



# Online-Magazin

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

ONLINE INTERAKTIV - JETZT ANMELDEN



incorporating



- Online-Congress über fünf Tage mit Interaktion und Networking!
- Über 450 Fachvorträge in bis zu 12 parallelen Sessions
- 10 internationale Keynote-Vorträge aus Industrie und Forschung
- Drei vollständig integrierte Fachkonferenzen
- Trainingskurse
- Diskussions-Sessions und Workshops
- 3d interactive online exhibition and networking area

Gehen Sie mit Ihrem Avatar durch die neu entwickelte 3d interaktive World of Simulation und networken Sie per Audio/Video mit Teilnehmern und Ausstellern.



**Fachbeiträge in dieser Ausgabe**

**DIGITALER ZWILLING**

Herausforderung Digital Twin: Die digitale Durchgängigkeit erfolgreich gestalten!

**STRÖMUNGSMECHANIK**

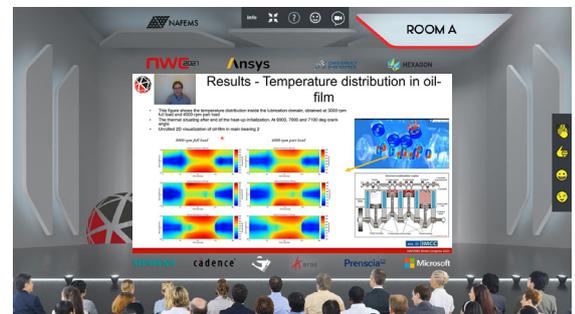
Integration der MRF-Modellierung in das CFD-Simulationsmodell eines Formelfahrzeugs

**GETRIEBESTEUERUNG**

Entwicklung eines modularen Ansatzes zur automatisierten, simulationsbasierten Validierung der Schaltstrategie moderner Doppelkupplungstriebe

**COMPOSITES**

Einfluss von Abweichungen der zugrundeliegenden Faserorientierungen auf die Struktursimulation von kurzfaserverstärkten Kunststoffen



[WWW.NAFEMS.ORG/CONGRESS](http://WWW.NAFEMS.ORG/CONGRESS)

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

Sponsoren dieser Ausgabe:



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

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

Beflügelt durch stetig steigende Rechnerkapazitäten und Speichermöglichkeiten wachsen Datenbestände immer schneller. Man spricht von Big Data, wenn die Bestände so groß, schnelllebig oder komplex sind, dass sie sich mit herkömmlichen Methoden der Datenverarbeitung nicht oder nur sehr mühsam behandeln lassen. Darüber hinaus versteht man unter dem Begriff aber auch neue Technologien, mit deren Hilfe sich große Mengen von unstrukturierten Daten verarbeiten lassen. Zum Beispiel dienen sie dazu, Unternehmensprozesse zu innovieren. Man kann Interaktionen, Muster und Anomalien innerhalb einer Branche und eines Marktes präzise analysieren und so neue, kreative Produkte und Tools auf den Markt bringen. Schließlich können sogar neue Geschäftsmodelle auf der Basis von Daten und deren Verknüpfungen entwickelt werden. Allerdings sollten auch die Gefahren nicht außer Acht gelassen werden, die sich mit den Möglichkeiten von Big Data ergeben. Dazu gehört die Überwachung der Bevölkerung durch Geheimdienste oder andere staatliche Institutionen sowie die Verletzung der Persönlichkeitsrechte von Kunden. Insgesamt kann man feststellen, dass Big Data ein universelles Phänomen beschreibt, das eine logische Konsequenz der Digitalisierung ist. NAFEMS befasst sich in zahlreichen Aktivitäten mit den Möglichkeiten und Risiken, die mit der Sammlung großer Datenmengen verbunden sind.



*Prof. Dr.-Ing.  
Klaus Rohwer*

Auch der erste Beitrag in diesem Heft behandelt Probleme, die bei der Bearbeitung großer Datenmengen auftreten. Um einen digitalen Zwilling als zentrales Informationsmodell im Produktlebenszyklus effektiv zu konfigurieren, müssen Informationen aus unterschiedlichen Quellen zusammenfließen. Dazu wird ein Ansatz für die erfolgreiche Gestaltung der digitalen Durchgängigkeit vorgestellt.

Strömungseffekte einer Kurvenfahrt mit einem Rennfahrzeug lassen sich nicht experimentell im Windkanal untersuchen. Der zweite Beitrag stellt vor, wie durch Integration eines Moving Reference Frames in die CFD-Analyse diese Effekte simuliert werden können. Auch die Raddrehung und die Durchströmung der Felge lassen sich auf diese Weise modellieren.

Automatisch schaltende Getriebe benötigen eine Schaltpunktsteuerung, mit der der optimale Gang berechnet wird. Im dritten Beitrag wird am Beispiel einer Fahrt im Kreisverkehr mit anschließender konstanter Fahrt dargestellt, wie synthetische Testfälle für eine bestehende Simulationsumgebung erstellt und anschließend automatisiert ausgewertet werden können, um den Prozess der Schaltqualitätsvalidierung effizienter zu gestalten.

Der vierte Beitrag belegt, dass für eine realistische Simulation von kurzfaserverstärkten Spritzgussbauteilen eine zuverlässige Prognose der Faserorientierungen von entscheidender Bedeutung ist. Bereits geringe Unterschiede, wie sie von kommerziellen Simulationstools geliefert werden, ergeben deutliche Abweichungen im mechanischen Verhalten.

Aus diesem Angebot ist sicher auch etwas dabei, was für Sie von Interesse ist. Ich wünsche Ihnen beim Lesen viele neue Erkenntnisse.

Mit freundlichen Grüßen

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

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



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



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



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



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



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



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



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



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

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

**NAFEMS Events**  
 Übersicht: Konferenzen, Schulungen.....5  
 NAFEMS World Congress 2021 .....6  
 Technical Communities .....10

**Stellenanzeige**  
 CGRail.....11

**NAFEMS Trainings**  
 Classroom online, E-learning, Learning Hub .....12  
 Verification and Validation in Engineering Simulation .....14  
 Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie.....16  
 Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear .....17  
 Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation.....18  
 Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung .....19

**NAFEMS Literatur**  
 Benchmark Magazin .....20

**Analysis Agenda**.....21

**Neuigkeiten** .....22

**Veranstaltungskalender** .....26

**Fachbeiträge**

**Digitaler Zwilling**  
**Herausforderung Digital Twin: Die digitale Durchgängigkeit erfolgreich gestalten!**.....27  
 M. Strietzel, L. Wagner (PROSTEP AG)

**Strömungsmechanik**  
**Integration der MRF-Modellierung in das CFD-Simulationsmodell eines Formelfahrzeugs** .....34  
 J. Pangerl, N. Kaiser, R. Stauch (Hochschule Esslingen)

**Getriebesteuerung**  
**Entwicklung eines modularen Ansatzes zur automatisierten, simulationsbasierten Validierung der Schaltstrategie moderner Doppelkupplungstriebe** .....47  
 J. Köber, L. Pflüger (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG);  
 M. Behrendt, A. Albers (IPEK – Institut für Produktentwicklung)

**Composites**  
**Einfluss von Abweichungen der zugrundeliegenden Faserorientierungen auf die Struktursimulation von kurzfaserverstärkten Kunststoffen**.....56  
 L. Veltmaat (Volkswagen AG);  
 H.-J. Endres, F. Bittner (Universität Hannover)

**PSE**  
 PSE - Professional Simulation Engineer Zertifizierung .....64/72

**Über NAFEMS**

Join - Übersicht und Ziele .....65  
 Mitglied werden .....68  
 Mitgliedsmodelle .....69  
 Technische Arbeitsgruppen .....70  
 Veranstaltungen .....71  
 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 -, Ver-  
 vielfältigung oder sonstige Verwertung  
 ist nur mit schriftlicher Genehmigung  
 unter ausdrücklicher Quellenangabe  
 gestattet. Gekennzeichnete Artikel  
 stellen die Meinung des Autors, nicht  
 unbedingt die Meinung der Redak-  
 tion dar. Für unverlangt eingesandte  
 Manuskripte und Datenträger sowie  
 Fotos übernehmen wir keine Haftung.  
 Alle Unterlagen, insbesondere Bilder,  
 Zeichnungen, Prospekte etc. müssen  
 frei von Rechten Dritter sein. Mit der  
 Einwendung erteilt der Verfasser / die  
 Firma automatisch die Genehmigung  
 zum kostenlosen weiteren Abdruck  
 in allen Publikationen von NAFEMS,  
 wo auch das Urheberrecht für ver-  
 öffentlichte Manuskripte bleibt. Eine  
 Haftung für die Richtigkeit der Veröf-  
 fentlichungen kann trotz Prüfung durch  
 die Redaktion vom Herausgeber nicht  
 übernommen werden.

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

**ISSN 2311-522X**

## Die nächsten Konferenzen/Seminare in DACH



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

25. - 29. Oktober 2021

Online

## Schulungen in DACH

<b>Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear</b> 2-tägig, Online, <a href="http://www.nafems.org/fkm-nonlin21-2">www.nafems.org/fkm-nonlin21-2</a>	14. - 15. Oktober	Online
<b>Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie (7. Ausgabe, 2020)</b> 2-tägig, Online, <a href="http://www.nafems.org/fkm21-2">www.nafems.org/fkm21-2</a>	23. - 24. November	Online
<b>Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</b> 2-tägig, Online, <a href="http://www.nafems.org/fem21-2">www.nafems.org/fem21-2</a>	25. - 26. November 2021	Online
<b>Verification and Validation in Engineering Simulation</b> 2,5-tägig, Online, <a href="http://www.nafems.org/vandv21-3">www.nafems.org/vandv21-3</a>	30. Nov. - 2. Dez.	Online
<b>Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung</b> <a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a>	Auf Anfrage	Online
<b>Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis</b> <a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a>	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](http://www.nafems.org/events).



**nwc**2021

**NAFEMSWORLD**CONGRESS

25-29 OCTOBER | ONLINE

**A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION**

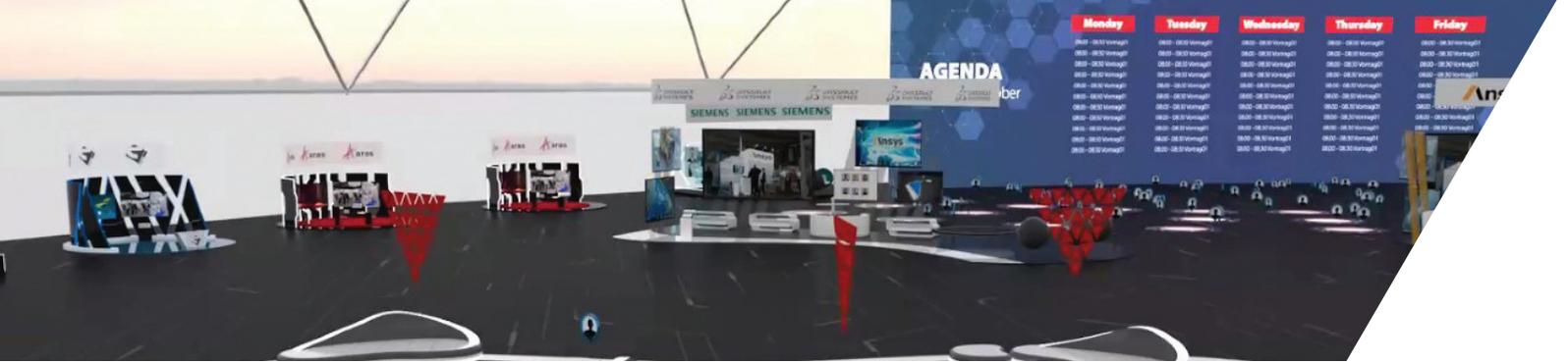
It's time to register.



**CAE in Automotive Development**  
State of the Art, Technology Changes, & Future Trends

PART OF THE NAFEMS WORLD CONGRESS 2021

25 - 29 OCTOBER | ONLINE



## Meet our Keynote Speakers

We are delighted to announce the initial lineup of keynote speakers for the NAFEMS World Congress 2021. Representing industry and academia from around the globe, they speak from positions of great experience and knowledge and are sure to provide excellent insight into their work in the simulation and analysis field.



**Yewande Akinola**  
**Innovate UK**  
 Global Citizen: Reporting for Duty



**Chuck Gray**  
  
 Digital Transformation & Modernization at Ford



**Torben Syberg**  
  
 Recommended Industry Practices to Promote and Support Airframe Structures Modeling & Simulation for Certification



**Marco Ferrogali**  
**AIRBUS**  
 GROUP  
 Digital transformation in the modelling and simulation world – the Airbus vision



**Karen Wilcox**  
  
 Engineering Design in the Age of Big Data and Big Compute



**Dr. Ivan Krajinovic**  
  
 From start-up simulations to now!  
 With plans for the future



**Gernot Kurt Boiger**  
  
 A Unified Approach on Teaching and Modelling 1D Dynamic Multiphysics Systems



**Christoph Gumbel**  
  
 innovation und Zukunftsforschung  
 The Future of Virtual Vehicle Development from a Management Perspective



**Mark Palmer**  
**Medtronic**  
 The Evolution of Modeling & Simulation in Healthcare: Medical Device Perspectives



**Mark Norris**  
**the SDM consultancy**  
 Bringing global best practice to SDM projects  
 20 years of SPDM in Production, from Systems to Solutions

Registration now open!



The NAFEMS World Congress 2021 is only a few weeks away, and there is still time to register for this landmark event in the simulation and analysis community.

For the first time, the Congress is genuinely globally accessible no matter where you are located.

You've seen the flashy email promos (hopefully!), had a look at the keynote line-up, browsed the agenda, and read about what will be going on.

**But now it's time to register. Before it's too late.**

## What's included?

- Full access to the **5 days** of the Congress
- Over **450 presentations** across 12 tracks on every aspect of engineering analysis and simulation, with live Q&A
- **10 industry-leading** keynote presenters
- Numerous discussion sessions and roundtable meetings with **experts, colleagues and thought-leaders**
- A selection of NAFEMS Short Courses to **boost your CPD hours** and learn from the best
- **Full download access** to all submitted papers
- Ground-breaking **3D Virtual Exhibition**, where you can interact with other attendees and exhibitors via text and video
- Your registration **includes complete access** to the 5th International SPDM Conference, the Multiphysics Simulation Conference, and the CAE in Automotive Development Symposium, being held concurrently as part of the Congress **and much, much more!**

**NAFEMS Member Fee €450 | Non Member Fee €650**



## INTERACTIVE 3D EXHIBITION AREA THE NEW WORLD OF SIMULATION

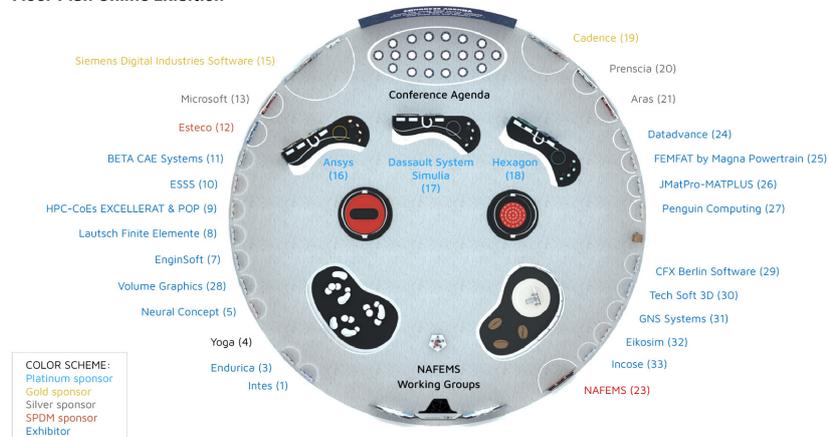
- Walk with your avatar through the interactive exhibition
- Get in contact with 25 exhibitors - with audio/video contacts
- Networking tables
- Live online audio/video contacts
- Best paper awards
- Infopoint and download station
- Lottery: Win a travel/hotel voucher
- Story of SIMUS
- Easter eggs and coffee points

## [nafems.org/congress/registration](https://nafems.org/congress/registration)

Every presentation will be available to you on a professional conference platform, produced to broadcast standard. Ask your questions from where you are, get involved in selected discussion sessions, and experience a full 3d exhibition.



### Floor Plan Online Exhibition



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

# JOIN THE 3D INTERACTIVE WORLD OF SIMULATION



LIVE - INTERACTIVE - ONLINE



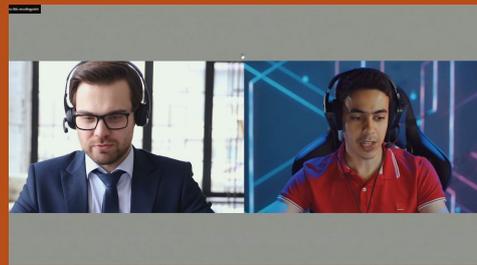
ONLINE A/V NETWORKING



JUMP TO PRESENTATIONS



DELEGATE TO DELEGATE



AUDIO-VIDEO CONTACTS



DELEGATE TO EXHIBITOR

PLATINUM



GOLD



SPDM



SILVER



**The 2021 Congress is genuinely accessible to every single member of the analysis and simulation community.**

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.

**And we want you to be a part of it. Because this is your community, and this is your Congress.**

## Get in touch



Roger Oswald  
 roger.oswald@nafems.org  
 +49 176 217 984 01  
 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](https://nafems.org/communities)

## Community

Home ▸ Community

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

### Your Community

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

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

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

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



- Webinars
- Technical Community Meetings
- Stay Connected



### CG Rail GmbH

Die CG Rail GmbH ist ein national und international führendes Forschungs- und Entwicklungsunternehmen zu innovativen Leichtbausystemen in Multi-Material-Design für Schienenfahrzeuge und andere Verkehrssysteme in Dresden. So entwickelte die CG Rail GmbH etwa in nur 2 Jahren die weltweit erste Leichtbau-Metro in carbonintensiver Leichtbauweise, die 2018 auf der InnoTrans als CETROVO vorgestellt wurde. Das einzigartige Know-How der CG Rail GmbH und ihrer Partner auf dem Gebiet des funktionsintegrativen Systemleichtbaus in Multi-Material Design belegt auch der mit dem europäischen „ERCI Innovation Award 2020“ ausgezeichnete Drehgestellrahmen in carbonintensiver Leichtbauweise. Dieser erfolgreich über 12 Millionen Lastwechsel erprobte Drehgestellrahmen erreicht eine Masseersparnis von fast 50 % gegenüber der metallischen Referenzbauweise.

**Für unseren Standort in Dresden suchen wir zum baldmöglichsten Termin eine/einen**

## Berechnungsingenieur (m/w/d)

### Ihre Aufgaben:

- > Termingerechte Erstellung, Durchführung und Auswertung von Finite-Elemente-(FE) Simulationen zur Auslegung von hochbeanspruchten Leichtbaustrukturen in Faserverbund-Metall-Mischbauweise
- > Erstellung von Berichten (Word, Powerpoint) und Präsentationen (Powerpoint) zur detaillierten Dokumentation von FE-Modellen und Berechnungsergebnissen
- > Präsentation und Diskussion von Ergebnissen im Projektteam und bei Kunden im nationalen und internationalen Umfeld
- > Enge Abstimmung innerhalb des jeweiligen Projektteams
- > Betreuung von Studierenden im Rahmen von Praktika oder Abschlussarbeiten

### Ihr Profil:

- > Abgeschlossene Hochschulstudium (Univ.-Diplom / Master) oder Promotion (Dr.-Ing.) im Bereich Maschinenbau (vorzugsweise Vertiefungsrichtungen Leichtbau, Technische Mechanik, Luft- und Raumfahrttechnik, Automobiltechnik oder Schienenfahrzeugtechnik)
- > Mehr als 10 Jahre industrielle Berufserfahrung als Berechnungsingenieur in den Bereichen Luft- und Raumfahrt und/oder Windkraftanlagen und/oder Automobiltechnik und/oder Schienenfahrzeugtechnik
- > Detaillierte Kenntnisse und umfangreiche Erfahrungen (mehr als 10 Jahre) zur durchgängigen Simulation (Fertigung, Betrieb, ...) von Faserverbundstrukturen mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM)
- > Idealerweise auch Erfahrung in der Prozesssimulation für Faserverbundwerkstoffe (etwa Fließwegsimulation)
- > Detaillierte Kenntnisse zu Material- und Schädigungsmodellen sowie Versagenskriterien für Faserverbundwerkstoffe in der FEM-Simulation
- > Langjährige Routine in der Anwendung von mindestens einem gängigen FEM-Softwaresystem wie etwa HyperWorks® oder Ansys® inklusive zugehöriger Prä- und Postprozessoren
- > Routine in der Bedienung von MS Word und MS Powerpoint
- > Analytische Denkweise
- > Ziel- und lösungsorientierte Arbeitsweise
- > Sehr gute Deutsch- sowie idealerweise auch Englischkenntnisse in Wort und Schrift
- > Gelegentliche Geschäftsreise zu internationalen Kunden in Asien je nach Projektbedarf

### Wir bieten:

- > Einen attraktiven Arbeitsplatz im Zentrum Dresdens
- > Überdurchschnittliche Bezahlung in der Region Dresden
- > Ein motiviertes Team im internationalen Umfeld
- > Herausfordernde Aufgaben und einen vielfältigen Arbeitsalltag mit Selbstverantwortung

Wir freuen uns auf Ihre vollständige Bewerbung, in der Sie bitte Ihre Kündigungsfrist und Ihre Gehaltsvorstellung angeben.

Ihre Bewerbungsunterlagen richten Sie bitte an: CG Rail GmbH  
Freiberger Straße 33  
01067 Dresden, Germany

E-Mail: [Bewerbung@cgrail.de](mailto:Bewerbung@cgrail.de)  
Telefon: 0351/41673000

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.

<h3>e-learning</h3> <p>WORLD-CLASS ONLINE TRAINING FROM THE EXPERTS ON A RANGE OF TOPICS. YOU AND YOUR TEAM CAN USE A COMBINATION OF LIVE SESSIONS, DISCUSSION FORUMS, AND RECORDED SESSIONS TO LEARN .</p> <p><a href="#">VIEW YOUR OPTIONS</a></p>	<h3>virtual classrooms</h3> <p>OUR BEST-IN-CLASS PUBLIC TRAINING COURSES, NOW BEING DELIVERED ENTIRELY ONLINE. COMPLETE COURSES DELIVERED IN FULL DAY SESSIONS OVER THE COURSE OF ONE OR MORE DAYS.</p> <p><a href="#">FULL DETAILS</a></p>	<h3>custom classes</h3> <p>OUR CUSTOM CLASSES COVER WHATEVER TOPICS YOU NEED, WITH EXAMPLES RELATED TO YOUR INDUSTRY, IN A PRIVATE, ONLINE DELIVERY FORMAT THAT SUITS YOU AND YOUR TEAM PRECISELY.</p> <p><a href="#">CREATE YOUR COURSE</a></p>
<h3>learning modules</h3> <p>ONLINE, SELF-PACED LEARNING WITH TUTOR SUPPORT. LEARN AT YOUR OWN PACE, WITH EXPERIENCED GUIDANCE ON-HAND ALL THE WAY.</p> <p><a href="#">VIEW THE MODULES</a></p>	<h3>learning hub</h3> <p>GUIDED LEARNING, EXCLUSIVE TO NAFEMS MEMBERS. FROM KEY CONCEPTS TO DETAILED LEARNING, THERE'S SOMETHING FOR EVERYONE.</p> <p><a href="#">Access the Hub (members only)</a></p>	
<p><b>6</b> Oct 2021</p> <p>Keeping a Large Enterprise Engaged in the Journey from "Test Centered" to a "Simulation-Led"...</p> <p>WebEx, Online</p> <p><b>Webinar</b></p>	<p><b>12</b> Oct 2021</p> <p>Systems Modelling &amp; Simulation Community Meeting</p> <p>WebEx, Online</p> <p><b>Technical Community Event</b></p>	<p><b>14</b> Oct 2021</p> <p>Developing Efficient Structural Concepts for the Future of Mobility</p> <p>Online, Online</p> <p><b>Webinar</b></p>
<p><b>14</b> Oct 2021</p> <p>Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear</p> <p>online, Online</p> <p><b>Training Course</b></p>	<p><b>19</b> Oct 2021</p> <p>Plans d'expériences pour l'ingénierie</p> <p>Webex, Online</p> <p><b>Training Course</b></p>	<p><b>25</b> Oct 2021</p> <p>SPDM-International Conference on Simulation Process &amp; Data Management</p> <p>Online, Online</p> <p><b>User Conference</b></p>
<p><b>25</b> Oct 2021</p> <p>NAFEMS World Congress 2021</p> <p>Salzburg, Austria</p> <p><b>World Congress</b></p>	<p><b>26</b> Oct 2021</p> <p>Multiphysics Simulation Conference</p> <p>Online, Online</p> <p><b>User Conference</b></p>	<p><b>29</b> Oct 2021</p> <p>Diversity and Inclusion Meeting - Turning Words into Actions</p> <p>Webex, Online</p> <p><b>Webinar</b></p>
<p><b>8</b> Nov 2021</p> <p>Learning from Physics and Data for Design and Condition Monitoring of Engineering Systems</p> <p>WebEx, Online</p> <p><b>Technical Community Event</b></p>	<p><b>9</b> Nov 2021</p> <p>Designer-Oriented Simulation: Putting Simulation Upfront</p> <p>Webex, Online</p> <p><b>Seminar</b></p>	<p><b>16</b> Nov 2021</p> <p>V&amp;V: Vérification &amp; Validation des Simulations pour l'ingénierie</p> <p>, France</p> <p><b>Training Course</b></p>
<p><b>23</b> Nov 2021</p> <p>Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie</p> <p>online, Online</p> <p><b>Training Course</b></p>	<p><b>25</b> Nov 2021</p> <p>Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</p> <p>Online, Online</p> <p><b>Training Course</b></p>	<p><b>30</b> Nov 2021</p> <p>Practical Introduction to Finite Element Analysis</p> <p>Cheshire, UK</p> <p><b>Training Course</b></p>
<p><b>30</b> Nov 2021</p> <p>Verification and Validation in Engineering Simulation</p> <p>Online, Online</p> <p><b>Training Course</b></p>	<p><b>8</b> Dec 2021</p> <p>The UC Simulation Center - A P&amp;G and University of Cincinnati Collaborative</p> <p>WebEx, Online</p> <p><b>Webinar</b></p>	<p><b>9</b> Dec 2021</p> <p>Un Jumeau Numérique Pour Mieux Connecter La Simulation Multiphysiques Et Le Monde Reel</p> <p><b>Seminar</b></p>



**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



Get started today at  
[nafe.ms/learninghub](http://nafe.ms/learninghub)

## 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

30. November - 2. Dezember 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 of expectation due in their industry context and applicable regulations
- Understand the fundamental concepts of V&V, the role and contents of standards, the existing methodologies for the implementation or the improvement of simulation and V&V plans
- Understand specific V&V requirements in the context of realistic simulation and virtual testing
- Understand how to build rational plans for V&V and related demonstrations
- Improve synergy between virtual and physical tests in the context of validation
- Learn how to build business cases allowing for justification of V&V plans
- Understand simulation management and process issues
- Learn how to implement reporting to bring visibility and confidence to all managers concerned with simulation outcomes.

### Who Should Attend?

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

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

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

### Program

#### Introduction

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

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

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

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

**V&V and Simulation Management**

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

**Realistic Simulation**

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

**V&V Fundamentals and Standards**

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

**Verification**

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

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

**Uncertainty Quantification**

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

**V&V Implementation Strategies**

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

**Course Language**

Englisch

**Tutors**



Jean-Francois Imbert

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



Philippe Pasquet

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

**Informationen und Anmeldung**  
[www.nafems.org/vandv21-3](http://www.nafems.org/vandv21-3)

## NAFEMS Schulung

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

23. - 24. November 2021 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

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

### Gliederung

Grundlegendes zur FKM-Richtlinie

- > Was leistet ein Festigkeitsnachweis?
- > Historie, Quellen und rechtlicher

Status der Richtlinie

- > Anwendungsbereich und Umfang

Theorie zum statischen Festigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

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

Beispiel „Getriebegehäuse“ zum statischen Nachweis

- > Auswahl der Nachweispunkte für manuelle Berechnung
- > Programmgestützte Berechnung

Vertiefung zum statischen Nachweis - Plastische Formzahl

- > Ertragbare Dehnung
- > Plastische Traglast
- > Beispiele zur Berechnung der plastischen Formzahl

Theorie zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

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

Beispielrechnung „Getriebegehäuse“ zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis

- > Auswahl der Nachweispunkte für manuelle Berechnung
- > Ermittlung des Spannungsgradienten
- > Programmgestützte Berechnung

Vertiefung zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis

- > Stützwirkungskonzept
- > Details zum Mittelspannungsfaktor
- > Betriebsfestigkeitsfaktor
- > Beispiel zum Betriebsfestigkeitsfaktor

Einführung in die Spannungskonzepte für die Schweißnahtbewertung

- > Nennspannungskonzept
- > Strukturspannungskonzept
- > Kerbspannungskonzept

- > Modellierung für Kerbspannungskonzept

Theorie Statischer Nachweis für geschweißte Bauteile

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

Beispiele zum statischen Nachweis geschweißter Bauteile

- > Strukturspannungsnachweis
- > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis

Theorie Ermüdungsnachweis für geschweißte Bauteile

- > Maßgebende Spannungskomponenten
- > Werkstoffkennwerte (Temperaturkennwerte)
- > Konstruktionskennwerte
- > FAT-Klasse
- > Mittelspannungseinfluss
- > Betriebsfestigkeitskonzept

Beispiele zum Ermüdungsnachweis geschweißter Bauteile

- > Strukturspannungsnachweis
- > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis

### Referent

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

**Informationen und Anmeldung**  
[www.nafems.org/fkm21-2](http://www.nafems.org/fkm21-2)

## NAFEMS Schulung

# Festigkeitsnachweis in die FKM-Richtlinie Nichtlinear

14. - 15. Oktober 2021 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens

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

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

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

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

### Gliederung

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

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

### Referenten

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

*Der Praxisteil des Seminars wird von Herrn Dipl.-Ing. (FH) Tim Kirchhoff vorgestellt. Herr Kirchhoff ist seit 2007 bei der ihf Ingenieurgesellschaft mbH im Bereich CAE-Simulation und Softwareentwicklung tätig. Als Teamleiter der Softwareentwicklung ist er verantwortlich für die Entwicklung von Programmen zum statischen und zyklischen Nachweis aufbauend auf FE-Analysen. Herr Kirchhoff arbeitet seit über 10 Jahren aktiv im Fachkreis Bauteilfestigkeit des VDMA zur Weiterentwicklung der FKM-Richtlinie mit. Zudem vertritt er die ihf Ingenieurgesellschaft mbH als KMU im Redaktionskreis der FKM-Richtlinie und im Industriekreis des Fachkreises.*

**Informationen und Anmeldung**  
[www.nafems.org/fkm-nonlin21-2](http://www.nafems.org/fkm-nonlin21-2)

# 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



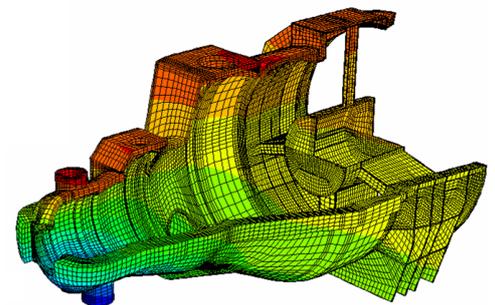
*Prof. Dr.-Ing. Armin Huß verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Technischen Mechanik, Technischen Schwingungslehre und der Anwendung der Finiten Elemente Methode, davon über 20 Jahre Praxis-Erfahrung als freiberuflicher Ingenieur für die Anwendung der FEM in den unterschiedlichsten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

**NAFEMS Schulung**

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

**Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar**

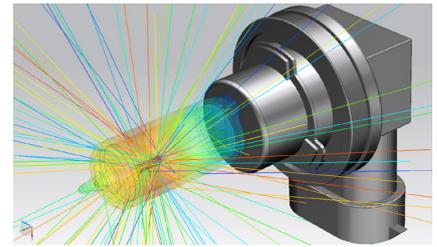
Die Schulung vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung (CFD). Neben der Funktionsweise von Programmen, die anhand zahlreicher einfacher Beispiele erläutert wird, steht die Vermittlung des gesamten Lösungsprozesses im Vordergrund. Mit Hilfe von 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*

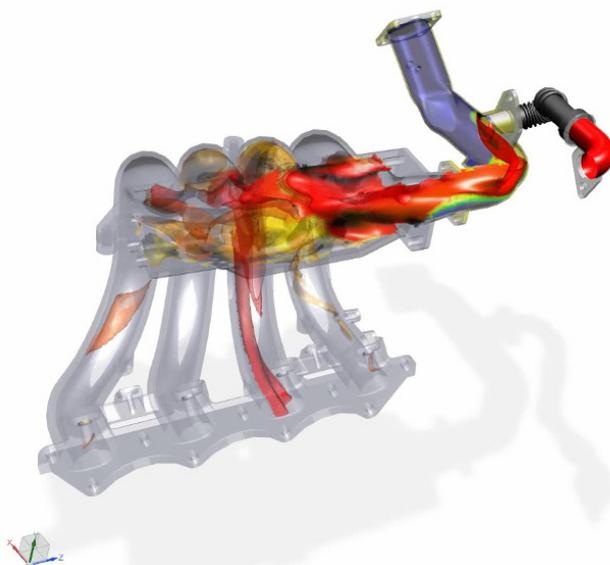
*der Strömungsberechnung CFD in Lehre, Forschung und Industrie. Herr Kohnen leitet den Bereich Maschinenbau und Virtual Engineering an der Hochschule Baden-Württemberg Mosbach.*

**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.



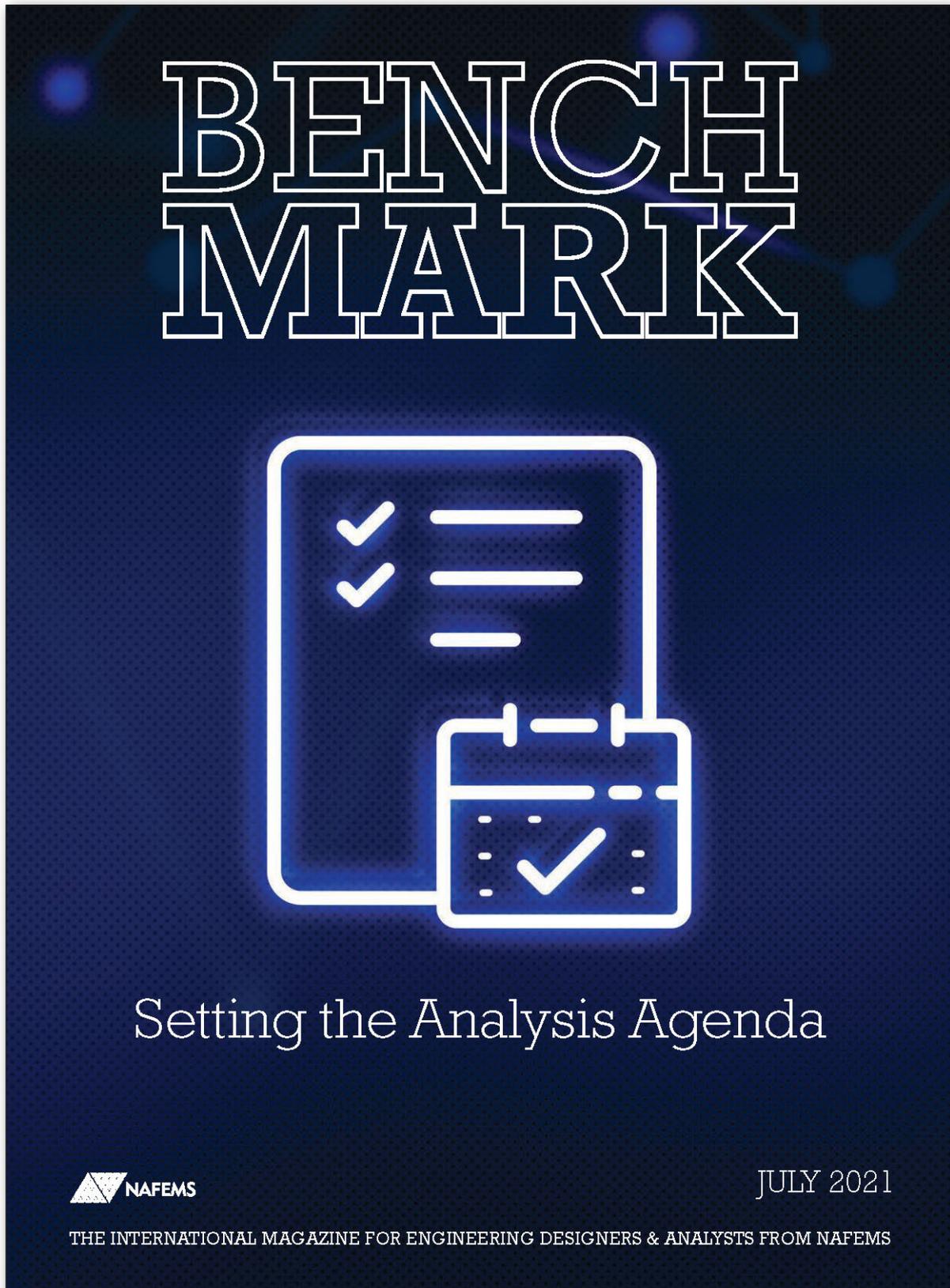
Internationales NAFEMS Magazin

## Benchmark Magazin, Ausgabe Juli 2021

Die internationale NAFEMS Zeitschrift „Benchmark“ erschien zuletzt im Juli 2021.

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

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





THE nafems.org/agenda  
**ANALYSIS  
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**

**ARRK**

**TOP 10 der familienfreundlichsten Unternehmen**

ARRK Engineering gehört zu den TOP 10 der familienfreundlichsten Unternehmen Deutschlands innerhalb der Branche Automobil/Automobilzulieferer. Die Medienmarke Freundin und die Arbeitgeber-Bewertungsplattform kununu würdigten auch in diesem Jahr wieder die Vereinbarkeit von Familie und Beruf, eine gute Work-Life-Balance, Wohlfühlfaktoren sowie gleichberechtigte Karriere-möglichkeiten bei Arbeitgebern. Über 600 Unternehmen in Deutschland und Österreich zeigen sich in diesem Jahr besonders familienfreundlich. Freundin und kununu verleihen zum sechsten Mal das Siegel „Die familienfreundlichsten Arbeitgeber“ – ARRK Engineering belegt Platz 10 in der Branche Automobil.

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

**BETA CAE Systems**

**Neue Versionen**

BetaCAE Systems hat die neuen Versionen 22.0.0 der Beta CAE Systems Suite bekanntgegeben.

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

**CADFEM**

**Engineering-Werkzeuge von Cadfem für Ansys**

Die Ansys Softwarefamilie deckt ein enormes Spektrum an Simulationsanwendungen ab. Und wenn es vereinzelt noch Lücken gibt, dann werden diese oft durch Lösungen aus dem Ansys Elite-Partner-Netzwerk gedeckelt. Die Cadfem Ansys Extensions sind solche Engineering-Werkzeuge für Spezialaufgaben, z.B. wenn es um FKM-Nachweise, Schraubenbewertungen nach VDI 2230 und schnelle Gleit- oder Wälzlagerauslegungen geht. Mittlerweile ist das gesamte Spektrum mit neuen Features für die aktuelle Version Ansys 2021 R2 verfügbar.

**Ansys Release 2021 R2**

Ansys, Inc. hat am 20. Juli 2021 das neue Release Ansys 2021 R2

frei gegeben. Die Neuerungen und Weiterentwicklungen über das gesamte Einsatzspektrum der Ansys Programmfamilie hinweg haben wir für Sie hier zusammengestellt.

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

**CARHS**

**Automotive CAE Companion**

Der neue automotive CAE Companion bietet umfassende Informationen zu unseren Konferenzen und Seminaren im CAE und im Engineering. Auf über 70 Seiten CAE-Wissen liefern Experten wertvolle Informationen zu Theorie und Anwendung der numerischen Simulation in der CAE-basierten Fahrzeugentwicklung. Das CAE-Wissen macht den automotive CAE-Companion von carhs.training zu einem einzigartigen Kompendium, das auch erfahrenen CAE-Ingenieuren wertvolles Wissen zur Theorie moderner Simulationsverfahren und deren praktischen Anwendung in der Fahrzeugentwicklung liefert. Bestellen Sie jetzt Ihr kostenloses Exemplar!

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

**INSTAL**

**Instal-News**

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

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

**INTES**

**Neu: Permas Version 18**

Die neue Permas Version 18 ist seit Juli 2020 verfügbar. Die Versionierung von VisPER wurde an Permas angeglichen und wird ab Version 18 als Paket mit gleicher Versionsnummer ausgeliefert. Eine Permas for Education (Permas4E-DU) steht für Trainings- und Ausbildungszwecke zur Verfügung. Auch mit der Permas Version 18 konnten Rechenzeiten wieder verkürzt werden: Für die Frequenzganganalyse wurde der iterative Löser signifikant beschleunigt. Darüber hinaus wurde die SOLV=SMW Option verallgemeinert, z.B. werden Control-Elemente

unterstützt. Die Laufzeit von Kontaktanalysen großer Modelle konnte erneut verkürzt werden. Die nichtlineare Spannungsberechnung wurde parallelisiert, genauso die Kapazität und Konduktivität für Wärmeleitung. Die Liste von unterstützten Nvidia Tesla Grafikkarten in Permas Modul XPU wurde erweitert. Neben Kepler werden auch Pascal und Volta unterstützt und werden mit CUDA 10.1 verwendet. Der VisPER HDF Import wurde wesentlich beschleunigt.

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

**HEXAGON**

**Athleten in Tokio wurden einer gefährlichen Hitze ausgesetzt – Simulation zeigt mögliche Auswirkungen auf die Körpertemperatur**

Eine neue Simulation zur Auswirkung der Hitze und Luftfeuchtigkeit auf die Athleten im Stadion von Tokio zeigt die gefährlichen Bedingungen der heißesten Olympischen Spiele aller Zeiten auf. Athleten riskieren Hitzschlag, Dehydrierung und totale Erschöpfung.

Die Ingenieure von Hexagon's Manufacturing Intelligence division, dessen Software von Herstellern wie Airbus, Toyota und Samsung eingesetzt wird, haben die Auswirkungen der feucht-heißen Bedingungen auf einen männlichen Athleten beim 10.000-Meter-Lauf simuliert (das längste Bahnrennen im Stadion). Obwohl das Rennen erst nach Sonnenuntergang startet, (am 30. Juli um 20:30 Uhr Ortszeit), zeigt die Simulation, dass die Athleten dennoch extremen Bedingungen ausgesetzt sein werden.

Selbst bei den durchschnittlichen Wetterbedingungen im Juli von 27°C und 70 % Luftfeuchtigkeit könnte die Körperkerntemperatur der 10.000-Meter-Läufer auf über 39 Grad C ansteigen. Eine Temperatur oberhalb von 38 Grad C gilt als Fieber und Forschungen haben ergeben, dass der menschliche Körper für eine optimale Funktion der biochemischen Reaktionen auf einer Kerntemperatur zwischen 35 und 39 °C gehalten werden muss. Für Menschen, die einer „gefühlten“ Temperatur (d. h. wie die jeweilige

Person die Temperatur empfindet) von mehr als 32,2 Grad C ausgesetzt sind, besteht die Gefahr von Hitzschlag, Hitzekrämpfen und Hitzeerschöpfung.

Die Entscheidung, die diesjährigen Spiele im tropischen Sommer Tokios auszutragen ist auf wachsende Kritik gestoßen, denn Experten warnten: „Bei dieser Hitze und Luftfeuchtigkeit sollte man nicht laufen“. Die Durchschnittstemperaturen in Tokio Ende Juli und Anfang August sind die höchsten einer Gastgeberstadt seit 1984. Daher wurden die letzten Olympischen Spiele in Tokio im Jahr 1964 aufgrund von Bedenken bezüglich der Hitze in den Oktober verschoben. Ein Hitzschlag ist vermutlich die größte wetterbedingte Gefahr für die Teilnehmer. Auslöser ist eine längere Belastung durch hohe Temperaturen und Luftfeuchtigkeit bei wenig oder keinem Wind zur Abkühlung; die möglichen Folgen sind Ohnmacht, Krämpfe oder eine allgemeine Erschöpfung.

Um zu illustrieren, wie nahe die Athleten den verheerenden Hitzeauswirkungen schon bei einer Temperaturänderung von wenigen Grad? kommen können, simulierten die Ingenieure zwei verschiedene Szenarios:

- > Überdurchschnittlich heiß: zu vernachlässigende Windgeschwindigkeit, 32 °C Lufttemperatur und 90 % Luftfeuchtigkeit
- > Für die Jahreszeit durchschnittliche Bedingungen: zu vernachlässigende Windgeschwindigkeit, 27 °C Lufttemperatur und 70 % Luftfeuchtigkeit

Die Simulationen zeigen hierbei die beträchtlichen Auswirkungen selbst geringfügiger Wetteränderungen. Steigt die Lufttemperatur um gerade einmal fünf Grad über den Durchschnitt, erhöht sich die simulierte Körperkerntemperatur auf 39,77 °C und die Hauttemperatur auf 37 °C. Darüber hinaus kann die Kopfkern-temperatur der Athleten im heißeren Szenario auf über 40 °C ansteigen, während selbst unter durchschnittlichen Bedingungen noch 39,2 °C möglich sind. Von allen Organen reagiert das Gehirn am stärksten auf Hitze, wodurch sich die empfindlichen neuronalen Aktivitätsmuster

verändern können, was letztlich zum Absterben von Nervenzellen und zu Krampfanfällen führt. Die Oberschenkel und das Becken (jeweils 40,7 °C) sind weitere Körperzonen, die nachweislich für besonders hohe Kerntemperaturen anfällig sind, wenn die Lufttemperatur überdurchschnittlich ansteigt.

Ebenso spielt die Luftfeuchtigkeit eine zentrale Rolle für die Leistung und Gesundheit der Sportler. Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit in Tokio liegt im Juli bei 70 %. Steigt sie jedoch auf 90 %, schwitzen die Sportler über die Dauer des rund 30-minütigen Rennens durchschnittlich 810 ml anstatt üblicherweise 630 ml. Während Schwitzen den Körper durch Verdunstung auf der Haut abkühlt, geht dieser Effekt der Verdunstungskühlung an Tagen mit hoher Luftfeuchtigkeit größtenteils verloren, da die Luft fast gesättigt ist. Somit ist die Belastung auf die Sportler unter diesen Bedingungen noch stärker. Zugleich beschleunigt die Dehydrierung den Anstieg der gesamten Körpertemperatur, was die Auswirkungen weiter verschärft. Diese Simulation konzentriert sich auf den 10.000-Meter-Lauf als längstes Rennen im Stadion. Die Ergebnisse geben jedoch einen Einblick in die harten Bedingungen, mit denen alle Athleten bei den Spielen konfrontiert sind – das betrifft insbesondere die Ausdauer-Wettbewerbe, aber auch Wettkämpfe in sengenden Mittagstemperaturen von potenziell mehr als 30°C. Der Klimawandel wurde als entscheidender Faktor für die steigenden Temperaturen Tokios angeführt. Die Durchschnittstemperatur ist seit 1900 um 2,9 Grad C angestiegen – mehr als dreimal so schnell wie die weltweite Durchschnittserwärmung. Zur Erstellung dieser Simulationen nutzten Ingenieure die numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD) – eine Disziplin zur Nachbildung von thermischen/fluiden Phänomenen. Die Hexagon-Software Cradle CFD verwendet unstrukturierte Netze, um komplizierte Geometrien darzustellen. Die Software dient unter anderem zur Planung von Klimaanlage, zur Fahrkomfort-Beurteilung oder

**3S DASSAULT SYSTEMES**

## SIMULATION AT ITS BEST!



Join us for free on  
**Nov. 16–18, 2021**

when engineers share their work experiences and we present the latest developments in Multibody System Simulation (MBS) with Simpack.

**MBS TECH DAYS**  
VIRTUAL EVENT  
[events.3ds.com/  
MBS-Tech-Days](https://events.3ds.com/MBS-Tech-Days)



**3DEXPERIENCE®**

sogar zur Konstruktion effizienterer Wäschetrockner.

Die simulierten Bedingungen umfassen die Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit, die von den Athleten in 30 Minuten (ungefähre Dauer des Rennens) erzeugte Wärme und die durch die Laufbewegung bewirkte Luftströmung. Der Körperzustand der Athleten wird unter Verwendung des Thermo-Regulationsmodells JOS-2 (JOS-Modell) analysiert, das von einer Forschungsgruppe der japanischen Waseda-Universität entwickelt wurde. Das JOS-Modell ist in der Lage, Körpergröße, Geschlecht und Alter von Menschen in die Berechnungen einzubeziehen. Durch die Kombination des Thermo-Regulationsmodells mit CFD lassen sich die Auswirkungen von Umgebungsänderungen auf die Kern- und Hauttemperaturen im gesamten Körper analysieren.

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

## SICOS-BW

### KIT-Forschungscluster für Industrieprojekte einsetzbar

Unternehmen bundesweit, insbesondere kleine und mittlere (KMU), haben jetzt die Möglichkeit, das regionale Forschungscluster am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) für Industrieprojekte rund um beispielsweise Maschinelles Lernen oder Künstliche Intelligenz (KI) einzusetzen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert einen neuen Cluster mit modernster GPU-Technologie, der über das von ihm unterstützte Smart Data Innovation Lab (SDIL) auch für Unternehmen zugänglich gemacht wird. Darüber hinaus haben die Partner SAP, IBM und Software AG ihre Cloud-Angebote erweitert. „Das Angebot richtet sich insbesondere an KMU, die entweder selbst für ihre Forschung und Entwicklung leistungsfähige Hard- und Software benötigen oder die in Kooperation mit Spitzenforschern durch neue zugeschnittene Algorithmen Datenschätze heben wollen. KI-Experten vom Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, der Fraunhofer Gesellschaft, dem Forschungszentrum Jülich und das KIT

stehen für Projekte bereit“, sagt Prof. Michael Beigl, Lab Leader des SDIL. Das Smart Data Innovation Lab bietet einen Datenreinraum, der die technischen, organisatorischen und rechtlichen Rahmenbedingungen für kollaborative Forschung und Entwicklung industrieller Datenquellen bietet. Hierfür liefert das SDIL (noch bis 2022 kostenfrei innerhalb sogenannter Mikroprojekte) Infrastruktur wie High Performance Computing oder Software nebst Support, Kontaktvermittlung zu Fachexperten oder Hilfestellung bei standardisierten Vorgehensweisen für die Datenpflege. Speziell KMU haben in diesen Bereichen oft Bedarf. „Das BMBF hat dies erkannt und fördert deshalb noch einmal den Ausbau der Infrastruktur, um insbesondere KMU eine niederschwellige Chance zu geben, von neusten und zukunftsweisenden Technologien und Forschungsergebnissen zu profitieren“, so Beigl. Seit 2014 ist das SDIL erfolgreich und hat bereits über 60 KI-Projekte auf industriellen Daten durchgeführt. Der Bedarf an skalierbar schnell verfügbarer Infrastruktur und Know-how im Bereich Maschinelles Lernen bei deutschen Unternehmen steigt stetig.

Um insbesondere die kleinen und mittleren Unternehmen bestmöglich unterstützen zu können, ist seit kurzem die Sicos BW GmbH als Experte für KMU-Beratung mit in das Projekt eingebunden. Das Team unterstützt die SDIL-Partner dabei, KMU-gerechte Angebote zu launchen, die eine gute Basis für Förderprojekte sowie auch den produktiven Einsatz bilden. Bereits seit 2014 betreut Sicos BW mit dem Smart Data Solution Center Baden-Württemberg (SDSC-BW) KMU rund um das Thema Smart-Data-Nutzung und bietet ihnen insbesondere eine Potentialanalyse für ihre Daten. „Wir freuen uns, die Erfahrung, die wir bislang eher landesorientiert gesammelt haben, nun auch bundesweit auf die Unterstützung kleiner und mittelständischer Unternehmen ausdehnen zu können“, sagt Dr. Andreas Wierse, Sicos BW-Geschäftsführer.

Alle Informationen zur Projektbeantragung am SDIL finden interessierte

Unternehmen unter [www.sdil.de/de/bewerben](http://www.sdil.de/de/bewerben). Bislang wurden vier Smart Data Innovation Challenge-Projektrunden durchgeführt, aus denen bis jetzt schon 24 vom BMBF geförderte Mikroprojekte hervorgingen. Der letzte Call ist vorerst im Dezember 2021, eine Weiterführung des Angebots darüber hinaus ist geplant. Im Dezember 2021 wird außerdem eine Informationsveranstaltung rund um die Cluster-Nutzung am KIT stattfinden. Nähere Informationen hierzu gibt es in Kürze auf der SDIL-Website.

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

## SIEMENS PLM

### Siemens kauft Nextflow Software

Siemens gab die Akquisition von Nextflow Software bekannt, einem unabhängigen Anbieter neuester Lösungen für partikelbasierte Strömungssimulationen (CFD). Nextflow Software wird Teil der Siemens Digital Industries Software, wo ihr Angebot das Software-Portfolio Simcenter™ erweitert, und als Teil des Siemens-Portfolios Xcelerator™ für Software und Services bringt Nextflow Software schnelle netzfreie CFD-Funktionen mit, die die Analyse komplexer transienter Applikationen beschleunigen. In den Industriezweigen Automobilbau, Luft- und Raumfahrt sowie Schifffahrt gehören dazu Anwendungen wie zum Beispiel die Beölung von Getrieben, Tank Sloshing (Bewegung der freien Flüssigkeitsflächen, die sich z.B. bei Schwappvorgängen bilden) oder die Sprühkühlung von Elektromotoren. „Unsere Kunden müssen anspruchsvolle Simulationen häufiger und zu einem früheren Zeitpunkt im Konstruktionsprozess durchführen können, und damit wächst die Nachfrage nach schnellen und automatisierten CFD-Simulationen für die Strömungsdynamik bei Gasen und Flüssigkeiten stark“, sagte Jean-Claude Ercolanelli, Senior Vice President, Simulation and Test Solutions, Siemens Digital Industries Software. „Die netzfreie Technologie hat sich zu einer führenden Lösung entwickelt: sie reduziert deutlich den Aufbau und die Lösungszeiten für

derartige Fragestellungen und liefert damit schneller kostengünstigere Ergebnisse zum Produktverhalten. Siemens Digital Industries Software ist bereits stark auf dem CFD-Markt positioniert und bietet sowohl CAD-zentrierte als auch High-Fidelity-Lösungen in den verschiedensten Bereichen der Mechanik- und Elektrokonstruktion. Mit der Integration der Smoothed-Particle Hydrodynamics-Technologie (SPH) von Nextflow Software in das Simcenter-Portfolio können Analysten ergänzend netzfreie und netzbasierte Lösungsansätze optimal nutzen und damit von den Stärken beider Softwarelösungen profitieren. Ebenso lassen sich neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnen, die bisher schwer zu lösen waren. „Wir freuen uns sehr, nun zu Siemens zu gehören und den Umfang der CFD-Simulationen für unsere Kunden erweitern zu können“, sagte Vincent Perrier, CEO Nextflow Software. „Heute gibt es keinen einzigen Validierungsansatz, der für alle Industrieanwendungen passt. Angesichts der zunehmenden Komplexität technischer Probleme und kürzerer Konstruktionszyklen müssen Analysten den bestmöglichen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungszeit finden. Die SPH-Lösungen von Nextflow Software ergänzen sich gut mit dem bestehenden CFD-Angebot aus dem Simcenter-Portfolio - gemeinsam meistern sie Herausforderungen wie Komplexität und lange Laufzeiten. Nextflow Software ist ein Startup-Unternehmen, das 2015 gegründet wurde und seinen Hauptsitz in Nantes, Frankreich, hat. Sein Hauptschwerpunkt liegt in der Entwicklung innovativer SPH-Lösungen als netzfreie CFD-Simulationsmethoden. Das Unternehmen hat entscheidend dazu beigetragen, SPH aus den akademischen Laboratorien in die Hände der Analysten in den verschiedensten Branchen zu übertragen, damit diese ihre komplexen transienten Probleme schneller simulieren und zu einem früheren Zeitpunkt

in den Produktentwicklungszyklus einfließen lassen können.

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

## TRANSVALOR

### Transvalor begrüßt Advance Engineering als neuen Geschäftspartner in Russland

Transvalor, führender Softwareentwickler für Umformprozesssimulation, ist stolz, die Vereinbarung mit seinem neuen Geschäftspartner Advance Engineering LLC, dem russischen Anbieter von Engineering-Lösungen, bekannt zu geben. Diese Zusammenarbeit ermöglicht Transvalor den Eintritt in den russischen Markt über einen renommierten Partner. Die Partnerschaft zielt darauf ab, zukünftigen Kunden in der Region erstklassige Simulationslösungen unter Berücksichtigung einer ganzheitlichen kundenorientierten Erfahrung zu bieten.

Advance Engineering LLC mit Sitz in Ekaterinburg ist ein russisches Ingenieurunternehmen, das sich auf innovative Technologieprojekte konzentriert, die vom Design bis zum Prototypen reichen, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt-, Nuklear- und Bodentransportindustrie. Auf Grundlage ihrer langjährigen Erfahrung und ihres Know-hows bietet Advance Engineering seinen Kunden komplette Lösungen, die ihren projektspezifischen Anforderungen entsprechen.

Transvalor wurde 1984 gegründet und ist ein führender Anbieter von Engineering-Lösungen, der eine Reihe von Hochleistungs-Simulationssoftware entwickelt hat, die das Ingenieuren bekannte Flaggschiff-Produkt Forge umfasst. Das französische Unternehmen adressiert mit seinen Lösungen ein breites Spektrum an Umformprozessen für metallische, feste und flüssige Materialien sowie Polymere, die mehr als 700 Kunden weltweit bedienen. „Wir freuen uns sehr auf die Zusammenarbeit mit Advance Engineering, da diese Partnerschaft das Geschäftswachstum in Russland

beschleunigen wird“, sagt Robert Brunck, Chairman und CEO von Transvalor. „Wir sind zuversichtlich, dass diese Zusammenarbeit eine erfolgreiche Reise sein wird, denn wir stellen sowohl den Kunden an erster Stelle als auch in den Mittelpunkt unseres Geschäfts.“

Dmitry Maltsev, CEO von Advance Engineering: „Wir freuen uns, unsere Partnerschaft mit Transvalor, dem führenden Entwickler von industrieller Prozesssimulationssoftware, beginnen zu können. Die Ergänzung unseres Simulationsportfolios mit Metallumformung, Gießen, Schweißen, Wärmebehandlung und vielen anderen wichtigen Lösungen wird es uns und unseren Kunden ermöglichen, noch umfassendere Engineering-Studien durchzuführen und qualitativ hochwertige Produkte effizienter auf den Markt zu bringen.“

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

## VIRTUAL VEHICLE

### Virtual Vehicle und Silicon Austria Labs starten strategische Forschungs Kooperation für Cyber-physische Systeme

Ob „Internet of Things“, „Industrie 4.0“ oder andere smarte und autonome Systeme: Grundlage für diese und viele andere Zukunftstechnologien sind sogenannte „Cyberphysische Systeme“ (CPS). Mit Virtual Vehicle und Silicon Austria Labs (SAL) bündeln nun zwei führende Forschungsinstitutionen Österreichs ihre Expertise, um kooperative und industriegetriebene angewandte Forschung in diesem Bereich zu beschleunigen. Die daraus resultierenden Innovationen elektronischer Komponenten und Systeme (ECS) soll die Entwicklung von Software und Simulations-Technologien für die Vision des virtuellen Fahrzeugs sowie die Hardware- und Software-Entwicklung von Cyber-physischen Systemen enger zusammenführen.

[www.v2c2.at](http://www.v2c2.at)

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

<b>Cascon</b>	verteilt	Online	<a href="http://www.simulation-conference-center.com">www.simulation-conference-center.com</a>	Cadferm
<b>Comsol Days</b>	verteilt	Online	<a href="http://www.comsol.com/comsol-days">www.comsol.com/comsol-days</a>	Comsol
<b>Permas Tech Meetings</b>	verteilt	Online	<a href="http://www.intes.de">www.intes.de</a>	Intes
<b>HxGN Live Design &amp; Engineering</b>	12.-14.10.	Online	<a href="http://www.hexagon.com">www.hexagon.com</a>	Hexagon
<b>Automotive CAE Grand Challenge</b>	19.-20.10.	Hanau/online	<a href="http://www.carhs.de">www.carhs.de</a>	Carhs
<b>OpenFOAM Conference</b>	19.-21.10	Berlin, D	<a href="http://www.esi-group.com">www.esi-group.com</a>	ESI Group
<b>Ansys Level Up 2.0 Conference3</b>	20.10.	Online	<a href="http://www.ansys.com">www.ansys.com</a>	Ansys



25.-29.10. Online - interaktiv [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress) NAFEMS

**International CAE Conference and Exhibition**  
17.-19.11. Online [www.caeconference.com](http://www.caeconference.com) EnginSoft

**NAFEMS Kurs: Festigkeitsnachweis FKM (7. Ausgabe, 2020)**  
23.-24.11. Online [www.nafems.org/fkm21-2](http://www.nafems.org/fkm21-2) NAFEMS

**NAFEMS Kurs: Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation**  
25.-26.11. Online [www.nafems.org/fem21-2](http://www.nafems.org/fem21-2) NAFEMS

**NAFEMS Kurs: Verification and Validation in Engineering Simulation**  
30.11.-02.12. Online [www.nafems.org/vandv21-3](http://www.nafems.org/vandv21-3) NAFEMS

**Multiphysics 2021**  
09.-10.12. Online [www.multiphysics.org/conference](http://www.multiphysics.org/conference) Int. Soc. of Multiphysics

**Fachkongress Composite Simulation**  
17.02.22 tba [www.composites-united.com](http://www.composites-united.com) Compositated United

4a Technology Days  
27.-29.06.2022 Schladming [www.technologietag.4a.at](http://www.technologietag.4a.at) 4a Engineering

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

# Herausforderung Digital Twin: Die digitale Durchgängigkeit erfolgreich gestalten!

Dr. Martin Strietzel, Dr. Lars Wagner (PROSTEP AG)

## 1 Einleitung

Digital Twins bieten die Möglichkeit, das Verhalten von physischen Assets – seien es Schiffe, Autos oder Fabrikanlagen – zu simulieren, sie im laufenden Betrieb zu überwachen und durch die Rückkopplung der Betriebsdaten kontinuierlich zu verbessern. Die Basis des Digitalen Twins ist dabei die exakte Beschreibung des jeweiligen Assets und die Möglichkeit, veränderte Einsatzbedingungen auf Basis von Simulationsmodellen in-time zu analysieren [1].

Der aus der Entwicklung bekannte virtuelle Prototyp bildet den Kontext, in dem die Betriebsdaten korrekt interpretiert werden können. Die Twin-gerechte Aufbereitung und Bereitstellung des virtuellen Prototyps ist deshalb eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Digital Twin-Anwendungen. Andererseits müssen auch die Betriebsdaten so bereitgestellt werden, dass sie einen sinnvollen logischen Bezug zu den Entwicklungsdaten haben. Weitere Informationsdimensionen entstehen in der Fertigung und sind in Manufacturing Execution Systemen (MES) und Enterprise Resource Planning (ERP) Systemen abgebildet.

Im Sinne des Produktlebenszyklusmanagements (PLM) müssen also Entwicklungs-, Produktions- und Betriebsinformationen im Digitalen Twin zusammenfließen und für wissensbasierte Entscheidungsprozesse bereitstehen. Die sinnvolle Verbindung dieser Informationsebenen wird als Digitale Durchgängigkeit bzw. Digital Thread bezeichnet. Die Gestaltung des Digital Threads ist somit eine sehr herausfordernde Aufgabe, verbindet sie doch Informationen aus traditionell getrennten Datenquellen mit eigenen Strukturen. Allein die Identifikation der benötigten Daten und der dazugehörigen Datenquellen ist bereits langwierig und kompliziert.

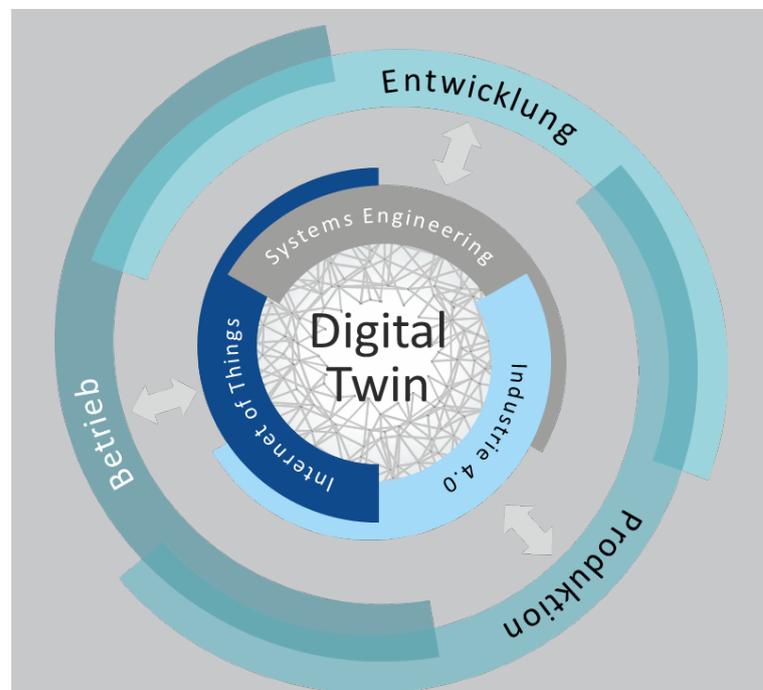


Abb. 1: Der Digitale Twin als zentrales Informationsmodell im Produktlebenszyklus

Der Beitrag beschreibt einen auf den Konzepten des Enterprise Architecture Management basierenden Ansatz zur erfolgreichen Gestaltung der Digitalen Durchgängigkeit auf Basis föderativer PLM-Infrastrukturen mit standardisierten Schnittstellen und offenen Datenformaten.

## 2 Fähigkeitsbasierte Architektur Entwicklung

Der Digital Twin lebt von und in einer komplexen IT-Landschaft, aus der heraus er Daten bezieht, analysiert, darstellt und geeignet weiterreicht. Diese Informationslogistik gilt es, u.a. mit dem Ziel einer Digitalen Durchgängigkeit sinnvoll zu organisieren. Hierzu bilden die Prinzipien des Enterprise Architecture Managements (EAM) eine gute Basis. EAM ermöglicht es, einen strukturierten, von den notwendigen Fähigkeiten des Unternehmens ausgehenden Blick auf die Organisation, die Anwendungen und die Datenströme zu werfen und kurzfristige Notwendigkeiten so umzusetzen, dass sie in eine langfristige Architektur- und Unternehmensstrategie passen. Gerade für die Beherrschung des Digitalen Twins hat sich ein solcher, auf den Fähigkeiten basierender Ansatz bewährt, um kurzfristigen Erfolg und mittelfristige Investitionssicherheit miteinander in Einklang zu bringen. Das Grundmotiv ist es dabei, die einzelnen Entscheidungen auf jeder Ebene miteinander in Bezug zu setzen und aus den unternehmerischen Notwendigkeiten der Firma zu begründen.

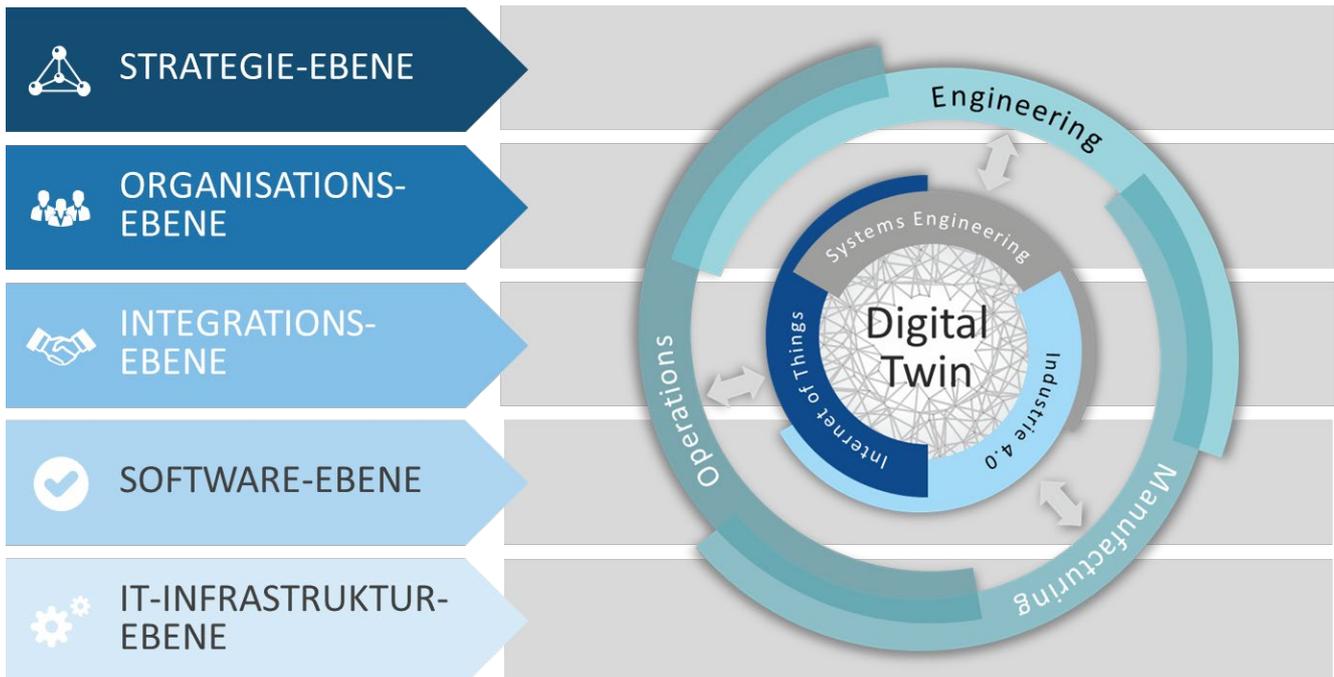


Abb. 2: Die zentralen Gestaltungsebenen des Digitalen Zwillings in der Enterprise Architektur [2]

Hierzu ist es im ersten Schritt wichtig, die Objekte der einzelnen Ebenen zu erfassen und sinnvoll zu strukturieren. Als strukturierendes Element hat sich die Idee von Fähigkeiten etabliert, die ein Unternehmen auf den jeweiligen Schichten benötigt. Auf der obersten Ebene, der Strategie-Ebene sprechen wir von Unternehmensfähigkeiten, die sich typischer Weise auch in den Funktionsbereichen jedes Unternehmens wiederfinden. Diese Bereiche haben jeweils Anforderungen an den Digitalen Zwillings, die insbesondere durch die Architektur der Organisations-, Integrations-, und Software-Ebene adressiert werden müssen.

Diese Ebenen lassen sich ebenfalls am besten über einen fähigkeitsbasierten Ansatz strukturieren. Die PROSTEP AG hat hierzu ein PLM Fähigkeiten Modell entworfen, welches den gesamten Raum der Möglichkeiten aufspannt. Die Anforderungen aus der Strategie-Ebene werden hierauf projiziert und führen zu einer Fähigkeiten Heatmap, die zur Priorisierung des weiteren Vorgehens genutzt wird.

Parallel zur Arbeit mit diesen Fähigkeiten erstellt man ein Bild der aktuellen Prozesse und der dazugehörigen IT-Bebauung. Durch die Zuordnung der Prozesse und IT-Bausteine zu den PLM-Fähigkeiten und deren Priorisierung auf Basis der Strategieebene ergibt sich eine direkte Verbindung von den Unternehmensaufgaben zur Prozess- und IT-Landkarte. Kostenintensive Entscheidungen zur Gestaltung des Digitalen Zwillings können somit direkt aus den unternehmerischen Zielen heraus begründet werden.

### 3 Überblick Digital Twin

Unter Digital Twin versteht man das digitale und aktuelle Abbild eines physischen Dings, das ein Produkt, ein System oder ein Prozess sein kann. Er stellt das Bindeglied zwischen digitalen Entwicklungs- oder Planungsmodellen und der physischen Welt dar. Wie vollständig der Digital Twin die Realität abbilden muss, hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Es gibt je nach Lebenszyklusphase viele Ausprägungen. Grundsätzlich lassen sich jedoch drei verschiedene Typen unterscheiden:

- Der **Digital Product Twin** ist ein virtuelles Abbild aller Produktinstanzen, mit dem Informationen aus dem Betrieb in die Produktentwicklung zurückgeführt werden, um Rückschlüsse aus dem Betriebsverhalten zu ziehen, das Produkt zu verbessern oder Auswirkungen von Produktänderungen auf reale Instanzen zu bewerten.
- Der **Digital Production Twin** ist ein virtuelles Abbild des Produktionsprozesses, das die Planung, Steuerung und Optimierung der Prozesse und Anlagen unterstützt und die autonome Fertigung im Kontext von Industrie 4.0 ermöglicht.
- Der **Digital Instance Twin** ist ein virtuelles Abbild einer in Betrieb befindlichen Produktinstanz bzw. eines real existierenden und betriebenen Systems zur Unterstützung von Services wie Instandhaltung, Predictive Maintenance, Updates oder Retrofit-Maßnahmen.

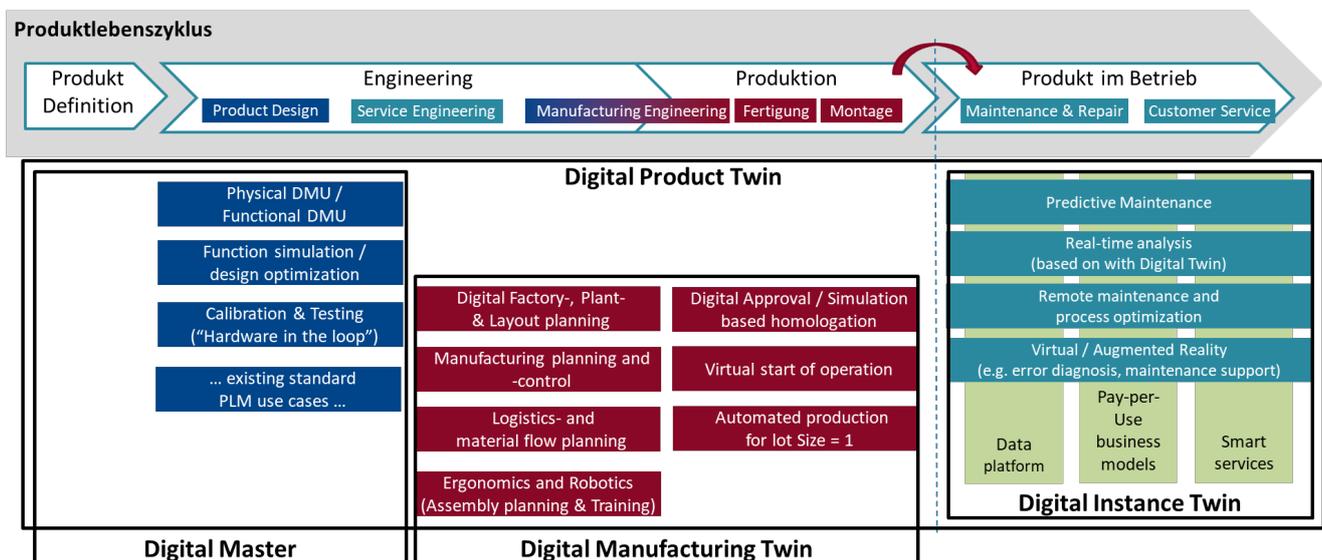


Abb. 3: Anwendungsfälle des Digital Twin [1]

Unter dem Begriff Digital Master werden meist typische Anwendungsfälle auf Basis der Planungs- und Entwicklungsmodelle zusammengefasst, bevor ein Produkt als Instanz realisiert wurde. Heute werden hierunter Digital Mockup und Simulationsverfahren verstanden, die den Entwicklungsingenieuren die Bewertung des potenziellen Produkts vor dem ersten, realen Prototyp ermöglichen. Auch die Abstimmung des geforderten Verhaltens ist Teil dieser ersten Anwendungsfälle. Damit bildet der Digital Master die Basis des Digital Product Twins.

In der Bau- bzw. Fertigungsphase des Produkts werden Fragestellungen zum Fertigungs- und Produktionsprozess relevanter. Mittels digitaler Modelle (Ablauf- oder Ergonomie-Simulationen) und realen Datensammlungen über Zustandsinformationen oder aus Messsystemen werden Antworten gesucht und mögliche Abweichungen des Prozesses gegenüber dem geplanten Prozess bewertet. Dadurch wird Planung und Produktion in die Lage versetzt, Problemfälle und Störungen vorauszusehen, sowie Strategien zur schnellen und effektiven Behebung dieser Störungen zu entwickeln. Ziel ist dabei eine möglichst reibungslose und wirtschaftliche Umsetzung der digitalen Produktbeschreibung in eine oder mehrere reale Produktinstanzen.

Nach Inbetriebnahme der Produktinstanz wird entweder das physische Produkt durch Service- oder andere Dienstleistungen im Digitalen ergänzt, wie z.B. die Buchungs- und Auslastungsoptimierung von Fahrzeugflotten, oder aber die Zuverlässigkeit und Wertigkeit des Produkts durch digital unterstützte Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen, wie Condition-based oder sogar Predictive Maintenance, erhöht. In diesen Anwendungsfällen ist die Nachverfolgbarkeit von Änderungen an der Produktinstanz über den gesamten Produktlebenszyklus von entscheidender Relevanz; z.B. ist die Gültigkeit und Auswirkungen von Software-Updates im laufenden Betrieb genauestens zu prüfen, um Fehler durch inkompatible Software-Hardware-Kombinationen zu vermeiden.

### 3.1 Bedeutung der Simulation

Die funktionalen Zusammenhänge eines Produkts oder einer Produktionsanlage werden ausgehend von den Kundenanforderungen und unter Berücksichtigung einer Vielzahl an gesetzlichen Vorgaben in der Produktplanung und -entwicklung festgelegt. Dies wird in Planungs- und Entwicklungsmodellen des Digital Masters beschrieben. Diese Modelle sind der digitale Wertanteil eines Produkts und werden daher auch Digital Asset genannt. Das Digital Asset ermöglicht mittels Simulation der funktionalen Zusammenhänge und des Systemverhaltens, das Produkt in definierten Einsatzszenarien schon vor der Realisierung zu bewerten. Doch auch im Betrieb bilden die Simulationsmodelle die Basis, um das Betriebsverhalten des realen Assets (real existierendes System bzw. Produktinstanz) in seinem späteren Produktleben zu erfassen und korrekt zu interpretieren.

Wenn man nicht weiß, wie eine Maschine oder Anlage eigentlich funktionieren soll, kann man die Ursachen von Abweichungen von diesem Sollzustand bzw. -verhalten nicht zweifelsfrei identifizieren und entsprechende Gegenmaßnahmen treffen - sei es eine vorbeugende Wartungsmaßnahme oder eine Optimierung der betroffenen Komponenten im Sinne des Closed Loop Engineerings.

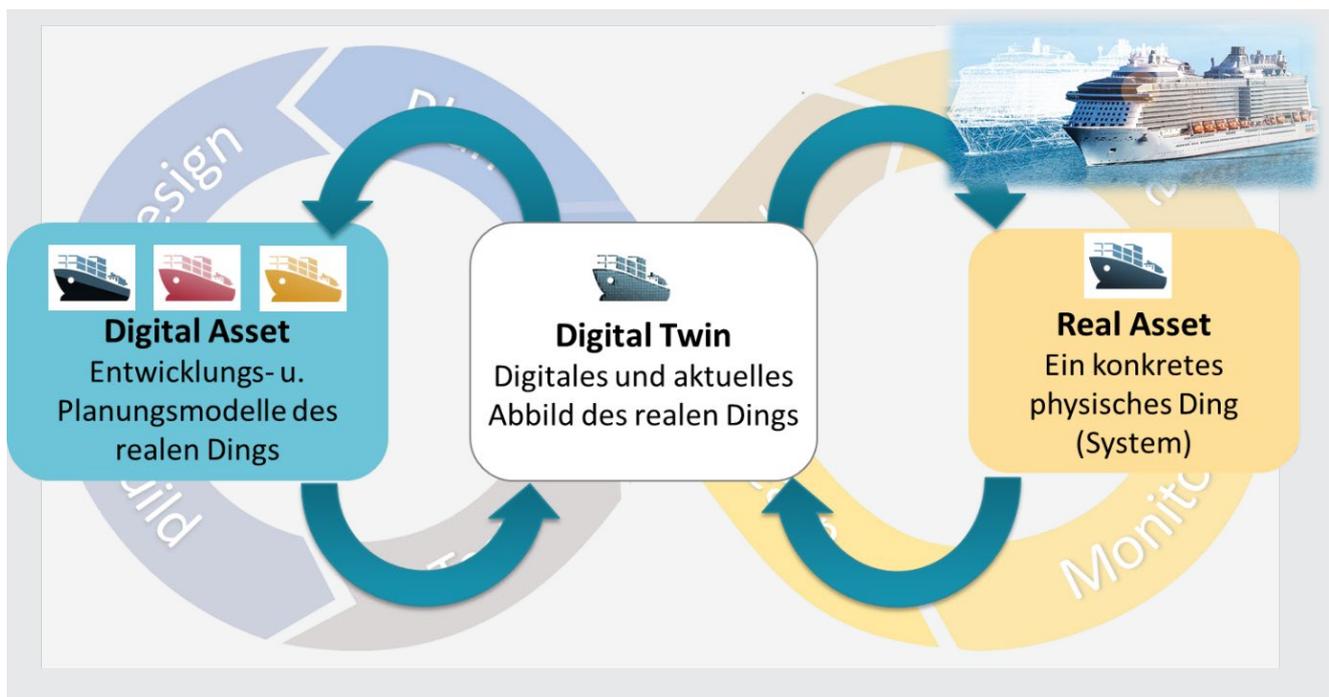


Abb. 4: Zusammenwirken des digitalen Modells und des realen Produkts

Durch die Erfassung und Auswertung der Signale eines Sensors am realen Asset, der z.B. die Vibrationen an einer Achse misst, lässt sich natürlich auch ohne Kenntnis der Entwicklungsgeschichte die Abnutzung eines Lagers vorhersagen und eine Wartungsmaßnahme einleiten. Interessant wäre aber zu wissen, warum das Lager ausfällt, ob es für die Belastung zu schwach ausgelegt wurde und warum, welche anderen Maschinen von dem Problem betroffen sein könnten oder ob es vielleicht eine Häufung von Ausfällen bei Komponenten eines

bestimmten Zulieferers gibt. Solche Zusammenhänge lassen sich durch eine eindeutige Rückverfolgbarkeit von der Produktinstanz zu den relevanten digitalen Planungs- und Entwicklungsmodellen des digitalen Assets erkennen, ohne sie anhand von meist noch papierbasierten Unterlagen aufwendig rekonstruieren zu müssen. Diese direkte Verbindung von Produktinstanz (Real Asset) zu den Entwicklungs- und Planungsmodellen, die die Entstehungsgeschichte des realen Assets beschreiben, wird als Digital Thread bezeichnet. Im Deutschen wird Digital Thread auch mit digitaler Durchgängigkeit im Sinne der Produktinformationen übersetzt.

#### 4 Ohne Produktstrukturmodell keine digitale Durchgängigkeit

Die digitale Durchgängigkeit ist die Grundlage für die Umsetzung eines Digital Twin-Konzepts. Gemeint ist damit die Fähigkeit, alle für den Digital Twin erforderlichen digitalen Produktdaten zusammenzuführen und gegebenenfalls mit den Betriebsdaten aus dem realen Produktleben zu verknüpfen. Fundament der digitalen Durchgängigkeit sind konsistente und durchgängige Datenstrukturen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg und ein darauf aufbauendes Konfigurationsmanagement. Im Prinzip stellt der Digitale Twin eine zeitpunktbezogene Sicht auf die reale Produktinstanz dar, nämlich die der zum aktuellen Zeitpunkt bestehenden Konfiguration.

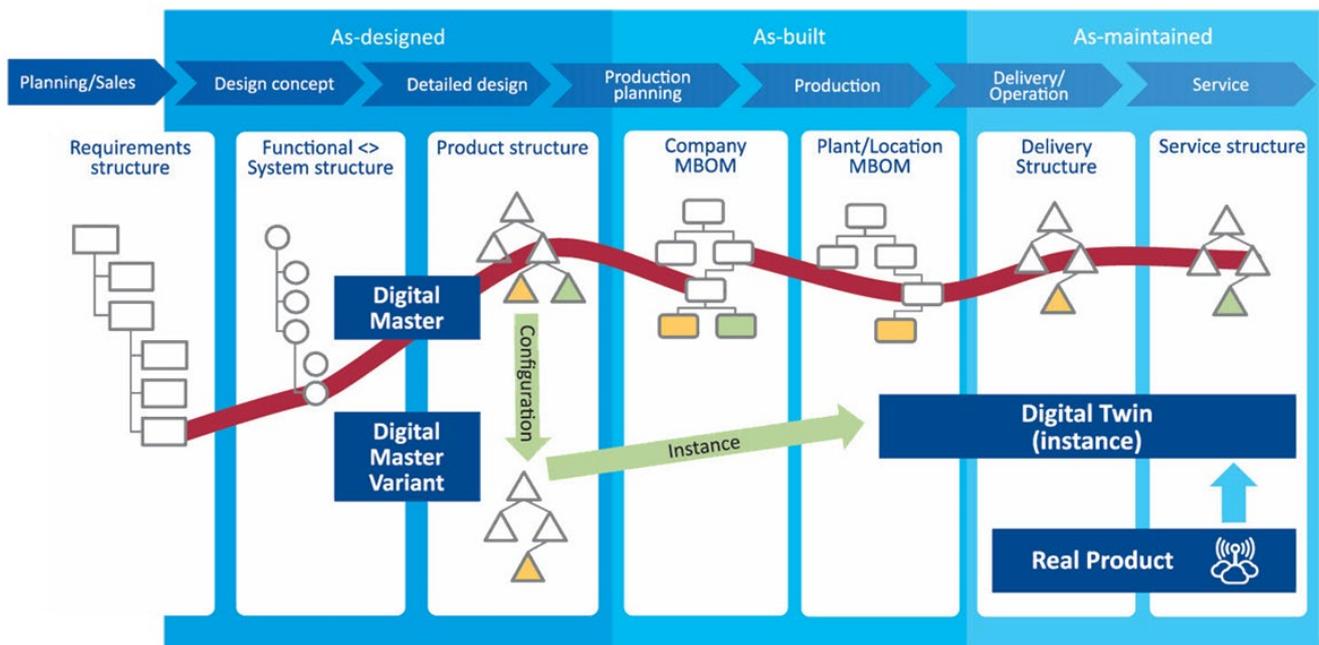


Abb. 5: Konzeptbild der digitalen Durchgängigkeit entlang des Produktlebenszyklus

Bei der Sicherstellung der digitalen Durchgängigkeit stehen die Unternehmen vor der Herausforderung, dass sich die Produktdaten der einzelnen Disziplinen über eine Vielzahl von Datensilos (TDM-, PDM-, ALM-, ERP-Systeme usw.) verteilen und in unterschiedlichen Strukturen verwaltet werden. Schon die Entwicklungs- und Fertigungsstücklisten für die mechanischen Komponenten sind von ihrer Struktur her nicht identisch und in vielen Fällen sogar voneinander entkoppelt, so dass sie synchron gehalten werden müssen. Im Sinne der digitalen Durchgängigkeit müssen diese unterschiedlichen Sichten ohne Medienbrüche ineinander überführt werden können. Der Schlüssel dazu ist das Produktstrukturmodell [3].

Ausgangspunkt für das Produktstrukturmodell ist die Erstellung eines systemneutralen Informationsmodells, das die relevanten Informationsobjekte, deren Verbindungen und Informationsflüsse abbildet. Aus dem Informationsmodell lässt sich dann ein konzeptionelles Datenmodell ableiten, das unter Berücksichtigung der PLM-Bebauung in ein logisches Datenmodell überführt wird und das zugleich als Orientierung für die künftige Digital Twin-Architektur dient.

## 4.1 Configuration Lifecycle Management

Smart vernetzte Produkte und Produktionssysteme produzieren eine wachsende Flut an digitalen Daten, nicht nur in der Entwicklung und in der Fertigung, sondern auch im Betrieb. Wie diese Daten in Beziehung zueinanderstehen, lässt sich in einem disziplinenübergreifenden Produktmodell abbilden. Es reicht aber nicht aus, die verschiedenen Sichten auf das digitale Produktmodell im Laufe des Lebenszyklus zu erzeugen, konsistent zu halten und ihre zeitliche Gültigkeit zu dokumentieren. Erst die Kombination mit einem leistungsfähigen Configuration Lifecycle Management (CLM) macht die Datenflut durch ein system- und disziplinenübergreifendes Baseline beherrschbar.

Ohne CLM sind die Unternehmen nicht in der Lage, zu jedem Zeitpunkt im Prozess sofort und zuverlässig die Frage zu beantworten, welcher Informationsstand für den jeweiligen Anwendungsfall verbindlich ist und damit den digitalen Zwilling repräsentiert. CLM stellt die erforderlichen Werkzeuge bereit, die Produktdaten zu durchsuchen, zu sortieren, zu filtern und miteinander zu kombinieren.

Voraussetzung für ein disziplinenübergreifendes CLM ist die Zusammenführung der Informationen aus den benutzten Autorensystemen unter Nutzung vorhandener Integrationen und moderner Techniken der Datenverlinkung. Der Anwender wählt zum Zugriff auf die ihn interessierenden Aspekte des Produktmodells ein oder mehrere Kriterien wie Auftrag, Meilenstein, Baustufe oder ausgelieferte Produktinstanz aus und bekommt die angeforderten Informationen für die jeweilige *Baseline* bereitgestellt, seien es die Simulationsergebnisse oder die Übersicht der lieferbaren Ersatzteile. Die für die *Baseline* definierten Ergebnisse lassen sich direkt mit den Informationen in den Datenquellen verknüpfen, so dass sie mit den gewünschten Merkmalen wie Reifegrad, Datum der letzten Änderung und auch mit anderen Projektergebnissen verglichen werden können.

Die Pflege der Konfigurationsparameter ist eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Nutzung von CLM. Die dafür benötigten Konfigurationsdaten müssen für den kompletten Lebenszyklus des digitalen Zwillings firmenweit und für die einzelnen Teilprozesse wie Einkauf, Produktion oder Service abgestimmt und in den verlinkten Datenquellen verfügbar gemacht werden.

Eine weitere Herausforderung beim CLM ist die Beherrschung der Komplexität, die sich aus der Anzahl und Vielfalt der Parameter, ihrer logischen Verknüpfung und der Anzahl der daraus resultierenden Varianten ergibt. Hinzu kommt, dass die Parameter validiert und über den Lebenszyklus gepflegt werden müssen.

Wie lassen sich diese Herausforderungen bewältigen? Die Beherrschung komplexer, variantenreicher Produkte erfordert zunächst eine genaue Analyse der Variabilität und der Frage, wie sie sich messen und managen lässt. Das ist eine Beratungsaufgabe, für die ein ganzer Methodenwerkzeugkasten zur Verfügung steht. In Ergänzung dazu ist Software für die Auswertung der Konfigurationsdaten erforderlich. Diese muss in der Lage sein:

- Extrem große und variable Datenmengen mit Hilfe mathematischer Verfahren zu analysieren;
- Abhängigkeiten zwischen Varianten, Optionen und Konfigurationen grafisch zu visualisieren;
- Inkonsistenzen, Lücken und Redundanzen in der Konfiguration zu identifizieren und zu beheben;
- Produktmodelle aus verschiedenen Disziplinen wie Engineering, Vertrieb oder Service zu verknüpfen;
- Produktkonfigurationen zu optimieren bzw. die Konfiguration mit minimalen Kosten, Entwicklungszeiten oder Testaufwand zu finden.

In Verbindung mit dem Produktmodell sind diese Methoden und Werkzeuge eine wesentliche Hilfestellung für den Aufbau eines konsistenten Configuration Lifecycle Managements, mit dem Entscheidungen schneller und auf einer abgestimmten und verbindlichen Basis getroffen werden können.

## 5 Die Rolle der Cloud

In den letzten Jahren hat sich die Cloud zum Maschinenraum für das Internet of Things (IoT) und viele professionelle Internetdienste entwickelt. Auch für die Digitalisierungs-Strategien der Fertigungsindustrie spielt das Thema Cloud eine entscheidende Rolle!

Somit kann man auch über das Thema Digital Twin nicht sprechen, ohne die Rolle der Cloud näher zu beleuchten. So wie die Ausprägung des Digital Twins vom jeweiligen Anwendungsfall abhängt, variiert auch die Bedeutung, die die Cloud für den Aufbau und Betrieb einer Digital Twin-Anwendung hat.

Während für den Digital Product Twin als individuellen virtuellen Prototyp in der Produktentwicklung eine on-premise Cloudlösung die richtige Wahl sein kann, erfordern Tausende von weltweit installierten Windanlagen

oder Hunderttausende von autonom fahrenden Fahrzeugen eine cloudbasierte IoT-Infrastruktur mit einer hoher Verfügbarkeit, Leistungsfähigkeit, Skalierbarkeit und Flexibilität.

Da der Digital Twin von der Verfügbarkeit von Daten aus den verschiedensten Plattformen und Systemen lebt, stellt sich die Frage, wie diese Systeme im Rahmen eines möglicherweise cloudbasierten Betriebsmodells miteinander kommunizieren und Daten austauschen können. Die digitale Durchgängigkeit wird dabei entscheidend von den gewählten Cloudkonzepten abhängen. Eine cloudbasierte IoT-Plattform alleine reicht für die Cloud-Strategie des Digital Zwillings aber nicht aus!

Zentrale Daten liegen, wie bereits erörtert, in den PLM-Plattformen, in denen der Digitale Master Gestalt annimmt. Sie sind in den meisten Unternehmen noch on-premise installiert. Bereits heute ziehen erste Fertigungsunternehmen aber mit Ihren PLM-Prozessen in multi-tenant Systeme in die public Cloud! Die PLM-Hersteller haben besonders im Neukundengeschäft ein großes Interesse daran, cloudbasierte Anwendungen zu positionieren. Die Angebote sind allerdings im Detail sehr unterschiedlich. Das Spektrum reicht von standardisierten SaaS-Modellen (Software as a Service) aus einer öffentlichen Cloud, bis zu kundenspezifischen PLM-Anwendungen, die in einer cloudbasierten Infrastruktur (IaaS) gehostet und gegebenenfalls durch die Softwareanbieter gemanagt werden. Für potenzielle Nutzer ist es nicht immer leicht zu beurteilen, welches Cloud-Modell ihren Anforderungen unter funktionalen, Datensicherheits- und Kostenaspekten am meisten entgegenkommt.

Aber auch die klassischen IT-Themen der Integration und des Datenaustauschs sind für den Digitalen Twin essenziell und werden durch die Cloud nicht hinfällig. Im Gegenteil erfordert ihre Beherrschung gerade in einer föderativen Infrastruktur mit Cloudkomponenten ein ganz spezielles Integrations-Know-how. Jede Digital Twin Infrastruktur erfordert ein gutes Konzept, wie der Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Subsystemen organisiert werden kann. Das ist schon im eigenen Rechenzentrum eine Herausforderung, die eine hohe technische Kompetenz im IT-Team voraussetzt. Wenn das ERP-System in der SAP-Cloud, das Office-Portfolio bei Microsoft Azure und das PDM-System vom präferierten PLM-Anbieter betreut wird, erhöht sich die Komplexität dadurch, dass mehrere Clouds miteinander verbunden werden müssen. Je nach Art der Cloudanwendung sind dabei unterschiedliche Kommunikations- und Integrationsstrategien erforderlich.

Gerade Unternehmen mit bestehenden PLM-Anwendungen müssen aus diesen Gründen sehr genau analysieren, inwieweit sie das in ihren Produktdaten und -prozessen steckende Know-how in der Cloud abbilden können und unter welchen Bedingungen sich die Migration ihrer on-premise Lösungen lohnt. Eines ist dabei sicher: Ihre Cloud-Strategie muss gut geplant sein und sollte die Digitale Durchgängigkeit bereits als Kernelement berücksichtigen!

## 6 Zusammenfassung

Der Digital Twin lebt von den Daten die er über den gesamten Produktlebenszyklus verteilt aus verschiedenen IT-Systemen zusammenstellt und in den durch den jeweiligen Anwendungsfall definierten Rahmen zusammenfasst und präsentiert. Die Komplexität der IT-Infrastrukturen macht es notwendig, die verschiedenen Komponenten, Datenquellen, Systeme und Anwendungen in einem Architekturmodell abzubilden. Auf Basis dieses Modells lässt sich dann der jeweilige Digitale Twin aus den spezifizierten Fähigkeiten heraus erstellen. Um eine möglichst hohe Flexibilität bei den Anwendungsfällen zu erreichen und um hierfür alle im Kontext stehende Daten möglichst einfach und durchgängig zur Verfügung zu stellen, ist ein durchgängiges Datenmodell notwendig, welches im Kontext der Produktdaten als Produktdatenmodell alle Informationen entlang des Produktlebenszyklus zur Verfügung stellt.

## 7 Literatur

- [1] Wagner L.: „Kein Digital Twin ohne digitale Durchgängigkeit“ Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, ZWF 115, Carl Hanser Verlag 2020
- [2] Sensler C., Grimm T.: „Business Enterprise Architecture“, entwickler.press, 2015
- [3] Eigner M., Roubanov D., Zafirov R. : „Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung“, Springer Vieweg, 2014
- [4] Stark, Damerou (2019): „Digital Twin“, in: Laperrire L., Reinhardt G. CIRP encyclopedia of production engineering. Springer Publishing Company;

# Integration der MRF-Modellierung in das CFD-Simulationsmodell eines Formelfahrzeugs

Jonas Pangerl, Niklas Kaiser und Rainer Stauch

Hochschule Esslingen

Im Rahmen des Formula Student Projekts wird die Außenaerodynamik eines Formelfahrzeugs simulativ untersucht. Dabei ist eine detaillierte und realitätsgetreue Abbildung aller strömungsbeeinflussenden Geometrien erforderlich.

In dieser Arbeit wird die Integration der MRF-Modellierung (MRF = Moving Reference Frame) in das Simulationsmodell erarbeitet und untersucht. Dabei wird das Augenmerk auf die Modellierung der Raddrehung und auf die Modellierung der Kurvenfahrt gelegt. Für die Abbildung der Raddrehung wird eine rotierende Region im Bereich der Felgen verwendet. Auf diese Weise werden die Auswirkungen der Verdrängungseffekte auf Radnachlauf und Felgendurchströmung ersichtlich. Der Einfluss der Modellierung auf den Luftmassenstrom durch die Felge wird untersucht.

Die Verwendung der MRF-Modellierung ermöglicht außerdem die simulative Untersuchung einer Kurvenfahrt mit konstantem Radius und konstanter Kurvengeschwindigkeit. Dabei wird dem Windkanal eine virtuelle Drehung mittels der MRF-Modellierung aufgeprägt. Die Kurvenfahrtsimulation lässt sich nicht wie die Gerad- und Schräganströmung experimentell im Windkanal abbilden, und auch die Datenerfassung und Validierung auf der Strecke gestaltet sich schwieriger als bei der Geradeausfahrt. Dennoch wird der implementierte Modellierungsansatz validiert.

Die Strömungssimulation bietet in diesem Bereich die einzige Möglichkeit, die Strömungsverhältnisse in der Kurve genau analysieren zu können und stellt ein sehr wichtiges Werkzeug bei der Entwicklung von Formelfahrzeugen dar. Anhand der Ergebnisse der CFD-Simulationen werden Widerstands- und Auftriebsbeiwerte der einzelnen Fahrzeugteile sowie des gesamten Fahrzeugs analysiert.

## 1. Problemstellung

Für die Entwicklung der Aerodynamik eines Rennfahrzeugs werden, nach aktuellem Stand der Technik, hauptsächlich die CFD-Simulation und Windkanalversuche herangezogen. Die CFD-Simulation ermöglicht dabei die schnelle und genaue Vorhersage von Geometrieinflüssen auf die Umströmung des Fahrzeugs in einem definierten Betriebspunkt und der damit einhergehenden Luftwiderstands- und Abtriebskräfte.

Der Rennstall Esslingen, das Formula Student Team der Hochschule Esslingen, nimmt seit Jahren an der Formula Student, einem internationalen Konstruktionswettbewerb für Studenten, teil. Mit der Belegung des jeweils ersten Platzes im Engineering Design, einer der statischen Disziplinen, in dem das technische Wissen und der Entwicklungsprozess des Fahrzeugs bewertet wird, in den letzten vier Rennveranstaltungen konnte der Rennstall Esslingen einen beachtlichen Erfolg erzielen. Die Entwicklung der Aerodynamik des Fahrzeugs stellt dabei einen signifikanten Teil des Engineering Designs dar. Im Rahmen der Fahrzeug-Entwicklung werden CFD-Simulationen eingesetzt, um die Aerodynamik und somit die Konkurrenzfähigkeit des Formel-Fahrzeugs zu verbessern.

Ziel der Arbeit ist es, CFD-Simulationen so einzusetzen, dass möglichst alle, in der Realität auftretenden Fahrzustände, wie Radrotation und Kurvenfahrt, abgebildet und untersucht werden können. Dazu ist es erforderlich, die Randbedingungen zu kennen und diese möglichst genau vorzugeben. In der Industrie werden verschiedene Modellierungsansätze für die Abbildung der Rad- und Felgenrotation verwendet. Die rotierenden Teile müssen dazu mit einem Ansatz modelliert werden, der es erlaubt, die Randbedingungen einer transienten Raddrehung in einer stationären Simulation abzubilden, um die daraus resultierenden Verdrängungseffekte genau zu erfassen.

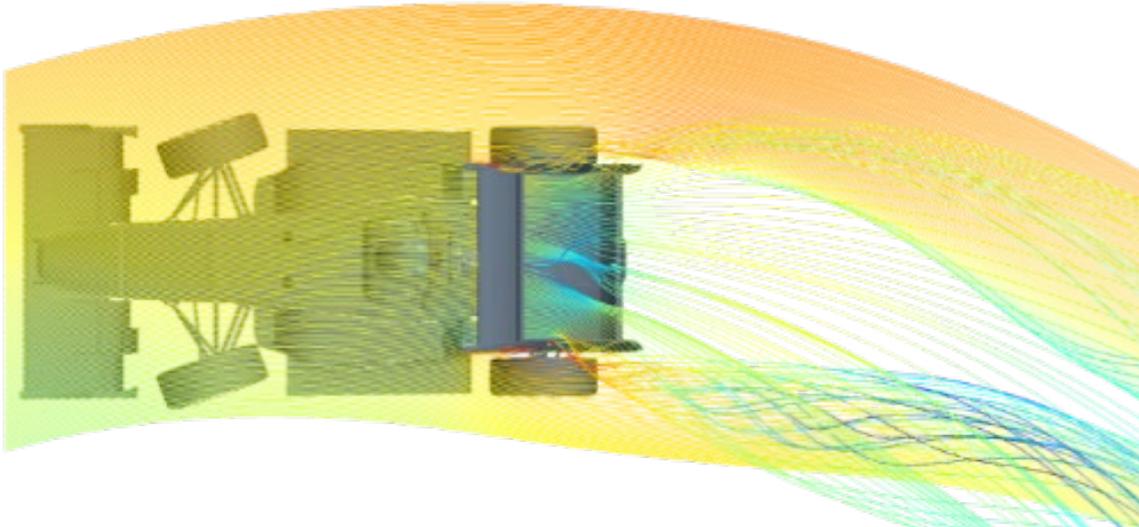


Abb. 1: Darstellung der Umströmung eines (Formel-) Fahrzeugs in einer Kurve anhand von Stromlinien. Ansicht von oben.

Einer der zu simulierenden Fahrzustände ist die Kurvenfahrt. Entgegen der Simulation einer Geradeausfahrt oder einer Anströmung mit Seitenwind (Schräganströmung) kann die Kurvenfahrt nicht mit den gängigen Methoden der Geradeausfahrt modelliert werden. Für die Geradeausfahrt wird in der Regel ein rechteckiger Windkanal verwendet. An der Vorderseite wird die Randbedingung so gewählt, dass Luft mit definierter Geschwindigkeit einströmt, und an der Hinterseite wird eine Ausströmung durch eine Druckrandbedingung ermöglicht. Das Bezugssystem in der Simulation und das Bezugssystem in der Realität werden somit gegensätzlich gewählt. In der Realität bewegt sich das Fahrzeug in die stehende Luft und über den stehenden Boden, wohingegen das Fahrzeug in der Simulation steht und sich Luft und Boden bewegen. Beschäftigt man sich mit der Theorie der Kurvenfahrt, fällt schnell auf, dass die Modellierung derselben mit den gängigen Methoden der Geradeausfahrt nicht möglich ist. Relativ zum Fahrzeug bewegt sich die Luft auf einer Bahn um den (momentanen) Kurvenmittelpunkt und überströmt das Fahrzeug dabei unter sich ändernden Winkeln (relativ zum Fahrzeug) und mit einer positionsabhängigen Geschwindigkeit (siehe Abbildung 1). Dies kann nicht einfach durch einen gekrümmten Windkanal, in dem die Strömung auf eine gekrümmte Bahn gezwungen wird, abgebildet werden. Entsprechend einer typischen Rohrströmung wird sich ein radiales Druckgefälle aufbauen, das in der Realität bei der Kurvenfahrt nicht auftritt und somit zu verfälschten Ergebnissen führt. Eine direkte Übertragung der Verhältnisse bei der Kurvenfahrt in den (gekrümmten) Windkanal ist somit nicht möglich.

## 2. Ansatz

Für die Entwicklung werden anstatt transienter Simulationen, die einen hohen Rechenaufwand erfordern, stationäre Simulationen verwendet. Zur Abbildung der turbulenten Strömung wird der RANS-Ansatz (RANS = Reynolds Averaged Navier Stokes) verwendet. Die sich damit ergebenden, gemittelten Strömungsgrößen ermöglichen eine (qualitative) Vorhersage der realen Umströmung [1] [2].

### 2.1 Raddrehung

Aufgrund des offenen Rad-Design bzw. das Nicht-Vorhandensein von Radkästen ist die korrekte Modellierung der aerodynamischen Umströmung der Räder von Formel-Fahrzeugen von größerer Bedeutung als für Serienfahrzeuge mit geschlossenen Radkästen. Speziell bei der Kurvenfahrt spielt auch die Durchströmung der Radfelgen eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Aus diesem Grund soll die Felgendurchströmung durch Einsatz der MRF-Modellierung verbessert werden.

Für die Modellierung der Raddrehung wird auf den Ansatz eines Moving Reference Frames (MRF) zurückgegriffen. Im Simulationsgebiet wird ein Bereich, in dem die rotierende Geometrie liegt, definiert (siehe Abbildung 2). In diesem Bereich kann eine, sich rotatorisch bewegende Geometrie abgebildet werden. Der Bereich wird über zwei Interfaces an beiden Seiten mit dem restlichen Simulationsgebiet verknüpft, so dass ein ungehinderter Stoff- und Impulsaustausch stattfinden kann. Da der rotierende Reifen nicht in dem rotierenden

Gebiet liegt, um radiale Ein- und Ausströmung zu verhindern, die auf numerischer Ebene nicht zu tolerieren wären, muss dieser mit einem anderen Ansatz behandelt werden. Der Reifen weist keine Verdrängungseffekte auf, da er über kein Profil verfügt. Aus diesem Grund lässt sich eine tangentielle Geschwindigkeit aufprägen, die sich aus der Raddrehzahl und dem Abstand zur Rotationsachse ergibt.

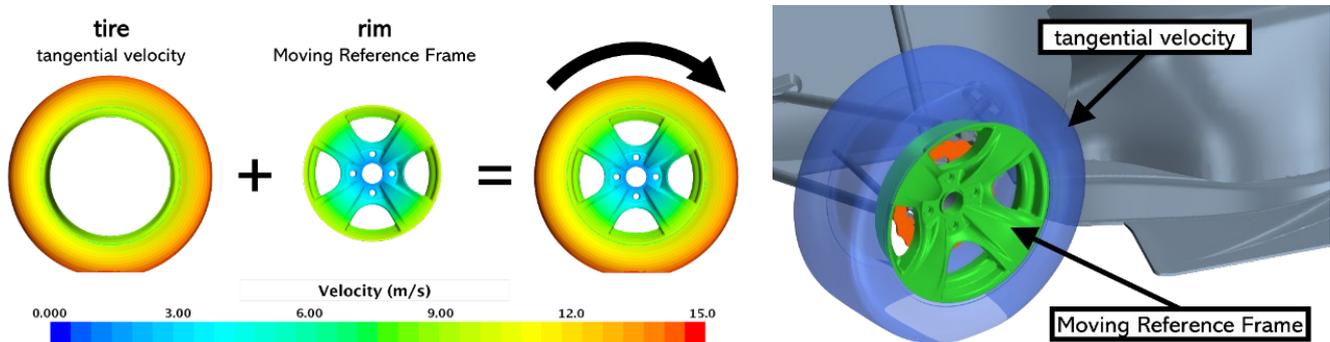


Abb. 2: Illustration des MRF-Ansatzes für die Modellierung der Raddrehung

Der verbesserte Modellierungsansatz der Raddrehung ermöglicht zukünftig die Analyse des Einflusses unterschiedlicher Felgengedesigns auf die Aerodynamik des Fahrzeugs sowie auf die lokalen Strömungsgegebenheiten.

## 2.2 Kurvenfahrt

Das oben beschriebene Problem der Kurvenfahrt lässt sich ebenfalls mit dem MRF-Ansatz modellieren. In diesem Fall ist aber keine begrenzte Region für das MRF Gebiet notwendig. Vielmehr wird dem gesamten Simulationsgebiet die Rotation der Kurvenfahrt aufgeprägt. Das Auto wird im ruhenden Windkanal virtuell durch die ruhende Luft bewegt. Dieser Ansatz wurde auch in den Arbeiten von Keogh et al. [3] [4] und Josefsson et al. [5] beschrieben und empfohlen. Es kann sowohl ein gekrümmter Windkanal als auch ein rechteckiger, mit entsprechend definierten Randbedingungen, verwendet werden. Bei einem rechteckigen Windkanal sind die Randbedingungen entsprechend der Strömungsrichtung in oder aus dem Simulationsgebiet zu wählen (siehe Abbildung 3).

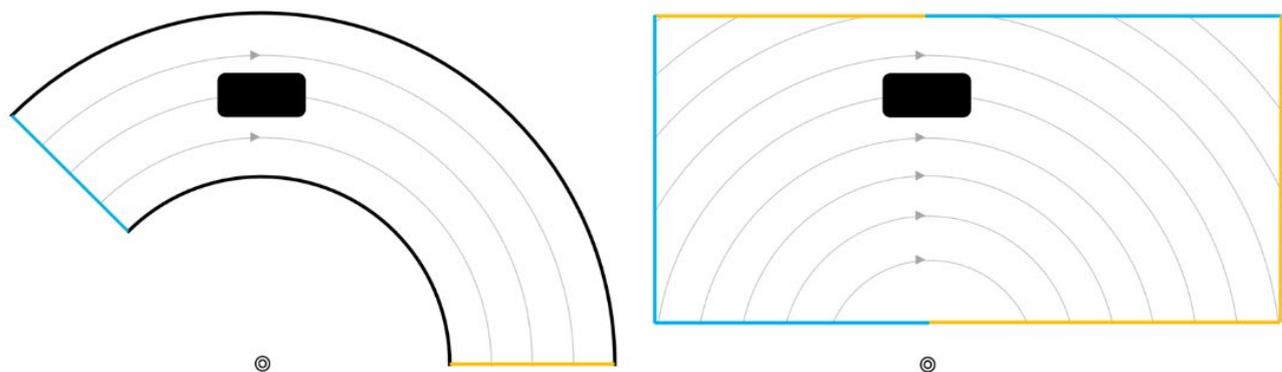


Abb. 3: Vergleich einer gekrümmten und einer rechteckigen Windkanal-Domäne. Einlassrandbedingungen sind blau markiert, Auslassrandbedingungen orange.

Als Einlassrandbedingung wird ein Geschwindigkeitseinlass mit der Geschwindigkeit gleich Null, als Auslassrandbedingung wird eine Druckrandbedingung mit Umgebungsdruck gewählt. Der MRF-Ansatz führt bereits zu einer relativen Bewegung der Luft zum Fahrzeug, weshalb nicht zusätzlich eine Geschwindigkeit in das Simulationsgebiet eingebracht werden muss. Der Boden des Windkanals wird mit einer Tangentialgeschwindigkeit beaufschlagt, um durch eine Überlagerung mit der Rotation des MRF-Gebiets relativ zum stehenden Bezugssystem zu ruhen. Die Reibung an den Wänden der gekrümmten Domäne wird deaktiviert, um die Bildung einer Grenzschicht zu vermeiden. Die weiteren Modellierungsparameter wurden anhand von Erfahrungswerten nach Nayman und Penny [6] gewählt.

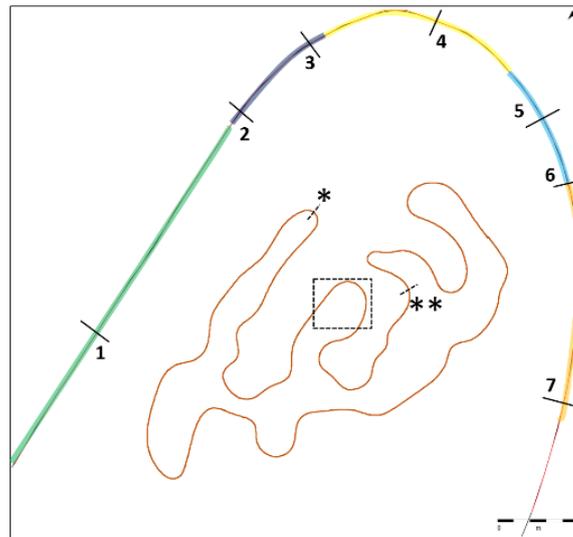


Abb. 4: Fahrzustände in einer repräsentativen Kurve aus dem Streckenlayout der Formula-Student Strecke am Hockenheimring

Die Parameter des Fahrzeugs während der Kurvenfahrt ergeben sich aus der Auswertung von bereits ausgetragenen Rennen. So wurde aus dem Rennen am Hockenheimring 2019 eine repräsentative Kurve ausgewählt und in verschiedene Abschnitte unterteilt, die dann einzeln mit dem Modellierungsansatz der Kurvenfahrt abgebildet und simuliert werden können. Die hier aufgeführte Kurve eignet sich für die Entwicklung der Aerodynamik besonders, da sie mit einer relativ konstanten Geschwindigkeit durchfahren wird und einen Kurvenradius aufweist, der dem Durchschnitt der Kurven auf einer typischen Formula-Student Strecke entspricht. Die Kurve wurde in sieben verschiedene Kontrollpunkte unterteilt und der jeweilige Fahrzustand in der Nähe des Kontrollpunktes ausgewertet (siehe Abbildung 4). Die sieben Kontrollpunkte liegen in den fünf Hauptabschnitten der Kurvendurchfahrt: Anbremsen (Punkt 1), Bremsen und Einlenken (Punkt 2 und 3), reine Kurvenfahrt (Punkt 4), Beschleunigen und Lenken (Punkt 5 und 6) und maximale Beschleunigung (Punkt 7). Die Parameter des jeweiligen Fahrzustands sind in Tabelle 1 einzusehen.

Tab. 1: Parameter einer Kurvenfahrt in den Kontrollpunkten aus Abbildung 4.

Kontrollpunkt	Geschwindigkeit (km/h)	Radius (m)	Lenkwinkel (°)	Rollwinkel (°)	Nickwinkel (°)	Fahrhöhe (mm)
1	85	---	0	0	-0.81	28
2	63	20.1	5	0.68	-0.59	31
3	55	16.5	7.5	0.90	-0.32	32.5
4	47	10.9	12	0.92	-0.23	35
5	48	14.2	12	0.84	0.18	34
6	51	18.1	4	0.79	0.40	34
7	59	24.7	2	0.47	0.42	31.5

Neben dieser Durchschnitts-Kurve sollten allerdings auch noch die Extrembedingungen auf der Strecke abgebildet und simuliert werden. Die schnellste Kurve mit der höchsten Querbewegung und dementsprechend starkem Rollwinkel und geringer Fahrhöhe liegt in dem mit zwei Sternen (\*\*) markierten Punkt in Abbildung 4. Eine der engsten und langsamsten Kurven liegt in dem Punkt, der mit einem Stern (\*) markiert ist. Hier treten sehr große Anströmwinkel und Geschwindigkeitsgradienten über den Radius am Fahrzeug auf. Abbildung 5 zeigt die Anströmwinkel der einzelnen Komponenten am Fahrzeug und die Anströmgeschwindigkeiten der einzelnen Komponenten in einer Linkskurve mit einem Radius von 6,5m, was in etwa dem Kurvenradius im Scheitelpunkt in der mit \* markierten Kurve entspricht. Man erkennt, dass an einem typischen Formula-Student Fahrzeug Anströmwinkel von bis zu 19 Grad am Frontflügel und bis zu 10 Grad in die entgegengesetzte Richtung am Heckflügel auftreten. Das vordere und das hintere Ende des Fahrzeugs auf der Kurveninnenseite erfahren dabei die größten Winkel. Die Verteilung der Geschwindigkeitskoeffizienten auf der Fahrzeugoberfläche zeigt, dass Teile des Fahrzeugs auf der Kurveninnenseite nur ca. 90% der

Fahrgeschwindigkeit als Anströmgeschwindigkeit sehen, wohingegen die Außenseite des Frontflügels auf der Kurvenaußenseite eine Anströmgeschwindigkeit erfährt, die 115% der Fahrgeschwindigkeit entspricht. Der Geschwindigkeitskoeffizient  $C_v$  (Abbildung 5 b) berechnet sich nach (1), indem die Bewegungsgeschwindigkeit  $v$  des jeweiligen Fahrzeuginkrementes durch die Bewegungsgeschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunktes  $v_{SP}$  dividiert wird.

$$C_v = \frac{v}{v_{SP}} \quad (1)$$

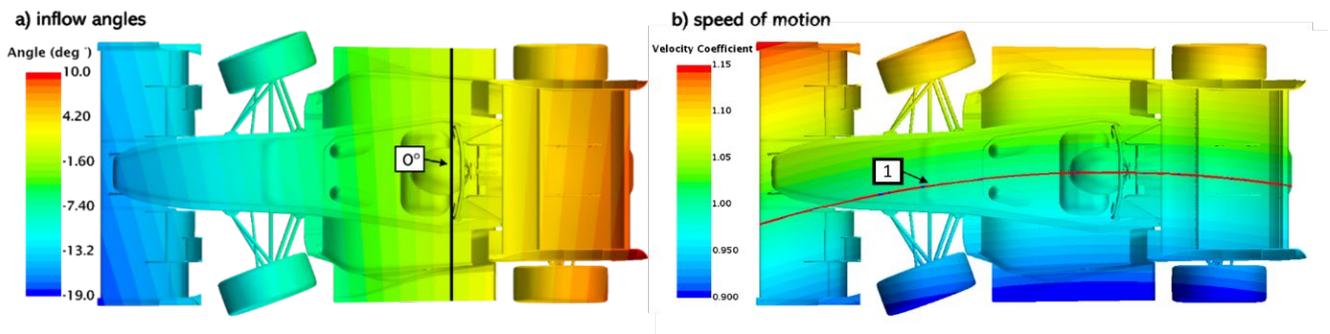


Abb. 5: Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit in einer Kurve mit 6,5m Radius ohne Unter- oder Übersteuern

### 3. Rechnetetz

Um die Genauigkeit der Simulation zu analysieren und zu verbessern, wurde eine Netzstudie durchgeführt. Dazu wurde nach den Empfehlungen von Ahmad, Abo-Serie und Gaylard [7] vorgegangen und mehrere verschiedene Einstellungen für jeden Vernetzungsparameter untersucht. Der Einfluss auf Abtrieb und Luftwiderstand sowie die Zellzahl wurden ermittelt. Daraus ließ sich ableiten, welche Parameter einen großen Einfluss auf die Zellzahl haben, aber auch welche Sensitivität die Parameter hinsichtlich der aerodynamischen Kräfte haben. Als Basis wurde eine Vernetzung mit 135 Millionen Zellen für eine Geradeausfahrt des gesamten Fahrzeugs verwendet. Für jeden Vernetzungsparameter wurden mindestens zwei Vergrößerungs- und zwei Verfeinerungsschritte simuliert. Die Ergebnisse von mehr als 80 durchgeführten Simulationen ermöglichten es, das Netz in sehr effizienter Weise anzupassen. Die Netzstudie zeigte darüber hinaus eine sehr gute Netzunabhängigkeit des Basismodells. Für alle Simulationen des Rennstalls wird ein Trimmer-Netz verwendet. Dieser Zelltyp ermöglicht eine hervorragende Parallelisierung der Vernetzung, eine geringe Gesamtzellzahl und führt zu einem kleinen Verhältnis von Zellflächen zu Gesamtzellzahl, was einen schnelleren Lösungsprozess des Finite-Volumen Solvers ermöglicht.

Der Aufbau der Grenzschichtvernetzung wurde nach Spalart [8] und Grozescu [9] mit mindestens drei Zellen in der viskosen Unterschicht, vier Zellen in der Übergangsschicht und fünf Zellen im logarithmischen Geschwindigkeitsprofil gewählt. Mit insgesamt 13 Wandschichten für aerodynamisch relevante Bauteile und einem  $Y^+$  Wert von etwas kleiner als eins für diese Oberflächen wurde nach Fu, Uddin und Robinson [10] eine gute Auflösung der Grenzschicht ermöglicht. Den Empfehlungen von Fu, Uddin und Robinson [11] folgend, wurde eine „all  $Y^+$ “ Wandschichtbehandlung gewählt, um alle Oberflächen adäquat behandeln zu können. Um den Bereich zwischen Fahrzeug und Fahrbahn hinreichend genau auflösen zu können, wurde eine anisotrope Volumenverfeinerung mit 2mm Zellgröße in z-Richtung unter dem Fahrzeug implementiert.

Der Fahrzeugnachlauf wurde mit diversen Verfeinerungsboxen, die nach [1] und [2] anhand der Größen turbulente kinetische Energie, turbulente Dissipationsrate und Totaldruck verfeinert. Neben der Anwendung von Volumenverfeinerungen wurden lokale Nachlaufverfeinerungen an die Geometrie geknüpft. So wird beispielsweise, wie in Abbildung 6 dargestellt, der Nachlauf des Ansaugtraktes sowie der Nachlauf der Radaufhängungen verfeinert.

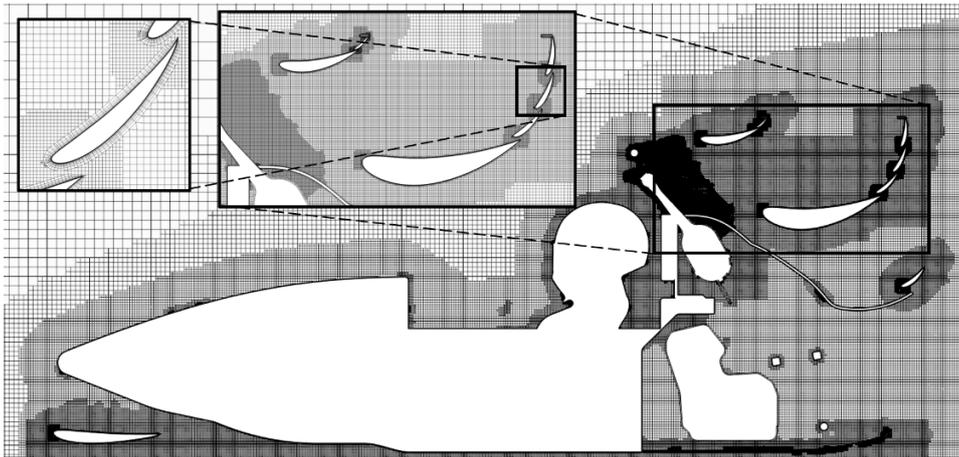


Abb. 6: Netz-Schnitt in der Symmetrieebene des Fahrzeugs

## 4. Validierung

### 4.1 Raddrehung

Lesniewiczs et al. [12] untersuchten den Einfluss der MRF-Modellierung anhand eines vereinfachten Felgengedesign mit geschlossener Felge. Dabei wurden die Ergebnisse von CFD-Simulationen mit MRF-Modellierung (untere Zeile), mit Simulationen in denen lediglich rotierende Wände als Randbedingung vorgegeben wurden (obere Zeile), sowie mit experimentellen Ergebnissen verglichen (siehe Tabelle 2). Der Vergleich zeigt eine deutlich verbesserte Übereinstimmung der Luftwiderstands- und Abtriebs-Koeffizienten  $C_D$  und  $C_L$  mit den experimentellen Werten unter Verwendung der MRF-Modellierung.

Tab. 2: Ergebnisse des Vergleichs der Modellierung der Raddrehung von Lesniewicz et al. [12]

Case	Simulated $C_D$	Simulated $C_L$	Experimental $C_D$	Experimental $C_L$
Rotating wall, smooth tire	0.709	0.320	0.51	0.28
Moving Reference Frame, smooth tire	0.535	0.295	0.51	0.28

### 4.2 Validierung der Abtriebswerte

Eine Validierung der Abtriebswerte wurde nach Rouelle [13] anhand von Messungen bei Validierungsfahrten auf der Strecke durchgeführt. Mit Hilfe von Federwegsensoren und einem Pitot-Rohr konnten die aerodynamischen Kräfte und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft ermittelt werden. Geradeausfahrten mit konstanter Geschwindigkeit über 80m wurden in Windrichtung und gegen die Windrichtung durchgeführt und die Messergebnisse für jede Fahrzeugkonfiguration aus vier Läufen gemittelt. Es wurden verschiedene Konfigurationen des Aerodynamik-Paket gewählt, um eine bessere Aussage über die Genauigkeit der Abtriebsvorhersage mittels Simulation treffen zu können. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass sich das Aerodynamik-Paket bei den Validierungsfahrten deutlich von dem der später vorgestellten Simulationen unterscheidet und die Abtriebswerte nicht verglichen werden können; sehr wohl kann aber eine Aussage über die Genauigkeit des Simulationsmodells getroffen werden.

Die Ergebnisse der Messungen bei den Validierungsfahrten und die Werte aus der Simulation sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Abweichung zwischen Simulation und Messungen (in den beiden letzten Spalten) fällt mit maximal 4,4% klein aus. Eine Fehlerabschätzung für die Federwege, durchgeführt, indem bekannte Gewichte im Stand auf das Fahrzeug geladen wurden und die Ergebnisse der Federwegsensor-Auswertung mit den Gewichten verglichen wurden, zeigte eine maximale Abweichung von 2,5%. Es wird angenommen, dass diese Abweichung unter den dynamischen Aspekten während der Fahrt größer ist.

Tab. 3: Ergebnisse der Validierung auf der Strecke und Vergleich mit der Simulation

Run	Case	On-track validation		Simulation		Deviation	
		c <sub>L</sub> Fullcar	Balance Front b <sub>Front</sub>	c <sub>L</sub> Fullcar	Balance Front b <sub>Front</sub>	c <sub>L</sub> Fullcar	Balance Front b <sub>Front</sub>
1	Standard Straight	3.82 (± 0.1)	0.477 (± 0.012)	3.941	0.480	3.1 % (± 2.5 %)	0.6 % (± 2.5 %)
2	FW Flap Angle -10°	3.56 (± 0.09)	0.451 (± 0.011)	3.724	0.458	4.4 % (± 2.5 %)	1.5 % (± 2.5 %)
3	FW Flap Angle -20°	3.34 (± 0.085)	0.432 (± 0.01)	3.455	0.426	3.4 % (± 2.5 %)	-1.4 % (± 2.5 %)
4	Braking (Front Low)	4.01 (± 0.1)	0.492 (± 0.012)	3.989	0.507	-0.6 % (± 2.5 %)	3.1 % (± 2.5 %)
5	Accelerating (Front High)	2.88 (± 0.07)	0.440 (± 0.011)	2.965	0.446	3.0 % (± 2.5 %)	1.4 % (± 2.5 %)
6	Low Front, Low Rear	3.11 (± 0.08)	0.470 (± 0.012)	3.228	0.470	3.8 % (± 2.5 %)	-0.1 % (± 2.5 %)

Die sehr gute Übereinstimmung der Balance zeigt zudem, dass der Abtrieb an der Vorder- sowie Hinterachse zuverlässig durch die Simulation vorhergesagt wird und sich keine Effekte einstellen, bei denen ein Verlust an einer Achse durch einen Gewinn an der anderen Achse kompensiert wird.

Die Balance auf der Vorderachse berechnet sich dabei nach (2) aus dem Quotienten von Vorderachsabtrieb und Gesamtabtrieb.

$$b_{\text{front}} = \frac{c_{L,\text{front}}}{c_L} \quad (2)$$

Eine Validierung des Luftwiderstands ist auf der Strecke mit der vorgestellten Methode nicht möglich und wird daher durch den Vergleich mit Literaturwerten des Luftwiderstands des Ahmed Body durchgeführt.

### 4.3 Kurvenfahrt Ahmed-Body

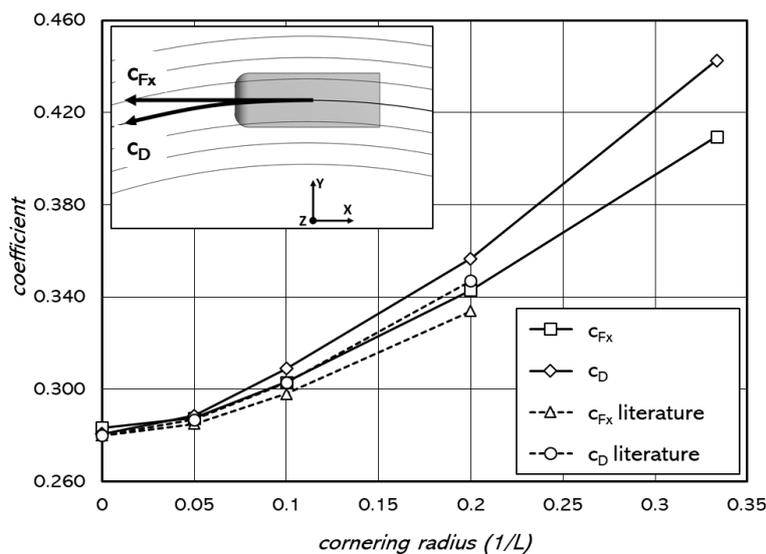


Abb. 7: Luftwiderstandsbeiwerte des Ahmed-Bodys für verschiedene Kurvenradien und Vergleich mit der Literatur [15]

Die vorgestellten Methoden zur simulativen Abbildung einer Kurvenfahrt wurden, neben einer Validierung der Abtriebswerte, anhand von Literaturwerten [14] [15] validiert. Dazu wurde auf eine Referenzgeometrie, den Ahmed-Body, zurückgegriffen. Die Netzeinstellungen der Rennfahrzeugsimulation wurden für den Referenzkörper übernommen und die Verfeinerungsboxen angepasst. Die somit gewonnenen Luftwiderstandsbeiwerte sind in Abbildung 7 dargestellt. Neben dem Vergleich zwischen Literatur- und eigenen Simulationen ist auch noch der Luftwiderstandsanstieg mit zunehmendem Kurvenradius ersichtlich. Hier ist zu beachten, dass sich der wahre Luftwiderstand in einer Kurve in die momentane Bewegungsrichtung jedes Fahrzeuginkrements berechnet. Die Unterschiede der Luftwiderstandsbetrachtung tangential zur Kurvenkreisbahn (c<sub>D</sub>) und in x-Richtung (c<sub>Fx</sub>) sind ebenfalls in Abbildung 7 ersichtlich. Zur Berechnung des wahren Luftwiderstands entlang der gekrümmten Bewegungsrichtung des Fahrzeugs (c<sub>D</sub>) wurde eine benutzerdefinierte Berechnung in das Simulationsmodell implementiert. Für Geradeausfahrten und die Berechnung des Luftwiderstands in x-Richtung stellt STAR-CCM+ einen „Force Report“ zur Verfügung. Dieser lässt sich aber nicht auf gekrümmte Bahnen anwenden. Eine häufig gesehene Lösung ist die Berechnung des

Luftwiderstandes über das Drehmoment um die Hochachse im Kurvenmittelpunkt. Dies führt zu einer guten Näherung solange die Fahrzeugbreite im Verhältnis zum Kurvenradius sehr klein ist, bei größeren Verhältnissen, also bei sehr engen Kurven, liefert dieser Ansatz allerdings keine genauen Ergebnisse. Aus diesem Grund wurde der wahre Luftwiderstand in der Kurve über eine „Field Function“ und einen „Surface Integral Report“ berechnet. Der Luftwiderstand setzt sich aus Druckwiderstand und Schubspannungswiderstand zusammen. In der „Field Function“ wird der skalare Druck mit dem Oberflächen-Einheits-Normalenvektor multipliziert, und die Schubspannung wird addiert (siehe (3)).

$$\underline{\sigma} = p \cdot \underline{n} + \underline{\tau}_w \quad (3)$$

Der Luftwiderstand berechnet sich mit dem „Surface Integral Report“ nach (4). Um nur die Kraft entlang der gekrümmten Bahn zu berücksichtigen, wird ein Zylinderkoordinatensystem im Kurvenmittelpunkt platziert und nur der Kraftanteil in azimutale Richtung berücksichtigt.

$$\underline{F} = \int_S \underline{\sigma} \cdot \underline{n} \, da \quad (4)$$

Der Vergleich der Ergebnisse der eigenen Simulation mit Literaturwerten zeigt eine gute Übereinstimmung mit einer maximalen Abweichung bei  $1/L=0,2$  von 2,7%. Ursachen für diese Abweichung sind unter anderem die Verwendung von unterschiedlichen Rechnernetzen und unterschiedlichen Simulationsansätzen. In der Literatur wird ein (transienter) Detached-Eddy Ansatz verwendet, wohingegen ein stationärer RANS Ansatz für die eigenen Simulationen verwendet wurde.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Raddrehung

Die berechneten aerodynamischen Kennwerte der Räder am Gesamtfahrzeug unter Verwendung des MRF-Ansatzes (MRF-rim) im Vergleich zu den Kennwerten mit stehender Felge (stationary rim) sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Luftwiderstandswerte der verschiedenen Modellierungsansätze unterscheiden sich hauptsächlich am Vorderrad, während sich am Hinterrad nahezu keine Änderung derselben ergibt. Insgesamt ergibt sich durch die abgebildete Luftverdrängung der Felgen kein zusätzlicher Luftwiderstand. Der Auftrieb des Vorderrades vergrößert sich etwas mit dem MRF-Modell, am Hinterrad entsteht signifikant weniger Auftrieb.

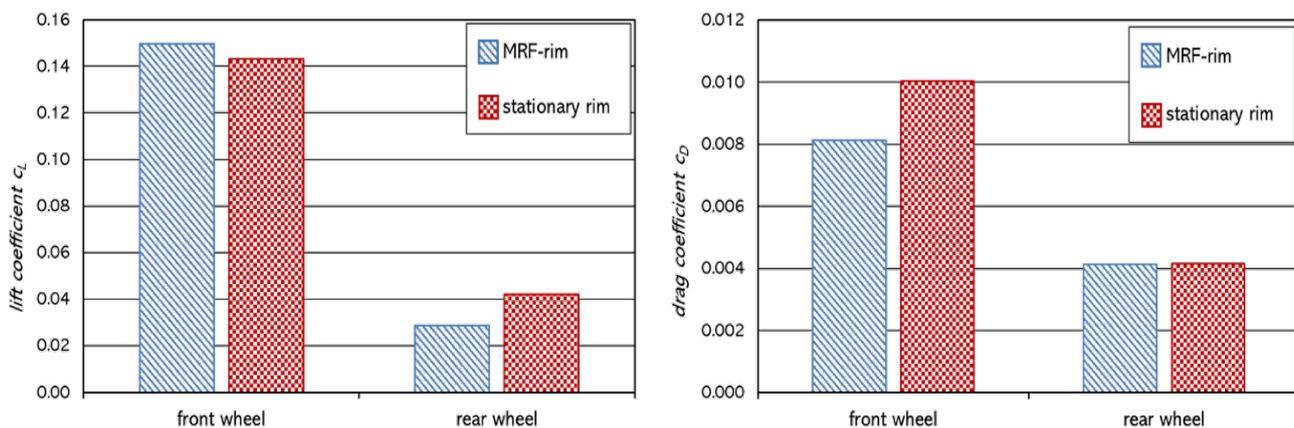


Abb. 8: Aerodynamische Koeffizienten der Räder am Gesamtfahrzeug unter Verwendung des MRF-Ansatzes (MRF-rim) und mit stehender Felge (stationary rim)

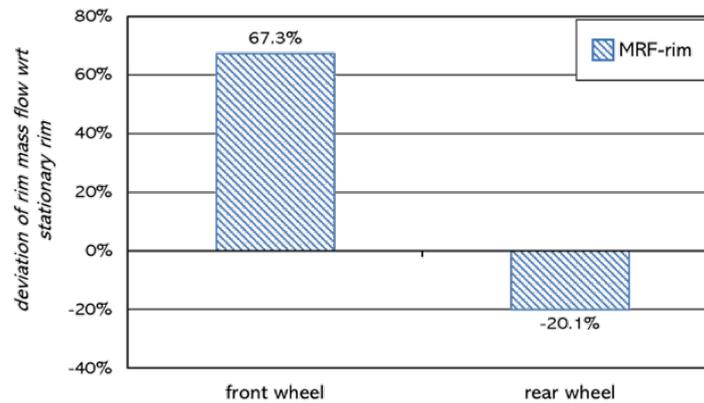


Abb. 9: Massenstrom durch die Felge im Vergleich zur stehenden Felge

Trotz der vorhandenen Abweichungen an den Rädern, ist der Einfluss der Radmodellierung auf den Gesamtantrieb und den Luftwiderstand des Fahrzeugs gering, da die Räder betragsmäßig lediglich ein Prozent des Abtriebs ausmachen. Der Gesamtantrieb erhöht sich mit den MRF-Felgen um 0,5%. Aufgrund der Position der beeinflussten Bauteile (hauptsächlich Frontflügel und Unterboden) nimmt die aerodynamische Balance an der Vorderachse um 0,4% zu.

Der Einfluss der Modellierung auf den Massenstrom durch die Felge zeigt Abbildung 9. Im Vergleich mit der stehenden Felge erhöht sich der Massenstrom durch das Vorderrad um 67%, während sich der Massenstrom durch das Hinterrad um 20% reduziert. Diese Ergebnisse decken sich mit den Resultaten der Untersuchung von Lewis et al. [16], worin mit der MRF-Methode ebenfalls höhere Massenströme am Vorderrad und geringere Massenströme am Hinterrad festgestellt werden konnten. Im Vergleich zur aufwendigen transienten Sliding Mesh-Methode konnte hier jedoch gezeigt werden, dass die berechneten Werte mit dem MRF-Ansatz um 7-15% höher (Vorderachse) und 30% niedriger als die gemessenen Massenströme waren.

Durch die Rad-Modellierung mit dem MRF-Ansatz kann trotzdem die Verlässlichkeit der Massenströme durch die Felgen verbessert werden. Diese sind vor allem aufgrund ihres Einflusses auf das thermische Verhalten der Bremscheiben von Bedeutung.

## 5.2 Kurvenfahrt Formel-Fahrzeug

Im Folgenden wird auf die sich ergebenden Auftriebskräfte im Vergleich mit einer Geradeausfahrt eingegangen. In Abbildung 10 sind die Auftriebsbeiwerte verschiedener Bauteile auf der linken und rechten Fahrzeughälfte gegen die Auftriebsbeiwerte einer Geradeausfahrt aufgetragen. Es wurde repräsentativ eine Linkskurve mit 6,5m Kurvenradius betrachtet, da diese, als eine der engsten Kurven auf der Strecke, die Effekte einer gekrümmten Anströmung am besten heraushebt. Es ist für alle Komponenten, die einen großen Teil zum erzeugten Abtrieb beitragen, zu erkennen, dass diese auf der Kurvenaußenseite (right side) deutlich größere Abtriebswerte aufweisen als auf der Kurveninnenseite (left side). Dies hat eine signifikante Verschiebung der aerodynamischen Balance auf die Kurvenaußenseite zur Folge, die sich aus mehreren, sich überlagernden Faktoren zusammensetzen.

Höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf der Außenseite (right side) und demzufolge geringere Geschwindigkeiten auf der Innenseite (left side), die quadratisch in den Abtrieb einfließen, sowie die Richtung der Anströmung führen zur genannten Verschiebung. Zusätzlich wird auf der Außenseite ein größerer Bodeneffekt erzielt, da die wirkenden Beschleunigungen in einer Kurve zu einem Rollwinkel und damit zu einer Absenkung der Fahrzeugplattform auf der Außenseite führen. Mit abnehmendem Bodenabstand vergrößert sich der Bodeneffekt, was einen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit unter dem Auto zur Folge hat. Der wirkende Unterdruck wird vergrößert und der Abtrieb verstärkt.

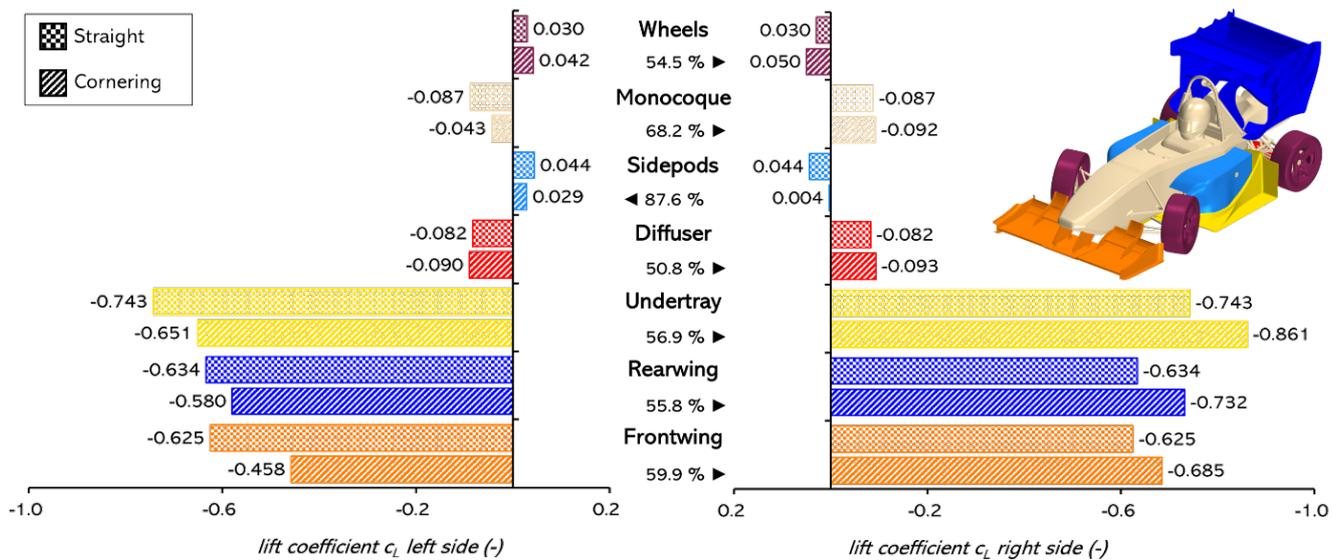


Abb. 10: Vergleich der Auftriebsbeiwerte zwischen Kurven- und Geradeausfahrt auf der Kurveninnenseite (left side) und der Kurvenaußenseite (right side) des Fahrzeugs in einer Linkskurve mit 6,5m Radius

Die genauere Betrachtung eines einzelnen aerodynamischen Bauteils, hier des Frontflügels, veranschaulicht die Effekte der gekrümmten Strömung. Abbildung 11 zeigt den Verlauf des Luftwiderstands und des Abtriebs über die Frontflügelspannweite in einer Linkskurve mit 6,5m Radius. Der Luftwiderstandsverlauf zeigt bei der Kurvenfahrt starke lokale Widerstands-Anstiege bei  $y=\pm 0,7m$  und bei  $y=\pm 0,12m$ . In diesen Bereichen befinden sich die Endplatten sowie die Aufhängung des Frontflügels. Diese Flächen haben eine sehr kleine Projektionsfläche in x-Richtung und tragen somit kaum zum Luftwiderstand bei Geradeausfahrt bei. Die Berücksichtigung der seitlichen Flächen bei Kurvenfahrt, die zu einer deutlich größeren Projektionsfläche in Fahrtrichtung beitragen, führt damit zu einem starken lokalen Anstieg des Luftwiderstands.

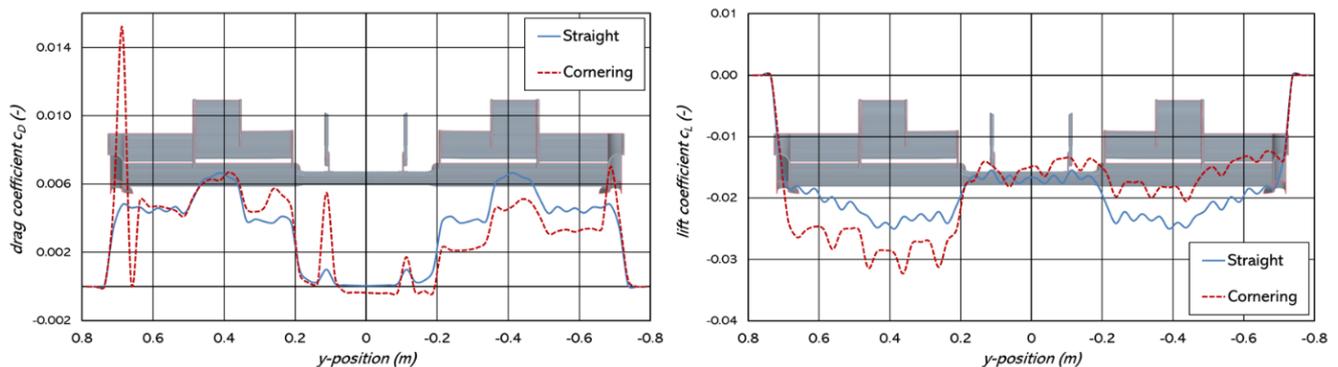


Abb. 11: Vergleich der Luftwiderstands- und Abtriebsverteilung über die Frontflügelspannweite in einer Linkskurve mit 6,5 m Radius

In beiden Diagrammen fällt auf, dass die Kräfte auf der Kurveninnenseite (negative y-Werte) bei der Kurvenfahrt geringer sind als bei der Geradeausfahrt. Dies ist auf die oben beschriebenen, ungleichen Anströmgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeughälften zurückzuführen (siehe Abbildung 5). Auf der Kurveninnenseite sind die Anströmgeschwindigkeiten generell geringer als auf der Außenseite, was zu diesem Ungleichgewicht führt. Weitere Effekte, wie beispielsweise die maximal tolerierten Anströmwinkel, bei denen es gerade noch zu keiner Strömungsablösung an vertikalen Elementen kommt, sind ebenfalls zu berücksichtigen. Diese Effekte können zu einem stark nichtlinearen Verhalten des Luftwiderstands und des Abtriebs über den Kurvenradius führen, sollen hier aber nicht genauer betrachtet werden, da sie stark geometrieabhängig sind. Weiterhin muss der Effekt der eingelenkten Räder auf Bauteile hinter denselben berücksichtigt werden. Der Radnachlauf hat bei einem Formelfahrzeug traditionell einen sehr großen Einfluss auf die Aerodynamik und kann ebenfalls zu starken Nichtlinearitäten über den Kurvenradius führen.

Die bereits beschriebenen Effekte des erhöhten Bodeneffekts auf der Kurvenaußenseite und der unterschiedlichen Anströmwinkel, bzw. Anströmgeschwindigkeiten führt zur in Abbildung 12 dargestellten Druckverteilung auf dem Fahrzeug. Der Abtrieb auf der Kurvenaußenseite beträgt ca. 58% des Gesamtabtriebs.

In der Seitenansicht wird die unterschiedliche Druckverteilung auf den Heckflügelendplatten deutlich. Auf der Kurvenaußenseite herrscht ein Überdruckgebiet, wohingegen auf der Kurveninnenseite ein Unterdruckgebiet herrscht. Dies führt zu einem Moment um die Fahrzeughochachse, dass der Rotationsbewegung des Fahrzeugs in der Kurve entgegenwirkt. Der Vorteil dieses Effekts ist die Reduktion der Tendenz zum Übersteuern und stellt damit eine Verbesserung des Fahrverhaltens dar.

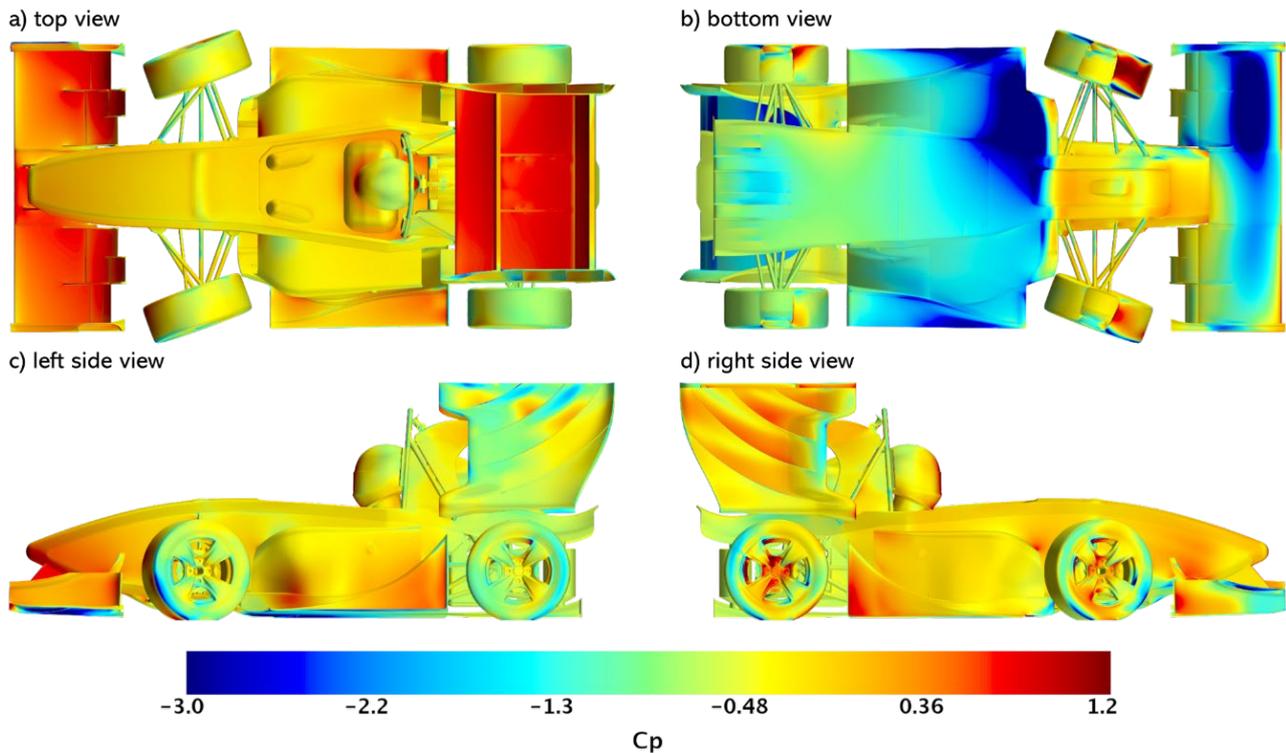


Abb. 12: Druckverteilung auf der Fahrzeugoberfläche in einer Linkskurve mit 6,5 m Radius

Für den Abtrieb an Vorder- und Hinterachse in der oben vorgestellten repräsentativen Formel-Student Kurve ergibt sich der in Abbildung 13 (über die sieben Kontrollpunkte) dargestellte Verlauf. Die genauen Parameter des Fahrzustands der jeweiligen Kontrollpunkte sind in Tabelle 1 einzusehen. Der Verlauf des Hinterachsabtriebs ist in der Kurve relativ konstant, wohingegen der Vorderachsabtrieb stark variiert. Dies lässt sich darauf zurückzuführen, dass der Heckflügel im verwendeten Aerodynamikpaket für diese Analyse bereits auf hohe Anströmwinkel von bis zu 20 Grad ausgelegt ist und über einen weiten Bereich von Anströmwinkeln einen konstanten Abtrieb liefert.

Der Frontflügel zeigt eine größere Sensitivität über die Anströmwinkel und zusätzlich noch über die Fahrhöhe. Man erkennt, dass der Abtrieb an der Vorderachse mit zunehmendem Bodenabstand in den Punkten vier bis sieben abnimmt. Die Anströmwinkel und Rollwinkel in den Punkten drei und fünf sind nahezu identisch, lediglich der Bodenabstand an der Vorderachse und der Lenkwinkel unterscheiden sich stark. Da allerdings auch Kontrollpunkt 6 wenig Vorderachsabtrieb zeigt, dort aber ein geringerer Lenkwinkel als in den Punkten drei und fünf herrscht, kann der Lenkwinkel als Hauptursache für den Abtriebsverlust ausgeschlossen werden. Es zeigt sich also, dass die Bodenabstandssensitivität zusammen mit dem Anströmwinkel einer der entscheidenden Punkte für das Vorderachsabtriebsverhalten in der Kurve ist.

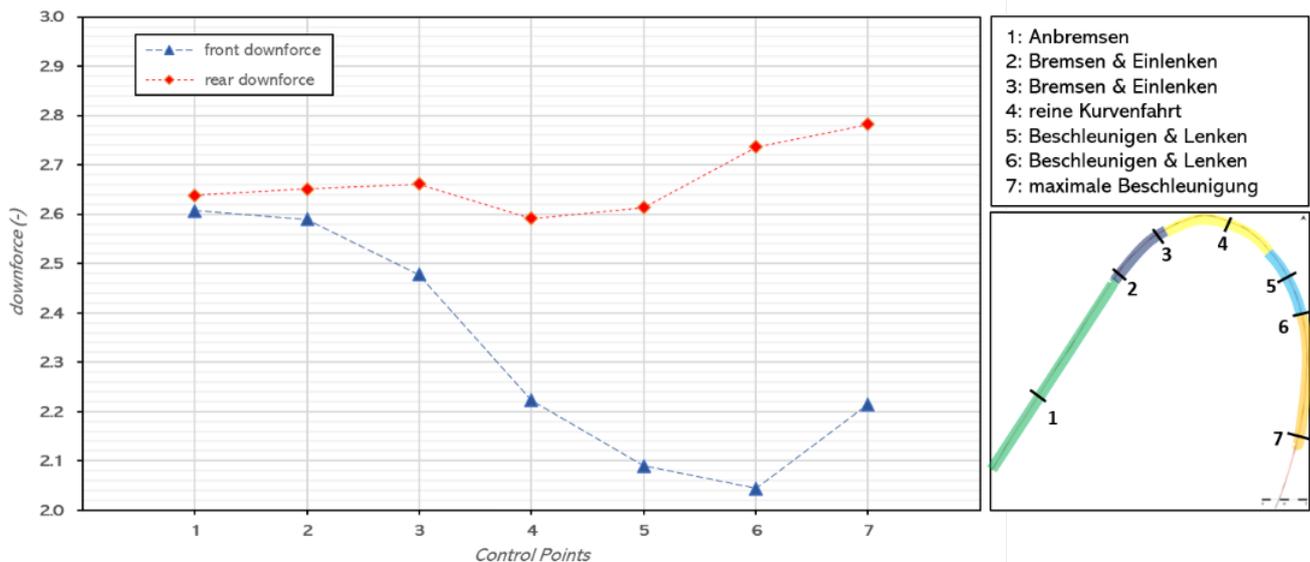


Abb. 13: Abtriebsverlauf in einer repräsentativen Formula-Student Kurve über sieben Kontrollpunkte

## 6. Zusammenfassung

Die CFD-Aerodynamiksimulation des Formula Student Rennwagens der Hochschule Esslingen wurde vorgestellt. Die Implementierung des MRF-Ansatzes in das bestehende CFD-Simulationsmodell wurde erläutert. Mittels des Vergleichs mit experimentellen Daten sowie Daten aus der Literatur wurde der implementierte Modellierungsansatz validiert. Dieser ermöglicht es, den Einfluss der Radrotation auf den Luftmassenstrom durch die Felge zu untersuchen. Weiterhin kann die Kurvenfahrt unter Verwendung des MRF-Ansatzes simulativ abgebildet werden. Die Auftriebsbeiwerte, die zur aerodynamischen Leistungsbeurteilung des Rennwagens herangezogen werden, wurden analysiert. Die Ergebnisse für diese Beiwerte bei Kurven- und Geradeausfahrt wurden sowohl für einzelne Fahrzeugteile als auch für das Gesamtfahrzeug verglichen.

Die Implementierung des MRF-Ansatzes in das CFD-Simulationsmodell ermöglicht es dem Rennstall Esslingen, die Aerodynamik des Rennwagens, das Felgendesign und die Bremskühlung in Bezug auf die spezifischen Bedingungen auf der Strecke zu optimieren, die in der Formula Student hauptsächlich durch Kurvenfahrten bestimmt werden. Mit dem vorgestellten CFD-Simulationsmodell können Komponenten des Fahrzeugs mit dem Ziel weiterentwickelt werden, die aerodynamische Leistung während der Kurvenfahrt zu optimieren.

Die vorgestellte Validierung soll mit Hilfe von Drucksensoren in den Flügelementen und durch sogenannte „Rakes“ (Messgitter mit (Total-) Drucksensoren) erweitert werden, um die Druckverteilung auf der Fahrzeugoberfläche sowie nicht-oberflächennahe Strömungsstrukturen erfassen zu können.

## 7. Danksagung

Alle Simulationen wurden auf dem bwUniCluster durchgeführt. Das bwUniCluster ist Baden-Württembergs Tier 3 Hochleistungsrechenzentrum innerhalb des bwHPC-Projekts. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch das Land Baden-Württemberg.

Darüber hinaus danken die Autoren Siemens für die Bereitstellung kostenloser Lizenzen für STAR-CCM+ im Rahmen des Formula Student Projekts.

## 8. Literatur

- [1] P. Altmann, „External Aerodynamics with Simcenter STAR-CCM+ - Best Practice Guidelines (2020.1),“ Siemens AG, 2020.
- [2] C. Santarelli und L. Reketat, „External Aerodynamics with Simcenter STAR-CCM+ - Best Practice Guidelines for Formula Student Cars (2019.3),“ Siemens AG 2020.

- [3] J. Keogh, T. Barber, S. Diasinos und G. Doig, „Techniques for Aerodynamic Analysis of Cornering Vehicles,“ SAE Technical Paper 2015-01-022, DOI 10.4271/2015-01-0022, 2015.
- [4] J. Keogh, G. Doig, S. Diasinos und T. Barber, „The Influence of Cornering on the Vortical Wake Structures of an Inverted Wing,“ Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering Vol. 229. pp. 1817-1829, DOI 10.1177/0954407015571673, 2015.
- [5] E. Josefsson, R. Hagvall, M. Urquhart und S. Sebben, „Numerical Analysis of Aerodynamic Impact on Passenger Vehicles during Cornering,“ SAE Technical Paper 2018-37-0014, DOI 10.4271/2018-37-0014, 2018.
- [6] M. Nayman und C. Penny, „Developing Steady-State Cornering CFD Simulations for Use in FSAE,“ White Paper, Siemens and Queen’s Formula SAE, 2020.
- [7] N. E. Ahmad, E. Abo-Serie und A. Gaylard, „Mesh Optimization for Ground Vehicle Aerodynamics,“ CFD Letters Vol. 2, p.54, 2010.
- [8] P. R. Spalart und Langley Research Center, „Young-Person's Guide to Detached-Eddy Simulation Grids,“ National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 2001.
- [9] A. Grozescu, „thesteveportal -Knowledge Base,“ Siemens AG, 10 February 2017. [Online]. Available: [https://thesteveportal.plm.automation.siemens.com/articles/en\\_US/FAQ/Do-](https://thesteveportal.plm.automation.siemens.com/articles/en_US/FAQ/Do-). [Zugriff am 13 March 2020].
- [10] C. Fu, M. Uddin und C. Robinson, „Turbulence Models and Model Closure Coefficients Sensitivity of NASCAR Racecar RANS CFD Aerodynamic Predictions,“ SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst., DOI 10.4271/2017-01-1547, 2017.
- [11] C. Fu, M. Uddin und A. C. Robinson, „Turbulence modeling effects on the CFD predictions of flow over a NASCAR Gen 6 racecar,“ Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 176, pp. 98-111, DOI 10.1016/j.jweia.2018.03.016, 2018.
- [12] P. Lesniewicz, M. Kulak und M. Karczewski, „Aerodynamic analysis of an isolated vehicle wheel,“ Journal of Physics Conference Series Vol. 530, DOI 10.1088/1742-6596/530/1/012064, 2014.
- [13] C. Rouelle, „Optimum G - Vehicle Dynamics Solutions Seminar Documents,“ 2016.
- [14] W. Maile, G. Brenn, A. Reppenhagen, B. Lechner, A. Fuchs und P. Akademia Baru, „Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body,“ CFD Letters Vol. 3, 2011.
- [15] G. Castro, R. Paz, M. Storti, V. Sonzogni, J. Marighetti und M. Bortolio, „Experimental and Numerical Study of the Aerodynamic Behaviour of a Simplified Road Vehicle,“ Mecánica Computacional Vol. XXIX, pp. 3291-3303, 2010.
- [16] R. Lewis, M. Cross und D. Ludlow, „The influence of rotating wheels on the external aerodynamic performance of a vehicle,“ Applied Mechanics and Materials Vol. 246-247, pp. 543-547, DOI 10.1533/9780081002452.5.161, 2014.
- [17] L. S. Roberts, J. Correia, M. V. Finnis und K. Knowles, „Aerodynamic characteristics of a wing-and-flap configuration in ground effect and yaw,“ Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 230, no. 6 (May 2016): 841–54. doi:10.1177/0954407015596274.
- [18] R. Lietz, Larson R, J. Goldstein, P. Bachant, R. Silveira, M. Shademan, P. Ireland und K. G. Mooney, „An Extensive Validation of an Open Source Based Solution for Automobile External Aerodynamics,“ SAE Technical Paper 2017-01-1524, DOI 10.4271/2017-01-1524, 2017.
- [19] J. Keogh, T. Barber, S. Diasinos und G. Doig, „The Aerodynamic Effects on a Cornering Ahmed Body,“ Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 154, pp. 34-46, 2016.
- [20] R. B. Chapman und M. S. Plesset, „Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary,“ Journal Fluid Mechanics 47, pp. 283-290, 1971.
- [21] J. Cederlund und J. Vikström, „The Aerodynamic Influence of Rim Design on a Sports Car and its Interaction with the Wing and Diffuser Flow,“ Master’s Thesis, Chalmers University, Gothenburg, Sweden, 2010.

# Entwicklung eines modularen Ansatzes zur automatisierten, simulationsbasierten Validierung der Schaltstrategie moderner Doppelkupplungstriebe

John Köber, Lukas Pflüger (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG),  
Matthias Behrendt, Albert Albers (IPEK – Institut für Produktentwicklung)

## 1 Einleitung und Motivation

Die Abstimmung und Festlegung der Schaltpunkte von modernen Doppelkupplungsgetrieben ist ein fundamentaler Bestandteil heutiger Fahrzeugentwicklungen. Diese Schaltpunkte ergeben sich jedoch nicht aus statisch bedateten Kennfeldern, sondern variieren aufgrund unterschiedlicher Fahrsituationen und Umweltbedingungen. In einer sehr komplexen Softwarestruktur wird in Abhängigkeit dieser Einflüsse versucht, den optimalen Gang zu berechnen. Diese sogenannte Schaltstrategie inklusive aller Einflussfaktoren ganzheitlich zu validieren kann mittels Fahrversuchen mit realen, physischen Prototypenfahrzeugen kaum abgebildet werden. Ein Transfer der bereits gesammelten Schaltstrategie-Testfälle auf alternative Validierungsumgebungen wie Simulationen ist folglich notwendig, um eine robuste und durchgehende Validierung sicherzustellen. Am Beispiel des Testfalles „Dynamische Kreisverkehrfahrt mit anschließender Konstantfahrt“ soll dargestellt werden, wie synthetische Testfälle für eine bestehende Simulationsumgebung erstellt und gemäß des initialen Zielsystems automatisiert ausgewertet werden können. Darauf aufbauend wird dargestellt, wie der entwickelte Ansatz zur Effizienzsteigerung im Kontext der Schaltqualitätsvalidierung eingesetzt werden kann.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

### 2.1 Validierung

Albers et al. [1] formulieren als eine grundlegende Hypothese ihrer Forschung an Produktentstehungsprozessen, dass die Validierung die zentrale Aktivität im Entwicklungsprozess ist. Dabei ist der Grundgedanke, dass durch eine kontinuierliche Validierung im Entwicklungsprozess ein steter Abgleich zwischen den Zielen und Zwecken des Produktes sowie dem jeweils erreichten Entwicklungsstand durchgeführt wird [1] [2]. Mit diesem Verständnis prägt die Validierung den gesamten Produktentstehungsprozess und trägt maßgeblich zur kreativen Lösungsfindung bei [3]. Folglich kommt der Validierung eine zentrale Bedeutung für die weitere Optimierung von Produktentstehungsprozessen zu. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Validierung, neben dem erheblichen Wissensgewinn, im ganzen Produktentstehungsprozess als die aufwendigste und herausforderndste Aktivität angesehen werden kann [1]. Aufgrund der Zeit- und Kostenrestriktionen, welche jeder Produktentstehungsprozess unterliegt, ist eine vollumfängliche Validierung nicht möglich. Folglich muss das Ziel sein, effiziente Referenzprozesse auf Basis von Erfahrungen und Kompetenzen der Entwickler mittels methodischer Grundsätze abzuleiten [1].

### 2.2 Schaltstrategie

In jedem modernen, automatisch schaltenden Getriebe wird eine Schaltstrategie zur Schaltpunksteuerung benötigt. Während in älteren Automatikgetrieben eine rein hydraulische Ansteuerung erfolgte, werden heutzutage elektronische Steuergeräte mit komplexen Softwarefunktionen zur Berechnung des geeignetsten Ganges eingesetzt [4]. Dabei hat die Schaltstrategie die primäre Aufgabe, alle vorliegenden Umgebungsbedingungen so zu interpretieren, dass in jeder Fahrsituation der optimale Gang eingelegt wird [4]. Diese Fahrsituationen werden durch die Schaltstrategie als verbauchs-, zugkrafts- oder leistungsoptimiert interpretiert und werden maßgeblich durch den Fahrerwunsch geprägt, weshalb konventionelle Schaltkennfelder stets in Abhängigkeit von Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrpedalwert bedatet werden [4]. Der Prozess der Bedatung und Abstimmung von Kennfeldern innerhalb eines bestehenden Funktionsrahmen wird in der Automobilbranche auch als Applikation bezeichnet. Die Schaltkennfelder sind in Abhängigkeit der Fahrmodi (z.B. Eco, Normal o. Sport) unterschiedlich appliziert (vgl. Abbildung 1), so dass bspw. im Eco-Modus ein besonders verbrauchsoptimierter Drehzahlbereich in Folge von früheren Hochschaltungen angestrebt wird [5]. Die Modi können in der Regel selbstständig durch den Fahrer aktiviert werden, wobei die Auswahl der wählbaren Modi in starker Abhängigkeit zum vorliegenden Fahrzeugsegment steht. [5] So bieten bspw. sehr sportlich positionierte Fahrzeughersteller oftmals keinen aktiv wählbaren Eco-Modus an. Aufgrund immer strenger werdender gesetzlicher Vorgaben bzgl. Verbrauchs- und Emissionswerten ist dieser dennoch in der Schaltstrategie verankert. Bei konstanter Fahrt mit geringer Längs- und Querschleunigung wird der Eco-Modus automatisch gesetzt und das entsprechende

Schaltkennfeld aktiviert [6]. Zur Validierung der automatischen Aktivierung des Eco-Modus nach einer definierten Zeit der Konstantfahrt gibt es bereits einige etablierte Testfälle, welche auf Basis von realen Anforderungen abgeleitet werden. Einer dieser Testfälle ist bspw. eine dynamische Fahrt durch einen Kreisverkehr mit anschließender Konstantfahrt. Ab einer definierten Geschwindigkeit und der daraus resultierenden Querbesehleunigung im Kreisverkehr wird durch die Getriebesteuerung der Eco-Modus deaktiviert. Nach Verlassen des Kreisverkehrs, einer kurzen Beschleunigungsphase und anschließender Konstantfahrt wird nach der Zeit  $\Delta t$  (sog. Aktivierungszeit) der Eco-Modus reaktiviert. Die Aktivierungszeit  $\Delta t$  ist folglich die primär zu untersuchende Größe im Rahmen dieses Testfalls.

Neben der automatisierten Schaltpunktsteuerung (Drive Mode - D) bieten Automatikgetriebe dem Fahrer zusätzlich die Option, die Wahl der Schaltpunkte eigenständig zu bestimmen (z.B. mittels Schaltwippen am Lenkrad). Dieser manuelle Modus (M) ist normalerweise so ausgelegt, dass alle Gangwechsel lediglich auf Initiative des Fahrers erfolgen. Es gibt dennoch Betriebspunkte, in denen die Schaltstrategie aus Gründen des Bauteilschutzes einen Gangwechsel in M fordert, obwohl dieser nicht vom Fahrer initiiert wurde oder Gangwechsel unterbindet, obwohl der Fahrer sie eigentlich fordert. Dazu gehören bspw. Schaltungen, welche dazu führen, dass die Motordrehzahl in den Drehzahlbegrenzer laufen würde, oder die Leerlaufdrehzahl unterschritten wird. Ebenso werden bspw. manuelle Schaltungen von der Schaltstrategie unterbunden, wenn sich das Fahrzeug noch im Anfahren befindet. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich die Kupplung noch im schlupfenden Zustand, weshalb eine Schaltfreigabe aus Gründen des Komforts erst nach Überwinden des Kupplungsschlupfes erfolgt.

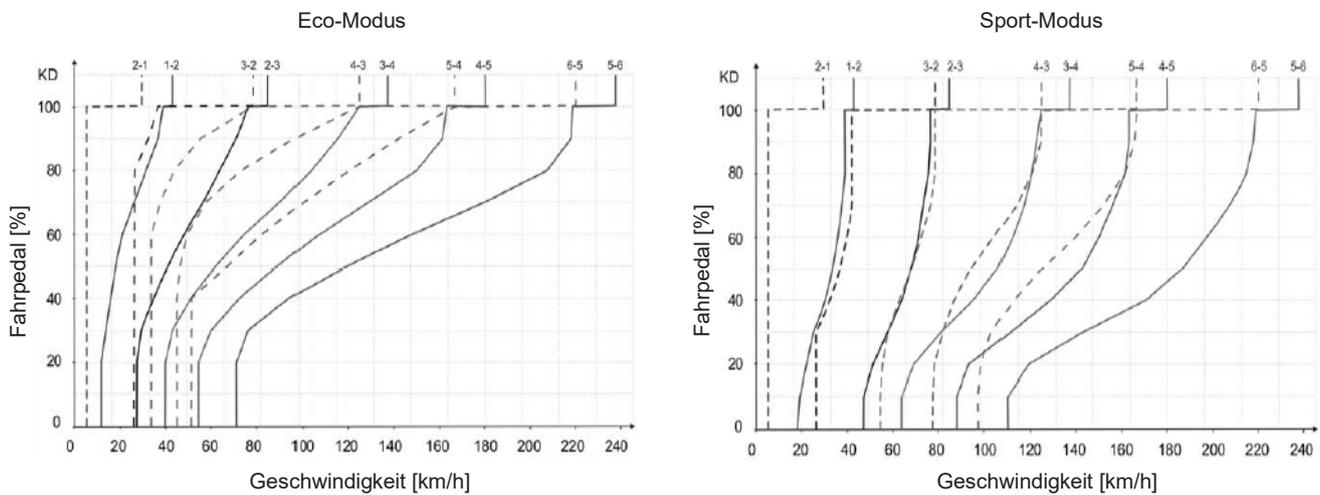


Abb. 1: Schaltkennlinien eines 6-Ganggetriebes mit Eco- (links) und Sport-Modus (rechts); Hochschaltung: durchgezogene Linie, Rückschaltung: gestrichelte Linie [3]

### 2.3 Schaltablauf

Nachdem die Schaltstrategie einen Gangwechsel gefordert bzw. eine vom Fahrer indizierte, manuelle Schaltung zugelassen hat, erfolgt im nächsten Schritt die Regelung des Schaltablaufs, welche neben der Schaltstrategie als die wesentlichste Funktion des Getriebesteuergerätes anzusehen ist. Grundsätzlich ist das Ziel der Schaltablaufsteuerung, den Gangwechsel in allen Betriebspunkten maximal komfortabel auszuführen [7]. Es existieren jedoch Sonderfälle – wie z.B. Fahrmodi (Sport) oder Fahrsituationen (KickDown) – in denen die Schaltungen Performance-optimiert ausgeführt werden sollen. Das negativ wahrgenommene Kriterium des Komforts ist in diesen Situationen von untergeordnetem Interesse und wird bewusst akzeptiert, um betont sportliche Schaltungen zu generieren [4]. Während des Gangwechsels von Doppelkupplungsgetrieben bleibt der Momentenfluss und somit die Zugkraft erhalten, weshalb diese als Lastschaltungen bezeichnet werden [7]. Da der Fokus dieser Arbeit auf Doppelkupplungsgetrieben liegt, soll im weiteren Verlauf diese Hauptschaltart näher beschrieben werden. In Abhängigkeit der Fahrsituation werden für den Gangwechsel unterschiedliche Unterarten der Schaltung innerhalb der Lastschaltung unterschieden. Dabei erfolgt die Klassierung der Schaltarten unter Berücksichtigung der Richtung des Momentenflusses [4]. In Abhängigkeit der Zugkraftbedarfe sind Schaltungen mit positivem Moment an der Getriebeeingangswelle Zugschaltungen, mit negativen Moment Schubschaltungen [4]. Diese Unterteilung wird zusätzlich in Verbindung mit dem resultierenden höheren oder niedrigeren Zielgang gebracht. Somit ergeben sich vier Schaltarten, welche aufgrund ihrer unterschiedlichen Abläufe individuell appliziert und validiert werden müssen:

- Zug-Hochschaltung
- Zug-Rückschaltung
- Schub-Hochschaltung
- Schub-Rückschaltung

Für die Validierung des Schaltablaufs bzw. der sich daraus ableitenden Schaltqualität existieren bereits umfangreiche Manöverkataloge bei den Automobilherstellern und Zulieferern [8]. Dabei sind die Inhalte der bestehenden Manöverkataloge prinzipiell vergleichbar und unterscheiden sich lediglich in der Granularität der Betriebspunkte zur Validierung des Schaltablaufs. In Abhängigkeit der Schaltart werden die Betriebspunkte mittels Fahr- bzw. Bremspedal, Geschwindigkeit, Drehzahl sowie Fahrmodus definiert. Beispielhaft ist in Abbildung 2 ein Ausschnitt eines Manöverkatalogs zur Validierung der Zug-Hochschaltung in D und M dargestellt, in welchem die weißen Zellen mit der Bewertung des jeweiligen Schaltablaufs befüllt werden.

Zughochschaltungen in Normal in D							
	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8
10%							
20%							
40%							
50%							
60%							
80%							
100%							

Zughochschaltungen in Normal in M							
		1000 1/min	2000 1/min	3000 1/min	4000 1/min	5000 1/min	6000 1/min
80% FP	1-2						
	2-3						
	3-4						
	4-5						
	5-6						
	6-7						
	7-8						

Abb. 2: Auszug aus einem Manöverkatalog zur Validierung der Schaltqualität  
 [Oben: Zug-Hochschaltungen in Normal in D; Spalten: Gangwechsel, Zeilen: prozentualer Fahrpedalwert ]  
 Unten: Zug-Hochschaltungen in Normal in M; Spalten: Motordrehzahl, Zeilen: prozentualer Fahrpedalwert und Gangwechsel]

Für die Zug-Hochschaltung in D ist ersichtlich, dass die Betriebspunkte lediglich über das Fahrpedal definiert werden. Die zu validierenden Gangwechsel ergeben sich anhand der Kennfelder der Schaltstrategie. Es ist evident, dass die Schaltpunkte in Abhängigkeit des Fahrwiderstandes (bspw. aufgrund von Steigung) verschoben werden. Da dies allerdings keinen direkten Einfluss auf die Schaltqualität hat, wird der vorliegende Manöverkatalog lediglich in der Ebene validiert. Bei Zug-Hochschaltungen in M wird zusätzlich zu der Vorgabe des Fahrpedals noch eine Drehzahl gefordert, bei welcher die Schaltung durch den Fahrer initiiert werden soll (z.B. mittels Schaltwippen). Die vier Schaltarten werden in allen vorgegebenen Betriebspunkten und Modi angefahren und anschließend durch den Applikateur subjektiv bzgl. der wahrgenommenen Schaltqualität bewertet. Die Bewertung orientiert sich in der Regel an der 10-stufigen ATZ-Skala [9], wobei diese punktuell für die jeweiligen Automobilhersteller angepasst wird [10].

### 3 Modularer Simulationsansatz der Validierung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll ein modularer Ansatz vorgestellt werden, welcher eine automatisierte Validierung von Testfällen der Schaltstrategie mittels eines bestehenden Simulationsmodells ermöglicht. Dabei ist es einerseits notwendig, synthetische Testfälle zu generieren, welche als Input für das vorliegende Simulationsmodell dienen (vgl. Abschnitt 3.1). Andererseits müssen die Simulationsergebnisse anhand des initialen Zielsystems automatisiert analysiert und aufbereitet werden (vgl. Abschnitt 3.2). Dieser prinzipielle Workflow ist in Abbildung 3 dargestellt.

Darüber hinaus sind an die Umsetzung weitere Anforderungen geknüpft:

- Sowohl die Schnittstellen zur Simulation als auch die synthetisch generierten Testfälle sollen modular aufgesetzt werden, so dass weitere Testfälle ohne Mehraufwand hinzugefügt werden und die Testfälle als solche abgeändert und variiert werden können.
- Der gesamte Ablauf soll ohne jegliche Nutzerinteraktion durchführbar sein, so dass eine maximale Nutzerfreundlichkeit und minimale Fehleranfälligkeit sichergestellt werden.
- Die Analyse der Simulationsergebnisse soll in Abhängigkeit des initialen Zielsystems und der relevanten Kenngrößen des Testfalles eine einfache und nutzerfreundliche Interpretation der Ergebnisse ermöglichen.

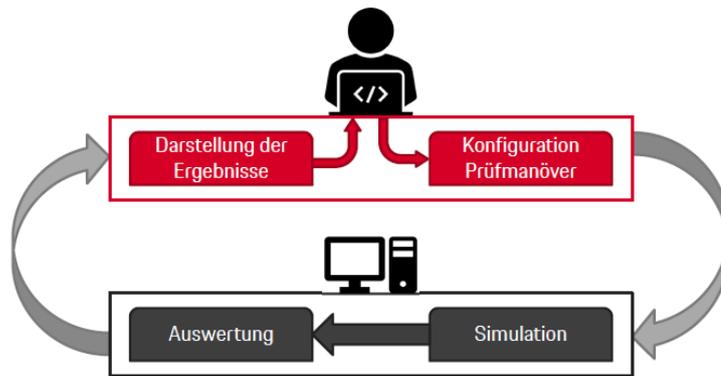


Abb. 3: Workflow der automatisierten, simulationsbasierten Validierung

Insbesondere die Modularität der Methodik ist in diesem Kontext als substantielle Forderung hervorzuheben. So können im Vergleich zu Realfahrzeugmessungen Datenstandsänderungen an Testfällen mit unterschiedlicher Parametrierung validiert werden. Testfälle mit unterschiedlicher Parametrierung verstehen sich als die Änderungen der vorgegebenen Input-Größen. Am Beispiel der Kreisverkehrfahrt mit anschließender Konstantfahrt bedeutet dies z.B. die Variation des Geschwindigkeitsprofils, des Radius des Kreisverkehrs oder der Beschleunigungsphasen.

### 3.1 Generierung synthetischer Testfälle

Zunächst müssen geeignete Testfälle identifiziert werden, welche eine objektive Bewertung anhand von signifikanten Messgrößen ermöglichen. Dazu zählt bspw. der in Kap. 2.2 vorgestellte Testfall der dynamischen Fahrt durch den Kreisverkehr mit anschließender Konstantfahrt, da die Aktivierungszeit anhand der Simulationsergebnisse objektiv messbar ist und subjektive Eindrücke folglich keinen Einfluss auf das Testergebnis haben. Dieser Testfall soll als Beispiel für die weitere Betrachtung der vorliegenden Arbeit dienen. Um im nächsten Schritt die Testfälle zu implementieren, bedarf es einer ausführlichen Analyse der potenziellen Schnittstellen des bestehenden Simulationsmodells. Wichtige Input-Dateien, welche an das Simulationsmodell übergeben werden, sind die Straße und die dazugehörige Fahrlinie sowie das Fahrermodell. Dabei kann das Fahrermodell direkt bzgl. der Längsregelung via Fahrpedal parametrierbar werden oder mittels einer zeitabhängigen Geschwindigkeitsvorgabe selbstständig regeln. Die notwendigen (grau) und optionalen (blau) Input-Dateien für das Simulationsmodell sind in Abbildung 4 dargestellt.

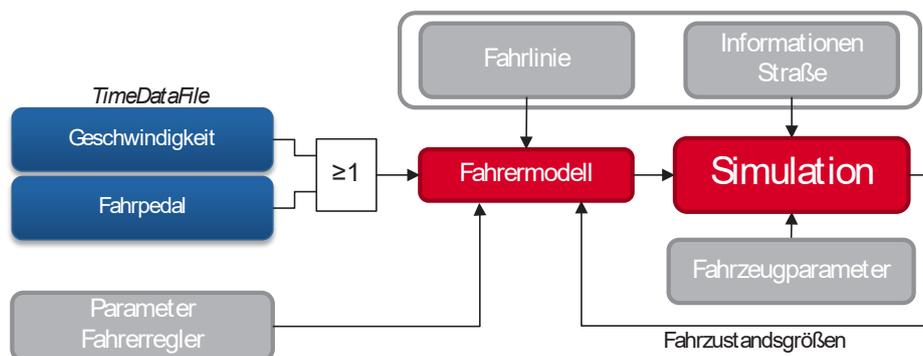


Abb. 4: Input-Dateien zur Vorgabe des synthetischen Testfalles

Die Generierung der beschriebenen Input-Dateien erfolgt in Abhängigkeit jedes Testfalles algorithmusbasiert. Am vorliegenden Beispiel können bspw. der Radius des Kreisverkehrs, die Geschwindigkeiten vor, während oder nach dem Kreisverkehr, sowie die Geschwindigkeitsgradienten der Beschleunigungs- bzw. Bremsphasen definiert werden. Demnach können die erzielten Quer- bzw. Längsbeschleunigung variiert werden, was wiederum einen direkten Einfluss auf die Aktivierung des Eco-Modus hat. Um diese Ergebnisse validieren zu können, bedarf es eines Vergleichs zu Realfahrzeugmessungen. Da mittels Realfahrzeugmessungen nur mit sehr hohem Aufwand exakte Längs- und Querregelungen abgebildet werden können, wird zur Validierung der Ergebnisse das Geschwindigkeitsprofil der Realfahrzeugmessung als Vorlage genutzt. Dieses wird in ein synthetisches Fahrprofil gemäß der in Abbildung 4 beschriebenen Methodik überführt. So kann eine direkte Vergleichbarkeit der Simulation synthetischer Fahrmanöver und Realfahrzeugmessung sichergestellt werden. In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass die Simulation die Querbeschleunigungen sehr gut abbilden kann und die Ergebnisse folglich für Validierungen der Getriebeapplikation nutzbar sind.

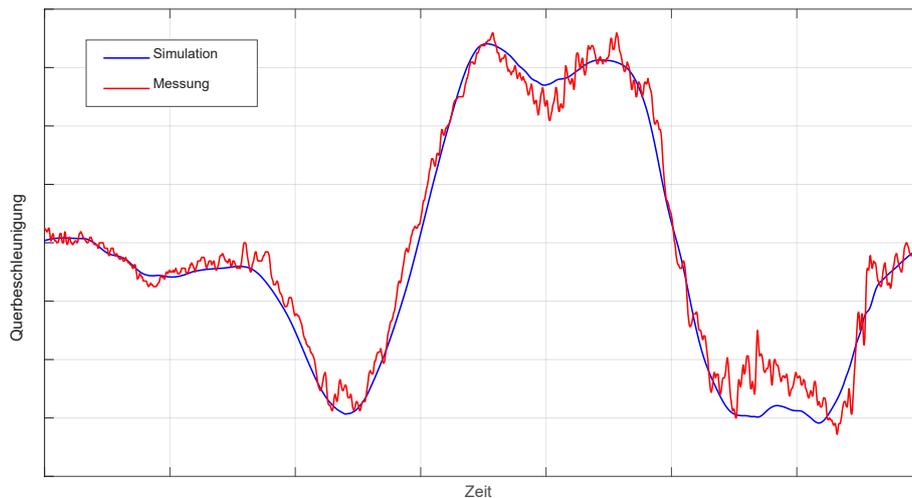


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Querbeschleunigung bei einer dynamischen Kreisverkehrsfahrt

### 3.2 Automatisierte Analyse der Simulationsergebnisse

Da das initiale Zielsystem zu Beginn der Simulation bekannt ist und Testfälle ausgewählt wurden, welche eine Objektivierung anhand von definierten Messgrößen zulassen, können die Simulationsergebnisse mittels Data-Mining automatisiert analysiert werden. Dies ist insbesondere von Vorteil, wenn der Applikateur einen Datenstand bei demselben Testfall mit unterschiedlicher Parametrierung validieren möchte. So können die Einflüsse der unterschiedlichen Querbeschleunigungen und der daraus resultierenden Zeit  $\Delta t$  zur Reaktivierung des Eco-Modus direkt miteinander verglichen werden. Eine zusätzliche Beurteilung der Messdatei in bekannten Analyse- und Kalibrier-Tools ist demnach nicht notwendig und bietet große Zeitpotentiale. Im vorliegenden Beispiel der dynamischen Kreisverkehrsfahrt wird ab Unterschreiten einer definierten Beschleunigungsgrenze ( $a_x < 0,25 \text{ m/s}^2 > a_y$ ) der Zeitpunkt  $t_0$  definiert. Dieser Grenzbereich ist zielführend, um mögliche Schwankungen in der Beschleunigung, wie sie bspw. aufgrund von Gangwechseln auftreten können, weiterhin als Konstantfahrt zu kategorisieren. In Abbildung 6 sind die Einflüsse variierten Datenstände (links) und unterschiedlich parametrierter Testfälle (rechts) auf den Drehzahlverlauf sowie die Aktivierung des Eco-Modus dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei identischem Geschwindigkeitsverlauf ein früheres Aktivieren des Eco-Modus aufgrund des Datenstandes A zum Zeitpunkt  $t_1$  erfolgt. Dies wird durch die daraus resultierende, frühzeitigere Hochschaltung deutlich. Darüber hinaus ist in der rechten Abbildung zu erkennen, dass eine Variation der Testfallparametrierung (unterschiedliche Geschwindigkeitsverläufe) ebenfalls einen erkennbaren Einfluss auf die Aktivierungszeit  $\Delta t$  hat. Diese Erkenntnis unterstreicht die Notwendigkeit zur modularen, algorithmusbasierten Generierung synthetischer Testfälle.

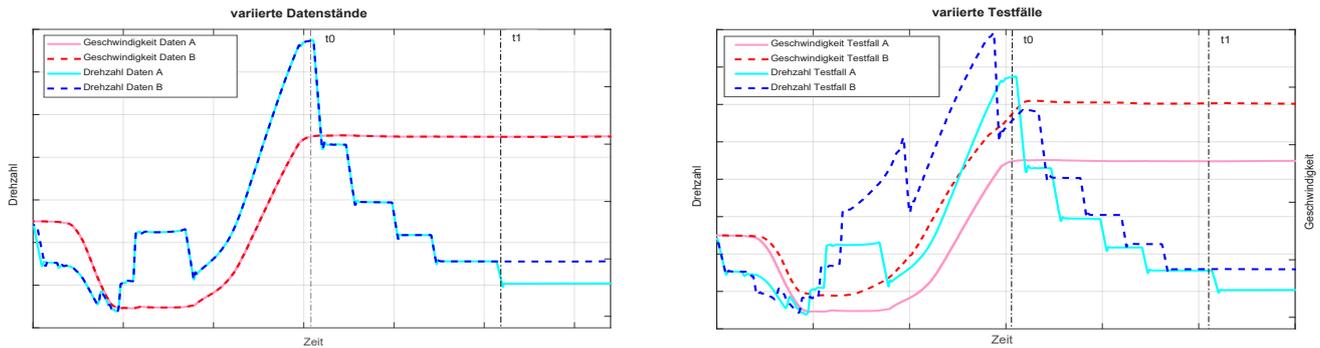


Abb. 6: Einflüsse variiertes Datenstände und parametrierter Testfälle auf das initiale Zielsystem

#### 4 Übertragung des Ansatzes zur Validierung der Schaltqualität

In diesem Kapitel soll dargestellt werden, wie der beschriebene Ansatz zur Validierung der Schaltstrategie mittels synthetischer Testfälle genutzt werden kann, um den Prozess der Schaltqualitätsvalidierung effizienter zu gestalten. Zunächst wird anhand einer Situationsanalyse dargestellt, wie die Validierung des Schaltqualitäts-Manöverkatalogs gegenwertig umgesetzt wird und welche Potentiale sich daraus ableiten. Darauf aufbauend wird erläutert, wie synthetische Testfälle zu einer Effizienzsteigerung im Kontext der Validierung der Schaltqualität beitragen können und wie diese final implementiert werden. Gemäß der initial beschriebenen Systematik wird abschließend dargestellt, wie die Simulationsergebnisse in Abhängigkeit des initialen Zielsystems automatisiert analysiert und ausgewertet werden können.

##### 4.1 Globaler Manöverkatalog

Die Verwendung von Manöverkatalogen zur Validierung der Schaltqualität wurde im Stand der Forschung bereits vorgestellt (siehe Kap. 2.3). Der Manöverkatalog ist in diesem Kontext jedoch als globaler Manöverkatalog zu verstehen, also als eine Sammlung aller Manöver zur Validierung des Schaltablaufs über alle Baureihen und Derivate eines Automobilherstellers hinweg. In Abhängigkeit der Fahrzeugklasse, der angestrebten Marktpositionierung, Motorisierung und Getriebevariante des Fahrzeuges resultieren allerdings gänzlich unterschiedliche Bedatungen der Schaltstrategie und somit auch der Schaltpunkte. Das führt dazu, dass nicht immer alle Schaltungen des Manöverkatalogs angefahren werden können. Gegenwärtig wird in Fahrversuchen mittels Trial&Error-Ansatz versucht, die maximal mögliche Anzahl an Schaltungen des Manöverkatalogs anzufahren und zu bewerten. Wird auch nach mehrmaligem Versuch eine Schaltung am vorgegebenen Betriebspunkt nicht ausgelöst, oder kann der vorgegebene Betriebspunkt gar nicht erst erreicht werden, dann wird die entsprechende Zelle in der Matrix des Manöverkatalogs als nicht bewertbar markiert. Entsprechend zeitaufwändig und ineffizient ist dieser Ansatz. Explizites Vorab-Wissen darüber, welche Schaltungen des globalen Manöverkatalogs für das zu validierende Fahrzeug möglich sind, kann somit zu einer signifikanten Effizienzsteigerung infolge eines reduzierten Zeitbedarfs führen.

##### 4.2 Synthetische Testfälle zur Plausibilisierung der realisierbaren Schaltungen

Es wurde bereits dargestellt, dass abhängig von der Applikation der Schaltstrategie möglicherweise nicht alle Schaltungen des globalen Manöverplans ausgeführt werden können. Theoretisch besteht die Möglichkeit, direkt aus dem vorliegenden Datenstand die Schaltpunkte ohne Simulationen zu berechnen. Die maximale Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Fahrpedals, der Motorleistung und Fahrzeugmasse oder spezielle Fahrmanöver wie Anfahren können ohne Simulationen jedoch nicht hinreichend genau beschrieben werden. Diesem Nachteil können Simulationen mit synthetischen Testfällen begegnen und für eine effiziente und automatisierte Plausibilitätsprüfung genutzt werden. Es ist evident, dass für jede Schaltart separate Testfälle benötigt werden. Darüber hinaus werden gesonderte Testfälle für Schaltungen in M benötigt, da durch den virtuellen Fahrer bei definierten Drehzahlen oder Geschwindigkeiten eine Schaltung manuell ausgelöst werden soll. Nachfolgend soll beispielhaft die Umsetzung der synthetischen Testfälle zur Plausibilisierung der Zug-Hochschaltung in M vorgestellt werden. In Kap. 3.1 wurden bereits die Input-Daten vorgestellt, welche notwendig sind, um synthetische Testfälle im Kontext der bestehenden Simulationsumgebung zu generieren. Da die Validierung der Schaltqualität lediglich in longitudinaler Richtung ohne Querkräfte erfolgt, soll im Folgenden nur auf die Parametrierung des Fahrermodells eingegangen werden. Alle notwendigen Informationen werden automatisiert aus dem Manöverkatalog ausgelesen und in Parameter für das Fahrermodell überführt. Somit ist bei Anpassung des Manöverplans (bspw. Grad an Granularität) keine gesonderte Korrektur der synthetischen Testfälle notwendig. Dies leistet einen wesentlichen Beitrag zur geforderten Modularität und Effizienzsteigerung.

Für die Zug-Hochschaltungen in M ist neben der Vorgabe des prozentualen Fahrpedalwertes auch die Motordrehzahl relevant, bei welcher die Schaltung durch den Fahrer initiiert werden soll. Dieser Zusammenhang wurde bereits in Kap. 2.3 erläutert. Dementsprechend wird für das vorliegende Manöver das Fahrermodell direkt bzgl. der Längsregelung mittels Fahrpedal parametrisiert. Bei Erreichen der definierten Drehzahl wird algorithmusbasiert geprüft, ob im aktuellen Betriebspunkt die manuelle Schalterlaubnis durch die Schaltstrategie bereits erfolgt ist. Wenn ja, wird dem Fahrermodell eine manuelle Schaltung durch virtuelle Betätigung der Schaltwippen aufgeprägt. Ist dies jedoch nicht der Fall, ist der Testfall so umgesetzt, dass der Fahrer bis zur Freigabe und Überschreitung der Drehzahlgrenze mit der Schaltung wartet. Durch diese Prüfung und das damit ggf. verbundene Pausieren wird sichergestellt, dass die simulationsbasierte Plausibilisierung des gesamten Manöverkatalogs ohne Stagnation aufgrund einer Endlosschleife durchlaufen kann. Zusätzlich kann durch den Anwender ein Timeout-Zeitfenster definiert werden, welches vorgibt, wie lang die Simulation maximal zum Anfahren des nächsten Betriebspunktes benötigen darf.

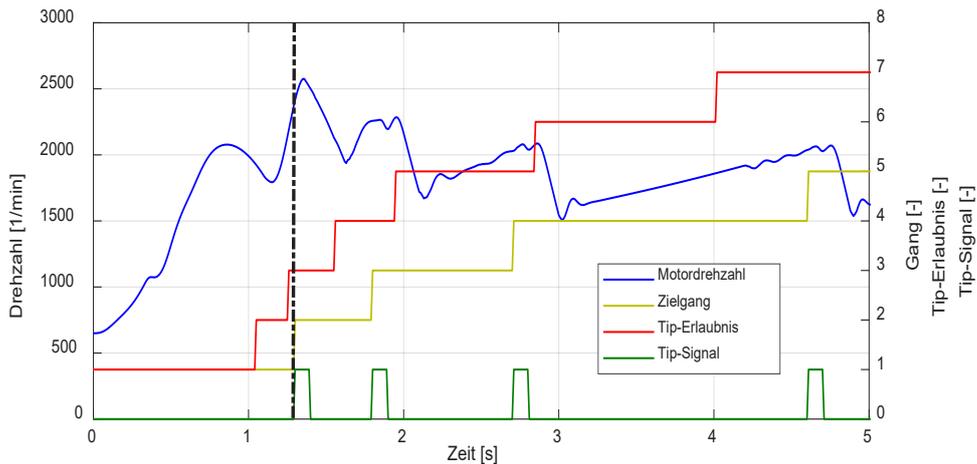


Abb. 7: Manuelle Zug-Hochschaltungen in Abhängigkeit von Drehzahl und vorliegender Tip-Erlaubnis der Schaltstrategie

Wird innerhalb dieses Timeout-Zeitfensters die geforderte Drehzahl oder Geschwindigkeit nicht erreicht, so wird bereits vorzeitig eine manuelle Zug-Hochschaltung initiiert. Die Integration eines Timeouts ist ebenfalls notwendig, um Endlosschleifen zu verhindern. Dies geschieht bspw., wenn das Fahrzeug aufgrund des Fahrwiderstandes und der fahrpedalabhängigen Motorleistung den geforderten Betriebspunkt nicht erreichen kann. Darüber hinaus kann durch den Anwender eine Geschwindigkeitsobergrenze für die Simulation festgelegt werden, um festgeschriebene Höchstgeschwindigkeiten von vielen Teststrecken Rechnung zu tragen. Der resultierende, prinzipielle Ablauf des beschriebenen Testfalles ist in Abbildung 7 dargestellt. Am ersten lokalen Maximum des Drehzahlverlaufs ( $t \approx 0,8$  sec) befindet sich das Fahrzeug noch im Anfahren. Die Kupplung ist noch im schlupfenden Zustand, weshalb bei Überschreiten der geforderten Drehzahl ( $N = 2000$  1/min) noch keine Tip-Erlaubnis durch die Schaltstrategie erfolgt. Der sich anschließende Drehzahl-Abfall resultiert infolge des simulationsmodellbedingten Abbaus des Kupplungsschlupfes. Kurz nach  $t = 1$  sec erfolgt die Tip-Erlaubnis für eine 1-2 Zug-Hochschaltung (Signal springt auf 2). Da zu diesem Zeitpunkt die Drehzahlgrenze jedoch wieder unterschritten ist, wird ebenfalls noch keine Schaltung initiiert. Bei dem nachfolgenden Erreichen der geforderten Drehzahl ( $N = 2000$  1/min) wird final eine Tip-Schaltung dem Fahrermodell aufgeprägt (Tip-Signal = 1), woraufhin das Signal des Zielganges auf Gang 2 springt. Dieser Moment ist mittels senkrechter Strich-Punkt-Linie in Abbildung 7 hervorgehoben. Die Latenz zwischen Erreichen der Zieldrehzahl und Tip-Signal ist auf das Modell des Fahrerreglers zurückzuführen. Da vor der Drehzahlüberführung im Schaltablauf zunächst die Kupplungsbefüllung und die Momentenüberschneidung erfolgt, steigt die Drehzahl zunächst weiter an. Demnach ist es für die nachfolgende, automatisierte Ergebnisauswertung notwendig, die Drehzahl zum Zeitpunkt des Tip-Signals zu berücksichtigen und nicht die des lokalen Maximums.

### 4.3 Automatisierte Analyse der Simulationsergebnisse

Wie in Kap. 3.2 dargestellt, ist die Voraussetzung für eine automatisierte Auswertung, dass zunächst Wissen über das initiale Zielsystem vorhanden ist und dass die Simulationsergebnisse objektivierbar sind. Das initiale Zielsystem ist bekannt, da Kenntnisse darüber gewonnen werden sollen, ob eine geforderte Schaltung des Manöverplans mit dem jeweiligen Getriebedatenstand realisierbar ist. Der sich daraus ableitende synthetische Testfall ist objektivierbar, da es sich um eine boolesche Abfrage handelt. Im vorgestellten Beispiel (Zug-

Hochschaltung in M) wurde der synthetische Testfall so implementiert, dass die manuelle Schaltung dem Fahrermodell erst aufgeprägt wird, wenn sowohl die geforderte Drehzahl erreicht als auch die Tip-Erlaubnis durch die Schaltstrategie erteilt wurde. Für die Ergebnisanalyse wird die Motordrehzahl zu diesem Zeitpunkt ausgelesen und mit der Drehzahlvorgabe des Manöverkatalogs abgeglichen. Liegt die Drehzahl nicht im Bereich der Zieldrehzahl des Manöverkataloges inklusive eines durch den Anwender definierten Toleranzbandes, so kann die Schaltung an dem vorgegebenen Betriebspunkt nicht ausgeführt werden. Die Berücksichtigung eines Toleranzbandes ist angebracht, da in den anschließenden, realen Fahrversuchen die vorgegebenen Drehzahlen nicht exakt durch die Fahrer angefahren werden können. Eine Abweichung ist demnach im Rahmen der menschlichen Streuung und sollte bei der Analyse der Simulationsergebnisse berücksichtigt werden. Im Anschluss an die Ergebnisanalyse ist es unabdingbar, die gewonnenen Informationen so aufzuarbeiten, dass sie für die Applikateure ohne zusätzlichen Aufwand nutzbar sind. Das bedeutet im vorliegenden Kontext, dass die nicht realisierbaren Schaltungen in dem beschriebenen Manöverkatalog automatisiert zugeordnet und kenntlich gemacht werden. Dazu werden bereits im Rahmen der Generierung der synthetischen Fahrmanöver anhand des vorliegenden Manöverkatalogs nicht nur die Informationen bzgl. Fahrpedal und Drehzahl ausgelesen, sondern auch die dazugehörigen Bereiche innerhalb des Manöverkatalogs. Dies ermöglicht eine nachträgliche, automatisierte Zuordnung der Ergebnisse in die entsprechenden Zellen. Die resultierende Tabelle für Zug-Hochschaltungen in M ist in Abbildung 8 beispielhaft dargestellt. Anhand dieser ist zu erkennen, dass die Anzahl der final zu validierenden Schaltungen (entspricht den weißen, mit Noten zu füllenden Zellen) im Vergleich zu Abbildung 2 signifikant reduziert wurde.

Zughochschaltungen in Normal in M		1000 1/min	2000 1/min	3000 1/min	4000 1/min	5000 1/min	6000 1/min
80% FP	1-2						
	2-3						
	3-4						
	4-5						
	5-6						
	6-7						
	7-8						

Abb. 8: Finaler Manöverkatalog für Zug-Hochschaltungen in Normal in M [Grau markierte Zellen: Nicht fahrbare Schaltungen eines beispielhaften Derivates]

### 5 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte am Beispiel der dynamischen Kreisverkehrfahrt mit anschließender Konstantfahrt gezeigt werden, dass synthetische Testfälle genutzt werden können, um mittels Simulationen bestehende Testfälle der Getriebeapplikation zu validieren. Die Ergebnisse der Simulation auf Basis synthetisch generierter Testfälle sind vergleichbar mit Realfahrzeugmessungen. Darüber hinaus wurde dargestellt, dass bei der Wahl der Testfälle mit objektiv quantifizierbaren Zielgrößen eine automatisierte Analyse der Ergebnisse möglich ist. Somit kann der gesamte Workflow automatisiert und ohne Nutzerinteraktion durchgeführt werden. Eine maximale Nutzerfreundlichkeit ist folglich gegeben. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen konnte gezeigt werden, dass der vorgestellte Ansatz, neben der Validierung ausgewählter Testfälle, auch zur Effizienzsteigerung der Validierung der Schaltqualität genutzt werden kann. Da in Abhängigkeit des zu validierenden Fahrzeuges nicht immer alle der gelisteten Schaltungen angefahren werden können, werden synthetische Testfälle erzeugt, um bestehende, globale Manöverkataloge zu plausibilisieren. Um eine maximale Nutzerfreundlichkeit und Effizienzsteigerung umzusetzen, erfolgt die Parametrierung der Testfälle direkt aus dem Manöverkatalog. In der sich anschließenden, automatisierten Analyse werden die Simulationsergebnisse so aufbereitet, dass sie für den Anwender direkt nutzbar sind. Am konkreten Beispiel bedeutet das, dass die Schaltungen, welche mit dem zu validierenden Fahrzeug nicht realisierbar sind, im Manöverkatalog kenntlich gemacht werden.

Initial ist der vorgestellte Ansatz zur Effizienzsteigerung der Schaltqualitätsvalidierung für Fahrversuche auf Teststrecken mit physischen Prototypen entwickelt wurden. Im Kontext des Frontloadings der Entwicklung- bzw. Validierungsaktivitäten und dem damit verbundenen Transfer von Validierungsaktivitäten auf alternative Validierungsumgebungen ist dieser Ansatz aber auch als probates Hilfsmittel nutzbar. Zukünftig soll bspw. die Validierung der Schaltqualität von der Straße auf Gesamtfahrzeugprüfstände verlagert werden. Um den gesamten Manöverkatalog automatisiert auf einem Prüfstand fahren zu können, bedarf es nicht nur Wissen darüber, ob eine Schaltung prinzipiell realisierbar ist, sondern auch, welcher Zielgang bei dem ausgeführten Manöver (z.B. Mehrfach-Zug-Rückschaltungen nach Tip-In) eingelegt wird. Erst das Wissen über den von der Schaltstrategie

geforderten Zielgang ermöglicht eine vollständig automatisierte Validierung des Manöverkatalogs. Ohne dieses Wissen kann kein Manöverplan erstellt werden, für welchen sichergestellt ist, dass alle geforderten Schaltungen angefahren werden. Der vorgestellte Ansatz zur Generierung synthetischer Testfälle mit anschließender, automatisierter Ergebnisanalyse kann dazu einen wertvollen Beitrag leisten.

## 6 Literatur

- [1] *Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S. et al.*: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: *Lindemann, U.* (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, 2016, S. 541-568.
- [2] *Albers, A.; Behrendt, M.; Ott, S.*: Validation - Central Activity to Ensure Individual Mobility. In: : Automobiles and sustainable mobility – Proceedings of the FISITA 2010 World Automotive Congress, Budapest, Hungary, May 30 - June 4, 2010, S.I., 2010.
- [3] *Albers, A.*: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: : Proceedings of the TMCE 2010, Ancona, Italien, 2010.
- [4] *Fischer, R.; Küçükay, F.; Jürgens, G. et al.*: Das Getriebebuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [5] *Baar, R.; Baumgarten, H.; Beck, M. et al.*: Antriebe. In: *Pischinger, S.; Seiffert, U.* (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, ATZ / MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016, S. 254-564.
- [6] *Gruhle, W.-D.*: Steuerung und Regelung von Automatikgetrieben. In: *Isermann, R.* (Hrsg.): Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe – Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe, ATZ / MTZ-Fachbuch. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2010, S. 288-305.
- [7] *Reif, K.*: Automobilelektronik – Eine Einführung für Ingenieure ; 36 Tabellen, ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2009.
- [8] *Matros, K.; Schille, F.; Behrendt, M. et al.*: Manöverbasierte Validierung von Hybridantrieben. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 117 (2015), Heft 2, S. 64-71.
- [9] *Aigner, J.*: Zur zuverlässigen Beurteilung von Fahrzeugen – The Reliable Evaluation of Motor Vehicles. In: : Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), 9/1982. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 1982, S. 447-450.
- [10] *Dylla, S.*: Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der subjektiv erlebten Schaltbetätigungsqualität von Fahrzeugen mit manuellem Schaltgetriebe. Karlsruhe, KIT, Diss., 2009, Forschungsberichte IPEK Heft 42,, 2009.

# Einfluss von Abweichungen der zugrundeliegenden Faserorientierungen auf die Struktursimulation von kurzfaserverstärkten Kunststoffen

L. Veltmaat (Volkswagen AG)

H.-J. Endres, F. Bittner (Leibniz Universität Hannover, Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik)

## 1 Zusammenfassung

Das Materialverhalten kurzfaserverstärkter Kunststoffe ist sehr wesentlich abhängig von der Orientierung der Verstärkungsfasern. Die Faserorientierungen werden von der Strömung der Schmelze beim Spritzgussprozess bestimmt, sodass der Herstellprozess in der Berechnung des strukturemechanischen Verhaltens berücksichtigt werden muss. Bei der Simulation von kurzfaserverstärkten Spritzgussbauteilen hat sich die integrative Simulation etabliert. Dabei wird durch eine Spritzgussimulation die Faserorientierung numerisch prognostiziert, bevor auf diesem Ergebnis aufbauende Struktursimulationen durchgeführt werden.

Durch die Komplexität dieses Vorgehens ergibt sich die Fragestellung, wie hoch die Prognosegüte der Faserorientierungen sein muss, um ein robustes Ergebnis zu erhalten. Dabei geht die Faserorientierung in vielen Fällen sowohl in die Kalibrierung des verwendeten Materialmodells in der Struktursimulation, als auch in die Struktursimulation selbst ein und hat damit einen signifikanten Einfluss auf das erzielbare Ergebnis.

Um diese Fragestellung zu untersuchen, wurden Charakterisierungsversuche mit verschiedenen Belastungen für ein glasfaserverstärktes Polypropylen durchgeführt und mittels der integrativen Simulation nachgebildet. Für die Bestimmung des Faserorientierungstensors wurden neben  $\mu$ -CT-Messungen kommerzielle Tools zur Spritzgussimulation verwendet, welche sich in ihren Ergebnissen voneinander unterscheiden. Bereits geringe Unterschiede der simulativ ermittelten Faserorientierungen bewirken deutliche Abweichungen hinsichtlich des mechanischen Verhaltens in der Struktursimulation. Insbesondere ist das Verhalten sensitiv hinsichtlich der vorliegenden Belastungsart wie einachsiger Zug oder Biegung.

## 2 Einleitung

Die Methodik der integrativen Simulation zielt darauf ab, Einflüsse von Fertigungsprozessen auf das mechanische Verhalten verschiedener Materialien zu berücksichtigen. Im Kontext von kurzfaserverstärkten Kunststoffen können dadurch eigenschaftsbestimmende Faserparameter wie Faserorientierung, -verteilung und -volumenanteil orts aufgelöst abgeschätzt und in der Struktursimulation eingebunden werden [1]. In der vorliegenden Untersuchung werden im Folgenden nur die Faserorientierungen betrachtet.

Die Verstärkungsfasern fließen bei Spritzgießprozessen mit der flüssigen Schmelze in die Kavität mit vorgegebener Formgeometrie. Die sich ausbildende Strömung bewirkt eine Ausrichtung der Fasern. Moderne Simulationsprogramme können den Füllvorgang abbilden und die dabei resultierende Faserorientierung abschätzen. Durch Effekte wie Kristallisation, Abkühlung und Erstarren sowie Schwinden der Schmelze, Wechselwirkungen zwischen Fasern und Schmelze, Schmelze und Werkzeugwand sowie auch der Fasern untereinander und der überlagerten temperatur-, druck- und schergeschwindigkeitsabhängigen Matriceigenschaften ist diese Modellierung eine große Herausforderung. Es ist bei Verwendung dieser Ansätze daher stets von einer Abweichung von der real vorliegenden Faserorientierung auszugehen. [2]

Basierend auf Abschätzungen der Faserorientierungen können in der integrativen Simulation die homogenisierten Materialeigenschaften bestimmt werden, sodass eine explizite geometrische Modellierung der Faserverstärkungen in der Struktursimulation nicht mehr notwendig wird. Dadurch kann die erforderliche Rechenzeit deutlich reduziert werden. Homogenisierungsmethoden berechnen Materialmodelle für den Komposit ausgehend von den Eigenschaften der Rohmaterialien des Verbundwerkstoffs [3–5]. In vielen Produktentwicklungsprozessen sind diese Informationen nicht zugänglich, sodass ein *reverse Engineering* Ansatz eingesetzt wird. Dabei werden die Materialparameter der Rohmaterialien aus dem mechanischen Verhalten des Komposits zurückgerechnet. Neben Materialcharakterisierungen sind dazu Daten zur vorliegenden

Faserorientierung notwendig. Im letzten Schritt der integrativen Simulation wird das Materialmodell mit den ermittelten Faserorientierungen im Bauteil homogenisiert, sodass ein faserorientierungsabhängiges Materialverhalten in der Struktursimulation lokal zugewiesen wird.[1]

Aus dieser Vorgehensweise ergibt sich eine Sensitivität der erzielbaren Ergebnisqualität in Abhängigkeit von der Güte der zugrundeliegenden Faserorientierungen. Diese können sowohl das Materialmodell im *reverse Engineering*, als auch das Ergebnis der Struktursimulation beeinflussen. Prognosen aus der Prozesssimulationen weisen Modellungenauigkeiten auf. Ziel dieser Untersuchung ist es, deren Einfluss zu quantifizieren.

### 3 Methodik

#### 3.1 Theoretische Grundlagen

Spritzgussteile sind in den meisten Fällen flache, dünne Strukturen. Für diese Geometrien ergibt sich ein typisches Strömungsverhalten der Schmelze beim Spritzgießen. So prägt sich zwischen den kalten, starren Werkzeugwänden ein stetiges Geschwindigkeitsprofil aus, mit niedrigen Geschwindigkeiten in Randnähe und hohen Geschwindigkeiten in der Kanalmitte. Da die Verstärkungsfasern beim Einspritzen mit der Schmelze in das Werkzeug strömen, interagieren diese mit der Strömung. Das beschriebene Strömungsprofil sorgt dafür, dass die Enden der Fasern sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen und so einer Rotation unterliegen. In randnahen Bereichen, wo der Geschwindigkeitsgradient besonders ausgeprägt ist, führt diese Rotation zu einer Ausrichtung der Fasern in Fließrichtung. In diesem ausgerichteten Zustand besitzen beide Faserenden dieselbe Geschwindigkeit, sodass keine weitere Umlagerung mehr stattfindet. In der Mitte des Kanals ist der Geschwindigkeitsgradient weniger ausgeprägt, sodass hier keine Ausrichtung der Fasern in Fließrichtung stattfindet. Kurzfaserverstärkte Kunststoffe zeigen aufgrund dieser Phänomene eine geschichtete Faserorientierung. Eine einfache Beschreibung der Hauptorientierungsrichtung lässt somit wesentliche Aspekte außer Acht.

Die Beschreibung der Orientierung einer Faser im Raum wird anhand eines Vektors  $p$  beschrieben. Dieser ist definiert mit den Einträgen

$$\begin{aligned} p_1 &= \sin \theta \cos \phi \\ p_2 &= \sin \theta \sin \phi \\ p_3 &= \cos \theta. \end{aligned}$$

Dabei stellen die Winkel  $\theta$  und  $\phi$  die Orientierung der Faser im Raum dar. Für die kompakte Beschreibung der Orientierungsverhältnisse einer Vielzahl von Fasern in einem Gemisch aus Fasern und Kunststoff wird der Faserorientierungstensor verwendet. Dieser ist definiert als das Integral

$$A = \oint p p \Psi(p) dp,$$

wobei  $\Psi(p)$  die Orientierungsdichteverteilungsfunktion ist [6]. Auf Basis dieses Tensors können Faserorientierungen simulativ prognostiziert werden. Im nächsten Schritt der integrativen Simulation wird ein homogenisiertes Materialmodell bestimmt, welches die lokalen Faserorientierungen berücksichtigt.

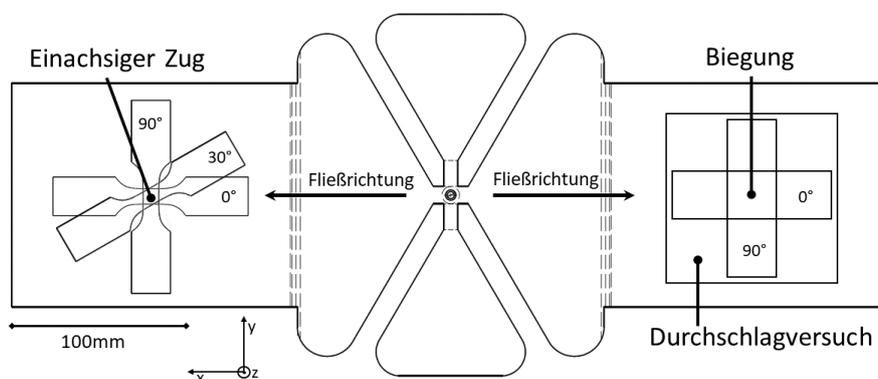


Abb. 1: Formgeometrie mit Probenplatten und verwendeten Versuchskörpern für Zugversuche, Biegeversuche und Durchschlagversuche.

Über den Homogenisierungsansatz nach Mori-Tanaka [3] können die elastischen Kennwerte eines unidirektionalverstärkten Materials berechnet werden. Darauf aufbauend, wird mittels des *Pseudo-Grain*-Verfahrens ein Materialmodell basierend auf der zuvor bestimmten Faserorientierung gebildet. Dafür wird die Gesamtheit aller Faserorientierungsrichtungen in  $N$  diskrete Richtungen aufgeteilt. Für jede dieser Richtungen kann nach Mori-Tanaka ein Materialmodell bestimmt werden, sodass diese über die Summe

$$\langle f(\mathbf{p}) \rangle \approx \sum_{i=1}^N \langle f(p) \rangle_i \Psi(\mathbf{p})_i \mathbf{p}.$$

miteinander verrechnet werden können. Darin beschreibt  $f$  einen Funktionswert und die Orientierungsdichteverteilungsfunktion  $\Psi$  wird aus dem Orientierungstensor zurück gerechnet.

### 3.2 Vorgehen

Gegenstand der aktuellen Untersuchung sind Probenplatten aus Polypropylen mit einem Glasfaser-Massenanteil von 30% (PP-GF30), die im Spritzguss hergestellt wurden. Anhand dieser Probenplatten werden die Faserorientierungen und das mechanische Verhalten des Kunststoffes charakterisiert sowie die Prognosegüte der Simulationen beurteilt. Die Geometrie der Probenplatte mit einer Dicke von 2,5 mm, sowie der Prüfkörper ist in Abbildung 1 dargestellt. Die untersuchten Lastfälle sind einachsige Zugversuche, Biegeversuche sowie Durchschlagversuche.

Anschließend wird das mechanische Verhalten der integrativen Simulation mit experimentellen Daten verglichen. In den entsprechenden Struktursimulationen wird ein zuvor durch *reverse Engineering* kalibriertes Materialmodell mit verschiedenen Faserorientierungsdaten eingesetzt. Das *reverse Engineering* beschreibt den Ansatz zur Kalibrierung eines Materialmodells ohne genaue Kenntnis der Eigenschaften der beiden Rohmaterialien Glasfaser und Kunststoff. Durch einen Abgleich von FEM-Simulationen mit entsprechenden Experimenten kann in einem iterativen Vorgehen ein optimales Materialmodell bestimmt werden. In dieser Untersuchung werden Zugversuche genutzt, um die Modelle zu kalibrieren. Dabei werden Faserorientierungsdaten herangezogen, die einerseits mittels 3-dimensionaler  $\mu$ -CT-Messungen in exemplarischen Probenbereichen und andererseits durch Simulationen des Spritzgießprozesses generiert wurden. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten lässt Rückschlüsse auf die notwendige Qualität der Faserorientierungsdaten zu. Das Vorgehen lässt sich zusammenfassen zu:

1. Bestimmung der Faserorientierung in der Probenplatte
  - a.  $\mu$ -CT-Messung
  - b. Spritzgussimulation
2. Charakterisierung des Materialverhaltens:
  - a. Zugversuche mit unterschiedlichen Probenorientierungen
  - b. 3-Punkt-Biegeversuch
  - c. Durchschlagversuch
3. Kalibrierung des Materialmodells
4. Anwendung des kalibrierten Materialmodells in Struktursimulation mit Berücksichtigung der Faserorientierung aus
  - a.  $\mu$ -CT-Messung
  - b. Spritzgussimulation
5. Vergleich von Experiment und Simulation

### 3.3 Bestimmung der Faserorientierung

Faserorientierungen werden in dieser Untersuchung über Tensoren angegeben [6]. Ein 8 mm x 8 mm großer Bereich in der Mitte der Probenplatten wird durch  $\mu$ -CT mit einer Voxelauflösung von 5,9  $\mu$ m am Fraunhofer WKI in Hannover untersucht. Aus den resultierenden Aufnahmen werden Faserorientierungen bestimmt.

Neben den  $\mu$ -CT-Untersuchungen werden Simulationen des Spritzgießvorgangs durchgeführt. Dabei werden drei verschiedene kommerzielle Softwaretools (Sim.1 – Sim.3) eingesetzt.

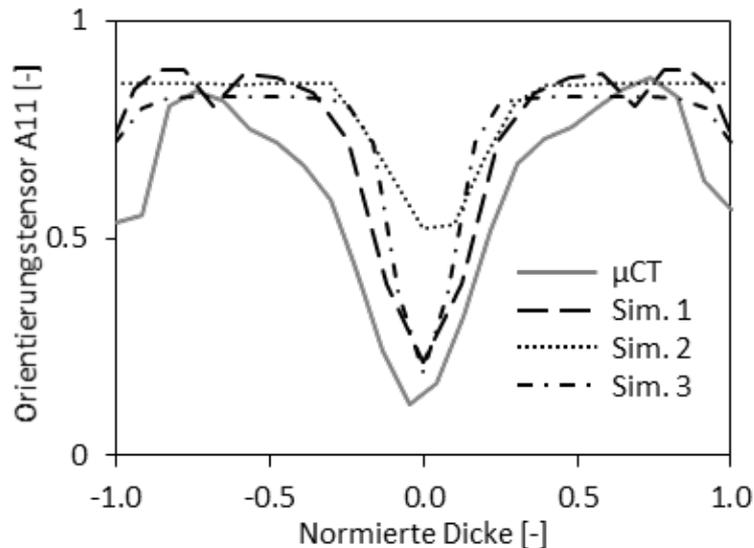


Abb. 2: Einträge A11 des Faserorientierungstensors in der Mitte der Probleplatte aus  $\mu$ CT-Messung und Simulationsmodellen.

Die so ermittelten Faserorientierungen in der Plattenmitte sind in Abbildung 2 dargestellt. Der A11 Eintrag des Faserorientierungstensors ist über die Dicke der Platte aufgetragen. Dieser Wert entspricht dem Anteil der Fasern, die in x-Richtung in Abbildung 1 und somit in Fließrichtung der Schmelze ausgerichtet sind. Diese Ergebnisse entsprechen qualitativ den in der Praxis beobachteten Strukturen in Spritzgussbauteilen, da die für diese Materialien typische Schichtstruktur der Faserorientierung erkennbar ist. Auch das Niveau des Orientierungsgrades kann von allen Simulationen gut nachgebildet werden, wenngleich sich kleine Unterschiede zeigen.

Darüber hinaus ist erkennbar, dass die Simulationsergebnisse im Detail von den  $\mu$ -CT-Untersuchung abweichen. So zeigt der  $\mu$ -CT Messung einen deutlichen Abfall der Orientierung in 1-Richtung an der äußersten Randschicht. Dieser ist in den Simulationen weniger stark bzw. gar nicht ausgeprägt. Zudem ist in der  $\mu$ -CT-Messung nach einem Maximum nahe dem Rand ein stetiger Abfall der Orientierung hin zur Plattenmitte erkennbar. Dieser resultiert aus dem unmittelbaren Einfrieren der Schmelze an der kalten Werkzeugwand, während darunter in der weiterhin fließenden Schmelze die beschriebene Faserorientierung abläuft. Die simulierten Orientierungsverläufe zeigen dagegen ein weitgehend konstantes Niveau in den Randschichten.

#### 4 Anwendung der Faserorientierung in Struktursimulationen

Das anhand von einachsigen Zugversuchen und  $\mu$ -CT-Faserorientierungsdaten kalibrierte Materialmodell wird in den Struktursimulationen, welche die durchgeführten Charakterisierungsversuche nachbilden, angewendet. Die homogenisierten Materialmodelle basieren dabei auf den in Abbildung 2 dargestellten Faserorientierungstensors. Dabei wird eine konstante Faserorientierung über die Fläche der Proben angenommen, sodass die Faserorientierungen lediglich in Dickenrichtung entsprechend der gezeigten Orientierungstensors variieren.

Die Ergebnisse von Experimenten und Simulationen zeigt Abbildung 3. Es lässt sich anhand der einachsigen Zugversuche in Abbildung 3a) erkennen, dass das Material in Abhängigkeit von der Fließrichtung der Schmelze - wie erwartet - ein anisotropes Verhalten aufweist.

Der Vergleich mit den Simulationen zeigt, dass sich in Abhängigkeit von den verwendeten Orientierungstensors signifikante Unterschiede in den simulierten Materialantworten ergeben können.

Die größte Prognosegüte diesbezüglich liegt vor, wenn das Materialmodell mit den gemessenen Faserorientierungen aus der  $\mu$ -CT-Analyse verwendet wird. Dies entspricht letztlich dem *reverse Engineering* und ist Ergebnis der Optimierung des verwendeten Materialmodells auf Basis des  $\mu$ -CT Faserorientierungstensors.

Geringe Abweichungen in der Orientierung, wie beispielsweise aus Simulation 1, rufen hingegen bereits eine deutliche Abweichung im modellierten mechanischen Verhalten hervor. Insbesondere die 0°-Orientierung zeigt sich sensitiv hinsichtlich des verwendeten Orientierungstensors. Die größte Abweichung zeigt hier das Simulationsergebnis mit Verwendung des Orientierungstensors aus Simulation 2. Im Vergleich mit Abbildung 2 ist erkennbar, dass dieser Faserorientierungstensor am stärksten vom  $\mu$ -CT-Tensor abweicht. Somit schlagen sich Unterschiede in den verwendeten Faserorientierungen direkt im mechanischen Verhalten nieder.

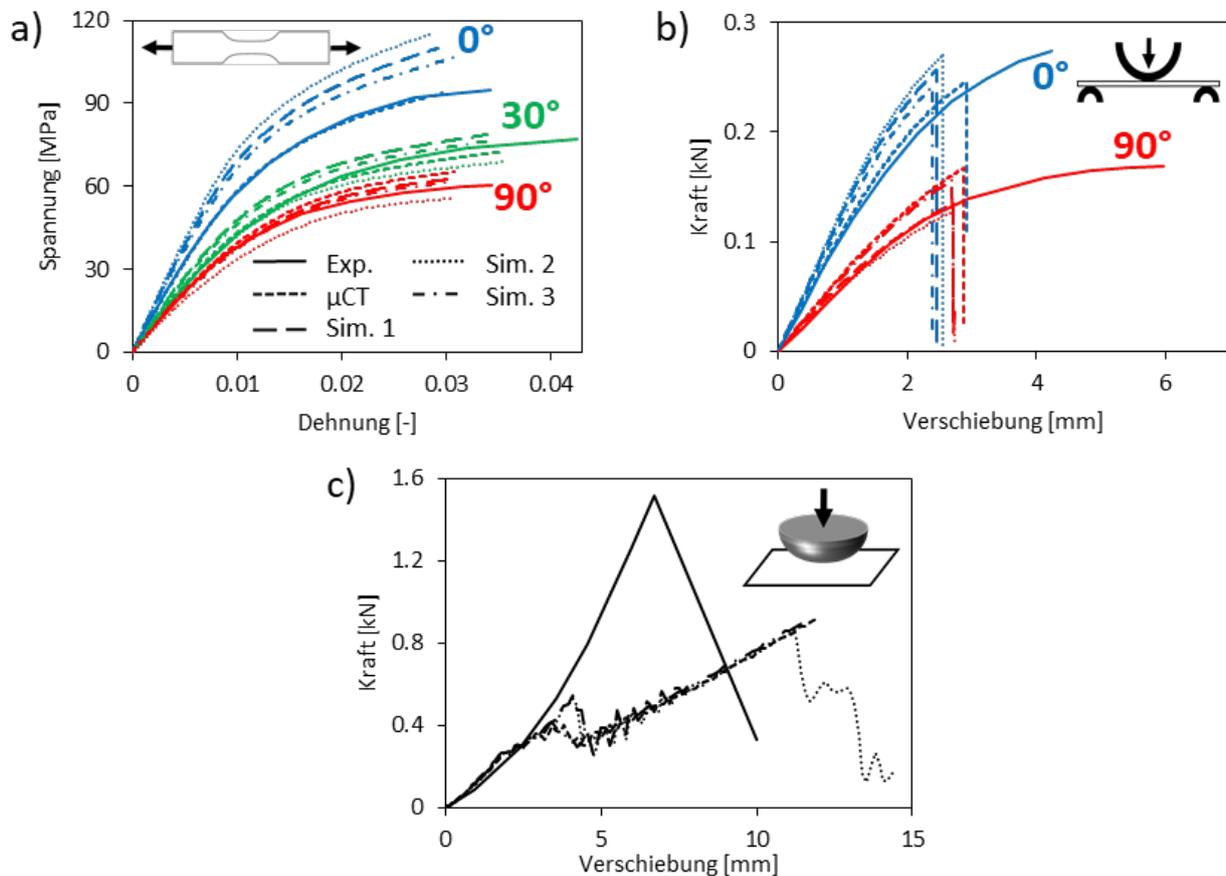


Abb. 3: Ergebnisse aus Versuch und Simulation mit verschiedenen Faserorientierungstensen. a) einachsiger Zug b) Biegeversuch c) Durchschlagversuch

Die Zugversuche in 30°- und 90°-Orientierung sind weniger sensitiv hinsichtlich der verwendeten Faserorientierungstensen. Zwar ergibt sich auch hier eine erkennbare Abhängigkeit vom verwendeten Faserorientierungstensor, jedoch ist die Spreizung zwischen den Ergebnissen weniger stark ausgeprägt. Vor dem Hintergrund, dass anteilig weniger Fasern in die jeweilige Belastungsrichtung orientiert sind, ist dieser Umstand plausibel. Setzen Kräfte quer zur Faserrichtung am Verbundwerkstoff an, treten die Eigenschaften der Kunststoffmatrix verstärkt in den Vordergrund. Diese sind isotrop und weitestgehend unabhängig von den Faserverstärkungen. Somit nähern sich die Kurvenverläufe in 30°- und 90°-Richtung bei unterschiedlichen Faserorientierungsdaten stärker einander an. Das Materialversagen ist in allen Zugversuchen hingegen weitestgehend unabhängig vom verwendeten Faserorientierungstensor.

Im Biegeversuch (Abbildung 3b)) konnten die Simulationen das Versagen nicht vollständig reproduzieren, da die Modelle deutlich zu früh versagen. Anders als im Zugversuch wurde das Materialmodell nicht hinsichtlich dieser Belastungsart optimiert, sodass diese Unterschiede bei einer detaillierteren Materialkalibrierung reduziert werden könnten. Analog zum Zugversuch zeigt sich jedoch auch hier eine Abhängigkeit der Materialantwort vom angewendeten Orientierungstensor. Wieder ist die 0°-Richtung sensitiver hinsichtlich der Faserorientierungen. Im Vergleich mit den Zugversuchen zeigt sich im 0°-Biegeversuch ein äquivalentes Verhältnis der Simulationen untereinander wie im 0°-Zugversuch. In der 90°-Richtung hingegen ergeben sich deutliche Differenzierungen zwischen Biege- und Zugversuch. Während die Simulation 3 im 90°-Biegeversuch, wie im 90°-Zugversuch, sehr nah an dem Verlauf mit  $\mu$ -CT-Tensor liegt, weicht die Simulation 1 deutlich ausgeprägter vom Verhältnis im

Zugversuch ab. Demnach variiert die Abhängigkeit vom Orientierungstensor in Zug- und Biegeversuch. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung sind die diskutierten Schichtstrukturen der Faserorientierung. Bei Zugversuchen ist die Dehnung über den Querschnitt konstant, während beim Biegeversuch insbesondere die Randschichten großen Dehnungen ausgesetzt sind. Somit fallen die Schichten der Faserorientierung unterschiedlich stark ins Gewicht bei der Berechnung der Materialantwort. Insbesondere von der Realität abweichende Randfaserorientierungen führen daher bei der Simulation des Biegeverhaltens zu größeren Unterschieden der jeweils resultierenden Werte.

Der Durchschlagversuch in Abbildung 3c) zeigt keine wesentliche Abhängigkeit des Modells vom verwendeten Orientierungstensor. Wie im Biegeversuch tritt das reale Versagen früher ein, als die Vorhersage der Simulationen ergibt, was durch eine geeignete Kalibrierungsmethode verbessert werden kann.

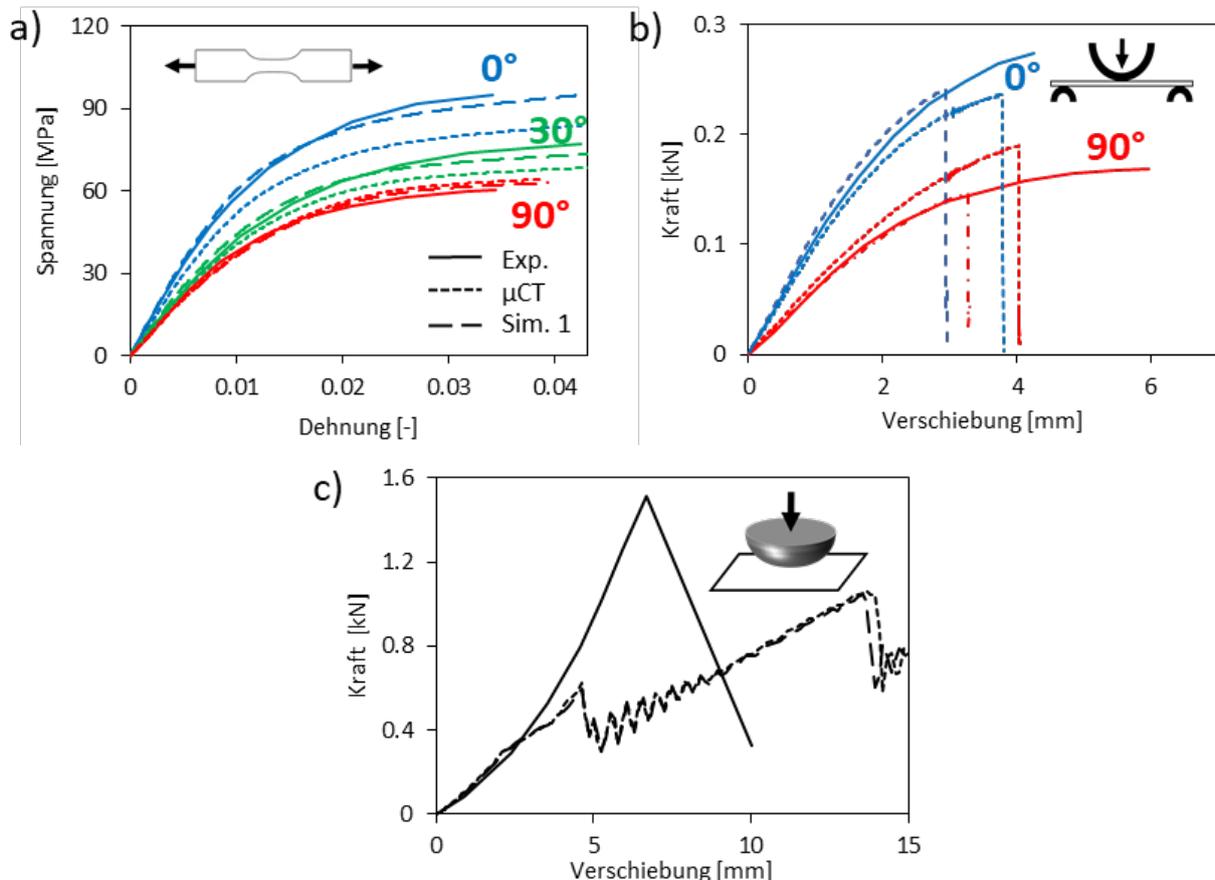


Abb. 4: Ergebnisse aus Versuch und Simulation mit auf Basis der Spritzgussimulation 1 kalibriertem Materialmodell. a) einachsiger Zug b) Biegeversuch c) Durchschlagversuch

## 5 Kalibrierung von Materialmodellen auf Basis von simulierten Faserorientierungen

Neben der  $\mu$ CT-Messung können auch simulierte Faserorientierungen als Basis für die Materialkalibrierung herangezogen werden. Dieser Weg ist in vielen Fällen pragmatisch, da eine  $\mu$ CT-Messung demgegenüber mit höheren Kosten verbunden ist. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage nach der Prognosegüte der so kalibrierten Materialmodelle.

In dieser Studie wurde ein weiteres Materialmodell erstellt, wobei die Faserorientierungsdaten aus der Spritzgussimulation 1 stammen. Entsprechend nehmen die Materialparameter im Modell andere Zahlenwerte als zuvor an, um die Versuchsdaten aus den einachsigen Zugversuchen optimal zu treffen.

In Abbildung 4 sind die Simulationsergebnisse mit diesem Materialmodell dargestellt. Dabei werden in den Simulationen Faserorientierungstensoren aus der  $\mu$ CT-Messung sowie aus Simulation 1 verwendet. In Abbildung 4 a) ist zu erkennen, dass, anders als mit dem in Abschnitt 4 getesteten Materialmodell, die Simulation mit dem Orientierungstensor aus Simulation 1 das experimentelle Ergebnis besser reproduzieren kann als mit dem  $\mu$ CT-

Ergebnis. Wieder ist es insbesondere die 0°-Richtung, die besonders sensitiv hinsichtlich des verwendeten Orientierungstensors ist. Während im obigen Fall die Spreizung zwischen den drei Orientierungsrichtungen durch die simulierten Orientierungstensen überschätzt wird, so wird sie hier durch den  $\mu$ CT-Orientierungstensor unterschätzt. Äquivalent dazu verhält sich der Biegeversuch in Abbildung 4. Das Ergebnis im Durchschlagversuch ist wie zuvor weitgehend unabhängig vom verwendeten Orientierungstensor.

## 6 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, wie sich unterschiedliche Faserorientierungen auf das mechanische Verhalten unter verschiedenen Lasten auswirken. Unter einachsigem Zug wird der Grad der resultierenden Anisotropie maßgeblich durch die Faserorientierung bestimmt. Bereits kleine Abweichungen vom in der Kalibrierung des Modells verwendeten Faserorientierungstensor beeinflussen die Abbildung der Anisotropie signifikant.

Für eine robuste Materialkalibrierung sind daher Messungen des Materialverhaltens unter verschiedenen Belastungsrichtungen und verlässliche Faserorientierungsdaten notwendig. Dies zeigt sich besonders im Biegeversuch, wobei sich der Effekt der Anisotropie im Vergleich zum Zugversuch unterscheidet. Es ist kein eindeutiger Zusammenhang bei der Abweichung zwischen Versuch und Simulation in der 90°-Belastung bei Zug und Biegung erkennbar. Eine allgemeingültige Materialkalibrierung hinsichtlich beider Belastungsarten ist somit nur mit realitätsnaher Faserorientierung möglich.

Der Durchschlagversuch zeigt für die Bewertung eines Materialmodells nur eine bedingte Eignung. Der Kraft-Verschiebungsverlauf weist in diesem Versuch keine Abhängigkeit vom verwendeten Orientierungstensor auf. Kann der Verlauf durch die Orientierungen aus Simulation 2 hier ähnlich gut berechnet werden wie mit  $\mu$ -CT-Daten, so unterscheiden sich die modellierten Materialeigenschaften unter einachsigem Zug doch maßgeblich. Das Versagensmodell hingegen sollte bedingt durch die aufgezeigte Sensitivität mithilfe des Durchschlagversuchs validiert werden.

Um ein breiteres Bild zu den Eigenschaften von kalibrierten Materialmodellen zu erhalten, wurden zudem Materialmodelle auf Basis von simulierten Faserorientierungstensen bestimmt. Die Anwendung dieser Modelle zeigt, dass auch hier in Abhängigkeit des verwendeten Faserorientierungstensors eine hohe Prognosegüte erreicht werden kann. Jedoch sind in diesem Fall, anders als zuvor, Simulationen mit Faserorientierungstensor aus Spritzgussimulationen näher an den experimentellen Kurven. Entgegen der obigen Beobachtung, bewirkt hier der  $\mu$ -CT-Tensor eine stärkere Abweichung des mechanischen Verhaltens. Demzufolge ist die realitätsnahe Abbildung von Faserorientierungen keine hinreichende Bedingung für eine sichere Modellierung des mechanischen Verhaltens. Vielmehr ist das Zusammenspiel von Materialmodell und Faserorientierung entscheidend. Das Materialmodell kann nur dann gute Ergebnisse liefern, wenn bei der Kalibrierung des Modells Faserorientierungsdaten verwendet wurden, die in konsistentem Verhältnis zur real vorliegenden Faserorientierung stehen. Werden für die Kalibrierung Faserorientierungen verwendet, welche die Realität ideal abbilden, bei der Anwendung in der Auslegung von Bauteilen hingegen ungenauere Orientierungsdaten, sind Abweichungen in der Modellierung des mechanischen Verhaltens zu erwarten. Diese Untersuchung konnte darüber hinaus zeigen, dass dieser Zusammenhang auch umgekehrt gültig ist – eine ideale Faserorientierung in der Struktursimulation führt nur dann zu realitätsnahen Ergebnissen, wenn in der Materialkalibrierung ebenfalls genaue Faserorientierungen verwendet werden.

Neben der beschriebenen Problematik bei der Materialkalibrierung ergeben sich auch wesentliche Herausforderungen für die Anwendung integrativer Simulationstechniken im Produkt-entwicklungsprozess. Untersuchungen von Spritzgussimulationen haben gezeigt, dass die Prognosegüte bei unterschiedlichen Prozessbedingungen oder Positionen im Bauteil variieren können [7–9]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung führen zu dem Schluss, dass für die Verwendung eines Materialmodells prognosesichere Faserorientierungsdaten verwendet werden müssen. Diese Daten müssen konsistent sein mit der Orientierung, die zur Kalibrierung des Modells verwendet wurde.

## 7 Literatur

- [1] Stommel M, Stojek M, Korte W. FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. 2nd ed. München: Carl Hanser Verlag; 2018.
- [2] Zheng R, Tanner RI, Fan X-J. Injection Molding: Integration of Theory and Modeling Methods. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2011.

- [3] Mori T, Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica* 1973;21(5):571–4.
- [4] Pierard O, Friebel C, Doghri I. Mean-field homogenization of multi-phase thermo-elastic composites: A general framework and its validation. *Composites Science and Technology* 2004;64(10-11):1587–603.
- [5] Jain A, Lomov SV, Abdin Y, Verpoest I, van Paepegem W. Pseudo-grain discretization and full Mori Tanaka formulation for random heterogeneous media: Predictive abilities for stresses in individual inclusions and the matrix. *Composites Science and Technology* 2013;87:86–93.
- [6] Advani SG, Tucker III CL. The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites. *Journal of Rheology* 1987;31(8):751–84.
- [7] Foss PH, Tseng H-C, Snawerdt J, Chang Y-J, Yang W-h, Hsu C-H. Prediction of fiber orientation distribution in injection molded parts using Moldex3D simulation. *Polym. Compos.* 2014;35(4):671–80.
- [8] Thi TBN, Yokoyama A, Hamanaka S, Yamashita K, Nonomura C. Numerical simulation of fiber interaction in short-fiber injection-molded composite using different cavity geometries. *AIP Conference Proceedings* 2016;1713(1):40006.
- [9] Cieslinski MJ, Wapperom P, Baird DG. Fiber orientation evolution in simple shear flow from a repeatable initial fiber orientation. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 2016;237:65–75.



Professional Simulation Engineer

It's Time  
to Get Certified

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



Join Us

WE ARE NAFEMS

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

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

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

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

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

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

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

Die Mitglieder sind:

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

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

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

Folgende Gruppen sind aktuell bei NAFEMS aktiv:

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

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

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

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

**Mitglieder erhalten unter anderem:**

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

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

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

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

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

Establish best practice in engineering simulation

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

Promote collaboration and communication

Act as an advocate for the deployment of simulation

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

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

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

## Why Join?

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

### Better Collaboration

#### BUILD LASTING BUSINESS ALLIANCES

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

#### EXCHANGE KNOWLEDGE & EXPERIENCE

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

#### LEARN ABOUT THE RESOURCES AVAILABLE

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

#### ENHANCE YOUR COMPANY'S VISIBILITY WORLDWIDE

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

### Increased Productivity

#### OPTIMIZE THE DESIGN PROCESS

Learn about potential pitfalls and pick up time saving techniques.

#### MINIMISE COSTLY PHYSICAL TESTING

Increase confidence in your company's engineering simulation capabilities.

### Improved Quality

#### BE COMMITTED TO THE HIGHEST STANDARDS

NAFEMS membership reinforces your focus on best practice.

#### BENCHMARK YOUR ORGANISATION'S SIMULATION PROCESS

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

### Enhanced Innovation

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

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

#### BE AT THE FOREFRONT

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

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

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

## Membership Levels

	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	<b>single site</b>	<b>single site</b>	<b>multiple named sites</b>	<b>all sites globally</b>
Copies of new NAFEMS Publications	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>multiple</b>	<b>multiple</b>
Copies of Benchmark Magazine	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>multiple</b>	<b>multiple</b>
Reduced Rates on NAFEMS Training	4	4	4	4
Discounted Attendance at all NAFEMS Events	4	4	4	4
Preferential Sponsorship rates at NAFEMS Events	4	4	4	4
Access to the PSE Competency Tracker	4	4	4	4
Discounted PSE Certification for all employees	4	4	4	4
Access to the NAFEMS Resource Centre	4	4	4	4
Members-Only Area of the NAFEMS Website	4	4	4	4
Participate in our Technical Working Groups	4	4	4	4
Use of the NAFEMS Member Logo on your Website	4	4	4	4
Free Places at NAFEMS Seminars and Conferences	<b>0</b>	<b>up to 4</b>	<b>multiple</b>	<b>multiple</b>
Company Details, Description and Links on nafems.org	8	4	4	4
Post your Press Releases and News on nafems.org	8	4	4	4
Promotion of your Events on nafems.org	8	4	4	4

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

## Technical Working Groups

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

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

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

### Technical working groups currently include:

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

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

## Nafems Events

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

### World Congress

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

### Conferences

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

### Seminar

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

### Webinars

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

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

## PSE

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

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

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



### THE PSE CERTIFICATION STANDARD

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

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

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

### PSE CERTIFICATION HAS BEEN DESIGNED TO:

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

NAFEMS Training

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

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

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

**QUALITY**

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

**VARIETY**

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

**FLEXIBILITY**

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

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

# Resource Centre

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

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

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

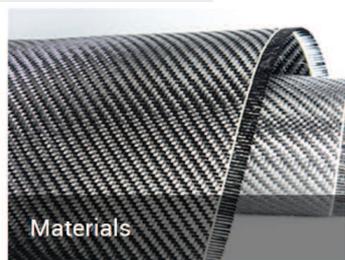
There are currently over 1,500 resources in the centre with this number growing weekly. NAFEMS Members have access to numerous types of resource as part of their membership, including presentations from previous events, conference papers, webinar archives, and much more.



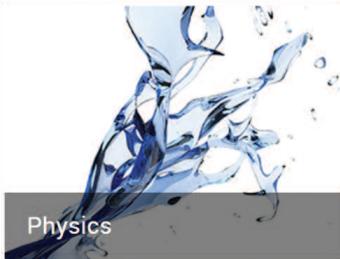
Analysis Management



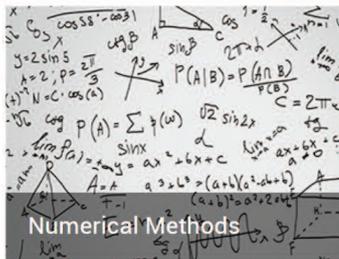
Industry & Products



Materials



Physics



Numerical Methods



All

## Nafems Publications

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

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

**BENCH  
MARK**

**e**library

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

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

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

Analysis Management Robust Design Durability Multi-Scale Multi-Body Additive Manufacturing Dynamics & Testing Simulation Data Management Optimization  
Methods Robust Design Durability Multi-Scale Additive Manufacturing Dynamics & Testing Simulation Data Management Optimization  
FEA Additive Nonlinear Durability Linear Acoustic  
Methods Multi-Scale Simulation Data Management  
CFD HPC Electromagnetics Optimization  
Stochastics Systems Modeling & Simulation HPC Robust Design  
Durability Dynamics & Testing Composites  
Verification & Validation Stochastics Methods Optimization Systems Modeling & Simulation  
Multiphysics Manufacturing Processes Simulation Data Management  
FSI Acoustics Analysis Management FEA CFD  
HPC Verification & Validation Simulation Data Management  
Analysis Management Uncertainty Quantification Nonlinear Multiphysics  
Linear Joints & Connections CFD  
FEA Composites CFD HPC FSI FEA  
Electromagnetics FSI Nonlinear Verification & Validation Multi-Scale  
FSI Interoperability Interoperability  
Nonlinear Linear Fatigue & Fracture Verification & Validation  
Materials Dynamics & Testing Manufacturing Processes FSI Multi-Body Joints & Connection  
Methods Nonlinear Multi-Body FSI Acoustics CFD Robust Design  
Fatigue & Fracture Stochastics Dynamics & Testing Electromagnetics FSI CF  
HPC FSI Material Systems Modeling & Simulation Joints & Connections Optimization  
FSI Methods Nonlinear Durability Stochastics HPC  
Nonlinear Multiphysics Joints & Connections Optimization

# We are NAFEMS



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

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