



# Online-Magazin

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

**Fachbeiträge**

**MULTIPHYSIK**

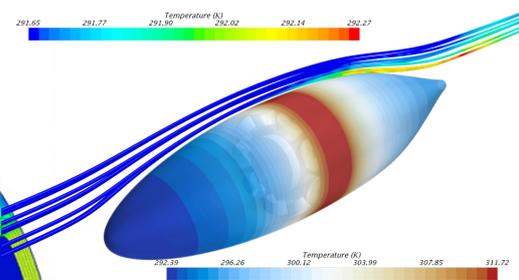
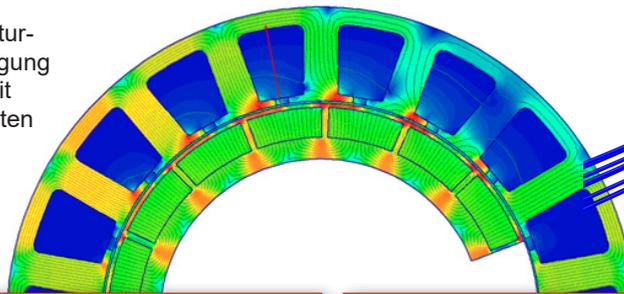
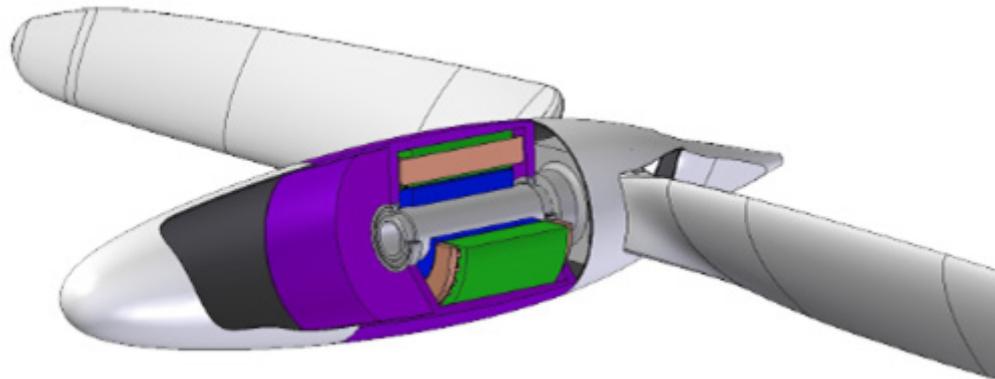
Entwicklung und Optimierung eines Elektromotors für kleine Luftfahrzeuge mittels Kopplung einer Motorauslegungssoftware und CFD

**MODELLUMSETZUNG**

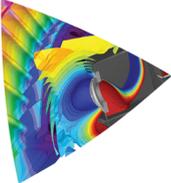
Ein Algorithmus zur automatisierten Modellbildung im Zustandsraum

**STRUKTUROPTIMIERUNG**

Nichtlineare dynamische Strukturoptimierung unter Berücksichtigung der Deformationsgeschichte mit differenzienbasierten äquivalenten statischen Lasten



**NAFEMS20**  
**DACH VIRTUELLE KONFERENZ**  
 Fachkonferenz für Berechnung & Simulation im Engineering  
 13. - 14. Oktober 2020, Online



Vortragsprogramm im Heft! Kostenlose Teilnahme für ALLE NAFEMS Mitglieder ohne „seminar credit“ Verrechnung!

**1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CAE INTEROPERABILITY 2020**  
 VMAP 19-20 Oct 2020 | Online



Vortragsprogramm im Heft!  
 Kostenlose Teilnahme!

**HYBRIDKONFERENZ**  
 Bitte reichen Sie Ihren Vortragstitel + kurzen Abstract bis 3. November ein !



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

incorporating the

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

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

Sponsoren dieser Ausgabe:



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

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

dieses Magazin informiert regelmäßig über Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete. Mit der Simulation wird versucht, Aussagen zu treffen über Auswirkungen von Aktionen, die man aus vielfältigen Gründen nicht – oder auch noch nicht – real ausführen möchte. Schon häufiger habe ich an dieser Stelle auf die zentrale Bedeutung der Modellbildung für die Simulation hingewiesen. Das gilt nicht nur für die numerische Analyse. So hat zum Beispiel Kirchhoff bereits 1850 ein analytisches Modell für die Verformung dünner Platten aufgestellt, das bis heute häufig mit Erfolg angewendet wird. Stetig wachsende Rechnerkapazitäten verführen nun dazu, die Modelle auszuweiten. Ging es zuvor darum, geringe Kopplungen von Einflüssen zu nutzen, um die Modelle zu vereinfachen, werden solche Kopplungen jetzt vermehrt berücksichtigt. Zu beobachten sind Entwicklungen in drei unterschiedliche Richtungen, alle mit dem Ziel, die Realität genauer abzubilden. Zum einen werden Modelle unterschiedlicher Detailliertheit (Mikro-, Meso- und Makro-Modelle) miteinander kombiniert. Damit lassen sich Auswirkungen von Inhomogenitäten auf das Gesamtverhalten studieren. Zudem werden unterschiedliche physikalische Effekte (Mechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik, Akustik) miteinander verknüpft, und die gegenseitige Beeinflussung unterschiedlicher Disziplinen (Chemie, Biologie, Medizin) wird berücksichtigt. Leitgedanke sollte immer sein, das Modell so detailliert wie nötig zu konzipieren, um die gewünschten Aussagen auch mit hinreichender Sicherheit treffen zu können; andererseits sollte das Modell aber so einfach wie möglich sein, um schnell und kostengünstig zu Ergebnissen zu kommen.



*Prof. Dr.-Ing.  
Klaus Rohwer*

Neben einer Vielzahl von Informationen zu Entwicklungen auf dem Gebiet der numerischen Simulation enthält dieses Heft drei Fachbeiträge, in denen die Modellbildung eine zentrale Rolle spielt. Der erste Beitrag untersucht die Auslegung eines elektrischen Flugzeugmotors unter Berücksichtigung der Motorkühlung. In einem multiphysikalischen Modell werden die elektromagnetischen Effekte durch eine Kombination aus analytischen Ansätzen und FEM berücksichtigt, während die thermischen und die aerodynamischen Probleme durch CFD gelöst werden. Der zweite Beitrag beschreibt einen Weg zur automatischen Modellerstellung. In vielen Fällen lässt sich die differential-algebraische Gleichung technischer Systeme in die Weierstraß-Normalform überführen und weist für jeden konsistenten Anfangswert eine eindeutige Lösung auf. Für Fälle, in denen das nicht zutrifft, wird in diesem Beitrag eine Methode zum automatisierten Aufstellen einer Zustandsdifferentialgleichung vorgestellt. Der dritte Beitrag beschreibt einen Lösungsansatz für die effektive Untersuchung des Crash-Verhaltens von Strukturen im Automobilbereich. Durch inkrementelle Bestimmung statisch äquivalenter Lasten kann das nichtlineare Verhalten besser approximiert werden.

Ich bin zuversichtlich, dass aus diesem Angebot auch für Sie etwas Interessantes dabei ist und wünsche Ihnen tiefere Einsichten und neue Erkenntnisse beim Lesen.

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



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



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



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



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



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

**NAFEMS Events**  
 Übersicht: Konferenzen, Schulungen, e-learnig Kurse .....5  
 NAFEMS Regionalkonferenzen 2020 .....6  
 NAFEMS World Congress 2021 - Call for Papers .....7  
 NAFEMS DACH Konferenz 2020.....9  
 VMAP International Conference on CAE Interoperability 2020.....17

**Analysis Agenda Survey**.....25

**NAFEMS Trainings**  
 Onsite Trainings und Übersicht.....26  
 Verification and Validation in Engineering Simulation .....28  
 Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie.....30  
 Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis.....31  
 Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation.....32  
 Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung.....33

**NAFEMS Literatur**  
 Invitation 2 Tender / Benchmark Magazin .....34

**Neuigkeiten** .....37

**Veranstaltungskalender** .....47

**Fachbeitrag: Multiphysik**  
**Entwicklung und Optimierung eines Elektromotors für kleine Luftfahrzeuge mittels Kopplung einer Motorauslegungssoftware und CFD**  
 J. Kott (Maccon GmbH); D. Grimmeisen (Cascade GmbH).....48

**Fachbeitrag: Modellumsetzung**  
**Ein Algorithmus zur automatisierten Modellbildung im Zustandsraum**  
 M. Herchenhan (Hochschule Kaiserslautern) .....56

**Fachbeitrag: Strukturoptimierung**  
**Nichtlineare dynamische Strukturoptimierung unter Berücksichtigung der Deformationsgeschichte mit differenzbasierten äquivalenten statischen Lasten**  
 J. Triller, L. Harzheim (Opel Automobile GmbH/Technische Universität Darmstadt); R. Immel (Opel Automobile GmbH).....74

**Über NAFEMS**  
 Übersicht und Ziele .....81  
 Mitglied werden .....83  
 Mitgliedsmodelle .....84  
 Technische Arbeitsgruppen .....85  
 Veranstaltungen .....86  
 PSE Zertifizierung .....8 / 87  
 Training .....88  
 Resource Centre .....89  
 Publikationen.....90

**Werbeanzeigen**  
 Beta CAE Systems.....38  
 Desktop Engineering / Win-Verlag .....44  
 FEMFAT Software .....40  
 Intes - Permas.....41  
 Meshfree - Fraunhofer ITWM.....42  
 MSC Software - Hexagon .....39  
 Prostep.....43  
 VMAP Projekt.....21

**Rückmeldefomulare**.....91

**Impressum**

**Editor-in-Chief**

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

**Redaktioneller Beirat**

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

**Redaktion**

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

**Gestaltung / Layout / Anzeigen**

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

**Bezugspreis / Aboservice**

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

**Anzeigenpreise**

Preisliste vom 01.01.2020

**Verteilung / Bezug**

Per e-mail an NAFEMS Datenbasis  
 DACH und als Download über [www.nafems.org](http://www.nafems.org). Bezug durch Aufnahme  
 in den Verteiler.

**Copyright © 2020, Werbos GbR.**

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

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

**ISSN 2311-522X**

## Konferenzen/Seminare in DACH

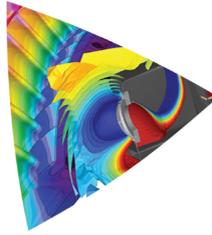
### NAFEMS20

DACH VIRTUELLE KONFERENZ

Fachkonferenz für Berechnung & Simulation im Engineering

13. - 14. Oktober 2020, Online

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



13.-14. Oktober 2020

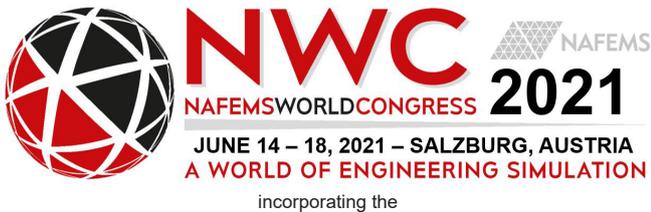
Online/virtuell



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

19.-20. Oktober 2020

Online/virtuell



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

14. - 18. Juni 2021

Hybrid / Salzburg

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

## Schulungen in DACH

**Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie**

2-tägig, Webex

[www.nafems.org/fkm20-3](http://www.nafems.org/fkm20-3)

27. - 28. Oktober

Online

**Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation**

2-tägig, Webex

[www.nafems.org/fem20-2](http://www.nafems.org/fem20-2)

19. Nov. + 26. Nov. 2020

Online

**Verification and Validation in Engineering Simulation**

2,5 Tage, Webex

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

09.-11. November

Online

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

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

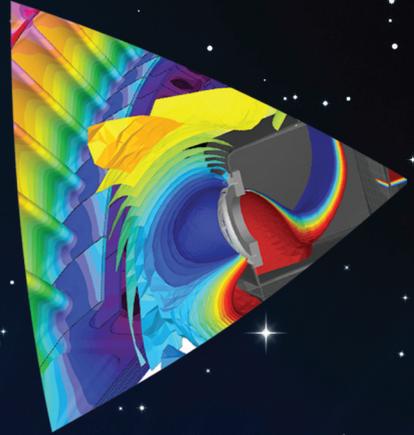
auf Anfrage

Online

NVH (in Vorbereitung)

Eine Beschreibung der Schulungsinhalte finden Sie auf Seiten 28 - 32. Weitere Schulungen und Kurse, die web-basiert (e-learning bzw. Webinare) oder ausserhalb der deutschsprachigen Region stattfinden, finden Sie unter [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events).

# NAFEMS20 Regional Conferences



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

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

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

# Call for Papers für die Hybridkonferenz



# nwC 2021

## NAFEMSWORLD CONGRESS

14-18 JUNE | SALZBURG | AUSTRIA

**A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION**

incorporating the

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

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

Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie zum Gelingen der Veranstaltung mit einem Vortrag und/oder mit der Teilnahme an der Ausstellung bzw. am Sponsoring beitragen würden.

Die Deadline zur Abgabe von Abstracts ist der 3. November 2020.





Professional Simulation Engineer

A New Standard for  
Simulation Engineers

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



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

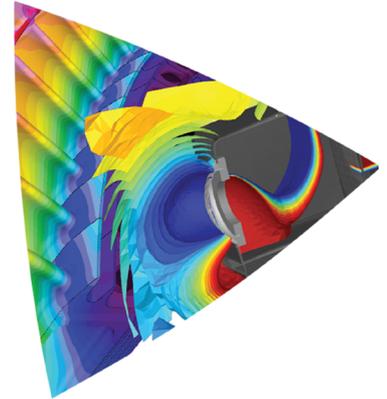
## Vortragsprogramm

# NAFEMS20

## DACH VIRTUELLE KONFERENZ

Fachkonferenz für Berechnung  
& Simulation im Engineering

13. - 14. Oktober 2020, Online



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



Platin Sponsor



Gold Sponsoren



Silber Sponsoren



Medienpartner



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

# EINLADUNG

NAFEMS DACH20 goes virtual!

Wir laden Sie herzlich zur 5. deutschsprachigen, nun virtuellen NAFEMS Konferenz vom 13. - 14. Oktober ein. Die alle zwei Jahre stattfindende Konferenz bietet Ihnen ein unabhängiges, übergreifendes und umfassendes Informationsangebot im Bereich der numerischen Simulationsmethoden – eine Plattform, auf der neue Techniken, Tools und „Best Practices“ präsentiert werden.

Es erwarten Sie interessante Plenarvorträge, Fachbeiträge von Anwendern verschiedener Softwareprodukte, von Softwareherstellern und Dienstleistern sowie eine virtuelle Hard- und Softwareausstellung.

Während der Vorträge haben Sie die Möglichkeit, über ein Chat-Fenster Fragen an den Vortragenden zu stellen und per E-mail direkt mit den Vortragenden zu kommunizieren. Da wir voraussichtlich viele parallele Vorträge haben werden, stehen Ihnen diese zeitversetzt und auch nach der Konferenz zur Verfügung.

Die Teilnahme ist offen für NAFEMS Mitglieder und Nichtmitglieder, wobei alle Mitarbeiter von NAFEMS Mitgliedsunternehmen im Rahmen ihrer Mitgliedschaft kostenlos teilnehmen. Möglichkeiten zur Anmeldung finden Sie unter [www.nafems.org/dach20](http://www.nafems.org/dach20).

Wir freuen uns sehr, Sie im Oktober virtuell begrüßen zu dürfen.

Ihr NAFEMS DACH Lenkungsausschuss,  
Albert Roger Oswald und das gesamte NAFEMS Team

## Virtuelle Fachausteller

 **em** engineering methods AG  
:em engineering methods AG

 **BETA** SIMULATION SOLUTIONS  
BETA CAE Systems

 **CASCATE**  
CASCATE

 **DASSAULT SYSTEMES**  
Dassault Systemés

 **DYNA** MORE  
DYNAmore

 **FEMFAT** software  
BY MAGNA POWERTRAIN  
Engineering Center Steyr

 **ENGINSOFT**  
EnginSoft

 **Fraunhofer** IGD  
Fraunhofer IGD

 **MESHFREE**  
Fraunhofer ITWM

 **gns**

GNS

 **GNS** Systems  
IT-Dienstleistungen für Engineering

GNS Systems

 **Prenscia**  
HBM Prenscia

 **HEXAGON** | **MSC** Software  
Hexagon / MSC Software

 **INTES**  
Intes

 **VMAP**  
ITEA3 VMAP Project

 **Microsoft**  
Microsoft

 **NAFEMS**  
NAFEMS

 **PROSTEP** integrate the future  
PROSTEP

 **rescale**  
Rescale

 **SIDACT** GmbH  
Sidact

 **TECHNIA** ADDNODE GROUP  
Technia

 **VOLUME GRAPHICS**  
part of Hexagon  
Volume Graphics

 **DIGITAL ENGINEERING**  
Win-Verlag / Digital Engineering

Falls Sie Interesse haben, selbst als Aussteller oder Sponsor teilzunehmen, finden Sie Unterlagen unter [www.nafems.org/dach20](http://www.nafems.org/dach20). Gerne beraten wir Sie auch persönlich – rufen Sie uns an unter +49 176 217 984 01.

**„Veranstaltungsort“**

Die Konferenz findet online statt. Etwa knapp eine Woche vor dem Beginn der Konferenz senden wir Ihnen Login-Informationen für die Konferenz-Online-Plattform zu. Sie müssen sich dort anmelden - einmal angemeldet, haben Sie Zugang zur Konferenz und zu allen Präsentationen. Bei wiederholten Einloggen müssen Sie nur unter „Already registered“ Ihre hinterlegte E-Mail Adresse angeben. Damit Sie schnell und einfach interessante Präsentationen finden können, haben wir Filter und ein Suchwerkzeug bereitgestellt.

**Konferenzteilnahmegebühren**

**Nicht-Mitglieder: 425,- Euro / Person zzgl. ges. MwSt.**  
**NAFEMS-Mitglieder: Die Teilnahme ist kostenlos für ALLE Mitarbeiter von NAFEMS Mitgliedsunternehmen ohne Verrechnung von seminar credits (Anmeldung erforderlich)!**

**Konferenzsprache**

Deutsch (einzelne Vorträge in englischer Sprache)

**Anmeldung / Bestätigung**

Bitte melden Sie sich mit dem Anmeldeformular oder Online unter [www.nafems.org/dach20](http://www.nafems.org/dach20) an. Sie erhalten eine Anmeldebestätigung.

**Über NAFEMS**

NAFEMS ist eine not-for-profit Organisation zur Förderung der sicheren und zuverlässigen Anwendung von Simulationsmethoden wie FEM, CFD, MKS, ... NAFEMS ist eine neutrale, von Software- und Hardwareanbietern unabhängige Institution. Sie vertritt die Interessen der Anwender numerischer Simulationsmethoden aus der Industrie, bindet Hochschulen und Forschungsinstitute in ihre Tätigkeit ein und hält Kontakt zu Systemanbietern. NAFEMS hat international über 1.400 Mitgliedsunternehmen und -Institutionen und ist seit 1996 in Deutschland präsent. Um die

Aktivitäten von NAFEMS im deutschsprachigen Raum neutral zu leiten und die nationalen Belange innerhalb von NAFEMS zu vertreten, wurde ein Lenkungsausschuss etabliert.

Die Mitglieder des NAFEMS DACH Lenkungsausschusses sind:

- Dr.-Ing. Werner Dirschmid - Consultant, Chairman
- Dr.-Ing. Albrecht Gill - Ansys Germany
- Dipl.-Ing. Gerhard Göß - Schaeffler Technologies
- Dr.-Ing. Reinhard Helfrich - Intes
- Dr.-Ing. Christian Hühne - DLR
- Dr.-Ing. Florian Jurecka - Dassault Simulia
- Prof. Dr.-Ing. Casimir Katz - Sofistik
- Dipl.-Ing. Jens Krämer - Festo
- Dr.-Ing. Ralf Meske - Federal-Mogul Nürnberg
- Dipl.-Ing. Werner Moretti - Schindler Elevator
- Dipl.-Ing. Eckardt Niederauer - Siemens PLM Software
- Dipl.-Ing. Joachim Noack - ZF Group
- Dipl.-Ing. Albrecht Pfaff - PDTEC
- Dr. rer. nat. Gerd Rapin - Volkswagen
- Dr.-Ing. Alois Starlinger - Stadler Altenrhein
- Dr. Alfred J. Svobodnik - MVOID Technologies
- Erke Wang - Cadfem
- Dr.-Ing. Don Wu - IABG
- Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Zehn - TU Berlin
- Dipl.-Ing. Martin Züger - pinPlus

Das CFD Advisory Board (CAB) unterstützt den NAFEMS DACH Lenkungsausschuss rund um das Thema CFD.

**Kontakt und Fragen**

NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH  
 Griesstr. 20, 85567 Grafing b. M.  
 Tel.: +49 176 217 984 01, Fax: +49 3 22 11 08 99 13 41  
 E-Mail: [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de)

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

<p><b>Stronger Collaboration</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>BUILD LASTING BUSINESS ALLIANCES</li> <li>EXCHANGE KNOWLEDGE &amp; EXPERIENCE</li> <li>LEARN ABOUT THE RESOURCES AVAILABLE</li> <li>ENHANCE YOUR COMPANY'S VISIBILITY WORLDWIDE</li> </ul>	<p><b>Enhanced Innovation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>DEVELOP YOUR SKILLS WITH THE LATEST ENGINEERING SIMULATION TECHNIQUES</li> <li>BE AT THE FOREFRONT</li> <li>PRODUCE BETTER-ENGINEERED PRODUCTS WITH ENHANCED CUSTOMER SATISFACTION</li> </ul>
<p><b>Increased Productivity</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>OPTIMIZE THE DESIGN PROCESS</li> <li>MINIMISE COSTLY PHYSICAL TESTING</li> </ul>	<p><b>Improved Quality</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>BE COMMITTED TO THE HIGHEST STANDARDS</li> <li>BENCHMARK YOUR ORGANISATIONS SIMULATION PROCESS</li> </ul>



**Mehr als 16.000 Mitglieder in 1.400 Unternehmen und Organisationen sind weltweit Mitglied bei NAFEMS.**  
**Werden auch Sie Mitglied!**

# AGENDA – DIENSTAG, 13. OKTOBER

1 - 1: Keynote-Vorträge / Platin-Sponsor Vortrag			
08:30	Begrüßung und Einführung NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz		
08:45	Keynote-Vortrag: Warum das Potenzial von CAE immer noch nicht vollständig genutzt wird und warum Zukunftstrends diesen Zustand verbessern werden C. Gümbel (Future Matters)		
09:15	Keynote-Vortrag: Modellbasierte Entwicklung und integrierter virtueller Engineering-Prozess gemäß ASPICE-Anforderungen J. Noack (ZF)		
09:45	Keynote-Vortrag: Virtual Engineering im Kontext der Instandhaltung von zivilen Flugzeugen J. Mendler (Mendler Engineering Technology)		
10:30	Platin Sponsor-Vortrag: Driving Innovation with Azure HPC N. Chappell, G. Sallah, L. Miroslaw, A. Chrysostomou (Microsoft)		
11:00	Pause		
2 - 1: Digital Twin			
11:30	Herausforderung Digital Twin: Die digitale Durchgängigkeit erfolgreich gestalten M. Strietzel, L. Wagner (Prostep)		
2 - 2: Optimierung A			
12:00	Sickenoptimierung auf Basis semi-analytischer Sensitivitäten R. Meske, M. Scherer, G. Stankiewicz (Tenneco)		
12:30	Optimierung des Motordesigns einschließlich elektromagnetischer Leistung und mechanischer Belastung C. Kremers, P. Veerma, B. Funieru (Dassault Systèmes)		
12:30	Automatisierte Fertigbarkeitsprüfung im Rapid-Prototyping durch künstlich intelligente RBF-Netze F. Richter, M. Ruschitzka (TH Köln); P. Gust, A. Schumacher (Univ. Wuppertal)		
2 - 3: CFD Kopplung A			
12:30	Einfluss von Ungenauigkeiten in Spritzgussimulationen auf die Struktursimulation von kurzfaserverstärkten Kunststoffen L. Veltmaat (Volkswagen); H.-J. Endres, F. Bittner (Univ. Hannover)		
13:00	Partitionierte, transiente Fluid-Struktur Kopplung mit Open-Source Löser-technologie U. Heck, M. Becker (DHCAE Tools)		
13:30	Integration der MRF Modellierung in das CFD-Simulationsmodell eines Formelfahrzeugs J. Pangerl, N. Kaiser, R. Stauch (Hochschule Esslingen)		
2 - 4: Demokratisierung A			
13:30	Verbreitung der (FE-) Simulation in der Entwicklung durch Demokratisierung M. Spiegel (Festo)		
14:00	Next Level Engineering: Digitalisierung von Know-How – Auf dem Weg zu einem intelligenten Produktentwicklungsprozess M. Tryfonidis (BETA CAE Systems)		
14:30	SMILE – Trennung der physikalischen und numerischen Modellierung B. Näser (BMW Group); D. Friedemann, J. Rademann (HTW Berlin)		
3 - 1: KI / ML			
13:30	Künstliche Intelligenz in der CAE-Berechnung C. Thieme (MSC Software)		
14:00	Datengetriebene Simulationsüberwachung durch ML-basierte Ähnlichkeitsanalyse* A. Druz, D. Klitzke, S. Slavetinsky, S. Suwelack (Renumics)		
14:30	Untersuchung der Anatomie eines Stoßdämpfers basierend auf CT-Daten M. Tryfonidis (BETA CAE Systems)		
3 - 2: Optimierung B			
14:00	Einfluss der Volumen- und Shell-Dickenmodellierung auf die hauptspannungsbasierte Trajektorienberechnung zur Bestimmung von Sickenverläufen S. Revfi, M. Fünkner, A. Albers (Karlsruher Inst. für Technologie IPEK); K. Behdinan (Univ. of Toronto)		
14:30	Topologieoptimierung von orthotropen Materialien mit Materialorientierung T. Fassas, P. Pantazidis, D. Drougkas, S. Chatzimoysiadis (BETA CAE Systems)		
15:00	SLM-Topo – Einfluss unterschiedlicher Modellierung von Randschicht und innerem Volumen auf eine 2D-Topologieoptimierung J. Holoch, L. Träger, A. Albers (Karlsruher Inst. für Technologie IPEK)		
3 - 3: CFD Thermal			
15:00	CFD-Simulation zum Thermo-management im Haushaltsbackofen B. Krüger (Miele)		
15:30	Optimierung von Wärmeübertragern mit Hilfe von bionischen Prinzipien und evolutionären Algorithmen D. Becker, A. Behr, N. Kockmann (TU Dortmund)		
16:00	Design und Optimierung einer Kühlsystemkomponente zur Verbesserung des Luftstromes V. Jambhekar, F. Cuzzola, R. Mallyala, K. Muthuraman, S. Karmungi, T. Donley (Dassault Systèmes)		
3 - 4: Systems Engineering			
15:30	Erfolgreiche Kopplung von System- und Simulationsmodellen für MBSE K. Mai, D. Xiao, S. Husung (:em engineering methods AG)		
16:00	Systems Engineering meets Simulation F. Fischer (Prostep)		
16:30	Die Zukunft der Produktentwicklung mit einem Model Based Systems Engineering Ansatz am Beispiel eines elektrischen Antriebsstrangs G. Fanmuy, P. Lalor, T. Reimer (Dassault Systèmes)		
4 - 1: SPDM			
15:30	Simulationsdatenmanagement für den virtuellen Fahrversuch A. Pfaff, A. Ehrler (PD Tec)		
16:00	Effiziente und vernetzte Produktentwicklung durch die Integration von Simulationsdatenmanagement (SDM) und Prüfstands-Testdatenmanagement (TDM) D. Rensink, M. Krastel (:em engineering methods AG)		
16:30	Über die Bedeutung des „D's“ im SPDM-System M. Weinberger (MSC Software)		
4 - 2: Optimierung C			
15:30	Nichtlineare dynamische Strukturoptimierung unter Berücksichtigung der Deformationsgeschichte mit differenzbasierten äquivalenten statischen Lasten J. Triller, L. Harzheim (Opel Automobile/TU Darmstadt); R. Immel (Opel Automobile)		
16:00	Strategie zur anwendergerechten Bestimmung kontextsensitiver neuronaler Netztopologien für Optimierungsaufgaben in der virtuellen Produktentwicklung A. Nüßgen, M. Ruschitzka (TH Köln)		
4 - 3: CFD Kopplung B / Workflow			
15:30	Gekoppelte aeroakustische CFD-FE-Simulation für kompaktes aeroakustisches Design A. Poulos, M. Brandstetter, C. Legendre, R. Baudson (Free Field Technologies); M. Bomme (Software Cradle Europe ); C. Deller (MSC Software)		
16:00	Effiziente Werkzeuge und Methoden für die Aufbereitung von wasserdichten CFD-Netzen bei Groupe PSA A. Karasavidis, N. Batsaris (BETA CAE Systems); G. Roy (PSA Group)		
16:30	CFD-Praxis: Abbildung von Schließvorgängen, Strömung und Kavitation am Beispiel eines Ventils B. Neuhierl (Cadferm)		
4 - 4: Material			
15:30	An Integrated Workflow for Modeling Fiber-Reinforced Plastics with Multi-scale Material Models F. Goetz, Y. Shi, H. Ji, P. Verma, H. Wen-Jun (Dassault Systèmes)		
16:00	Wie man mit System das passende Material für ein Produkt herausfindet F. Mailänder (Cadferm)		
16:30	Abgleich von Material- und Formparametern zwischen Versuch und Berechnung N. Wagner (Intes)		

## 2 - 5: Dynamik

**Maximierung der Eigenfrequenzen von Leiterplatten**  
R. Helfrich (Intes)

**Numerische Untersuchung der Bodenverdichtung mit dynamisch angeregten Walzen**  
P. Erdmann (TH Köln)

**Verbesserte Materialdämpfung in der Strukturdynamik**  
N. Wagner, M. Klein, B. Kirchgäßner (Intes)

## 2 - 6: Gold-Sponsoren

11:30-11:45  
**BETA CAE Systems: Groundbreaking Simulation Solutions**

11:45-12:00  
**Dassault Systemes Simulia**

12:00-12:15  
**Hexagon-MSC Software**

12:15-12:30  
**Technia**

## 3 - 5: Methoden A

**A New Method for Fast Finite Element Explicit Crash Simulations**  
P. Specker, A. Van der Velden, D. Kokan (Dassault Systemes)

**Etablierung einer ganzheitlichen simulationsgestützten Entwicklungsmethodik am Beispiel des Sondergetriebes HypoGear**  
H. Möller, S. Heinrich, B. Stephan, R. Michel (imk automotive)

**Rapid Interactive Structural Analysis**  
D. Weber, T. Grasser, J. Mueller-Roemer, A. Stork (Fraunhofer IGD)

## 3 - 6: Silber-Sponsoren

13:30-13:45  
**FEMFAT Software**

13:45-14:00  
**Meshfree: Punkt vor Gitter**

14:00-14:15  
**GNS**

14:15-14:30  
**Intes: PERMAS High-End FE-Simulation seit 35 Jahren**

14:30 - 14:45  
**PROSTEP: Digitale Produktentwicklung in Zeiten der Plattformökonomie**

14:45-15:00  
**Rescale im Überblick**

## 4 - 5: Methoden B

**Robuste Automatisierung und Appifizierung von Simulationsprozessen mit „Abstrakter Modellierung“ einfach machen**  
K. Peters (Novus Nexus)

**Automatisiertes Simulationsmodell für Transformatorwicklungen**  
E. Karer, A. Dorninger, J. Wenninger (Linz Center of Mechatronics); A. Hackl (Siemens Energy Austria)

**Eine Raum-Zeit Finite-Elemente-Methode für die Entleerung von Silos**  
S. Reinstädler (Cenit)

## 4 - 6: HPC A

**Engineer from Anywhere with Anyone. Why Connected Product Innovation Matters now**  
R. Müller (Microsoft)

**Schnellere Innovation durch Big Compute in der Cloud: Anwendungsbeispiele und Vorteile in der Ingenieurs-Alltags-Praxis**  
R. Klein, J. Salmund, N. Strah, M. Groetelaars (Rescale)

**Machine Learning im HPC: Effizientere Clusternutzung durch Vorhersage von Laufzeiten**  
L. Moj, M. Rajput (GNS Systems)

## Aussteller laden ein: Virtuelle Meetingräume

### Fraunhofer IGD

- Videokonferenzraum „Rapid Interactive Structural Analysis“ zur direkten Kontaktaufnahme während der Konferenz

### MESHFREE

- MESHFREE-Chat offen während der kompletten Veranstaltung
- 13.10. und 14.10., jeweils um *tbid* Uhr: Q&A mit dem MESHFREE-Begründer Dr. Jörg Kuhnert
- 13.10. und 14.10., jeweils um *tbid* Uhr: Zukünftige Herausforderungen – Diskussionsrunde mit dem MESHFREE-Team

### GNS

- 13.10. und 14.10., jeweils von 14:00 - 15:00 Uhr: Chat about Animator
- 13.10. und 14.10., jeweils von 14:00 - 15:00 Uhr: Chat about Generator

### INTES

- 13.10.2020, 13:00-14:00 Uhr: Diskussion mit PERMAS-Spezialisten: Dynamik + Optimierung – wie kann man die Möglichkeiten nutzen?
- 13.10.2020, 15:30-16:30 Uhr: Diskussion mit PERMAS-Spezialisten: Integrierte Optimierung - ein Vorteil?
- 14.10.2020, 14:00–15:00 Uhr: Diskussion mit PERMAS-Spezialisten: Rechenzeiten – wie reduzieren?

### PROSTEP

- 13.10.2020, 10:00-12:00 Uhr: TEAMS Meeting PROSTEP@NAFEMS
- 14.10.2020, 10:00-12:00 Uhr: TEAMS Meeting PROSTEP@NAFEMS

### RESCALE

- 13.10.2020 / 16:30-17:30 Uhr: Offene Diskussion
- 14.10.2020 / 10:30-11:30 Uhr: Offene Diskussion

### SIDACT

- Treffen Sie uns im virtuellen SIDACT Meeting Raum!

## 3 - 7: CFD Training

**13:30-15:00 Mehrphasenströmung**

**Kurze Einführung in die Theorie mehrphasiger Strömungen**  
U. Janoske (Universität Wuppertal / Chairman des NAFEMS DACH CFD Advisory Boards)

## CFD Fokus Mehrphasenströmung

Mehrphasenanwendungen gewinnen im Bereich der Strömungssimulation branchenübergreifend immer mehr an Bedeutung. Im Rahmen der NAFEMS-DACH Konferenz wird diesen Anwendungen ein Schwerpunkt eingeräumt. Zusätzlich zu den beiden Sessions „Mehrphasenströmung“ bieten wir Ihnen einen Short Course und einen Workshop an, der von Mitgliedern der NAFEMS DACH CFD Advisory Board geleitet bzw. moderiert wird.

### Session

Wir freuen uns über interessante Beiträge zu diesem Thema, die wir in den Sessions 7-3 zusammengefasst haben.

### Training

Der Short Course „Kurze Einführung in die Theorie mehrphasiger Strömungen“ soll eine kurze Einführung in die Modellierung und Simulation mehrphasiger Strömungen geben. Die Herausforderungen und Probleme bei der Berechnung mehrphasiger Strömungen werden diskutiert und Ideen für Modellierungsansätze beschrieben. Einfache Beispiele mehrphasiger Strömungen zeigen die Anwendung der Modelle als auch deren Vor- und Nachteile.

### Workshop

Im Workshop werden Best Practices der Mehrphasenströmungssimulation und deren Stolpersteine anhand mehrerer Beispiele aufgezeigt und diskutiert.

## 4 - 7: CFD Workshop

**15:30-17:30 Mehrphasenströmung**

15:30-15:45  
**Volume of Fluid: CFL Zahl an der freien Oberfläche und Einfluss der Oberflächenspannung**  
M. Schneider (Cascate)

15:45-16:00  
**Potenzial und Modellierungsansätze für partikelbeladene Strömungen und Sprays**  
U. Heck (DHCAE)

16:00-16:15  
**Hybride Mehrphasenmodelle: Tor zur effizienten Simulation unterschiedlicher Strömungsregime**  
T. Eppinger (Siemens Digital Industries Software)

16:15-16:30  
**Overview of Surface Contamination**  
D. Mutlyashki, J. Jilesen, T. Linden (Dassault Systemes)

16:30-17:30  
-> **Diskussion**  
Moderation: R. Stauch (Hochschule Esslingen / Mitglied des NAFEMS DACH CFD Advisory Boards)

# AGENDA – MITTWOCH, 14. OKTOBER

## 5 - 1: Keynote-Vorträge

08:45 Begrüßung / NAFEMS World Congress 2021 in Salzburg, Österreich  
NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz

09:00 Keynote-Vortrag:  
**Transformation of the CAE Organization at Opel**  
T. Pohl (Opel Automobile)

09:30 Keynote-Vortrag:  
**The Lay of the Land: Chancen und Herausforderungen für den Digitalen Zwilling**  
D. Wu (IABG)

10:00 Keynote-Vortrag:  
**VMAP Enabling Interoperability in Integrated CAE Simulation Workflows**  
K. Wolf, P. Gulati (Fraunhofer SCAI), G. Duffett (NAFEMS)

10:30 Keynote-Vortrag:  
**Modern Forecasting for Weather and Climate – Using and Predicting Uncertainty, Distribution and Risk**  
R. Potthast (Deutscher Wetterdienst (DWD))

11:00 Pause

## 6 - 1: Multiphysik/NVH

11:30 **Direkte Simulation magneto-mechanischer Kopplung in 3D**  
L. Kielhorn, T. Rüberg, J. Zechner (Tailsit)

12:00 **Mehrdimensionale Optimierung von Lautsprechern basierend auf multiphysikalischen Modellen**  
A. Svobodnik, T. Gmeiner (Mvoid); P. Maury (Datadvance)

12:30 **Ein modernes und flexibles Flexible Finite Elemente Framework für multiphysikalische Probleme**  
C. Lackner (Cerbsim)

13:00 **Multiphysikalische FEM Modellierung in Brennstoffzellen beim Abdichten von Wasserstoff**  
M. Achenbach (Ingenieur- & Sachverständigenbüro Achenbach)

## 6 - 2: MKS

**Aufbringung verteilter Lasten auf flexible Körper in Mehrkörpersimulationen**  
T. Ulmer (Airbus Operations)

**Simulativer Ansatz zur Abbildung der Ventilesekundärdynamik von Großmotoren**  
A. Pausin, A. Beck, P. Böhm (MAN Energy Solutions)

**Anwendung der Methode zur virtuellen Lastermittlung durch flexible Körper in Mehrkörpersimulation auf Lkw-Rahmen – Herausforderungen und Abgleich mit Versuchen**  
T. Hufnagel (MAN Truck & Bus/Univ. Erlangen-Nürnberg); D. Meyer (MAN Truck & Bus); S. Wartzack (Univ. Erlangen-Nürnberg)

**Dynamische Finite-Elemente-Analyse von fremderregten Mehrmassensystemen**  
F. Magerl (OTH Amberg-Weiden)

## 6 - 3: CFD Methoden

**Meshfree – gitterfreie Strömungssimulation im Wassermanagement an Fahrzeugen und Turbinen**  
J. Kuhnert (Fraunhofer ITWM)

**Rücksprungverhalten komplexer Partikelgeometrien in Diskrete Elemente Methode (DEM)-Simulationen**  
P. Pircher, E. Fimbinger (Univ. Leoben)

**Gewinner des NAFEMS DACH Studentenpreises 2020/2021: Experimentelle und numerische Untersuchungen von eingeschlossenem Pulvermaterial zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens innerhalb von Partikeldämpfern**  
G. Hauenstein (SMS Group, ehem. Hochschule Luzern); R. Baumann, C. Haack (Hochschule Luzern)

**Analyse der Stabilität der Strömung einer Defrostanlage mit Model Order Reduction (MOR)**  
S. Müller, P. Putin, C. Thole, N. Abdelhady (Sidact)

## 6 - 4: CFD Optimierung

**Automatisierte Modellerstellung für die CFD-basierte Optimierung von Turboladergehäusen**  
B. Kneidl (em engineering methods AG); S. Mihal (Daimler Truck)

**CFD-basierte Optimierung der Kühlleistung eines Li-Ionen-Batteriemoduls**  
M. Schneider, D. Grimmeisen (Cascade)

**Topologieoptimierung mit integrierter CAD Rekonstruktion für durchströmte Bauteile**  
J. Iseler, P. Pagliugh (Dassault Systèmes)

**Energetische Bewertung und Optimierung von Wohnhäusern**  
T. Jordan, P. Royl (KIT)

13:30 Pause

## 7 - 1: Optim. D / Demokratisierung B

14:00 **Methode und Werkzeugkette zur thermischen Optimierung mit Finite Elemente Simulationen**  
D. Perchtold, M. Schörgenhumer (Linz Center of Mechatronics); M. Javurek (Univ. Linz)

14:30 **Machine-learning basierte Ansätze für globale Optimierung und interaktives Design**  
M. Bauer, J. Lohse (Navasto)

15:00 **CAE-Anwendungen demokratisieren – ein ökonomischer Imperativ?**  
M. Probst (ISKO engineers (eine Marke der FCM-S))

## 7- 2: Methoden C

**Probabilistische Ermüdungs- und Zuverlässigkeitssimulation**  
S. Vervoort, A. Halfpenny, A. Chabod (HBM Prensicia); M. Bonatod (Valeo Thermal Systems)

**Eine generische Programmstruktur zur Durchführung von FE-Analysen**  
M. B. Geilen, M. Klein, M. Oechsner (TU Darmstadt)

**Kontakte noch schneller berechnen**  
R. Helfrich, R. Fischer, M. Ast (Intes)

## 7 - 3: CFD Mehrphasen

**Multiskaleneffekte – Herausforderung für die Strömungssimulation in Wälzlager**  
K. Juckelandt, C. Schäfer (Schaeffler)

**Potenziale der Smoothed Particle Hydrodynamics Methode für die mehrphasige Simulationen von Wälzlagerströmungen**  
E. Pause (dive solutions); P. Koob, K. Juckelandt (Schaeffler)

**Direkte numerische Simulation von kapillaren Mehrphasenströmungen in komplexen Geometrien**  
S. Höcker, O. Iliev (Fraunhofer ITWM/TU Kaiserslautern); D. Niedzela (Fraunhofer ITWM); H. Kordy (Fraunhofer IFAM)

**Filtersimulation auf Basis von Euler-Lagrangischen Transportansätzen: Skalenübergreifende Modellierung von der Mikro- auf die Meso- und Makroskala**  
U. Heck, M. Becker (DHCAE Tools)

## 7 - 4: HPC B

**Machine Learning für CAE-Simulationen: Den richtigen Zeitpunkt für die Job-Einreichung wählen**  
L. Moj, M. Rajput (GNS Systems)

**Excellerat: Wegbereiter für die Entwicklung zu Exascale**  
R. Schneider (Universität Stuttgart)

**Ein Modulares Weiterbildungsprojekt rund um die Simulation**  
N. Prange (Sicos BW)

15:30

16:00 Ende der Konferenz



# Call for Papers!

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

Einreichung von Abstracts bis 3. November 2020 unter [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress)

**6 - 5: Regler, Sensoren/Kontakt**  
 Entwicklung eines modularen Ansatzes zur automatisierten, simulationsbasierten Validierung der Schaltstrategie moderner Doppelkupplungsstriche  
 J. Köber, L. Pflüger (Dr. Ing. h.c. Porsche); A. Albers (Karlsruher Inst. für Technologie IPEK)

Herausforderungen beim Einsatz von Sensormodelle in der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen  
 S. Schmidt (Volkswagen); R. Stark (TU Berlin)

Effiziente und strukturierte Bewertung von allgemeinen Gewindeverbindungen mittels FEM auf Basis des örtlichen Konzeptes  
 F. Schüssler, M. Strummer (ACAM Engineering)

**6 - 6: Visualisierung / Fertigung**  
 Berücksichtigung von fertigungsbedingten Defekten in der strukturmehchanischen Simulation  
 B. Lauterbach, J. Fieres, K. M. Nigge (Volume Graphics)

Qualitätsüberwachung der Faserverbundproduktion mittels Bildanalyse in einem virtuellen Produktionsumfeld  
 O. Döbrich, N. Gort, A. Anderegg, C. Brauner (FH Nordwestschweiz); F. Pavia, N. Zehnder (Ansys)

Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Warmauslagerungseffekten bei Aluminiumbauteilen in der Finite-Elemente-Simulation  
 C. Liebold, D. Koch, A. Haufe (DYNAmore); M. Feucht (Mercedes-Benz)

Analyse von Eigenspannungen in Hochtemperatur-Faserverbundbauteilen durch Simulation des Herstellungsprozesses  
 N. Gort, F. Schadt, L. Amirova, M. Grob, C. Brauner (FH Nordwestschweiz); M. Liebisch, T. Wille (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR), I. Ortiz De Zarate Alberdi, J. Navas (Parque Tecnológico de Alava); T. Ricard (North Thin Ply Technology)

**6 - 7: SPDM Workshop A**  
 11:30-12:30  
 How to get started with SPDM  
 M. Norris (the SDMconsultancy)

12:30-13:30  
 -> Fragen an M. Norris (the SDMconsultancy)

**7 - 5: SPDM Workshop B**  
 14:00-15:00  
 Introduction to SPDM  
 M. Norris (the SDMconsultancy)

15:00-16:00  
 -> Fragen an M. Norris (the SDMconsultancy)

Bei Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung:



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

**NAFEMS20**  
 REGIONAL CONFERENCES



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

# ANMELDEFORMULAR

Bitte ausfüllen und faxen an Fax +49 3 22 11 08 99 13 41

oder kopieren und senden an NAFEMS GmbH, Griesstr. 20, 85567 Grafing b. M.

**Hiermit melde ich mich verbindlich als Teilnehmer zur NAFEMS virtuellen DACH Konferenz vom 13. - 14. Oktober 2020:**

- Mein Unternehmen/Institut ist NAFEMS Mitglied: **ALLE Mitarbeiter frei - Anmeldung erforderlich!**
- Mein Unternehmen/Institut ist kein NAFEMS Mitglied: 425,- Euro zzgl. ges. MwSt.
- Bitte senden Sie mir Aussteller-/Sponsoringinformationen zu.**
- Ich bin an einer NAFEMS Mitgliedschaft interessiert. Bitte kontaktieren Sie mich.**

## Absender

Firma / Hochschule: \_\_\_\_\_

USt.-ID/VAT-number: \_\_\_\_\_

Ihre interne Bestellnummer: \_\_\_\_\_

Abteilung: \_\_\_\_\_

Name: \_\_\_\_\_

Vorname: \_\_\_\_\_

Straße: \_\_\_\_\_

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

Land: \_\_\_\_\_

Telefon: \_\_\_\_\_

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

E-mail: \_\_\_\_\_

Rechnungsanschrift (falls abweichend):  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Ich bin damit einverstanden, dass mein Vor- und Nachname sowie meine Firma auf der gedruckten Teilnehmerliste für die Konferenzteilnehmer gelistet wird.**

- Ja       Nein

**Ohne Aussteller und Sponsoren wäre die Durchführung der Konferenz so nicht möglich. Sie würden uns und den Ausstellern/Sponsoren helfen, wenn Sie Ihr Einverständnis zur Weiterleitung Ihrer Kontaktdaten an Aussteller/Sponsoren erlauben würden. Ich bin damit einverstanden:**

- Ja       Nein

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Mit Ihrer Anmeldung gestatten Sie uns die Nutzung und das Verarbeiten Ihrer Daten gemäß unserer Datenschutzrichtlinien: [www.nafems.org/about/privacy/](http://www.nafems.org/about/privacy/)

**Online-Anmeldung unter [www.nafems.org/dach20](http://www.nafems.org/dach20)**



Attendance free of charge!

### Invitation and preliminary conference agenda

# 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CAE INTEROPERABILITY 2020

VMAP 19-20 Oct 2020 | Online

We invite you to attend the 1<sup>st</sup> VMAP International Conference on CAE Interoperability 2020 which will be held virtual from 19 - 20 October 2020.

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

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

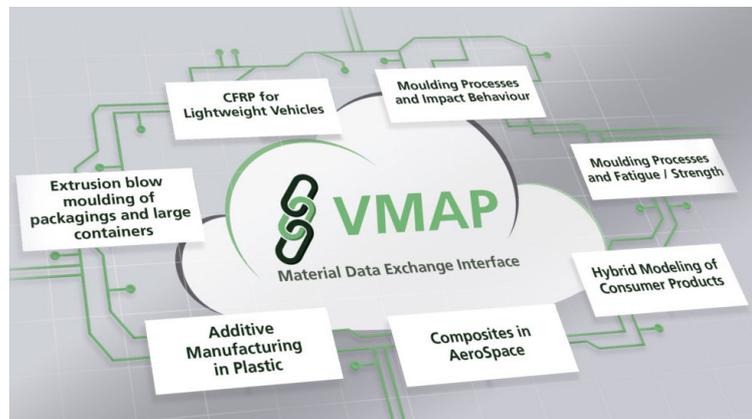
Conference websites:  
[www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020/](http://www.vmap.eu.com/vmap-conference-2020/)

### ITEA 3 VMAP Project

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

The project is funded by national research agencies from Austria, Netherlands, Germany and Canada.

More information:  
[www.vmap.eu](http://www.vmap.eu)



Industrial Use Cases will show the need and benefits of a standardised Material Exchange Interface.

## Agenda (preliminary) – Monday, 19 October

### Session 1

- 08:45 **Welcome and Introduction day 1**  
K. Wolf, P. Gulati (Fraunhofer SCAI); G. Duffett (NAFEMS)
- 09:00 **VMAP Enabling Interoperability in Integrated CAE Simulation Workflows**  
K. Wolf, P. Gulati (Fraunhofer SCAI); G. Duffett (NAFEMS)
- 09:30 **The VMAP Material Data Interface Standard**  
– A New Approach to Unify Information Transfer in Virtual Manufacturing Workflows  
P. Gulati (Fraunhofer SCAI)
- 10:00 **Integration of VMAP into the Open Source Library PYLIFE**  
G. Kiss, D. Kreuter, J. Müller (Robert Bosch)
- 10:30 Break

### Session 2

- 11:00 **How to make an Interoperability Standard a Tool for Performance?**  
J. M. Crepel (Citran)
- 11:30 **Digital Thread to Capture and Exchange Content and Intent Across the Product Lifecycle**  
– The Key to Effective Management of Ever-Increasing Product Complexity  
M. Nicolich (ARAS)
- 12:00 **Implementation Insight and Demonstration of the Advantages of the VMAP Standard for CAE Engineers**  
T. Usta, C. Liebold, A. Haufe (DYNAmore)
- 12:30 Break

### Session 3

- 13:00 **Enhancing Interoperability of BETA Products within Complex CAE Workflows by Adopting and Integrating the VMAP Standard**  
A. Fassas, G. Mokios (BETA CAE Systems)
- 13:30 **Sheet-Metal Manufacturing Simulations Coupled to Structural Simulations for an Improved Structural Static and Fatigue Response**  
N. Laue, A. Jensen (Grundfos Holding)
- 14:00 **Simulation Chain for Fatigue Strength Assessment of Short-Fiber Reinforced Plastic Parts in the Presence of Weld Lines**  
M. De Monte (Robert Bosch)
- 14:30 Break

### Session 4

- 15:00 **3D Deep-Learning Based Surrogate Modeling and Optimization**  
L. Zampiere, P. Baqué, S. Baset, T. Allard, T. von Tschammer (Neural Concept)
- 15:30 **An Integrated Design-Process Optimization Methodology – With Two Industrial Cases**  
V. Tsai, F. Buchy (SimpaTec)
- 16:00 **Structural Pile-Cap and Pile Layout Parametric Modeling and Optimization Across Multiple Software Platforms**  
R. Villena (Thornton Tomasetti)
- 16:30 End of day 1



### Session 5

- 08:45 **Welcome and Introduction day 2**  
K. Wolf, P. Gulati (Fraunhofer SCAI); G. Duffett (NAFEMS)
- 09:00 **The eCI@ss Standard as Semantic Basis for CAE Product Data Exchange**  
C. Block (eCI@ss Head Office)
- 09:30 **Tailored Data Exchange Processes in Automotive Bodywork Engineering**  
A. Kreis, M. Hirz (Graz University of Technology); M. Prenner, S. Stadler  
(Magna Steyr Fahrzeugtechnik)
- 10:00 **CAE Software Interoperability: Impact of In-Use Properties of a Welded Part on Crash Analysis**  
L. Gaston, S. Andrietti (Transvalor); D. Even, C. Le Falher, M. Lecoq, G. Delattre, L. Guerin (Faurecia)
- 10:30 Break

### Session 6

- 11:00 **How ICME Enables Microstructure as a Design Parameter for Optimal Plastic Components**  
P. Hebert, B. Alsteens (e-Xstream engineering, part of Hexagon Manufacturing Intelligence division)
- 11:30 **Data Exchange and Software Interoperability Based on MOSSEC Standard. Application to a Cabin Aircraft Architecture Process**  
A. Munck, X. Dugros, D. Sauvage (Digital Product Simulation)
- 12:00 **A Value-Focused Approach to the Deployment of Simulation Data Management to Support Multidisciplinary Simulation and Interoperability**  
M. Norris (theSDMconsultancy); G. Neveu (DPS)
- 12:30 Break

### Session 7

- 13:00 **Digital Twins in Technical Product Development: Definitions and Insights from an Industrial Case Study**  
J. Trauer, S. Schweigert-Recksiek, M. Zimmermann (Technical University of Munich); C. Engel, K. Spreitzer (Viessmann)
- 13:30 **Enhanced Simulation of Shrinkage and Warpage of Extrusion Blow Molded Parts Using the VMAP Interface Standard**  
O. Bruch (Dr. Reinold Hagen Stiftung/ TREE Institut); P. Michels, D. Grommes (Dr. Reinold Hagen Stiftung)
- 14:00 **Considering the Local Anisotropy in Simulation Process Chain for Short and Long Fiber Reinforced Thermoplastics**  
P. Reithofer, B. Jilka, H. Pothukuchi (4a engineering)
- 14:30 Break

### Session 8

- 15:00 **Interoperability in Multiphysical Development Processes**  
D. Friedemann, J. Rademann (HTW Berlin); B. Näser (BMW Group)
- 15:30 **Mapping of Microstructure Information to FE-Meshes by Means of Computed Tomography**  
B. Lauterbach, P. Pinter (Volume Graphics)
- 16:00 **Qualitative Study for Energy Consumption of Domestic Appliances**  
A. Naiknaware, S. Sahoo, J. Chhatre, A. Shukla (Whirlpool)
- 16:30 **An Approach Towards Interoperability of CSM Models in the Virtual Structural Sizing and Testing of Lightweight Composite Structures**  
M. Rädcl (German Aerospace Center DLR)
- 17:00 **External: Closure and General Q&A**  
K. Wolf, P. Gulati (Fraunhofer SCAI); G. Duffett (NAFEMS)
- 18:00 End of conference



## Organization

### Conference „venue“

Online - registrants will receive login information for the conference online platform a few days before the event.

### Conference language

English

### Delegate Fee

Attendance is free of charge - registration required.

### Exhibition

We would like to extend our invitation to your company to be part of the conference as exhibitor. Please find further information on the NAFEMS conference website: [www.nafems.org/vmap](http://www.nafems.org/vmap).

### NAFEMS Membership

If you are interested in membership please contact Mr. Paul Steward ([paul.steward@nafems.org](mailto:paul.steward@nafems.org)). Please find also information at [www.nafems.org/join](http://www.nafems.org/join).

### Conference Organisation

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

### Conference website and online registration

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

## More NAFEMS Conferences

# NAFEMS20

## REGIONAL CONFERENCES



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



**nwc**2021  
NAFEMS**WORLD**CONGRESS

14-18 JUNE | SALZBURG | AUSTRIA

A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION

incorporating the

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

## Call for Papers!

Submit title and short abstract by 3 November 2020 at

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



# VMAP

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

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

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

Further features:

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

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

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

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

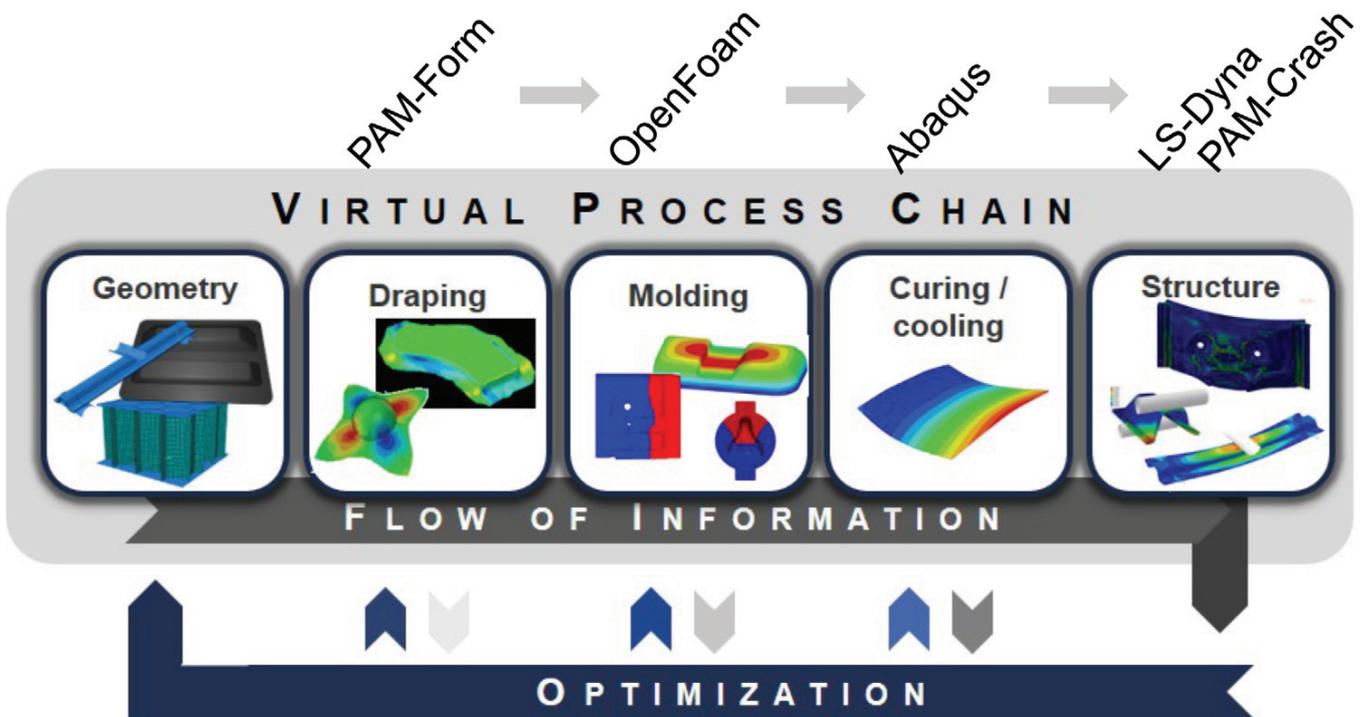
Implementations are under development for ANSYS Mechanical, Autodesk FUSION 360Platform and Forge (Transvalor).

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



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

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



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

## VMAP Standards Community

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

## Complex workflow?

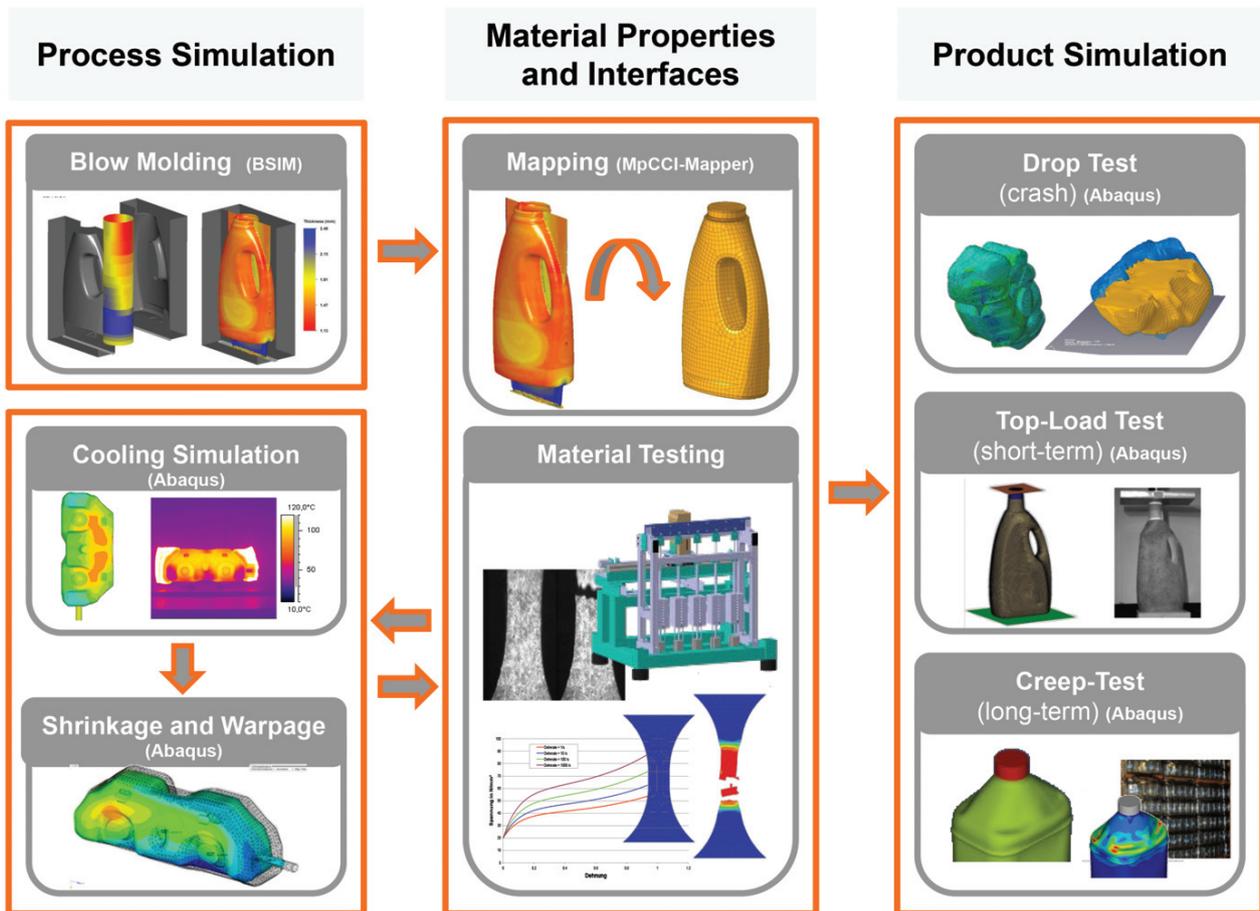
## Difficult material data transfer?

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

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

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

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



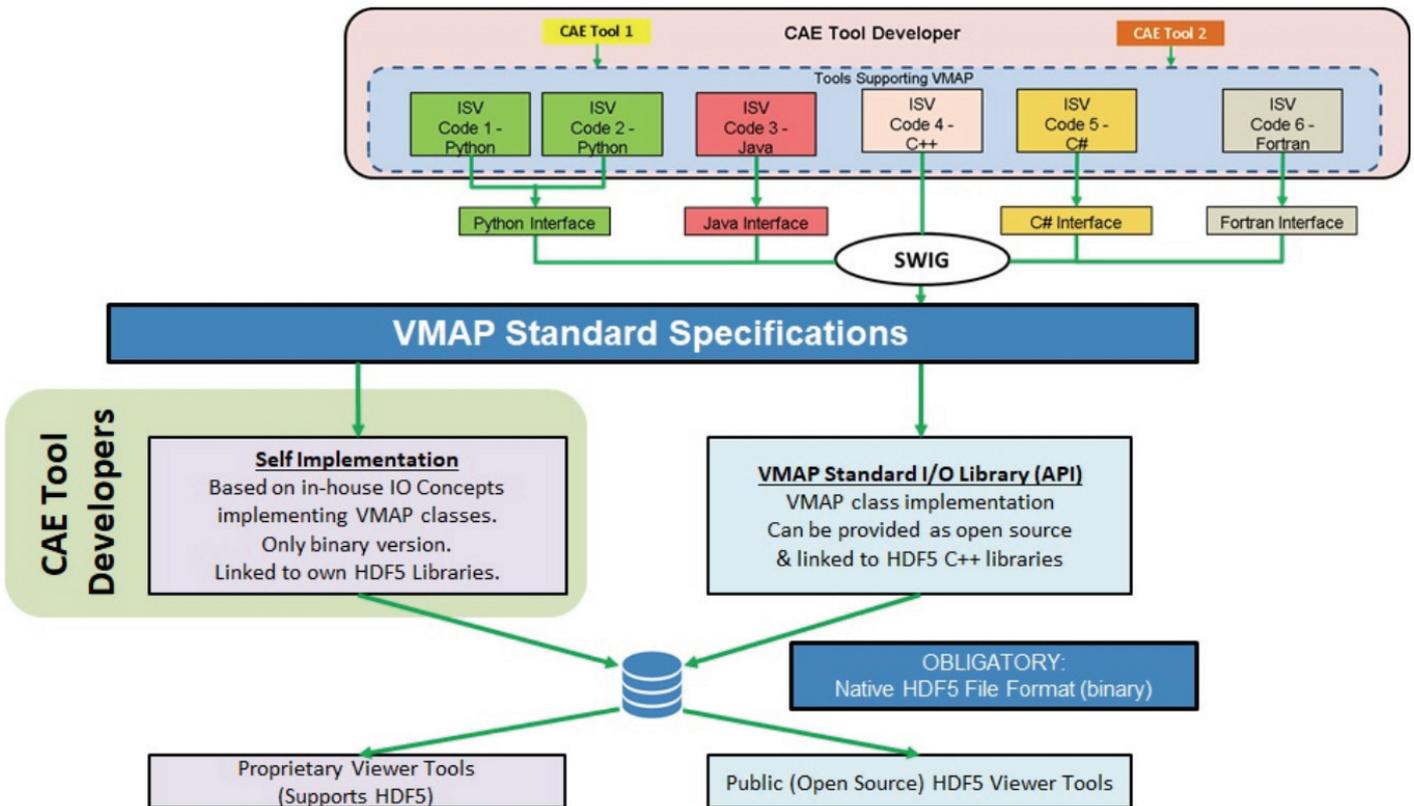
## VMAP help for software developers

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

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

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

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



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

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

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

ITEA is a EUREKA Cluster, the community is founded in Europe based on the EUREKA principles and is open to participants worldwide. <https://itea3.org>





# THE ANALYSIS AGENDA

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

What Next for Engineering Simulation?

**GET INVOLVED IN SETTING THE AGENDA.**  
**SURVEY NOW LIVE AT [NAFEMS.ORG/AGENDA](http://NAFEMS.ORG/AGENDA)**

**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

**[NAFEMS.ORG/AGENDA](http://NAFEMS.ORG/AGENDA)**

# Onsite Training



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



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

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

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

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

## COURSE PROGRAMME

### INTRODUCTORY

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

### MID-LEVEL

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

### ADVANCED

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

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

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 2020</p> <p>Webex-Kurs: Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung</p> <p>Webex, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>7</b> Oct 2020</p> <p>Introduction to Practical CFD</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>21</b> Oct 2020</p> <p>Next Steps with Multibody Dynamics Simulation</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>
<p><b>27</b> Oct 2020</p> <p>Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie</p> <p>Wiesbaden, Germany</p> <p>Training Course</p>	<p><b>30</b> Oct 2020</p> <p>How to Effectively Communicate Innovative Ideas</p> <p>WebEx, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>3</b> Nov 2020</p> <p>Introduction to Dynamics using FEA</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>
<p><b>6</b> Nov 2020</p> <p>Basic Finite Element Analysis</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>9</b> Nov 2020</p> <p>Verification and Validation in Engineering Simulation</p> <p>Online, Webex</p> <p>Training Course</p>	<p><b>11</b> Nov 2020</p> <p>Elements of Turbulence Modeling</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>
<p><b>12</b> Nov 2020</p> <p>Structural Optimization in FEA</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>19</b> Nov 2020</p> <p>Webex-Kurs: Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</p> <p>WebEx, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>24</b> Nov 2020</p> <p>Principes de la simulation des données et des processus de la simulation</p> <p>Paris, France</p> <p>Training Course</p>
<p><b>24</b> Nov 2020</p> <p>Formation - Modélisation et simulation des systèmes complexes</p> <p>Paris, France</p> <p>Training Course</p>	<p><b>1</b> Dec 2020</p> <p>Vérification &amp; Validation des Simulations pour l'ingénierie</p> <p>Webex, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>2</b> Dec 2020</p> <p>FEA Day to Day</p> <p>Stratford-upon-Avon, UK</p> <p>Training Course</p>
<p><b>2</b> Dec 2020</p> <p>CFD for Structural Designers &amp; Analysts</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>15</b> Dec 2020</p> <p>Advanced Dynamic FEA</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>	<p><b>17</b> Dec 2020</p> <p>Practical Modelling of Joints and Connections</p> <p>eLearning, Online</p> <p>eLearning</p>

## NAFEMS Schulung

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

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

9. - 11. November 2020, 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/vandv20-2](http://www.nafems.org/vandv20-2)

## NAFEMS Schulung

# Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie

27. - 28. Oktober 2020 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

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

### Gliederung

Grundlegendes zur FKM-Richtlinie

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

### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/fkm20-3](http://www.nafems.org/fkm20-3)

Theorie zum statischen Festigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

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

Beispiel „Getriebegehäuse“ zum statischen Nachweis

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

Theorie zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

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

Beispielrechnung „Getriebegehäuse“ zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis

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

Einführung in die Spannungskonzepte für die Schweißnahtbewertung

- > Nennspannungskonzept
- > Strukturspannungskonzept
- > Kerbspannungskonzept

- > Modellierung für Kerbspannungskonzept

Theorie Statischer Nachweis für geschweißte Bauteile

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

Beispiele zum statischen Nachweis geschweißter Bauteile

- > Strukturspannungsnachweis
- > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis

Theorie Ermüdungsnachweis für geschweißte Bauteile

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

### Referent

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

## NAFEMS Schulung

# Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

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

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

### Who Should Attend

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

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

### Technical Content

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

cedures, Difficulties in modelling non-linear problems.

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

### Tutor

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



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

### Course Language

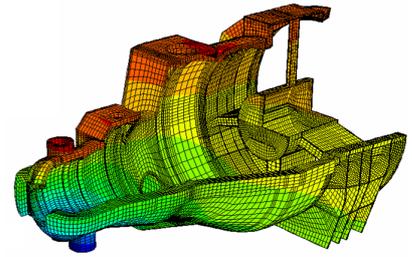
English

### Inhouse-Kurs

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

## NAFEMS Schulung

# Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation



19. Nov. + 26. Nov. 2020, online (2-tägig, Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Die Schulung vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die notwendigen Grundlagen für den erfolgreichen und effizienten Einsatz der Finite-Elemente-Methode. Nach Auffrischung von strukturmechanischem Basiswissen, welches für das Verständnis und für die kompetente Auswertung von FE-Berechnungen unerlässlich ist, wird auf leicht verständliche Art erklärt, wie die FE-Programme arbeiten. Zahlreiche einfach gehaltene, anwendungsspezifische Beispiele aus der Industrie unterstützen die Diskussion um Voraussetzungen für adäquate Modellbildung und liefern wertvolle Tipps für die professionelle Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Ingenieure und Konstrukteure, welche ihre Kenntnisse in Technischer Mechanik bzw. Festigkeitslehre aus der Studienzeit im Hinblick auf die Anwendung bei FE-Simulationen auffrischen und ausbauen möchten, sind besonders angesprochen. Der Kurs wird in einer Workshop-Atmosphäre durchgeführt, wodurch eine aktive Mitwirkung gefördert wird.

### Inhalte

- Einführung, Grundbegriffe und Prinzipien
  - Freiheitsgrade / Lagerung / Freischneiden / Gleichgewichtsbetrachtung
  - Innere Kräfte / Beanspruchung / Schnittgrößen
  - Spannungszustände / Hauptspannungen
- Typische Beanspruchungsfälle
- Werkstoffparameter / Versagenshypothesen / Sicherheitsfaktor
- Wechsel- und Dauerfestigkeit, Ermüdung und Kerbwirkung
- Thermische Beanspruchung
- Spannungen und Verformungen in dünnwandigen Strukturen
- Stabilitätsprobleme: Knicken und Beulen
- Grundlagen der Elastodynamik / Schwingungen / Dynamische Beanspruchung
- Modellbildung als ingenieurmäßiger Prozess / Möglichkeiten und Grenzen der Vereinfachung
- Lineare und nichtlineare Problemstellungen
- Wie funktioniert FEM?
- Typische Finite-Elemente (1D, 2D und 3D) zur diskreten Beschreibung deformierbarer Körper
- Berücksichtigung von Symmetrien bei der Modellierung
- Modellierung von Materialverhalten / Evaluation von Versagenskriterien
- Dynamische FE-Berechnungen / Modale Analyse / Dämpfung / Transiente Schwingungen
- Thermische / thermo-mechanische Untersuchungen
- Beispiele für nichtlineare FE-Simulationen
- Voraussetzungen für effiziente FE-Modelle und zuverlässige Ergebnisse
- Optimale FE-Modelle dank gezielter Nutzung der Möglichkeiten von CAD-Software
- Tipps und Tricks für problemgerechte FE-Vernetzung
- Qualitätssicherung bei FE-Analysen / Ursachen möglicher Fehler bei der FE-Modellierung und Tipps für deren Erkennung
- Möglichkeiten zur Überprüfung der Ergebnisse
- Fallbeispiele / Workshop / Diskussion

### Referent



*Prof. Dr.-Ing. Armin Huß verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Technischen Mechanik,*

*Technischen Schwingungslehre und der Anwendung der Finiten Elemente Methode, davon über 20 Jahre Praxis-Erfahrung als freiberuflicher Ingenieur für die Anwendung der FEM in den unterschiedlichsten Bereichen der Technik. Seit Mitte 2009 ist er als Professor für Technische Mechanik, Schwingungslehre und Finite Elemente an der Frankfurt University of Applied Sciences tätig.*

### Kursprache

Deutsch

### Inhouse-Kurs

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

### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/fem20-2](http://www.nafems.org/fem20-2)

## NAFEMS Schulung

# Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

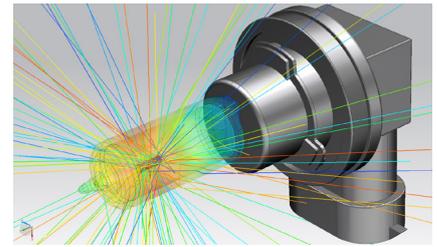
Die Schulung vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung (CFD). Neben der Funktionsweise von Programmen, die anhand zahlreicher einfacher Beispiele erläutert wird, steht die Vermittlung des gesamten Lösungsprozesses im Vordergrund. Mit Hilfe von 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. Ganguolf Kohnen hat über 25 Jahre Erfahrung mit CAE-Anwendungen mit Schwerpunkten auf dem Gebiet*

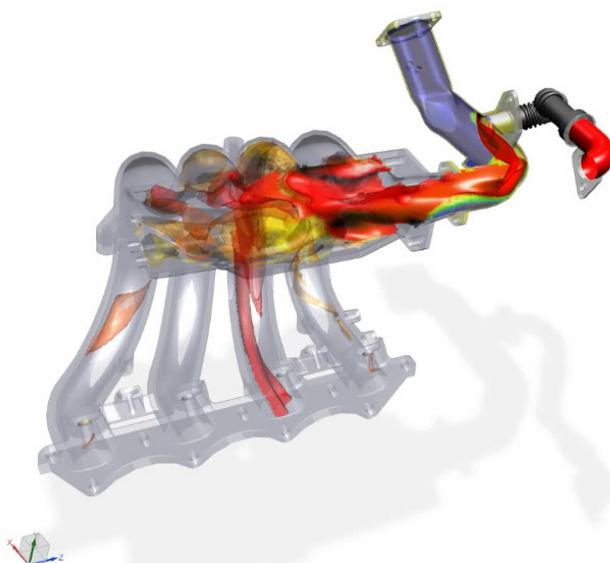
*der Strömungsberechnung CFD in Lehre, Forschung und Industrie. Herr Kohnen leitet den Bereich Maschinenbau und Virtual Engineering an der Hochschule Baden-Württemberg Mosbach.*

### Kursprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

### Inhouse-Kurs

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



# invitation<sup>2</sup>TENDER



## How to - Assess the Importance of Material Data Quality

The NAFEMS Manufacturing Process Simulation Working Group (MANWG) would like to commission a How-To guide titled "How to - Assess the Importance of Material Data Quality".

The simulation of manufacturing processes requires the use of many different materials (e.g. metals, plastics, composites, etc.) described by constitutive models and equation of state models in the simulation. These models are controlled by user-supplied input parameters which characterise the material response to loads, pressures, temperatures, etc. during manufacturing. While it is recommended to use validated data, often the quality of these model input parameters is not known since the modeller may use easily obtained values without caring too much about their origin. Another fact that is often underestimated is that some parameters are more important for simulation accuracy than others, dependent too on the development or design stage. This document is intended to provide insights to managers and practitioners as to best practices in assessing material model input quality and the relationship to simulation accuracy and outcome.

The document is intended to complement the existing publication that has been developed by MANWG, specifically "Material Characterisation for Metal Forming Simulation (TG01)". The new document is expected to be completely generic and should not focus on one specific manufacturing process.

### Scope

This document is expected to provide generic insights to a range of typical questions and topics, for example:

- Which material models are important (and may be required) for manufacturing process simulation? This should consider cost, lead-time, quality and design stage.
- What material parameters are required for these models? What are their specific temperature, loading, physical structure, process sequence, etc. ranges?
- What are the sources of material input parameters? How generally reliable are these sources?
- What approach should be used for determining the quality of material input parameters?
- How could one assess which constitutive model parameters are most important to the simulation outcome?

- How should one assess the sensitivity of simulation outcomes to material input parameters?
- What is constitutive model and material input parameter uncertainties and what methods may be used to quantify this?

The document is expected to make the reader aware of these key issues for general manufacturing simulation and provide examples and demonstrations of material model input consequences on simulation outcomes. If possible, the document should also indicate where there are current knowledge gaps and industrial demand to improve model accuracy that may currently be insufficient. It is envisaged that this document would spawn a number of more detailed process- and/or sector specific publications to be created in the future.

### Intended Readership

The intended readership consists of managers, engineers and scientists responsible for analysis and modelling activities within their organisation. The document is expected to provide these decision makers and practitioners with a guide to the key issues that need to be considered when implementing a manufacturing process simulation requiring specific material data input, that may be part of a fuller manufacturing simulation process. Managers that want to introduce engineering simulation into their companies and need advice on how best to do so.

### Format / Cost / Timescale / Expected Length

- The key issues may be expressed as a series of questions that the practitioner may ask themselves in preparing and performing a manufacturing process simulation and analysis.
- The total cost is not expected to exceed £4,000 (GBP) which should include responding to a single set of consolidated comments from the review team.
- The first draft for review must be complete within 12 months of placement of contract. Interim work-in-progress drafts may be requested by the review panel.
- The publication is anticipated to be approximately 50 A5 pages in length.

Proposals should be sent to [manufacture@nafems.org](mailto:manufacture@nafems.org) for a Submission deadline: **1st of January 2021**.

### Potential authors should submit the following:

- A brief description of the main topics to be covered
- Chapter and section headings with an approximate number of pages per chapter
- Timescale for completing the book
- Cost
- CVs of the authors (Maximum two-pages per author)

## How to - Modelling of Extreme Deformation

The NAFEMS Computational Structural Mechanics Working Group (CSMWG) would like to commission a How-to guide providing guidance on modelling extreme deformation.

The intent of the document is to act as an introductory guide for analysts who, whilst experienced in small displacement finite element simulation, wish to understand the simulation challenges posed by systems with much greater deformation. Examples include high-speed impacts, blast response and penetration of materials and structures, slow-speed but severe forming processes (e.g. forging and extrusion) and simulation of parts containing elastomeric or foam materials.

The focus of the document should be on the challenges associated with the solution of these models, including discussion and comparison of the various points listed below. The use of explanatory example problems is strongly encouraged. These are to be used to illustrate the difficulties encountered in obtaining convergence to a realistic solution, e.g. due to excessive mesh distortion, and how alternative approaches can permit the simulation to proceed to completion.

Other aspects of extreme deformation modelling are of interest, but should not be the main focus. These aspects are listed under "additional points of interest" in the scope below.

### Scope

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

- Fundamental differences between static implicit, dynamic implicit, and dynamic explicit simulation schemes. Stress and strain measures for large deflections.
- Wave propagation phenomena
- Solution methods
  - Implicit vs explicit solution schemes
  - Computer requirements for implicit and explicit solvers, and scalability issues
  - The use of explicit dynamic schemes to solve implicit static problems with extreme deformation, and how to ensure a physically representative solution
  - Riks method and artificial stabilisation to assist in unstable static calculations

- The transfer between solution schemes, or explicit-implicit switching, eg springback after forming
- Finite element modelling
  - Lagrangian meshes (including deliberate pre-distortion to become progressively better shaped during the calculation)
  - Re-meshing and mapping of Lagrangian solutions from one mesh to another after excessive deformation
  - Purely Eulerian grids and interaction between Lagrangian meshes within Eulerian grids
  - Arbitrary Lagrangian-Eulerian adaptive meshing
  - Particle methods (SPH) and interactions between particle and Lagrangian regions
  - Common pitfalls and solution verification checking (eg Eulerian material leakage past Lagrangian boundaries).
- Illustrative examples
- Using benchmarks or NAFEMS publications (eg forging tutorials, R0117) From published material, e.g. conference or journal papers

Additional points of interest include:

- Material modelling
- Contact modelling, friction, erosion.

### Intended Readership

Analysts who are experienced in small displacement or mildly non-linear problems who require knowledge of how to solve extreme deformation problems.

### Format / Cost / Timescale / Expected Length

- The total cost is not expected to exceed €7,000 which should include responding to a single set of consolidated comments from the review panel.
- The first draft for review must be complete within 12 months of placement of contract. Interim work-in-progress drafts may be requested by the review panel.
- The publication is anticipated to be approximately 70 A5 pages in length.

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

Submission deadline: **1st of January 2021.**

### Potential authors should submit the following:

- A brief description of the main topics to be covered
- Chapter and section headings with an approximate number of pages per chapter
- Timescale for completing the book
- Cost
- CVs of the authors (Maximum two-pages per author)

For full details visit [nafe.ms/tenders](http://nafe.ms/tenders)  
or contact the NAFEMS Technical Officer [technical@nafems.org](mailto:technical@nafems.org)

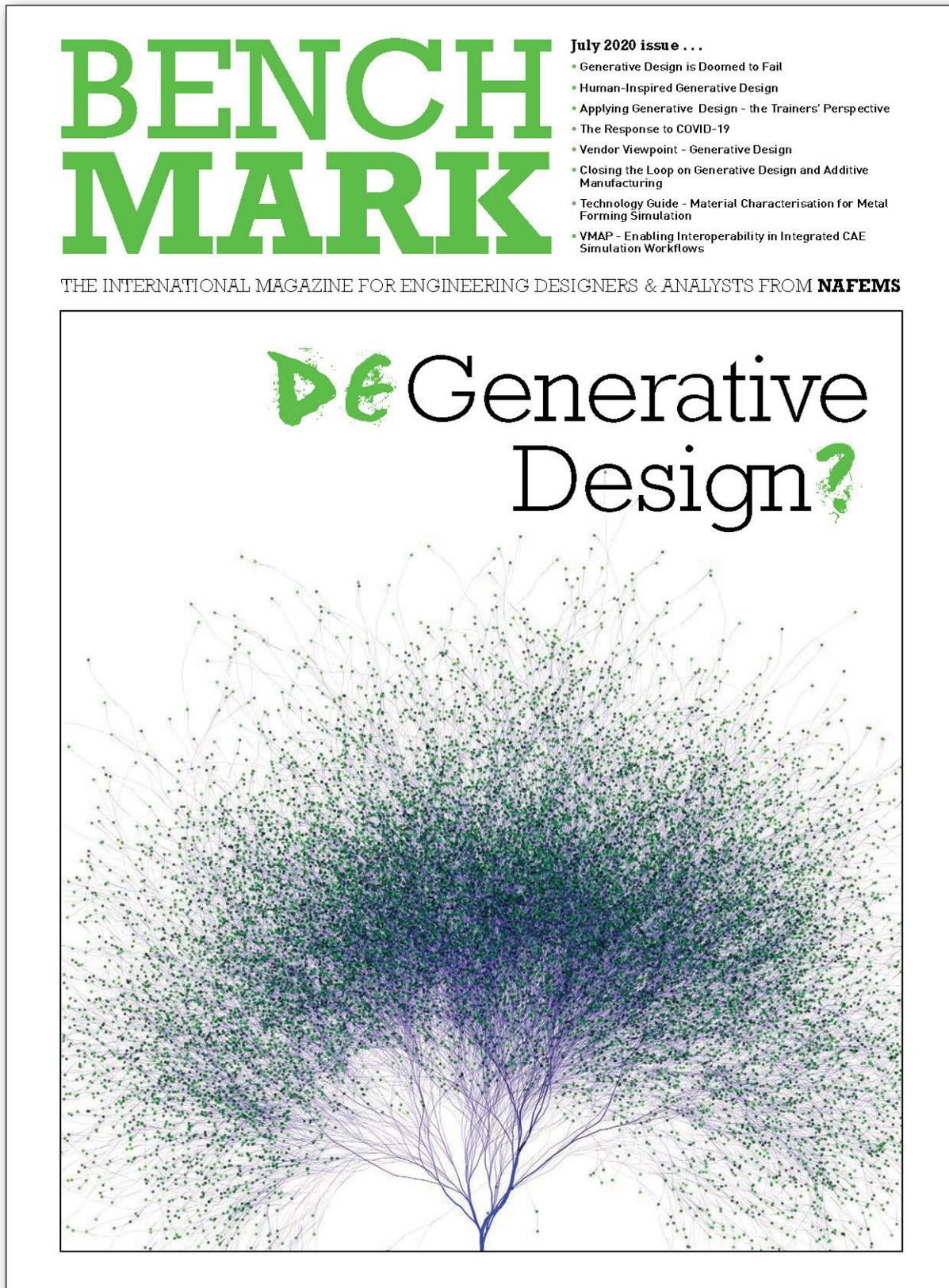
Internationales NAFEMS Magazin

## Benchmark Magazin, Ausgabe Juli 2020

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

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

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



**ALTAIR****Altair erweitert strategische OEM Vereinbarung mit Hewlett Packard Enterprise (HPE) und optimiert High-Performance Computing**

Altair, ein weltweit agierendes Technologieunternehmen, das Lösungen für die Bereiche Produktentwicklung, High-Performance Computing (HPC) und Data Analytics anbietet, erweitert seine mehrjährige OEM Vereinbarung mit Hewlett Packard Enterprise (HPE). Im Rahmen der Vereinbarung bietet Altair die neue erweiterte Version des Altair PBS Professional Workload Managers und Job Schedulers in sämtlichen branchenführenden HPC Systemen von HPE an, einschließlich der HPE Apollo Systeme und der neuen Reihe der HPE Cray Supercomputer. Darüber hinaus kann der Geschäftsbereich HPE Pointnext Technology Services, der Beratungs- und professionelle Dienstleistungen für Entwicklungs- und Bereitstellungs-lösungen anbietet, für den Support von Altairs neuem Softwareportfolio genutzt werden.

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

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

Beta CAE Systems veröffentlichte kürzlich die neue Version SPDRM 1.4.0, Version 21.0.0 der ANSA, Epilysis, META und Komvos software suite.

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

**COMSOL****Comsol ernennt SGL Carbon zum Comsol Certified Consultant**

Comsol freut sich, bekannt zu geben, dass SGL Carbon offiziell in die Liste der weltweiten Comsol Certified Consultants aufgenommen wurde. SGL Carbon CAE Services ist aus der internen Modellierungs- und Simulationsgruppe von SGL Carbon hervorgegangen und bietet nun auch

extern CAE-Dienstleistungen im Bereich Multiphysik-Simulation von Fertigungsprozessen an, um Kunden kostengünstiger, schneller und effizienter zu ihren Entwicklungszielen zu führen. Die Fachkompetenz der SGL Carbon im Bereich der CAE-Dienstleistungen umfasst die Simulation von Herstellungsverfahren mit komplexen Materialien und wird durch umfangreiche Expertise in der Bestimmung von Materialeigenschaften und der Modellvalidierung ergänzt. Durch den Einsatz der Comsol Multiphysics Software können die Experten der SGL Carbon komplexe Materialmodelle erstellen, die Herausforderungen wie Extremtemperaturen in Industrieöfen, chemische Reaktionen in Reaktoren oder Phasenwechsel in Energiespeichern berücksichtigen und präzise darstellen.

„Mit der Ernennung zum Comsol Certified Consultant stellen wir unseren Kunden multiphysikalische Expertise auf höchstem Niveau zur Verfügung“, sagt Dr. Bojan Jakanovic, Senior Expert Modeling bei SGL Carbon. „Die Zusammenarbeit ermöglicht es uns, zuverlässige Simulationsdienstleistungen einem noch breiteren Spektrum an Kunden zur Verfügung zu stellen. Unser Mitarbeiterteam, das bereits über umfangreiche Erfahrung in Wissenschaft, industrieller Forschung und Entwicklung verfügt, profitiert von den neu hinzugewonnenen Ressourcen ebenso wie unsere Kunden, die dadurch zusätzliche Erkenntnisse aus der Simulation gewinnen können.“

Das Portfolio der SGL Carbon im Bereich CAE-Dienstleistungen deckt ein breites Spektrum an Prozessbereichen ab, darunter elektromagnetische Erwärmung, Wärme-Struktur-Kopplung oder Festkörper- und Porendiffusion. Auf dieser Grundlage befasst sich ein Team aus hochqualifizierten Ingenieuren mit Ursachenanalysen, Designoptimierungen von Fertigungswerkzeugen und dem Erstellen von Comsol Simulations-Apps.

„Wir freuen uns, mit den Experten der SGL Carbon für CAE-Dienstleistungen einen Dienstleister mit einem

breiten Kompetenzspektrum in unsere Liste der weltweit zertifizierten Berater aufnehmen zu dürfen“, sagte Dr. Thorsten Koch, Geschäftsführer Comsol Multiphysics GmbH. „Wir sind uns sicher, dass ihre langjährige Expertise im Umgang mit komplexen Materialien es einer Vielzahl an Kunden ermöglicht, von hochwertigen Simulationslösungen zu profitieren.“

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

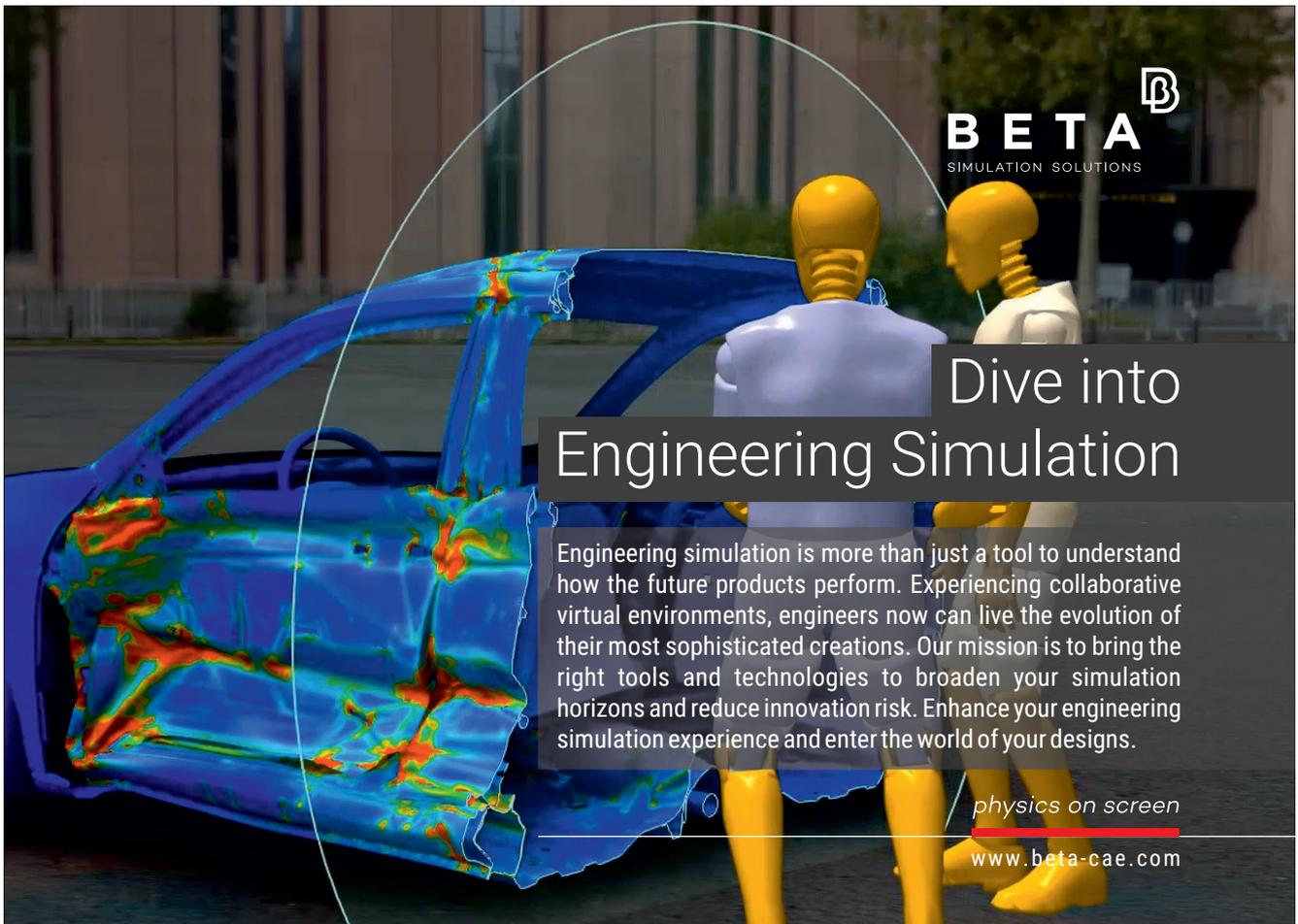
**CPU24/7****CPU 24/7 GmbH und MSC Software GmbH schließen Kooperationsvereinbarung**

- siehe auch MSC Software .

Hexagon -

Die CPU 24/7 GmbH, Deutschlands führender Cloud-Anbieter für IT-Engineering-Plattformen, gibt die neue Kooperation mit der MSC Software GmbH, der deutschen Niederlassung von einem der weltweit renommiertesten Anbieter von Softwarelösungen im Computer Aided Engineering (CAE), bekannt. Damit ist CPU 24/7 nun offizieller Kooperationspartner und Reseller der MSC Software GmbH. Zusammen streben beide Unternehmen eine langfristige und nachhaltige Partnerschaft an, bei der v.a. durch ein transparentes, stundengenaues Abrechnungsmodell für die Nutzung von Hard- und Software die bestmögliche Betreuung ihrer Kunden im Vordergrund steht.

Mit MSC One können Kunden nun die gesamte MSC Produktpalette stundenweise in der Engineering Cloud nutzen. Durch die neu geschlossene Kooperationsvereinbarung wird das bestehende Software-Portfolio der CPU 24/7 Engineering Cloud um innovative und kosteneffiziente CAE-Software-Lösungen für die Industrie erweitert. Ob erste Konzeptentwürfe, die Erstellung eines digitalen Modells bis zur Analyse virtueller Prototypen – ab sofort kann das Lizenztokensystem MSC One in Verbindung mit State-of-the-Art HPC-Servern direkt über die On-demand-Plattform Resource Area gebucht und nach einem Frei-



**BETA**  
SIMULATION SOLUTIONS

## Dive into Engineering Simulation

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

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

gabeprozess entsprechend genutzt werden. Der Preis ist zunächst auf 0,20 € / Token / Std. festgesetzt.

Daniel Gülzow, Head of Presales bei CPU 24/7: „CPU 24/7 und MSC Software festigen die seit Jahren bestehende Partnerschaft mit einer Rahmenvereinbarung, um unsere Kunden gezielt mit performanter Hardware, modernster Software und den dazu passenden Lizenzen zu bedienen sowie die Positionierung beider Unternehmen als führende Technologieanbieter der CAE-Branche weiter zu stärken.“

Perfektes Zusammenspiel aus Hardware und Software für optimale Simulationsergebnisse. Für MSC Software GmbH ist die Kooperation mit dem Engineering Cloud Provider CPU 24/7 aus strategischer Sicht ein wichtiger Schritt. Unternehmen unterschiedlichster Industriezweige nutzen vermehrt die speziell angepassten und sicheren Cloud-Lösungen der CPU 24/7, um hohe Anschaffungs- und Wartungskosten

für In-house-Lösungen zu vermeiden. Mit CPU 24/7 als Performance Partner wird Anwendern von MSC künftig ein unkomplizierter Zugang zu skalierbaren High Performance Computing Ressourcen ermöglicht. Dr. Tarik El Dsoki, Geschäftsführer von MSC Software GmbH: „Die Partnerschaft zur Nutzung von MSC Software in der CPU 24/7 Engineering Cloud unterstreicht unser erklärtes Ziel, Ingenieuren und Wissenschaftlern aus dem Research & Development (R&D)-Umfeld eine allumfassende Plattform für die digitale Produktentwicklung zu bieten.“ Daniel Gülzow fasst die Kooperation weiter zusammen: „Den Kunden können nun gemeinsam ganzheitliche Lösungen angeboten werden. Die befristete Lizenznutzung ist nun ideal auf die gemieteten Hardware-Komponenten abgestimmt. Damit stellen wir sicher, allen Herausforderungen in der industriellen Produktentwicklung rund um die aktuellen und zukünftigen Themen der

Digitalisierung gerecht zu werden.“ fährt Gülzow fort. IMDEA

[www.engineeringcloud.io](http://www.engineeringcloud.io)

## DYNAMORE

### Luftfahrtforschung: Öffentlich gefördertes Projekt TISTRAQ bewilligt

In Zusammenarbeit mit den Partnern Heggemann und FAU untersucht das DYNAMore MCC im Rahmen des vorerst auf vier Jahre ausgelegten Forschungsprojekts TISTRAQ die Herstellung von Blechformteilen aus Titanlegierungen für die Luftfahrt.

Hauptziel des ab 1.7.2020 vom BMWi im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms der Bundesregierung geförderten Verbundprojektes TISTRAQ (TITanium Solution Treated & RAPid Quenching) ist die Entwicklung eines Umformprozesses für die energie- und materialeff-



## Design & engineering simulation solutions

Smarter CAE, virtual manufacturing & costing

| [mscsoftware.com](https://www.mscsoftware.com)



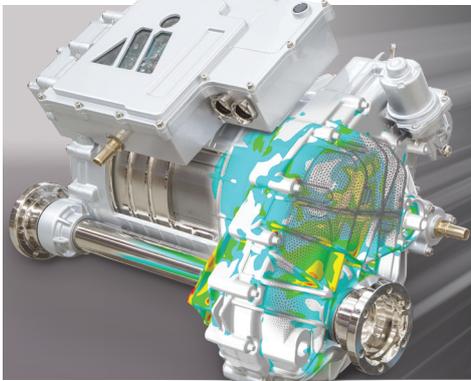
© 2020 Hexagon AB and/or its subsidiaries and affiliates. All rights reserved.

fiziente Herstellung von Blechformteilen aus  $\alpha+\beta$ -Titanlegierungen mit gesteigerten mechanischen Kennwerten durch eine prozessintegrierte Wärmebehandlung. Dabei werden erstmalig  $\alpha+\beta$ -Titanlegierungen resistiv schnellerwärmt und mit gekühlten Werkzeugen abschreckumgeformt. Die prozessintegrierte Wärmebehandlung (Umformung und Abschrecken in einem Schritt) erhöht das Leichtbaupotential durch die Steigerung mechanischer Eigenschaften und senkt die Herstellkosten für blechbasierte Titanbauteile durch den Entfall einer nachgelagerten Wärmebehandlung. Durch die angestrebte sehr kurze Prozesszeit (STQ: short time quenching) soll zudem die Bildung einer sauerstoffangereicherten spröden Randschicht weitestgehend vermieden werden. Die Umformung von  $\alpha+\beta$ -Titanlegierungen mit prozessintegrierter Wärmebehandlung führt zu einer im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik ökologisch und

ökonomisch effizienteren Herstellung von Titanstrukturen mit zugleich hohem Leichtbaupotential durch die verbesserten mechanischen Eigenschaften. Der STQ-Prozess bietet somit ein großes Potential für die Steigerung der Leistungsfähigkeit und der Effizienz in der Luftfahrt. Die Prozessroute basiert auf dem in der automobilen Serienfertigung erfolgreich für die Warmumformung von Stählen eingesetzten Presshärten. Gemeinsam mit den Projektpartnern soll der Prozess für Titanlegierungen entwickelt und der Nachweis erbracht werden, dass der Prozess simulationstechnisch beherrschbar ist und zu einer dauerhaften Erhöhung der mechanischen Kennwerte bei den verwendeten  $\alpha+\beta$ -Titanlegierungen führt. DYNAMore übernimmt die simulative, lokale Abbildung der Gefügeumwandlung im STQ-Prozess, sowie die Prognose der zugehörigen lokalen mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. Mit Erreichen

dieses Zieles können die Potentiale des Verfahrens durch Optimierung des Prozesses innerhalb einer Simulationsumgebung bestimmt werden. Der Arbeitsplan sieht vielfältige experimentelle Untersuchungen zum Abkühlverhalten von TiAl6V4 bei diversen Abkühlgeschwindigkeiten, sowie mechanische Untersuchungen der erzeugten Gefüge vor. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse entwickelt DYNAMore ein thermomechanisch gekoppeltes Simulationsmodell, das in der Lage ist, den gesamten Umformprozess eines Bauteils zu beschreiben. Die lokalen Eigenschaften des Werkstoffs werden dabei mit einem Modell zur Bestimmung der Phasenumwandlungskinetik, abhängig u. A. von Deformationshistorie und Abkühlgeschwindigkeit beschrieben. Neben der prinzipiellen Beschreibung des Modells, dessen Implementierung und Validierung, werden vom DYNAMore MCC ausführliche Kalibrierungsumfänge geleistet, um

**FEMFAT** software  
BY MAGNA POWERTRAIN



**FEMFAT (Finite Element Method Fatigue)** performs fatigue analyses in combination with most finite element solvers and pre-processors.

- Fast and flexible fatigue life prediction
- Multiple joint type assessment
- Open database concept (materials, joints)
- Assessment in time and frequency domain
- Considering production processes
- More than 400 materials in database
- Verifications in more than 1000 projects

**2020 FEMFAT Roadshows**

Austria 17 October  
Poland 23 October  
Germany 28 November  
Germany 27 November

[femfat.magna.com](http://femfat.magna.com)

GL  
GL Renewables Certification  
certification.no.gl.com/2019

Alliance Partner  
Altair  
altairalliance.com

den hohen Anforderungen an die Prognosefähigkeit Rechnung zu tragen.

Dazu Prof. Dr.-Ing. André Haufe, Leiter des DYNAMore MCC: „Mit dem Zuspruch dieses Forschungsprojekts können wir unsere simulationstechnische Kompetenz im industriell-werkstoffwissenschaftlichen Bereich weiter ausbauen und schaffen zusammen mit den Projektpartnern Heggemann und FAU die Basis für vielfältige, neue Applikationsmöglichkeiten von Titanblechbauteilen.“

Die Partner im Konsortium sind:

Heggemann AG: 1962 als „Luftfahrttechnischer Betrieb“ gegründet hat sich Heggemann als international anerkannter Spezialist für die Entwicklung und Fertigung komplexer metallische Leichtbaustrukturen in der Luft- und Raumfahrtindustrie etabliert. Gemäß dem Unternehmensmotto „360° - from Engineering to Production“ realisieren 220 Mitarbeiter für Kunden die komplette Wertschöpfungskette von der Entwicklung über die Serienreifmachung bis zur Produktion einbaufertiger Strukturen und Systeme. Insbesondere das Production Quality Engineering zur Auslegung der stückzahloptimierten Herstellung sowie stetige Innovationen zeichnen das inhabergeführte Unternehmen mit Sitz am Airport Paderborn-Lippstadt aus. Als Luftfahrtzugelassener Herstellbetrieb und zertifizierter Schweißfachbetrieb bringt Heggemann insbesondere die über 50-jährige Erfahrung bei der Entwicklung von Fertigungsprozessen nach Luftfahrtqualitätsstandards mit in das Projekt ein. Heggemann verfügt über umfangreiche Kompetenzen im Umgang mit hochfesten Titanlegierungen bzgl. des Schweißens, der zerspanenden Bearbeitung, der Blechbearbeitung sowie der Montage von ganzen Baugruppen.

FAU: Der Lehrstuhl für Allgemeine Werkstoffeigenschaften (WW1) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) beschäftigt sich seit vielen Jahrzehnten mit der Erforschung der Mikrostruktur-Eigenschaftskorrelation von Werkstoffen und den zugehörigen Schädigungsmechanismen. Ein Schwerpunkt sind dabei Leichtmetallwerkstoffe, insbesondere auch Titan-Legierungen. Der Lehrstuhl verfügt über eine große Expertise auf dem Gebiet der mikrostrukturellen und mechanischen Charakterisierung von Werkstoffen. Der Lehrstuhl WW1 ist experimentell sehr gut ausgestattet: Neben makroskopischen mechanischen

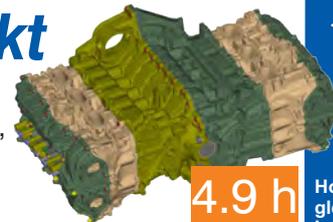
Prüfverfahren wie Zug-, Druck-, und Ermüdungsprüfung und Verfahren zur Ermittlung der mechanischen (Langzeit-) Eigenschaften bei hohen Temperaturen verfügt der Lehrstuhl WW1 über eine umfangreiche Ausstattung im Bereich der mikrostrukturellen Charakterisierung. Am Lehrstuhl sind ca. 30 Doktoranden in verschiedenen über EU, DFG, BFS, BMBF geförderten Projekten beschäftigt. Der Lehrstuhl WW1 ist Mitglied im Cluster of Excellence EXC315, Engineering of Advanced Materials, arbeitet in mehreren laufenden Sonderforschungsbereichen und Graduiertenkollegs mit und hat erfolgreich zwei ERC-Grants eingeworben.

DYNAMore Material Competence Center (MCC): Als Software- und Entwicklungsdienstleister bietet DYNAMore ein Produktportfolio an, das die Finite-Elemente Software LS-DYNA, den Pre- und Postprozessor LS-PrePost, die Optimierungsoftware LS-OPT sowie zahlreiche FE-Modelle für die Crashesimulation (Dummy-, Barrieren-, Fußgänger-, und Menschmodelle) umfasst. Die Simulationssuite LS-DYNA wird von Entwicklern der DYNAMore GmbH mit- bzw. weiterentwickelt. DYNAMore hat langjährige Projekt- und Entwicklungserfahrung in Modellentwicklung und Simulation (Prozesssimulation, Insassenschutz, Fahrzeugcrash) in allen Bereichen der Mobilität (Luft- und Raumfahrt, Schienen- und Kraftfahrzeuge). Einen besonderen Schwerpunkt im jüngst mit neuen, größeren Räumlichkeiten ausgestatteten DYNAMore Material Competence Center (MCC) bildet die Entwicklung von Werkstoffmodellen (Metalle, Kunststoffe und Composite- Materialien) und die Ableitung von Methoden zu deren Bedatung und Validierung. Insbesondere dieses Know-How ist im nunmehr geförderten TISTRAQ-Projekt relevant, um für den bezogen auf  $\alpha+\beta$ -Ti-Legierung neuartigen Abschreckumformprozess die Bedeutung von Werkstoffmodellen in enger Kooperation mit den Projektpartner entlang der gesamten Prozesskette durchführen zu können.

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

# PERMAS - Spitze mit Kontakt

- hoch-effizient (bis zu 40mal schneller als andere verfügbare Löser),
- sehr genau (feinere Netze ergeben bessere Ergebnisse),
- für kleine bis sehr große Modelle (> 150M Fhg., > 300T Kontakte),
- mit speziellen 3D Schraubenmodellen,
- mit Reibung, mit Plastizität, mit großen Drehungen,
- mit nachfolgender Dynamik wie Frequenzgang (mit Linearisierung),
- mit integrierter Optimierung (wie Topologie und Form),
- für Getriebe, Motoren, Maschinen und alles, wo Kontakte wichtig sind.



4.9 h

19M Knoten,  
13M Elemente,  
56M Fhg.,  
145T Kontakte,  
Dichtung,  
Schraubenvorspannung  
2 Temperaturniveaus,  
37 Lastschritte



Holen Sie sich gleich mehr Informationen unter [www.permas.de](http://www.permas.de)

INTES GmbH  
Breitwiesenstr. 28  
70565 Stuttgart  
0711 784990  
info@intes.de

## FLUIDON

### Wenn der Zylinder ruckt oder das Ventil rattert

Fluidon GmbH, erfahrener Dienstleister für Simulation und Analyse von fluidtechnisch-mechatronischen Systemen, verzeichnet in den vergangenen Monaten einen starken Nachfrageanstieg für Dienstleistungen zum Thema Anlageninbetriebnahme. Schwerpunkte sind die simulationsbasierte, virtuelle Inbetriebnahme sowie die Konzeption und Betreuung von Messkampagnen vor Ort beim Kunden. Um dem Bedarf im wachstumsstarken Servicesegment der Inbetriebnahme gerecht zu werden, wird Fluidon in diesen Bereich verstärkt investieren. Mit über 25 Jahren Erfahrung in der Simulation und Analyse von komplexen fluidtechnisch-mechatronischen Systemen bietet Fluidon kompetente Unterstützung bei widerspenstigen fluidtechnischen Systemen. Durch detaillierte Problemanalyse und Fehlerdiagnose unterstützt das Experten-Team Anlagen- und Maschinenhersteller bei der Lösungsfindung zur Fehlerbehebung und Inbetriebnahme von fluidtechnischen Anlagen und Systemen. So sind in der Entwurfsphase komplexer fluidtechnischer Systeme die dynamischen Wechselwirkungen zwischen System und Arbeitsprozess zum Auslegungszeitpunkt oftmals unbekannt und müssen geschätzt werden. Als Konsequenz verläuft die Inbetriebnahme häufig nicht reibungslos. Drängt zusätzlich ein

ungeduldiger Kunde auf fristgerechte Bereitstellung, ist schnelle Hilfe gefragt.

„Die Unterstützung der Inbetriebnahme durch Fluidon ist eine ideale Projekt-Ergänzung für alle Fluidon-Kunden sowie für Unternehmen, die keine oder nur wenig eigene Expertise im Bereich Fluidtechnik besitzen. Mit Hilfe fluidtechnisch-mechatronischer Simulation wird eine zeit- und kostenintensive Fehlersuche nach der Methode „Versuch und Irrtum“ vermieden. Verbesserungspotentiale können souverän identifiziert, qualifiziert und zur finalen Problemlösung hin optimiert werden“, sagt Dr. Heiko Baum, Geschäftsführer von Fluidon. „Für die kommenden Monate sind wir im Bereich Engineering-Dienstleistungen bereits sehr gut ausgelastet, sehen aber weiteren Bedarf bei unseren Kunden und Interessenten im Markt. Wir haben unsere Kapazität in diesem Bereich ausgebaut und das Fluidon-Expertenteam vergrößert, um unsere Kunden bei der Lösungsfindung und Fehlerbehebung zu unterstützen.“

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

## HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK

### Wir heißen jetzt „Hottinger Brüel & Kjaer GmbH“

Die Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH hat am 1. August 2020 ihren Namen in Hottinger Brüel & Kjaer GmbH geändert und die Brüel &

Kjaer GmbH wird am 1. September 2020 auf die umbenannte Hottinger Brüel & Kjaer GmbH verschmolzen. Damit tun wir einen weiteren wichtigen Schritt im Rahmen des Zusammenschlusses von HBM und B&K zu Hottinger Brüel & Kjaer.

Durch den Zusammenschluss stärken wir unsere Position im Bereich Test & Measurement weiter. Die Zusammenführung unserer Fähigkeiten, Ressourcen und Arbeitskräfte ist die Grundlage, um Ihnen ein komplettes Portfolio an Angeboten bereitstellen zu können, welches die physische Welt der Sensoren, Tests und Messungen mit der digitalen Welt der Simulation, Modellierungssoftware und Analyse vereint.

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

## 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)

# SIMULATE WITH COMPLEX GEOMETRIES AND COMPLEX PHYSICS



[www.meshfree.eu](http://www.meshfree.eu)



## MSC SOFTWARE - HEXAGON

### CPU 24/7 GmbH und MSC Software GmbH schließen Kooperationsvereinbarung

- siehe auch CPU 24/7 -

Die CPU 24/7 GmbH, Deutschlands führender Cloud-Anbieter für IT-Engineering-Plattformen, gibt die neue Kooperation mit der MSC Software GmbH, der deutschen Niederlassung von einem der weltweit renommiertesten Anbieter von Softwarelösungen im Computer Aided Engineering (CAE), bekannt. Damit ist CPU 24/7 nun offizieller Kooperationspartner und Reseller der MSC Software GmbH. Zusammen streben beide Unternehmen eine langfristige und nachhaltige Partnerschaft an, bei der v.a. durch ein transparentes, stundengenaues Abrechnungsmodell für die Nutzung von Hard- und Software die bestmögliche Betreuung ihrer Kunden im Vordergrund steht.

Mit MSC One können Kunden nun die gesamte MSC Produktpalette stundenweise in der Engineering Cloud nutzen. Durch die neu geschlossene Kooperationsvereinbarung wird das bestehende Software-Portfolio der CPU 24/7 Engineering Cloud um innovative und kosteneffiziente CAE-Software-Lösungen für die Industrie erweitert. Ob erste Konzeptentwürfe, die Erstellung eines digitalen Modells bis zur Analyse virtueller Prototypen – ab sofort kann das Lizenztokensystem MSC One in Verbindung mit State-of-the-Art HPC-Servern direkt über die On-demand-Plattform Resource

Area gebucht und nach einem Freigabeprozess entsprechend genutzt werden. Der Preis ist zunächst auf 0,20 € / Token / Std. festgesetzt.

Daniel Gülzow, Head of Presales bei CPU 24/7, CPU 24/7 und MSC Software festigen die seit Jahren bestehende Partnerschaft mit einer Rahmenvereinbarung, um unsere Kunden gezielt mit performanter Hardware, modernster Software und den dazu passenden Lizenzen zu bedienen sowie die Positionierung beider Unternehmen als führende Technologieanbieter der CAE-Branche weiter zu stärken.

Perfektes Zusammenspiel aus Hardware und Software für optimale Simulationsergebnisse. Für MSC Software GmbH ist die Kooperation mit dem Engineering Cloud Provider CPU 24/7 aus strategischer Sicht ein wichtiger Schritt. Unternehmen unterschiedlichster Industriezweige nutzen vermehrt die speziell angepassten und sicheren Cloud-Lösungen der CPU 24/7, um hohe Anschaffungs- und Wartungskosten für In-house-Lösungen zu vermeiden. Mit CPU 24/7 als Performance Partner wird Anwendern von MSC künftig ein unkomplizierter Zugang zu skalierbaren High Performance Computing Ressourcen ermöglicht. Dr. Tarik El Dsoki, Geschäftsführer von MSC Software GmbH: „Die Partnerschaft zur Nutzung von MSC Software in der CPU 24/7 Engineering Cloud unterstreicht unser erklärtes Ziel, Ingenieuren und Wissenschaftlern aus dem Research & Development (R&D)-Umfeld eine allumfassende Plattform für die di-

gitale Produktentwicklung zu bieten.“ Daniel Gülzow fasst die Kooperation weiter zusammen: „Den Kunden können nun gemeinsam ganzheitliche Lösungen angeboten werden. Die befristete Lizenznutzung ist nun ideal auf die gemieteten Hardware-Komponenten abgestimmt. Damit stellen wir sicher, allen Herausforderungen in der industriellen Produktentwicklung rund um die aktuellen und zukünftigen Themen der Digitalisierung gerecht zu werden.“ fährt Gülzow fort. IMDEA

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

## NEXTFLOW SOFTWARE

### Nextflow Software stellt vielseitige, präzise und schnelle SPH-Lösung vor

Nextflow Software, ist einer der führenden Anbieter im Gebiet innovativer Computersimulationen für Strömungsdynamik (CFD) in Europa. Das Unternehmen präsentiert eine neue Lösung zur Untersuchung und Analyse komplexer Strömungen für industrielle Designs auf der Grundlage der SPH-Methode (Smoothed Particle Hydrodynamics) SPH - Die partikelbasierte Methode setzt neuen Standard auf dem CFD-Markt

Nach mehr als 20 Jahren Forschung hat das SPH-Verfahren dank Nextflow Software und vielen anderen Beteiligten den Weg von den akademischen Forschungseinrichtungen zu den Ingenieuren gemacht. Die Software ergänzt die traditionelle

Finite-Volumen-Methode (FV) durch geometrische Vernetzung, um komplexe und spezifische Bewegungen von Fluiden zu simulieren.

Die SPH-Methode wird von Automobilherstellern und -zulieferern für Schlüsselanwendungen, wie die Schmierung und Kühlung von Getriebe- und Antriebssystemen (einschließlich E-Motoren) oder die Fahrzeug-Wattierung eingesetzt. Sie wird aber auch für andere Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, Schifffahrt und Offshore, Umwelt und Energie, industrielle Prozesse/ Maschinen und Fertigung und vieles Weitere verwendet.

Die Hauptmerkmale der SPH-Methode sind:

- Sie löst die Navier-Stokes-Gleichungen mittels Abbildung von Fluidströmungen in Form von Partikelbewegungen. Dies ist besonders für Simulationen mit komplexen Festkörpergrenzflächen (Körperbewegung, Verformung, Kontakt...) sowie Flüssigkeiten (Mehrphasen, Zerstäubung, Koaleszenz...) gut geeignet. Herkömmliche FV-Methoden sind durch ihre netzbasierte Natur eingeschränkt und können solche Grenzflächen nicht effektiv simulieren.
- Sie erfordert keine manuelle Vernetzung und ermöglicht es Anwendern, Flüssigkeitsströmungssimulationen innerhalb weniger Minuten auszuführen, nachdem ihre CAD-Dateien fertig sind. Herkömmliche netzbasierte FV-Methoden erfordern eine mühsame und benutzerabhän-

gige manuelle Vernetzungsoperation, die wertvolle Stunden oder sogar ganze Arbeitstage hochqualifizierter Ingenieure in Anspruch nehmen.

SPH-flow - Verschiedene Solver zur Bewältigung aller Zielsetzungen, Anwendungsfälle und -szenarien mit SPH

Das SPH-Angebot von Nextflow Software umfasst zwei komplementäre Produkte, um allen technischen Anforderungen gerecht zu werden:

- SPH-flow Explorer wird typischerweise in der explorativen Designphase verwendet, wenn schnelle Simulationen erforderlich sind, um eine erste Orientierung und Richtung für Designentscheidungen zu finden.
- SPH-flow Designer bietet zuverlässige und detaillierte Erkenntnisse, die für Designanalysen in späteren Phasen nützlich sind.

SPH-flow bietet kompressible und inkompressible Formulierungen in beiden Solvoren, um alle Flüssigkeitsströme genau zu erfassen:

- Die inkompressible Formulierung mit SPH-Strömung eignet sich am besten für stark fragmentierte Ströme, bei denen die Flüssigkeit in Tröpfchen oder Strahlen zerstäubt wird, sowie für lang anhaltende Strömungen;
- Die kompressible Formulierung mit SPH-Strömung eignet sich am besten für Flüssigkeitsströmungen mit komplexer Physik und kurzer Dynamik, wie z.B. Stöße. Diese Formulierung wird besonders dann empfohlen, wenn es auf ein lokales Druckfeld

und die Genauigkeit der freien Oberfläche ankommt.

SPH-flow liefert die präziseste und schnellste SPH-Berechnung auf dem Markt

SPH-flow Designer verwendet die modernsten SPH-Modelle weltweit und verbessert die Präzision und Konvergenzordnung, selbst wenn es sich um komplexe Multiphysik handelt: Mehrphasenströmungen, Oberflächenspannung mit Benetzbarkeit, Fluid-Struktur-Wechselwirkungen (FSI), thermische Analyse, SPH-LBM (Lattice Boltzmann Methode) und SPH-FV Co-Simulation.

SPH-flow Explorer ist darauf optimiert, Ergebnisse so schnell wie möglich zu liefern, um die Simulationszeit zu begrenzen.

SPH-flow ist jetzt für Workstations und kleine Server sowie für High Performance Computing (HPC)-Cluster verfügbar, wenn große Rechenkapazitäten benötigt werden. Eine Version für die Graphics Processing Unit (GPU) wird ab Anfang 2021 angeboten.

SPH-flow kann bei bestimmten Anwendungen, die für die SPH-Methode geeignet sind, 5 bis 100 Mal schneller sein als FV-Solver, sodass Simulationen in Stunden statt Tagen durchgeführt werden können und bei solchen Anwendungen bessere Ergebnisse im Vergleich zu FV erzielen.

[www.nextflow-software.com](http://www.nextflow-software.com)

# DIGITAL ENGINEERING MAGAZIN

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



Wir sind immer für Sie da - auch im Homeoffice!

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

DIGITAL ENGINEERING Magazin

kostenfrei als ePaper an

Einfach hier lesen oder herunterladen



**WIN**  
VERLAG

Solutions to Market

**#stayathomereadandlearn**

## RESCALE

Rescale stellt die weltweit erste HPC-Analyseplattform speziell für Unternehmenslenker vor. San Francisco, 16. Juli 2020 - Rescale Inc., Marktführer im Bereich Enterprise Big Compute, gab heute die Markteinführung von Rescale Insight bekannt, der branchenweit ersten umfassenden Business-Management-Lösung für High Performance Computing (HPC). Zum ersten Mal ermöglicht Rescale Insight dem Management und den Unternehmenslenkern aus den Bereichen Finanzen, IT und Technik eingehende Kontrollen, um finanziellen, sicherheitstechnischen und HPC-Architektur-Anforderungen gerecht zu werden.

Bisherige Softwarelösungen für die Verwaltung von HPC-Ressourcen konzentrieren sich meist auf Auslastungsraten der IT-Infrastruktur, liefern aber keinerlei Erkenntnisse zu einzelnen Anwendungen oder geschäftlichen und finanziellen Zielen. Rescale Insight basiert auf einer vollständig verwalteten HPC-Plattform mit Daten für über 400 Anwendungen und ermöglicht so Analysen zur Nutzung von Softwarelizenzen, zur detaillierten Leistung der Hardware-Architektur und zur Budgetnutzung. Dieser komplette Satz an Kontrollwerkzeugen hilft IT-Verantwortlichen dabei, Compliance und Sicherheit zu gewährleisten. Dank der wirtschaftlichen Transparenz und der richtlinienbasierten Finanzkontrollen, sind Unternehmenslenker in der Lage, Kosten erheblich zu minimieren. Die serverlose Architektur von Rescale stellt darüber hinaus sicher, dass Kunden nur für das zahlen, was sie auch wirklich nutzen.

Rescale Insight umfasst die folgenden Funktionen:

- Finanzkontrollen
- Sicherheit und Zugriffskontrollen
- Multi-Team-Steuerung
- Software- und Softwarelizenzkontrollen.
- Steuerung der Infrastruktur-Architektur

Branchenführer wie Aerion Supersonic und Bionano Genomics profitieren bereits von den Vortei-

len von Rescale Insight Business Management und nutzen die Leistungsfähigkeit von HPC in der Cloud während sie gleichzeitig Compliance und Kontrolle sicherstellen.

„Rescale ermöglicht uns Compliance, Kontrolle und wirtschaftliche Sichtbarkeit, kombiniert mit den bestmöglichen Eigenschaften der Cloud, so dass wir schnell, effizient und parallel zueinander arbeiten können.“, sagte Bissell Smith, CIO & EVP bei Aerion Supersonic. „Cloud Computing ist ein grundlegender Bestandteil der langfristigen Strategie von Aerion. Wenn sicherheitstechnische Anforderungen nicht erfüllt werden, können die Folgen für das Unternehmen, für die Mitarbeiter und sogar für das Land sehr schwerwiegend sein, deshalb nehmen wir diese Angelegenheit sehr ernst“.

„Unsere Kunden verlagern HPC-Workloads zunehmend in die Cloud, was zu einem zunehmenden Bedarf an Sicherheits-, Architektur- und Finanzkontrollen führt“, so Edward Hsu, Vice President Product bei Rescale. „Rescale Insight hilft unseren Kunden, IT-Kontrollen in ihren Unternehmen umzusetzen. Gleichzeitig profitieren Entwicklungsteams von der Skalierbarkeit und der modernen Softwarearchitektur der Cloud, um Produktinnovationen zu beschleunigen.“

Darüber hinaus kündigte Rescale eine Vorschau auf die Technologie der branchenweit ersten HPC-Anwendungs-KI-Engine an, mit der die HPC-Workloads an die beste verfügbare Infrastruktur und Konfiguration angepasst werden können. Die KI-Engine eliminiert den Zeitaufwand für das Optimieren und Testen von Hardware, so dass sich die Endnutzer auf die Ausführung von Workloads konzentrieren können, die neue Produktinnovationen beschleunigen.

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

## TRANSVALOR

### Transvalor wird erstrangiger Partner des AFRC zur Unterstützung der neuen FutureForge-Anlage

Transvalor, ein führender Softwareentwickler in der Fertigungsprozessmodellierung wurde erstrangiger Partner (Tier 1) des Advanced Forming Research Centre (AFRC) der Universität Strathclyde, das zum National Manufacturing Institute Scotland (NMIS) gehört.

Als erster Partner des AFRC, der die kurz vor der Eröffnung stehende FutureForge-Anlage unterstützt, bringt Transvalor seine Expertise in der Prozesssimulation und intensive Kenntnisse über das Materialverhalten ein, das aus den Fertigungsprozessen hervorgeht.

Gemeinsam mit dem fundierten Fachwissen des AFRC über Werkstoffe, Metallumformung und Schmieden wird diese neue Partnerschaft dem Unternehmen Transvalor mit Sitz in Frankreich neue Möglichkeiten für angewandte Forschungstätigkeiten und Zugang zu verschiedensten Industriepartnern eröffnen.

Die FutureForge-Anlage wird Fertigungsunternehmen aller Größen dabei unterstützen, wettbewerbsfähiger zu werden, indem sie weniger energieintensive Verfahren zum Schmieden entwickelt. Sie wird auch digitale Technologien einsetzen, um die Entwicklung von Schmiedeprodukten zu beschleunigen, indem das traditionellerweise mit dem Schmiedevorgang einhergehende kostspielige Prinzip von Versuch und Irrtum vermieden wird.

FutureForge wird eine einzigartige physikalische Umgebung für einige der schwierigsten Aspekte des Warmumformens bieten, einschließlich einer 2000t Hydraulikpresse zum Frei-, Gesenk- und Isotherm-Schmieden.

Transvalor bietet technische Expertise und den Zugang zu seiner Software Digimu & Forge für mikrostrukturelles Modellieren innerhalb des Gesenkschmiedeprozesses. Forge ist eine Softwarelösung zur Simulation von Warm- und Kaltum-

formprozessen, die Unternehmen dabei unterstützt, Schmiedeteile für verschiedenste Industriezweige herzustellen, während Digimu Mikrostrukturveränderungen während der Umformungsprozesse simuliert. Das AFRC und Transvalor haben ihre Kräfte gebündelt, um Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu stärken und kostengünstige Lösungen für die Herstellung erstklassiger Schmiedeprodukte anzubieten. Durch die Partnerschaft intensiviert Transvalor seine Bereitschaft, eines der international renommiertesten Forschungszentren zu unterstützen, das mit Industriekunden aus vielen Sektoren zusammenarbeitet.

Dazu erklärte Emmanuel Chenot, Geschäftsführer von Transvalor: „Diese neue Partnerschaft ist zweifellos von strategischer Bedeutung für Transvalor, da sie die Möglichkeit bietet, angewandte Forschungstätigkeiten und eine Zusammenarbeit mit herausragenden Industriepartnern im Bereich der Umformtechnik und Metallurgie fortzuführen.“

Transvalor verfügt über umfangreiche Erfahrung in verschiedensten Industriesektoren, wie zum Beispiel der Luft- und Raumfahrt-, Automobil-, Energie-, Schwer- und Metallindustrie. Prozesssimulation ist heutzutage ein unverzichtbares Instrument, das vollkommen in den Entwicklungszyklus von Erzeugnissen integriert ist und Konstrukteuren, Ingenieuren und Wissenschaftlern Zugang zu genauesten Kenntnissen ermöglicht. Die digitale Simulation trägt wesentlich zur Steigerung der Innovationsfähigkeit bei, indem sie Umformbetrieben dabei hilft, in hohem Maße konkurrenzfähig zu bleiben. Durch eine geringere Anzahl von Prototypen und die Entdeckung von Produktionsfehlern werden Lösungen möglich, die zu einer deutlichen Verringerung der

Entwicklungszyklen und Kosten führen.

Im Rahmen der erstrangigen Partnerschaft Transvalors wird das Unternehmen in FutureForge, die weltweit modernste Forschungsplattform für Warmumformung, eingebunden. Der Vertriebsleiter von Transvalor für Nordeuropa, Oliver Schwesinger, sagt über die Zusammenarbeit: „Als erstrangiger Partner freuen wir uns, Lizenzen unserer bekannten Software Forge für Warmumformprozesse und Digimu für mikrostrukturelle Entwicklungen von Metalllegierungen installieren zu können. Die Forschungsteams des AFRC führen ambitionierte Arbeiten durch, um die Veränderungen der Mikrostruktur während der Warmumformung von Superlegierungen auf Nickelbasis zu verstehen. Wir ergänzen einander perfekt.“

Professor Michael Ward, Chief Technology Officer des Advanced Nuclear Research Centre und früherer technischer Leiter des AFRC meinte dazu: „Wir sind sehr erfreut darüber, Transvalor als ersten hochrangigen Partner für unsere mit Spannung erwarteten FutureForge-Anlage begrüßen zu dürfen.“

Transvalor wird die Simulationssoftware für das Programm liefern und damit digitale Funktionen in ein traditionelles Herstellungsverfahren integrieren, das für viele Industriebereiche von entscheidender Bedeutung ist und Innovation in ihrer eigentlichen Form ermöglicht. Dank dieser Technologie können wir gemeinsam daran arbeiten, einen traditionsreichen Prozess zu verstehen und sicherstellen, dass die Schmiedeindustrie über die datenbasierten Erkenntnisse verfügt, die erforderlich sind, um weiterhin robuste Lösungen bereitzustellen.“

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

---

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

**Global Altair Technology Conference 2020 (ATC)**

05.-07.10. Online [www.altair.com](http://www.altair.com)

Altair

**ICME**

06.-08.10. Online [www.icmeconference.com](http://www.icmeconference.com)

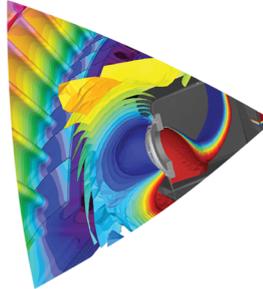
Hexagon - e-Xstream

# NAFEMS20

## DACH VIRTUELLE KONFERENZ

Fachkonferenz für Berechnung & Simulation im Engineering

13. - 14. Oktober 2020, Online



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

NAFEMS

**OpenFOAM Conference**

13.-15.10. Online [www.esi-group.com](http://www.esi-group.com)

ESI

**Comsol Conference**

14.-15.10. Virtuell [www.comsol.com](http://www.comsol.com)

Comsol



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

VMAP/NAFEMS

**NAFEMS Kurs: Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie**

27.-28.10. Online [www.nafems.org/fkm20-3](http://www.nafems.org/fkm20-3)

NAFEMS

**Praxiskonferenz Fußgängerschutz**

28.-29.10. Bergisch Gl., D / Online [www.carhs.de](http://www.carhs.de)

carhs.training

**ISNVH: Integrating Seamlessly NVH**

03.-05.11. Graz, A [www.isnvh.com](http://www.isnvh.com)

VIF

**NAFEMS Kurs: Master Course V&V: Verification and Validation in Engineering Simulation**

09.-11.11. Online [www.nafems.org/vandv20-2](http://www.nafems.org/vandv20-2)

NAFEMS

**3DExperience Conference — Design, Modeling and Simulation**

11.-12.11. Online [www.3ds.com](http://www.3ds.com)

Dassault Systèmes

**NAFEMS Kurs: Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation**

19.11. + 26.11. Online [www.nafems.org/fem20-2](http://www.nafems.org/fem20-2)

NAFEMS

**Human Modeling Symposium**

19.-20.11. Wiesbaden, D / Online [www.carhs.de](http://www.carhs.de)

carhs.training

**NAFEMS UK Conference 2020**

09.-10.11. Online [www.nafems.org/2020](http://www.nafems.org/2020)

NAFEMS

**Multiphysics 2020**

10.-11.12. Online [www.multiphysics.org](http://www.multiphysics.org)

Int.Society of Multiphysics

**NAFEMS Nordic Conference 2020**

16.-17.11. Online [www.nafems.org/nordic20](http://www.nafems.org/nordic20)

NAFEMS

**Human Modeling and Simulation in Automotive Engineering**

19.-20.11. Wiesbaden, D [www.carhs.de](http://www.carhs.de)

Carhs

**NAFEMS France Conference 2020**

25.-26.11. Paris, F [www.nafems.org/2020](http://www.nafems.org/2020)

NAFEMS

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

# Entwicklung und Optimierung eines Elektromotors für kleine Luftfahrzeuge mittels Kopplung einer Motorauslegungssoftware und CFD

Johann Kott<sup>1</sup>, Daniel Grimmeisen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Maccon GmbH, München; [j.kott@maccon.de](mailto:j.kott@maccon.de)

<sup>2</sup>CASCATE GmbH, Stuttgart; [daniel.grimmeisen@cascate.de](mailto:daniel.grimmeisen@cascate.de)

Der Design- und Entwicklungsprozess eines Elektromotors verknüpft mehrere physikalische Disziplinen. Neben dem Elektromagnetismus müssen auch thermische und mechanische Aspekte analysiert werden. Die Auslegung eines Elektromotors für Hochleistungsanwendungen ist demnach ein multiphysikalisches Problem. Um ein gutes Verhältnis zwischen Drehmoment und Masse zu erzielen, ist präzises Wissen über die Interaktion zwischen elektromagnetischen Verlusten und thermischem Verhalten des Motors notwendig. Simulation ermöglicht es, dieses Wissen zu erlangen. Ein Anwendungsgebiet von Elektromotoren sind elektrische Luftfahrzeuge.

Wegen strenger Massebeschränkungen ist keine Flüssigkeitskühlung denkbar. Stattdessen steht die umströmende Umgebungsluft als Kühlmedium zur Verfügung. Die Vorhersage von natürlicher und erzwungener Konvektion an der Außenhülle des Motors ist schwierig, da sie von der Geschwindigkeit des Luftfahrzeugs, dem Druck und der Umgebungstemperatur abhängen. Dieser Artikel beschreibt die Auslegung eines elektrischen Motors im Kontext der Motorkühlung.

Der Elektromagnetismus wird durch eine Kombination aus analytischer und Finiter-Elemente-Methode berücksichtigt. Die thermischen und aerodynamischen Aspekte werden durch CFD abgedeckt. Softwaretools werden gekoppelt, um in einem iterativen Prozess stabile und effiziente Betriebspunkte zu ermitteln.

## 1 Elektrischer Antrieb für Kleinflugzeuge

Diese Arbeit befasst sich mit der elektromagnetischen und thermischen Simulation eines Hilfsantriebs für ein Segelflugzeug. Aufgaben des Hilfsantriebs sind neben einem selbstständigen Start die Vergrößerung der Reichweite sowie die Unterstützung des Fluges bei schlechter Thermik. Bild 1.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Hilfsantriebs.

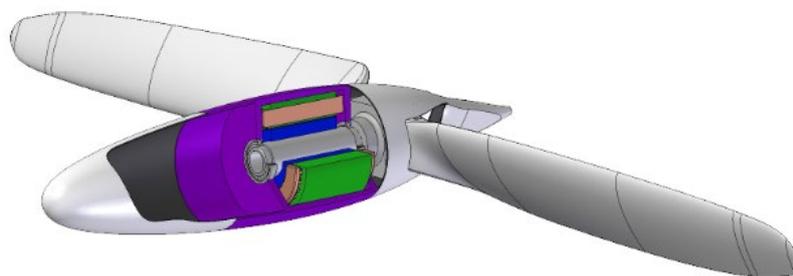


Bild 1.1 Prinzipieller Aufbau des Hilfsantriebs

Bild 1.2 und Bild 1.3 zeigen die vom Hersteller des Segelflugzeugs spezifizierten maximalen Abmessungen des Hilfsantriebs sowie die geforderten Lastpunkte.

Max. Outer Diameter [mm]	150,0
Max. Motor Length [mm]	50,0
Max. Total Mass [kg]	4,0
DC Supply voltage [V]	210,0

Bild 1.2 Maximale Abmessungen

	Duration [min]	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Altitude [m]	Ambient Temperature [°C]	air flow velocity [m/s]	ambient pressure [hPa]	air density [kg/m <sup>3</sup> ]
Take-off and climb	30	33	3936	3000	18,5	35	721	0,86
Horizontal flight	continuous	16,9	2826	3000	18,5	35	721	0,86

Bild 1.3 Lastpunkte

Die Aufgabenstellung umfasst das elektromagnetische Design eines kundenspezifischen Motors unter Berücksichtigung der Kühlung im Luftstrom während der verschiedenen Flugphasen. Auf Basis der in Bild 1.3 aufgeführten Abmessungen und Lastpunkte wurde ein kundenspezifischer Elektromotor entwickelt. Für die elektromagnetische Auslegung wurde die CAE-Software Simcenter SPEED verwendet. Die thermische Berechnung erfolgte in der CFD-Software Simcenter STAR-CCM+.

## 2 Elektromagnetischer Entwurf in Simcenter SPEED

Die Simulation von Elektromotoren in Simcenter SPEED basiert sowohl auf analytischen Gleichungen als auch auf der Finiten-Elemente-Methode. Ziel der Kombination dieser beiden Berechnungsansätze ist die Kalibrierung von analytischen Gleichungen mittels FEM um die Vorteile der schnellen analytischen Berechnung mit der Präzision der FEM optimal zu verbinden. Der für den Hilfsantrieb entwickelte Elektromotor überzeugt durch ein hohes Drehmoment bei gleichzeitig niedrigem Gewicht und hoher mechanischer Festigkeit. Als Rotortopologie wurde ein Design mit vergrabenen Magneten gewählt.

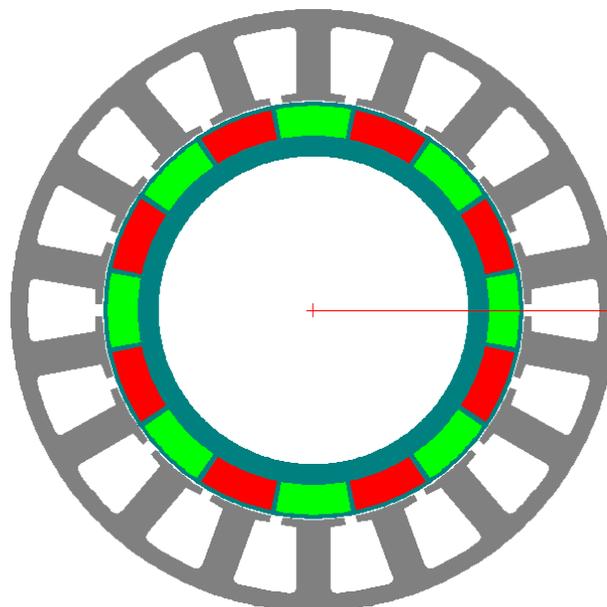


Bild 2.1 2D-Darstellung Elektromotor

Mit Drehzahlen zwischen 2800 rpm und 4000 rpm wird nur eine relative kleine Drehzahlspreizung gefordert. Bei geringer Drehzahlvariation und hoher Drehmomentdichte wird als bevorzugte Lösung meist eine Rotortopologie mit Oberflächenmagneten verwendet. Bei hohen Rotordrehzahlen, unabhängig vom Grad der Drehzahlspreizung, müssen die Magneten jedoch gegen Fliehkräfte gesichert werden. Die gewählte Rotortopologie (Bild 2.1) ähnelt stark einem Design mit Oberflächenmagneten. Die Magneten wurden jedoch aus Gründen der mechanischen Festigkeit in den Rotorkörper eingebettet. Die Statorwicklung wird als Zahnspulenwicklung ausgeführt. Vorteile dieser Wickeltechnik sind sehr kompakte Wickelköpfe und ein damit verbundener geringer Phasenwiderstand. Des Weiteren ermöglichen kompakte Wickelköpfe eine Erhöhung der

Aktivlänge des Motors. Sobald eine maximale Gesamtlänge spezifiziert ist, kann die Aktivlänge nur noch über eine Verkürzung der Wickelköpfe angepasst werden. Bild 2.2 zeigt die Abmessungen des entwickelten Motors.

Stator Outer Diameter [mm]	146,0
Rotor Inner Diameter [mm]	75,0
Lamination Active Length [mm]	50,0
Total Motor Length [mm]	79,5
Total Motor Mass (excl. Cables) [kg]	3,6

Bild 2.2 Abmessungen des finalen Motordesigns

Für die Berechnung der Lastpunkte in Bild 1.3 wurde der analytische Solver verwendet. Die analytischen Gleichungen wurden im Voraus mittels FEM kalibriert. Bild 2.3, Bild 2.4 und Bild 2.5 zeigen die magnetische Flussdichte, die Statorisenverluste sowie die Wirbelstromverluste in einem Permanentmagneten unter Last (take-off and climb).

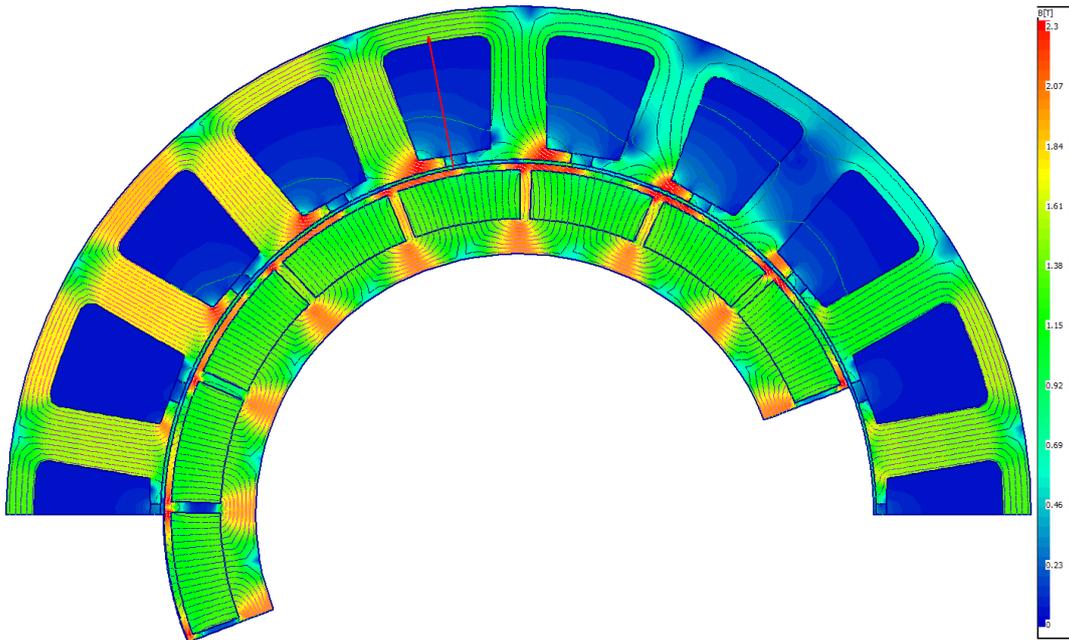


Bild 2.3 Magnetische Flussdichte während dem Start

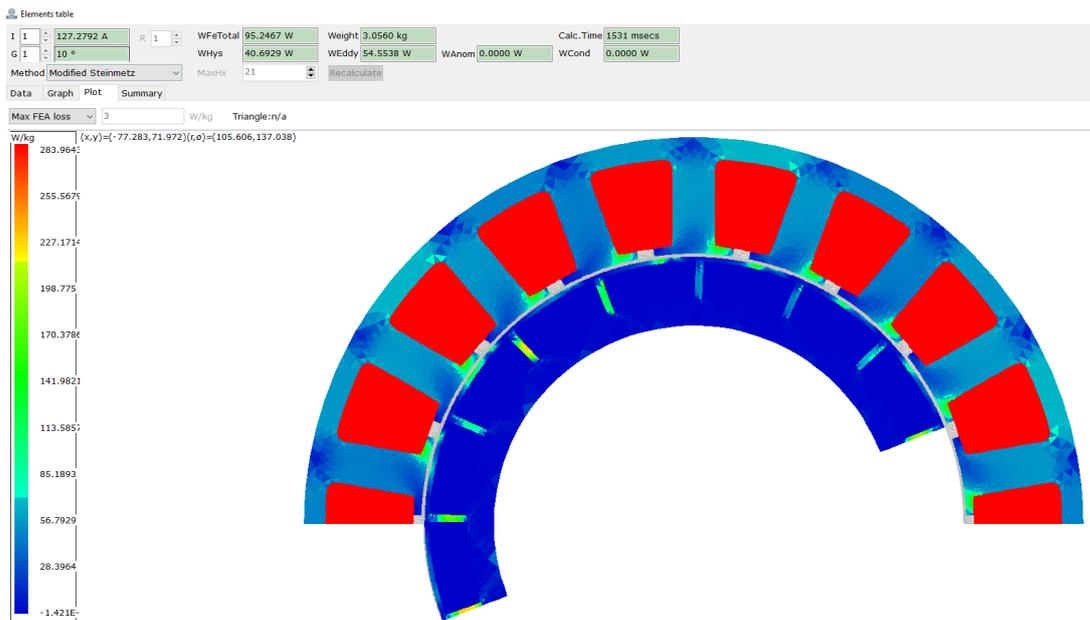


Bild 2.4 Eisen- und Kupferverluste während dem Start

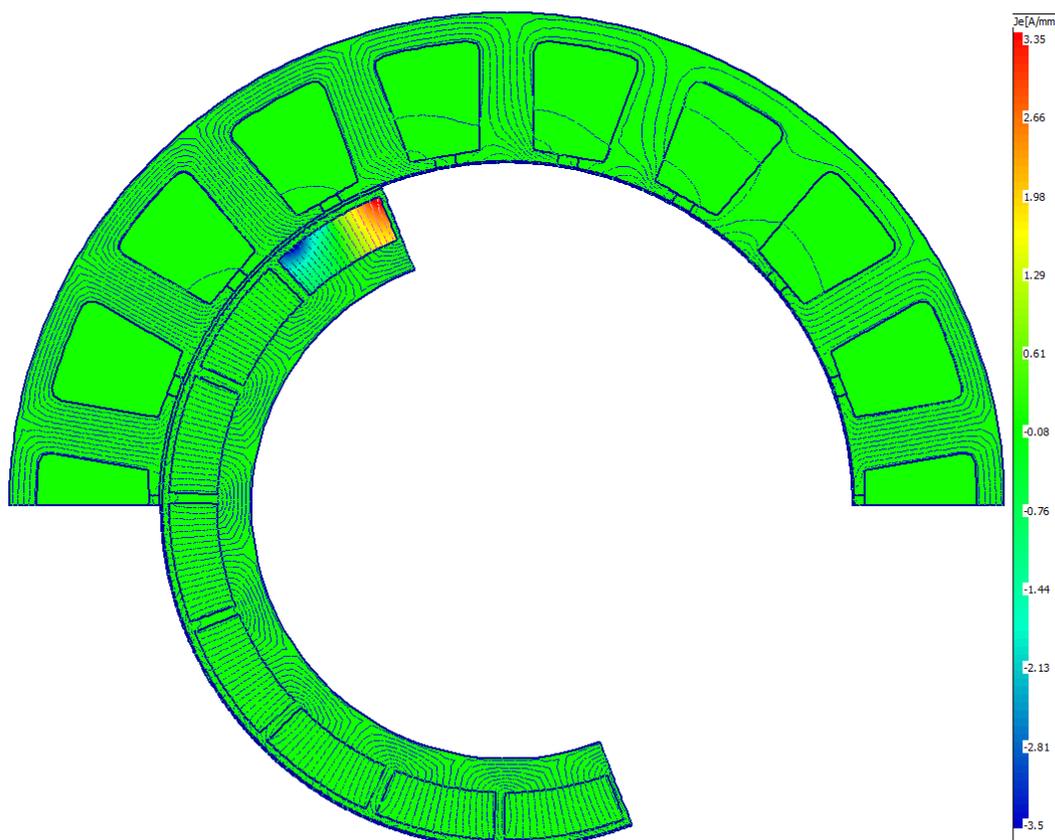


Bild 2.5 Wirbelströme in einem Permanentmagneten während dem Start

Die Simulationsergebnisse mit und ohne FEM-Kalibrierung sind in den untenstehenden Tabellen dargestellt. Verglichen mit den Kupfer- und Eisenverlusten sind die Magnetverluste sehr gering. Da zusätzlich noch eine axiale Segmentierung der Magnete zur weiteren Verlustminimierung geplant ist, können die Magnetverluste als Wärmequelle in der thermischen Berechnung vernachlässigt werden.

	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Copper Losses [W]	Iron Losses [W]	Magnet Losses [W]	Efficien [%]
Take-off and climb	33,0	3936,0	436,0	97,0	0,0	96,8
Horizontal flight	16,9	2826,0	116,0	65,0	0,0	97,0

Bild 2.6 Analytische Simulation ohne FEM-Kalibrierung

	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Copper Losses [W]	Iron Losses [W]	Magnet Losses [W]	Efficien [%]
Take-off and climb	33,0	3936,0	508,0	95,0	1,2	96,4
Horizontal flight	16,9	2826,0	106,0	58,0	1,2	97,2

Bild 2.7 Analytische Simulation mit FEM-Kalibrierung

Für die elektromagnetische Simulation wurden konstante Wicklungs- und Magnettemperaturen von 20°C angenommen. Aufgrund der Kupfer- und Eisenverluste wird sich der Motor jedoch erwärmen. Die Erwärmung von Kupfer und Magnet führt zu einem höheren Wicklungswiderstand und einer geringeren Remanenzflussdichte des Magneten. Für ein konstantes Drehmoment muss nun der Phasenstrom erhöht werden, um die sinkende Remanenz zu kompensieren. Die Erhöhung von Phasenstrom und Phasenwiderstand führen folglich wieder zu einem Anstieg der Kupferverluste, wodurch die Temperatur im Motor weiter ansteigt. In diesem iterativen Prozess steigt die Temperatur solange, bis ein thermischer Gleichgewichtszustand erreicht wird. Für die Simulation des thermischen Verhaltens des Motors wurde die CFD-Software STAR-CCM+ verwendet. Bild 2.8 zeigt die Kopplung zwischen elektromagnetischer und thermischer Simulation. Diese Schleife wird bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichtszustandes iterativ durchlaufen.

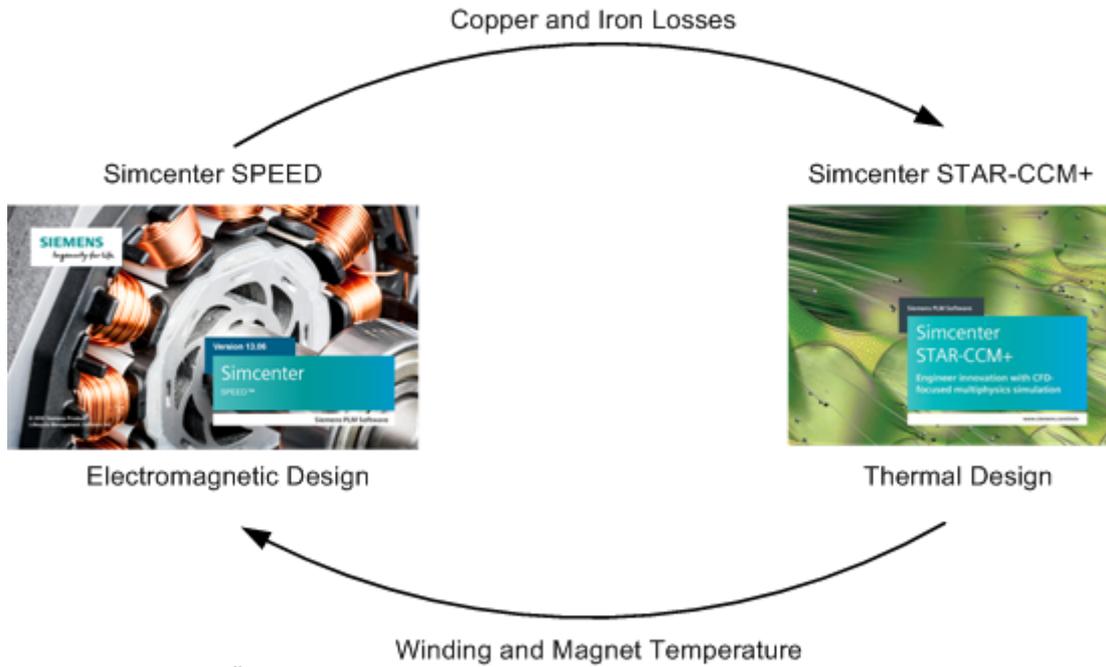


Bild 2.8 Kopplung und Übergabeparameter zwischen elektromagnetischer und thermischer Simulation

### 3 Thermische Auslegung in STAR-CCM+

Dieses Kapitel beschreibt die Konfiguration des Modells zur thermischen Auslegung in STAR-CCM+.

#### 3.1 Geometrie

Die Form des Motors wird über das \*.xGDF-Dateiformat in STAR-CCM+ importiert. Die zugrundeliegende Datei wurde zuvor in SPEED erstellt. Obwohl SPEED ein 2D-Werkzeug ist, liegen die geometrischen Informationen dreidimensional vor. Des Weiteren wird eine Hülle eingebunden, um das aerodynamisch vorteilhafte Gehäuse zu berücksichtigen, welches den Motor umschließt. Innerhalb dieser Gondel ist der Motor durch eine Fassung an die Hülle angeschlossen. Diese ermöglicht konduktiven Wärmeabtransport vom Motor in die Hülle. Um die Simulationszeit zu verkürzen, wurden einige Vereinfachungen am Modell vorgenommen. Der Propeller trägt nur wenig zum Wärmetransport bei und wurde deshalb nicht berücksichtigt. Außerdem wurde die Verbindungswelle, die den Motor und den Propeller verbinden würde, auf Länge des Motors gekürzt. Der Luftstrom um die Gondel wird in einem zylindrischen Gebiet betrachtet. Dieses ist in Bild 3.1. zu sehen.

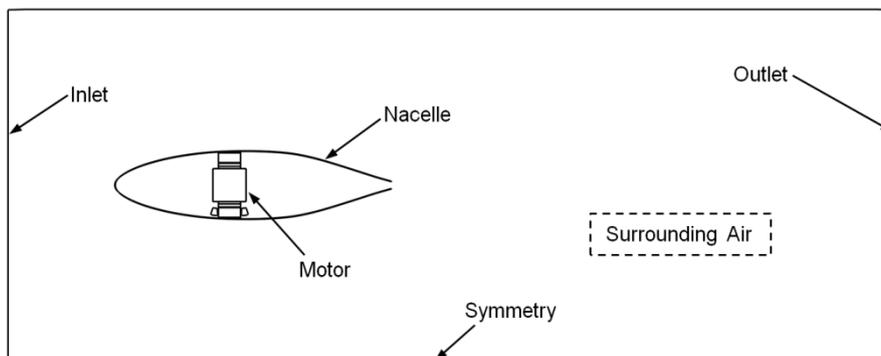


Bild 3.1 Rechengebiet

### 3.2 Das Rechengitter

Das Rechengitter wird innerhalb von STAR-CCM+ erzeugt. Zwischen Strömungsgebiet und Festkörpern liegen nicht-konforme Interfaces vor. Somit können Oberflächengitter unterschiedlicher Größen in Strömungsgebiet und Festkörper generiert werden. Es werden überwiegend polyedrische Zellen verwendet. Im Strömungsgebiet wird die Grenzschicht nahe der Oberflächen durch fünf prismatische Zellschichten aufgelöst. Die dünne Hülle der Gondel wird in wandnormaler Richtung durch vier prismatische Zellschichten diskretisiert. Das Rechenggebiet ist an einer Seite durch einen Einlass (Inlet) begrenzt. Dort wird die Strömungsgeschwindigkeit als Randbedingung vorgegeben. Auf der anderen Seite ist das Rechenggebiet durch einen Auslass (Outlet) begrenzt, in dem der statische Druck als Randbedingung vorgegeben wird. An der Mantelfläche des das Rechenggebiet begrenzenden Zylinders wird Symmetrie angenommen. Dies ist in Bild 3.1 dargestellt. Nahe stark gekrümmter Bereiche an Vorder- und Hinterkante des Gehäuses sowie in der Nähe des Motors wird das Gitter verfeinert.

Insgesamt besteht das Rechengitter aus 230.000 Zellen im Strömungsgebiet, 250.000 Zellen in der Hülle und 88.000 Zellen im Motor.

### 3.3 Physikalische Modellbildung

Stationäre RANS-Simulationen werden durchgeführt, um die Effizienz der Kühlung zu bewerten. Die Rechnung gilt als konvergiert, wenn sich die Temperatur im Motor zwischen zwei Iterationen um weniger als einen relativen Schwellenwert ändert. Gravitation wird berücksichtigt, da sie für die natürliche Konvektion in der Nähe des Motors ausschlaggebend ist. Das Turbulenzverhalten wird mithilfe des k-epsilon-Turbulenzmodells berücksichtigt. Das Strömungsgebiet hat Bereiche hoher Reynolds-Zahlen in der freien Strömung und Bereiche niedrigerer Reynolds-Zahlen innerhalb der Gondel. Deshalb wird der two-layer-Ansatz des Turbulenzmodells gewählt, bei der das Strömungsgebiet in zwei Schichten aufgeteilt wird. In der Schicht nahe der Wand wird die turbulente Dissipationsrate und die turbulente Viskosität als Funktion des Wandabstandes ermittelt [1]. Im Strömungsgebiet wird zusätzlich die Energieerhaltungsgleichung gelöst, da Wärme durch freie und erzwungene Konvektion übertragen wird. Die Dichte wird als konstant angenommen und ergibt sich aus der Definition der Flugzustände in Bild 1.3. Zur Kopplung zwischen Druck- und Geschwindigkeitsfeld wird der SIMPLE-Algorithmus verwendet [2].

Mehrere Festkörper-Regionen decken die verschiedenen verwendeten Materialien im Motor und in der Hülle ab. Die Materialeigenschaften des Motors werden in SPEED vorgegeben, für die Hülle wird Aluminium angenommen. In allen Festkörper-Regionen wird die Energieerhaltungsgleichung gelöst, um die Temperaturverteilung zu ermitteln.

### 3.4 Verknüpfung von SPEED und STAR-CCM+

Die Kühlung des Motors beeinflusst die in ihm herrschenden Temperaturen. Diese beeinflussen dessen Leistungsfähigkeit. Also muss ein gegenseitiger Einfluss zwischen thermischer und elektromagnetischer Simulation sichergestellt werden, weshalb diese miteinander gekoppelt betrachtet werden müssen. Dazu werden zwei Kenngrößen des Motors von SPEED zu STAR-CCM+ übertragen, nämlich die Wärmeverluste im Stator und in den Wicklungen. Diese Wärmeverluste werden in Form von Wärmequellen an den Oberflächen entsprechender Regionen in STAR-CCM+ eingebunden. Nach Durchführung der Rechnung in STAR-CCM+ stellen sich so Temperaturen in den Magneten und in den Wicklungen ein, welche zurück an SPEED übertragen werden. Dort dienen sie als Anfangswerte für die nächste Iteration.

## 4 Ergebnisse

Zwei Kriterien werden definiert, um eine konvergierte Lösung festzustellen. Innerhalb STAR-CCM+ gilt die stationäre Simulation demnach als konvergiert, wenn sich die Maximaltemperatur in den Wicklungen zwischen zehn Iterationen um weniger als einen definierten Schwellenwert ändert. Analog dazu gilt die rückgekoppelte Schleife zwischen SPEED und STAR-CCM+ als konvergiert, wenn die Maximaltemperatur in den Windungen sich zwischen zwei Iterationen um weniger als einen definierten Schwellenwert ändert.

	PFes [W]	WCu [W]	T_mag [K]	T_Wdg [K]
i0	15.821964	507.54612	373.0247	380.304
i1	7.437204	681.791643	397.9827	408.0805
i2	5.437956	737.229001	406.0058	417.0246
i3	4.858318	755.079964	408.6035	419.133
i4	4.677236	759.287986	409.1917	420.5858
i5	4.636682	762.187538	409.6568	421.0704
i6	4.604733	763.15472	409.7773	421.2284
i7	4.596472	763.470062	409.811	421.2767
i8	4.594363	763.566461	409.8343	421.2989
i9	4.592567	763.610769	409.8529	421.3094

Bild 4.1 Ausgetauschte Parameter beim Start und Steigflug

	PFes [W]	WCu [W]	T_mag [K]	T_Wdg [K]
i0	8.940921	105.345114	310.3948	311.5712
i1	7.80158	113.02384	311.421	312.6835
i2	7.736138	113.484552	311.4875	312.7528
i3	7.731907	113.513256	311.4913	312.7571
i4	7.731665	113.515037	311.4983	312.7628

Bild 4.2 Ausgetauschte Parameter beim Horizontalflug

Die Bilder 4.1 und 4.2 zeigen die Parameter, die zwischen SPEED und STAR-CCM+ bei jeder Iteration i ausgetauscht werden. PFes ist der Eisenverlust, WCu ist der Kupferverlust. Beide Verluste werden durch die Rechnungen in SPEED bestimmt. T\_mag ist die Temperatur im Magneten, T\_Wdg ist die Temperatur in den Wicklungen. Beide werden durch die Rechnungen in STAR-CCM+ bestimmt. Mit jeder zusätzlichen Iteration nähern sich die Temperaturen und Verluste einem asymptotischen Wert. Beim Start- und Steigflug-Fall sind neun Iterationen bis zur Konvergenz nötig, da die Temperaturen und Verluste auf einem generell höheren Niveau liegen. Im Fall des Horizontalflugs konvergiert die Gesamtrechnung bereits nach vier Iterationen. Bild 4.3 zeigt die Wärmeverteilung auf der Gondel und auf den Stromlinien beim letzten Iterationsschritt im Fall des Horizontalflugs.

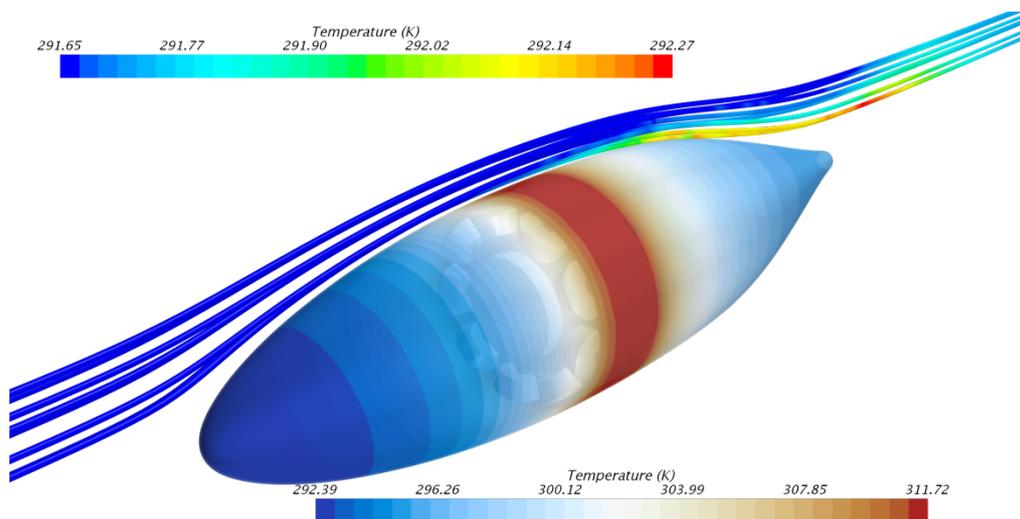


Bild 4.3 Temperaturverteilung auf der Gondel und den Stromlinien beim Horizontalflug

In unmittelbarer Nähe zum Motor wärmt sich die Hülle am stärksten auf. Luft, die die Hülle umströmt, erwärmt sich ebenfalls, sobald sie die Bereiche höherer Temperatur auf der Hüllenoberfläche passiert hat. Die zwei dominierenden Mechanismen des Wärmetransports sind Konvektion und Wärmeleitung. Luft, die den Motor umgibt, erwärmt sich, steigt auf und trifft auf die innere Wand der Hülle, welche die Wärme dann nach außen transportiert. Dies ist in Bild 4.4 dargestellt.

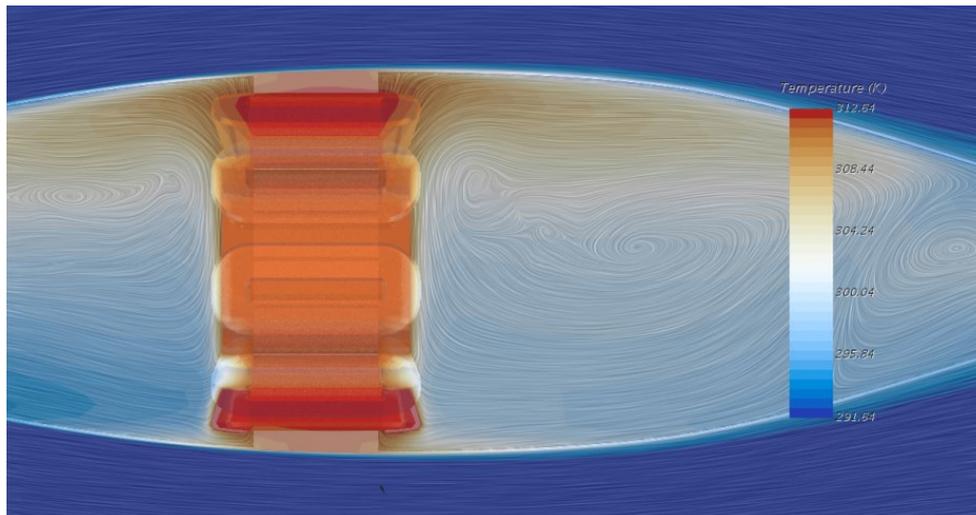


Bild 4.4 Vektorfeld innerhalb und außerhalb der Gondel

Das Bild zeigt die über das Vektorfeld integrierten Stromlinien innerhalb und außerhalb der Gondel. Nahe dem Motor steigt die Luft auf, fernab des Motors fällt sie wieder ab. Dadurch stellt sich ein Wirbel innerhalb der Gondel ein. Zu beachten ist, dass in der realen Geometrie das Innere der Gondel nicht leer ist. Somit kann dort die Luft nicht so frei strömen.

Die Simulationen in SPEED führen zu nahezu instantanen Ergebnissen. Die Simulationen in STAR-CCM+ dauern zwischen zwei Minuten während der letzten äußeren Iteration bis hin zu einer Stunde während der ersten äußeren Iteration pro Testfall auf einem sechskernigen Rechner. Insgesamt dauerte die Rechnung des horizontalen Testfalls etwa 90 Minuten, wohingegen die des Start- und Steigflug-Falls etwa vier Stunden benötigte.

## 5 Fazit

Es wurde gezeigt, dass mittels einer Kopplung von SPEED und STAR-CCM+ das elektro-thermische Verhalten eines Elektromotors simuliert werden kann. Für zwei Testfälle wurden die Eisen- und Kupferverluste in SPEED bestimmt. Diese wurden dann auf die entsprechenden Oberflächen in STAR-CCM+ projiziert, wo sie als Wärmequellen dienten. Zur Berechnung der Kühlung wurde die im Motor freiwerdende Wärme per Konvektion durch die Luft und per Wärmeleitung durch eine Fassung in die Hülle der Gondel transportiert. Innerhalb der Hülle übertrug sich die Wärme zur äußeren Oberfläche, wo sie von der Außenströmung abtransportiert wurde. Dadurch stellte sich ein stationärer Zustand mit festen Temperaturen in allen Regionen ein. Durch die höheren Temperaturen in den Wicklungen und in den Magneten änderte sich die Leistungsfähigkeit des Motors. Deshalb wurden diese Temperaturen in SPEED zurückgeführt, um die iterative Schleife zu vervollständigen. Auf diese Weise kann Simulation als Verfahren genutzt werden, um das thermische Verhalten des Modells festzustellen, ohne auf physische Tests zurückgreifen zu müssen.

## 6 Literatur

- [1] Rodi, W. 1991. "Experience with Two-Layer Models Combining the k-e Model with a One-Equation Model Near the Wall", 29th Aerospace Sciences Meeting, January 7-10, Reno, NV, AIAA 91-0216
- [2] Siemens PLM Software: Documentation of STAR-CCM+ v2019.2

# Ein Algorithmus zur automatisierten Modellbildung im Zustandsraum

Prof. Dr. Michael Herchenhan<sup>1</sup>

Hochschule Kaiserslautern

Viele Methoden der Systemanalyse und der Reglersynthese basieren auf Zustandsbeschreibungen. Aus den physikalischen Gesetzmäßigkeiten von Systemkomponenten und den aus der Topologie resultierenden Relationen zwischen den Systemgrößen der einzelnen Komponenten ergibt sich jedoch zunächst erst eine Differential-algebraische Gleichung (DAE). Oft nimmt die dann erforderliche Überführung der DAE in eine Zustandsbeschreibung einen beträchtlichen Anteil des gesamten Arbeits- und Zeitaufwandes in Anspruch. Dieser Beitrag präsentiert daher einen Ansatz zur systematischen Synthese einer Zustandsbeschreibung aus einer linearen DAE. Der Ansatz ist auch auf eine DAE mit unendlich vielen Lösungen anwendbar, leicht in Programmcode umzusetzen und reduziert den Arbeitsaufwand für eine Beschreibung im Zustandsraum erheblich. Die Anwendung der vorgestellten Methode auf eine DAE mit unendlich vielen Lösungen wird an einem Beispiel demonstriert.

## 1 Einleitung

Der erste Schritt der Modellierung technischer Systeme besteht gewöhnlich darin, die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Systemkomponenten und die aus der Topologie resultierenden Zwangsbedingungen durch Differentialgleichungen und algebraische Gleichungen auszudrücken<sup>2</sup>. Dies führt zu einer Reihe von mathematischen Beziehungen zwischen den (unabhängigen) Eingangsvariablen<sup>3</sup>, abhängigen physikalischen Systemgrößen und mindestens einer Ableitung von mindestens einer abhängigen physikalischen Systemgröße<sup>4</sup>. Diese Beziehungen können auf verschiedene Arten behandelt werden.

Es ist sinnvoll, Differentialgleichungen höherer Ordnung durch mehrere Differentialgleichungen erster Ordnung zu ersetzen, sodass das System durch einen Ausdruck der allgemeinen Form

$$\mathbf{F}(\dot{\mathbf{v}}(t), \mathbf{v}(t), \mathbf{u}(t), t) = \mathbf{0} \quad \text{mit} \quad \mathbf{F} \in \mathbb{R}^{\tilde{R} \times 1}, \quad (1)$$

modelliert wird, wobei jedes Element von  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{p \times 1}$  eine Eingangsgröße des Systems ist und  $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  alle abhängigen Systemgrößen enthält.

Ein System aus gekoppelten Differentialgleichungen und algebraischen Gleichungen wird als *Differential-algebraisches System* oder *Differential-algebraische Gleichung* bezeichnet. Die hierfür oft verwendete Abkürzung *DAE* stammt aus dem englischen Begriff *differential-algebraic equation*. Bei (1) handelt es sich um die allgemeinste Form von DAE für technische Systeme mit dem Eingangsvektor  $\mathbf{u}$ . In vielen Fällen kann diese aber auch in der Form

$$\mathbf{E} \cdot \dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{v}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}(t). \quad (2)$$

dargestellt werden. Eine DAE wird als linear bezeichnet, wenn die Matrizen  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  und  $\mathbf{K}$  von keiner anderen Variable außer evtl. der Zeit abhängen. In den meisten Fällen technischer Modellierungsaufgaben sind die Matrizen  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  und  $\mathbf{K}$  konstant, dann spricht man von einer linearen DAE mit konstanten Koeffizienten. Kennzeichnendes Merkmal einer DAE ist die Singularität der Matrix  $\mathbf{E}$ , deshalb wird gelegentlich alternativ auch von einem singulären System gesprochen. Bei Regularität der Matrix  $\mathbf{E}$  liegt nämlich keine DAE, sondern ein gewöhnliches Differentialgleichungssystem (ODE) vor. *Deskriptorsystem* oder *implizites System* sind weitere alternative Begriffe für eine DAE.

Das Lösungsverhalten einer DAE wurde bereits über mehrere Jahrzehnte untersucht [5, 10]. Auch DAE höherer Ordnung wurden z. B. in [9] betrachtet. Wesentliche Eigenschaften von DAE werden in [7] erläutert. DAE sind nach

<sup>1</sup>E-Mail: michael.herchenhan@hs-kl.de

<sup>2</sup>In diesem Beitrag wird angenommen, dass Begrenzungen unberücksichtigt bleiben und somit keine Ungleichungen auftreten.

<sup>3</sup>Ableitungen von Eingangsvariablen eines technischen Systems werden nach diesem ersten Schritt nicht erwartet.

<sup>4</sup>Es ist offensichtlich, dass nur bei statischen Systemen keine Ableitungen von abhängigen physikalischen Systemgrößen auftreten. In diesem Artikel werden jedoch ausschließlich dynamische Systeme betrachtet.

wie vor ein Bereich intensiver wissenschaftlicher Aktivitäten, der aktuelle Forschungsstand ist beispielsweise in [2] zusammengefasst. Ein Ansatz, der sich von den genannten Arbeiten stark unterscheidet und auf Taylorreihen basiert, ist in [12] dargestellt. Zur Lösung von DAE sind auch Toolboxen für Simulationssoftware wie etwa Matlab® verfügbar [4], so dass reine Simulationsaufgaben auch erledigt werden können, ohne die DAE in eine Zustandsdifferentialgleichung zu überführen, welche dann mit früheren numerischen Integrationsverfahren für ODE-Systeme gelöst werden kann.

Obwohl einige Methoden für die Systemanalyse und die Synthese von Regelalgorithmen bereits auf der Grundlage einer DAE formuliert wurden (siehe z. B. [3, 6, 8, 10, 11]), basieren die meisten Methoden für die genannten Aufgabenstellungen auf Zustandsbeschreibungen. Daher muss der Modellierungsprozess in vielen Fällen durch umfangreiche Umformungen der DAE fortgesetzt werden, um eine Zustandsbeschreibung zu erhalten. Dieser zeitaufwändige Vorgang wurde in der Regel ohne Automatismus manuell ausgeführt. Diese Tatsache hat offensichtlich bereits den Autor von [7] veranlasst, eine Methode zur Umwandlung einer DAE in eine Zustandsbeschreibung vorzustellen.

Die Betrachtungen in [7] beschränken sich auf DAE mit quadratischen Matrizen  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$ , welche ein reguläres Matrixbündel  $(\mathbf{E}, \mathbf{H})$  bilden<sup>5</sup>, so dass die DAE in die Weierstraß-Normalform überführt werden kann und für jeden konsistenten Anfangswert jeweils eine eindeutige Lösung aufweist (siehe etwa [5, 7]). Eine Zustandsbeschreibung wird aus der Weierstraß-Normalform hergeleitet. DAE mit nicht quadratischen Matrizen  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  werden in [7] nicht betrachtet, DAE mit unendlich vielen Lösungen ebenfalls nicht.

DAE technischer Systeme erfüllen oft die in [7] getroffenen Annahmen. Dass bei der Modellbildung allerdings auch DAE entstehen können, die nicht quadratische Matrizen  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  und unendlich viele Lösungen für ein- und denselben konsistenten Anfangswert aufweisen, wird im nachfolgenden Abschnitt gezeigt. Deshalb wird in diesem Beitrag eine Methode zum automatisierten Aufstellen einer Zustandsdifferentialgleichung vorgestellt, die auch in diesen Fällen anwendbar ist und gezeigt, welche Variablen der DAE im Falle unendlich vieler Lösungen nicht eindeutig bestimmt sind.

Die Rolle der Weierstraß-Normalform, aus welcher in [7] die Zustandsbeschreibung abgeleitet ist, nimmt im Falle nicht quadratischer Matrizen  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  die Kronecker-Normalform an [5, 1]. In welcher Weise eine DAE effizient in die Kronecker-Normalform überführt werden kann, ist noch immer Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten und komplex [1]. Daher wird in diesem Beitrag eine alternative Methode vorgestellt, bei der die Kronecker-Normalform keine Rolle spielt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf einfache Umsetzbarkeit in Programmcode gelegt, so dass nach einmaligem geringem Programmieraufwand der Aufwand der Zustandsraummodellierung im Rahmen typischer Ingenieur Tätigkeiten erheblich reduziert werden kann. Da die Übertragungsfunktion bzw. Übertragungsmatrix eines linearen zeitinvarianten Systems durch Anwendung einer weitläufig bekannten Formel leicht aus einer Zustandsbeschreibung gewonnen werden kann, kann die vorgestellte Methode auch zur Effizienzsteigerung bei der Modellierung im Frequenzbereich genutzt werden.

**Nomenklatur:** In diesem Beitrag wird die weitläufig verbreitete Nomenklatur für Formelzeichen verwendet. Für skalare Größen werden kursive, nicht fettgedruckte Kleinbuchstaben verwendet, für Vektoren nicht kursive fettgedruckte Kleinbuchstaben und für Matrizen nicht kursive fettgedruckte Großbuchstaben.  $\mathbf{I}$  bezeichnet die Einheitsmatrix und  $\mathbb{I}_{a,b}$  eine  $a \times b$  Einsmatrix.  $a_{i,j}$  bezeichnet das Element in der  $i$ -ten Zeile und  $j$ -ten Spalte,  $\mathbf{a}_j$  den  $j$ -ten Spaltenvektor und  $\mathbf{a}_i^T$  den  $i$ -ten Zeilenvektor einer Matrix  $\mathbf{A}$ .

## 2 Matrixdimensionen und Lösungsmenge

Dass bei der Modellbildung auch DAE entstehen können, die nicht quadratische Matrizen  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  und unendlich viele Lösungen für ein- und denselben konsistenten Anfangswert aufweisen, sei anhand eines Gedankenexperiments verdeutlicht. Hierzu stelle man sich beispielsweise ein elektrisches Netzwerk aus linearen Widerständen, Induktivitäten und Kondensatoren vor, dessen DAE der Form (2) mit quadratischen Matrizen  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  und eindeutiger Lösung mittels Zweigstromanalyse (unter Verwendung eines vollständigen Baums) hergeleitet wurde.

Das Netzwerk werde nun gedanklich, wie in Abbildung 1(a) ausschnittsweise dargestellt, zwischen zwei beliebigen Knotenpunkten um zwei parallel geschaltete ideale Schalter<sup>6</sup> erweitert. Da beide Knotenpunkte bereits mit den Baumzweigen des ursprünglichen Netzwerkes inzidieren, kann der vollständige Baum des ursprünglichen Netzwerkes auch als vollständiger Baum des erweiterten Netzwerkes herangezogen werden. Daher kann aus der

<sup>5</sup>Ein Matrixbündel  $(\mathbf{E}, \mathbf{H})$  heißt regulär, wenn  $\det(\lambda \cdot \mathbf{E} - \mathbf{H}) \neq 0$  für mindestens einen Wert von  $\lambda$  gilt. Anderenfalls heißt das Matrixbündel singular.

<sup>6</sup> Ideal bedeutet widerstands- und induktivitätslos im geschlossenen und ideal isolierend und kapazitätslos im offenen Zustand.

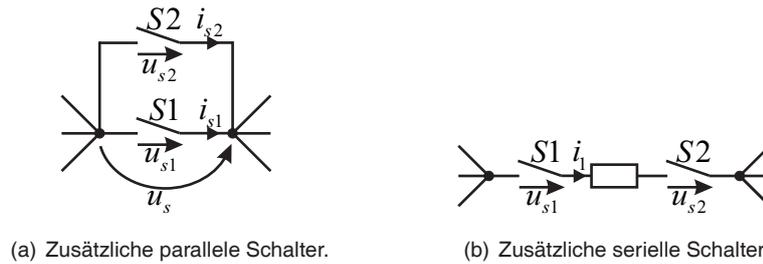


Abb. 1: Netzwerkerweiterungen (ausschnittsweise Darstellung).

bestehenden DAE wie folgt eine DAE für das erweiterte Netzwerk gewonnen werden:  $i_{s1}$  und  $i_{s2}$  werden der/den bestehenden Knotenpunktgleichung/en vorzeichenrichtig hinzugefügt, wodurch  $\mathbf{v}$  um die zusätzlichen Elemente  $i_{s1}$  und  $i_{s2}$ ,  $\mathbf{H}$  um zwei Spaltenvektoren mit jeweils einem von Null verschiedene Element und  $\mathbf{E}$  um zwei Nullzeilen erweitert werden. Da die beiden Schalter in Verbindungszweigen liegen, bringt die Netzwerkerweiterung zwei zusätzliche Fundamentalmaschen mit sich. Beide sind mit denselben Baumzweige inzidiert, so dass deren Gleichungen identisch sind, wenn darin  $u_s$  anstatt  $u_{s1}$  und  $u_{s2}$  verwendet wird. Somit ist die DAE noch um eine weitere Gleichung mit einer zusätzlichen Variablen zu erweitern, was ein zusätzliches Element in  $\mathbf{v}$ , jeweils ein zusätzlicher Spaltenvektor in  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  und jeweils ein zusätzlicher Zeilenvektor in  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  und  $\mathbf{K}$  mit sich bringt. Bis dahin sind die Matrizen  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  um drei Spalten aber nur um eine Zeile erweitert. Wenn mindestens ein Schalter geschlossen ist, muss die DAE um die Zwangsbedingung  $u_s = 0$  erweitert werden. Und für jeden offenen Schalter ist durch eine weitere Gleichung in der DAE zu berücksichtigen, dass dieser keinen Strom führt. Demnach sind  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  nicht quadratisch, wenn beide Schalter geschlossen sind, weil die Schaltzustände beider Schalter durch eine gemeinsame Zwangsbedingung anstatt durch jeweils eine separate Zwangsbedingung für jeden Schalter berücksichtigt sind. Offensichtlich ist die erweiterte DAE nur dann eindeutig lösbar, wenn der Wert jedes neuen Elements von  $\mathbf{v}$  eindeutig aus dem Wert des Vektors  $\delta = {}^n\mathbf{H} \cdot {}^n\mathbf{v}$  berechnet werden kann, wobei  ${}^n\mathbf{v}$  aus den neuen Elementen von  $\mathbf{v}$  und  ${}^n\mathbf{H}$  aus den zugehörigen Spaltenvektoren von  $\mathbf{H}$  bestehen, also genau dann, wenn die Spaltenvektoren von  ${}^n\mathbf{H}$  linear unabhängig sind. Hier ist  ${}^n\mathbf{v} = [i_{s1} \ i_{s2} \ u_s]^T$  und die nicht ausschließlich Nullen enthaltenden Zeilenvektoren von  ${}^n\mathbf{H}$  sind (mindestens)

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ für } \neg S1 \neg S2, \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ für } \neg S1 S2, \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ für } S1 \neg S2, \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ für } S1 S2.$$

In den Matrizen gehört jeweils die erste Zeile zu der erweiterten Knotenpunktgleichung, die zweite Zeile zu der zusätzlichen Maschengleichung und die anderen Zeilen zu den Zwangsbedingungen der Schaltzustände<sup>7</sup>. Es ist erkennbar, dass alle Spaltenvektoren von  ${}^n\mathbf{H}$  linear unabhängig sind, wenn mindestens ein Schalter offen ist. Anderenfalls sind die ersten beiden Spalten von  ${}^n\mathbf{H}$  identisch und jeder beliebige Wert von  ${}^n\mathbf{H} \cdot {}^n\mathbf{v}$  kann durch unendlich viele Wertepaare von  $i_{s1}$  und  $i_{s2}$  erzeugt werden, so dass beide Ströme nicht eindeutig berechnet werden können. Es liegt auf der Hand, dass  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  stets quadratisch sind und die DAE stets eindeutig lösbar ist, wenn die DAE die Summe  $i_s = i_{s1} + i_{s2}$  anstatt der beiden Ströme und die Zwangsbedingung  $i_s = 0$  für  $\neg S1 \neg S2$  und andererseits  $i_s = 0$  enthält<sup>8</sup>.

Wird ein Zweig des ursprünglichen Netzwerks, wie in Abbildung 1(b) ausschnittsweise dargestellt, um zwei serielle Schalter erweitert, kann aus der DAE des ursprünglichen Netzwerks wie folgt eine DAE des erweiterten Netzwerks gewonnen werden:  $u_{s1}$  und  $u_{s2}$  werden zusätzlich in der/den bereits bestehenden Maschengleichung/en berücksichtigt, was  $\mathbf{v}$  um zwei Elemente,  $\mathbf{E}$  um zwei Nullspalten und  $\mathbf{H}$  um zwei Spalten erweitert. Wenn mindestens ein Schalter offen ist, muss die DAE um die Zwangsbedingung  $i_1 = 0$  erweitert werden. Und für jeden geschlossenen Schalter ist durch eine weitere Gleichung in der DAE zu berücksichtigen, dass über diesem keine Spannung abfällt. Demnach sind  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  nicht quadratisch, wenn beide Schalter offen sind, weil die Schaltzustände beider Schalter durch eine gemeinsame Zwangsbedingung anstatt durch jeweils eine separate Zwangsbedingung für jeden Schalter berücksichtigt sind. Hier ist  ${}^n\mathbf{v} = [u_{s1} \ u_{s2}]^T$  und die nicht ausschließlich Nullen

<sup>7</sup>Wenn die DAE beide Knotenpunktgleichungen enthalten würde, würden diese Matrizen den zusätzlichen Zeilenvektor  $[-1 \ -1 \ 0]$  enthalten. Dies würde die linearen (Un-) Abhängigkeiten zwischen den Spaltenvektoren nicht verändern, weil der zusätzliche Zeilenvektor und der erste Zeilenvektor bereits linear abhängig sind.

<sup>8</sup> Allerdings bedeutet dies zumindest bei eindeutiger Lösbarkeit einen Verlust von Detailinformationen.

enthaltenden Zeilenvektoren von  ${}^n\mathbf{H}$  sind (mindestens)

$$\begin{pmatrix} {}^n h_a & {}^n h_a \end{pmatrix} \text{ für } \neg S1 \neg S2, \quad \begin{pmatrix} {}^n h_a & {}^n h_a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ für } \neg S1 S2, \quad \begin{pmatrix} {}^n h_a & {}^n h_a \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ für } S1 \neg S2, \quad \begin{pmatrix} {}^n h_a & {}^n h_a \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ für } S1 S2$$

mit  ${}^n h_a \pm 1$ . In den Matrizen gehört jeweils die erste Zeile zu der erweiterten Maschengleichung, die restlichen Zeilen gehören zu den Zwangsbedingungen der Schaltzustände<sup>9</sup>. Hier zeigt sich, dass alle Spaltenvektoren von  ${}^n\mathbf{H}$  linear unabhängig sind, wenn mindestens ein Schalter geschlossen ist. Anderenfalls kann jeder beliebige Wert von  ${}^n\mathbf{H} \cdot {}^n\mathbf{v}$  durch unendlich viele Wertepaare von  $u_{s1}$  und  $u_{s2}$  erzeugt werden, so dass beide Spannungen nicht eindeutig berechnet werden können.  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  sind stets quadratisch und die DAE stets eindeutig lösbar, wenn die DAE die Summe  $u_s = u_{s1} + u_{s2}$  anstatt der beiden Spannungen und die Zwangsbedingung  $u_s = 0$  für  $S1S2$  und andererseits  $i_1 = 0$  enthalten würde<sup>8</sup>.

Das Gedankenexperiment zeigt also, dass die DAE eines elektrischen Netzwerkes für ein- und denselben konsistenten Anfangswert unendlich viele Lösungen aufweist, wenn z. B. mehrere parallele ideale Schalter geschlossen sind und der Strom jedes Schalters in  $\mathbf{v}$  berücksichtigt ist oder wenn mehrere serielle ideale Schalter offen sind und die Spannung über jedem Schalter in  $\mathbf{v}$  berücksichtigt ist. Im Fall unendlich vieler Lösungen sind  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  nicht quadratisch, wenn die Schaltzustände mehrerer idealer Schalter durch eine gemeinsame Zwangsbedingung berücksichtigt sind. Entsprechendes gilt auch für mechanische Systeme mit Kupplungen und/oder Bremsen als Schaltelemente und auch für andere technische Systeme mit Schaltelementen.

### 3 Voraussetzungen

1. Nachfolgend wird vorausgesetzt, dass die DAE in der Form

$$\underbrace{\begin{bmatrix} {}^1\mathbf{E} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ {}^5\mathbf{E} \\ {}^6\mathbf{E} \end{bmatrix}}_{=\mathbf{E}} \cdot \dot{\mathbf{v}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} {}^1\mathbf{H} \\ {}^2\mathbf{H} \\ {}^3\mathbf{H} \\ {}^4\mathbf{H} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{=\mathbf{H}} \cdot \mathbf{v}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} {}^1\mathbf{K} \\ {}^2\mathbf{K} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{=\mathbf{K}} \cdot \mathbf{u}(t) \tag{3a}$$

mit

$$\mathbf{E}, \mathbf{H} \in \mathbb{R}^{R \times N}, \quad \mathbf{K} \in \mathbb{R}^{R \times p}, \quad \mathbf{v} \in \mathbb{R}^{N \times 1}, \quad \mathbf{u} \in \mathbb{R}^{p \times 1}, \tag{3b}$$

dargestellt ist, wobei gilt:

- a) Jede Zeile von  ${}^1\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{R_1 \times N}$  und jede Zeile von  $[{}^1\mathbf{H} \quad {}^1\mathbf{K}] \in \mathbb{R}^{R_1 \times (N+p)}$  hat mindestens ein Nichtnullelement.
- b) Jede Zeile von  ${}^2\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{R_2 \times p}$  hat mindestens ein Nichtnullelement oder  ${}^2\mathbf{K}$  existiert nicht.
- c) Jede Zeile von  ${}^2\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{R_2 \times N}$  hat mindestens ein Nichtnullelement und existiert nur, wenn  ${}^2\mathbf{K}$  existiert.
- d) Jede Zeile von  ${}^3\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{R_3 \times N}$  hat *mehr als ein* Nichtnullelement oder  ${}^3\mathbf{H}$  existiert nicht.
- e) Jede Zeile von  ${}^4\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{R_4 \times N}$  hat *genau ein* Nichtnullelement oder  ${}^4\mathbf{H}$  existiert nicht.
- f) Jede Zeile von  ${}^5\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{R_5 \times N}$  hat *mehr als ein* Nichtnullelement oder  ${}^5\mathbf{E}$  existiert nicht.
- g) Jede Zeile von  ${}^6\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{R_6 \times N}$  hat *genau ein* Nichtnullelement oder  ${}^6\mathbf{E}$  existiert nicht.
- h) Die obere Nullmatrix in  $\mathbf{E}$  existiert nur, wenn  ${}^2\mathbf{K}$  existiert, die mittlere Nullmatrix in  $\mathbf{E}$  und obere Nullmatrix in  $\mathbf{K}$  existieren nur, wenn  ${}^3\mathbf{H}$  existiert, die untere Nullmatrix in  $\mathbf{E}$  und die 2-te Nullmatrix in  $\mathbf{K}$  existieren nur, wenn  ${}^4\mathbf{K}$  existiert, die obere Nullmatrix in  $\mathbf{H}$  und die 3-te Nullmatrix in  $\mathbf{K}$  existieren nur, wenn  ${}^5\mathbf{E}$  existiert, und die unteren Nullmatrizen in  $\mathbf{H}$  und  $\mathbf{K}$  existieren nur, wenn  ${}^6\mathbf{E}$  existiert.

<sup>9</sup>Inzidiert der betrachtete Zweig mit mehreren Maschen, würden diese Matrizen weitere Zeilen der Form  $[\pm {}^n h_a \quad \pm {}^n h_a]$  enthalten, was aber wegen ihrer linearen Abhängigkeit von der ersten Zeile lineare (Un-) Abhängigkeiten zwischen Spalten der Matrizen nicht verändern würde.

2. Die DAE beschreibt das Verhalten des technischen Systems so, dass daraus eine Zustandsdifferentialgleichung hergeleitet werden kann. Jedes Element von  $\mathbf{u}$  ist eine Eingangsgröße, jedes Element von  $\mathbf{v}$  ist eine abhängige physikalische Größe des Systems.
3. Infolge der Voraussetzung 2:
  - a) Die DAE enthält keine Relation, welche die Berechnung eines Elements von  $\mathbf{u}$  unabhängig von  $\dot{\mathbf{v}}$  und nicht konstanten Elementen von  $\mathbf{v}$  ermöglicht.
  - b) Jedes Element von  $\mathbf{u}$  und  $\mathbf{v}$  ist stets endlich, auch an Unstetigkeitsstellen von  $\mathbf{u}$ .
  - c) Für jeden Zeilenvektor von  ${}^2\mathbf{H}$  ist die folgende Bedingung erfüllt: Wenn  $\mu$  die Spaltenindizes aller Nicht-nullelemente des betrachteten Zeilenvektors von  ${}^2\mathbf{H}$  enthält, gilt  $\exists \mu \in \mu$  ( $e_\mu = 0$ ).

Die Voraussetzungen 1a bis 1h können stets erfüllt werden, indem die DAE in der folgenden Reihenfolge aufgestellt wird: Inhomogene ODEs, evtl. existierende algebraische Gleichungen, in welchen mindestens ein Element von  $\mathbf{v}$  und mindestens ein Element von  $\mathbf{u}$  vorkommt, evtl. existierende algebraische Gleichungen, in welchen mehr als ein Element von  $\mathbf{v}$  aber kein Element von  $\mathbf{u}$  vorkommt, evtl. existierende algebraische Gleichungen, in welchen genau ein Element von  $\mathbf{v}$  aber kein Element von  $\mathbf{u}$  vorkommt, evtl. existierende homogene ODEs, in welchen mehr als ein Element von  $\dot{\mathbf{v}}$  vorkommt, evtl. existierende homogene ODEs, in welchen genau ein Element von  $\dot{\mathbf{v}}$  vorkommt.

Die Voraussetzungen 3a bis 3c sind notwendige Bedingungen für Voraussetzung 2. Bei Verletzung der Voraussetzung 3a sind Elemente von  $\mathbf{u}$  voneinander abhängig, so dass mindestens ein Element von  $\mathbf{u}$  keine Eingangsgröße des Systems ist. Ferner stellt lineare Kombinierbarkeit konstanter Elemente von  $\mathbf{v}$  aus Elementen von  $\mathbf{u}$  einen Widerspruch dar, weil Eingangsgrößen beliebige Funktionen der Zeit sind, während  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{K}$  und die betrachteten Elemente von  $\mathbf{v}$  konstant sind. Deshalb ist dieser Fall durch die Voraussetzung 3a auszuschließen.

Voraussetzung 3c sollte detaillierter erläutert werden. Aufgrund der Voraussetzung 1b kann jedes  $v_\mu$  mit  $\mu \in \mu$  als Linearkombination der Elemente von  $\mathbf{u}$  und der restlichen, zu Nichtnullelementen von  ${}^2\mathbf{H}$  gehörenden Elementen von  $\mathbf{v}$  aufgefasst werden. Dies hat zwei weitreichende Konsequenzen: Einerseits können ggf. existierende Zwangsbedingungen  ${}^5\mathbf{E} \cdot \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{0}$  und  ${}^6\mathbf{E} \cdot \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{0}$  nur dann für jede mögliche Eingangstrajektorie erfüllt werden, wenn  $\exists \mu \in \mu$  ( ${}^5e_\mu = \mathbf{0} \wedge {}^6e_\mu = \mathbf{0}$ ). Andererseits würde mindestens ein  $\mu \in \mu$  existieren, für welches  $\dot{v}_\mu$  bei Unstetigkeitsstellen der Eingangsgrößen nicht endlich wäre, so dass  ${}^1\mathbf{E} \cdot \dot{\mathbf{v}} = {}^1\mathbf{H} \cdot \mathbf{v} + {}^1\mathbf{K} \cdot \mathbf{u}$  bei endlichem  $\mathbf{v}$  und endlichem  $\mathbf{u}$  nur erfüllt werden kann, wenn  $\exists \mu \in \mu$  ( ${}^1e_\mu = 0$ ). Voraussetzung 3c ist die Schlussfolgerung aus beiden Konsequenzen und  $\exists \mu \in \mu$  ( ${}^1e_\mu = 0$ ) ist eine notwendige Bedingung für 3b.

Ein wichtiger Aspekt beim Aufstellen einer DAE ist, dass keine Zustandsdifferentialgleichung existiert, wenn mindestens eine Systemkomponente so modelliert ist, dass mindestens eine Größe an Unstetigkeitsstellen der Eingangsgrößen nicht endlich ist. Dies ist z. B. der Fall, wenn ein Kondensator, dessen parasitäre Induktivität und Reihenwiderstand vernachlässigt werden, parallel zu einem Spannungseingang geschaltet ist. Dann wird der Kondensator durch die ODE  $C \cdot \dot{u}_c(t) = i_c(t)$  und die algebraische Gleichung  $0 = u_c(t) - u(t)$  repräsentiert, so dass Voraussetzung 3c offensichtlich verletzt ist. Selbige Voraussetzung wird in analoger Weise verletzt, wenn ein Stromeingang mit einem Knotenpunkt inzidiert, der sonst ausschließlich mit Zweigen inzidiert, deren Ströme durch Spulen fließen, deren parasitäre Parallelkapazitäten vernachlässigt werden.

#### 4 Wahl der Zustandsgrößen

Um eine Zustandsdifferentialgleichung zu erhalten, sind aus den Variablen in (3a) zunächst diejenigen zu identifizieren, die sich als Zustandsgrößen eignen. Der Einfachheit wegen werden in diesem Beitrag ausschließlich Variablen, deren zeitliche Differentialquotienten in (3a) mit Nichtnullelementen von  $\mathbf{E}$  multipliziert werden, als mögliche Zustandsgrößen aufgefasst<sup>10</sup>. Um mögliche Zustandsgrößen zu erkennen, ist es hilfreich, (3a) darzustellen in der Form

$$\begin{bmatrix} {}^1a\mathbf{E} & {}^1c\mathbf{E} & {}^1d\mathbf{E} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ {}^5a\mathbf{E} & {}^5c\mathbf{E} & {}^5d\mathbf{E} \\ \mathbf{0} & {}^6c\mathbf{E} & {}^6d\mathbf{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^a\dot{\mathbf{v}}(t) \\ {}^c\dot{\mathbf{v}}(t) \\ {}^d\dot{\mathbf{v}}(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1a\mathbf{H} & {}^1b\mathbf{H} & {}^1c\mathbf{H} & {}^1d\mathbf{H} \\ {}^2a\mathbf{H} & {}^2b\mathbf{H} & {}^2c\mathbf{H} & {}^2d\mathbf{H} \\ {}^3a\mathbf{H} & {}^3b\mathbf{H} & {}^3c\mathbf{H} & {}^3d\mathbf{H} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^4d\mathbf{H} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^a\mathbf{v}(t) \\ {}^b\mathbf{v}(t) \\ {}^c\mathbf{v}(t) \\ {}^d\mathbf{v}(t) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} {}^1\mathbf{K} \\ {}^2\mathbf{K} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}(t), \tag{4}$$

<sup>10</sup>Zu den genannten Größen proportionale Größen könnten ebenfalls als mögliche Zustandsgrößen aufgefasst werden.

mit den folgenden *Eigenschaften*:

- I.  $({}^4\mathbf{h}_\nu \neq \mathbf{0}) \Leftrightarrow (v_\nu \in {}^d\mathbf{v}), {}^d\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{N_d \times 1}$  existiert nur, wenn  ${}^4\mathbf{H}$  existiert.
- II.  $((v_\nu \notin {}^d\mathbf{v}) \wedge ({}^6\mathbf{e}_\nu \neq \mathbf{0})) \Leftrightarrow (v_\nu \in {}^c\mathbf{v}), {}^c\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{N_c \times 1}$  existiert nur, wenn  ${}^6\mathbf{E}$  existiert.
- III.  $((v_\nu \notin {}^d\mathbf{v}) \wedge (v_\nu \notin {}^c\mathbf{v}) \wedge (\mathbf{e}_\nu = \mathbf{0})) \Leftrightarrow (v_\nu \in {}^b\mathbf{v}), {}^b\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{N_b \times 1}$ .
- IV.  $((v_\nu \notin {}^d\mathbf{v}) \wedge (v_\nu \notin {}^c\mathbf{v}) \wedge (v_\nu \notin {}^b\mathbf{v})) \Leftrightarrow (v_\nu \in {}^a\mathbf{v}), {}^a\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{N_a \times 1}$ .
- V.  $\forall i \in \{1, 5, 6\} ((v_\nu = {}^d v_\mu) \Leftrightarrow ({}^{id}\mathbf{e}_\mu = {}^i\mathbf{e}_\nu)), {}^{id}\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{R_i \times N_d}$  existiert nur, wenn  ${}^4\mathbf{H}$  existiert.
- VI.  $\forall i \in \{1, 5, 6\} ((v_\nu = {}^c v_\mu) \Leftrightarrow ({}^{ic}\mathbf{e}_\mu = {}^i\mathbf{e}_\nu)), {}^{ic}\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{R_i \times N_c}$  existiert nur, wenn  ${}^6\mathbf{E}$  existiert.
- VII.  $\forall i \in \{1, 5\} ((v_\nu = {}^a v_\mu) \Leftrightarrow ({}^{ia}\mathbf{e}_\mu = {}^i\mathbf{e}_\nu)), {}^{ia}\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{R_i \times N_a}$
- VIII.  $\forall i \in \{1, \dots, 4\} ((v_\nu = {}^d v_\mu) \Leftrightarrow ({}^{id}\mathbf{h}_\mu = {}^i\mathbf{h}_\nu)), {}^{id}\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{R_i \times N_d}$  existiert nur, wenn  ${}^4\mathbf{H}$  existiert.
- IX.  $\forall i \in \{1, \dots, 3\} ((v_\nu = {}^c v_\mu) \Leftrightarrow ({}^{ic}\mathbf{h}_\mu = {}^i\mathbf{h}_\nu)), {}^{ic}\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{R_i \times N_c}$  existiert nur, wenn  ${}^6\mathbf{E}$  existiert.
- X.  $\forall i \in \{1, \dots, 3\} ((v_\nu = {}^b v_\mu) \Leftrightarrow ({}^{ib}\mathbf{h}_\mu = {}^i\mathbf{h}_\nu)), {}^{ib}\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{R_i \times N_b}$  existiert nur, wenn  ${}^b\mathbf{v}$  existiert.
- XI.  $\forall i \in \{1, \dots, 3\} ((v_\nu = {}^a v_\mu) \Leftrightarrow ({}^{ia}\mathbf{h}_\mu = {}^i\mathbf{h}_\nu)), {}^{ia}\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{R_i \times N_a}$ .
- XII. Die in einer Zeile eingetragenen Nullmatrizen existieren nur, wenn die restlichen Matrizen der selben Zeile ebenfalls existieren.

Diese Eigenschaften sind auch als *Regeln zur Überführung von (3a) in (4)* zu verstehen. Die Überführung gelingt immer, wenn zuerst I, II, III und IV der Reihe nach auf (3a) angewendet werden. Die Anwendung der restlichen Regeln kann in beliebiger Reihenfolge erfolgen.

Bei Existenz der Matrix  ${}^4\mathbf{H}$  enthält (4) die Gleichung  ${}^{4d}\mathbf{H} \cdot {}^d\mathbf{v}(t) = \mathbf{0}$ . Weil die Voraussetzung 1e wegen der Eigenschaft VIII auch für  ${}^{4d}\mathbf{H}$  gilt, liefert diese Gleichung die Erkenntnis  ${}^d\mathbf{v}(t) = \mathbf{0}$ . Deshalb ist bei Existenz der Matrix  ${}^6\mathbf{E}$  die ODE  ${}^{6c}\mathbf{E} \cdot {}^c\dot{\mathbf{v}}(t) + {}^{6d}\mathbf{E} \cdot {}^d\dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{0}$  äquivalent zu  ${}^{6c}\mathbf{E} \cdot {}^c\dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{0}$ . Vor dem Hintergrund von Eigenschaft VI und Voraussetzung 1g führt dies zu  ${}^c\dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{0}$  und  ${}^c\mathbf{v}(t) = {}^c\mathbf{v}(t_0)$ . Zusammenfassend können die betrachteten Relationen ersetzt werden durch

$${}^d\mathbf{v}(t) = \begin{cases} \mathbf{0} & \text{für } {}^4\mathbf{H} \neq [] \\ [] & \text{sonst} \end{cases}, {}^c\mathbf{v}(t) = \begin{cases} {}^c\mathbf{v}(t_0) & \text{für } {}^6\mathbf{E} \neq [] \\ [] & \text{sonst} \end{cases} \quad (5a)$$

und die sonstigen Relationen aus (4) werden repräsentiert durch

$$\underbrace{\begin{bmatrix} {}^{1a}\mathbf{E} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ {}^{5a}\mathbf{E} \end{bmatrix}}_{{}^a\mathbf{E}:=} \cdot {}^a\dot{\mathbf{v}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} {}^{1a}\mathbf{H} \\ {}^{2a}\mathbf{H} \\ {}^{3a}\mathbf{H} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{{}^a\mathbf{H}:=} \cdot {}^a\mathbf{v}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} {}^{1b}\mathbf{H} \\ {}^{2b}\mathbf{H} \\ {}^{3b}\mathbf{H} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{{}^b\mathbf{H}:=} \cdot {}^b\mathbf{v}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} {}^{1c}\mathbf{H} \\ {}^{2c}\mathbf{H} \\ {}^{3c}\mathbf{H} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{{}^c\mathbf{H}:=} \cdot {}^c\mathbf{v}(t_0) + \underbrace{\begin{bmatrix} {}^{1\mathbf{K}} \\ {}^{2\mathbf{K}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{{}^a\mathbf{K}:=} \cdot \mathbf{u}(t), \quad (5b)$$

wobei  ${}^c\mathbf{H}$  und  ${}^c\mathbf{v}(t_0)$  nur existieren, wenn  ${}^6\mathbf{E}$  existiert.

Selbstverständlich kann (5b) umgeformt werden zu<sup>13</sup>

$$\underbrace{\begin{bmatrix} {}^b\mathbf{H} & -{}^a\mathbf{E} & {}^a\mathbf{H} & {}^c\mathbf{H} & {}^a\mathbf{K} \end{bmatrix}}_{\mathbf{N}:=} \cdot \begin{pmatrix} {}^b\mathbf{v}(t) \\ {}^a\dot{\mathbf{v}}(t) \\ {}^a\mathbf{v}(t) \\ {}^c\mathbf{v}(t_0) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (6)$$

<sup>11</sup> Aufgrund der Eigenschaften II, V, und VI sind alle Nichtnullspalten von  ${}^6\mathbf{E}$  in  $[{}^{6c}\mathbf{E} \quad {}^{6d}\mathbf{E}]$  enthalten. Deshalb ist in (4) rechts von  $[{}^{6c}\mathbf{E} \quad {}^{6d}\mathbf{E}]$  eine Nullmatrix eingetragen, so dass  $i = 6$  hier nicht mehr zu berücksichtigen ist.

<sup>12</sup> Aufgrund der Eigenschaft I sind alle Nichtnullspalten von  ${}^4\mathbf{H}$  in  ${}^{4d}\mathbf{H}$  enthalten. Deshalb ist in (4) rechts von  ${}^{4d}\mathbf{H}$  eine Nullmatrix eingetragen, so dass  $i = 4$  hier nicht mehr zu berücksichtigen ist.

<sup>13</sup> Die Untermatrizen in den eckigen Klammern sind so eingetragen, dass die  $\nu$ -te Submatrix von links zum  $\nu$ -ten Untervektor in der runden Klammer gehört.

Durch elementare Zeilenumformungen kann die Matrix  $\mathbf{N}$  auf *Zeilenstufenform* gebracht<sup>14</sup> und diese Relation somit ersetzt werden durch<sup>1315</sup>

$$\begin{bmatrix} {}^b\mathbf{H} & {}^1\mathbf{E} & {}^1\mathbf{H} & {}^1\mathbf{H} & {}^1\mathbf{K} \\ \mathbf{0} & {}^2\mathbf{E} & {}^2\mathbf{H} & {}^2\mathbf{H} & {}^2\mathbf{K} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^3\mathbf{H} & {}^3\mathbf{H} & {}^3\mathbf{K} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^4\mathbf{H} & {}^4\mathbf{K} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^5\mathbf{K} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^b\mathbf{v}(t) \\ {}^a\dot{\mathbf{v}}(t) \\ {}^a\mathbf{v}(t) \\ {}^c\mathbf{v}(t_0) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (7)$$

${}^5\mathbf{K} \neq \mathbf{0}$  würde die Voraussetzung 3a verletzen. Selbiges gilt für  ${}^4\mathbf{K} \neq \mathbf{0}$ . Außerdem wäre bei Existenz von  $[\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ {}^3\mathbf{H} \ {}^3\mathbf{H} \ {}^3\mathbf{K}]$  mindestens ein Element von  ${}^a\mathbf{v}$  an Unstetigkeitsstellen von  $\mathbf{u}$  unstetig und  ${}^a\dot{\mathbf{v}}$  nicht endlich, wenn  ${}^3\mathbf{K} \neq \mathbf{0}$ . Wegen  ${}^1\mathbf{E} \neq \mathbf{0}$  würde dies jedoch Voraussetzung 3b verletzen. Diesen Aspekten wird durch Entfernung von  $[\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ {}^5\mathbf{K}]$  aus (7) und Nullsetzen von  ${}^3\mathbf{K}$  und  ${}^4\mathbf{K}$  Rechnung getragen.

Es ist nicht sicher, dass ein existierendes Gleichungssystem  ${}^3\mathbf{H} \cdot {}^a\mathbf{v}(t) + {}^3\mathbf{H} \cdot {}^c\mathbf{v}(t_0) = \mathbf{0}$  alle existierenden Abhängigkeiten zwischen Elementen von  ${}^a\mathbf{v}$  der Form

$${}^a v_\nu(t) = \beta_\nu^T \cdot {}^c\mathbf{v}(t_0) + \sum_{\substack{\mu=1 \\ \mu \neq \nu}}^{N_a} \alpha_{\nu,\mu} \cdot {}^a v_\mu(t) \quad (8)$$

mit konstanten Zeilenvektoren  $\beta_\nu^T$  und konstanten, von Null verschiedenen Koeffizienten  $\alpha_{\nu,\mu}$  repräsentiert. Daher kann ein zulässiger Satz von Zustandsgrößen nicht allein anhand des erstgenannten Gleichungssystems erfolgen. Aber wegen  $\dot{\mathbf{v}}(t_0) = \mathbf{0}$  liefert es das homogene ODE-System  ${}^3\mathbf{H} \cdot {}^a\dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{0}$ . Wenn dieses noch nicht Bestandteil der DAE (3a) war, enthält mindestens eine Spalte von  ${}^2\mathbf{E}$  kein Pivotelement, und (7) kann nur nach  ${}^a\dot{\mathbf{v}}$  aufgelöst werden, nachdem es erweitert wurde zu<sup>13</sup>

$${}^3\mathbf{H} \cdot {}^a\mathbf{v}(t) + {}^3\mathbf{H} \cdot {}^c\mathbf{v}(t_0) = \mathbf{0}, \quad (9a)$$

$${}^4\mathbf{H} \cdot {}^c\mathbf{v}(t_0) = \mathbf{0}, \quad (9b)$$

$$\begin{bmatrix} {}^b\mathbf{H} & {}^1\mathbf{E} & {}^1\mathbf{H} & {}^1\mathbf{H} & {}^1\mathbf{K} \\ \mathbf{0} & {}^2\mathbf{E} & {}^2\mathbf{H} & {}^2\mathbf{H} & {}^2\mathbf{K} \\ \mathbf{0} & {}^3\mathbf{H} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^b\mathbf{v}(t) \\ {}^a\dot{\mathbf{v}}(t) \\ {}^a\mathbf{v}(t) \\ {}^c\mathbf{v}(t_0) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (9c)$$

Durch elementare Zeilenumformungen der linken Matrix<sup>14</sup> kann (9c) ersetzt werden durch<sup>1315</sup>

$$\begin{bmatrix} {}^b\tilde{\mathbf{H}} & {}^1\tilde{\mathbf{E}} & {}^1\tilde{\mathbf{H}} & {}^1\tilde{\mathbf{H}} & {}^1\tilde{\mathbf{K}} \\ \mathbf{0} & {}^2\tilde{\mathbf{E}} & {}^2\tilde{\mathbf{H}} & {}^2\tilde{\mathbf{H}} & {}^2\tilde{\mathbf{K}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^b\mathbf{v}(t) \\ {}^a\dot{\mathbf{v}}(t) \\ {}^a\mathbf{v}(t) \\ {}^c\mathbf{v}(t_0) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix} = \mathbf{0}, \quad (10a)$$

wobei die linke Matrix *Zeilenstufenform aufweist und jede Pivotspalte nur ein Nichtnullelement enthält, nämlich das Pivotelement*<sup>16</sup>. An dieser Stelle offenbart sich eine notwendige Bedingung für die eindeutige Bestimmtheit von  ${}^a\dot{\mathbf{v}}$  und damit für die Existenz einer Zustandsdifferentialgleichung für das durch die DAE beschriebene System:  ${}^2\tilde{\mathbf{E}}$  muss eine Diagonalmatrix

$${}^2\tilde{\mathbf{E}} = \text{diag}({}^2\tilde{e}_{1,1}, {}^2\tilde{e}_{2,2}, \dots, {}^2\tilde{e}_{N_a, N_a}) \quad (10b)$$

mit *ausschließlich von Null verschiedenen Hauptdiagonalelementen sein*. Die Verletzung dieser Bedingung ist eine Abbruchbedingung für den Algorithmus und ist nicht zu erwarten, wenn Voraussetzung 3 erfüllt ist und die DAE des betrachteten technischen Systems fehlerfrei aufgestellt wurde.

<sup>14</sup> Dabei muss besonderes Augenmerk auf Rundungsfehler und deren Auswirkungen auf den Rang der Matrix gelegt werden. Siehe Abschnitt 7.

<sup>15</sup> Jedes zu einem Element des  $\mu$ -ten Untervektors aus der runden Klammer gehörenden Pivotelement ist ein Element der  $\mu$ -ten Untermatrix von oben. Die Untermatrizen und Nullmatrizen in der  $\mu$ -ten Position von oben existieren nicht, wenn kein Pivotelement zum  $\mu$ -ten Untervektor der runden Klammer gehört. Die untersten Zeilen der Matrix müssen nicht notwendigerweise Nullzeilen sein.

<sup>16</sup> Um Rundungsfehler zu vermeiden, ist hier nicht die reduzierte Zeilenstufenform anzustreben.

Demzufolge ist  ${}^{1a}\tilde{\mathbf{E}} = \mathbf{0}$  und (10) äquivalent zu<sup>13</sup>

$${}^{bd}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^{bd}\mathbf{v}(t) = {}^{1a}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^a\mathbf{v}(t) + {}^{1a}\tilde{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{u}(t) + {}^{bi}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^{bi}\mathbf{v}(t) + {}^{1c}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^c\mathbf{v}(t_0), \quad (11a)$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} -2^a\tilde{e}_{1,1} \cdot {}^a\dot{v}_1(t) \\ \vdots \\ -2^a\tilde{e}_{N_a, N_a} \cdot {}^a\dot{v}_{N_a}(t) \end{pmatrix}}_{\mathbf{w}:=} = \underbrace{\begin{bmatrix} 2^a\tilde{\mathbf{H}} & 2^c\tilde{\mathbf{H}} & 2^a\tilde{\mathbf{K}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}:=} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} {}^a\mathbf{v}(t) \\ {}^c\mathbf{v}(t_0) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix}}_{\mathbf{z}:=}, \quad (11b)$$

wobei  ${}^{bd}\tilde{\mathbf{H}}$  aus den *additiv inversen Pivotspalten* von  ${}^b\tilde{\mathbf{H}}$  und  ${}^{bd}\mathbf{v}$  aus den korrespondierenden Elemente von  ${}^b\mathbf{v}$  bestehen.  ${}^{bi}\tilde{\mathbf{H}}$  besteht aus allen evtl. existierenden sonstigen Spalten von  ${}^b\tilde{\mathbf{H}}$  und  ${}^{bi}\mathbf{v}$  aus den korrespondierenden Elemente von  ${}^b\mathbf{v}$ . Die Elemente von  ${}^{bi}\mathbf{v}$  sind freie Variablen des Modells. Deren Existenz, Einfluss und Behandlung wird am Ende des Abschnitts 5 diskutiert.

Aus einem Satz ausgewählter Elemente von  ${}^a\mathbf{v}$  kann ein zulässiger Zustandsvektor  $\mathbf{x}$  gebildet werden, wenn zwischen den ausgewählten Elementen keine Abhängigkeit der Form(8) besteht. Offensichtlich kann eine solche Abhängigkeit nicht bestehen, wenn die zeitlichen Differentialquotienten der ausgewählten Elemente linear unabhängig sind<sup>17</sup>. Für jedes  $i \in \{1, \dots, N_a\}$  ist  ${}^a\dot{v}_i$  linear unabhängig von  ${}^a\dot{v}_j$ , wenn  $j \in \{1, \dots, N_a\} \setminus \{i\}$  und  $w_i$  linear unabhängig von  $w_j$  ist. Dies ist nur der Fall, wenn  $\mathbf{m}_i^T \cdot \mathbf{z}$  linear unabhängig von  $\mathbf{m}_j^T \cdot \mathbf{z}$  ist. Da jedes Element eines Spaltenvektors von  $\mathbf{M}$  mit dem selben Element von  $\mathbf{z}$  multipliziert wird, ist lineare Unabhängigkeit der Zeilen des Produkts  $\mathbf{M} \cdot \mathbf{z}$  äquivalent zu linearer Unabhängigkeit der entsprechenden Zeilen von  $\mathbf{M}$ . Wie leicht einzusehen, ist ein Satz von Zeilen von  $\mathbf{M}$  linear unabhängig, wenn eine Matrix  $\mathbf{P}$  aus einer maximalen Anzahl linear unabhängiger Spaltenvektoren von  $\mathbf{M}$  besteht und die korrespondierenden Zeilen von  $\mathbf{P}$  linear unabhängig sind.

*Folglich ist  $n = \text{rg}\{\mathbf{M}\}$  die Ordnung des Systems. Ein zulässiger Zustandsvektor  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  kann gefunden werden, indem aus  $n$  linear unabhängigen Spaltenvektoren von  $\mathbf{M}$  eine Matrix  $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{N_a \times n}$  gebildet und anschließend aus  $n$  linear unabhängigen Zeilenvektoren von  $\mathbf{P}$  eine Matrix  ${}^x\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  gebildet wird. Das  $\nu$ -te Element von  ${}^a\mathbf{v}$  wird nur in den Zustandsvektor  $\mathbf{x}$  übernommen, wenn der  $\nu$ -te Zeilenvektor von  $\mathbf{P}$  in die Matrix  ${}^x\mathbf{P}$  übernommen wurde.*

Eine geeignete Matrix  $\mathbf{P}$  kann aus  $\mathbf{M}$  gemäß (11b) nach der Initialisierung  ${}_0\mathbf{P} = []$  iterativ gebildet werden, indem  $s_P$  Schritte gemäß

$${}_\nu\mathbf{P} = \begin{cases} \begin{bmatrix} {}_{\nu-1}\mathbf{P} & \mathbf{m}_\nu \end{bmatrix} & \text{für } \text{rg} \begin{bmatrix} {}_{\nu-1}\mathbf{P} & \mathbf{m}_\nu \end{bmatrix} > \text{rg}\{{}_{\nu-1}\mathbf{P}\} \\ {}_{\nu-1}\mathbf{P} & \text{sonst} \end{cases}, \quad (12a)$$

ausgeführt werden und anschließend

$$\mathbf{P} = {}_{s_P}\mathbf{P} \quad (12b)$$

gesetzt wird, wobei  ${}_\nu\mathbf{P}$  die Matrix  $\mathbf{P}$  im  $\nu$ -ten Schritt bezeichnet. Wenn  $n$  bekannt ist, bezeichnet  $s_P$  den kleinsten Wert von  $\nu$ , für welchen  $\text{rg}\{{}_\nu\mathbf{P}\} = n$  ist. Anderenfalls ist  $s_P$  mit der Spaltenanzahl von  $\mathbf{M}$  gleichzusetzen, und  $n$  kann anschließend mit der Spaltenanzahl von  $\mathbf{P}$  gleichgesetzt werden.

Wenn  $\nu$  der kleinste aller Indizes ist, für welchen  $m_{\mu, \nu} \neq 0$  gilt, ist  $\text{rg} \begin{bmatrix} {}_{\nu-1}\mathbf{P} & \mathbf{m}_\nu \end{bmatrix} > \text{rg}\{{}_{\nu-1}\mathbf{P}\}$ . Dies führt zur Schlussfolgerung  $(\mathbf{m}_\mu^T = \mathbf{0}) \Leftrightarrow (\mathbf{p}_\mu^T = \mathbf{0})$ . Vor diesem Hintergrund offenbart (11b), dass  $(\mathbf{p}_\mu^T = \mathbf{0}) \Rightarrow ({}^a\dot{v}_\mu = 0)$ . Daher können konstante Elemente von  ${}^a\mathbf{v}$  anhand der Matrix  $\mathbf{P}$  identifiziert werden.

Die erwähnte Matrix  ${}^x\mathbf{P}$ , ihr zugehöriger Zustandsvektor  $\mathbf{x}$  und ein evtl. existierender Vektor  ${}^{ai}\mathbf{v}$  mit konstanten Elementen von  ${}^a\mathbf{v}$  kann nach der Initialisierung  ${}^x_0\mathbf{P} = []$ ,  ${}_0\mathbf{x} = []$ ,  ${}^{ai}_0\mathbf{v} = []$  iterativ gebildet werden, indem  $N_a$  Schritte gemäß

$${}^x_\nu\mathbf{P} = \begin{cases} \begin{bmatrix} {}^x_{\nu-1}\mathbf{P} \\ \mathbf{p}_{\xi(\nu)}^T \\ {}^x_{\nu-1}\mathbf{P} \end{bmatrix} & \text{für } \text{rg} \begin{bmatrix} {}^x_{\nu-1}\mathbf{P} \\ \mathbf{p}_{\xi(\nu)}^T \end{bmatrix} > \text{rg}\{{}^x_{\nu-1}\mathbf{P}\} \\ {}^x_{\nu-1}\mathbf{P} & \text{sonst} \end{cases}, \quad {}_\nu\mathbf{x} = \begin{cases} \begin{pmatrix} {}_{\nu-1}\mathbf{x} \\ {}^a\mathbf{v}_{\xi(\nu)} \end{pmatrix} & \text{für } \text{rg} \begin{bmatrix} {}^x_{\nu-1}\mathbf{P} \\ \mathbf{p}_{\xi(\nu)}^T \end{bmatrix} > \text{rg}\{{}^x_{\nu-1}\mathbf{P}\} \\ {}_{\nu-1}\mathbf{x} & \text{sonst} \end{cases}, \quad (13a)$$

$${}^{ai}_\nu\mathbf{v} = \begin{cases} \begin{pmatrix} {}^{ai}_{\nu-1}\mathbf{v} \\ {}^a\mathbf{v}_{\xi(\nu)} \end{pmatrix} & \text{für } \mathbf{p}_{\xi(\nu)}^T = \mathbf{0} \\ {}^{ai}_{\nu-1}\mathbf{v} & \text{sonst} \end{cases} \quad (13b)$$

<sup>17</sup>Denn aus (8) folgt  ${}^a\dot{v}_\nu(t) = \sum_{\substack{\mu=1 \\ \mu \neq \nu}}^{N_a} \alpha_{\nu, \mu} \cdot {}^a\dot{v}_\mu(t)$

ausgeführt werden und anschließend

$${}^x\mathbf{P} = {}^x_{N_a}\mathbf{P}, \quad \mathbf{x} = {}_{N_a}\mathbf{x} \quad {}^{ai}\mathbf{v} = {}^{ai}_{N_a}\mathbf{v}. \quad (13c)$$

gesetzt wird, wobei  $\xi$  eine (wiederholungsfreie) Permutation der Menge  $\{1, 2, \dots, N_a\}$  und  $\xi(\nu)$  das  $\nu$ -te Element von  $\xi$  bezeichnen. Sind mehrere Zeilen von  $\mathbf{P}$  linear abhängig voneinander aber linear unabhängig von den Zeilen von  ${}^x_{\nu-1}\mathbf{P}$ , wird nur diejenige Zeile von  $\mathbf{P}$ , deren Zeilenindex den vordersten Platz innerhalb der Permutation belegt, in die Matrix  ${}^x\mathbf{P}$  übernommen. Somit priorisiert die Permutation die Zeilen von  $\mathbf{P}$  bei der Selektion linear unabhängiger Zeilen. Entsprechend werden auch die Elemente von  ${}^a\mathbf{v}$  bei der Auswahl von Zustandsgrößen priorisiert.

## 5 Herleitung einer Zustandsbeschreibung

Nach der Wahl der Zustandsgrößen können nun die linear unabhängigen Zeilen von (11b) in der ODE

$$-{}^{xa}\tilde{\mathbf{E}} \cdot \dot{\mathbf{x}}(t) = {}^{xa}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^a\mathbf{v}(t) + {}^{xa}\tilde{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{u}(t) + {}^{xc}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^c\mathbf{v}(t_0) \quad (14)$$

zusammengefasst werden. Ihre Matrizen, sowie weitere Matrizen und Vektoren, die für spätere Betrachtungen benötigt werden, können nach der Initialisierung  ${}^x_0\tilde{\mathbf{E}} = []$ ,  ${}^x_0\tilde{\mathbf{H}} = []$ ,  ${}^x_0\tilde{\mathbf{K}} = []$ ,  ${}^y_0\mathbf{P} = []$ ,  ${}^a_0\mathbf{y} = []$ ,  ${}^{ya}_0\tilde{\mathbf{E}} = []$  iterativ gebildet werden, indem  $N_a$  Schritte gemäß<sup>18</sup>

$${}^x_\nu\tilde{\mathbf{E}} = \begin{cases} \text{diag}({}^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{E}}, 2^a\tilde{e}_{\xi(\nu),\xi(\nu)}) & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \in \mathbf{x} \\ {}^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{E}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad {}^x_\nu\tilde{\mathbf{H}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} {}^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} \\ 2^a\tilde{\mathbf{h}}_{\xi(\nu)}^T \end{bmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \in \mathbf{x} \\ {}^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad (15a)$$

$${}^x_\nu\tilde{\mathbf{K}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} {}^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{K}} \\ 2^a\tilde{\mathbf{k}}_{\xi(\nu)}^T \end{bmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \in \mathbf{x} \\ {}^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{K}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad {}^y_\nu\mathbf{P} = \begin{cases} \begin{bmatrix} {}^y_{\nu-1}\mathbf{P} \\ \mathbf{P}_{\xi(\nu)}^T \end{bmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \notin \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ {}^{ai}\mathbf{v} \end{pmatrix} \\ {}^y_{\nu-1}\mathbf{P} & \text{sonst} \end{cases}, \quad (15b)$$

$${}^a_\nu\mathbf{y} = \begin{cases} \begin{pmatrix} {}^a_{\nu-1}\mathbf{y} \\ {}^a v_{\xi(\nu)} \end{pmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \notin \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ {}^{ai}\mathbf{v} \end{pmatrix} \\ {}^a_{\nu-1}\mathbf{y} & \text{sonst} \end{cases}, \quad {}^y_\nu\tilde{\mathbf{E}} = \begin{cases} \text{diag}({}^y_{\nu-1}\tilde{\mathbf{E}}, 2^a\tilde{e}_{\xi(\nu),\xi(\nu)}) & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \notin \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ {}^{ai}\mathbf{v} \end{pmatrix} \\ {}^y_{\nu-1}\tilde{\mathbf{E}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad (15c)$$

mit dem selben  $\xi$  wie in (13) ausgeführt und anschließend

$${}^x_a\tilde{\mathbf{E}} = {}^x_{N_a}\tilde{\mathbf{E}}, \quad {}^x_a\tilde{\mathbf{H}} = {}^x_{N_a}\tilde{\mathbf{H}}, \quad {}^x_a\tilde{\mathbf{K}} = {}^x_{N_a}\tilde{\mathbf{K}}, \quad {}^y\mathbf{P} = {}^y_{N_a}\mathbf{P}, \quad {}^a\mathbf{y} = {}^a_{N_a}\mathbf{y}, \quad {}^y_a\tilde{\mathbf{E}} = {}^y_{N_a}\tilde{\mathbf{E}} \quad (15d)$$

gesetzt wird.

${}^a\mathbf{v}$  ist nun zerlegt in  $\mathbf{x}$ ,  ${}^{ai}\mathbf{v}$  und  ${}^a\mathbf{y}$ , so dass (14) und (11a) in der Form

$$-{}^{xa}\tilde{\mathbf{E}} \cdot \dot{\mathbf{x}}(t) = 2^x\tilde{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{x}(t) + 2^v\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^{ai}\mathbf{v}(t_0) + 2^y\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^a\mathbf{y}(t) + {}^{xa}\tilde{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{u}(t) + {}^{xc}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^c\mathbf{v}(t_0) \quad (16a)$$

$${}^{bd}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^{bd}\mathbf{v}(t) = 1^x\tilde{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{x}(t) + 1^v\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^{ai}\mathbf{v}(t_0) + 1^y\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^a\mathbf{y}(t) + 1^a\tilde{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{u}(t) + {}^{bi}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^{bi}\mathbf{v}(t) + 1^c\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^c\mathbf{v}(t_0), \quad (16b)$$

dargestellt werden kann, wenn  $1^a\tilde{\mathbf{H}}$  und  ${}^{xa}\tilde{\mathbf{H}}$  zerlegt werden, indem nach der Initialisierung  $1^x_0\tilde{\mathbf{H}} = []$ ,  $2^x_0\tilde{\mathbf{H}} = []$ ,  $1^v_0\tilde{\mathbf{H}} = []$ ,  $2^v_0\tilde{\mathbf{H}} = []$ ,  $1^y_0\tilde{\mathbf{H}} = []$ ,  $2^y_0\tilde{\mathbf{H}} = []$  und der Ausführung von  $N_a$  Schritten gemäß

$$1^x_\nu\tilde{\mathbf{H}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & 1^a\tilde{\mathbf{h}}_{\xi(\nu)} \end{bmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \in \mathbf{x} \\ 1^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad 2^x_\nu\tilde{\mathbf{H}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 2^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & {}^{xa}\tilde{\mathbf{h}}_{\xi(\nu)} \end{bmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \in \mathbf{x} \\ 2^x_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad (17a)$$

$$1^v_\nu\tilde{\mathbf{H}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1^v_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & 1^a\tilde{\mathbf{h}}_{\xi(\nu)} \end{bmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \in {}^{ai}\mathbf{v} \\ 1^v_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad 2^v_\nu\tilde{\mathbf{H}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 2^v_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & {}^{xa}\tilde{\mathbf{h}}_{\xi(\nu)} \end{bmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \in {}^{ai}\mathbf{v} \\ 2^v_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad (17b)$$

$$1^y_\nu\tilde{\mathbf{H}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1^y_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & 1^a\tilde{\mathbf{h}}_{\xi(\nu)} \end{bmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \in {}^a\mathbf{y} \\ 1^y_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad 2^y_\nu\tilde{\mathbf{H}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 2^y_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & {}^{xa}\tilde{\mathbf{h}}_{\xi(\nu)} \end{bmatrix} & \text{für } {}^a v_{\xi(\nu)} \in {}^a\mathbf{y} \\ 2^y_{\nu-1}\tilde{\mathbf{H}} & \text{sonst} \end{cases}, \quad (17c)$$

<sup>18</sup>Die Matrix  ${}^{xc}\tilde{\mathbf{H}}$  wird später nicht gebraucht. Deshalb wird sie hier nicht gebildet.

mit dem selben  $\xi$  wie in (13)

$${}^{1x}\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1x}{N_a}\tilde{\mathbf{H}}, \quad {}^{2x}\tilde{\mathbf{H}} = \frac{2x}{N_a}\tilde{\mathbf{H}}, \quad {}^{1v}\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1v}{N_a}\tilde{\mathbf{H}}, \quad {}^{2v}\tilde{\mathbf{H}} = \frac{2v}{N_a}\tilde{\mathbf{H}}, \quad {}^{1y}\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1y}{N_a}\tilde{\mathbf{H}}, \quad {}^{2y}\tilde{\mathbf{H}} = \frac{2y}{N_a}\tilde{\mathbf{H}}. \quad (17d)$$

gesetzt wird.

Um (16) in eine Zustandsdifferentialgleichung zu überführen, dürfen lediglich Zustandsgrößen, Eingangsgrößen und von  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{u}$  unabhängige Größen im Gleichungssystem verbleiben. Alle anderen in (16) auftretenden Größen müssen als Funktionen der zuvor genannten Größen ausgedrückt werden. Da  ${}^{ai}\mathbf{v}$  konstant ist, hängt dieser Vektor nicht von  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{u}$  ab, selbiges gilt für  ${}^{c}\mathbf{v}$  und  ${}^{bi}\mathbf{v}$ .  ${}^a\mathbf{y}$  hängt jedoch von  $\mathbf{x}$  und/oder  $\mathbf{u}$  ab. Charakteristisch für die lineare Abhängigkeit eines Zeilenvektors  ${}^y\mathbf{p}_\nu^T$  der Matrix  ${}^y\mathbf{P}$  von den Zeilenvektoren von  ${}^x\mathbf{P}$  und für die lineare Abhängigkeit eines Elements  ${}^y w_\nu$  des Spaltenvektors  ${}^y\mathbf{w} = -{}^{ya}\tilde{\mathbf{E}} \cdot {}^a\dot{\mathbf{y}}$  von den Elementen des Spaltenvektors  ${}^x\mathbf{w} = -{}^{xa}\tilde{\mathbf{E}} \cdot \dot{\mathbf{x}}$  ist die Existenz eines Zeilenvektors  ${}^a\tilde{\mathbf{c}}_\nu^T$ , welcher die Gleichungen  ${}^y\mathbf{p}_\nu^T = {}^a\tilde{\mathbf{c}}_\nu^T \cdot {}^x\mathbf{P}$  und  ${}^y w_\nu = {}^a\tilde{\mathbf{c}}_\nu^T \cdot {}^x\mathbf{w}$  erfüllt. Da dies für jedes  $\nu \in \{1, \dots, n\}$  gilt, bildet die Gesamtheit dieser Zeilenvektoren eine Matrix  ${}^a\tilde{\mathbf{C}}$ , welche die Gleichungen  ${}^y\mathbf{P} = {}^a\tilde{\mathbf{C}} \cdot {}^x\mathbf{P}$  und  ${}^y\mathbf{w} = {}^a\tilde{\mathbf{C}} \cdot {}^x\mathbf{w}$  erfüllt. Da  ${}^x\mathbf{P}$  regulär ist, liefert die erste Gleichung  ${}^a\tilde{\mathbf{C}} = {}^y\mathbf{P} \cdot {}^x\mathbf{P}^{-1}$ , so dass die zweite Gleichung in der Form  ${}^y\mathbf{w} = {}^y\mathbf{P} \cdot {}^x\mathbf{P}^{-1} \cdot {}^x\mathbf{w}$  oder  ${}^{ya}\tilde{\mathbf{E}} \cdot {}^a\dot{\mathbf{y}}(t) = {}^y\mathbf{P} \cdot {}^x\mathbf{P}^{-1} \cdot {}^{xa}\tilde{\mathbf{E}} \cdot \dot{\mathbf{x}}(t)$  geschrieben werden kann. Da jedes Hauptdiagonalelement der Diagonalmatrix  ${}^{ya}\tilde{\mathbf{E}}$  von Null verschieden sein muss, kann die letztgenannte Gleichung nach  ${}^a\dot{\mathbf{y}}(t) = {}^{ya}\tilde{\mathbf{E}}^{-1} \cdot {}^y\mathbf{P} \cdot {}^x\mathbf{P}^{-1} \cdot {}^{xa}\tilde{\mathbf{E}} \cdot \dot{\mathbf{x}}(t)$  aufgelöst werden, was wiederum

$${}^a\mathbf{y}(t) = \overbrace{{}^{ya}\tilde{\mathbf{E}}^{-1} \cdot {}^y\mathbf{P} \cdot {}^x\mathbf{P}^{-1} \cdot {}^{xa}\tilde{\mathbf{E}}}^{a\mathbf{C}:=} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (18)$$

liefert, wenn  ${}^{3c}\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{0}$ . Anderenfalls hängt mindestens ein zu den Pivotspalten von  ${}^{3a}\tilde{\mathbf{H}}$  gehörendes Element des Vektors  ${}^{c}\mathbf{v}$  von  ${}^{c}\mathbf{v}(t_0)$  ab, so dass davon betroffene Elemente nicht als Linearkombinationen der anderen Elemente von  ${}^a\mathbf{y}$  dargestellt werden können, sondern als Funktionen der Form (8) mit von Null verschiedenen  $\beta_\nu^T$ . Deshalb sind die betroffenen Elemente durch Lösen der Gleichung (9a) zu berechnen. Nur die nicht betroffenen Elemente von  ${}^{c}\mathbf{v}$  ergeben sich gemäß (18). Welche Elemente von  ${}^{c}\mathbf{v}$  betroffen sind, hängt von  ${}^{3a}\tilde{\mathbf{H}}$  und  ${}^{3c}\tilde{\mathbf{H}}$  ab. Dies zeigt, dass mehrere Fallunterscheidungen erforderlich sind, wenn  ${}^{c}\mathbf{v}(t_0) \neq \mathbf{0}$ . Offensichtlich ist ein System mit  ${}^{c}\mathbf{v}(t_0) \neq \mathbf{0}$  nichtlinear. Im Sinne eines geringeren Platzbedarfes werden ab hier nur noch lineare Systeme betrachtet.

Im Folgenden wird daher  ${}^{c}\mathbf{v}(t_0) = \mathbf{0}$  vorausgesetzt.

Die Diagonalmatrix  ${}^{xa}\tilde{\mathbf{E}}$  ist invertierbar, da jedes Hauptdiagonalelement von Null verschieden ist. Deshalb ergibt sich unter zusätzlicher Berücksichtigung von (18) aus (16a) die Zustandsdifferentialgleichung

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \overbrace{-{}^{xa}\tilde{\mathbf{E}}^{-1} \cdot ({}^{2x}\tilde{\mathbf{H}} + {}^{2y}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^a\mathbf{C})}^{\mathbf{A}:=} \cdot \mathbf{x}(t) + \overbrace{(-{}^{xa}\tilde{\mathbf{E}}^{-1} \cdot {}^{xa}\tilde{\mathbf{K}})}^{\mathbf{B}:=} \cdot \mathbf{u}(t) + \overbrace{(-{}^{xa}\tilde{\mathbf{E}}^{-1} \cdot {}^{2v}\tilde{\mathbf{H}})}^{x\mathbf{O}:=} \cdot {}^{ai}\mathbf{v}(t_0) \quad (19a)$$

des Systems, welches durch die DAE beschrieben war. (18), (16b) und (5a) formen die Ausgangsgleichung

$$\underbrace{\begin{pmatrix} {}^a\mathbf{y}(t) \\ {}^{bd}\mathbf{v}(t) \\ {}^c\mathbf{v}(t) \\ {}^{d}\mathbf{v}(t) \end{pmatrix}}_{\mathbf{y}(t):=} = \underbrace{\begin{bmatrix} {}^a\mathbf{C} \\ {}^{bd}\tilde{\mathbf{H}}^{-1} \cdot ({}^{1x}\tilde{\mathbf{H}} + {}^{1y}\tilde{\mathbf{H}} \cdot {}^a\mathbf{C}) \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}:=} \cdot \mathbf{x}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ {}^{bd}\tilde{\mathbf{H}}^{-1} \cdot {}^{1a}\tilde{\mathbf{K}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}:=} \cdot \mathbf{u}(t) \\ + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ {}^{bd}\tilde{\mathbf{H}}^{-1} \cdot {}^{bi}\tilde{\mathbf{H}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{\mathbf{G}:=} \cdot {}^{bi}\mathbf{v}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ {}^{bd}\tilde{\mathbf{H}}^{-1} \cdot {}^{1v}\tilde{\mathbf{H}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{y\mathbf{O}:=} \cdot {}^{ai}\mathbf{v}(t_0), \quad (19b)$$

in welcher nicht jeder eingetragener Vektor und dessen zugeordnete (Unter-) Matrix existieren muss. Insbesondere  ${}^{c}\mathbf{v}$  und die zugehörigen Untermatrizen existieren nur, wenn  ${}^6\mathbf{E}$  existiert, und  ${}^{d}\mathbf{v}$  und die zugehörigen Untermatrizen existieren nur, wenn  ${}^4\mathbf{H}$  existiert. Die Matrix  $\mathbf{G}$  und der Vektor  ${}^{bi}\mathbf{v}$  existieren nur, wenn mindestens eine Systemgröße nicht eindeutig bestimmt ist. Wie in Abschnitt 2 gezeigt, gilt dies z. B. für die Ströme durch mehrere parallel geschaltete ideale Schalter<sup>6</sup>. Dann tritt der Strom durch einen der Schalter in  ${}^{bd}\mathbf{v}$  auf, während die Ströme durch alle anderen Schalter Elemente von  ${}^{bi}\mathbf{v}$  und freie Variablen des Modells sind. Gleiches gilt für Spannungen über in Reihe geschaltete offene Schalter.

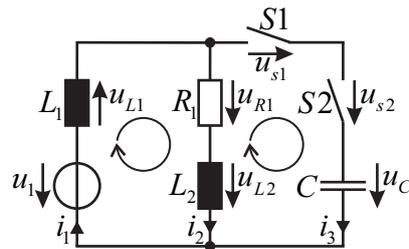


Abb. 2: Elektrisches Netzwerk als einfaches Beispiel.

Werte freier Variablen können beliebig gewählt werden, jedoch sollte die Wahl auf sinnvollen Annahmen basieren. Da  $^{bi}v$  nicht in der Zustandsdifferentialgleichung (19a) vorkommt, ist die Zustandstrajektorie für einen gegebenen Anfangszustand und eine gegebene Eingangstrajektorie trotz freier Variablen eindeutig bestimmt. Die Ausgangsgleichung zeigt, dass freie Variablen generell ausschließlich Ausgangsgrößen beeinflussen, welche in  $^{bd}v$  enthalten sind. Dies passt beispielsweise zu der klar erkennbare Tatsache, dass es für andere Spannungen und Ströme eines elektrischen Netzwerks nicht relevant ist, wenn ein geschlossener Schalter durch mehrere parallel geschaltete Schalter ersetzt wird oder wenn ein offener Schalter durch mehrere seriell geschaltete Schalter ersetzt wird.

Es sei nochmals vergegenwärtigt, dass (19) für den häufigsten Fall  $^{c}v(t_0) = 0$  gilt.

## 6 Beispiel

In diesem Abschnitt wird die Anwendung der beschriebenen Methode auf das in Abbildung 2 illustrierte Beispiel demonstriert.

Die detailliertesten Informationen über die Systemgrößen eines elektrischen Netzwerks liefert die so genannte Knotentableauanalyse (KTA), da ihre zugehörige DAE sämtliche Knotenpotentiale, die Spannungen über sämtlichen Widerständen, Kondensatoren und Induktivitäten und alle Zweigströme als Variablen enthält. Eine KTA, die z. B. in [13] kurz beschrieben ist, erfordert nur wenige Grundkenntnisse und ist daher auch ohne umfangreiche spezifische Kenntnisse und Erfahrungen in der Netzwerkanalyse leicht anwendbar. Allerdings würde eine KTA wegen der Anzahl der Variablen zu viel Platz benötigen. Da die Zweigstromanalyse in den relevanten Ingenieurwissenschaften sehr bekannt ist, keine Spannungen über Widerständen und Induktivitäten enthält (z. B. tritt in den Maschengleichungen anstatt  $u_{R1}$  das Produkt  $R_1 \cdot i_2$  und anstatt  $u_{L1}$  das Produkt  $L_1 \cdot \dot{i}_1$  auf), wird hier die Zweigstromanalyse bevorzugt.

Nach der Definition des Vektors

$$v = [u_C \quad i_1 \quad i_2 \quad i_3 \quad u_{s1} \quad u_{s2}]^T \tag{20a}$$

stellen die ersten vier Zeilen von<sup>19</sup>

$$\underbrace{\begin{bmatrix} C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{E=} \cdot \dot{v} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -R_1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{H=} \cdot v + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{K=} \cdot u \tag{20b}$$

die DAE der Zweigstromanalyse dar (die erste Zeile beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Strom des Kondensators, die zweite und dritte Zeile stellen die Maschengleichungen der eingezeichneten Maschen dar, die vierte Zeile repräsentiert die Knotenpunktgleichung des Knotenpunktes zwischen  $L_1$ ,  $R_1$  und  $S1$ ). Diese Zeilen sind von der Schaltzustandskombination unabhängig. Die Zwangsbedingung/en der Schaltzustandskombination ist/sind durch mindestens eine weitere Zeile zu berücksichtigen. Hier repräsentiert die fünfte Zeile die Zwangsbedingung  $i_3 = 0$  für den hier betrachteten Fall, dass  $S1$  und  $S2$  offen sind. Da hier nur eine Zwangsbedingung für zwei Schalter berücksichtigt ist, sind die Matrizen  $E$  und  $H$  nicht quadratisch.

<sup>19</sup> Um Platz zu sparen, ist die Zeitabhängigkeit der Variablen nicht explizit gekennzeichnet.

Die Anwendung der vorgestellten Methode auf die DAE (20) wird im Folgenden demonstriert. Ein Blick in Abschnitt 3 zeigt, dass (20) die Voraussetzung 1 erfüllt und dass  ${}^2\mathbf{H} = []$ ,  ${}^2\mathbf{K} = []$ ,  ${}^5\mathbf{E} = []$ ,  ${}^6\mathbf{E} = []$ , die vierte Zeile von  $\mathbf{H}$  ist  ${}^3\mathbf{h}$ , die oberen drei Zeilen der Matrizen bilden die Untermatrizen  ${}^1\mathbf{E}$ ,  ${}^1\mathbf{H}$ ,  ${}^1\mathbf{k}$  und die unterste Zeile von  $\mathbf{H}$  ist  ${}^4\mathbf{h}$ .

Letztgenannte Gegebenheit und die Eigenschaft I führen zur Schlussfolgerung  ${}^d v = i_3$ . Die Eigenschaft II führt mit  ${}^6\mathbf{E} = []$  zu  ${}^c \mathbf{v} = []$ . Die Schlussfolgerungen aus den Eigenschaften III und IV und den beschriebenen Gegebenheiten bzgl.  ${}^5\mathbf{E}$  und  ${}^1\mathbf{E}$  sind  ${}^b \mathbf{v} = [u_{s1} \ u_{s2}]^T$  und  ${}^a \mathbf{v} = [u_C \ i_1 \ i_2]^T$ . Die in (5b) definierten Matrizen können nun auf Basis dieser Schlussfolgerungen und der übrigen Eigenschaften gebildet werden. Dementsprechend besteht  ${}^a\mathbf{E}$  aus den ersten vier Zeilen der ersten drei Spalten von  $\mathbf{E}$ . Die ersten vier Zeilen der ersten drei Spalten von  $\mathbf{H}$  bilden die Untermatrix  ${}^a\mathbf{H}$ .  ${}^b\mathbf{H}$  besteht aus den ersten vier Zeilen der letzten zwei Spalten von  $\mathbf{H}$ .  ${}^c\mathbf{H} = []$ . Somit ist (6) hier<sup>19</sup>

$$\overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & -C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_1 & -L_2 & 0 & 0 & -R_1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -L_2 & 1 & 0 & -R_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}}^{\mathbf{N} =} \cdot \begin{pmatrix} {}^b \mathbf{v} \\ \dots \\ {}^a \dot{\mathbf{v}} \\ \dots \\ {}^a \mathbf{v} \\ \dots \\ u \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (21)$$

Nach Verschiebung der dritten Zeile nach ganz oben hat die Matrix der resultierenden DAE<sup>19</sup>

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & -L_2 & 1 & 0 & -R_1 & 0 \\ 0 & 0 & -C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_1 & -L_2 & 0 & 0 & -R_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^b \mathbf{v} \\ \dots \\ {}^a \dot{\mathbf{v}} \\ \dots \\ {}^a \mathbf{v} \\ \dots \\ u \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (22)$$

Zeilenstufenform. Der Vergleich zwischen (22) und (7) ergibt  ${}^{3a} \mathbf{h} = [0 \ -1 \ 1]$ . Deshalb sind (9a) und (9c) hier<sup>19</sup>

$$[0 \ -1 \ 1] \cdot {}^a \mathbf{v} = 0 \quad (23a)$$

$$\overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & -L_2 & 1 & 0 & -R_1 & 0 \\ 0 & 0 & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_1 & -L_2 & 0 & 0 & -R_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}^{{}^2\mathbf{N} =} \cdot \begin{pmatrix} {}^b \mathbf{v} \\ \dots \\ {}^a \dot{\mathbf{v}} \\ \dots \\ {}^a \mathbf{v} \\ \dots \\ u \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (23b)$$

Durch Ersetzen von  ${}^2\mathbf{n}_4^T$  durch  $L_1 \cdot {}^2\mathbf{n}_4^T - {}^2\mathbf{n}_3^T$  wird  ${}^2\mathbf{N}$  zu

$${}^3\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & -L_2 & 1 & 0 & -R_1 & 0 \\ 0 & 0 & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_1 & -L_2 & 0 & 0 & -R_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (L_1 + L_2) & 0 & 0 & R_1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Das Ziel ist nun, dass jede Pivotspalte genau ein Nichtnullelement enthält. Dies kann durch Ersetzen von  ${}^3\mathbf{n}_3^T$  durch  $-L_2 \cdot {}^3\mathbf{n}_4^T - (L_1 + L_2) \cdot {}^3\mathbf{n}_3^T$  und  ${}^3\mathbf{n}_1^T$  durch  $L_2 \cdot {}^3\mathbf{n}_4^T + (L_1 + L_2) \cdot {}^3\mathbf{n}_1^T$  erreicht werden, so dass die erste Zeile der linken Matrix von (10a)

$$[(L_1 + L_2) \ (L_1 + L_2) \ 0 \ 0 \ 0 \ (L_1 + L_2) \ 0 \ -R_1 \cdot L_1 \ -L_2]$$

ist und die sonstigen Zeilen der erwähnten Matrix

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_1 \cdot (L_1 + L_2) & 0 & 0 & 0 & R_1 \cdot L_1 & -L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (L_1 + L_2) & 0 & 0 & R_1 & -1 \end{bmatrix}$$

sind. Somit sind die in (10a) definierten Untermatrizen hier

$${}^b \tilde{\mathbf{h}} = (L_1 + L_2) \cdot [1 \ 1], \quad {}^{1c} \tilde{\mathbf{H}} = [], \quad {}^{2c} \tilde{\mathbf{H}} = [], \quad {}^{1a} \tilde{\mathbf{h}} = [(L_1 + L_2) \ 0 \ -R_1 \cdot L_1], \quad {}^{1a} \tilde{k} = -L_2, \quad (24a)$$

$${}^{2a}\tilde{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 \\ 0 & L_1 \cdot (L_1 + L_2) & 0 \\ 0 & 0 & (L_1 + L_2) \end{bmatrix}, \quad {}^{2a}\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 \cdot L_1 \\ 0 & 0 & R_1 \end{bmatrix}, \quad {}^{2a}\tilde{\mathbf{k}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -L_1 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (24b)$$

Offensichtlich ist eine Spalte von  ${}^b\tilde{\mathbf{h}}$  keine Pivotspalte, so dass dieser Zeilenvektor und der Vektor  ${}^b\mathbf{v}$  in Form von

$${}^{bd}\tilde{h} = -(L_1 + L_2), \quad {}^{bi}\tilde{h} = L_1 + L_2, \quad {}^{bd}v = u_{s1}, \quad {}^{bi}v = u_{s2} \quad (25a)$$

in (11) auftreten. Weiterhin ist

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 \cdot L_1 & -L_1 \\ 0 & 0 & R_1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (25b)$$

Der durch (12) beschriebene Algorithmus übernimmt  $\mathbf{m}_3$  in die Matrix  $\mathbf{P}$ , weil die Übernahme von  $\mathbf{m}_1$  und  $\mathbf{m}_2$  den Rang der Matrix nicht erhöht. Wegen  $\mathbf{m}_4 = -R_1^{-1} \cdot \mathbf{m}_3$  würde die Übernahme von  $\mathbf{m}_4$  den Rang ebenfalls nicht erhöhen, so dass

$$\mathbf{p} = \mathbf{m}_3 = [0 \quad (R_1 \cdot L_1) \quad R_1]^T. \quad (26)$$

Demnach ist  $n = \text{rg}\{\mathbf{M}\} = 1$ . Daher tritt in diesem Fall ein Skalar  ${}^x p$  anstatt einer Matrix  ${}^x \mathbf{P}$  auf. Der durch (13) beschriebene Algorithmus selektiert jenes Nichtnullelement von  $\mathbf{p}$ , dessen Zeilenindex den vordersten Platz innerhalb der Permutation  $\xi$  belegt. Das zugehörige Element von  ${}^a \mathbf{v}$  wird zur einzigen Zustandsgröße. Im Folgenden wird

$$\xi = \{1, 3, 2\} \quad (27)$$

angenommen, was

$${}^x p = R_1, \quad x = i_2, \quad {}^{ai}v = {}^a v_1 = u_C \quad (28)$$

liefert. Nachdem nun die Wahl der Zustandsgrößen abgeschlossen ist, muss die Zustandsbeschreibung (19) basierend auf (24) mit Hilfe des durch (15) und (17) beschriebenen Algorithmus parametrisiert werden. (15) liefert

$${}^{xa}\tilde{e} = L_1 + L_2, \quad {}^{xa}\tilde{\mathbf{h}} = [0 \quad 0 \quad R_1], \quad {}^{xa}\tilde{k} = -1, \quad {}^y p = R_1 \cdot L_1, \quad {}^a y = i_1, \quad {}^{ya}\tilde{e} = L_1 \cdot (L_1 + L_2). \quad (29a)$$

Und (17) liefert

$${}^{1x}\tilde{h} = -R_1 \cdot L_1, \quad {}^{2x}\tilde{h} = R_1, \quad {}^{1v}\tilde{h} = L_1 + L_2, \quad {}^{2v}\tilde{h} = 0, \quad {}^{1y}\tilde{h} = 0, \quad {}^{2y}\tilde{h} = 0. \quad (29b)$$

(18), (28) und (29) ergeben

$${}^a c = \frac{1}{L_1 \cdot (L_1 + L_2)} \cdot R_1 \cdot L_1 \cdot \frac{1}{R_1} \cdot (L_1 + L_2) = 1. \quad (30)$$

Einsetzen von (24), (25), (29) und (30) in (19) ergibt schließlich<sup>19</sup>

$$\dot{x} = -\frac{R_1}{L_1 + L_2} \cdot x + \frac{1}{L_1 + L_2} \cdot u, \quad (31a)$$

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ u_{s1} \\ i_3 \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ R_1 \cdot L_1 \\ L_1 + L_2 \\ 0 \end{bmatrix}}^{\mathbf{C}} \cdot x + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ L_2 \\ L_1 + L_2 \\ 0 \end{bmatrix}}^{\mathbf{D}} \cdot u + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}}^{\mathbf{yO}} \cdot {}^{ai}v + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}}^{\mathbf{G}} \cdot {}^{bi}v. \quad (31b)$$

Wegen der Einfachheit des betrachteten Netzwerks ist dieses Resultat einfach zu verifizieren. Abbildung 2 lässt direkt erkennen, dass  $u_C$  konstant,  $i_3 = 0$  und  $i_1 = i_2$  ist, weil  $S1$  offen ist. Dann ist  ${}^{ai}v = u_C$  und die Maschengleichung der linken Masche kann als  $L_1 \cdot \dot{i}_2 + R_1 \cdot \dot{i}_2 + L_2 \cdot \dot{i}_2 - u = 0$  oder  $(L_1 + L_2) \cdot \dot{i}_2 + R_1 \cdot \dot{i}_2 - u = 0$  geschrieben werden. Wird  $i_2 = x$  gesetzt und nach  $\dot{x}$  aufgelöst, ergibt sich (31a), und die Gegebenheit  $i_1 = i_2$  wird ebenfalls durch die erste Zeile von (31b) ausgedrückt. Die unmittelbar sichtbare Gegebenheit  $i_3 = 0$  kommt durch die letzte Zeile von (31b) zum Ausdruck. Mit  $x = i_2$ ,  ${}^{bi}v = u_{s2}$  und  ${}^{ai}v = u_C$  ergibt sich die Gleichung der rechten Masche zu  $u_{s1} + {}^{bi}v + {}^{ai}v - L_2 \cdot \dot{x} - R_1 \cdot x = 0$ . Durch Einsetzen von (31a) und anschließendes Auflösen nach  $u_{s1}$  ergibt sich die zweite Zeile von (31b).

## 7 Numerische Behandlung

Bei der auf (11b) basierenden Auswahl von Zustandsgrößen müssen die zu einem unzulässigen Satz von Elementen des Vektors  ${}^a\mathbf{v}$  gehörenden Zeilenvektoren von  $\mathbf{M}$  linear abhängig sein. Daher müssen elementare Zeilenumformungen der linken Matrizen in (6) und (9c) so erfolgen, dass Rundungsfehler nicht dazu führen, dass existierende lineare Abhängigkeiten zwischen Zeilenvektoren nach der Umformung nicht mehr erkannt werden. Am besten ist die Vermeidung von Rundungen.

Liegen ausschließlich ganzzahlige Elemente mit nicht zu unterschiedlichen Beträgen vor, erfolgt eine elementare Zeilenumformung zwischen den Zeilen  $\nu$  und  $\mu$  der Matrix  $\mathbf{N}$ , bei welcher ein Nullelement in Zeile  $\mu$  und Spalte  $\alpha$  erzielt werden soll, gemäß

$$\tilde{\mathbf{n}}_{\mu}^T = \frac{\text{kgV}(n_{\nu,\alpha}, n_{\mu,\alpha})}{n_{\nu,\alpha}} \cdot \mathbf{n}_{\nu}^T - \frac{\text{kgV}(n_{\nu,\alpha}, n_{\mu,\alpha})}{n_{\mu,\alpha}} \cdot \mathbf{n}_{\mu}^T, \quad (32a)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_{\mu}^T = \frac{\tilde{\mathbf{n}}_{\mu}^T}{\text{ggT}(\tilde{\mathbf{n}}_{\mu}^T)} \quad (32b)$$

ohne Rundung, wobei  $\text{kgV}(a, b)$  das kleinste gemeinsame Vielfache von  $a$  und  $b$  bezeichnet und  $\text{ggT}(\tilde{\mathbf{n}}_{\mu}^T)$  den größten gemeinsamen Teiler der Elemente von  $\tilde{\mathbf{n}}_{\mu}^T$ . (32b) ist optional und sorgt für kleinstmögliche Beträge der Elemente von  $\hat{\mathbf{n}}_{\mu}^T$ . Die anschließend aufzustellende linke Matrix in (9c) ist in der selben Weise wie  $\mathbf{N}$  zu behandeln.

Bei symbolischer Berechnung, die auch in Abschnitt 6 erfolgte, sind elementare Zeilenumformungen rundungsfrei, da sie ohnehin gemäß (32) erfolgt, wobei das Produkt  $n_{\nu,\alpha} \cdot n_{\mu,\alpha}$  an Stelle von  $\text{kgV}(n_{\nu,\alpha}, n_{\mu,\alpha})$  verwendet wird und  $\text{ggT}(\tilde{\mathbf{n}}_{\mu}^T)$  ist der Divisor, durch welchen jedes Element von  $\tilde{\mathbf{n}}_{\mu}^T$  ganzzahlig dividiert werden kann.

In einigen Fällen nicht ganzzahliger Elemente mit nicht zu unterschiedlichen Beträgen sind elementare Zeilenumformungen gemäß (32) mit dem Produkt  $n_{\nu,\alpha} \cdot n_{\mu,\alpha}$  an Stelle von  $\text{kgV}(n_{\nu,\alpha}, n_{\mu,\alpha})$  rundungsfrei.

Die folgenden Überlegungen sind für alle anderen Fälle von computergestützten numerischen Berechnungen relevant.

Welche Sätze von Systemgrößen zulässige Zustandsvektoren bilden, ist von den Beträgen der Systemparameter unabhängig. Daher müssen die Zustandsgrößen nicht auf Basis des tatsächlichen Parametervektors  $\sigma$ , aus welchem die tatsächlichen Matrizen  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{K}$  und  $\mathbf{N}$  resultieren, ausgewählt werden. Stattdessen kann auch ein beliebiger Parametervektor  ${}^*\sigma$ , aus welchem die Matrizen  ${}^*\mathbf{E}$ ,  ${}^*\mathbf{H}$ ,  ${}^*\mathbf{K}$  und  ${}^*\mathbf{N}$  resultieren, verwendet werden, wenn jedes Element von  ${}^*\sigma$  das selbe Vorzeichen wie das entsprechende Element von  $\sigma$  aufweist. Somit ist es naheliegend, den Parametervektor  ${}^*\sigma$  so zu wählen, dass eine Matrix  ${}^*\mathbf{N}$  mit ausschließlich ganzzahligen Elementen möglichst kleiner Beträge entsteht. Dann können die erforderlichen Zeilenumformungen in  ${}^*\mathbf{N}$  und den anschließend gebildeten Matrizen in (9c) gemäß (32) rundungsfrei erfolgen, solange dabei die Beträge der Elemente nicht so groß werden, dass sie ohne Rundung nicht darstellbar sind.

Der tatsächliche Parametervektor des in Abschnitt 6 betrachteten Beispiels ergibt sich aus  $\sigma = [CL_1L_2R_1]^T$ , indem die Formelzeichen der Parameter durch deren Werte ersetzt werden. Wie anhand von (21) leicht erkennbar ist, wäre die Wahl  ${}^*\sigma = [1111]^T$  optimal, weil der Betrag jedes Elements von  ${}^*\mathbf{N}$  eins wäre.

Die resultierende Matrix  ${}^*\mathbf{N}$  und die zugehörigen Matrizen  ${}^*\mathbf{P}$  und  ${}^{*x}\mathbf{P}$  sind als Grundlage für die Auswahl von Zustandsgrößen und für die Identifizierung aller Elemente von  ${}^a\mathbf{v}$  gemäß (13) zu empfehlen. Die tatsächlichen Matrizen sind jedoch für die Herleitung der Zustandsbeschreibung gemäß Abschnitt 5 unverzichtbar. Bei elementaren Zeilenumformungen der tatsächlichen Matrix  $\mathbf{N}$  in (6) und der resultierenden (tatsächlichen) linken Matrix in (9c) sollten folgende Maßnahmen ergriffen werden: In jeder Pivotspalte wird das betragsgrößte Element durch entsprechende Zeilenvertauschung in die Pivotposition gebracht<sup>20</sup>. Nach Elimination der Elemente unterhalb der Pivotposition werden die Zeilen unterhalb der Pivotposition so umsortiert, dass die Beträge der Elemente der nächsten Pivotspalte mit steigendem Zeilenindex abnehmen.

Die zuletzt genannte Prozedur verschiebt Elemente mit kleinen Beträgen, deren Differenz von Null durch Rundungsfehler entsteht, in die letzten Zeilen der Matrix. Folglich kann ein Nichtnullelement der linken Matrix in (7)

<sup>20</sup>Diese als Teilpivotisierung bezeichnete Maßnahme verringert Rundungsfehler

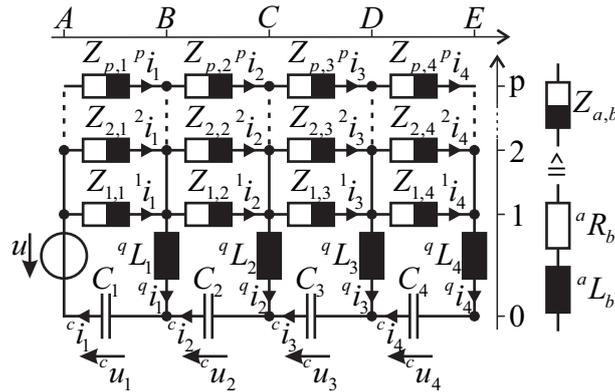


Abb. 3: Elektrisches Netzwerk höherer Ordnung als Testsystem.

oder (10a) Null gesetzt werden, wenn das Element in der selben Position der entsprechenden, aus \*N hervorgegangenen Matrix nicht zu einer der von einer Nullmatrix verschiedenen Untermatrix gehört. Dies ermöglicht die Identifikation der Untermatrizen von (7) und (10a) und letztendlich das Aufstellen der tatsächlichen Matrix M.

Die Matrizen \*P bzw. \*xP werden anhand von \*M analog zu (12) und (13) aufgestellt. Anschließend wird ein Spaltenvektor von M in P übernommen, wenn der entsprechende Spaltenvektor von \*M in \*xP übernommen wurde. Entsprechend wird ein Zeilenvektor von P in xP übernommen, wenn der entsprechende Zeilenvektor von \*P in \*xP übernommen wurde.

### 8 Praktische Anwendung und Test

Der vorgestellte Algorithmus wurde unter Einbeziehung der in Abschnitt 7 beschriebenen Maßnahmen in Matlab® umgesetzt. Bei der Modellierung zahlreicher mechatronischer Systeme wurden damit bereits validierte Modelle im Zustandsraum erstellt. Dennoch soll nachfolgend nochmals die Bemerkung aus Abschnitt 7 aufgegriffen werden, dass die dort beschriebenen einfachen Maßnahmen zur Vermeidung von Rundungen geeignet sind, solange die Zeilenoperationen nicht zu Beträgen der Matrixelemente führen, die ohne Rundung nicht verarbeitet werden können. Wenn aufgrund eines zu umfangreichen Gleichungssystems zu viele Zeilenumformungen erforderlich sind, kann diese Voraussetzung verletzt und in der Folge ein unzulässiger Zustandsvektor generiert werden. Vor diesem Hintergrund wurde exemplarisch Anhand des in Abbildung 3 dargestellten Netzwerks getestet, ab wann dies der Fall ist.

Mit den Vektoren<sup>19</sup>

$${}^{\nu} \mathbf{i} = [{}^1 i_{\nu} \quad {}^2 i_{\nu} \quad \dots \quad {}^p i_{\nu}]^T \text{ für } \nu \in \{1, \dots, 4\}, \quad {}^c \mathbf{u} = [{}^c u_1 \quad {}^c u_2 \quad {}^c u_3 \quad {}^c u_4]^T, \quad (33a)$$

kann das System beschrieben werden durch<sup>1319</sup>

$$\overbrace{\begin{bmatrix} {}^{1,1} \mathbf{E} & {}^{1,2} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ {}^{2,1} \mathbf{E} & {}^{2,2} \mathbf{E} & {}^{2,3} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & {}^{3,2} \mathbf{E} & {}^{3,3} \mathbf{E} & {}^{3,4} \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^{4,3} \mathbf{E} & {}^{4,4} \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^{5,5} \mathbf{E} \end{bmatrix}}^{\mathbf{E} =} \cdot \dot{\mathbf{v}} = \overbrace{\begin{bmatrix} \mathbb{I}_{p,1} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}^{\mathbf{K} =} \cdot \mathbf{u} + \overbrace{\begin{bmatrix} {}^{1,1} \mathbf{H} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^{1,5} \mathbf{H} \\ \mathbf{0} & {}^{2,2} \mathbf{H} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^{2,5} \mathbf{H} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^{3,3} \mathbf{H} & \mathbf{0} & {}^{3,5} \mathbf{H} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & {}^{4,4} \mathbf{H} & {}^{4,5} \mathbf{H} \\ {}^{5,1} \mathbf{H} & {}^{5,2} \mathbf{H} & {}^{5,3} \mathbf{H} & {}^{5,4} \mathbf{H} & \mathbf{0} \end{bmatrix}}^{\mathbf{H} =} \cdot \overbrace{\begin{pmatrix} {}^1 \mathbf{i} \\ {}^2 \mathbf{i} \\ {}^3 \mathbf{i} \\ {}^4 \mathbf{i} \\ {}^c \mathbf{u} \end{pmatrix}}^{\mathbf{v} =} \quad (34a)$$

mit

$${}^{1,1} \mathbf{E} = \text{diag}({}^1 L_1, \dots, {}^p L_1) + {}^q L_1 \cdot \mathbb{I}_{p,p}, \quad {}^{\nu,\nu} \mathbf{E} = \text{diag}({}^1 L_{\nu}, \dots, {}^p L_{\nu}) + ({}^q L_{\nu} + {}^q L_{\nu-1}) \cdot \mathbb{I}_{p,p} \text{ for } \nu \in \{2, 3, 4\}, \quad (34b)$$

$${}^{\nu,\nu+1} \mathbf{E} = {}^{\nu+1,\nu} \mathbf{E} = -{}^q L_{\nu} \cdot \mathbb{I}_{p,p} \text{ for } \nu \in \{1, 2, 3\}, \quad {}^{5,5} \mathbf{E} = \text{diag}(C_1, C_2, C_3, C_4), \quad (34c)$$

$${}^{\nu,\nu} \mathbf{H} = -\text{diag}({}^1 R_{\nu}, {}^2 R_{\nu}, \dots, {}^p R_{\nu}) \text{ for } \nu \in \{1, \dots, 4\}, \quad {}^{1,5} \mathbf{H} = -[\mathbb{I}_{p,1} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}], \quad (34d)$$

$${}^{2,5} \mathbf{H} = -[\mathbf{0} \quad \mathbb{I}_{p,1} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}], \quad {}^{3,5} \mathbf{H} = -[\mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbb{I}_{p,1} \quad \mathbf{0}], \quad {}^{4,5} \mathbf{H} = -[\mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbb{I}_{p,1}], \quad (34e)$$



bestätigt. Lediglich für  $p \geq 15$  führte die Vielzahl der notwendigen Zeilenoperationen zu zu großen Beträgen von Matrixelementen, die nicht ohne Rundung verarbeitet werden können, so dass die Auswahl von Zustandsgrößen fehlerhaft wurde. Die Verwendung der tatsächlichen Matrix  $\mathbf{P}$  an Stelle von  $^*\mathbf{P}$  führte sogar bei  $p = 1$  zu einem fehlerhaften Zustandsvektor, obwohl jeder Induktivität der Wert 1 H zugewiesen war. Dies verdeutlicht, wie wichtig die in Abschnitt 7 beschriebenen Maßnahmen für die Wahl der Zustandsgrößen sind.

Der Fall  $^*\boldsymbol{\sigma} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$  und  $p = 14$ , welcher durch  $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{76 \times 76}$ ,  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{76 \times 76}$  und  $\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{76 \times 141}$  charakterisiert ist, wurde detaillierter betrachtet. Der Algorithmus wurde zehntausend mal auf (36) angewendet, wobei jeder Induktivität jedes mal per Zufallsgenerator ein individueller Wert zwischen  $100 \mu\text{H}$  und  $0,1 \text{H}$  zugewiesen wurde und das resultierende Modell mit dem Referenzmodell bzw. mit den erwarteten Werten verglichen wurde. Zu Vergleichszwecken wurden folgende Größen ermittelt: Die relative Differenz zwischen jedem Element von  $\mathbf{A}$  und seinem Pendant aus  $^R\mathbf{A}$  gemäß  $\delta a_{\nu,\mu} = |a_{\nu,\mu} - {}^R a_{\nu,\mu}| \cdot |{}^R a_{\nu,\mu}|^{-1}$ , wenn  ${}^R a_{\nu,\mu} \neq 0$ , anderenfalls  $\delta a_{\nu,\mu} = |a_{\nu,\mu}| \cdot (\min\{{}^R \hat{\mathbf{a}}_{\nu}^T\})^{-1}$ , wobei  ${}^R \hat{\mathbf{a}}_{\nu}^T$  den Betrag jedes Nichtnullelements von  ${}^R \mathbf{a}_{\nu}^T$  enthält. Die relative Differenz zwischen den Elementen von  $\mathbf{b}$  und  ${}^R \mathbf{b}$  wurde für jedes  $\nu \in \{1, \dots, n\}$  gemäß  $\delta b_{\nu} = |b_{\nu} - {}^R b_{\nu}| \cdot |{}^R b_{\nu}|^{-1}$  berechnet, wenn  ${}^R b_{\nu} \neq 0$ , anderenfalls wurde die absolute Differenz von  $b_{\nu}$  gemäß  $\Delta b_{\nu} = |b_{\nu}|$  berechnet. Die relative Differenz zwischen dem Realteil jedes Eigenwertes  $\lambda_{\nu}$  von  $\mathbf{A}$  und dem Eigenwert  ${}^R \lambda_{\nu}$  von  ${}^R \mathbf{A}$  wurde gemäß  $\delta \text{Re}(\lambda_{\nu}) = |\text{Re}(\lambda_{\nu} - {}^R \lambda_{\nu})| \cdot |\text{Re}({}^R \lambda_{\nu})|^{-1}$  berechnet. Für den Imaginärteil von  $\lambda_{\nu}$  wurde die relative Differenz gemäß  $\delta \text{Im}(\lambda_{\nu}) = |\text{Im}(\lambda_{\nu} - {}^R \lambda_{\nu})| \cdot |\text{Im}({}^R \lambda_{\nu})|^{-1}$  berechnet, wenn  $\text{Im}({}^R \lambda_{\nu}) \cdot \text{Im}(\lambda_{\nu}) \neq 0$ , anderenfalls wurde diese Größe gemäß  $\delta \text{Im}(\lambda_{\nu}) = |\text{Im}(\lambda_{\nu} - {}^R \lambda_{\nu})| \cdot |\text{Re}({}^R \lambda_{\nu})|^{-1}$  berechnet. Die absolute Differenz  $\Delta \tilde{x}_{\nu}$  zwischen dem Stationärwert von  $x_{\nu}/u$  und seinem erwarteten Wert wurde für jedes  $\nu \in \{1, \dots, n\}$  berechnet. Offensichtlich gilt im stationären Zustand  ${}^c u_1 = u$ ,  ${}^c u_2 = {}^c u_3 = {}^c u_4 = 0 \text{V}$  und alle Ströme sind Null, während das Modell den Stationärwert  ${}^{\infty} \mathbf{x} = \tilde{\mathbf{x}} \cdot u$  mit  $\tilde{\mathbf{x}} = -\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b}$  liefert. Dementsprechend wurde für  $\Delta \tilde{x}_{\nu} = |\tilde{x}_{\nu} - 1|$  für  $\nu = n - 3$  bzw.  $\Delta \tilde{x}_{\nu} = |\tilde{x}_{\nu}|$  für  $\nu \neq n - 3$  berechnet. Bei jeder der zehntausend Anwendungen war  $\delta a_{\nu,\mu} < 1,6 \cdot 10^{-10}$ ,  $\delta b_{\nu} < 1,2 \cdot 10^{-11}$ ,  $\Delta b_{\nu} = 0$ ,  $\delta \text{Re}(\lambda_{\nu}) < 6,1 \cdot 10^{-11}$ ,  $\delta \text{Im}(\lambda_{\nu}) < 6,6 \cdot 10^{-15}$  und  $\Delta \tilde{x}_{\nu} < 6,6 \cdot 10^{-14}$ . Derartige Differenzen sind für praktische Anwendungen irrelevant.

In typischen Ingenieur Tätigkeiten treten in der Regel DAE mit deutlich weniger (Differential-) Gleichungen als im hier untersuchten Beispiel auf. Die erfolgreiche Anwendung des Algorithmus auf die DAE des betrachteten Systems sechzigster Ordnung, bestehend aus 76 (Differential-) Gleichungen legt folglich nahe, dass der Algorithmus in der dargestellten Form ein nützliches Hilfsmittel für typische Ingenieuraufgaben ist. Oft ist die Ordnung eines zu modellierenden Systems recht einfach zu erkennen, so dass an einer von der Ordnung abweichenden Anzahl der vom Algorithmus selektierten Zustandsgrößen ein fehlerhaftes Modell erkannt werden kann. Gleichermaßen kann in der Praxis meist leicht erkannt werden, ob zwischen den selektierten Zustandsgrößen tatsächlich keine unzulässigen Abhängigkeiten bestehen. Verläuft die Prüfung des generierten Modells bzgl. beider Gesichtspunkte ohne Beanstandung, kann auch im Falle einer großen DAE davon ausgegangen werden, dass das entstandene Modell nicht aufgrund von Rundungsfehlern verworfen werden muss. Selbstverständlich könnte auch der Algorithmus dahingehend erweitert werden, dass Rundungen erkannt und Warnungen ausgegeben werden und/oder die Maßnahmen zur Rundungsvermeidung verbessert werden (z. B. dürfen bei der Auswahl von Pivotelementen die Positionen der Elemente ein- und desselben Untervektors des in (6) und (9c) rund eingeklammerten Vektors vertauscht werden, um die entsprechenden Spalten innerhalb der eckig eingeklammerten Matrix zu vertauschen). Ersteres würde die nachträgliche Plausibilitätsprüfung ersetzen, letzteres würde dazu führen, dass der Algorithmus bei noch größeren DAE eine korrekte Zustandsbeschreibung liefert.

## 9 Zusammenfassung

Das Lösungsverhalten einer DAE wurde bereits über mehrere Jahrzehnte untersucht und numerische Ansätze, die auf einer DAE basieren, stehen als Toolboxen für Simulationssoftware wie beispielsweise Matlab® zur Verfügung. Daher ist eine Beschreibung durch eine DAE der schnellste Weg, um ein Modell für reine Simulationsaufgaben zu erhalten. Die meisten Methoden zur Systemanalyse und zur Reglersynthese basieren jedoch auf Zustandsbeschreibungen. Um diese Anwendungen zu können, muss der Modellierungsprozess durch umfangreiche Transformationen der DAE fortgesetzt werden, um eine Zustandsbeschreibung zu erhalten. Dieser zeitaufwändige Vorgang wurde in der Regel ohne Automatismus manuell ausgeführt.

Vor diesem Hintergrund war das Ziel dieses Beitrags die Herleitung einer Methode zur systematischen Konvertierung einer linearen DAE  $\mathbf{E} \cdot \dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{v}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}(t)$ , welche eine große Klasse dynamischer Systeme beschreibt, in eine Zustandsbeschreibung.

Es wurde gezeigt, dass die DAE eines technischen Systems nicht quadratische Matrizen  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{H}$  und unendlich viele Lösungen haben kann. Diese Fälle wurden bei der Herleitung der gewünschten Methode berücksichtigt.

Der Umgang mit freien Variablen, die im Falle unendlich vieler Lösungen auftreten, und deren Auswirkungen auf Zustands- und Ausgangstrajektorie wurden diskutiert. Anschließend wurde das Auftreten nicht quadratischer Matrizen  $E$  und  $H$  sowie unendlich vieler Lösungen einer DAE technischer Systeme anhand eines beispielhaft betrachteten elektrischen Netzwerks und die Anwendung der vorgestellten Methode auf das betrachtete Beispiel demonstriert. Anhand eines größeren elektrischen Netzwerks wurde auf die Grenzen der Anwendbarkeit der Methode und Verbesserungsmöglichkeiten eingegangen.

Die vorgestellte Methode ist einfach in Programmdateien zu implementieren und geeignet, den Aufwand der Modellierung einer großen Klasse technischer Systeme im Zustandsraum erheblich zu reduzieren. Dies gilt auch für den Fall, dass mehrere technische Systeme, die bereits im Zustandsraum beschrieben sind, zusammengesetzt werden sollen und eine Zustandsbeschreibung für das zusammengesetzte System benötigt wird. In diesem Fall liefern die Zustandsdifferentialgleichungen der einzelnen Systeme die ODEs und die Zwangsbedingungen der Compoundierung die algebraischen Gleichungen einer DAE, auf welche dann die vorgestellte Methode angewendet werden kann. Da die Übertragungsfunktion bzw. die Übertragungsmatrix eines linearen Systems durch Anwenden einer weitläufig bekannten Formel leicht aus einer beliebigen Zustandsbeschreibung bestimmt werden kann, reduziert die vorgestellte Methode auch den Aufwand für die Modellierung im Frequenzbereich erheblich.

## Literatur

- [1] Berger, T.; Trenn, S.: *The Quasi-Kronecker Form for Matrix Pencils*. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 33(2), pp. 336–368, 2012. DOI: 10.1137/110826278.
- [2] Ilchmann, A.; Reis, T. (eds): *Surveys in Differential-Algebraic Equations*. 4 Bde. Springer, 2013/2015/2015/2017.
- [3] Konigorski, U.: *Entwurf linearer Deskriptorsysteme durch Polvorgabe*. at - Automatisierungstechnik, 52(1-2004), pp. 39–45, Jan. 2004. DOI: 10.1524/auto.52.1.39.25435.
- [4] Kunkel, P.; Mehrmann, V.; Seidel, S.: *A MATLAB Toolbox for the Numerical Solution of Differential-Algebraic Equations*. Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin, Preprint 16/2005, 2005. <https://www3.math.tu-berlin.de/multiphysics/Publications/Previous/KunMS05ppt.pdf>.
- [5] Kunkel, P.; Mehrmann, V.: *Differential-Algebraic Equations: Analysis and Numerical Solution*. (EMS Textbooks in Mathematics) European Mathematical Society, 2006.
- [6] Labisch, D.; Konigorski, U.: *Optimale Regelung linearer, zeitvarianter Deskriptorsysteme*. at - Automatisierungstechnik, 62(1), pp. 11–20, Jan. 2014. DOI: 10.1515/auto-2014-3001.
- [7] Lunze, J.: *Eigenschaften von linearen DAE-Systemen*. at - Automatisierungstechnik, 64(2), pp. 81–95, Feb. 2016. DOI: 10.1515/auto-2015-0091.
- [8] Manderla, M.; Konigorski, U.: *Parametrischer Entwurf dynamischer Ausgangsrückführungen für reguläre Deskriptorsysteme*. at - Automatisierungstechnik, 59(2), pp. 94–103, Jan. 2011. DOI: 10.1524/auto.2011.0903.
- [9] Mehrmann, V.; Shi, C.: *Analysis of Higher Order Linear Differential-Algebraic Systems*. Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin, preprint 17-2004, 2004. [https://www3.math.tu-berlin.de/cgi-bin/IfM/show\\_abstract.cgi?Report-17-2004.rdf.html](https://www3.math.tu-berlin.de/cgi-bin/IfM/show_abstract.cgi?Report-17-2004.rdf.html).
- [10] Mehrmann, V.; Stykel, T.: *Descriptor Systems: A General Mathematical Framework for Modelling, Simulation and Control*. at - Automatisierungstechnik, 54(8), pp. 405–415, Aug. 2006. DOI: 10.1524/auto.2006.54.8.405.
- [11] Müller, P. C.: *Optimal Control of Proper and Nonproper Descriptor Systems*. Archive of Applied Mechanics, 72, pp. 875–884, Jun. 2003. DOI: 10.1007/s00419-002-0258-1.
- [12] Nedialkov, N. S.; Pryce, J. D.: *Solving Differential-Algebraic Equations by Taylor Series (III): the DAETS Code*. Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics, 3(1-2), pp. 61–80, 2008. ISSN: 1790-8140.
- [13] Rianza, R.: *DAEs in Circuit Modelling: A Survey*. In: Surveys in Differential-Algebraic Equations I, pp. 97–136, Springer Nature, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-34928-7\_3.

# Nichtlineare dynamische Strukturoptimierung unter Berücksichtigung der Deformationsgeschichte mit differenzenbasierten äquivalenten statischen Lasten

J. Triller<sup>1,2,\*</sup>, R. Immel<sup>1</sup>, L. Harzheim<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Opel Automobile GmbH

<sup>2</sup>Technische Universität Darmstadt, fnb

\* korrespondierender Autor: Jens.triller@opel-vauxhall.com

Die Strukturoptimierung nichtlinearer dynamischer Probleme ist eine große Herausforderung. Wenn explizite Verfahren für die nichtlineare Analyse verwendet werden, können numerische Gradienten nur mit großer Ungenauigkeit und numerischem Aufwand, analytische Gradienten dagegen gar nicht bestimmt werden. Die Folge ist, dass für nichtlineare dynamische Probleme Optimierungsmethoden eingesetzt werden müssen, die zeitaufwändiger sind als Gradientenverfahren. Die Anzahl der Designvariablen ist in diesem Fall stark limitiert und die Anwendung von Topologie-Optimierung somit nicht möglich.

Diese Einschränkung kann durch die Definition linear statischer Ersatzlastfälle umgangen werden, die den nichtlinearen Lastfall approximieren sollen. Wenn dies gelingt, ist mit ihnen der Einsatz effizienter Gradientenverfahren möglich. Mit der Methode der äquivalenten statischen Lasten (Equivalent-Static-Load, ESL) liegt ein Ansatz vor, solch lineare Ersatzlastfälle aus einer nichtlinearen dynamischen Analyse zu bestimmen. Dabei werden für eine Auswahl repräsentativer Zeitpunkte  $t^i$  äquivalente statische Lasten (ESLs) so berechnet, dass sich in der linearen Statik die gleichen Verschiebungen ergeben wie in der nichtlinearen dynamischen Analyse. Der große Nachteil hierbei ist, dass die ESLs immer in Bezug auf die undeformierte Ausgangsstruktur berechnet werden. Jedem Ersatzlastfall liegt damit dasselbe FE-Modell zugrunde. Der Deformationspfad und alle Abhängigkeiten davon bleiben demnach im linear statischen System unberücksichtigt, was mitunter sehr hohe ESLs und eine schlechte Approximationsqualität zur Folge hat.

Dieser Nachteil soll durch die Methode der differenzenbasierten äquivalenten statischen Lasten (Difference-based Equivalent Static Load, DiESL) behoben werden. Hier wird jeder Ersatzlastfall durch ein eigenes FE-Modell beschrieben, welches die deformierte Struktur des nichtlinearen Modells zum jeweiligen Zeitpunkt  $t^i$  darstellt. Die dazugehörigen ESLs erzeugen nur das Verschiebungsfeld zum nachfolgenden deformierten Ersatzlastfall und folgen somit dem Deformationspfad des nichtlinearen dynamischen Problems. Folglich entspricht ein Ersatzlastfall einem Zeitinkrement. Eine Strukturantwort zum Zeitpunkt  $t^i$  ergibt sich somit aus der Summe der Strukturantworten der vorangegangenen Ersatzlastfälle. Da das Optimierungsproblem nicht mehr nur ein FE-Modell enthält, muss nun eine Multi-Modell-Optimierung (MMO) durchgeführt werden. Es zeigt sich, dass der DiESL-Ansatz verglichen mit der Standard ESL-Methode zu einem deutlichen Anstieg der Approximationsqualität des linearen Systems und einer schnelleren Konvergenz zum Optimum führt. Dies wird anhand eines ausgewählten Beispiels verdeutlicht und diskutiert.

## 1 Einleitung

Die Strukturoptimierung linear statischer Probleme ist fester Bestandteil des Gestaltungsprozesses vieler Bereiche der Industrie. Vor allem auf Grund der Verfügbarkeit (semi-) analytischer Sensitivitäten können dabei sehr effiziente Gradienten-basierte Optimierer zum Einsatz kommen. Im Gegensatz dazu stellt die Strukturoptimierung nichtlinearer dynamischer Systeme eine große Herausforderung dar. Ein Paradebeispiel dafür ist die Optimierung von Strukturen in Crash-Lastfällen. Für die Simulation von Crash-Lastfällen kommen explizite Solver zum Einsatz. Dabei gilt es nicht nur, Nichtlinearitäten bedingt durch das Material oder die Geometrie zu simulieren, sondern insbesondere bedingt durch Kontakt. Die auftretenden Kontaktkräfte verändern von Zeitschritt zu Zeitschritt nicht nur ihre Größe, sondern auch ihre Position. Die Berechnung von Sensitivitäten

ist folglich sehr schwierig und möglicherweise der Grund dafür, dass dafür keine kommerzielle Lösung verfügbar ist. Stattdessen kommen für die Strukturoptimierung von Crash-Problemen häufig metamodellbasierte Methoden zum Einsatz. Solche Metamodelle können beispielsweise durch Polynome, radiale Basisfunktionen [1]–[3], Neuronale Netzwerke [4]–[6] oder Kriging [7]–[10] generiert werden. Der große Nachteil von metamodellbasierter Strukturoptimierung ist, dass die Anzahl der Design-Variablen eingeschränkt ist und damit Anwendungen wie etwa Topologie-Optimierung nicht möglich sind.

Eine andere Möglichkeit, mit den fehlenden Sensitivitäten umzugehen, ist die Definition linearer Ersatzlastfälle, die das nichtlineare Problem approximieren sollen. Sie ermöglichen die Anwendung effizienter Gradienten-basierter Optimierer. Das bedeutet, dass das nichtlineare dynamische Optimierungsproblem durch die Lösung mehrerer linearer statischer Ersatzlastfälle gelöst wird. Die ESL-Methode stellt ein etabliertes Verfahren zur Definition solcher Ersatzlastfälle dar und wurde sowohl für Sizing- und Shape- als auch Topologie-Optimierung erfolgreich eingesetzt [11]–[21]. Der große Vorteil der ESL-Methode ist, dass auf ausgereifte kommerzielle Software wie etwa MSC-NASTRAN, Altair-OptiStruct oder VRAND-GENSIS für die Analyse und Optimierung zurückgegriffen werden kann und die Entwicklung eines Algorithmus zur Sensitivitäts-Analyse oder Optimierung entfällt. Nichtsdestotrotz hat die Methode einige Schwachstellen, welche durch die in diesem Paper vorgestellte DiESL-Methode verbessert werden sollen. So wird folgend zunächst die ESL-Methode erklärt, um anschließend auf deren Schwachstellen einzugehen. In Kapitel 4 wird die DiESL-Methode vorgestellt und abschließend anhand der Optimierung eines vereinfachten Seitenaufpralltests der ESL-Methode gegenübergestellt.

## 2 Die ESL Methode

Mit der von Choi und Park [1] eingeführte ESL Methode steht ein etabliertes Verfahren für die Strukturoptimierung nichtlinearer dynamischer Lastfälle zur Verfügung. Dieses findet besonders bei der Optimierung von Crashlastfällen Anwendung, bei denen für die Analyse ein expliziter Solver verwendet werden muss und die Sensitivitäten nicht analytisch bestimmt werden können. Die Grundidee der Methode ist, für  $n_T$  ausgewählte Zeiten  $t^i$  äquivalente statische Lasten  $f_{ESL}^i$  zu berechnen, so dass die daraus in der linearen Statik resultierenden Verschiebungsfelder  $u^i$  mit den Verschiebungsfeldern aus einer vorangegangenen nichtlinearen Analyse  $u^{NL}(t^i)$  übereinstimmen. In Abbildung 1 ist der Ablauf der ESL-Methode dargestellt. Der Ablauf beginnt mit einer nichtlinearen Analyse zur Berechnung der Verschiebungsfelder  $u^{NL}(t^i)$ . Durch anschließende Multiplikation der Verschiebungsfelder mit der linearen Steifigkeitsmatrix  $K$  der undeformierten Ausgangsstruktur resultieren für die  $n_T$  ausgewählten Zeitpunkte  $t^i$  äquivalente statische Lasten  $f_{ESL}^i$ .

$$K(x) u^{NL}(t^i) = f_{ESL}^i ; \quad i = 1, \dots, n_T . \tag{1}$$

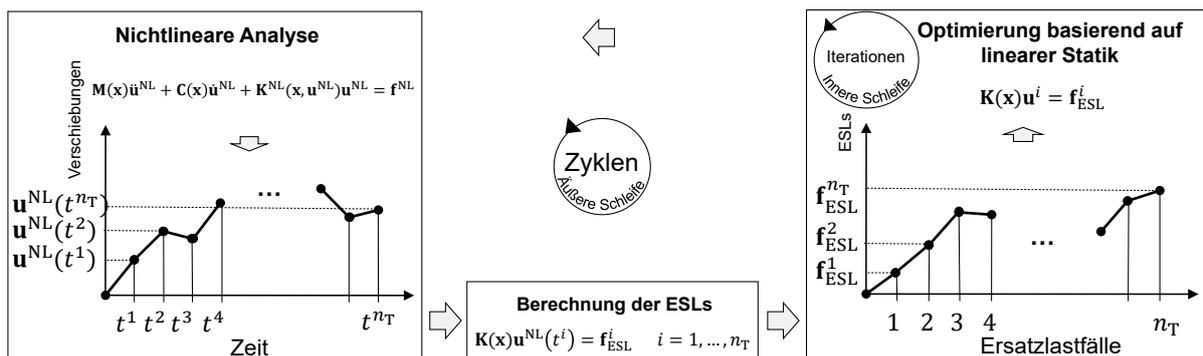


Abb. 1: Ablauf der ESL-Methode für ein nichtlineares dynamisches Problem

Für jeden Lastvektor  $f_{ESL}^i$  bzw. Zeitpunkt  $t^i$  entsteht so ein Ersatzlastfall. Auf Grundlage dieser  $n_T$  Ersatzlastfälle kann anschließend eine lineare Optimierung durchgeführt werden. Da allen Lastfällen dasselbe FE-Modell und demnach dieselbe Steifigkeitsmatrix zugrunde liegt, kann die Optimierung mit einem einzelnen Optimierungsdeck und mehreren Lastfällen ausgeführt werden. Nach der Optimierung wird erneut eine nichtlineare Analyse mit aktualisierten Design-Variablen gestartet. Weil die Ersatzlastfälle nur eine Approximation des eigentlichen nichtlinearen Problems sind, kann nicht erwartet werden, dass die Strukturantworten im linearen und nichtlinearen System übereinstimmen. Ist der Unterschied zu groß, wird der Ablauf wiederholt (äußere Schleife) bis der

Unterschied ausreichend klein ist und weitere Konvergenzkriterien (in Kap. 5 relative Änderung der Zielfunktion < 3%) erfüllt sind. Im Folgenden werden die äußeren Schleifen mit Zyklen bezeichnet, um sie von den Iterationen der linearen Optimierung unterscheiden zu können.

Für Systemantworten wie Verschiebung und Masse stimmen Zielfunktion und Restriktionen des linearen Ersatzproblems mit denen des nichtlinearen dynamischen Ausgangsproblems überein. Für andere Strukturantworten, wie zum Beispiel Reaktionskräfte, Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen, ist es allerdings nötig, eine geeignete Umrechnung von nichtlinearer Dynamik zu linearer Statik zu wählen [19], [20], [23].

### 3 Die Methode der differenzbasierten äquivalenten statischen Lasten (DiESL)

Die ESL-Methode ist kein Optimierungsalgorithmus im klassischen Sinne, sondern eher eine Methode, um lineare Ersatzlastfälle für nichtlineare dynamische Optimierungsprobleme zu erzeugen. Folglich hängt die Effizienz der ESL-Methode stark von der Approximationsqualität der nichtlinearen dynamischen Strukturantworten durch die Ersatzlastfälle ab. Diese Approximationsqualität und dementsprechend auch die Approximation der Sensitivitäten soll durch die Methode der differenzbasierten äquivalenten statischen Lasten [24] verbessert werden. Es ist zu erwarten, dass eine Verbesserung der Approximationsqualität auch zu einer Verbesserung des Konvergenzverhaltens führt. Um die Idee der DiESL-Methode zu erklären, betrachten wir zunächst den Deformationspfad eines beliebigen Knotens des FEM-Netzes für die nichtlineare dynamische Analyse in Abbildung 2 links. Die Position des Knotens zum Zeitpunkt  $t = 0$  liegt auf der undeformierten Ausgangsstruktur und die Koordinate bei  $t = t^i$  spiegelt die Position des Knotens für einen Deformationszustand zum Zeitpunkt  $t^i$  wieder. Der Hauptnachteil der ESL-Methode ist, dass die ESLs immer in Bezug zur undeformierten Ausgangsstruktur berechnet werden. Das bedeutet, dass die ESLs immer so berechnet werden, dass sich ein linearer Deformationspfad von der Knotenposition bei  $t = 0$  zu einem späteren Zeitpunkt  $t = t^i$  einstellt. Der resultierende lineare Deformationspfad unterscheidet sich in der Regel stark vom nichtlinearen Pfad (Abbildung 2, Mitte). Die Tatsache, dass das resultierende Verschiebungsfeld im linearen Ersatzlastfall mit dem des nichtlinear dynamischen Ausgangsproblem übereinstimmt, garantiert also nicht, dass auch der Weg dorthin übereinstimmt. Das führt zu folgenden Problemen:

- Änderungen der Struktursteifigkeit bei großen Verformungen bleiben unberücksichtigt
- Die ESLs sind typischerweise sehr hoch und unterscheiden sich stark von den Knotenkräften im nichtlinearen System
- Geometrische Nichtlinearitäten werden teilweise nur schlecht approximiert
- Die im linearen System resultierenden Dehnungen entsprechen nicht den wahren Dehnungen
- Die Sensitivitäten im linearen und nichtlinearen System können sich stark unterscheiden und im schlimmsten Fall nicht mal im Vorzeichen übereinstimmen

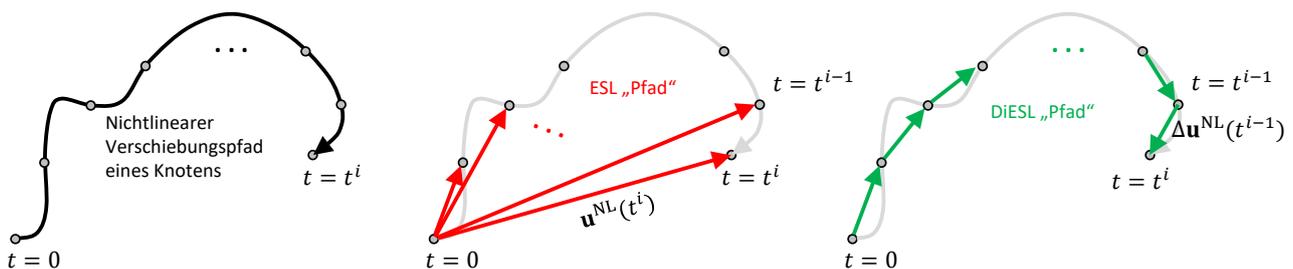


Abb. 2: Deformationspfad eines beliebigen Strukturknotens (links) und die dazugehörigen Verschiebungen  $\mathbf{u}^{NL}(t^i)$  zur Berechnung der ESLs (mittig) sowie  $\Delta \mathbf{u}^{NL}(t^i)$  zur Berechnung der DiESLs (rechts)

Die Idee der DiESL-Methode ist nun, die Approximationsqualität der Ersatzlastfälle zu verbessern, indem der nichtlineare Deformationspfad besser abgebildet wird. Dabei werden die ESLs zum Zeitpunkt  $t^i$  nicht in Bezug auf die Ausgangskoordinaten  $r^j(t^0 = 0)$ , sondern bezogen auf die deformierte Geometrie  $r^j(t^{i-1})$  des davorliegenden Zeitpunktes  $t^{i-1}$  berechnet (Abbildung 2, rechts). Der Deformationspfad wird somit, ähnlich wie bei einer „updated Lagrangian“-Methode [25], in Inkremente aufgeteilt, und die deformierte Geometrie eines Ersatzlastfalls wird als neue Referenzkonfiguration des folgenden Lastfalls verwendet. Daraus folgt, dass mit dem DiESL Ansatz  $n_T$  verschiedene FE-Modelle, jeweils eins für einen Zeitpunkt  $t^i, i = 0, \dots, n_T - 1$ , simultan optimiert

werden. Im Folgenden wird ein FE-Modell bezogen auf einen Zeitpunkt  $t^i$  als das  $i$ -te "Lineare Sub-Modell" ( $\text{LSM}^i$ ) bezeichnet. Dabei basiert jedes  $\text{LSM}^i$  auf derselben Knotentopologie. Die Knotenkoordinaten eines  $\text{LSM}^i$  werden durch den Vektor

$$\mathbf{r}^T(t^i) = (\mathbf{r}_1^T(t^i), \mathbf{r}_2^T(t^i), \dots, \mathbf{r}_{n_N}^T(t^i)) \quad (2)$$

zusammengefasst, welcher die Koordinaten  $\mathbf{r}_j(t^i)$  aller  $n_N$  Knoten enthält. Demnach enthält  $\mathbf{r}(t^0)$  die Knotenkoordinaten des undeforinierten FE-Modells  $\text{LSM}^0$ . Der Vektor

$$\mathbf{u}^{\text{NL}}(t)^T = (\mathbf{u}_1^{\text{NL}}(t)^T, \mathbf{u}_2^{\text{NL}}(t)^T, \dots, \mathbf{u}_{n_N}^{\text{NL}}(t)^T) \quad (3)$$

beinhaltet die Verschiebungen aller  $n_N$  Knoten zum Zeitpunkt  $t$ . Die Koordinaten eines  $\text{LSM}^i$  lassen sich demnach wie folgt berechnen:

$$\mathbf{r}(t^i) = \mathbf{r}(t^0) + \mathbf{u}^{\text{NL}}(t^i) = \mathbf{r}(t^{i-1}) + \Delta\mathbf{u}^{\text{NL}}(t^{i-1}), \quad (4)$$

wobei sich die inkrementellen Verschiebungen ergeben aus

$$\Delta\mathbf{u}^{\text{NL}}(t^i) = \mathbf{u}^{\text{NL}}(t^{i+1}) - \mathbf{u}^{\text{NL}}(t^i), i = 0, \dots, n_T - 1. \quad (5)$$

Die Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}^i = \mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{r}(t^i))$  eines  $\text{LSM}^i$  hängt somit nicht nur von den Designvariablen  $\mathbf{x}$ , sondern auch von den Knotenkoordinaten  $\mathbf{r}(t^i)$  ab. Durch Multiplikation mit den inkrementellen Verschiebungen  $\Delta\mathbf{u}^{\text{NL}}(t^i)$  berechnen sich die differenzbasierten äquivalenten statischen Lasten (DiESLs):

$$\mathbf{K}^i \Delta\mathbf{u}^{\text{NL}}(t^i) = \Delta\mathbf{f}_{\text{DiESL}}^i, \quad (6)$$

Die DiESLs  $\Delta\mathbf{f}_{\text{DiESL}}^i$  können, wie für die ESL-Methode beschrieben (Abbildung 1), für eine gradientenbasierte lineare Optimierung benutzt werden. Aber im Gegensatz zur ESL-Methode werden nun  $n_T$  verschiedene FE-Modelle simultan optimiert, und es muss eine Multi-Model-Optimierung durchgeführt werden. Dabei wird für jedes  $\text{LSM}^i$  die Gleichung der linearen Statik

$$\mathbf{K}^i \Delta\mathbf{u}^i = \Delta\mathbf{f}_{\text{DiESL}}^i \quad (7)$$

gelöst, und es ergeben sich die inkrementellen linearen Verschiebungen  $\Delta\mathbf{u}^{iT} = (\Delta\mathbf{u}_1^i, \Delta\mathbf{u}_2^i, \dots, \Delta\mathbf{u}_{n_N}^i)$  als Lösung. Die Gesamtverschiebungen zum Zeitpunkt  $t^i$  bezogen auf den Ausgangszustand berechnen sich demnach wie folgt:

$$\mathbf{u}^i = \mathbf{u}^0 + \sum_{j=0}^{i-1} \Delta\mathbf{u}^j. \quad (8)$$

Für eine ausreichend große Anzahl Zeitpunkte  $t^i$  ergeben sich vergleichsweise kleine inkrementelle Verschiebungen und somit auch vergleichsweise kleine äquivalente statische Lasten, und der Gültigkeitsbereich der linearen Statik wird nicht überschritten. Der differenzbasierte Ansatz liefert zudem eine stark verbesserte Approximation der nichtlinearen wahren Dehnungen und ermöglicht außerdem prinzipiell eine Berücksichtigung der deformationsabhängigen Steifigkeitsänderungen während der Optimierung der Ersatzlastfälle.

### 3.1 Berechnung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

Grundsätzlich können Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als Finite Differenzen zweier aufeinanderfolgender Zeitschritte berechnet werden. In DiESL wird dieser Vorgang vereinfacht, denn das Ergebnis eines  $\text{LSM}^i$  ist bereits eine Differenz  $\Delta\mathbf{u}^i$ . Folglich kann die Geschwindigkeit  $\dot{\mathbf{u}}^i$  zum Zeitpunkt  $t^i$  als Vorwärtsdifferenz berechnet werden

$$\dot{\mathbf{u}}^i = \frac{\Delta\dot{\mathbf{u}}^i}{\Delta t^i} \quad (9)$$

wobei  $\Delta t^i$  die Zeitdifferenz zwischen  $\text{LSM}^i$  und  $\text{LSM}^{i+1}$  ist. Beschleunigungen werden wie folgt berechnet

$$\ddot{\mathbf{u}}^i = \frac{\dot{\mathbf{u}}^i - \dot{\mathbf{u}}^{i-1}}{\Delta \bar{t}^{i,i-1}}; \quad \Delta \bar{t}^{i,i-1} = \frac{\Delta t^i + \Delta t^{i-1}}{2}. \quad (10)$$

### 3.2 Berechnung von Dehnungen und Spannungen

Dehnungen und Spannungen können in einer ähnlichen Weise wie Verschiebungen summiert werden. Die Vorgehensweise wird folgend am Beispiel von Dehnungen gezeigt. Eine Dehnungskomponente  $\varepsilon^i$  im LSM<sup>i</sup> berechnet sich wie folgt

$$\varepsilon^i = \varepsilon^{i-1} + \alpha^{i-1} \Delta \varepsilon^{i-1} \tag{11}$$

Durch den Skalierungsfaktor  $\alpha$  können Nichtlinearitäten in Geometrie oder Material innerhalb eines LSM<sup>i</sup> berücksichtigt werden. Der Skalierungsfaktor berechnet sich wie folgt

$$\alpha^{i-1} = \frac{\varepsilon^{NL}(t^i) - \varepsilon^{NL}(t^{i-1})}{\Delta \hat{\varepsilon}^{i-1}} \tag{12}$$

wobei  $\Delta \hat{\varepsilon}^{i-1}$  der Dehnung im linearen Ersatzlastfall LSM<sup>i-1</sup> zu Beginn der Optimierung eines Zyklus entspricht. Die nichtlinearen wahren Dehnungen  $\varepsilon^{NL}(t^i)$  und  $\varepsilon^{NL}(t^{i-1})$  ergeben sich aus der vorangegangenen nichtlinearen dynamischen Analyse. Die summierten Dehnungen ergeben sich demnach

$$\varepsilon^i = \varepsilon^0 + \sum_{j=0}^{i-1} \alpha^j \Delta \varepsilon^j \tag{12}$$

wobei im Allgemeinen  $\varepsilon^0 = 0$  gilt. Dabei gilt es zu beachten, dass  $\varepsilon^i$  ebenfalls eine wahre Dehnung ist, zumindest in guter Approximation. Ist der zeitliche Abstand aufeinanderfolgender LSMs ausreichend klein gewählt, dann ist folglich der Skalierungsfaktor für Dehnungen nicht nötig. Das gilt nicht unbedingt für Spannungen, da sich bei der Berücksichtigung nichtlinearen Materialverhaltens deutliche Steifigkeitsunterschiede zwischen Tangentenmodul und E-Modul ergeben. Generell ist es jedoch möglich, den E-Modul lokal für jedes LSM anzupassen und damit auch die Approximationsqualität für Spannungen deutlich zu erhöhen.

## 4 Vereinfachter Seitenaufpralltest

Anhand eines einfachen Testbeispiels wird folgend die ESL-Methode der DiESL-Methode gegenübergestellt. Dabei handelt es sich um einen Seitenaufpralltest, bei welchem eine starre Säule mit einer Rahmenstruktur kollidiert (Abbildung 3, links). Die Anfangsgeschwindigkeit des Impaktors beträgt  $v_y = -8$  m/s. Außerdem sind die translatorischen Freiheitsgrade der Säule in x- und z- Richtung gesperrt. Die Rahmenstruktur ist an der dem Impaktor abgewandten Seite der Bodenplatte in allen 6 Freiheitsgraden fixiert (SPC) und besteht aus Stahl, welches bilinear plastisch modelliert wird (Tangentenmodul = 0.6 GPa, Fließspannung = 0.25 GPa). Die Simulation endet nach 100 ms, so dass die maximale Intrusion des Impaktors erfasst wird.

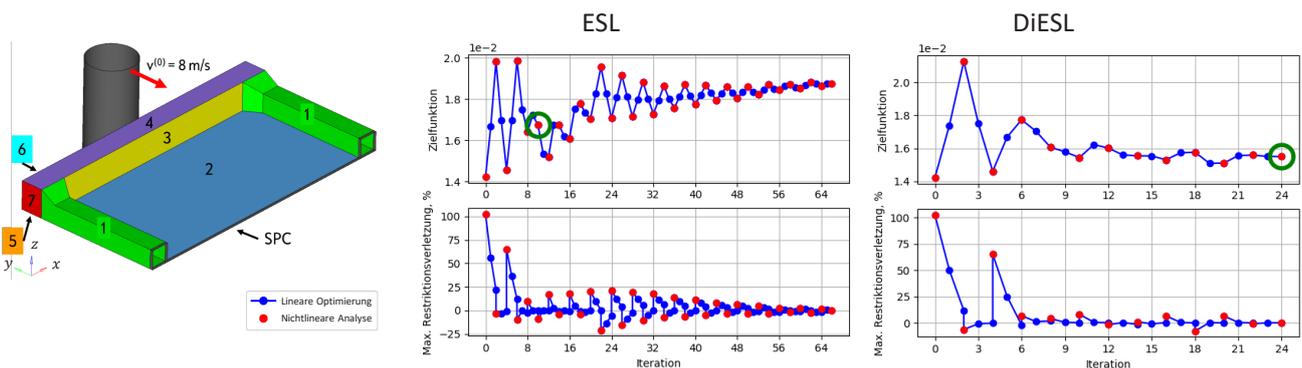


Abb. 3: FE-Modell des Seitenaufpralltests und Zuordnung der Design-Variablen (links) und Verlauf der Zielfunktion und Restriktionsverletzung für ESL (mittig) und DiESL (rechts)

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, wird die Rahmenstruktur durch 7 Design-Variablen, die sich jeweils auf eine Blechdicke beziehen (Ausnahmen:  $x_1$  bezieht sich auf 12 Blechteile,  $x_7$  bezieht sich auf 2), spezifiziert. Die Vernetzung des linearen und nichtlinearen FE-Modells ist identisch. Zwischen Rahmenstruktur und Impaktor ist ein Kontakt definiert. Das Optimierungsziel ist die Minimierung der Masse der Rahmenstruktur. Gleichzeitig soll der Impaktor eine maximale Intrusion  $d(x)$  in negative y-Richtung von 200 mm nicht überschreiten. Das Optimierungsproblem ist wie folgt definiert:

$$\min \text{mass}(\mathbf{x})$$

s. d.  $d(\mathbf{x}) \leq 200 \text{ mm}$

$$0.5 \text{ mm} \leq x_i \leq 3 \text{ mm}; \quad i = 1, \dots, 7$$

Um die maximale Intrusion der Säule genau genug aufzulösen, werden 20 gleichmäßig verteilte ESL-Zeiten von 5 bis 100 ms für beide Methoden gewählt. In Abbildung 3 (mittig und rechts) sind die Optimierungsverläufe für die Anfangswerte  $x_i^{(0)} = 0.8 \text{ mm}; i = 1, \dots, 7$  dargestellt. Die DiESL-Methode erfüllt die Konvergenzkriterien in wesentlich weniger Zyklen als die ESL-Methode. Außerdem ist hervorzuheben, dass das beste zulässige Design (Grüne Markierung, Abbildung 3, mittig) durch die ESL-Methode nicht am Ende der Optimierung gefunden wurde. Das bedeutet, dass die ESL-Methode gegen ein Design konvergiert ist, welches offensichtlich nicht dem Optimum entspricht. Die DiESL-Methode konvergiert gegen ein deutlich leichteres Design  $\text{mass}_{\text{DiESL}}^* = 15.50 \text{ kg}$  als die ESL-Methode  $\text{mass}_{\text{ESL}}^* = 18.75 \text{ kg}$ . Durch eine metamodelbasierte Optimierung mit radialen Basisfunktionen, die mit LS-Opt [26] durchgeführt wurde, konnte das DiESL-Ergebnis mit  $\text{mass}_{\text{LS-OPT}}^* = 15.50 \text{ kg}$  bestätigt werden. Dabei ist allerdings anzumerken, dass die Anzahl der für die metamodelbasierte Optimierung nötigen nichtlinearen Analysen, etwa 10-mal so hoch war wie bei der Verwendung der DiESL-Methode. Wie in Tabelle 1 zu sehen ist, sind die resultierenden Designs für DiESL und LS-Opt nicht identisch. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Einfluss von Design-Variable  $x_4$  und  $x_5$  auf die Masse  $\text{mass}(\mathbf{x})$  und die Intrusion  $d(\mathbf{x})$  wegen ihrer Position relativ zum Impaktor und der identischen Oberfläche, ähnlich ist.

Um den Einfluss der Anfangswerte  $x_i^{(0)}$  auf die aus den Optimierungsergebnissen gezogenen Schlussfolgerungen

Tabelle 1: Optimierungs-Ergebnisse für ESL, DiESL und LS-OPT (metamodel basierter Ansatz)

$x_1^*/\text{mm}$	$x_2^*/\text{mm}$	$x_3^*/\text{mm}$	$x_4^*/\text{mm}$	$x_5^*/\text{mm}$	$x_6^*/\text{mm}$	$x_7^*/\text{mm}$	$\text{mass}(\mathbf{x}^*)/\text{kg}$	Anzahl nichtlineare dynamische Analysen
0.513	0.707	0.5	1.172	2.703	2.95	0.511	18.75	33
0.5	0.5	0.5	2.9	2.68	0.5	0.5	15.50	12
0.5	0.5	0.5	2.63	3.0	0.5	0.69	15.50	131

zu reduzieren, wurde eine Multistart-Optimierung durchgeführt. Dafür wurde ein „Design of Experiments“ (DoE) erstellt und 20 Startwert-Konfigurationen von einheitlich verteilten Design-Variablen erzeugt (space filling design). Diese 20 Konfigurationen wurden als Startwerte für Optimierungen mit ESL, DiESL und LS-Opt verwendet. Tabelle 2 zeigt die gemittelten Ergebnisse für alle Konfigurationen. Die gemittelten Ergebnisse bestätigen die zuvor beschriebenen Schlussfolgerungen: Die DiESL-Methode liefert verglichen mit der ESL-Methode deutlich bessere Ergebnisse bei gleichzeitig geringerer Anzahl an nichtlinearen dynamischen Analysen.

Tabelle 2: Multistart Ergebnisse gemittelt über die Konfigurationen für ESL, DiESL und LS-OPT

Methode	gemittelte Anzahl nichtlinearer dynamischer Analysen	gemittelte Masse $\text{mass}^*/\text{kg}$
ESL	28.2	18.60
DiESL	13.35	15.67
LS-OPT	127.1	15.79

In Abbildung 4 werden für ein ausgewähltes Element die Dehnungen in x-Normalen Richtung einer nichtlinearen Analyse mit den Dehnungen der dazugehörigen Ersatzlastfälle bei Verwendung der ESL- und DiESL-Methode gegenübergestellt. Dabei wurden die Dehnungen nicht wie in Kapitel 4.2 beschrieben skaliert, da davon ausgegangen wird, dass die zeitliche Auflösung des Problems ausreichend fein ist. Es ist zu erkennen, dass die Dehnungen in DiESL deutlich besser mit denen der nichtlinearen Analyse übereinstimmen als die durch ESL berechneten.

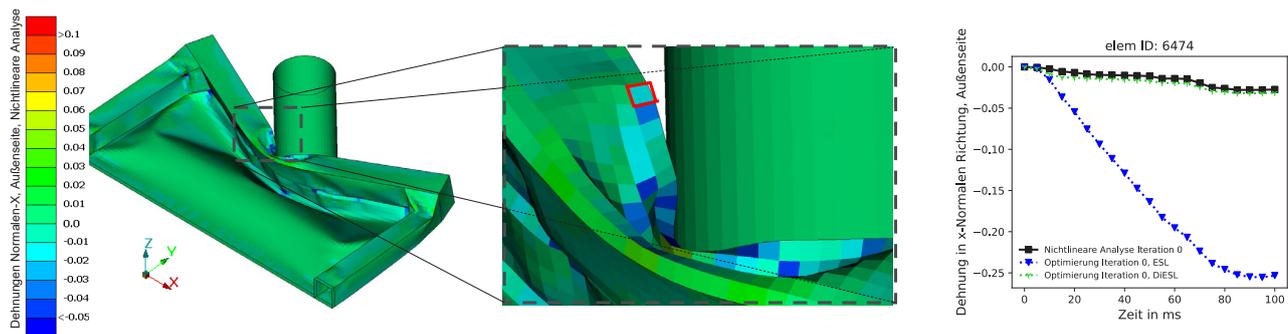


Abb. 4: Dehnung in x-Normalen Richtung aus einer nichtlinearen Analyse im Ausgangsdesign und Darstellung des untersuchten Elements (rot eingerahmt) zum Zeitpunkt  $t = 100 \text{ ms}$  (links) und Gegenüberstellung des zeitlichen Verlaufs der Dehnungen berechnet im linearen System mit der ESL und DiESL-Methode (rechts).

## 5 Fazit

Am Beispiel eines vereinfachten Seitenaufpralltests wurde die ESL-Methode der DiESL-Methode gegenübergestellt. Durch den Einsatz der DiESL-Methode konnte die zur Konvergenz benötigte Anzahl an Zyklen deutlich reduziert werden. Gleichzeitig liefert die DiESL-Methode ein deutlich leichteres Design als die ESL-Methode. Das DiESL-Optimum wurde durch eine metamodelbasierte Optimierung mit LS-Opt bestätigt, wobei die Anzahl der für die Optimierung nötigen nichtlinearen Analysen bei DiESL deutlich kleiner war. Da die Anzahl der nichtlinearen Analysen bei Verwendung der DiESL-Methode nicht direkt von der Anzahl der Designvariablen abhängt, könnte DiESL möglicherweise zur Topologie-Optimierung nichtlinearer dynamischer Probleme wie zum Beispiel Crash verwendet werden.

Außerdem wurde gezeigt, dass die wahren Dehnungen mit der DiESL-Methode deutlich besser approximiert werden können. Dadurch wird der Einsatz eines dehnungsbasierten Versagenskriteriums in der nichtlinearen dynamischen Strukturoptimierung ermöglicht.

Ein Nachteil der DiESL-Methode ist, dass sich die Elementqualität zeitlich fortgeschrittener LSMs bei großen Deformationen so weit verschlechtern kann, dass der lineare Solver bei der Berechnung der DiESLs mit einer Fehlermeldung abbricht. Für eine robuste Anwendung der DiESL-Methode wurde deswegen erfolgreich ein Mechanismus entwickelt, der solche Fehler automatisiert durch Entfernen der fehlerhaften Elemente behebt [27].

## 6 Anmerkungen

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Programms „under the Horizon 2020“ der Europäischen Union, (grant agreement number 723893)

## 7 Literatur

- [1] M. J. D. Powell, “The theory of radial basis function approximation in 1990,” *Adv. Numer. Anal.*, pp. 105–210, 1992.
- [2] R. Schaback and H. Wendland, “Characterization and construction of radial basis functions,” *Multivar. Approx. Appl.*, pp. 1–24, 2001.
- [3] R. Schaback, “Stability of radial basis function interpolants,” *Approx. Theory X Wavelets, Splines, Appl.*, pp. 433–440, 2002.
- [4] K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White, “Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives. Artificial Neural Networks: Approximations and Learning Theory,” *Neural networks*, vol. 3, no. 5, pp. 551–560.
- [5] K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White, *Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives*. Inc. Cambridge, Ma, USA: Blackwell, 1992.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Mitglieder erhalten unter anderem:**

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

**Werden auch Sie Mitglied !  
[www.nafems.org/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 to use the latest technology in the most efficient manner, ensuring your customers will always receive the most innovative and effective products possible.

## Membership Levels

	Entry	Standard	Corporate Select	Corporate Global
	Ideal for small companies and consultancies, or smaller analysis teams. Also appropriate in areas without a NAFEMS Regional Group.	The perfect level of membership for medium-sized organisations who are looking to get maximum benefit from their involvement.	Tailored for companies who need to share the benefits of membership across several teams and locations. Choose what you need, and where you need it.	Meeting the needs of large multi-national organisations. Covers every employee at every site in your organisation. A truly all-encompassing membership option.
Sites Covered	<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

**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

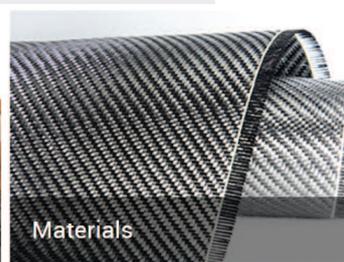
There are currently over 1,500 resources in the centre with this number growing weekly. NAFEMS Members have access to numerous types of resource as part of their membership, including presentations from previous events, conference papers, webinar archives, and much more.



Analysis Management



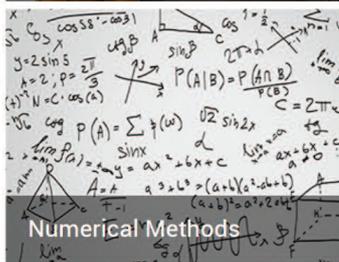
Industry & Products



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.**

Bitte per Post oder E-Mail an:  
[magazin@nafems.de](mailto:magazin@nafems.de)

Adresse für Fensterkuvert



NAFEMS Deutschland,  
 Österreich, Schweiz GmbH  
 Griesstr. 20  
 D-85567 Grafing b. München,  
 Germany

## Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (3/2020)

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

### Absender

Firma: \_\_\_\_\_  
 Abt.: \_\_\_\_\_  
 Titel, Vor-/Nachname: \_\_\_\_\_  
 Straße: \_\_\_\_\_  
 PLZ-Ort: \_\_\_\_\_  
 Tel.: \_\_\_\_\_  
 Fax: \_\_\_\_\_  
 e-mail: \_\_\_\_\_

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

Firma: \_\_\_\_\_  
 Abt.: \_\_\_\_\_  
 Titel, Vor-/Nachname: \_\_\_\_\_  
 Straße: \_\_\_\_\_  
 PLZ-Ort: \_\_\_\_\_  
 Tel.: \_\_\_\_\_  
 Fax: \_\_\_\_\_  
 e-mail: \_\_\_\_\_

