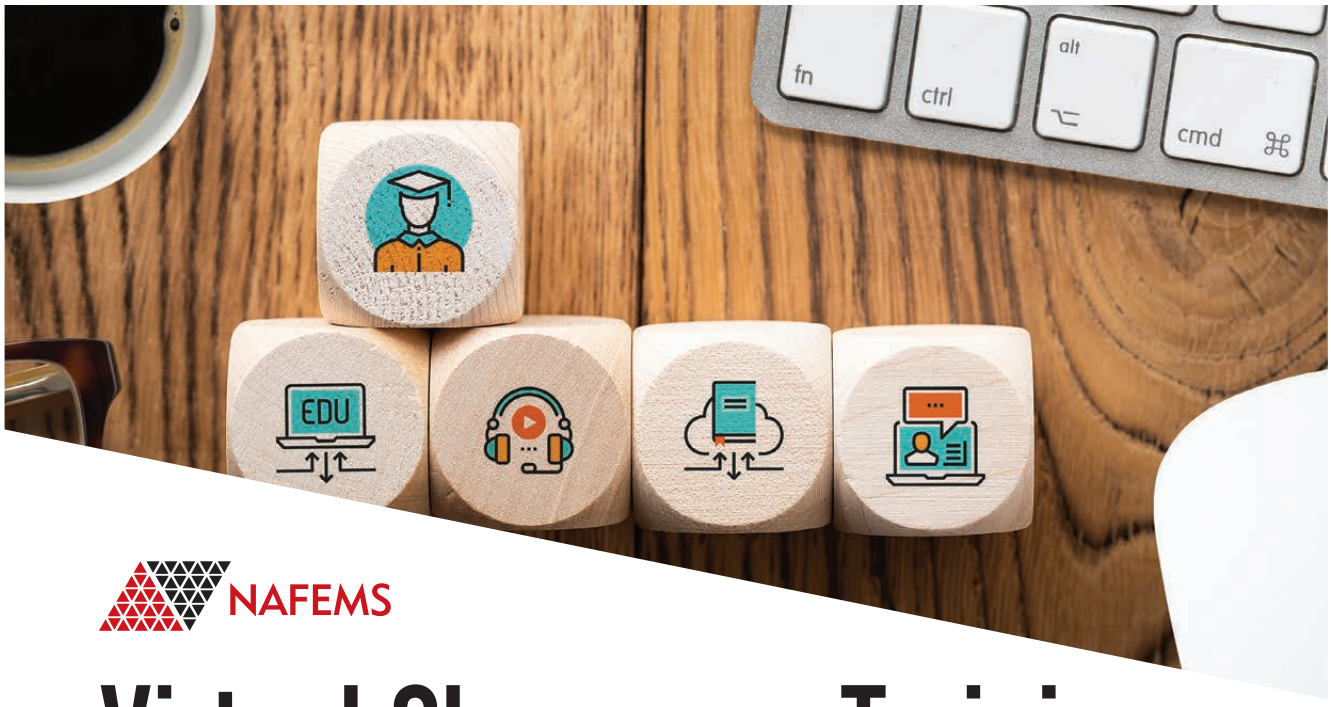
This is not just another conference. This is where the simulation world comes together as one, in an independent, international forum to push engineering analysis forward. We want you to be a part of it.

Sponsorship and exhibition packages are also now available. Visit the website for full details.

nafems.org/congress

NAFEMS
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


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



NAFEMS

Virtual Classroom Training

The Same Training – Delivered Online

We've transitioned our face to face classroom training courses to our online platforms, to make sure you can still access the training you need.

Sometimes, you want a complete course delivered in full or half day sessions over the course of one or more days. You know, like training courses used to be.

Get up-close and personal with NAFEMS training using our new virtual classroom delivery. The only thing that's different is that you have to make your own lunch.

We can also create custom classes for you and your company, delivered in a secure online environment, covering whatever topics you need in a way that suits you.

Contact
tricia.hughes@nafems.org
for more information,
or visit the website.

System Modeling & Simulation
June 2nd – 3rd 2021

Méthodologies et Bonnes Pratiques de Simulation Numérique en contexte industriel
June 7th – 9th 2021

Automatic Optimization for Efficient Product and Process Development
June 7th 2021

V&V: Vérification & Validation des Simulations pour l'ingénierie – Construire la crédibilité des simulations dans un contexte industriel.
June 15th – 17th 2021

Principes essentiels de la gestion des données et des processus de la simulation
June 22nd – 24th 2021

Verification and Validation in Engineering Simulation
June 29th – July 1st 2021

Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear – Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens
June 30th – July 1st 2021

nafems.org/training

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

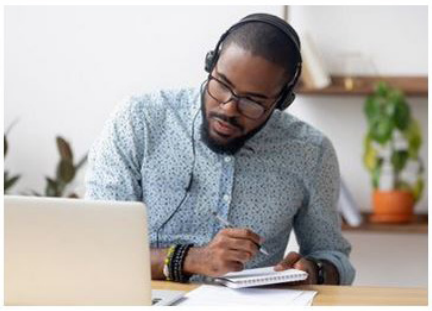
ONLINE, SELF-PACED LEARNING WITH TUTOR SUPPORT. LEARN AT YOUR OWN PACE, WITH EXPERIENCED GUIDANCE ON-HAND ALL THE WAY.

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)



27 May 2021 — Practical Modelling of Joints and Connections — eLearning, Online — eLearning	28 May 2021 — Structural Optimization in FEA — eLearning, Online — eLearning	2 Jun 2021 — System Modeling & Simulation — Webex, Online — Training Course
7 Jun 2021 — Online course: Automatic Optimization for Efficient Product and Process Development — Online, Online — Training Course	7 Jun 2021 — Méthodologies et Bonnes Pratiques de Simulation Numérique en contexte industriel — Webex, Online — Training Course	9 Jun 2021 — Elements of Turbulence Modeling — eLearning, Online — eLearning
15 Jun 2021 — V&V: Vérification & Validation des Simulations pour l'ingénierie — Webex, Online — Training Course	17 Jun 2021 — Basic Finite Element Analysis — eLearning, Online — eLearning	22 Jun 2021 — Principes essentiels de la gestion des données et des processus de la simulation — Webex, Online — Training Course
22 Jun 2021 — Composite Finite Element Analysis — eLearning, Online — eLearning	25 Jun 2021 — Introduction to Dynamics using FEA — eLearning, Online — eLearning	29 Jun 2021 — Verification and Validation in Engineering Simulation — Online, Online — Training Course
30 Jun 2021 — Online-Kurs: Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear — Online, Online — Training Course	7 Jul 2021 — CFD for Structural Designers & Analysts — eLearning, Online — eLearning	3 Aug 2021 — Fatigue & Fracture Mechanics in FEA — eLearning, Online — eLearning
5 Aug 2021 — Non-Linear FEA — eLearning, Online — eLearning	11 Aug 2021 — Introduction to Practical CFD — eLearning, Online — eLearning	13 Aug 2021 — Advanced Dynamic FEA — eLearning, Online — eLearning

www.nafems.org/events www.nafems.org/training

NAFEMS

LearningHUB

Your Central Location : :
for Continuous Professional Development

NAFEMS Learning Hub delivers online guided learning, ranging from quick courses aimed at explaining key concepts, to more in-depth learning.

Available exclusively to NAFEMS members, the Learning Hub is your central location for continuous professional development.

available courses

Extended Courses:

- Complex Pressure-Related Flow Phenomena in CFD
- FEM vs. Numerical Simulation: Fundamentals of Simulation Governance
- Getting Started with FEA
- Sheet Metal Formability - Material Properties, Failure, and Simulation

Quick Courses:

- Basics of Credibility in Engineering Simulation
- Basics of Business Challenges in Engineering Simulation
- Basics of Generative Design
- Basics of Engineering Simulation Digital Twins
- Basics of Integration of Systems and Detailed Sub-Systems Simulations
- Basics of Democratization of Engineering Simulation (DoES)
- Basics of Aligning Commercial, Government And Research Engineering Simulation Efforts

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

29. Juni - 1. Juli 2021, 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 ofexpectation due in their industry context and applicable regulations
- Understand the fundamental concepts of V&V, the role and contents ofstandards, the existing methodologies for the implementation or the improvementof 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 relateddemonstrations
- Improve synergy between virtual and physical tests in the context ofvalidation
- Learn how to build business cases allowing for justification of V&Vplans
- Understand simulation management and process issues
- Learn how to implement reporting to bring visibility and confidence to allmanagers 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/vandv21-2

NAFEMS Schulung

Festigkeitsnachweis in die FKM-Richtlinie

Herbst 2021 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, ist ein vom Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) entwickelter Standard für einen statischen und zyklischen Festigkeitsnachweis. Durch die breite Anwendbarkeit hat der Festigkeitsnachweis eine hohe Verbreitung im Maschinenbau und anderen Branchen gefunden. In diesem Seminar lernen Sie den richtlinienkonformen Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen sowohl für nichtgeschweißte als auch für geschweißte Bauteile kennen. Neben der Theorie des Nachweises steht dabei auch die praktische Anwendung der Richtline 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 Kirchhoff, ist seit 2007 beim Ingenieurbüro Huß & Feickert im Bereich CAE-Simulation und Softwareentwicklung tätig. Als Teamleiter der Softwareentwicklung ist er verantwortlich für die Entwicklung von Programmen zum statischen und zyklischen Nachweis aufbauend auf FE-Analysen. Herr Kirchhoff arbeitet seit über 10 Jahren aktiv im Fachkreis Bauteilfestigkeit des VDMA zur Weiterentwicklung der FKM-Richtlinie mit. Zudem vertritt er das Ingenieurbüro Huß & Feickert als KMU im Redaktionskreis der FKM-Richtlinie und im Industriekreis des Fachkreises.

NAFEMS Schulung

Festigkeitsnachweis in die FKM-Richtlinie Nichtlinear

NEU

30. Juni - 1. Juli 2021 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens

Für die Bewertung der Festigkeit von Maschinenbauteilen wird vom Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) Anfang 2019 eine neue Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoffverformungsverhaltens“ herausgegeben. Diese Richtlinie erweitert die Anwendung der FKM-Richtlinien in den niederzyklischen Bereich, erlaubt das Ausnutzen von Reserven beim statischen Nachweis und kann Reihenfolgeeinflüsse bei Lasten berücksichtigen.

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.

Zielgruppe:
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.

Ihr Nutzen:
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.

Referent

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

Informationen und Anmeldung
www.nafems.org/fkm-nonlin21-1

NAFEMS Schulung

Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation

25. - 26. November 2021 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

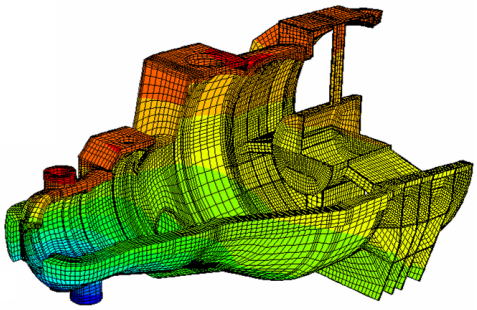
Prof. Dr.-Ing. Armin Huß verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Technischen Mechanik, Technischen Schwingungslehre und der Anwendung der Finiten Elemente Methode, davon über 20 Jahre Praxis-Erfahrung als freiberuflicher Ingenieur für die Anwendung der FEM in den unterschiedlichsten 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/fem21-2

NAFEMS Schulung

NEU

Automatic Optimization for Efficient Product and Process Development

7. Juni 2021 online (Webex)/ auch als Inhouse-Schulung buchbar

Recognise next level design methodologies utilizing simulation results to explore the whole design space. Some people consider that optimization is part of an engineer's basic job. In general, no one will accept a project if they think it can be improved in any way. However, usually there are restrictions such as time and cost not to mention the number of technical restrictions.

Computers and software came to the rescue such that we now have software that cleverly controls other software to run process simulations and automatically repeat them in order to improve the design or the concept that we have defined. This requires smart algorithms that determine trends and make the best decisions to come up with an optimal design.In this way the sequence of simulations in the design process is configured by the engineer, who then defines an optimization strategy for the computer to do the work using software algorithms. This saves time and effort, but there are issues and possibly time is wasted in some cases.

The course provides an extensive overview of process simulation and optimization methods so that engineers can enhance their working methods by defining optimization strategies be they single- or multi-objective, single- or multi-disciplinary using determinate, continuous or statistical variables and including restrictions and decision making. Generic algorithms are discussed, advice is provided and problematic issues are highlighted to guide engineers in the creation of successful, efficient optimization strategies.

Interaction is encouraged throughout the course. Questions and class participation are encouraged, as this is one of the key aspects of making this a unique and positive experience for each attendee.

Who should attend
Engineers who are interested in the next level of design methodologies utilizing simulation results to explore the whole design space and improve designs by using appropriate optimization tools and methods.

Course Program
This course combines information, examples, case-studies and time for open discussion of the concepts presented:

- Design cycles
  - Optimization within a design cycle
- Simulation Process Integration
  - Design windows
- Optimization
  - Basics
  - Single- and Multi-objective optimization
  - Basic methodologies
- Topology Optimization
  - Concepts, methods, and examples
- Design of Experiments (DoE)
  - Concepts, uses, guidance
  - Typical algorithms
- Parameter Optimization
  - Concepts and guidance
  - Methods (gradient, GA, evolution, others)
  - Decision making tools
- Response Surface/Meta-model methods
  - Methods and algorithms
  - Real-life/Experimental information
- Robust design methodologies
  - Sensitivity
- Examples in many sectors are distributed throughout the course

Tutor

Dr. Gino Duffett has over 30 years of experience in CAE software development, training, industrial implementation and usage on an international level in various sectors, mostly automotive and renewable energy. Currently a Technology Project Manager focussing on innovative simulation driven design and automatic optimization. Over his career Gino has taught numerical modelling up to university level, developed commercial courses and provided training for software users and university programmes on aspects such as metal forming, structural analysis, simulation process methodologies and optimization and has provided courses at Business schools on mathematical modelling, ERP and multi-cultural management.

Course Language

English

Inhouse-Kurs

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

Informationen und Anmeldung

www.nafems.org/opt21-2

NAFEMS Schulung

Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

The objectives of this Finite Element course are:

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

Who Should Attend

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

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

Technical Content

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

Tutor

Dr. Gino Duffett has over 30 years of experience in CAE software development, training, industrial implementation and usage on an international level in various sectors, mostly automotive and renewable energy. Currently a Technology Project Manager focussing on innovative simulation driven design and automatic optimization. Over his career Gino has taught numerical modelling up to university level, developed commercial courses and provided training for software users and university programmes on aspects such as metal forming, structural analysis, simulation process methodologies and optimization and has provided courses at Business schools on mathematical modelling, ERP and multi-cultural management.

Course Language

English

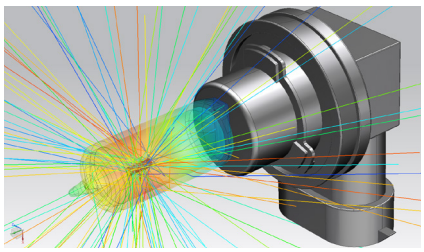
Inhouse-Kurs

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

NAFEMS Schulung

Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

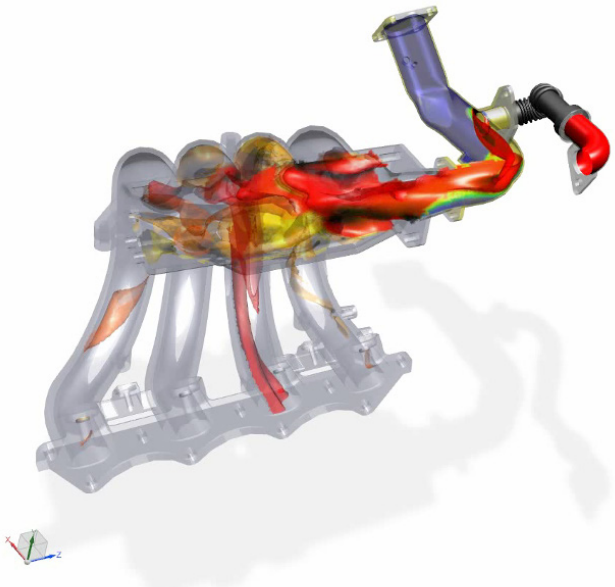
Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar



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

Kurssprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

Inhouse-Kurs

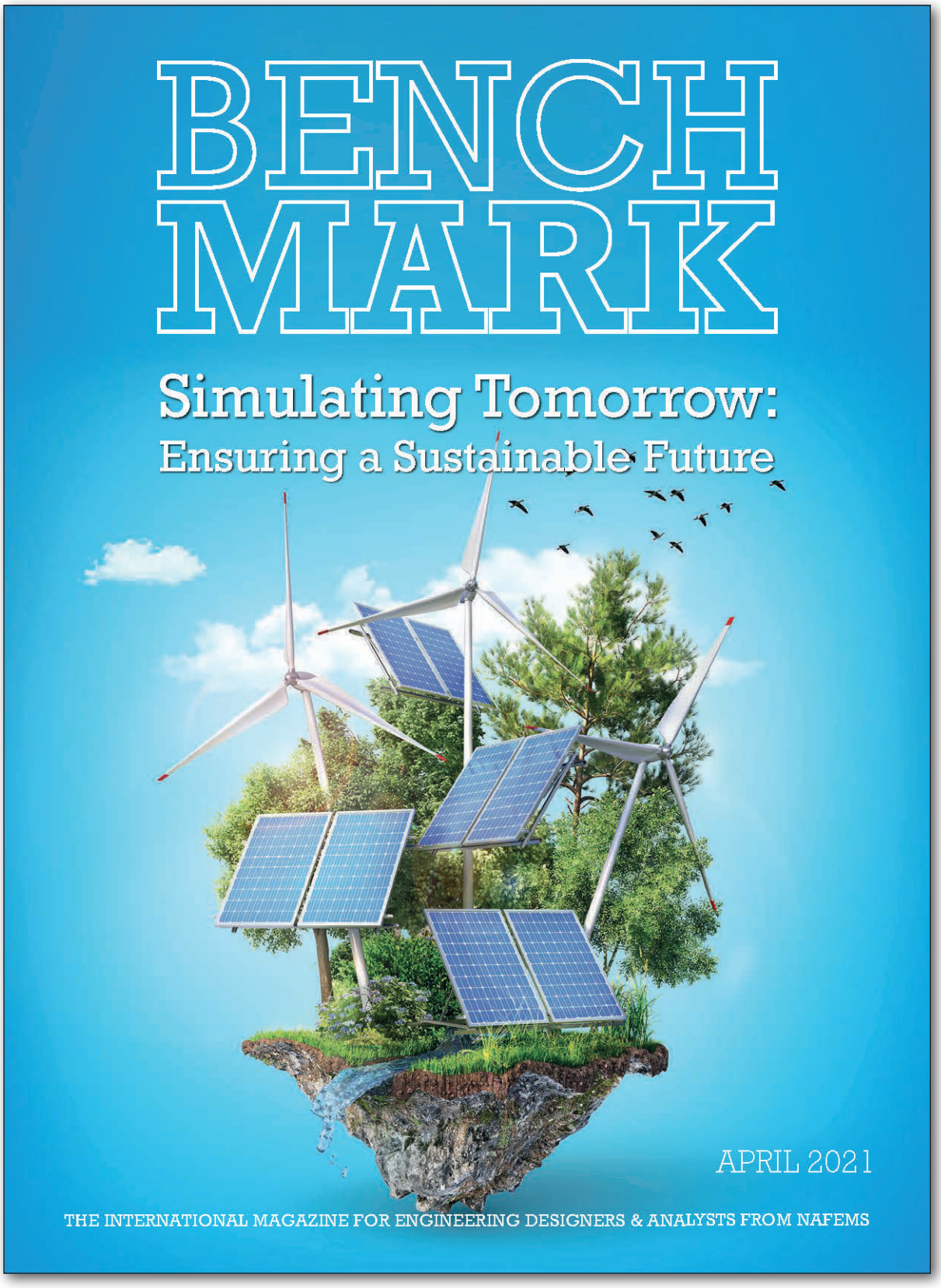
Dieser Kurs wird als Inhouse-Kurs bei Ihnen vor Ort angeboten. Bitte fordern Sie nähere Informationen an - Rückmeldeformular auf der vorletzten Seite.

Internationales NAFEMS Magazin

Benchmark Magazin, Ausgabe April 2021

Die internationale NAFEMS Zeitschrift „Benchmark“ erschien zuletzt im April 2021.
Download für Mitglieder und Abonnenten sowie Informationen zum Abonnement finden Sie unter:

www.nafems.org/publications/benchmark



THE ANALYSIS AGENDA
nafems.org/agenda
What Next for Engineering Simulation?
Engineering Data Science
The Fourth Paradigm
Process Simulation
Predicting & Optimising Systems
Simulation Supporting Certification
Relying Less on Test
Simulation Data Management
Making the Data Work
Generative Design
Making the Impossible a Reality
Code Verification
Keeping you Accurate
Communicating Complexity
Ensuring Simulation is Understood
Autonomous Things
Artificial Intelligence becomes Real
The Digital Twin
Connecting Virtual with Physical
The Failure Test
Modelling Structural Failure
Simulating Tomorrow
Ensuring a Sustainable Future
Rapid Manufacturing
Towards Distributed Digital Production
Simulation Governance
Building a Simulation Capability
Multiscale Simulation
Analysis Great and Small
Designer-Oriented Simulation
Putting Simulation Upfront
Systems Level Simulation
Modelling the Sum of the Parts
Diffusion of Innovation
Crossing the Chasm
NAFEMS.ORG/AGENDA

ITEA 3

Project Results

VMAP

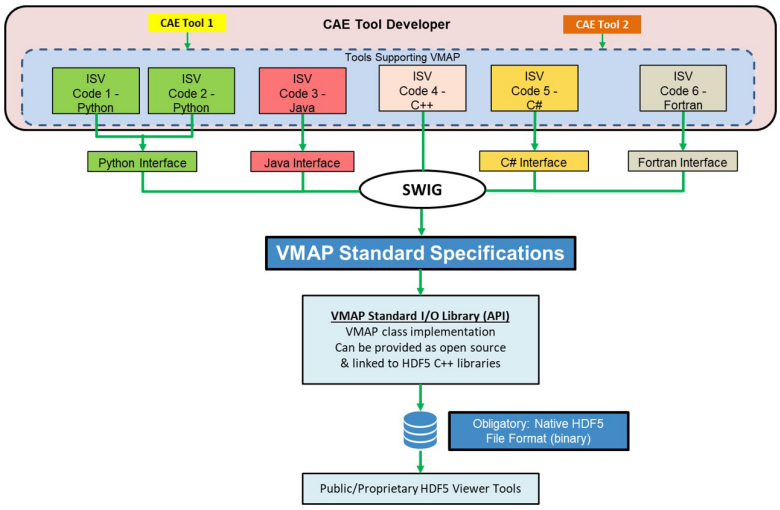
A global first in CAE data storage standardisation

EXECUTIVE SUMMARY

The goal of the ITEA project VMAP was to create the first open vendor-neutral standard for computer-aided engineering data storage, thereby enhancing the interoperability of software tools and reducing costs and effort for companies. An open standardisation community will help push this into domains beyond the scope of the project, guaranteeing these benefits in both the short and long term.

PROJECT ORIGINS

A wide range of computer-aided engineering (CAE) software tools already enable virtual material and product design, virtual manufacturing and machining process parameterisation and virtual product testing of high-tech materials. However, these tools are rarely interoperable and contain multiple native formats for storing the CAE data to be transferred between simulation codes, such as geometrical information, simulation results and metadata. The corresponding lack of standardisation means that companies have to implement customised data transfer solutions – a huge effort in terms of both time and money.



VMAP Software Architecture

The VMAP (A new Interface Standard for Integrated Virtual Material Modelling in Manufacturing Industry) project has filled this gap by creating the world's first CAE workflow interface standard. This is vendor-neutral, cost-free and completely open to any interested party, helping to maximise its uptake amongst companies of all sizes. Input/output (I/O) routines have also been provided for easy implementation. With the uptake of this standard, VMAP's end-users will enjoy a faster time to market and lower production costs through a decrease in the amount of manual work and corresponding human error in their CAE workflows.

TECHNOLOGY APPLIED

The starting point for VMAP is the identification of the main groups among unorganised CAE data, such as time steps and coordinate systems. The data can then be aligned into a hierarchal structure of the different fields involved in CAE simulation: geometry, variables, systems and material parameters. Commonalities across different forms of software have been used to build the data storage standard, which is implemented in a number of software tools. This is based on the Hierarchical Data Format (HDF5), an open-source file format which supports large amounts of heterogeneous data in a structure similar to a file directory. Companies can connect their own application programming interfaces to VMAP through the Simplified Wrapper and Interface Generator (SWIG) software architecture, which links C and C++ to high-level languages like Java. VMAP's I/O Library and large number of parameters for (material) models then enable end-users to read and write VMAP data files and exchange these between simulation codes.

Crucially, the commonalities uncovered by VMAP will enhance interoperability across diverse sectors, as demonstrated in its six use-cases: blow moulding; composites in lightweight vehicles; injection moulding; additive manufacturing of plastics; hybrid modelling of consumer products; and composites in aerospace. In composites for lightweight vehicles, for instance, VMAP's material data storage supports the transfer and eases the mapping of parameters such as fibre orientations, allowing companies to complete their workflow

chain. A similar process occurs with the storage of elements and points at the part level for both blow forming and composites in aerospace. Given the vast nature of the domain, future work will focus on expanding standardisation and normalisation within each sub-field of CAE simulation.

MAKING THE DIFFERENCE

VMAP's major result is simple: computer-aided engineering is now quicker and easier than ever before. One clear example of this has been observed at Philips, where the innovation speed of highly complex parts has increased by almost 50%. Similarly, the time spent on strength assessments in the moulding of plastic parts has been reduced by 42% and the set-up time for virtual process chains for lightweight automotive components with composites fell by 40%. By eliminating the need for customised solutions, delays caused by human errors are also greatly reduced. Overall, VMAP offers a far more cost-effective approach to CAE.

A standard is only as strong as its users. Having so far implemented VMAP in the CAE tools of twelve consortium partners and seven external parties, the project is now taking the unique step of establishing a legal entity called the VMAP Standards Community. This not-for-profit open standards community will push for further standardisation by contacting vendors and end-users in industry. Early dissemination has already proven successful; the VMAP International Conference, for instance, saw 584 registrations in October 2020. The VMAP community now contains 143 entities, including large players such as Bosch and Philips, and has good links with other groups such as Modelica/FMI and the European Material Modelling Council.

As mentioned, VMAP is the first ever CAE workflow interface standard. One of its biggest strengths is therefore its rich potential, which the community seeks to exploit by extending the standard into technical domains beyond simulation for manufacturing parts. Another ITEA project, VMAP Analytics, has already been formed to apply these innovations to AI analytics and sensor data. VMAP thus represents the tip of the iceberg: as the number of organisations involved in the community increases, so too will the number of engineering domains which can benefit from the faster processes and reduced costs of CAE interoperability.

MAJOR PROJECT OUTCOMES

Dissemination

- Participation in 45 conferences worldwide.
- NAFEMS World Congress 19 had VMAP Interoperability sessions.
- VMAP International Conference on Interoperability received over 400 registrations.
- 6 technical magazine articles and 9 technical papers.
- VMAP Community meetings organised every 3 months during the project.

Exploitation (so far)

New Standard:

- VMAP is a vendor-neutral standard for CAE data storage.
- VMAP Standard Specifications published on the VMAP website: https://www.vmap.eu.com/vmap-release/

New Software:

- All project partner softwares support VMAP Standard format.
- VMAP Standard I/O Library implemented for 7 codes external to the project.
- VMAP Standard import and export wrappers developed for Abaqus & ANSYS.

New System:

- Engineering workflows completed using VMAP Standard – blow moulding, composites, additive manufacturing etc.

Standardisation & Spin-offs

- Creation of VMAP Standards Community (SC) e.V.: The VMAP-SC is a non-profit association, established in Germany, which will work on the dissemination of VMAP Standard, including development and maintenance of a uniform library.

ITEA is a transnational and industry-driven R&D&I programme in the domain of software innovation. ITEA is a EUREKA Cluster programme, enabling a global and knowledgeable community of large industry, SMEs, start-ups, academia and customer organisations, to collaborate in funded projects that turn innovative ideas into new businesses, jobs, economic growth and benefits for society.

https://itea3.org

VMAP
16010

Partners

Austria
4a engineering
Wittmann Battenfeld

Belgium
MSC Software Belgium

Canada
Convergent Manufacturing Technologies

Germany
Audi
Dr. Reinold Hagen Stiftung
DYNAmore
EDAG Engineering
ESI Software Germany
Fraunhofer SCAI
Hagen Engineering
inuTech
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Kautex Maschinenbau
NAFEMS
RIKUTEC Richter Kunststofftechnik
Robert Bosch
Simcon Kunststofftechnische Software

Netherlands
Delft University of Technology
DevControl
In Summa Innovation
KE-works
Materials innovation institute M2i
MSC Software Benelux
Philips
Reden
University of Groningen

Switzerland
BETA CAE Systems International
Sintratec

Project start
September 2017

Project end
October 2020

Project leader
Klaus Wolf, Fraunhofer SCAI
Project email
klaus.wolf@scai.fraunhofer.de
Project website
https://www.vmap.eu.com/

BETA CAE Systems

Neue Versionen

BETA CAE Systems veröffentlichte die neuen Versionen SPDRM v1.4.3 und v20.1.6 release for Ansa/Epilysis/Meta and Komvos.

www.beta-cae.com

CADFEM

Cadfem Journal „Simulation" erschienen

Im Februar 2021 ist die jüngste Ausgabe des Journals „Simulation – Cadfem" erschienen. Lesen Sie unter anderem Anwenderberichte zur Rolle der Simulation mit Ansys bei SEW-Eurodrive, beim E-Mobilitäts-Start-up Alvier Mechatronics, bei HAWE Hydraulik, bei der Salzgewinnung bei K+S und beim Schweizer Badausrüster Geberit. Darüber hinaus erfahren Sie vieles aus der Historie der Simulation mit Blick auf die Entwicklung der Methodik sowie auf Cadfem, Ansys und den FEM-Pionier bei Daimler, Dr. Alfred Zimmer.

www.cadfem.net

CARHS

Automotive CAE Companion

Der kostenlose Carhs Automotive CAE Companion ist ab sofort verfügbar. Neben Informationen zu Seminaren und Konferenzen im Bereich CAE und Engineering liefert der neue automotive CAE-Companion auf über 70 Seiten wertvolles CAE-Wissen von internationalen Experten zur Theorie und Anwendung der numerischen Simulation in der CAE-basierten Fahrzeugentwicklung.

www.carhs.de

DYNAmore

DYNAmore eröffnet neues Büro in München

Die DYNAmore GmbH hat am 1. März 2021 ein neues Büro in der bayrischen Landeshauptstadt München eröffnet. Tätigkeitsschwerpunkte des Teams am neuen Standort sind die Zusammenarbeit mit Automobilherstellern, den Kunden im Großraum München sowie mit der Technischen Universität.

Der neue Standort ist für die DYNAmore GmbH ein wichtiger Schritt, um zukünftig die Zusammenarbeit mit den Automobilherstellern und weiteren Kunden im Großraum München zu intensivieren und auszubauen.

„Eine örtliche und personelle Expansion ist in der derzeitigen Situation etwas ganz Besonderes", erklärt Professor Dr. Ulrich Göhner, Mitgründer des Unternehmens. „Der neue Standort erleichtert die Zusammenarbeit mit unseren Kunden im Großraum München ganz erheblich. Unsere Expertise im Bereich Crash- und Umformsimulation ist stark gefragt und wird auch in der Zukunft weiteres personelles Wachstum im süddeutschen Raum generieren", so Göhner weiter.

Neben der allgemeinen Methodenentwicklung in LS-DYNA sind vor allem die Entwicklung von Rückhaltesystemen und die Menschmodellierung Themenschwerpunkte der Ingenieure vor Ort. Hervorzuheben ist ebenso die Kooperation mit der Technischen Universität München, die bei mehreren Forschungsprojekten unterstützt wird.

„Investitionen in die Forschung sind bei DYNAmore Teil der Unternehmensphilosophie", meint Professor Dr.-Ing. André Haufe, Leiter des Material Competence Centers (MCC) und der Verantwortliche für Forschungsvorhaben bei DYNAmore. „An der TU München finden wir exzellente Spezialisten auf dem Gebiet der numerischen Simulation und der Werkstoffwissenschaften. Wir freuen uns außerordentlich auf die Zusammenarbeit und viele spannende Projekte."

Das französische Unternehmen Cadlm und DYNAmore gehen Vertriebspartnerschaft ein

Die DYNAmore GmbH vertreibt ab sofort das Software-Paket Odyssee des französischen Unternehmens Cadlm SAS. Mit der Vertriebspartnerschaft erweitert das Stuttgarter Unternehmen sein Produktportfolio um eine leistungsstarke CAE-zentrierte Innovationsplattform.

Der Name Odyssee steht für Optimal Decision Support System and Expertise. Dabei handelt es sich um eine CAE-zentrierte Innovationsplattform, die es ermöglicht, modernes maschinelles Lernen, künstliche Intelligenz, Reduced Order Modeling (ROM) und Design-Optimierung auf Workflows anzuwenden. Die Software verwendet algebraische oder maschinelle Lösungen, mit denen die Datenmenge reduziert wird, die in diesen Daten enthaltenen Informationen bleiben jedoch erhalten. Dies geschieht in der Regel durch Dekomposition, maschinelles Lernen oder andere effiziente Datenfusionstechniken. Diese Techniken ermöglichen die Erstellung von On-Board- und Echtzeitanwendungen auf der Grundlage vorhandener Ergebnisse aus Simulationen oder Experimenten. Typische Anwendungen von Odyssee sind Optimierung, parametrische Sensitivitätsanalyse und Robustheit im nichtlinearen Bereich, z.B. bei der Crashanalyse oder der Insassensicherheit.

„Mit Cadlm haben wir einen verlässlichen Partner an unserer Seite, der mit seiner innovativen Lösung unser Produktangebot sinnvoll erweitert, erklärt Ulrich Franz, Geschäftsführer der DYNAmore GmbH. „Mit Odyssee können wir unseren Kunden ein attraktives Produkt anbieten, dass zum Beispiel im Bereich des Reduced Order Modeling sehr interessant sein dürfte."

Cadlm mit Sitz im Großraum Paris ist seit vielen Jahren eng mit DYNAmore verbunden und war bereits oft Gast bei den LS-DYNA Konferenzen auf deutscher und europäischer Ebene. „Wir sind sehr glücklich über die Vertriebspartnerschaft mit DYNAmore", sagt Kambiz Kayvantash, CTO von Cadlm. „Wir profitieren vom Netzwerk von DYNAmore und hoffen, die Vorteile unserer Lösungen einem großen, internationalen Publikum präsentieren zu können", erklärt Kayvantash weiter.

Die Kooperation der beiden Unternehmen umfasst neben dem Vertrieb auch ein Schulungsangebot, bei dem die Vorteile und Möglichkeiten von Odyssee ausführlich vorgestellt werden. Auch bei der 13. Europäischen LS-DYNA Konferenz im Oktober 2021 wird das Produkt sowohl im Rahmen der Ausstellung als auch in den Breakout-Sessions detailliert beschrieben und die Mög-

lichkeiten demonstriert.
Bei Interesse an weiteren Informationen zu Odyssee , bei generellen Fragen zu LS-DYNA
oder anderen Produkten aus unserem Portfolio steht unser Vertrieb gerne zur Verfügung. Wir freuen uns auf zahlreiche Anfragen.

www.dynamore.de

EVA.dat

Evadat.com ist online

Die Evaluierungsbeispieldatenbank EvaDAT basiert auf der Richtlinie VDI 6201 und ist eine kostenlose Plattform zur Qualitätssicherung von softwaregestützter Tragwerksberechnung. Hier können Anwender und Hersteller von Software interaktiv standardisierte, qualifizierte und neutrale Evaluierungsbeispiele für eigene Testzwecke aufrufen und an der Einstellung weiterer Beispiele mitwirken.
Die Beispiele aus dem Forschungsvorhaben wurden bereit in die neue Datenbank eingestellt und jeweils mit Autor und Unternehmen verknüpft.

www.evadat.com

INSTAL

Instal-News

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

www.4innovative-engineers.com

HEXAGON - MSC Software

Hexagon erweitert mit Cadlm sein Portfolio für autonome, intelligente Fertigung

Hexagon AB, einer der weltweit führenden Anbieter von Sensoren, Software und autonomen Lösungen, gab die Akquisition von Cadlm SAS bekannt. Das Unternehmen gilt als Wegbereiter bei der Einbindung von künstlicher Intelligenz (KI) und maschinellem Lernen (ML) in das computergestützte Engineering (CAE), um den Einfluss von Simulationen auf die Entwicklungsprozesse und Lebenszyklen von Produkten zu revolutionieren.
Cadlm, gegründet in 1989, mit Hauptsitz in Frankreich, bringt jahrelange Erfahrung in der Entwicklung computergestützter Konstruktions- und Optimierungsmethoden für Industrieprodukte und -prozesse ein. Seit 2014 entwickelt CadlmLösungen mithilfe künstlicher Intelligenz sowie maschinellem Lernen. Die Software-Plattform Odyssee von Cadlm wendet sowohl KI als auch ML auf reale Sensordaten und physikbasierte Simulationsdaten an, um exakte, prädiktive Modelle eines Produkts zu generieren, bei effizienter Nutzung der Rechnerleistung. Diese Kombination ermöglicht schnellere wirksame Simulationen von dynamischen, multiphysikalischen Phänomenen – wie Fahrzeugcrash- und Sicherheitsanalysen – die das Produktverhalten unter Realbedingungen vollständig beschreiben und erfassen. Basierend auf diesen Erkenntnissen können Ingenieure den Entwurfsraum umfassender untersuchen sowie die nächste Produktgeneration interaktiv verbessern, ohne dass der rechentechnische Aufwand steigt.
Hersteller können mithilfe eines digitalen Zwillings über die frühe Entwurfsphase hinaus die Vorteile von Bilderkennung, prädiktiver Simulation sowie Störungsprognose nutzen, um Herausforderungen wie Stillstandzeiten, Durchsatz, Qualität und Flexibilität im gesamten Fertigungsprozess wirksam zu begegnen.
„Die Verschmelzung von CAE mit den neuesten Fortschritten in den Disziplinen Datenmanagement, künstliche Intelligenz, maschinelles Lernen sowie ein zunehmend vernetzter Fertigungslebenszyklus versetzen die Industrie heute in die Lage, immer komplexere Design-Anforderungen mit kurzen Innovationszyklen und höherer Produktivität zu bewältigen“, erklärt Ola Rollén, President und CEO von Hexagon. „Die Kompetenz und Technologie von Cadlm im KI-Bereich stärkt unser Lösungsportfolio für Smart Manufacturing. So können Daten über das frühe Entwurfsstadium genutzt werden, um Produktdesignsinnovation, Produktivität in der Fertigung, Produktqualität sowie Nachhaltigkeit durch weniger Materialverschwendung zu verbessern.“
Cadlm wird als Teil des Hexagon-Geschäftsbereichs Manufacturing Intelligence agieren. Auf das Geschäftsergebnis von Hexagon hat die Akquisition keinen signifikanten Einfluss. Der Abschluss der Transaktion (Closing) unterliegt den üblichen Vollzugsbedingungen.

Hexagon und Authentise entwickeln gemeinsam die erste offene End-To-End-Softwarelösung für die additive Fertigung

Der Geschäftsbereich Manufacturing Intelligence von Hexagon und Authentise arbeiten zusammen, um den Regelkreis der Additiven Fertigung (AM) von der Maschinenebene auf die gesamte Wertschöpfungskette zu erweitern, von der Konstruktion über die Fertigung bis hin zur Qualitätssicherung, und sorgen so für besser vorhersagbare, wiederholbare und rückführbare additive Fertigungsprozesse.
Daten aus Fertigungsprozessen sowie aus der Designphase, Materialeigenschaften und Qualitätsdaten aus Validierungs- und Inspektionsprozessen sind der Schlüssel zu automatisierten Verbesserungen in der Serienproduktion und ermöglichen Designverbesserungen. Die technischen Herausforderungen, Silos zu verknüpfen sowie die entsprechenden Daten anzuwenden, haben bisher jedoch die konsequente Anwendung von Additiven Fertigung auf Neukonstruktionen ausgebremst. Neue gemeinsam entwickelte Lösungen wenden Methoden der Statistischen Prozesskontrolle (SPC) mit Maschinellem Lernen (ML) und Künstlicher Intelligenz (KI) an, um Abfall- und Qualitätsprobleme in der Designphase zu lösen sowie die Wiederholbarkeit additiver Fertigungsprozesse innerhalb eines Standorts oder auch an mehreren Standorten weltweit zu verbessern.
Im Rahmen ihrer Partnerschaft entwickeln Hexagon und Authentise Lösungen für den industriellen Einsatz der AM-Technologie, mit deren Hilfe sich alle Schritte des Arbeitsablaufs von der Bauteilkonstruktion über die Produktion bis hin zu Endprodukt und Qualitätssi-

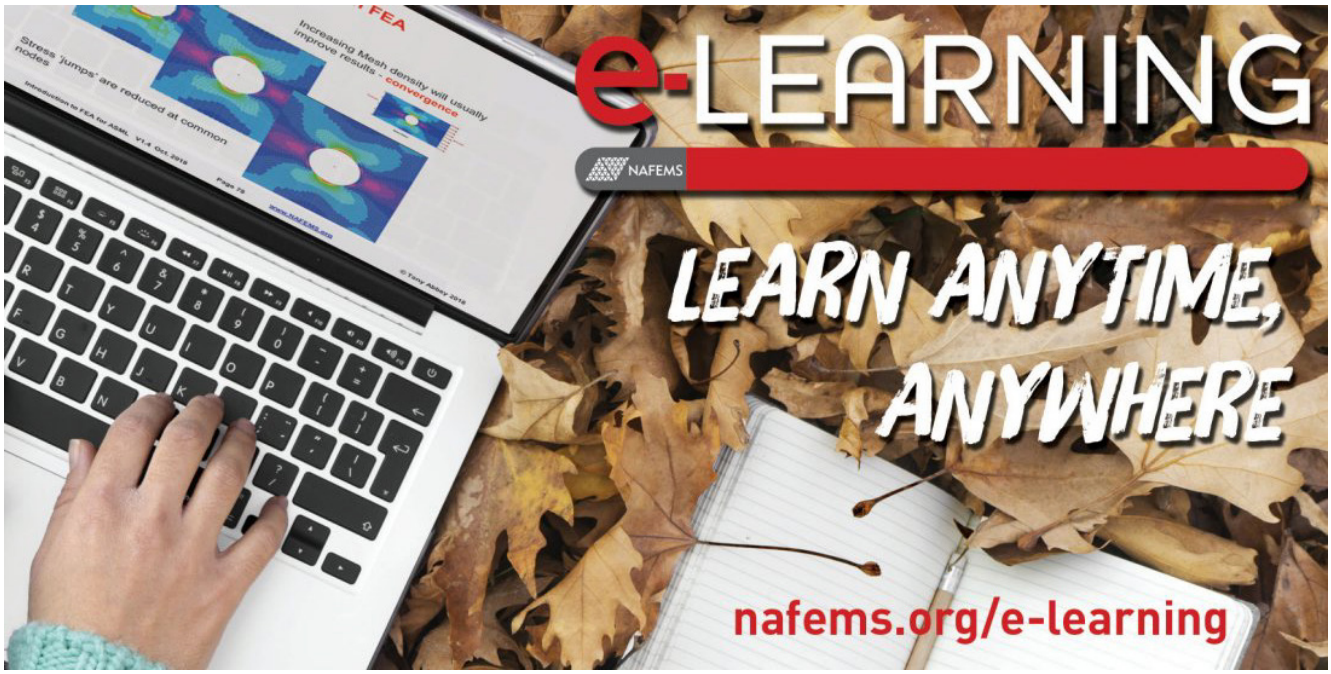
cherung digitalisieren lassen. Dabei nutzen sie ihr einzigartiges Portfolio an Technologien, um den digitalen Faden eines Bauteils zu verknüpfen und seinen Ursprung zurückzuverfolgen. Möglich wird dies durch das gemeinsame Engagement für offene Architekturen, die sowohl Daten integrieren als auch Arbeitsabläufe automatisieren zwischen den führenden AM-Anwendungen von Hexagon und den von Herstellern gewählten Drittanbieter-Geräten und -Softwarepaketen.
Mathieu Pérennou, Global Business Development Director für die additive Fertigung bei Hexagon Manufacturing Intelligence erklärt: „Mit Authentise schaffen wir ein Framework der nächsten Generation, dank dem unsere Kunden flexible, vollständig digitalisierte Produkionsabläufe in privaten Cloud-Umgebungen verwalten. Für Hersteller ist die additive Fertigung ein sich wandelnder, komplexer Markt mit einer großen Auswahl an ausgezeichneten Tools, Druckern und Materialien. Wir sind davon überzeugt, dass unsere offenen und flexiblen Systeme uns ermöglichen, Kundenanforderungen schnell umzusetzen und ihre einzigartigen Umgebungen umfassend zu berücksichtigen. Dies trägt zur Verknüpfung des Datenflusses sowie zur Optimierung ihrer Arbeitsabläufe in allen Phasen des AM-Prozesses bei – vor, während und nach der Fertigung und unterstützt zudem spezifische Normen und Compliance-Anforderungen."
Das von Authentise entwickelte offene und auf die speziellen Bedürfnisse der additiven Fertigungsverfahren abgestimmte Manufacturing Execution System (MES) macht das Unternehmen zu einem Schlüsselpartner in Hexagons offenem AM-Ökosystem. Dieses wachsende Ökosystem bietet ein breites Lösungsportfolio, auf dessen Basis Hexagon Lösungen entwickelt, die auf spezifische Kundenanforderungen verschiedener Branchen sowie jeden Komplexitätsgrad zugeschnitten sind – von der Großserienfertigung von Präzisionsverzahnungen aus Metall bis hin zur First-Time-Right-Produktion maßgeschneiderter Luft- und Raumfahrtbauteile aus Verbundwerkstoffen.
Andre Wegner, CEO von Authentise sagt: „Wir freuen uns, die Lösungen von Hexagon mit unserem offenen Workflowmanagement-System zu kombinieren, denn so entsteht eine einzigartige End-To-End-Lösungsplattform. Die Integration von Daten aus Hexagons führenden Softwarelösungen und Sensoren sorgt sowohl für nahtlosen Bedienkomfort und die Automatisierung des gesamten Prozesses als auch die Fähigkeit, aus Daten zu lernen. Diese Partnerschaft repräsentiert einen deutlichen Wandel für die Branche – gemeinsam liefern wir den integrierten digitalen Faden für die additive Fertigung, wonach Kunden bereits seit Längerem suchen."
Für weitere Informationen zu dieser Partnerschaft und für Anfragen zu einer kostenlosen Prozessevaluation besuchen Sie bitte www.authentise.com/hexagon.

www.hexagon.com
www.mscsoftware.com

SICOS-BW

Data Analytics für KMU: Mehr als 200 KMU aus Baden-Württemberg nutzten bereits Beratung des SDSC-BW

Mehr als 200 kleine und mittlere Unternehmen (KMU) aus Baden-Württemberg ließen sich bis dato vom Smart Data Solution Center Baden-Württemberg (SDSC-BW) intensiv über die Vorteile und Nutzungsmöglichkeiten von Smart Data beraten. „Viele KMU scheuen vor der Planung und Umsetzung von gewinnbringenden Digitalisierungsvorhaben zurück, weil sie selbst nicht über das notwendige Know-how verfügen. Wir freuen uns, dass wir diese Unternehmen mit unserer Expertise neutral und unabhängig unterstützen und voranbringen konnten", sagt Dr. Andreas Wierse, Geschäftsführer der Sicos BW GmbH. Das Stuttgarter Beratungsunternehmen initiierte das SDSC-BW gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Jahr 2014, um kleinen und mittelständischen Unternehmen den Zugang zu Smart Data Technologien zu erleichtern.
Finanziell unterstützt wird Sicos BW mit seinen Vorhaben von Beginn an durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (MWK). „Im Rahmen unserer Landesstrategie zu High Performance Computing und Data Intensive Computing ist uns der Technologie- und Knowhow-Transfer aus der Wissenschaft in die Wirtschaft ein besonderes Anliegen. Die Sicos BW GmbH ist hier ein zentraler Akteur, um kleinen und mittelständischen Unternehmen mit einem niederschwelligen Angebot den Einstieg in die Simulation und Datenanalyse zu ermöglichen. Von der international konkurrenzfähigen digitalen Forschungsinfrastruktur unserer exzellenten Wissenschaft profitiert somit auch unsere innovationskräftige Wirtschaft", sagt Wissenschaftsministerin Theresia Bauer.
Nur wenige KMU können aus eigener Kraft einschätzen, ob, wann und wie sich Datenanalysen für sie lohnen. Das SDSC-BW bietet ratsuchenden KMU deshalb eine Potentialanalyse an: Im Kontext ihrer eigenen Daten lernen die Unternehmen erste Smart-Data-Technologien kennen und deren Einsatz im eigenen Unternehmensumfeld zu beurteilen. Auf Basis der Analyse-Ergebnisse geben die SDSC-BW-Experten Handlungsempfehlungen, benennen mögliche Einsatzfelder und stehen bei Bedarf als Begleiter bei der Umsetzung eines tiefergehenden Projekts oder der passenden Partnerwahl zur Verfügung. „Mit knapp 30 Unternehmen konnten wir bereits erfolgreiche Potentialanalysen durchführen und so gewinnbringende Digitalisierungsprojekte anstoßen", freut sich Wierse. Weil das SDSC-BW durch das Landesministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst finanziell unterstützt wird, sind Analyse und Beratung für die Unternehmen kostenfrei (Referenzen).
Neben den Beratungsprojekten ist es auch das umfassende hauseigene Weiterbildungsangebot für KMU, das potenziellen Nutzern die Umsetzung von Digitalisierungsprojekten näherbringt. Events wie der Smart Data & KI Tag stoßen auf großes Interesse. An der zweiten



Ausgabe dieser Veranstaltung Ende 2020 nahmen knapp 100 KMU aus der Region teil. „Die Begegnung auf Augenhöhe ist für die Unternehmen sehr wertvoll. Es entsteht ein gewinnbringender Austausch und Partnerschaften kommen zustande", sagt Murat Malyemez, bei Sicos BW für die Betreuung der KMU zuständig.
Das Solution Center selbst arbeitet derzeit mit fast 20 Partnern zusammen und möchte sein Netzwerk weiter ausbauen – insbesondere das der kleinen und mittelständischen (Dienstleistungs-)Partner. „Dabei geht es in erster Linie nicht darum, dass wir als SDSC-BW neue Partner finden, sondern wir vielmehr fördern, dass die KMU untereinander zu Partnern werden", erklärt Wierse. Ziel ist es, dass KMU, die Data Analytics nutzen möchten, dazu befähigt werden, dies auch eigenständig zu tun. So können sie selbst profitieren, Mehrwert für ihre Kunden generieren und nicht zuletzt ihre erworbenen Kenntnisse und Fähigkeiten an andere weitergeben – sei es als Dienstleistung oder Hilfestellung. Dass dies funktioniert, zeigt das Projekt mit der Karlsruher EDI GmbH.

www.sicos-bw.de

SIEMENS PLM

Siemens erweitert sein Simcenter-Portfolio um Prüfungen unter extremen Bedingungen

Siemens Digital Industries Software präsentiert mit Simcenter Scadas RS Hardware das neueste Datenerfassungssystem für schnelle und präzise Prüfungen unter rauen Bedingungen. Mit Simcenter Scadas RS können Testingenieure und Qualitätsmanager ihre Testdatenerfassung verbessern und die Effizienz in rauer Umgebung steigern, wie sie zum Beispiel bei Nutzfahrzeugen, Bau- und Landmaschinen besteht. Diese neueste Erweiterung der Simcenter Softwarelösungen für Simulation und Test ist Teil des übergeordneten Xcelerator Portfolios integrierter Software und Services von Siemens..
Lastdatenerfassungstests werden häufig an Prototypen unter schwierigen Bedingungen auf Prüfgeländen, öffentlichen Straßen oder in abgelegenen Gegenden durchgeführt. Zudem werden Prüf- und Messteams ständig gefordert, viele Tests in immer kürzeren Zeiten durchzuführen. Simcenter Scadas RS ist modular aufgebaut und bietet größtmögliche Flexibilität beim Anbau an ein Fahrzeug oder eine Maschine. Messkampagnen können unter extremen Temperaturen, bei hoher Luftfeuchtigkeit, Staub und Schmutz durchgeführt werden und Scadas RS hält auch starken Vibrationen und Stoßeinwirkungen stand. Damit werden nicht nur präzise Messdaten möglich, sondern auch detaillierte Analysen und optimierte Prozesse in der Software-Suite Simcenter Testlab. Ab hier können Testingenieure die validierten Daten zur weiteren Lastdatenanalyse verwenden und sie in Verbindung mit Simulationsmodellen zur Aktualisierung des digitalen Zwillings einsetzen.
Testmanager können die Kapitalrendite (ROI) optimieren und die Testproduktivität steigern, wenn sie Simcenter Scadas RS in bestehende Prozesse und Verfahren integrieren. Simcenter Scadas RS lässt sich leicht in Firmennetzwerke einbinden und über Mobilfunknetze integrieren. Es ermöglicht den gleichzeitigen Zugriff mehrerer Nutzer auf die integrierte Software von jedem Gerät: PC, Tablet oder Smartphone. Als wahres „Edge"-Gerät kann es in Automatisierungsprozesse für Cloud-Computing und weitergehende technische Analysen integriert werden.

www.simens.com/plm

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

Cascon			
verteilt	Online	www.simulation-conference-center.com	Cadfem
Comsol Days			
verteilt	Online	www.comsol.com/comsol-days	Comsol
Permas Tech Meetings			
verteilt	Online	www.intes.de	Intes
NAFEMS Kurs: NEU: Automatic Optimization for Efficient Development			
07.06	Online	www.nafems.org/opt21-2	NAFEMS
Simulia Regional User Meeting Eurocentral			
15.-17.06.	Online	events.3ds.com	Dassault Systemes
NAFEMS Seminar: Integration von Simulation und Test in der Produktentwicklung			
16.-17.06	Online	www.nafems.org/simtest21	NAFEMS
Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage			
17.-18.06.	Online	www.dynardo.de	Ansys
NAFEMS Kurs: Verification and Validation in Engineering Simulation			
29.06.-01.07.	Online	www.nafems.org/vandv21-2	NAFEMS
NAFEMS Kurs: NEU: Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear			
30.06.-01.07	Online	www.nafems.org/fkm-nonlin21-1	NAFEMS
Safety Week			
31.08.-02.09.	Würzburg, D	www.carhs.de	Carhs
Graz Symposium Virtual Vehicle			
01.-02.09.	Graz, A	www.gsvf.at	ViF
ALTI Automotive Audio Conference (AAAC)			
09.-10.09.	München, D	altiassoc.org/alti-automotive-audio-conference	ALTI
Europäische LS-DYNA Konferenz			
04.-07.10.	Ulm, D	www.dynamore.de	DYNAmore
HxGN Live Design & Engineering			
12.-14.10.	Online	www.hexagon.com	Hexagon/MSC.Software
CAE Grand Challenge			
19.-20.10.	Hybrid/Hanau, D	www.carhs.de	Carhs
OpenFOAM Conference			
19.-21.10	Berlin, D	www.esi-group.com	ESI Group

incorporating

25.-29.10.	Hybrid/Salzburg, A	www.nafems.org/congress	NAFEMS

incorporating

Automotive Symposium

25.-29.10.	Hybrid/Salzburg, A	www.nafems.org/congress	NAFEMS

incorporating

26.-27.10.	Hybrid, Salzburg, A	www.nafems.org/congress	NAFEMS

Weitere Veranstaltungen: www.nafems.org/events

Probabilistische Ermüdungs- und Zuverlässigkeitssimulation

A. Halfpenny (HBK UK), A. Chabod (HBK France),
M. Bonato (Valeo Thermal Systems, France), S. Vervoort (HBK Germany)

In diesem Beitrag werden die Vorteile von probabilistischen Ermüdungssimulationen und stochastischem Design im Vergleich zum traditionellen deterministischen Designansatzes dargestellt. Es belegt, wie effektiv eine Monte-Carlo Simulation mit Latin Hypercube Sampling ist, um simulierte Zuverlässigkeitstests auf Basis von finiten Elementen Standardmodellen zu erzielen. Ein besonderes Interesse gilt den Auswirkungen von Dauerfestigkeit und statischem Versagen in der Zuverlässigkeitsanalyse. Die Robustheit des Designs wird dabei durch die Verwendung einer faktoriellen Stichprobentechnik in Verbindung mit einem Response Surface Modell sichergestellt. Empfehlungen werden gegeben, um die Auswirkungen von Dauerschwingfestigkeit, statischem Versagen und Nichtlinearitäten in den Ermüdungslebensdauerkurven während einer Weibull Analyse zu berücksichtigen. Abschließend wird in einer Fallstudie gezeigt, wie die Vorgehensweise auf einen Ladeluftkühler angewendet wird. Ein Vergleich zwischen gemessenen Zuverlässigkeitsergebnissen und Simulationen wird durchgeführt, wobei sowohl deterministische als auch stochastische Ansätze verwendet werden.

1. Einführung

Eine betriebsfeste Auslegung mechanischer Systeme wird konventionell mit Hilfe von deterministischen Prozessen durchgeführt. Für vorgegebene Eingabeparameter wird eine konsistente Anzahl von Ermüdungs- bzw. Lebensdauerergebnissen ohne Streuung bestimmt. De facto wird ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor zu jedem Eingabeparameter zugeschlagen. Modellierungsfehler können mit einem weiteren Sicherheitsfaktor, der den Schädigungsergebnissen hinzugefügt wird, berücksichtigt werden. In der Regel werden dadurch die Simulationsergebnisse konservativer, wobei aber die endgültige Sicherheitsmarge, die Zuverlässigkeit oder die Ausfallrate nicht gesichert angegeben werden können. Dagegen ist eine probabilistische Ermüdungssimulation, eine stochastische Methode, in Abbildung 1 dargestellt. Die Eingaben werden zusammen mit einem Erwartungswert einer probabilistischen Wahrscheinlichkeitsverteilung abgebildet. Diese Vorgehensweise hilft, eine schlechte Betriebszuverlässigkeit zu vermeiden und mögliche Überdimensionierungen zu reduzieren. Dadurch wird erkennbar, welche Unsicherheiten größtenteils zum konservativen Gesamtdesign beitragen, und es wird eine detailliertere Untersuchung der Unsicherheiten möglich. Ein Vergleich zwischen deterministischen und stochastischen Designmethoden ist in den Veröffentlichungen [1] und [2] dargestellt.

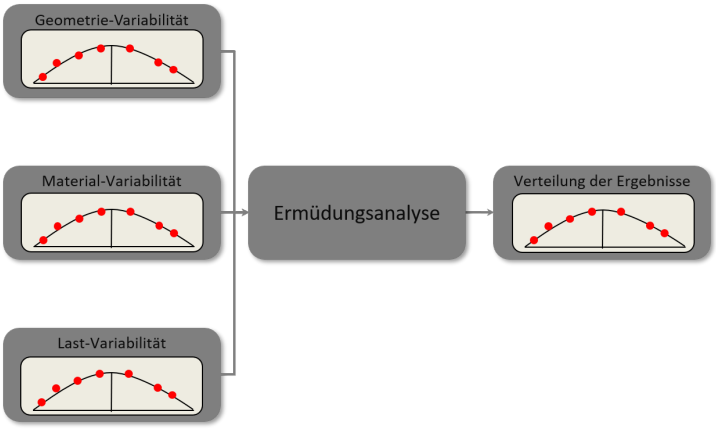


Abb. 1: Probabilistischer Ansatz

2. Stochastische Ermüdungssimulationen

Konventionelle Ermüdungsanalysen mechanischer Systeme werden, wie bereits zuvor erwähnt, mit einem deterministischen Prozess realisiert, bei dem konstante Werte den Eingabeparametern zugeordnet werden. Derselbe Simulationsprozess zur Ermittlung der Zuverlässigkeit kann ebenso mit einem probabilistischen Ansatz realisiert werden, indem als Kern ein deterministischer Monte Carlo Subprozess (Wrapper) integriert wird, wie in der Abbildung 2 (blau) dargestellt. Der Wrapper wiederholt den deterministischen Prozess mit einer statistischen Variation der Eingabeparameter bei jedem Durchlauf.

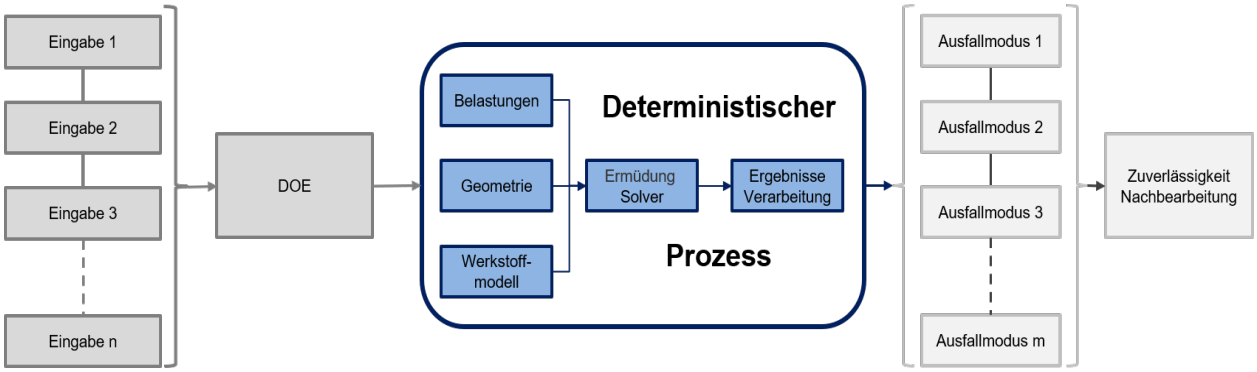


Abb.2: Schema einer probabilistischen Designanalyse

Am Anfang des Prozesses steht die Festlegung der statistischen Variabilität und der passenden Auswahl der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion, z.B. einer Gaußschen Normalverteilung. Es schließt sich ein Design of Experiment (DOE) an, wo mit der Hilfe von geeigneten Methoden der Eingangsparametersatz im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Robustheit oder im Hinblick auf beide optimiert werden kann. Die DOE vermindert dabei den Berechnungsaufwand durch die Reduzierung der Anzahl der Eingangsparametern und damit die Wiederholungsanzahl des sich anschließenden, deterministischen Subprozesses. Somit wird nur der optimierte Satz im anschließenden Monte Carlo Prozess verwendet. Diese Stelle ist die eigentliche Ermüdungsanalyse mit der Bestimmung der Lebensdauerwerten. Im weiteren Prozessverlauf werden die Zuverlässigkeitsparameter abgeschätzt und am Ende ausgeben.

2.1. Monte-Carlo Simulation mit Latin Hypercube Sampling

Die hier verwendete, stochastische Simulation basiert auf der Monte-Carlo Methode mit einem Latin Hypercube Sampling. In diesem Beitrag wird nicht detailliert auf die theoretischen Grundlagen der Monte-Carlo Simulationsmethode eingegangen; dazu sei hier auf weiterführende Publikationen wie z. B. die Publikation von R. Y. Rubinstein und D. P. Kroese [3] verwiesen.

Der prinzipielle Ansatz der Monte-Carlo Simulationsmethode berechnet eine große Anzahl von Zufallswerten, die sich auf jeden statisch zu variierenden Parameter in der Analyse beziehen. Diese Zufallswerte eines Parameters folgen dabei einer für diesen Parameter spezifischen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Eine Pseudo-Zufallszahl wird in einem Bereich (0,1) basierend auf einer Gleichverteilung berechnet, wobei jeder Wert mit der gleichen Wahrscheinlichkeit aus dem Bereich entnommen wird. Diese Gleichverteilung wird durch eine kumulative Dichtefunktion (CDF) der erforderlichen Verteilung abgebildet. Das Resultat besteht dann aus einer Reihe von Zufallswerten mit der erforderlichen statistischen Verteilung. Eine detailliertere Theorie des Latin Hypercube Sampling wird in den Publikationen [4] und [5] beschrieben.

Das vorgeschlagene Prozedere unterscheidet sich von der Theorie der Monte-Carlo Verfahrensweise in zweierlei Hinsicht:

- Das Stichprobenverfahren wird dahingehend modifiziert, dass die Tests gleichmäßiger über den Bereich verteilt sind.
- Die multivariaten Stichproben basieren auf dem Latin Square Ansatz.

Ein grundsätzlicher Nachteil des Monte-Carlo Verfahrens ist die Voraussetzung einer großen Anzahl von Stichproben, um eine vollständige Abdeckung des Parameterbereichs (insbesondere an den Rändern der Verteilungen) zu gewährleisten. Das Latin Hypercube Sampling reduziert diesen Nachteil. Eine einzelne Stichprobe wird jeweils nach dem Zufallsprinzip innerhalb jedes Feldes ausgewählt, wodurch sichergestellt wird, dass Punkte aus allen Abschnitten der Verteilung eingesetzt werden, während die erforderliche Verteilung beibehalten wird (Abb. 3).

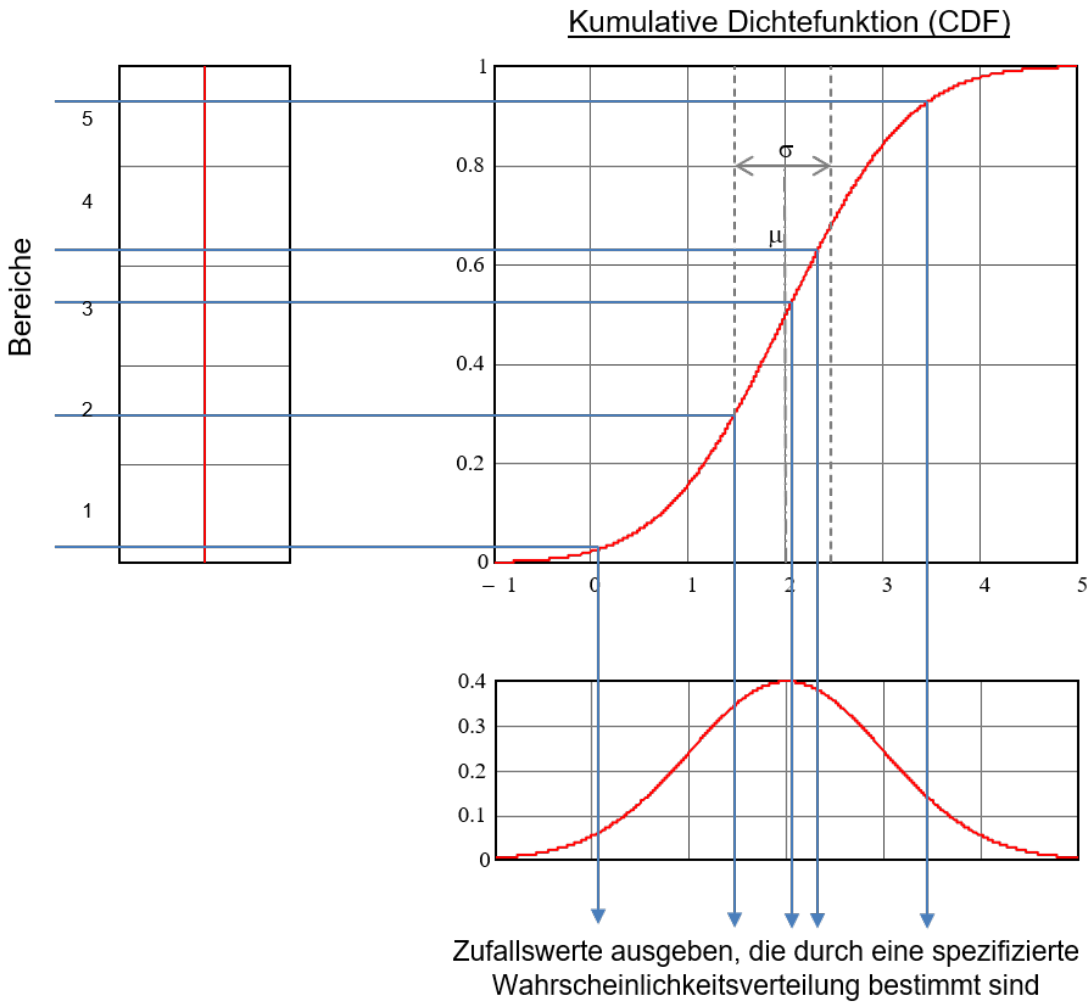


Abb. 3: Monte-Carlo-Methode mit Latin Hypercube Sampling

In Abbildung 3 ist zum besseren Verständnis, graphisch vereinfacht die Latin Square Methode mit einer Normalverteilung in einer zwei-dimensionalen Darstellung schematisch skizziert, da die n Dimensionen der Latin Hypercube Methode nicht darstellbar sind. In der zwei-dimensionalen Darstellung ist klar zu erkennen, dass jeweils nur eine Zufallszahl pro Reihe und Spalte entnommen wird. Latin Hypercube stellt eine Erweiterung um n Dimensionen da. Diese Methode ist somit multi-dimensional und verwendet n Unterbereiche, wobei jeweils eine einzige einheitliche Zufallszahl aus jedem Unterbereich ausgewählt wird. Erfahrungen zeigen, dass die Latin Hypercube Methode ideal für statistische Analysen geeignet ist. Das ist der Grund, warum sie für die Eingangsparameter der Ermüdungsanalyse bzw. häufig für Zuverlässigkeitsauslegungen eingesetzt wird. Eine detaillierte Beschreibung der Latin Hypercube Methode befindet sich im Artikel [2].

2.2. Faktorielle & Response Surface Methoden

Im DOE können zur Optimierung des Designraums, wie bereits erwähnt, verschiedene Auslegungen im Hinblick auf Zuverlässigkeit und auf Robustheit verwendet werden. Neben den beschriebenen Methoden zur möglichen Auslegung auf Zuverlässigkeit gibt es für die Auslegung auf Robustheit andere Ansätze, faktorielle oder Response Surface Methoden. Faktorielle Methoden konzentrieren sich auf die Ränder, wobei sie sowohl auf einen zweidimensionalen als auch auf einen drei-dimensionalen Designraum angewendet werden können. Response

Surface Methoden verwenden bzw. ermitteln Maxima einer Fläche. Varianten sind dabei der maximale Punkt, der minimale Punkt oder der Sattelpunkt der Fläche. In der Fallstudie am Beispiel des Ladeluftkühlers wurde der Fokus aber nur auf die Zuverlässigkeit und nicht auf die Robustheit gelegt. D.h. die hier aufgeführten Methoden wurden nicht verwendet. Eine Kombination aus beiden stellt aber grundsätzlich eine Alternative dar.

2.3 Reduced Order Modelling (ROM)

Ein anderer Aspekt ist die Verwendung von großen FEA-Modellen, was zu übermäßigen Laufzeiten und erheblichem Speicherbedarf führen kann. Zusätzlich ist eine große Anzahl von Simulationsläufen erforderlich. Dies wird durch die Verwendung eines Reduced Order Modells (ROM) revidiert. Das ROM ist eine Übertragungsfunktion, die die Eingangslasten mit den Spannungsantworten an den kritischen Versagensstellen in Beziehung setzt. Da die Ermüdungsschädigung exponentiell mit der Spannung korreliert, können auch große FEA Modelle auf relativ wenige kritische Ermüdungspositionen reduziert werden. Es ist daher wünschenswert, die FEA-Ausgabe auf die identifizierten kritischen Stellen zu beschränken. Bei linear-statischen FEA-Modellen ist das ROM einfach ein Skalierungsfaktor, das einen Eingangslastfall mit dem Spannungstensor an einer bestimmten Versagensstelle in Beziehung setzt. Die resultierenden Spannungstensoren werden dann unter Verwendung der linearen statischen Überlagerung über alle Lastfälle summiert, wie in der folgenden Gleichung dargestellt: [6]

$$\sigma_{ij}(t) = \sum_{k} P_k\,(t) \cdot s_{ij,k}$$

Dabei ist $\sigma_{ij}(t)$ der zeitliche Verlauf des Spannungstensors an einem einzelnen kritischen Knoten, $P_k(t)$ der Lastzeitverlauf für den Lastfall k, und $s_{ij,k}$ ist der Spannungstensor aus der FEA Berechnung für den Lastfall k unter einer statischen Einheitslast. Die folgenden Varianten können sich aus unterschiedlichen Belastungen ergeben:

- **Zufällige PSD Belastung:** Wird die Struktur mit zufälligen dynamischen Lasten, die als PSD-Funktionen (Power Spectral Density) ausgedrückt werden, belastet, wird das ROM durch die harmonische Frequenzgangfunktion $H(\omega)$ dargestellt.
- **Nichtlineare FEA:** Im Fall von nichtlinearen FEA-Modellen kann es schwieriger werden das ROM zu definieren. Im schlimmsten Fall muss das gesamte FEA-Modell zusammen mit dem Ermüdungsmodell im Rahmen des in Abbildung 2 gezeigten deterministischen Prozesses erneut gelöst werden.

3. Zuverlässigkeitssimulation

Die Schätzung von Zuverlässigkeitsparametern, assoziiert mit einer geeigneten Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilung, ist abhängig von simulierten oder gemessenen Lebensdauerdaten. Eine ausführliche Beschreibung der Zuverlässigkeits-Lebensdaueranalyse ist im Beitrag [7] dargestellt.

An dieser Stelle wird sich vor allem auf die Weibull Verteilung konzentriert:

$$p(x) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

mit

- $p(x)$ als Weibull Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Lebensdauer x im Bereich $(x \geq \gamma \geq 0)$,
- η als die charakteristische Lebensdauer,
- β als Formparameter (oder Steigung) und
- γ als Positionsparameter. In Bezug auf die Lebensdauerverteilungen stellt der Positionsparameter eine Zeitverschiebung dar, was gemeinhin als 3-Parameter Weibullkurve bezeichnet wird. Im Falle einer 2-Parameter Weibullkurve wird der Positionsparameter $\gamma = 0$.

Testdaten werden häufig mit einer 2-Parameter Weibullverteilung abgebildet, weil die Weibullkurve im logarithmischen Diagramm linear dargestellt wird. Dabei wird zwischen spannungsbasierten und dehnungsbasierten Testergebnissen unterschieden. Für die dehnungsbasierten Daten ist oft eine 3-Parameter Weibullverteilung die bessere Wahl.

Simulationsdaten werden mit der gleichen 3-Parameter Weibullverteilung abgebildet. Wenn unterschiedliche Methoden bei Simulations- und Testdaten verwendet werden, muss ein Zusatzparameter θ verwendet werden. Auf diesen Zusammenhang wird in der Fallstudie genauer eingegangen.

3.1. Ausfälle und statisches Versagen

Bei der Abschätzung der Zuverlässigkeitsparameter einer Ermüdungsanalyse sind zusätzlich Grenzen zu berücksichtigen. In den Lebensdauer-Ergebnissen kann es zu Werten kommen die mit *Beyond Cut-off* oder *Static Failure* bezeichnet werden. [2]

- Ermüdungsanalysen werden meist mit einem Wert (z.B. einem Grenzwert der Dauerfestigkeit) begrenzt. Dieser Wert wird als *Beyond Cut-off* bezeichnet. Ab dem Erreichen dieses Lebensdauerwertes wird das Ergebnis der Berechnung als dauerfest bewertet.
- Ebenso kann der Fall eintreten, das die berechneten Festigkeiten die Material-Zugfestigkeit überschreitet, die durch die Materialkennwerte vorgegeben ist. Dies wird als *Static Failure* bezeichnet.
- Werden zusätzlich die Ergebnisse der Materialversuche betrachtet, kann ein dritter Fall eintreten. Er beschreibt einen Zeitpunkt (z.B. 10 Mio. Schwingspiele), bei der der Versuch fest definiert abgebrochen wird. Das Ergebnis des abgebrochenen Versuches zu diesem Zeitpunkt wird als *Durchläufer* bezeichnet, da zu diesem Zeitpunkt die Probe nicht versagt hat. Ein solch fester Abbruchzeitpunkt wird meist aus wirtschaftlichen Gründen verwendet.

Alle diese drei Fälle müssen unterschiedlich berücksichtigt werden. Der erste Fall kann in der Zuverlässigkeitsanalyse als Suspended Test behandelt werden. Der zweite Fall kann über eine Robustheitsanalyse berücksichtigt werden. Wenn zusätzlich auch der dritte Fall berücksichtigt werden soll, muss bei der Abschätzung der Zuverlässigkeitsparametern der Fall wegen der unterschiedlichen Versagensphysik als nicht unterbrochener Versuch betrachtet werden.

4. Fallstudie

In diesem Anwendungsbeispiel wird die Zuverlässigkeit eines Ladeluftkühlers unter Anwendung des vorher beschriebenen Simulationsprozesses bestimmt. Es werden Daten aus physikalischen Versuchen mit Simulationsdaten korreliert. Dabei werden sowohl deterministische als auch stochastische Ermüdungssimulationen berücksichtigt. Ziel ist es, die Auswirkungen der Parameterunsicherheit zu verstehen und die Simulationen als Instrument zur Extrapolation physikalischer Tests zu nutzen.

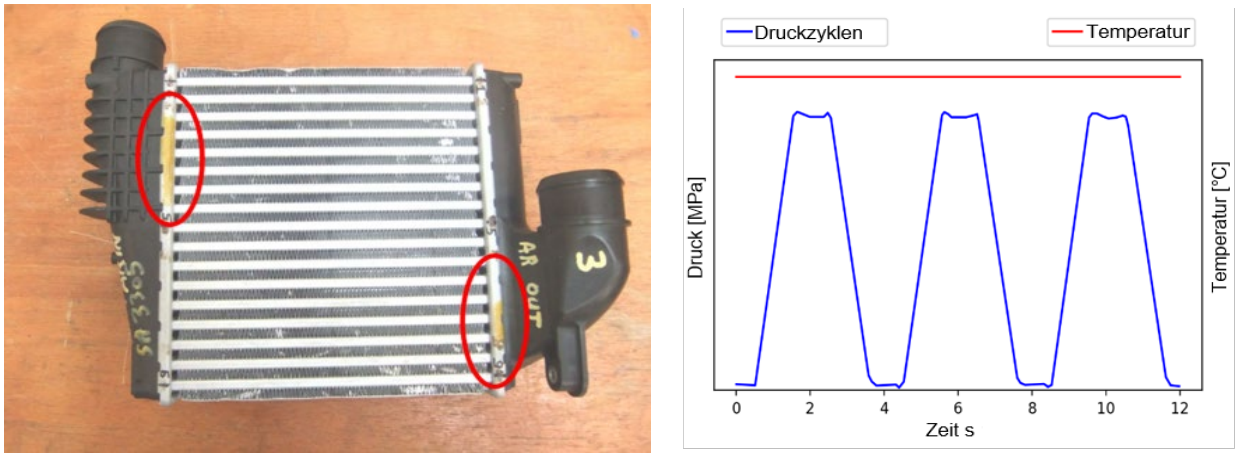


Abb. 4: Ladeluftkühler (links) und Belastungsprofil (rechts)

Physikalische Versuche wurden an fünf Ladeluftkühlern durchgeführt, in denen die Kühler kontinuierlichen Druckzyklen bei erhöhter Temperatur ausgesetzt wurden. Die Entstehung der Ermüdungsrisse bzw. ein Versagen wurde in der Kopfschiene des Ladeluftkühlers beobachtet (Abb. 4). Die Anzahl der Druckzyklen bis zum Versagen wurden aufgezeichnet und die einzelnen Lebensdauern beim Bruch sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Die erwartete

Lebensdauer (Annahme: gemittelte Parameterwerte) wurde mit 499.300 Zyklen bis zum Versagen berechnet. Dies zeigt eine sehr gute Korrelation mit der in Tabelle 1 angegebenen durchschnittlichen Testlebensdauer von 505.286 Zyklen (1,2% Streuung).

Test	Lebensdauer [Zyklen]
1 (*Minimum*)	351630
2	445000
3	465000
4	615000
5 (*Maximum*)	*649800*
Mittelwert	**505286**
Verhältnis *(max/min)*	*1.848*

Tab.1: Anzahl der Druckzyklen bis zum Versagen im Versuch

Das Finite Elemente Modell des Ladeluftkühlers (Abb. 5) wurde mit Abaqus erstellt, und die sich daran anschließenden Ermüdungsanalysen wurden mit nCode DesignLife und die Zuverlässigkeitsanalysen mit ReliaSoft durchgeführt.

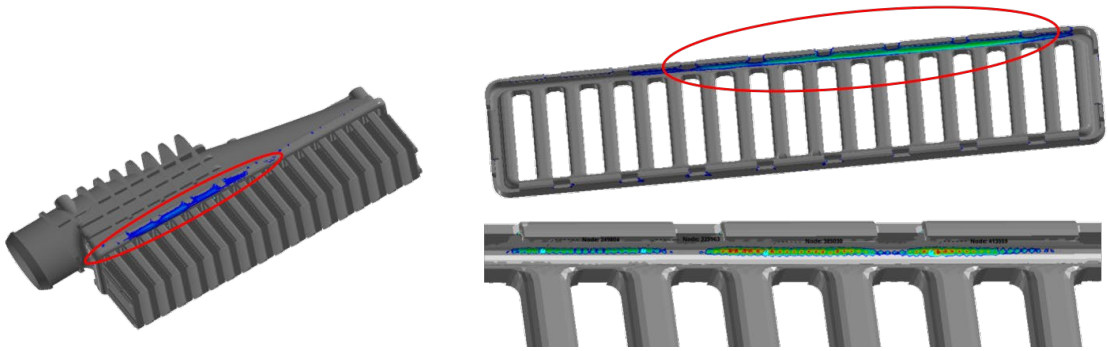


Abb. 5: FE Modell des Ladeluftkühlers mit Bereichen niedriger Lebensdauer

Das Material der Kopfschiene besteht aus der Aluminiumlegierung AL 3915. Die Schwingfestigkeitsversuche an Blechen aus diesem Material wurden in unserem eigenen Materiallabor, dem Advanced Materials Characterisation and Testing (AMCT) Service, durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsauswertung ergeben die Dehnungs-Wöhlerlinie und die zyklische Spannungs-Dehnungskurve des Materials. Die statistische Unsicherheitsanalyse wurde für 2 Simulationsparameter, die Materialstreuung und Modellierungsfehler, durchgeführt. Die Streuung der Materialdaten wird als aleatorische Unsicherheit charakterisiert. Mit dieser Unsicherheit werden natürliche physikalische Phänomene, die irreversibel sind, bezeichnet. Die Spannungsstreuung, die aus den Modellierungsfehler im FEA Modell entstehen, sind dagegen eine epistemische Unsicherheit, die mit größerem Arbeitsaufwand und Verfeinerung reduziert werden kann. Es existiert jedoch eine Grenze für den Umfang einer möglichen Verfeinerung wobei auch ein Kompromiss zwischen der wünschenswerten Genauigkeit und der Komplexität des FEA-Modells, gefunden werden muss. Durch die stochastische Analyse kann bestimmt werden, ob ein optimaler Genauigkeitsgrad erreicht wird.

Es wird eine statistische Monte-Carlo-Simulation mit 20 Iterationen mit nCode DesignLife und eine statistische Zuverlässigkeitsstudie mit ReliaSoft Weibull++ durchgeführt. Ein 2-Parameter-Weibull-Modell wurde zur Anpassung der experimentellen Daten und ein 3-Parameter-Weibull-Modell für die Simulationsdaten verwendet. Die Ergebnisse aus den gemessenen und simulierten Daten sind in der Abbildung 6 in einem Weibull-Diagramm gegenübergestellt. Der Vergleich zwischen den Test- und Simulationsergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung.

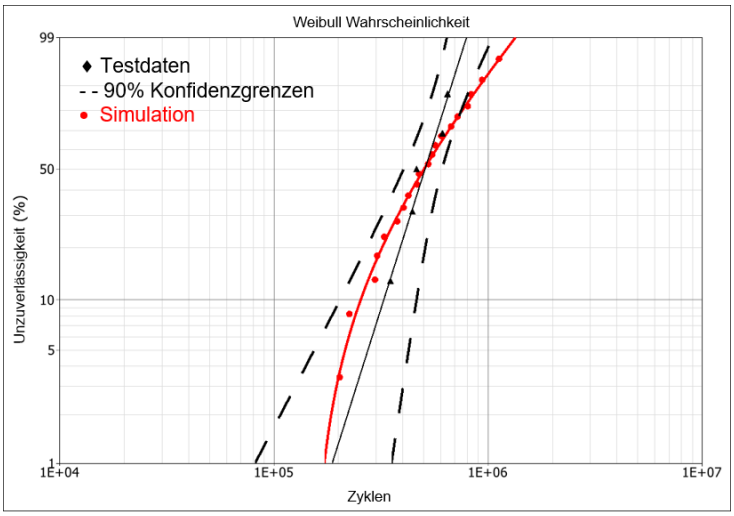


Abb. 6: Vergleich zwischen den Test- und Simulationsergebnissen

Die Simulationsergebnisse liegen größtenteils, außer bei großen Werten der Lebensdauer, innerhalb des 90%-Konfidenzintervalls der Testergebnisse. Ein Vergleich der beiden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen ist in Abbildung 7 dargestellt.

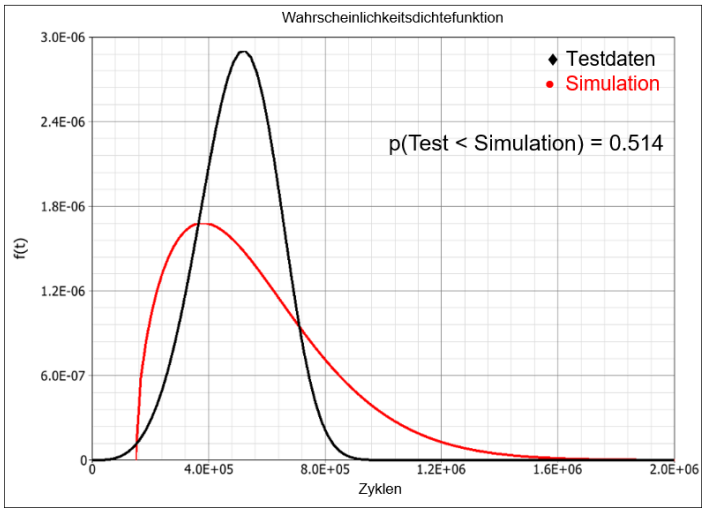


Abb. 7: Vergleich der Weibull Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Test- und Simulationsdaten

Die Wahrscheinlichkeit von Test zu Simulation ist gleich 0,514. D. h. die Wahrscheinlichkeit, dass eine Testlebensdauer niedriger oder größer als eine Simulationsprognose sein kann, ist fast gleich groß. Die Tabelle 2 zeigt eine Zusammenfassung der statistischen Ergebnisse.

	β	η	γ	$\theta = \eta + \gamma$
Test	4.240	553386		553386
Vollständige Simulation	1.555	447917	148610	596527
Materialvariabilität	2.030	417579	156400	573979
Fehler bei den FEA Spannungen	1.989	126357	390550	516907

Tab.2: Zuverlässigkeitsstatistiken

Die gute Korrelation wird von den Werten des Parameters θ aus Test und Simulation bestätigt. Hier ist es besser, zum Vergleich den Parameter θ anstelle von η zu verwendet, da die Testdaten aus einer 2-Parameter-Analyse und die Simulationsdaten aus einer 3-Parameter-Analyse stammen. Die Gesamtsimulation berücksichtigt die statistische Variabilität, die sowohl Materialstreuung als auch Modellierungsfehler enthält. In der dritten Zeile der Tabelle wurden nur die Auswirkung der Materialvariabilität berücksichtigt - die FE-Fehler werden in diesem Fall vernachlässigt. In ähnlicher Weise zeigt die vierte Zeile nur die Ergebnisse, die auf Modellierungsfehlern beruhen. Die Werte dieser beiden Zeilen sind hilfreich, um festzustellen, ob die Variabilität eines Parameters mehr oder weniger signifikant ist. Die in der Tabelle angegebenen Werte von $\beta > 1$ sind ein Hinweis auf ein ermüdungsbedingtes Versagen, das im Fall des Ladeluftkühlers erwartet wird. Der scheinbare Wert von $\beta = 1{,}555$ für die Gesamtsimulation im Vergleich zu $\beta = 4{,}240$ für den Test erfordert jedoch eine zusätzliche Erklärung. Hierbei ist ein direkter Vergleich der Werte nicht statthaft, da β aus zwei unterschiedlichen Analysen kommt. Bei der abschließenden Beurteilung der Ergebnisse muss auch der Effekt einer versagensfreien Lebensdauer berücksichtigt werden, der in der Tabelle durch den Parameter γ repräsentiert wird. In der Abbildung 8 sind die Mittelwerte dargestellt. Es zeigt sich nochmals die gute Korrelation. Die Simulationsdaten liegen, wie bereits erwähnt, innerhalb der 90%-Konfidenzgrenzen der Testdaten.

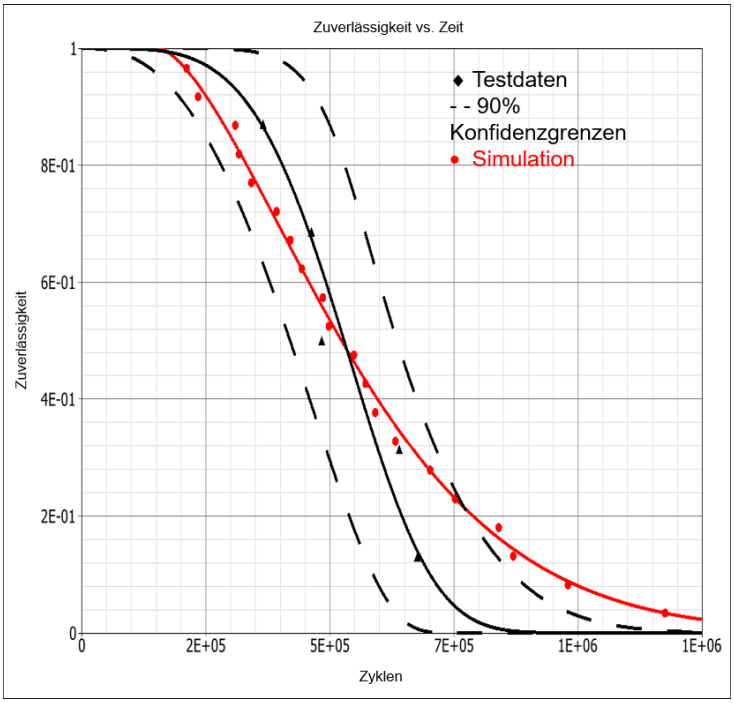


Abb. 8: Weibull Zuverlässigkeit vs. Zeitdiagramm zum Vergleich von Test- und Simulationsdaten

Die Abbildung 9 zeigt einen Vergleich der Konturdiagramme von β und θ auf dem 90%-Konfidenzniveau. Die Konturen zeigen die Testdaten, die Gesamtsimulation und die Unsicherheitsparameter für Material und FEA-Spannungen. Aus der Größe und Form der Konturen geht hervor, dass die Materialunsicherheit mehr zur Variabilität der Gesamtsimulation beiträgt als der Fehler, der sich aus den FE-Spannungen ergibt. Dies deutet darauf hin, dass eine weitere Optimierung der FE-Genauigkeit unnötig ist. Die Materialstreuung ist in diesem Fall der dominierende Faktor. Da sich alle Konturbereiche überlappen, bedeutet dies, dass alle Analysefälle sich weder statistisch voneinander noch von den Testergebnissen auf dem 90%-Konfidenzniveau unterscheiden. Wenn das Konfidenzniveau reduziert werden würde, dann hätte dieses eine Schrumpfung der Konturen zur Folge und sie würden sich ab einem bestimmten Niveau nicht mehr überlappen. Beim Beispiel des Ladeluftkühler wurde das kritisches Konfidenzniveau zwischen dem Test und der Simulation ab 82 Prozent gefunden.

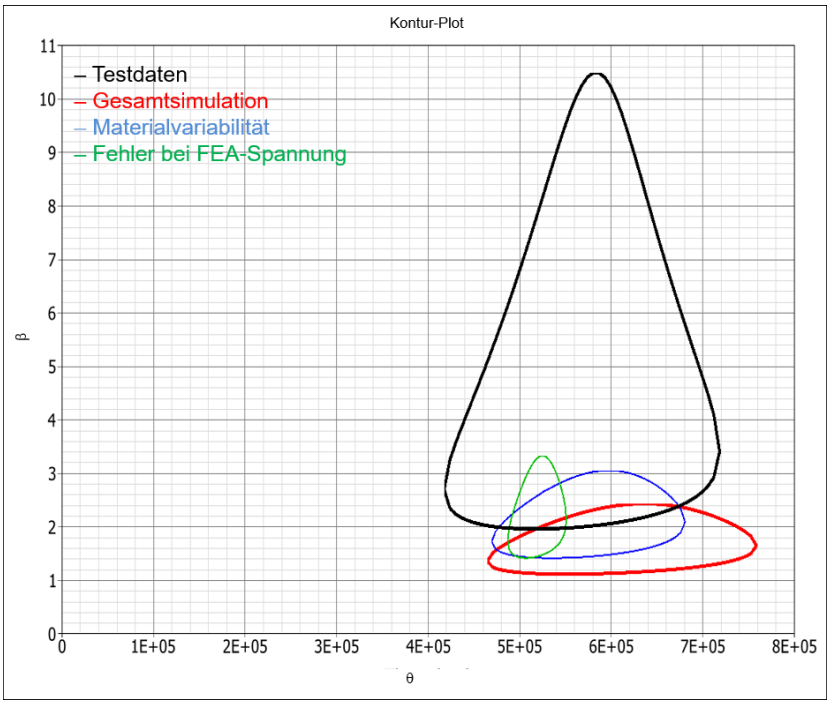


Abb. 9: Weibull Diagramm mit Vergleich von Test und Simulation mit Material- und FEA Spannungen

5. Zusammenfassung

Es wurden die Vorteile der Anwendung von probabilistischer Ermüdungssimulation und stochastischem Design gegenüber dem traditionellen deterministischen Konstruktionsansatz aufgezeigt. Es hat sich gezeigt, dass eine Monte-Carlo Simulation mit Latin Hypercube Sampling effektiv ist, um simulierte Zuverlässigkeitstests auf Basis von standardisierten FEA Modellen zu erreichen. Eine Fallstudie wurde anhand eines Ladeluftkühlers durchgeführt, wobei sich eine sehr gute Korrelation zwischen Simulation und den experimentellen Messungen ergeben hat. Zu beachten gilt aber, dass nur ein Druckniveau in der Fallstudie verwendet wurde. Weitere Versuche über einen Bereich unterschiedlicher Niveaus wären sinnvoll, wenn die Simulation für variable Belastungsamplituden verwendet werden sollen.

6. Literatur

[1] NAFEMS (2018): *What is uncertainty quantification (UQ)?*, URL: https://www.nafems.org/publications/resource_center/wt08/ (Stand: 13.03.2020)
[2] Halfpenny, A. / Chabod, A. / Czapski, P. / Aldred, J. / Munson. K. / Bonato, M. (2019): *Probabilistic fatigue and reliability simulation,* Procedia Structural Integrity 19 (2019) 150-167
[3] Rubinstein, R. Y. / Kroese, D. P. (2016): *Simulation and the Monte Carlo method*, Wiley Series in Probability and Statistics, 3. edition, 2017 John Wiley & Sons, Inc.
[4] McKay, M. D. / Beckman, R. J. / Conover, W. J. (1979): *A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in Analysis of Output from a Computer Code*, Technometrics 21/2 (1979) 239–245
[5] Iman, R. L. / Shortencarier, M. J. (1984): *A FORTRAN 77 program and user's guide for the generation of Latin Hypercube and random samples for use with computer models*, NUREG/CR-3624 SAND83-2365, Sandia National Laboratories
[6] HBK, *nCode DesignLife Theory Guide*, Software Documentation, Hottinger Brüel & Kjaer 2021
[7] ReliaSoft (2015): *Life data analysis reference*, URL: http://www.synthesisplatform.net/references/Life_Data_Analysis_Reference.pdf, ReliaSoft Corporation

Strategie zur anwendergerechten Bestimmung kontextsensitiver neuronaler Netztopologien für Optimierungsaufgaben in der virtuellen Produktentwicklung

Alexander Nüßgen (Technische Hochschule Köln),
Prof. Dr. rer. nat. Margot Ruschitzka (Technische Hochschule Köln)

Bei der Nutzung der potenten Möglichkeiten von Künstlicher Intelligenz innerhalb der virtuellen Produktentwicklung steht der Entwicklungsingenieur vor der Frage, wie das mehrschichtige Neuronale Netz für die bestmöglichen Ergebnisse zu gestalten sei. Die Wahl entscheidet dabei maßgeblich über die mögliche Prognosequalität und die Kosten, die durch die numerische Analyse entstehen. Daher befasst sich dieser Artikel mit der Entwicklung einer Strategie zur Bestimmung der idealen Netztopologien gemäß regulärer kontextsensitiver Optimierungsaufgaben bei dem Produktentwurf.

1 KI-gestützte und kontextsensitive virtuelle Produktentwicklung

Im Rahmen des methodischen Konstruierens nach VDI-Richtlinie 2222 [1][2] bedient sich der Produktentwickler digitaler und inzwischen auch intelligenter Methoden. [3] Es lässt sich sagen, dass der Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der virtuellen Produktentwicklung und den hierfür benötigten Co-Simulationsumgebungen maßgeblich Einzug genommen hat. Sie „[…] hat die Forschungslabore verlassen und durchdringt atemberaubend schnell unsere Alltagswelt in Form sprechender Geräte und digitaler Assistenten, kooperativer Roboter, autonomer Fahrzeuge und Drohnen.“ [4] So existiert im Zeitalter der Industrie 4.0 die Kenntnis, dass mit Hilfe neuronaler Netze die Mustererkennung, Prognosen über Systemverhalten und sogar Optimierungsaufgaben zu realisieren sind.

Die hierfür zur Verfügung stehenden Tools zur Nutzung Künstlicher Intelligenz haben die Theorie der Künstlichen Neuronalen Netze (KNN) anwenderfreundlich umgesetzt. Lediglich die kritische Entscheidung der kontextsensitiv optimalen Netztopologie bleibt dem Anwender überlassen. Die Aussagefähigkeit der neuronalen Netze ist, bei vorausgesetzter Qualität der Trainingsdaten hinsichtlich Überabgedecktheit des Designraumes, gleichmäßig dichter Verteilung mittels geeigneter DoE, etc., maßgeblich von dieser Netztopologie abhängig. Dabei entscheidet die Anzahl und layerbezogene Verteilung der Neuronen nicht nur über die Treffsicherheit der Aussage, sondern auch über den Wirkungsgrad des Trainingsprozesses und damit über die notwendige Anzahl von kapazitiv kostbaren Trainingsläufen. Eine komplexere Struktur führt zu einer erhöhten Anzahl nötiger Rechenschritte, was die Berechnungszeit zwangsläufig erhöht; es existiert ein Zielkonflikt. [5] Folglich ist ein Regelwerk wünschenswert, das die potentiellen Kandidaten bei der Eignungsprüfung auch hinsichtlich des Rechenaufwands gegeneinander aufwiegt.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit einer Strategie zur Bestimmung geeigneter Netztopologien gemäß regulärer kontextsensitiver Optimierungsaufgaben bei der Produktausarbeitung. Der Fokus liegt dabei auf der systematischen Identifikation der topologierelevanten Netzparameter und deren Optimierung in einem iterativen Prozess bis hin zur Entwicklung einer ressourceneffizienten Entscheidungslogik.

1.1 Entwurf neuronal optimaler Architekturen

Ein großer Vorteil der KNN ist die Fähigkeit der Approximation, sowohl für lineare als auch für nicht lineare Zusammenhänge. So ist das Netz vom Grundgedanken her in der Lage, nahezu jedes Systemverhalten abzubilden; stets unter der Voraussetzung geeigneter Trainingsdaten, zielführend gewählter Parameter und einer ausreichenden Anzahl an Epochen. [6][7]

Um diese Approximationsfähigkeit zu erreichen, ist architektonische Ingenieursarbeit, also der Entwurf der neuronalen Architekturen, für ein effizientes und effektives Training zur Erfüllung einer bestimmten Aufgabe unabdingbar. Die Anzahl der versteckten Schichten eines KNN kann beliebig variieren, eine theoretische Begrenzung besteht nicht. Allerdings beeinflusst eine zu kleine bzw. zu große Schichtanzahl die Vorhersagequalität und zugleich führen komplexere Strukturen zwangsläufig zu erhöhtem Rechenaufwand.

Ebenso kann die Anzahl der Neuronen in jeder versteckten Schicht theoretisch beliebig variieren, allerdings gilt auch hier: Je mehr Neuronen, desto umfangreicher die Berechnungen der Kantengewichte. Zusammengefasst entscheidet die Netztopologie maßgeblich über die prädiktive Aussagefähigkeit und die Wirtschaftlichkeit der numerischen Analyse. Hinzu kommt, dass das Netz bei einer zu hohen Anzahl von Layern und Neuronen, also einer Überparametrisierung, zum Overfitting und damit einer schlechten Generalisierungsfähigkeit neigt. Bei zu wenig Elementen im Netz kann es zum Underfitting und damit einer nicht ausreichenden Abbildung des zu approximierenden Verhaltens kommen, wie Abbildung 1 darstellt. [8]

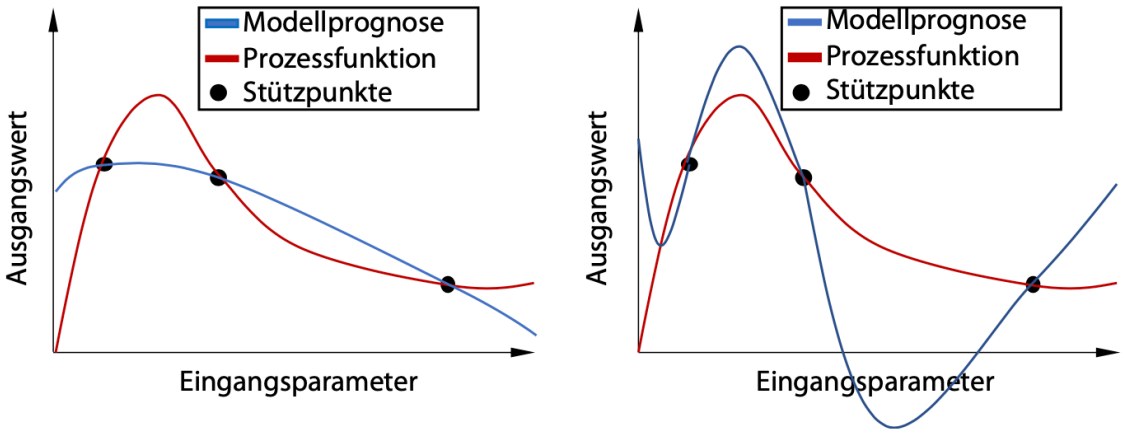


Abb. 1: Schematische Darstellung von Under- (l.) bzw. Overfitting (r.)

Da für den Entwurf der Netzwerke Kenntnisse über die Funktionsweise des Deep Learnings und die Anwendungsdomäne erforderlich sind, hängt der Prozess zur Suche nach der aufgabenbezogen idealen Architektur in der Folge in hohem Maße von der Expertise des Anwenders ab. Um dieses Abhängigkeitsverhältnis aufzuweichen, ist die Optimierung der Struktur von neuronalen Netzen sowie ihrer Gewichte schon lange ein Forschungsthema, sogar noch vor dem Aufkommen des Deep Learnings. [9]

So entstand früh der Wunsch nach einer Faustformel. So formulierten Bailey und Thompson 1990 die „Daumenregel“, die Anzahl der verborgenen Neuronen bei einem einschichtigen Netz auf höchstens 75% der Anzahl der Inputneuronen zu begrenzen und Anders 1997 schlägt vor, das geometrische Mittel aus der Zahl der Input- und Outputneuronen zu bilden. Klimasauskas 1993 führt an, dass es fünfmal so viele Stichproben wie Gewichtungen geben sollte, was die Menge an Neuronen begrenzt. Die geometrische Pyramidenregel von Masters 1993 gibt an, dass ein KNN mit einem Hidden-Layer eine Anzahl von sqrt(n•m) Neuronen aufweist, mit n als Anzahl der Input- und m als Menge der Output-Neuronen. Zusätzlich wird hier formuliert, dass die tatsächliche Anzahl innerhalb eines Bereichs von 0,5 bis 2-mal des eigentlichen Ergebnisses liegen kann, abhängig von der Komplexität des abzubildenden Verhaltens. Hierbei ist auffällig, dass diese Faustformeln nahezu alle nur für einschichtige Netze (oft auch als dreischichtige Netze bezeichnet, je nachdem ob alle Schichten oder nur die Anzahl der Hidden-Layer gezählt wird) gelten. Dies liegt womöglich an der Tatsache, dass die genannte Literatur einer Zeit entstammt, in der das Deep Learning aufgrund der fehlenden Rechenkapazitäten noch wenig Einzug fand. Zudem lässt sich die relativ niedrige Anzahl der Layer-Neuronen im Vergleich zu den Inputparametern dadurch verstehen, dass in dieser Entwicklungsepoche häufig Bildverarbeitungsaufgaben Untersuchungsgegenstand waren, die natürlicherweise durch die Bildpixel eine enorm hohe Anzahl an Inputparametern bereitstellen. [10][11][12][13]

Aus diesen Gründen wuchs besonders in den letzten Jahren der Wunsch, den Entwurfsprozess und somit die Wahl der Schichten und Neuronen der Netzwerke zu automatisieren. Entstanden ist daraus das Feld der Neural Architecture Search (NAS), also der Suche nach der neuronalen Netzarchitektur. [14]

Die Methoden des NAS lassen sich in drei große Gebiete aufteilen:

- der Such-Raum: Dieser definiert, welche Architekturen prinzipiell zur Auswahl stehen. Die Integration von bestehender Expertise, hinsichtlich der kontextsensitiven Attribute, kann die Größe des Suchraums reduzieren und die Suche vereinfachen. Allerdings ist an dieser Stelle zu beachten, dass hierdurch eine Art menschliche Voreingenommenheit mitschwingt, die das Auffinden neuartiger Topologien, also solcher, die über die derzeitige menschliche Vorstellung hinausgehen, verhindern kann.

- die Such-Strategie: Sie beschreibt im Einzelnen, auf welchem Wege der Such-Raum zu erkunden ist. Sie umfasst den klassischen Kompromiss zwischen Exploration und Erschließung. Einerseits ist es wünschenswert, schnell gut funktionierende Architekturen zu finden, andererseits ist aber eine zu frühe Festlegung auf einen Bereich mit suboptimalen Architekturen zu vermeiden.
- die Strategie zur Leistungseinschätzung: NAS zielt darauf ab, Architekturen zu finden, die eine hohe Prognosequalität bei neuen, also bis dato vom Netz ungesehenen Daten erreichen. Die Strategie zur Einschätzung der Leistung bezieht sich auf ebendiese Bewertung. Die hierfür simpelste Variante ist die Durchführung eines standardmäßigen Trainings und einer Validation der jeweiligen Netz-Architektur mittels des Datensatzes. An dieser Stelle tritt der bereits in Abschnitt 1 beschriebene Zielkonflikt auf und schränkt womöglich die Anzahl der Architekturen ein, die untersucht werden können. Daher liegt der Fokus vieler aktueller Arbeiten auf der Entwicklung von Methoden zur Reduzierung dieser numerischen Kosten und damit zur Lösung des Konfliktes. [15]

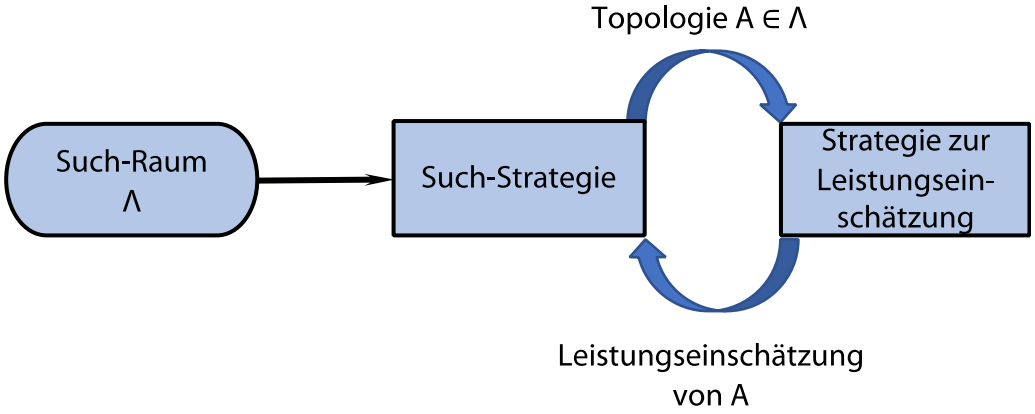


Abb. 2: Visualisierung der Methoden für die Neural Architecture Search in Anlehnung an [15]

Abbildung 2 visualisiert die Verbindung der Methoden der NAS. Eine spezifische Suchstrategie wählt eine Topologie A aus einem vordefinierten Such-Raum Λ aus. Anschließend findet die Übergabe dieser an die zuvor definierte Strategie zur Leistungseinschätzung statt, die als Antwort die Performance der jeweiligen Topologie liefert.

1.2 Optimierungspotential der Neural Architecture Search

Um die Such-Strategie effizient und optimiert durchzuführen, finden sich in der Literatur Optimierungsansätze, die sich mit den bekannten Methoden der Hyperparameteroptimierung decken. Dies erscheint auch logisch, da die Topologie erfahrungsgemäß als Hyperparameter verstanden wird. [15][16]
Folgende Ansätze sind somit denkbar:

- Rastersuche
- Zufallssuche
- BAYESsche Optimierung
- Gradientenbasierte Optimierung
- Evolutionäre Optimierung

Darüber hinaus bedarf es bei der Suche nach der kontextsensitiv besten Topologie einer Strategie, um die Kandidaten hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit einzuschätzen. Der einfachste Weg ist ein regulärer und vollumfänglicher Trainingsprozess mit dem zur Verfügung stehenden Datensatz und eine anschließende Validierung mittels ausgelassener Stichproben, bspw. via Kreuzvalidierung. Dieser Prozess ist allerdings enorm rechen- und somit zeitintensiv, was zu hohen Kosten führt. Dazu kommt, dass die absolute Performance nicht maßgeblich ist, sondern die relative Leistung bzgl. der Kandidatenauswahl. Dies hat zum Experimentieren mit Ansätzen zur Optimierung geführt, um die Qualität der Topologien schneller zu bewerten. [17]

Nachfolgend werden einige Methoden zur beschleunigten Qualitätsvalidierung aufgezählt:

- Reduzierung der Anzahl an Trainingsepochen [18]
- Modifizierung des Datensatzes [14]
- Extrapolation der sich bildenden Lernkurven [19]
- approximierende Netzwerkmorphismen [20]
- Erstellung und Verwendung von prädiktiven Modellen [21]
- One-Shot-Architektursuche [22]

1.3 Die Methodik zur Bestimmung kontextsensitiver neuronaler Netztopologien

Mittels des entstandenen Neural Architecture Optimizers steht die Anwendung kontextsensitiv optimierter KI nun auch dem Produktentwickler zur Verfügung. Als Eingangsinformationen erhält die Optimierungsanwendung einen spezifizierten, DoE-gestützten Datensatz. Dieser enthält die Anzahl der Ein- und Ausgangsdaten, die Anzahl der Muster und die abzubildenden Systemdaten. Anschließend kann aus der Menge an möglichen Topologien (Anzahl der Neuronen pro individueller Schicht und Anzahl der Schichten) mittels der Festlegung von Grenzen für den Such-Raum eine diskrete Teilmenge erzeugt werden. Diese immer noch hohe Anzahl an Varianten ist daraufhin strategisch zu durchsuchen. Eine weitere Versuchsplanung zur Eingrenzung der möglichen Testarchitekturen ist sinnvoll. Die sich so ergebenden Architekturen sind anschließend auf die Netze anzuwenden und diese nachfolgend zu trainieren. Um ein vollumfängliches und in der numerischen Analyse teures Training unnötig zu machen, sollen die sich für eine erste Menge an Trainingsepochen ergebenden Lernkurven mittels eines Algorithmus gezielt extrapoliert werden und so eine optimierte Einschätzung der Leistungsfähigkeit erfolgen. Das Ergebnis des Neural Architecture Optimizers ist somit ein Topologievorschlag und ein dreidimensionaler Plot, der den MSE-Verlauf über das Training und somit die durchlaufenen Epochen hinweg für alle getesteten Architekturen visualisiert. Eine beispielhafte Darstellung für ein solches Ergebnis liefert Abbildung 3.

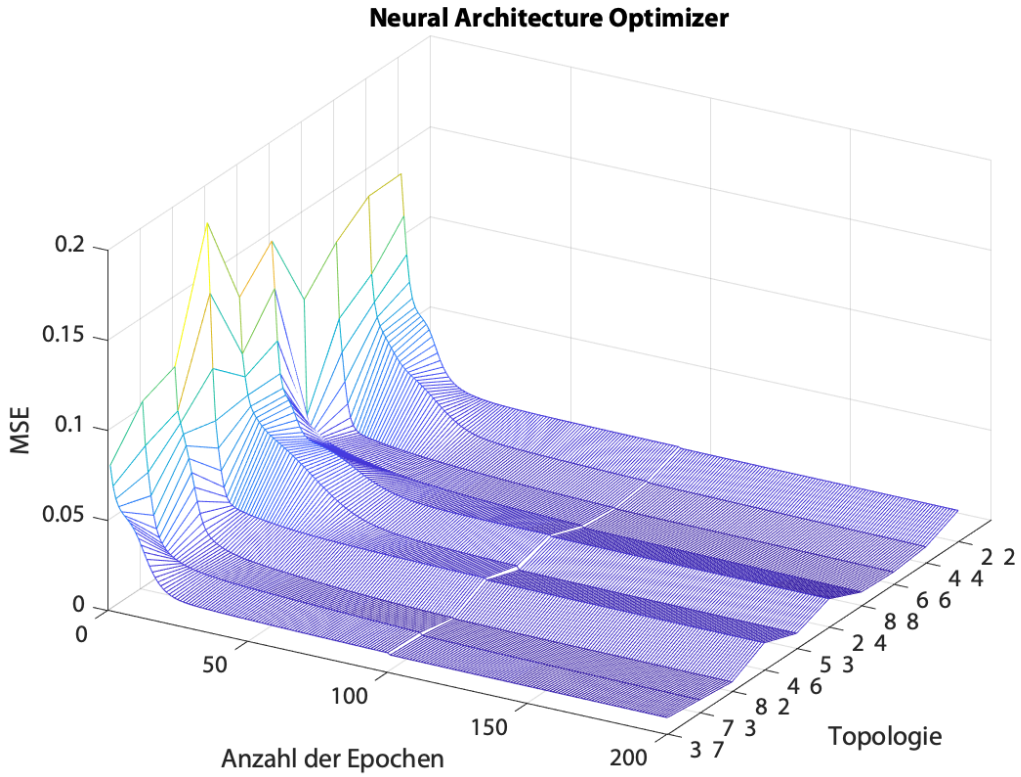


Abb. 3: Ergebnisplot einer beispielhaften Architektursuche

Die sich ergebenden Favoriten bezüglich der Topologie sind anschließend hinsichtlich der numerischen Kosten gegeneinander aufzuwiegen. Zwar ist ein geringerer Fehler theoretisch zu bevorzugen, allerdings ist es mitunter fraglich, ob sich die Verbesserung gegenüber der benötigten Rechenzeit rechtfertigt. Um dieses multikriterielle Problem zu lösen, findet die Pareto-Optimierung Anwendung. Abbildung 4 zeigt den strukturellen Ablauf des Neural Architecture Optimizer.

Die Schnittstellen sind so gestaltet, dass der Neural Architecture Optimizer grundsätzlich in unterschiedlichen und diversen Co-Simulationsumgebungen implementierbar ist. Beispielsweise kann auf diesem Wege der Austausch mit einer an die Konstruktionsumgebung wie CATIA V5 gekoppelten FEM-Simulation, beispielsweise durch Altair Hyperworks, erfolgen, um so unter anderem ein kontextsensitiv optimales Neuronales Netz zur Prognose der Bauteilfestigkeit zu gestalten und zu trainieren.

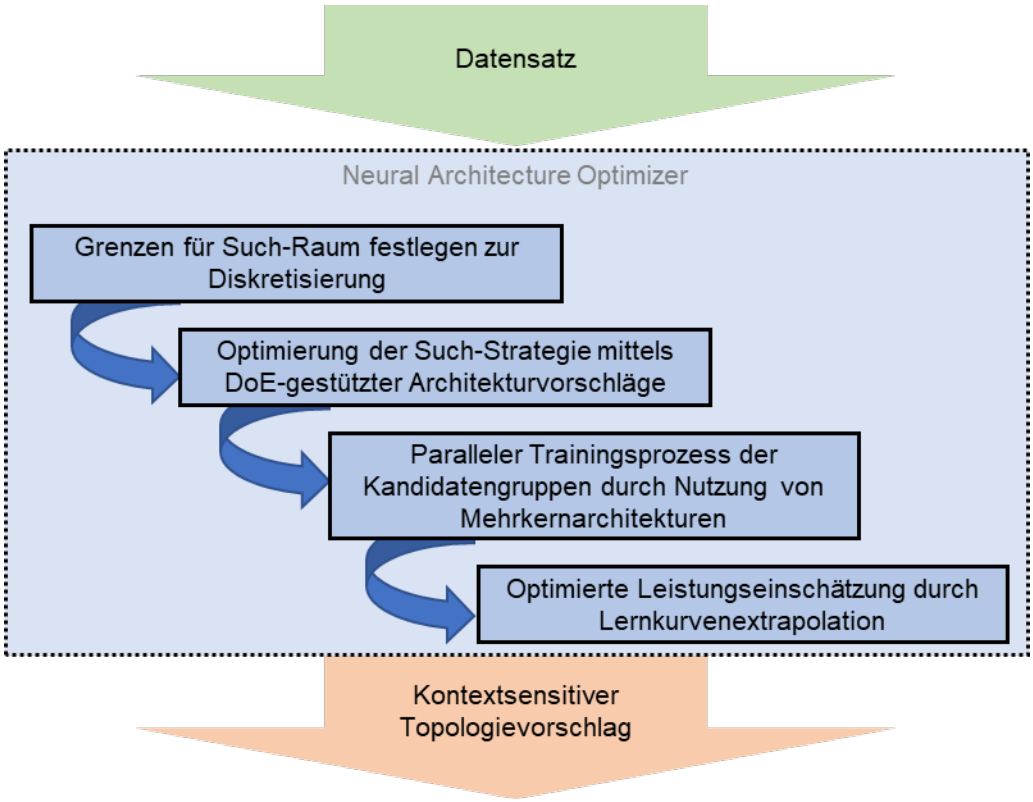


Abb. 4: Ablaufkonzept der kontextsensitiven Optimierung der Netztopologie

1.4 Validierung anhand eines ausgewählten Anwendungsbeispiels

Als Anwendungsbeispiel dient ein konkretes Konstruktionsteil aus dem Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik. 80 Prozent der vorhandenen Muster des Datensatzes wurden dem Netz für das Training zur Verfügung gestellt und 20 Prozent dienen der Validierung. Die erste Variante der Netzgestalt ist eine nicht gezielt kontextsensitive Topologie mit drei verborgenen Schichten mit jeweils 15 Neuronen. Die konkurrierende Architektur ist das Ergebnis des Neural Architecture Optimizers und weist ebenfalls drei Schichten auf, allerdings besetzt mit sieben, neun und vier Neuronen. Somit ist der numerische Aufwand der zweiten Variante als deutlich geringer anzusehen. Das Resultat für das Testen nach dem Training von 500 Epochen ist Abbildung 5 zu entnehmen.

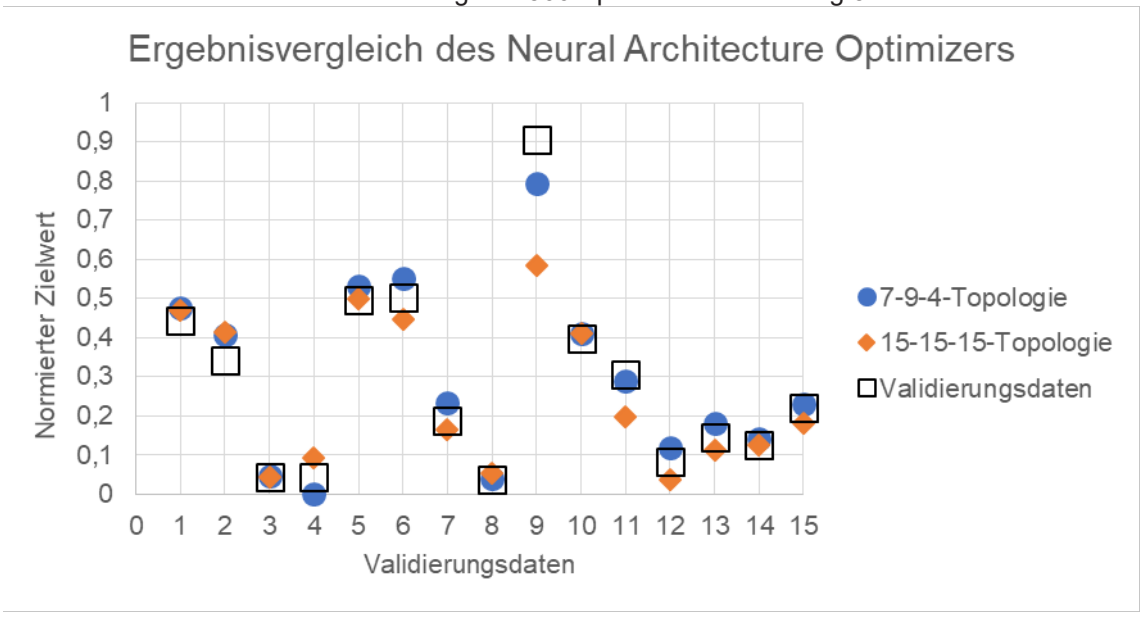


Abb. 5: Ergebnis der Architekturoptimierung

Für die niedrige Anzahl an durchlaufenen Epochen ist das Ergebnis für beide Varianten zufriedenstellend. Allerdings ist die Vorhersage in nahezu allen Fällen für die optimierte Architektur genauer. Es zeigt sich somit, dass die entwickelte Methode erfolgreich Architekturen findet, die sowohl in der Prognosequalität gleichwertig oder sogar besser sind und zugleich geringere Kosten für die numerische Analyse verursachen.

2 Zusammenfassung

Mithilfe der entstandenen Methodik gelingt der Schritt von der rudimentären Nutzung hin zur kontextsensitiven und somit einsatzgerechten Verwendung des Potentials der Künstlichen Intelligenz innerhalb der virtuellen Produktentwicklung und darüber hinaus. Hierfür bedarf es keinerlei Expertenwissen oder vorhandener Erfahrungswerte bei der Gestaltung des Netzdesigns, da der Designvorgang nun vollautomatisiert von der Optimierungsmethodik übernommen wird, indem diese die Kandidaten innerhalb weniger Trainingsepochen auf Eignung überprüft. Zusätzlich bezieht die Methodik die Kosten für die numerische Analyse durch Einsatz der Pareto-Optimierung in den Entscheidungsprozess mit ein, wodurch ein multikriterielles Entwicklungsziel zu lösen ist. Das Einsatzgebiet der Anwendung ist dabei völlig offen, da die Schnittstellen über einfache CSV-Tabellen bzw. Excel-Tabellen realisiert wurden.

Keywords: Künstliche Intelligenz, Neuronale Netze, virtuelle Produktentwicklung, Netztopologie, Netzarchitektur, NAS, Data Intelligence

3 Literatur

[1] VDI 2221 Blatt 1:2019, “ Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung”.
[2] Gust, P., “Konstruieren – Produkte methodisch entwickeln”, in W. Skolaut (ed.), Maschinenbau: Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium (Berlin, Heidelberg: Springer), 811–45, 2018.
[3] Matthiesen, S., “Konstruktion entsteht im Kopf!”, Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe/4, 2016.
[4] Hecker, D., Döbel, I., Rüping, S. und Schmitz, V., 2017, “Künstliche Intelligenz und die Potenziale des maschinellen Lernens für die Industrie” Wirtschaftsinformatik & Management 9 (5): 26–35., https://doi.org/10.1007/s35764-017-0110-6.
[5] Klüver, C. und Schmidt, J., “Modellierung komplexer Prozesse durch naturanaloge Verfahren”, Wiesbaden, Vieweg & Teubner), 100, 2009
[6] Hornik, K., Stinchcombe, M. und White, H., 1989, “Multilayer Feedforward Networks Are Universal Approximators”, Neural Networks 2 (5): 359–66. https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8.
[7] Hornik, Kurt, 1991, “Approximation Capabilities of Multilayer Neural Network”, Neural Networks 4 (1991): 251–57.
[8] Walde, J. F., 2000, “Design Künstlicher Neuronaler Netze”, https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004.
[9] Stanley, K. O. und Miikkulainen, R., 2002, “Evolving Neural Networks through Augmenting Topologies”, Evolutionary Computation 10 (2): 99–127. https://doi.org/10.1162/106365602320169811.
[10] Bailey, David L, and Donna Thompson. 1990. “Developing Neural-Network Applications.” AI Expert 5 (9): 34–41.
[11] Anders, Ulrich. 1997. “Statistische Neuronale Netze.”
[12] Klimasauskas, Casimir C. 1993. “Applying Neural Networks.” Neural Networks in Finance and Investing, 47–72.
[13] Masters, Timothy. 1993. Practical Neural Network Recipes in C++. USA: Academic Press Professional, Inc.
[14] Kyriakides, G. und Margaritis, K., 2020, “An Introduction to Neural Architecture Search for Convolutional Networks”, http://arxiv.org/abs/2005.11074.
[15] Hutter, Frank, Lars Kotthoff, and Joaquin Vanschoren. 2019. Automated Machine Learning. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00960-5_6.
[16] Iba, Hitoshi, and Nasimul Noman. 2020. Deep Neural Evolution.
[17] Siebertz, Karl, David van Bebber, and Thomas Hochkirchen. 2017. Statistische Versuchsplanung. https://doi.org/10.3139/9783446439924.022.
[18] Zela, Arber, Julien Siems, and Frank Hutter. 2020. “NAS-Bench-1Shot1: Benchmarking and Dissecting One-Shot Neural Architecture Search.” http://arxiv.org/abs/2001.10422.

[19] Domhan, Tobias, Jost Tobias Springenberg, and Frank Hutter. 2015. “Speeding up Automatic Hyperparameter Optimization of Deep Neural Networks by Extrapolation of Learning Curves.” IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence 2015-Janua: 3460–68.
[20] Elsken, Thomas, Frank Hutter, and Jan Hendrik Metzen. 2019. “Efficient Multi- Objective Neural Architecture Search via Lamarckian Evolution.” 7th International Conference on Learning Representations, ICLR 2019, 1–23.
[21] Kandasamy, Kirthevasan, Willie Neiswanger, Jeff Schneider, Barnabás Póczos, and Eric P. Xing. 2018. “Neural Architecture Search with Bayesian Optimisation and Optimal Transport.” Advances in Neural Information Processing Systems 2018-Decem (NeurIPS): 2016–25.
[22] Bender, Gabriel, Pieter Jan Kindermans, Barret Zoph, Vijay Vasudevan, and Quoc Le. 2018. “Understanding and Simplifying One-Shot Architecture Search.” 35th International Conference on Machine Learning, ICML 2018 2: 883–93.

Automatisierte Fertigbarkeitsprüfung im Rapid-Prototyping durch künstlich intelligente RBF-Netze

Fabian Richter (Technische Hochschule Köln),
Prof. Dr.-Ing. Peter Gust (Bergische Universität Wuppertal), Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher (Bergische Universität Wuppertal), Prof. Dr. rer. nat. Margot Ruschitzka (Technische Hochschule Köln)

1 Motivation

Der laufende Prozess der Industriellen Revolution 4.0 befähigt den Entwicklungsingenieur dazu, gesteigerte Anforderungsprofile zu erfüllen. [1] Dabei stehen die neuen Möglichkeiten innovativer digitaler Instrumente und Verfahren, wie 3D-Drucktechnologien oder vernetzte Simulationsumgebungen, den ebenfalls verschärften Anforderungen, wie individuell optimiert ausgearbeiteten Bauteilvarianten, gegenüber. [2][3] Das Variantenmanagement seinerseits steht im Spannungsfeld einer mitunter sehr hohen Zahl an Kombinationsmöglichkeiten, ohne dabei individuelle spezifische Anforderungen optimal berücksichtigen zu können. Die Ausarbeitung individueller Produktvarianten erfordert jeweils iterative Schritte im Entwicklungsprozess.

Eine technologische Lösungsmöglichkeit stellt die neu gewonnene geometrische Designfreiheit durch den 3D-Druck dar. Für metallische Bauteile ist beispielsweise das Verfahren des selektiven Laserschmelzens (SLM) etabliert. Doch auch dieses ist durch Verfahrensgrenzen wie minimale Wandstärken oder limitiert flache Raumwinkel beschränkt. [4] Dabei herrscht das Fertigungsverfahren an vielen Stellen über die anzuwendende Art der Konstruktion im CAD-System, vergleichbar mit der verfahrenseigenen Konstruktionsmethodik für Gussteile. Die Verfahrensgrenzen des metallischen 3D-Druckes erfordern von der Konstruktion dabei eine häufig andere Art zu denken und zu modellieren.

Geometrisch durchparametrisierte Konstruktionsmethoden liefern dynamische Variantenmodelle, deren Überprüfung auf Druckbarkeit für den kundenindividuellen Anforderungssatz jedoch noch durch den Entwicklungsingenieur zu überprüfen ist. [5] Es fehlt an einem Automatismus, der, nach Einhaltung gewisser Rahmenbedingungen, in der Lage ist, für autonom individuelle Geometrievarianten die Druckbarkeit zu garantieren, bzw. die Freiheitsgrade der jeweiligen Parameterräume automatisiert auf die herstellbaren Werteintervalle zu begrenzen.

Eine Möglichkeit die Fertigbarkeit durch 3D-Druck stabil automatisiert in einer Bandbreite von Bauteilvarianten gewährleisten zu können, stellen Mechanismen der künstlichen Intelligenz dar. Dabei ist es möglich, nicht lediglich die Fertigbarkeit zu trainieren und zu überwachen, sondern diese auch mit den relevanten simulationstechnisch zu berechnenden Optimierungszielen zu verknüpfen. Damit hilft der Intelligenzmechanismus eine im Rahmen der Druckbarkeit kundenoptimale Variante zu entwerfen.

Eine vielversprechende Strategie ist die Verwendung von künstlich intelligenten Radialen-Basisfunktionen-Netzen (RBF-Netz), einer spezifischen Art neuronaler Single-Layer-Netze für kontinuierliche, parametrisierte Strukturen. [6] Sie ermöglichen es, ein ganzheitliches Systemverhalten des Produktes in ein Metamodell zu überführen, das die fertigungsbezogenen Verfahrensgrenzen als Restriktionen der Optimierungsaufgabe berücksichtigen kann. Grundlage ist ein vorsimulierter Datensatz aus Parameterkombinationen, deren Anordnung hinsichtlich des maximalen Erkenntnisgewinnes zu erfolgen hat, unter der Maßgabe einer zeit- und numerisch ökonomischen Perspektive. Im Zusammenspiel bildet sich ein Prozess, dessen Eingangskennzahlen sich mit einem entsprechend vorbereiteten, parametrisierten 3D-Geometriemodell, einer Simulations- und Optimierungsstrategie und einem neuronalen RBF-Netz verknüpfen, das durch einen Satz an Vorsimulationen, basierend auf einem adäquaten statistischen Versuchsplan, trainiert wurde. Damit ist die automatisierte Fertigungsprüfung Teil einer Strukturoptimierung, die durch die künstliche Intelligenz erfolgt.

2 Regelwerke zu den Fertigungsgrenzen des SLM-Verfahrens

Beim SLM-Verfahren fährt ein intensiver Laser eine Kontur auf einer feinen Pulverschicht ab und verschweißt so die metallischen Körner miteinander und mit der darunter liegenden Schicht. Durch repetitive Absenkung des Untergrundes und Auftragen einer neuen Pulverschicht entsteht das Bauteil schichtweise. Die geometrische Designfreiheit ist zwar hoch, jedoch verfahrensbedingt teilweise eingeschränkt. So müssen die Produkte so entworfen sein, dass es möglich ist, das überflüssige Pulver nach dem Druckvorgang auszurütteln. Die minimale Wandstärke ist durch den Durchmesser des Laserstrahls bestimmt und die Flachheit von Raumwinkeln dadurch begrenzt, dass die Entfernung dafür notwendiger Stützstrukturen aufwendig oder mitunter unmöglich ist. [4] Die konkreten Fertigungsgrenzen stehen dabei auch unter dem Einfluss der verwendeten Anlage und der Körnung des verwendeten Pulvers.

Um die Festanforderung der Fertigbarkeit dennoch automatisiert gewährleisten zu können, ist eine Überführung der Verfahrensrestriktionen in ein prozedurales Regelwerk sinnvoll. Die Idee dabei ist, eine Verkettung von regelindividuellen Entscheidungen dafür zu nutzen, die Geometrieparameter eines vorliegenden Designentwurfes mit den Verfahrensrestriktionen und anlagenspezifischen Grenzen zu vergleichen. Die Anlagencharakteristika sind dafür als bekannt vorausgesetzt und bestenfalls in strukturierter Form abgelegt, beispielsweise in einer *.ini-Datei. Eine standardisierte Struktur der spezifisch kritischen Druckergrenzen ermöglicht sogar, das Optimierungsergebnis automatisiert an die zur Verfügung stehenden Anlagen anzupassen oder, je nach Anforderung, die Anlage spezifiziert über die Optimierungsziele auszuwählen.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Ablauf einer automatisierten Regelprüfung zur Einhaltung eines minimalen Radius für innenliegende Kanäle oder Bohrungen.

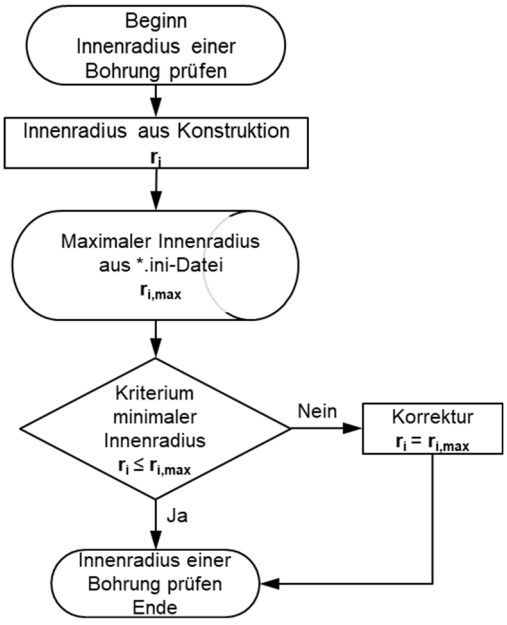


Abb. 1: Beispielhafter prozeduraler Ablauf zur automatisierten Prüfung einer Fertigungsrestriktion

Voraussetzung zur Anwendbarkeit automatisierter Prozeduren zur Gewährleistung der Fertigbarkeit bezüglich des SLM-Verfahrens ist eine analog dazu verwendete Konstruktionsmethodik bei der Parametrisierung der digitalen Geometriemodelle im CAD-System. Dabei können durchaus die branchenspezifisch sehr unterschiedlichen Konstruktionsmethodiken grundsätzlich beibehalten werden; sie sind jedoch um eine Komponente zur Erfassung bzw. Einstellung der kritischen geometrischen Zusammenhänge zu erweitern. Da letztendlich die Optimierung über die führenden Geometrieparameter erfolgt, ist für die Erreichung der Optimierungsziele der möglichst unmittelbare Einfluss auf die relevanten Geometrieparameter entscheidend aber auch möglich, solange eine Semantik zur jeweiligen Herleitung bekannt ist. So lässt sich beispielsweise die Wandstärke eines Rohres direkt als Wandstärke oder als Differenz von Außen- und Innenradius äquivalent bestimmen.

Bei der späteren Optimierung fließen die prozedural überprüfbaren Geometrieregeln in Form von Ungleichheitsnebenbedingungen ein. Je nach gewählter Optimierungsstrategie sind diese entweder eine Eingangsgröße oder sie werden als Restriktionen während iterativer Optimierungsrechnungen berücksichtigt.

3 Radiale Basisfunktionen-Netze

Die Radialen-Basisfunktionen-Netze (RBF-Netze) beschreiben eine spezifische Ausprägung der einschichtigen künstlichen neuronalen Netze. Der wesentliche Unterschied zu konventionellen neuronalen Netzen besteht in der determinierten Ein-Schicht-Topologie, wie in *Abb. 2* zu sehen, und der verwendeten Aktivierungsfunktion. Sind in konventionellen neuronalen Netzen die einzelnen Neuronen eher durch monotone Funktionen simuliert, so verwenden RBF-Modelle radiale Abbildungen. [7]

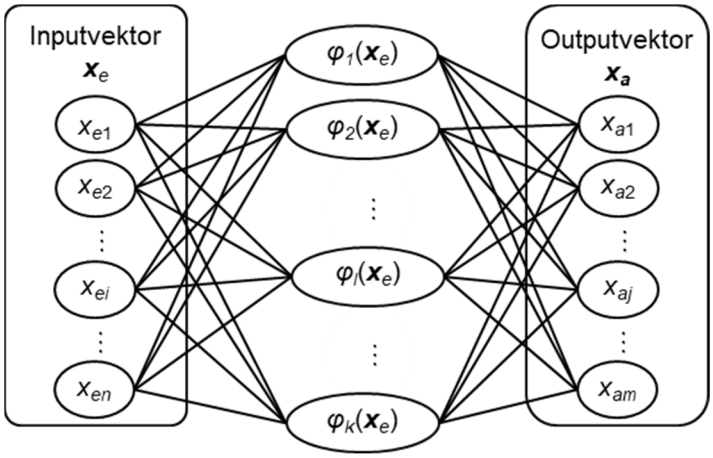


Abb. 2. Determinierte Ein-Schicht-Topologie von RBF-Netzen

Radialität ist eine mathematische Funktionseigenschaft, bei der der Funktionswert ausschließlich vom radialen Abstand zu einem Funktionszentrum $\boldsymbol{x}_e$ abhängig ist. Typische radiale Funktionen sind Glockenfunktionen, inverse Quadrate oder Multiquadrate.

Glockenkurven: $$\varphi(\boldsymbol{x}_e) = e^{-c\|\boldsymbol{x}_e\|_2^2} \quad (1a)$$

Inverse Quadrate: $$\varphi(\boldsymbol{x}_e) = \frac{1}{\|\boldsymbol{x}_e\|_2^2 + c^2} \quad (1b)$$

Multiquadrate: $$\varphi(\boldsymbol{x}_e) = \frac{1}{\sqrt{\|\boldsymbol{x}_e\|_2^2 + c^2}} \quad (1c)$$

In einer mehrdimensionalen Abbildungsaufgabe bekommt jedes Neuron eine Kombination von Ein- und Ausgangsparametern aus dem Trainingsdatensatz mit einer gewissen Dominanzumgebung zugeordnet. Das zugrundeliegende Narrativ geht davon aus, dass eine ähnliche Kombination von Eingangsgrößen auch ähnliche Werte der Ausgangsgrößen erzeugt. Formell zeigt sich der Funktionsparameter c als Einstellmöglichkeit. Je nach Wahl dieses Formparameters beschränkt sich der Einfluss des einzelnen Datenpunktes auf eine größere oder eben kleinere Umgebung.

So sind die RBF-Netze in der Lage, durch vernetzte Nachbarschaftsbeziehungen, anhand von *i*=1,..,n diskret ausgewählten Datenpunkten, eine kontinuierliche Landkarte an Ausgangsgrößen aufzuspannen. [8]
Das Gesamtmodell für eine nicht vorsimulierte Parameterkombination $\boldsymbol{x}$ errechnet sich aus der gewichteten Summe aller Einflüsse für eine kontinuierliche und beliebige Parameterkombination, wobei sich die Gewichtungsfaktoren durch Lösen eines Gleichungssystems bestimmen lassen, dessen Ergebnisvektor eine vorsimulierte Ausgangsgröße darstellt. Für die Vorhersage von *j=1,..,m* unterschiedlichen Ausgangsgrößen werden demnach ebenso viele RBF-Netze verwendet.

$$\Phi_{RBF,j}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ij} \cdot \varphi_i\left(\|\boldsymbol{x}_{ei} - \boldsymbol{x}\|_2\right), \ \forall\ j = 1...m\ \ \exists\ \boldsymbol{\Phi}_{RBF}(\boldsymbol{x}) \cdot \boldsymbol{\lambda}_j = \boldsymbol{x}_{aj} \quad (2)$$

Voraussetzung für eine gute Vorhersagequalität des Netzes ist ein Trainingsdatensatz aus Vorsimulationen. Die Simulationsziele können dabei unterschiedliche produktindividuelle Anforderungen widerspiegeln, beispielsweise FEM-Berechnungen falls Festigkeit ein Optimierungskriterium ist, oder CFD-Analysen für strömungsrelevante Eigenschaften. Der Datensatz soll den gewünschten verfügbaren Designraum für alle relevanten Geometrieparameter in ausreichend dichter Besetzung repräsentieren und gleichzeitig aus möglichst wenigen

Berechnungen bestehen, um die numerischen Aufwände ökonomisch zu halten. [9] Dazu ist das gezielte Aufstellen von Parameterkombinationen durch einen geeigneten statistischen Versuchsplan (DoE) notwendig.

Um auch mathematisch einfache Zusammenhänge, wie lineare oder quadratische Abhängigkeiten, auf diese streng nichtlineare Art modellieren zu können, empfiehlt sich die Modellerweiterung um einen polynomiellen Anteil des Grades *u*, wobei in der Praxis der quadratische Grad *u*=2 eine sinnvolle Grenze ist. Ein erweitertes Gleichungssystem erlaubt die Bestimmung der Polynomparameter unter Berücksichtigung der Nebenbedingung, dass das Modell weiterhin interpolierenden Charakter behalten und die vorsimulierten Ausgangsgrößen exakt abbilden soll. Dabei entspricht ***P*** den fallend geordneten Potenzen des Polynoms:

$$\Phi P^{v}_{RBF,j}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ij} \cdot \varphi_i\left(\left\|\boldsymbol{x}_{ei} - \boldsymbol{x}\right\|_2\right) + \sum_{u=1}^{v} \beta_{uj} \cdot \left\|\boldsymbol{x}\right\|_2^u ,$$

$$\forall\ j = 1...m\ \exists \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Phi}_{RBF,j} & \boldsymbol{P}^{v}_{j} \\ \boldsymbol{P}^{v,T}_{j} & \boldsymbol{0} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \boldsymbol{\lambda}_j \\ \boldsymbol{\beta}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{x}_{aj} \\ \boldsymbol{0} \end{pmatrix} \tag{3}$$

4 Statistische Versuchsplanung

Das geschickte Anordnen möglichst weniger, aber den Designraum aller Variablen gut überdeckender Parameterkombinationen ist für den Trainingsdatensatz an Vorsimulationen unverzichtbar. [8] Es verhindert Fehlkorrelationen und damit falsche Interpretationen der Ergebnisse einerseits und hält andererseits den Gesamtaufwand numerisch gering. Es existieren typische Strategien zur Erstellung quasi-zufälliger Kombinationen unter der Nebenbedingung einer möglichst guten statistischen Diskrepanz.

Dabei ist die HALTON-Folge eine gute Strategie für Aufgaben niedriger Dimensionalität. [10] Sie basiert auf einem deterministischen Streuungsmuster über unterschiedliche Primzahlpotenzen. Die Ausprägung dieses Determinismus sorgt bei einer geringen Anzahl von zu verteilenden Parametern für eine quasi-zufällige Verteilung. Dies bedingt jedoch, dass für eine größere Anzahl von Parametern auch eine größere Anzahl von Punkten notwendig ist, um den Designraum zu füllen. Ein Bewertungskriterium dafür ist der Korrelationskoeffizient nach PEARSON [8] mit einem Wertebereich [-1,1], dessen idealer Wert für vollkommene statistische Unabhängigkeit bei 0 liegt. Für die bestmögliche Auswertbarkeit der vorsimulierten Zielgrößen sind Scheinkorrelationen zu vermeiden, woraus eine gewünschte statistische Unabhängigkeit der Eingangsparameter resultiert. Aufgrund der primzahlbasierten Verteilung sind für die Optimierung von *n* Geometrieparametern die ersten *n* Primzahlbasen notwendig. Daraus resultiert aber auch, dass die Anzahl der aufzustellenden Parameterkombinationen zwar grundsätzlich frei wählbar bleibt, aber groß genug werden muss, um den Designraum vollständig abdecken zu können. Außerdem neigen benachbarte primzahlbasierte HALTON-Folgenglieder bei zu wenigen Kombinationen zur Korrelation. *Abb. 3* zeigt die Korrelation benachbarter Primzahlbasenfolgenglieder. Die Interpretation der Abbildung besagt, dass bei höherdimensionalen Problemstellungen die Anzahl der notwendigen Vorsimulationen stark steigt, um die statistische Korrelation der Eingangsparameter untereinander möglichst gering zu halten.

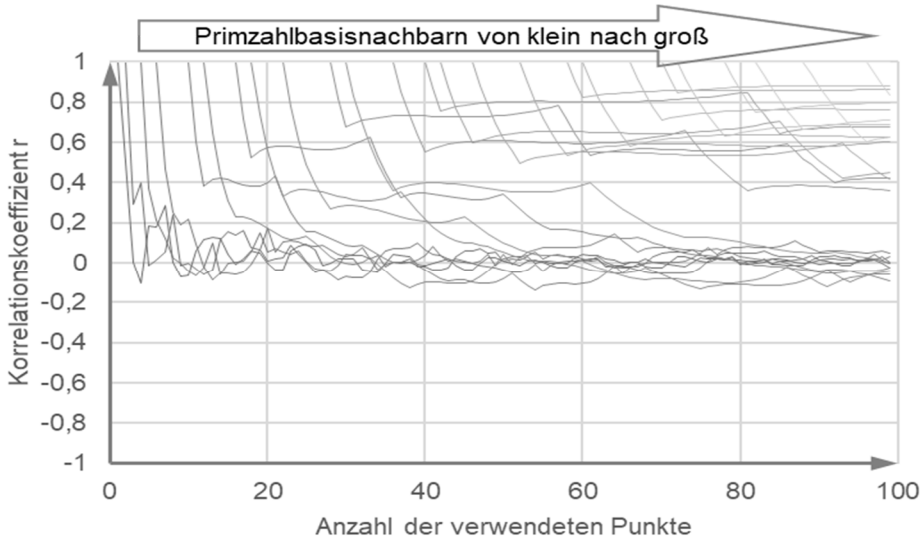


Abb. 3: Entwicklung des Korrelationskoeffizienten der ersten 30 benachbarten Primzahlbasen der HALTON-Verteilung für 100 Punkte

Je nach Erstellungsalgorithmus lassen sich zwar Gegenmaßnahmen durch Skip- und Leap-Parameter ergreifen, aber die Beschäftigung mit den Details der Verteilungsalgorithmen ist es schließlich, was den Entwicklungsingenieur an der Anwendung hindert. Ein besonderer Vorteil der Halton-Folge ist die Erweiterbarkeit. Viele andere Verteilungsstrategien erlauben nicht, dem initialen Verteilungsset weitere Punkte hinzuzufügen, ohne dabei eine homogene Verteilung zu stören. Dies bedeutet, dass ein Simulationsset mit zu wenigen durchgeführten Berechnungen im Falle einer Unterabdeckung des Designraumes unbrauchbar ist. Es wäre dann neu aufzustellen und zu simulieren.

Die SOBOL-Sequenz liefert bessere Ergebnisse für den Fall, dass viele Geometrieparameter gleichzeitig zu optimieren sind. [11] Sie ist jedoch algorithmisch schwierig zu erstellen. Falls die Hürden zur Erzeugung von SOBOL-Sequenzen zu hoch sind, kann das relativ einfache Latin-Hypercube-Design Anwendung finden – jedoch mit dem Nachteil der fehlenden Erweiterbarkeitseigenschaft.

5 Prozessentwurf zur automatisierten Fertigbarkeitsprüfung

Im Zusammenspiel ergeben die Teilschritte
- die parametrisierte, fertigbarkeitsorientierte Konstruktionsmethodik,
- das prozedurale Regelwerk zur Prüfung der Verfahrensgrenzen des SLM-Verfahrens und
- ein wohltrainiertes, auf ein nach passendem DoE trainierten RBF-Netz

die Möglichkeit, kundenindividuelle Bauteilvarianten automatisiert unter dem zusätzlichen Aspekt der Fertigbarkeit zu optimieren. Der gesamte Teilprozess ist in *Abb. 4* dargestellt.

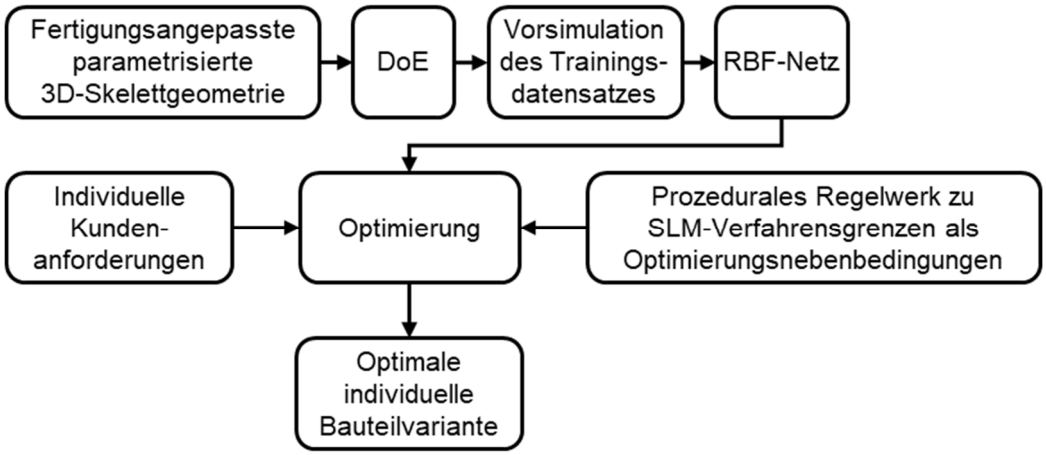


Abb. 4: Der Teilprozess der automatisierten Fertigbarkeitsprüfung durch künstlich intelligente RBF-Netze für durch SLM-Verfahren zu fertigende Bauteilvarianten.

Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Prozessschritten hängen dabei von den konkret verwendeten Systemen ab. In der Regel sind die modernen CAD-Softwares jedoch mit Möglichkeiten ausgestattet, parametrische Modelle über Konstruktionstabellen anzusteuern. Ebenso ist in vielen CAE-Umgebungen die Stapelverarbeitung von Simulationsrechnungen durch Skripte, Makros oder direkte, modulare Einbettung ermöglicht. Die Erstellung des RBF-Netzes erfordert numerische Entwicklungsumgebungen wie Maplesoft Maple oder MathWorks MATLAB. Unter Voraussetzung der Bekanntheit der Eingangsdaten, im Wesentlichen der Zentralpunkte der Radialfunktionen in Form der durch das DoE vorgegebenen Parameterkombinationen, lässt sich ein RBF-Netz mit moderatem Aufwand durch Verknüpfung der trainierten Kantengewichte für die Radialfunktionen und den polynomiellen Anteil auch in einfachen Tabellenkalkulationstools umsetzen. Diese wiederum sind leicht mit den Konstruktionstabellen des CAD-Programmes zu verknüpfen. Einfache Optimierungsaufgaben, beispielsweise die prozedurale Prüfung von Geometrieparametern hinsichtlich Herstellbarkeit, ließen sich also bereits auf dieser Ebene vollziehen. Konkretere Strategien der Optimierung bezüglich vorsimulierter Optimierungsziele würden wiederum in der numerischen Entwicklungsumgebung zu platzieren sein. Dort sind häufig auch schon vorgefertigte Algorithmen, wie SQP- oder Gradientenverfahren, vorimplementiert. Die prozedural geprüften Fertigungsregeln lassen sich dann beispielsweise als Nebenbedingungen berücksichtigen, sei es als Optimierungseingangsgröße oder stetig zu prüfende Randgröße in iterativen Verfahren.

Letztendlich liefert die Optimierung auf dem RBF-Modell einen oder mehrere Parametersätze für kundenspezifisch optimale Geometrie oder, im Falle mehrerer optimaler Ergebnisse, einen Lösungsraum aus einer Menge optimaler Kompromisse, aus denen der Kunde dann nach zusätzlichen Kriterien auszuwählen vermag. Hierbei bietet sich entweder eine Paretofront an, oder die Formulierung weiterer Optimierungskriterien, wie beispielsweise minimalen Materialeinsatz zum ressourcenschonenden Umgang hinsichtlich der Nachhaltigkeit.

6 Anwendungsbeispiel

Die Vorgehensweise wurde erfolgreich am Anwendungsbeispiel eines Sensorflügelprofils validiert. Nach der Optimierung war es möglich, unter Verwendung der prozeduralen Regeln zur Fertigbarkeit nach SLM-Verfahren, optimale Lösungen anhand kundenindividuell formulierter Anforderungen automatisiert zu generieren. *Abb. 2Abb. 5* zeigt den Verlauf der Lösungsentwicklung über eine FEM-Berechnung, dem Ergebnis des parametrisierten Geometriemodells nach prozeduraler Prüfung der Fertigbarkeit, bis zum finalen, ausgearbeiteten Zustand. Die kundeninduzierten Parameter betrafen dabei Geometriegrenzen mit dem Optimierungsziel des besten Steifigkeits-Gewichts-Kompromisses.

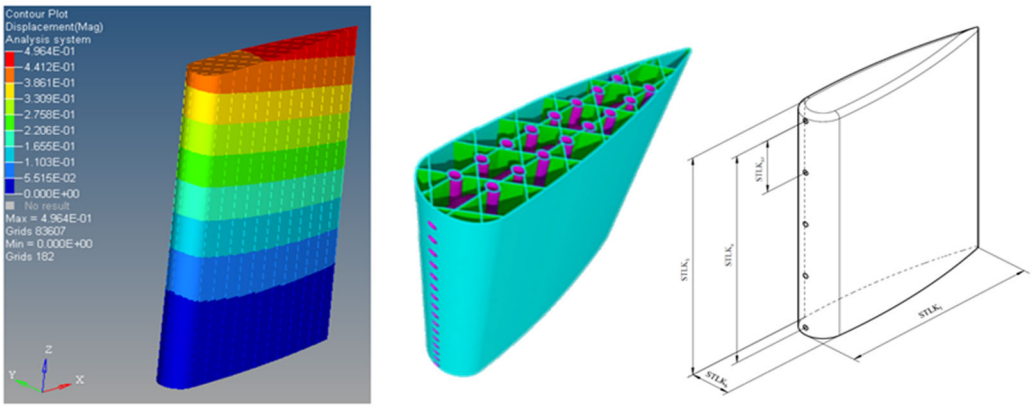


Abb. 5: Ergebnisse der automatisierten Fertigbarkeitsprüfung im Rapid-Prototyping durch künstlich intelligente RBF-Netze, von der FEM-Simulation (links), über die prozedural bedingte Optimierung durch ein künstlich intelligentes RBF-Netz (mittig), bis zum automatisch ausgearbeiteten Produkt (rechts)

7 Zusammenfassung

Erste Anwendungsbeispiele zeigen, dass die automatisierte Fertigbarkeitsprüfung im Rapid-Prototyping durch künstlich intelligente RBF-Netze ein vielversprechender Ansatz ist. Mit den Schwerpunkten einer fertigungsgerechten Konstruktionsmethodik und eines entsprechenden DoE zur Erstellung eines aussagekräftigen Trainingsdatensatzes, sowie dem prozeduralen Regelwerk zur Überprüfung der SLM-spezifischen Verfahrensgrenzen, entsteht ein durchgängiger und nicht-repetitiver Prozess, um kundenindividuelle Bauteilvarianten automatisiert und fertigungsgerecht zu generieren. Es fehlen detailliertere und ganzheitliche Betrachtungen und die Einordnung in den Gesamtentwicklungsprozess sowie die Verknüpfung zu multidisziplinären Co-Simulationsumgebungen.

8 Literatur

[1] Matthiesen, S., „Konstruktion entsteht im Kopf!“, Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe/4, 2016.
[2] VDI 2221 Blatt 1: „Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung”, 2019.
[3] Gust, P., „Konstruieren – Produkte methodisch entwickeln“, in W. Skolaut (ed.), Maschinenbau: Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg), 811–45, 2018.
[4] Adam, G. A. O. und Zimmer, D., “On design for additive manufacturing. Evaluating geometrical limitations“, Rapid Prototyping Journal, 2015/6.
[5] Kranz, J., „Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen“, Dissertation, 2017.
[6] Buhmann, M. D., “Radial basis functions: Theory and implementations (Cambridge monographs on applied and computational mathematics”, 12, Cambridge: Cambridge University Press), 2003.
[7] Afiatdoust, F. und Esmaeilbeigi, M., “Optimal variable shape parameters using genetic algorithm for radial basis function approximation”, Ain Shams Engineering Journal, 2015/2.
[8] Siebertz, K., van Bebber, D. und Hochkirchen, T., „Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)“, (VDI-Buch; 2. Aufl. 2017, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg), 2017.
[9] Krausz, M., „Methode zur Abschätzung der Ergebnisqualität von modularen Gesamtfahrzeugsimulationsmodellen“, Dissertation, 2017.
[10] Halton, J. H., und G. B. Smith, “Algorithm 247: Radical-Inverse Quasi-Random Point Sequence.” Commun. ACM 7 (12): 701–702,1964.
[11] I.M. Sobol’, “Uniformly distributed sequences with an addition uniform property”, USSR Comput. Maths. Math. Phys. 16, S. 236–242, 1976.

Analyse von Eigenspannungen in Hochtemperatur-Faserverbundbauteilen durch Simulation des Herstellungsprozesses

N. Gort, L. Amirova, M. Grob, C. Brauner
Institut für Kunststofftechnik, Fachhochschule Nordwestschweiz

Steigende Anforderungen an Faserverbundwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen wie Flugzeugtriebwerksverkleidungen legen die Wahl von Matrixsystemen mit hohen Glasübergangstemperaturen von bis zu 400°C nahe. Dieser Materialkennwert geht jedoch häufig einher mit einer verringerten Bruchzähigkeit, weshalb im Rahmen des europäisch geförderten Projekts SuCoHS[1] ein carbonfaserbasiertes, Dünnschichtprepreg mit modifiziertem Kunststoff entwickelt wurde, das einen optimierten Kompromiss dieser zwei Eigenschaften aufweist. Ausserdem führen die in der Herstellung von Bauteilen aus diesem Material erforderlichen hohen Aushärtungsbedingungen von bis zu 260°C zu prozessbedingten Verformungen und Eigenspannungen, die sich in einer reduzierten Bauteilleistung bemerkbar machen können. Zur Analyse der Eigenspannungen und prozessbedingten Verformungen wurde in dieser Studie eine ganzheitliche thermomechanisch gekoppelte Materialbeschreibung in eine transiente Simulation implementiert. Dafür wurde ein Materialmodell verwendet, welches die Materialeigenschaften während des Aushärtungsprozesses von Kohlenstofffaser / Cyanatester-Verbundteilen erfasst und das aushärtegradabhängige Verhalten mit einem viskoelastischen Ansatz abbildet.

Das entwickelte Modell wurde an einem Anwendungsfall für die Luft- und Raumfahrt durch ein repräsentatives gekrümmtes und versteiftes Panel demonstriert. Ein prozessinduzierter Materialschaden an der Stringerwurzel war in der Folge Anlass, dieses Materialmodell für eine Optimierung des Strukturkonzeptes einzusetzen. Die Resultate sind in dieser Studie aufgeführt.

1 Einführung

Das Projekt SuCoHs hat als Ziel, mit einer Reihe von Maßnahmen die Einführung von polymerverstärkten Faserverbundwerkstoffen in Bereichen mit hohen Temperaturlasten einzuführen, in welchen momentan mehrheitlich Metalle eingesetzt werden. Die erwähnten Maßnahmen enthalten nicht nur die Entwicklung von auf Hochtemperaturanwendungen angepassten Materialien, sondern auch neue virtuelle Analysemethoden für die Herstellung sowie Überwachungsysteme für Herstellung und Betrieb.

Kohlenstofffaserverstärkte Cyanatester-Verbundwerkstoffe sind wegen ihrer hohen Festigkeit, Steifigkeit, hohen thermischen Beständigkeit und geringen Feuchtigkeitsaufnahme für strukturelle Luft- und Raumfahrtanwendungen in diesem Zusammenhang von hohem Interesse. Die herausragenden thermischen Eigenschaften dieser Materialien werden jedoch nur erreicht, wenn sie bei hohen Temperaturen von bis zu 260°C ausgehärtet werden. Dies bringt die zwei Schwierigkeiten mit sich, dass das Material durch die erreichte hohe Glasübergangstemperatur spröder wird und andererseits das Bauteil schon durch den Produktionsprozess hohe Temperaturdifferenzen erfährt.

Um das erste Problem anzugehen, wurde deshalb ein Matrixsystem modifiziert, das durch Zugabe von Additiven einen optimierten Kompromiss zwischen Bruchzähigkeit und hoher Glasübergangstemperatur aufweist [1]. In Zusammenarbeit mit der Firma NTPT wurde dieses modifizierte System zu einem Dünnschicht-Prepreg (87gsm) verarbeitet, welches mit automatisierter Faserpositionierung (AFP) abgelegt werden kann. Die Vorteile von diesen sogenannten Thin Ply Prepregs liegen in einer verbesserten Schädigungstoleranz [2]. Das Thin Ply Prepreg wurde verwendet, um einen Demonstrator herzustellen, nämlich ein gekrümmtes Panel, mit Verwendung von AFP und integrierten Sensorsystemen. Dieses ist in Abb. 1 abgebildet.

[1] SuCoHs: https://www.sucohs-project.eu/

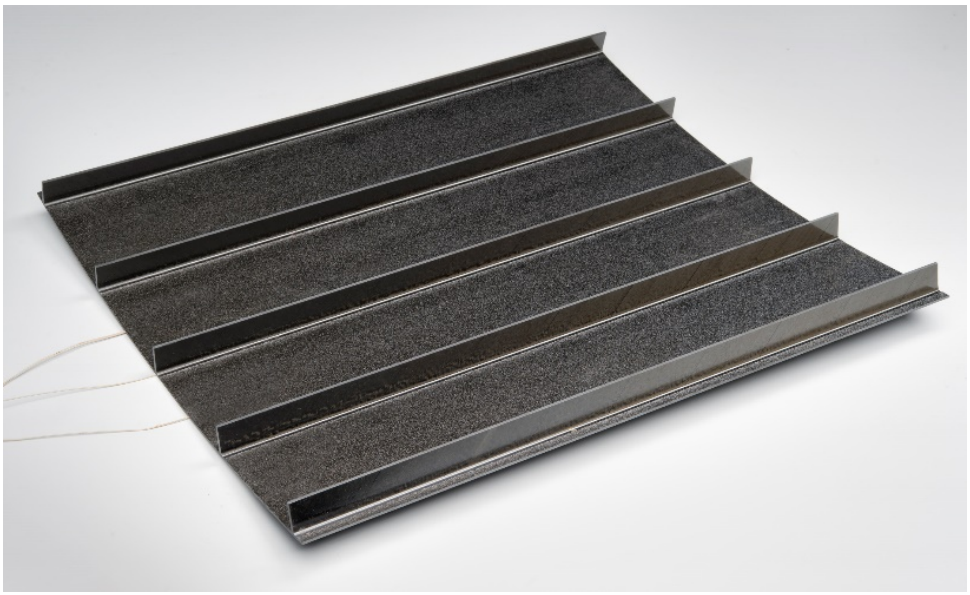


Abb. 1: Demonstrator aus neu entwickeltem Material und integrierten optischen Sensoren. Die Komponente wurde unter Verwendung einer automatisierten Faserpositionierung (AFP) hergestellt und der Herstellungsprozess mit einer Prozesssimulation unterstützt

Dem strukturellen Einfluss der grossen Temperaturdifferenzen kann entweder auf mikroskopischer Ebene, das heißt durch die Wahl von Materialien mit geringen Wärmeausdehnungen, oder auf makroskopischer Ebene, durch neue Strukturkonzepte entgegengewirkt werden. Da der Spielraum für die Materialwahl in diesem Fall schon begrenzt ist, bleibt vor allem die zweite Möglichkeit. Das erste Mal, dass die Teile einer hohen Temperatur ausgesetzt werden, ist während des Herstellungsprozesses, insbesondere der Nachhärtung. Die hohe Temperaturdifferenz beim Abkühlen von der Aushärtetemperatur auf Raumtemperatur führt zwangsläufig zu hohen thermischen Kontraktionen. Dies kann je nach Laminataufbau, Bauteilgeometrie und der Fähigkeit zur Relaxation der Eigenspannungen zu großen Verformungen des fertigen Bauteils führen.

Um neue Strukturkonzepte analysieren zu können, wurde im Rahmen des Projekts deshalb ein virtuelles Prozessmodell [3] implementiert, das in einem gesamtheitlichen thermomechanischen gekoppelten Ansatz alle relevanten physikalischen Prozesse abbildet, die zu prozessinduzierten Dehnungen und Spannungen im Bauteil führen.

Durch die Untersuchung der Spannungen während des Prozesses und insbesondere nach dem Abkühlen von der Nachhärtungstemperatur kann das entwickelte Modell daher dazu beitragen, die Fähigkeit verschiedener Strukturkonzepte zu bewerten; es kann in Regionen mit hohen Einsatztemperaturen und Temperaturdifferenzen angewendet werden.

Während des Projekts wurden nach der Herstellung einer Demonstrationsplatte mit dem neu entwickelten Material und einem ersten strukturellen Design prozessbedingte Schädigungen in der Region des T-Stosses / Stringerwurzel gefunden (siehe Abb. 2). Daher wurde beschlossen, das entwickelte Simulationsmodell zu verwenden, um die Eignung verschiedener Designs der Stringerwurzel zu bewerten. Das anfängliche Konzept der Stringerwurzel besteht aus einem vertikalen Steg, der von zwei UD-Einlagen und einer dünnen Decklage umgeben ist. Während alle verwendeten Laminate ausbalanciert sind und aus mehreren unidirektionalen Lagen bestehen, wurden die zwei Einlagen durch vorgeformte UD-Bänder realisiert. Nach dem Zusammenfügen der vorgeformten Komponenten wurde das Bauteil im Autoklaven ausgehärtet

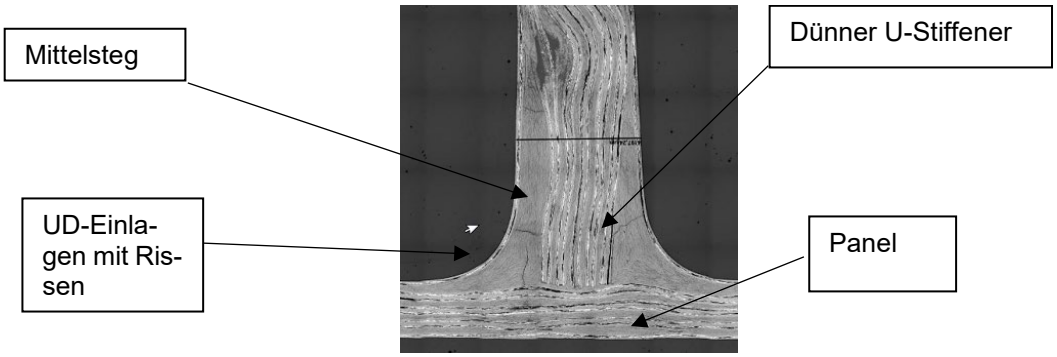


Abb. 2: Mikroskopbild der Stringerwurzel des Demonstrators.
Es gibt deutlich sichtbare prozessbedingte Risse in den UD-Einlagen

2 Methoden

Die präsentierte Studie soll einen Einblick geben über die Anwendung eines ganzheitlichen Ansatzes für ein Prozessmodell bei der Suche eines geeigneten Designs einer Struktur für Hochtemperaturanwendungen. Im Nachfolgenden wird ein Simulationsmodell vorgestellt in welches ein physikalisch basiertes Materialmodel integriert wurde. Dieser Ansatz wurde nachfolgend angewendet, um verschiedene Designkonzepte hinsichtlich prozessbedingter Eigenspannungen zu bewerten. Die Implementierung des Modells wurde in Abaqus FEA V6.13 durch Einbinden einer User Subroutine umgesetzt.

2.1 Prozessmodell

In Anlehnung an frühere Arbeiten ([4, 5]) wurde der Berechnungsprozess in zwei Schritte gegliedert: In einem ersten Schritt werden Temperatur, Aushärtegrad und Glasübergangstemperatur (Tg) in einer thermochemischen Analyse berechnet und die Ergebnisse für einen zweiten Schritt auf das mechanische Modell übertragen. Der Aufbau als sequentiell gekoppeltes Modell basiert auf der Annahme, dass der thermische Teil zwar die mechanische Analyse beeinflusst, umgekehrt aber die aus mechanischer Arbeit erzeugte Wärme sich in einer vernachlässigbaren Größenordnung bewegt.

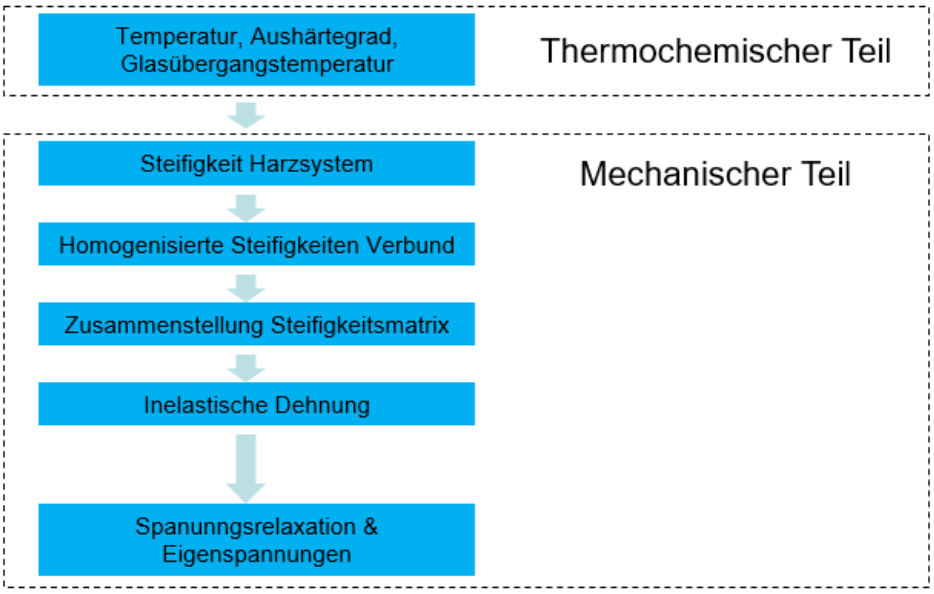


Abb. 3: Schematische Darstellung der Struktur der Methode

Zum Verständnis des Aufbaus und der Einbettung der zugrunde liegenden physikalischen Modelle kann das gesamte Prozessmodell schematisch dargestellt werden, wie in Abb. 3 gezeigt. Der thermochemische Teil besteht aus der Berechnung der abhängigen Variablen Temperatur und Aushärtegrad sowie der Tg als Funktion dieser beiden Parameter. Das thermische Modul wurde dabei gekoppelt mit einer Differentialgleichung, welche die Aushärtereaktion beschreibt. Das Aushärtungsmodell [6] beschreibt die Reaktionskinetik n^{-ten} Grades durch Gl. (1).

$$\frac{dp}{dt} = [k1 + k2p^m](1-p)^n d \quad (1)$$

Dabei ist p der Aushärtegrad, m und n der Ordnungsgrad der Polymerisation, ki beschreibt die Temperaturabhängigkeit basierend auf der Arrhenius-Gleichung (Gl. (2)) und d ist eine Erweiterung (siehe Gl. 3), der die diffusionskontrollierte Polymerisation bei niedrigen Härtungstemperaturen beschreibt. Der Arrhenius-Term k_i basiert auf den Material- und Prozessparametern mit der thermischen Aktivierungsenergie der Reaktion E, dem präexponentiellen Faktor A, der universellen Gaskonstante R und der Temperatur T.

$$k_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \quad (2)$$

Dabei wurde ein Diffusionskoeffizient d eingeführt, der berücksichtigt, dass die Reaktion mit steigender Glasübergangstemperatur zunehmend diffusionskontrolliert und langsamer abläuft: [7]

$$d = \left[\frac{2}{1 + exp\left(\frac{p - p_{max}}{b}\right)} - 1\right] \quad (3)$$

Ein Beispiel für die Anwendung des Modells kann in [8] inspiziert werden. Die Glasübergangstemperatur (Tg) wurde direkt aus dem Aushärtegrad mit der Gleichung von DiBenedetto berechnet [9]. Der Parameter λ wurde dabei durch ein Fitting an Messdaten erhalten.

$$T_g = T_{go} + \left(T_{g\infty} - T_{go}\right) \cdot \frac{p\lambda}{1 - (1-\lambda)p} \quad (4)$$

Im darauffolgenden mechanischen Teil wird zunächst die Matrixsteifigkeit in Abhängigkeit vom tatsächlichen Aushärtegrad und der Temperatur berechnet. Die Steifigkeit des Harzsystems ist abhängig vom Aushärtegrad und der aktuellen Temperatur. Um die Abhängigkeit der Matrixsteifigkeit vom Aushärtegrad zu simulieren, schlug Brauner [4] ein Modell vor, um den aktuellen Tg des Harzes mit Messungen der Steifigkeit am Rheometer zu verknüpfen. Die Abhängigkeit der Steifigkeit von der Temperatur wurde mittels dynamisch mechanischer Analyse (DMA) in einem Drei-Punkt Biegeversuch ermittelt. Zusammen mit den elastischen Fasereigenschaften kann diese von zwei Parametern abhängige Matrixsteifigkeit verwendet werden, um die homogenisierten Lageneigenschaften und den Aufbau der orthotropen Steifheitsmatrix zu berechnen.
Als treibende Kräfte, welche zu prozessinduzierten Verformungen und Eigenspannungen fertigen Bauteil führen, werden einerseits der thermische Schwund, andererseits die chemische Schwindung gesehen. Die inelastische Dehnung wird daher definiert als die Summe aus diesen beiden:

$$\Delta\varepsilon_{inel} = \Delta\varepsilon_{th} + \Delta\varepsilon_{sh} \quad (5)$$

Der thermische Schwund des Materials wurde charakterisiert durch die Messung der richtungsabhängigen Temperaturausdehnungskoeffizienten. Die Modellierung der thermischen Schwindung geschieht danach durch dessen Multiplikation mit der Temperaturänderung:

$$\Delta\varepsilon_{th} = \alpha_i \Delta T \quad (6)$$

Um wieviel das Material durch die chemische Vernetzungsreaktion schwindet, wurde durch Kontaktwinkelmessung eines Harztropfens bei einer konstanten Temperatur gemessen. Daraus kann man einen Schwindungskoeffizienten ableiten, der zur Modellierung der chemischen Schwindung mit der Aushärtegradänderung multipliziert wird.

$$\Delta\varepsilon_{sh} = \gamma_i \Delta p \quad (7)$$

Diese inelastischen Dehnungen fliessen im letzten Schritt in die Berechnung des Verschiebungs- und Spannungsfeldes der Struktur ein. Um die prozessinduzierten Spannungen nicht zu hoch einzuschätzen und somit eine zu konservative Einschätzung des Bauteils zu liefern, ist es wichtig, die Spannungsrelaxation zu berücksichtigen, die speziell bei hohen Temperaturen ausgeprägt ist.

Dazu wurde in diesem Fall ein linear viskoelastischer Ansatz verwendet, der eine Zustandsvariable benutzt, um die relaxierte Spannung zu einem bestimmten Zeitpunkt, abhängig von deren Geschichte, zu berechnen [10] [11].

Dieser Ansatz basiert auf der Beschreibung des Verhaltens des verallgemeinertes Maxwell oder Wiechert Modells als Prony Serie. Dieses linear viskoelastische Element ist in Abb. 4 gezeigt.

Im Folgenden wurde der Relaxationsmodul des Materials bei verschiedenen konstanten Temperaturen gemessen und das Modell an diese Kurven gefittet. Für jede gemessene Temperatur erhalt man nun durch das Fitting einen Wert für die Parameter des viskoelastischen Modells. Dies sind die Messpunkte in Abb. 4. Um eine bezüglich der Temperatur kontinuierliche Beschreibung des Relaxationsverhaltens zu erhalten, wurden diese Messpunkte mit einem geeigneten Ausdruck beschrieben, der wiederum an diese Daten gefittet wurde.

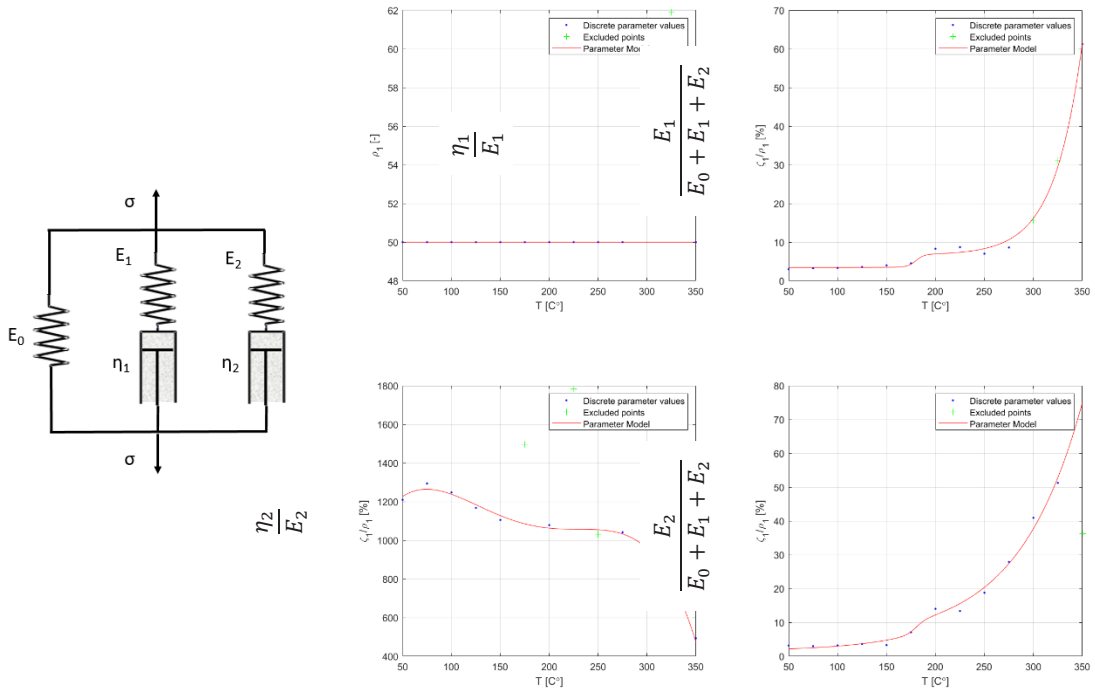


Abb. 4: Zur Beschreibung des Relaxationsverhaltens wurde das generalisiertes Maxwell Modell verwendet. Ein Fitting des Modells an Messdaten resultiert in den einzelnen Messpunkten für die Modellparameter. Diese wurden mit einem analytischen Ansatz kontinuierlich beschrieben

2.2 Evaluierte Stringerwurzelkonzepte

Die Bewertung verschiedener Stringerwurzelkonzepte wurde mit einem Submodell des gesamten Panels durchgeführt, um den Rechenaufwand zu verringern. Die Dimensionen des Submodells wurden so groß gewählt, dass Randeffekte von den Begrenzungen des Submodells keinen Einfluss mehr haben. Dies wurde überprüft, indem sichergestellt wurde, dass sich das Dehnungsfeld entlang der Länge in der Mitte des Untermodells nicht ändert. Die Randbedingungen wurden dabei als frei verschiebbar gewählt.

Um die strukturelle Leistung des gesamten Panels nicht dramatisch zu verändern, wurde versucht, bei der Suche nach einem neuen Konzept nahe am ursprünglichen Design zu bleiben.

Die Layups für alle Laminate wurden so gewählt, dass sie in jedem Abschnitt ausgewogen sind. Um einen sinnvollen Vergleich der Konzepte zu erhalten, wurden die Lagen außerdem so gewählt, dass über die Dicke von Steg und Panel verteilt jeweils gleich viele Lagen einer bestimmten Orientierung enthalten sind.

In Abb. 5 sind die verschiedenen Konzepte skizziert. Zuerst wurde das ursprüngliche Design mit unterschiedlichen Aussenradien betrachtet. Danach wurde eine Version evaluiert, dessen Mittelsteg schon mehrheitlich auf den U-Stiffener übertragen wurde und schlussendlich noch eine Variante mit einem einzelnen UD-Filler. Diese Variante wurde auch mit Glas- statt Carbonfasern als Fasermaterial betrachtet.

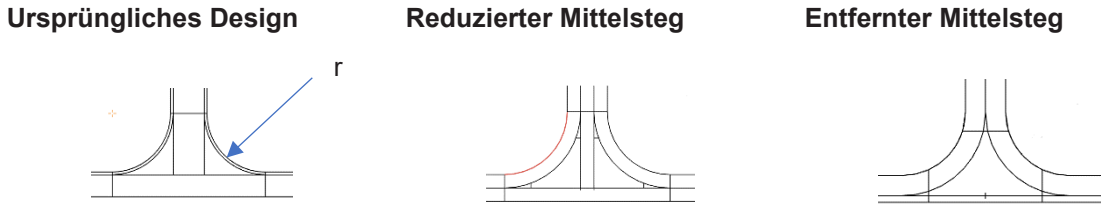


Abb. 5: Evaluierte Strukturkonzepte

3 Resultate

Durch den ganzheitlichen Ansatz der Prozesssimulation erhält man am Schluss nicht nur eine Aussage über die prozessinduzierten Eigenspannungen, sondern auch ein Monitoring der Variablen der zugrundeliegenden physikalischen Modelle über den ganzen Prozess. Beispielsweise kann die Frage geklärt werden, ob das Bauteil durch den gewählten Aushärtezyklus ausreichend ausgehärtet ist oder durch die exotherme Reaktion bereits degradiert. Deshalb soll in diesem Abschnitt zuerst die Fähigkeit des Prozessmodells, eine größere Struktur mit komplexem Aufbau zu simulieren gezeigt werden und wie sich die wichtigsten Prozessvariablen verhalten. In der Folge werden die Resultate der strukturellen Optimierung der Stringerwurzel präsentiert.

3.1 Ganzes Panel

Deformation des Demonstratorpanels am Ende des Herstellungsprozesses (siehe Abb. 6)

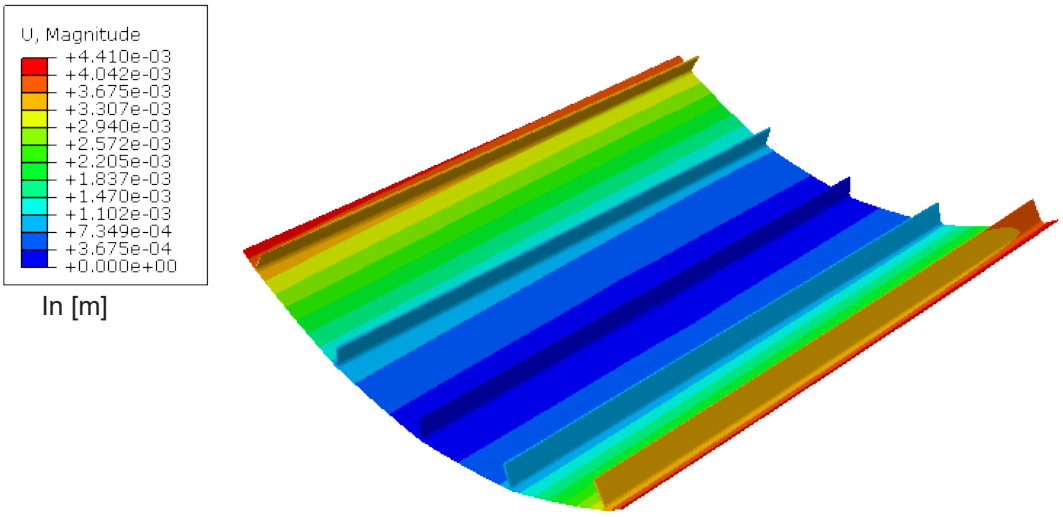


Abb. 6: Deformation vom gesamten Panel

In diesem Fall wurde beispielsweise mit dem gewählten Aushärtezyklus ein praktisch uniformer Aushärtegrad ermittelt. Das liegt daran, dass die Temperatur aufgrund der geringen Dicke der Struktur auch an der am weitesten von der Bauteiloberfläche entfernten Stelle am Fuss eines Stringers beinahe identisch zur aufgebrachten Prozesstemperatur resultiert. Dies ist in Abb. 7 gezeigt.

Der hierbei verwendete Zyklus, ist aufgrund der geringen Hautdicke beinahe identisch zu dem Temperaturverlauf am Fuss eines Stringers, der in Abb. 7 gezeigt ist. Man kann sehen, dass nach dem ersten Aushärtezyklus der Aushärtegrad zwar auf etwa 75% steigt, der Tg jedoch erst beim Post-Curing (2. Zyklus) in die Nähe des Endwerts kommt. Dabei wurde der Temperaturanstieg beim Post-Curing verzögert, damit die aktuelle Temperatur des während des Post-Curing freistehenden Bauteils nicht zu weit über den Tg steigt. Ein Blick auf die prozessinduzierten Spannungen in Materialkoordinaten über den ganzen Prozess zeigt, dass in diesem Fall bereits mit Initialrissen gerechnet werden muss, da diese Spannungen die Zugfestigkeit der Matrix (48 MPa) bereits deutlich übersteigen.

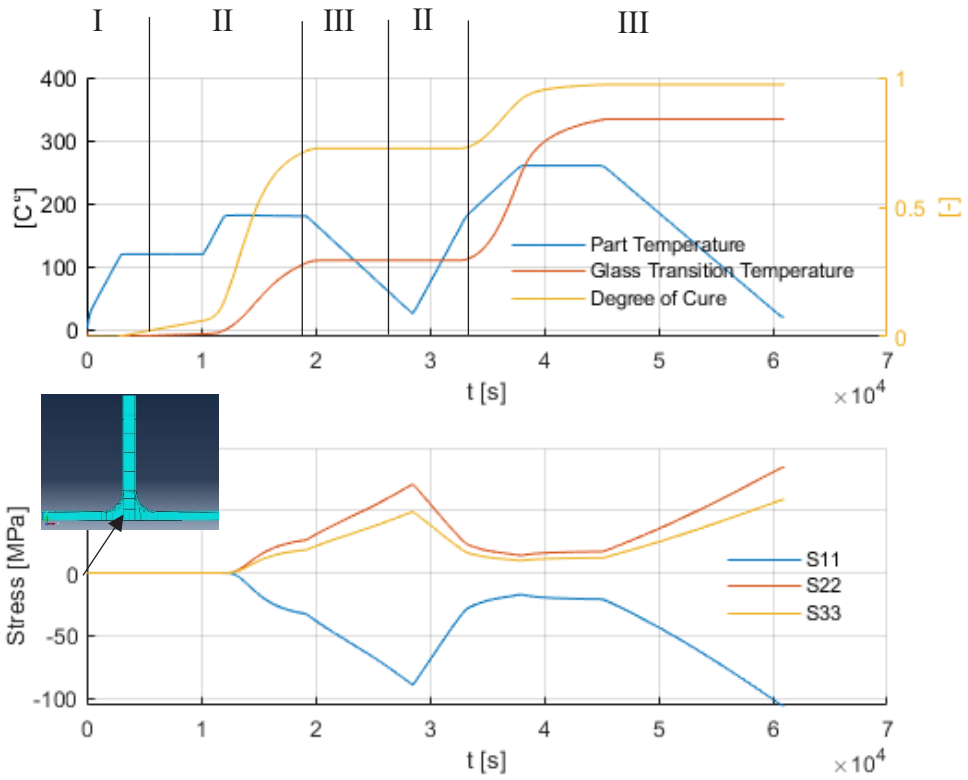


Abb. 7: Oben: Übersicht über den Temperaturverlauf und Aushärtegrad an der Wurzel eines Stringers des untersuchten Panels. Unten: Resultierende prozessinduzierte Spannungen in einer ausgewählten Lage in Materialkoordinaten. Das Material befindet sich dabei im I: flüssigen, II: gummiartigen, III: festen Zustand

3.2 Stringerkonzept

Für die Bewertung der Eignung eines Designs kommen verschiedene Indikatoren in Frage. Die Wahl eines geeigneten Designs hängt dann wiederum davon ab, wie diese Indikatoren aufgrund der Prioritäten des Herstellers gewichtet werden. Zum Beispiel können die Investitionskosten für neues Tooling den Entscheid gegen ein Design mit geringer Wahrscheinlichkeit für besseres strukturelles Verhalten kippen. In manchen Fällen, wie für die Spannung in einem vielschichtigen multiaxialen Laminat, lassen sich zusätzlich schwierig skalare Werte als Indikator generieren.

Für die Bewertung eines geeigneten Designs für Hochtemperaturanwendungen wurde deshalb versucht, die wichtigsten Kennwerte der prozessinduzierten Effekte zusammenzustellen, die dann als Entscheidungsgrundlage dienen können.

3.2.1 Spring-in Angle

Ein üblicher Indikator für die geometrische Stabilität von Strukturen einschließlich Versteifungen ist der sogenannte Spring-In Winkel. Er ist als Abweichung von der Idealgeometrie bei der der Winkel des T-Stringers 90° beträgt zu verstehen.

Die Ergebnisse in Abbildung Abb. 8 zeigen, dass die Geometrien mit entferntem Mittelsteg am Ende des Prozesses eine geringere Winkelabweichung aufweisen. Im Vergleich zur ursprünglichen Konstruktion kann der Spring-In um 50% reduziert werden, wenn das Konzept des entfernten Mittelstegs mit einem vergrößerten Radius von 7 mm gewählt wird.

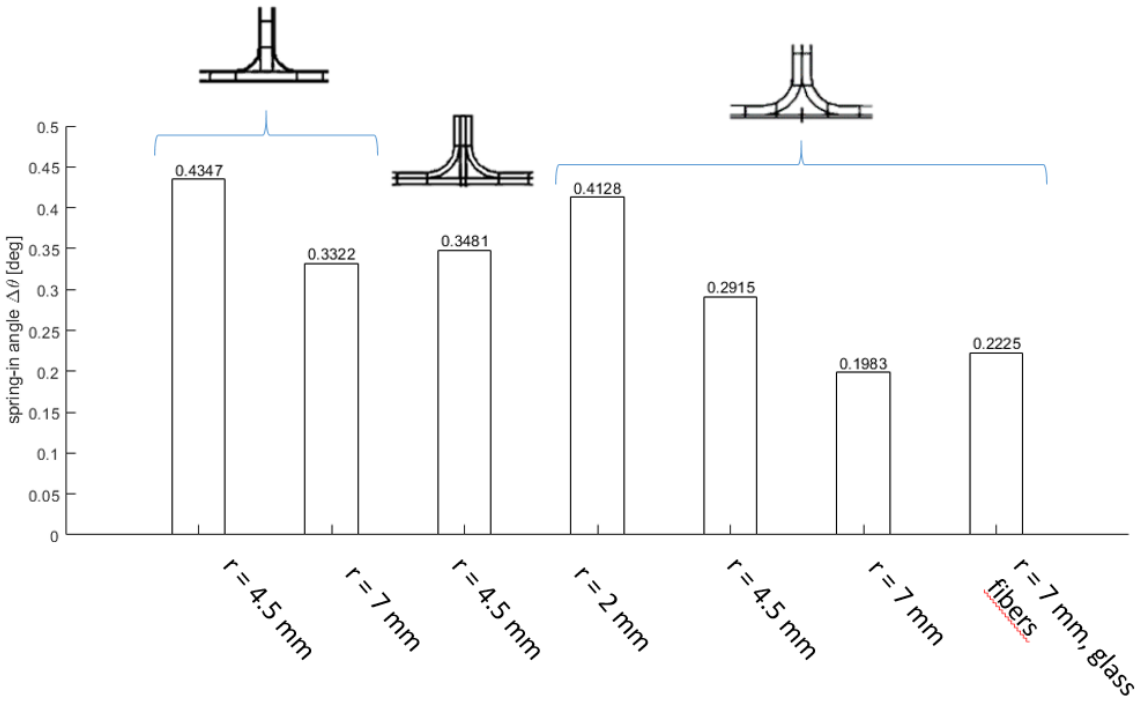


Abb. 8: Simulierter Wert des Spring-In Winkels am Ende des Prozesses

3.2.2 Größenbereich der Spannungskomponenten

Um den Bereich zu visualisieren, in dem sich die Spannungen in verschiedenen Richtungen am Ende des Prozesses ergeben, ist in Abbildung Abb. 9 der Bereich vom Minimal- bis Maximalwert dargestellt. Zunächst ist zu erkennen, dass sich die Spannungen mit zunehmendem Radius dem spannungslosen Zustand nähern (geringere Streuung um die Mittellinie). Da der Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) für kohlefaserverstärkten Kunststoff im Vergleich zum CTE von GFK, viel geringer ist, kann beim Wechsel zu einer glasfaserverstärkten Einlage eine Änderung von Druck zu Zugspannung festgestellt werden. Ziel ist in diesem Fall durch ein geschicktes Design, eine möglichst geringe Abweichung des Bereichs der Spannungen von der Nullpunktlinie zu erzielen.

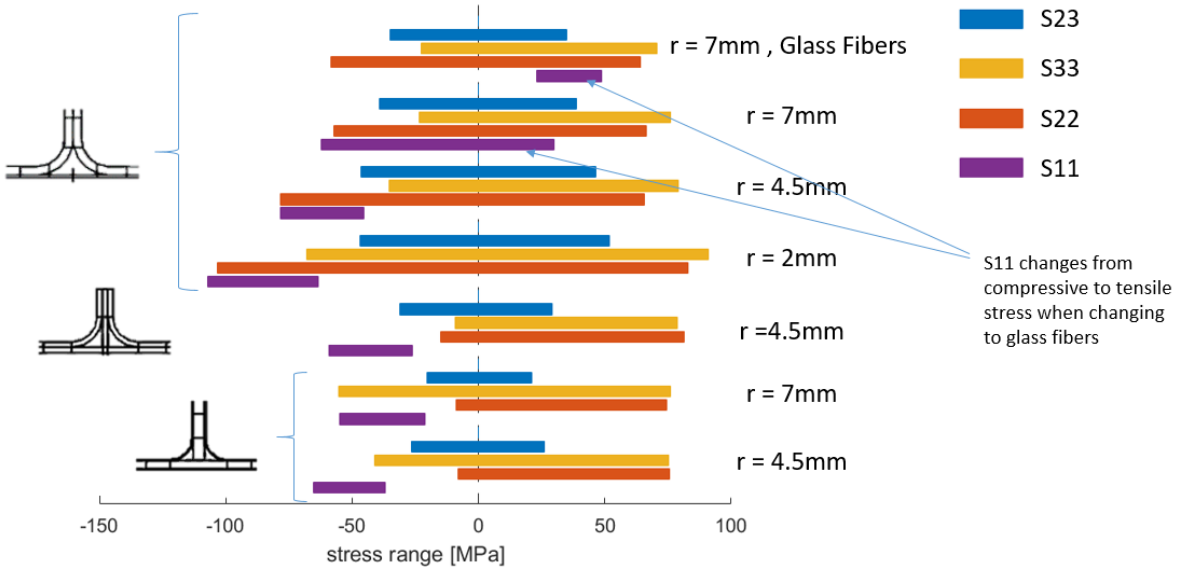


Abb. 9: Bereich der wichtigsten Spannungskomponenten in den UD-Einlagen

3.2.3 *Risiko für prozessinduzierte Schäden im Einlagematerial*

Das Hauptziel besteht darin, ein Stringerwurzel-Konzept mit verbesserter Beständigkeit gegen hohe Temperaturbelastungen zu finden. Dabei wird vermutet, dass die Reduzierung prozessbedingter Risse am Ende des Prozesses ein vielversprechender Ansatz ist. Das basiert unter anderem darauf, dass beim Abkühlen von der angenommenen spannungsfreien Nachhärtungstemperatur auf Raumtemperatur das Teil der größten zu erwartenden Temperaturbelastung ausgesetzt ist.

Als Indikator für das Versagen von Verbundwerkstoffen existieren mehrere Versagenskriterien. Die Hashin-Kriterien [12] sind differenzierende Versagenskriterien, die zwischen Faser- und Matrixversagen und Versagen aufgrund von Zug- oder Druckspannung unterscheiden. Aufgrund der auftretenden Grössenordnung von Spannungskomponenten wurde in diesem Fall das Versagenskriterium für Matrixversagen durch Zugspannung angewendet. Dieses Kriterium ist wie folgt definiert:

$$\frac{\tau_{12}^2+\tau_{13}^2}{R_{12}^2}+\frac{\tau_{23}^2-\sigma_{22}\sigma_{33}}{R_{23}^2}+\frac{(\sigma_{22}+\sigma_{33})^2}{(R_{22}^+)^2}=1 \qquad \text{für } (\sigma_{22}+\sigma_{33})>0 \qquad (8)$$

Die verwendeten Festigkeitswerte wurden abgeschätzt, sodass die Ergebnisse der Fehlerkriterien nur einen vergleichenden Charakter zwischen verschiedenen Konstruktionen haben. Das heisst, es kann beurteilt werden, dass eine bestimmte Konstruktion nach dem Prozess mit grösserer Wahrscheinlichkeit eine bessere Teilequalität aufweist. Das Fehlen prozessbedingter Risse kann jedoch nicht garantiert werden. Die angenommenen Werte sind in Tab. 1 aufgeführt.

Tab. 1: Verwendete Festigkeitswerte für die Entwurfsbewertung

Property	[MPA]
$R_{\parallel}^{+}$	2000
$R_{\parallel}^{-}$	1500
$R_{\perp}^{+}$	70
$R_{\perp}^{-}$	150
$R_{\perp\parallel}$	65

Für die Bewertung in diesem Fall wurden aufgrund des beobachteten Versagensmodus die Versagenskriterien für das Matrixzugversagen implementiert und bewertet (Gl. (8)). Es ist ersichtlich, dass das Konzept mit dem entfernten Mittelsteg ein insgesamt geringeres Risiko für prozessbedingte Ausfälle aufweist.

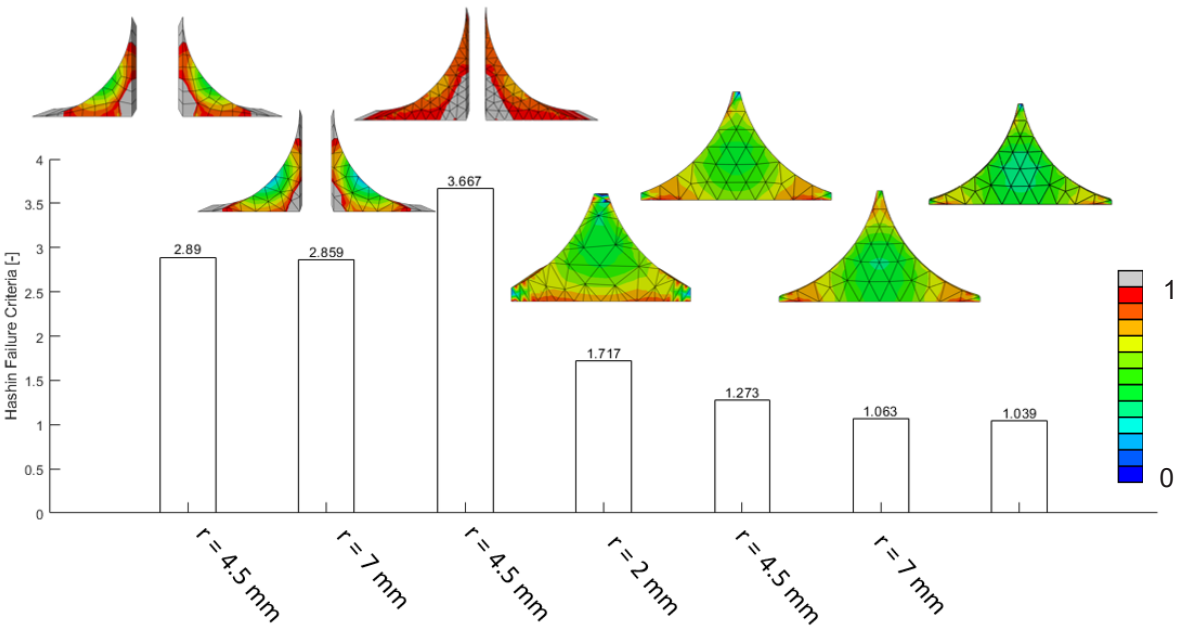


Abb. 10: Hashin-Versagenskriterium für Matrixzugversagen in den UD-Einlagen am Ende des Herstellungsprozesses

4 Fazit

Basierend auf dem Projekt SuCoHS wurde eine schlagzähmodifiziertes, AFP taugliches Hochtemperatur Thin Ply-Prepreg entwickelt. Dieses Material wurde erprobt anhand des gezeigten versteiften Panels und detailliert untersucht. Zur Berechnung von prozessbedingten Verformungen und Eigenspannungen wurde das entwickelte Material detailliert charakterisiert und ein physikalisch basierter Ansatz abgeleitet welcher Phänomene wie Schwindung, Schrumpf, Relaxation und Änderungen im Faservolumengehalt berücksichtigt.

Bei der Suche nach einer geeigneten Verbindung von Stringer und Haut, welches ein geringeres Risiko für prozessinduzierte Schäden aufweist, ist das entwickelte Simulationsmodell eine Möglichkeit, verschiedene Konzepte zu evaluieren.

Die höchste Priorität hat am Ende, dass ein gewähltes Konzept fertigungstechnisch umsetzbar ist und mit annehmbaren Werkzeug- und Fertigungskosten verbunden ist. Die Ergebnisse zeigen mögliche Verbesserungen durch Variation der Topologie des Wurzelbereichs und liefern eine Einschätzung des Ausmaßes der Eigenspannungen.

In diesem Fall hat sich gezeigt, dass sich die prozessinduzierten Spannungen aufgrund der hohen erforderlichen Aushärtetemperatur von 260°C und damit verbundenen Temperaturdifferenz schon in einem Bereich bewegen, in dem von prozessinduzierten Schäden ausgegangen werden muss. Durch ein schädigungstolerantes Design können die Auswirkungen aber wahrscheinlich verringert und auf ein akzeptables Niveau gebracht werden.

5 Literatur

[1] F. Schadt, L. Amirova, C. Brauner und M. Grob, «Thermoplastic particle tough-ening of carbon fiber / cyanate ester composites,» in *EASN Conference "Innovation in Aviation & Space"*, 2019.

[2] R. Amacher, W. Smith, J. Botsis, C. Dransfeld und J. Cugnoni, «New design opportunities using thin-ply composites,» Bd. 52, pp. 33-35, 4 2015.

[3] C. Brauner, S. Bauer und A. S. Herrmann, «Analysing process-induced deformation and stresses using a simulated manufacturing process for composite multispar flaps,» *Journal of Composite Materials,* Bd. 49, pp. 387-402, 2015.

[4] C. Brauner, «Analysis of Process Induced Distortions and Residual Stresses in Composite Structures, Logos Verlag, Berlin,» 2013.

[5] R. Hein; Wille, Tobias; Gabtni, Khalil; Dias, Jean-Paul: Prediction of Process-Induced Distortions and Residual Stresses of a Composite Suspension Blade. In: Defect and Diffusion Forum 362 (2015), apr, 224–243. http://dx.doi.org/10.4028/www.scient,» 2015.

[6] P. I. Karkanas, I. K. Partridge und D. Attwood, «Modelling the cure of a commercial epoxy resin for applications in resin transfer moulding,» *Polymer International,* Bd. 41, pp. 183-191, 1996.

[7] J. Fournier, G. Williams, C. Duch und G. A. Aldridge, «Changes in Molecular Dynamics during Bulk Polymerization of an Epoxide−Amine System As Studied by Dielectric Relaxation Spectroscopy,» *Macromolecules,* Bd. 29, pp. 7097-7107, 1996.

[8] I. Zhilyaev, C. Brauner, S. Queloz, H. Jordi, R. Lüscher, S. Conti und R. Conway, «Controlled curing of thermoset composite components using infrared radiation and mathematical modelling,» *Composite Structures,* Bd. 259, p. 113224, 2021.

[9] A. T. DiBenedetto, «Prediction of the glass transition temperature of polymers: A model based on the principle of corresponding states,» *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics,* Bd. 25, pp. 1949-1969, 1987.

[10] M. A. ZOCHER, S. E. GROVES und D. H. ALLEN, «A THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT FORMULATION FOR THERMOVISCOELASTIC ORTHOTROPIC MEDIA,» *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* Bd. 40, pp. 2267-2288, 1997.

[11] J. M. Svanberg und J. A. Holmberg, «Prediction of shape distortions Part I. FE-implementation of a path dependent constitutive model,» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* Bd. 35, pp. 711-721, 2004.

[12] Z. Hashin, «Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites,» *Journal of Applied Mechanics,* Bd. 47, pp. 329-334, 6 1980.

[13] T. Frerich, C. Brauner, J. Jendrny und A. S. Hermann, «Modeling the influence of interleaf layers in composite materials on elastic properties, thermal expansion, and chemical shrinkage,» *Journal of Composite Materials,* Bd. 53, pp. 2415-2428, 2019.

6 Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des SuCoHS-Projekts, das aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Finanzhilfevereinbarung Nr. 769178 finanziert wurde.

PSE

Professional Simulation Engineer

It's Time
to Get Certified

nafems.org/pse

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 verscheidenen geografischen Regionen zu vertreten, neutral zu leiten und die nationalen Belange innerhalb der NAFEMS zu vertreten, wurden sogenannte regionale Steering Committees (Lenkungsausschüsse) gebildet.

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

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

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

Die Mitglieder sind:
- U. Janoske (Universität Wuppertal), Chair
- A. Avci (Festo)
- R. Banjac (Siemens PLM Software)
- W. Dirschmid (CAE Consulting)
- A. Gill (Ansys Germany)
- T. Grahs (Volkswagen)
- U. Heck (DHCAE)
- B. Hupertz (Ford)
- V. Kassera (CFD Consultants)
- J. Iseler (Dassault Systèmes)
- G. Kohnen (DHBW Mosbach)
- B. Marovic (Mentor Graphics (Deutschland))
- S. Rudolph (Cascate)
- 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- udn 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 passwortgeschützen 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 the 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 visibily part of this global community.

Increased Productivity

OPTIMIZE THE DESIGN PROCESS
Learn about potential pitfalls and pick up time saving techniques.

MINIMISE COSTLY PHYSICAL TESTING
Increase confidence in your company's engineering simulation capabilities.

Improved Quality

BE COMMITTED TO THE HIGHEST STANDARDS
NAFEMS membership reinforces your focus on best practice.

BENCHMARK YOUR ORGANISATION'S SIMULATION PROCESS
Learn first-hand about experiences of other organisations similar to your own.

Enhanced Innovation

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

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

PRODUCE BETTER-ENGINEERED PRODUCTS WITH ENHANCED CUSTOMER SATISFACTION
Customer satisfaction will always be key. NAFEMS provides you with the opportunity use the latest technology in the most efficient manner, ensuring your customers will always receive the most innovative and effective products possible.

Membership Levels

	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-LEARING | 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.

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

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.

elibrary

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.

We are NAFEMS

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

nafems.org