



# Online-Magazin

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

## Fachbeiträge

### MODELLERSTELLUNG

- Eine generische Programmstruktur zur automatisierten Durchführung von Simulationsschemata

### STRUKTURMECHANIK

- Effiziente und strukturierte Bewertung von allgemeinen Gewindeverbindungen mittels FEM auf Basis des örtlichen Konzepts
- Eine Raum-Zeit-Finite-Elemente-Methode für die Entleerung von Silos

### DATENMANAGEMENT

- Effiziente und vernetzte Produktentwicklung durch die Integration von Simulationsdatenmanagement (SDM) und Prüfstands-/Testdatenmanagement (TDM)

## NAFEMS WORLD CONGRESS

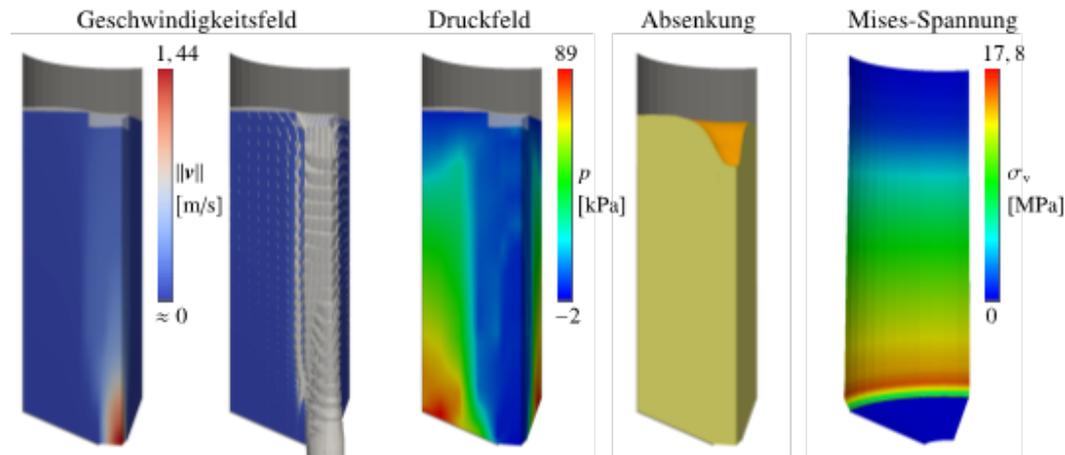
Achtung neuer Konferenztermin und neuer Abgabetermin für Abstracts!

**nwc 2021**  
**NAFEMS WORLD CONGRESS**  
 25-29 OCTOBER | SALZBURG | AUSTRIA  
 A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION

incorporating

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

Multiphysics Simulation Conference



Kernfluss – Zustandsgrößen zu Beginn der Entleerung eines Silos



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

Sponsoren dieser Ausgabe:

**BETA** SIMULATION SOLUTIONS  
**SIMULIA**  
**esi** get it right®  
**HEXAGON**  
**MSC Software**  
**CADFEM**  
**DYNA MORE**  
**INTES**

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

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

für den Begriff Intelligenz gibt es keine klar umrissene Definition. Man bezeichnet damit vor allem das Vermögen, die Gesamtheit unterschiedlich ausgeprägter kognitiver Fähigkeiten zur Lösung eines logischen, sprachlichen, mathematischen oder sinnorientierten Problems einzusetzen. Schon vor etwa 70 Jahren wurde zum ersten Mal auch von „künstlicher Intelligenz“ (KI) gesprochen, einer Vorstellung, die von ernsthaften Wissenschaftlern zumindest mit großer Skepsis bedacht, wenn nicht gar strikt abgelehnt wurde. Mit den damals vorhandenen Möglichkeiten der Datenverarbeitung war zudem nicht absehbar, dass jemals auch nur annähernd die Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns erreicht werden könnte. Auch heute noch kann niemand genau sagen, ob KI-Systeme jemals die Intelligenz des Menschen grundsätzlich übertreffen werden – und noch weniger, was dann passieren würde. Diejenigen Experten, die eine allgemeine KI für realisierbar halten, sind sehr unterschiedlicher Ansicht darüber, wann es soweit sein könnte. Große Fortschritte erzielt die künstliche Intelligenz in jüngster Zeit im Bereich künstlicher neuronaler Netze, auch unter dem Begriff Deep Learning bekannt. Dabei werden neuronale Netze, die grob von der Struktur des Gehirns inspiriert sind, künstlich auf dem Computer simuliert. Viele der jüngsten Erfolge wie bei Handschrifterkennung, Spracherkennung, Gesichtserkennung, autonomem Fahren oder maschineller Übersetzung beruhen auf dieser Technik. Hierbei treten in jedem Einzelfall ethische Probleme auf, die vorab untersucht und gelöst werden müssen. Das Herausgeber-Team des NAFEMS Online Magazin wird die Entwicklung auf dem Gebiet der KI weiterhin mit Interesse verfolgen und bei Gelegenheit relevante Artikel veröffentlichen.



*Prof. Dr.-Ing.  
Klaus Rohwer*

In diesem Heft finden Sie vier Fachbeiträge. Der erste Beitrag behandelt die automatische Modellerstellung, wobei der Schwerpunkt auf der Interaktion des Algorithmus mit Programmen und Bibliotheken liegt. Anhand einer abgeleiteten, konkreten Klasse wird gezeigt, wie sich Finite-Elemente Modelle von Tellerfedern innerhalb der Programmstruktur voll automatisiert erstellen lassen. Der zweite Beitrag bewertet allgemeine Gewindeverbindungen. Bei Anwendung auf Schraubverbindungen berücksichtigt das örtliche Konzept die geometrischen Details. Damit kann die Lebensdauer allgemeiner Verbindungen unter zyklischer Belastung bewertet werden. Der dritte Beitrag behandelt das Problem der Leerung von Silos und den damit verbundenen Schalenbeanspruchungen. Dazu wird ein Gesamtmodell vorgestellt, mit dem das Zusammenwirken der Verformung von Siloschalen mit dem Strömungszustand von Schüttgütern unter Berücksichtigung von deren innerer Reibung sowie der Wandreibung zwischen Schüttgut und Siloschale untersucht werden kann. Im vierten Beitrag wird schließlich darauf hingewiesen, dass sowohl für die numerische Simulation als auch für die Dokumentation von Versuchen ein adäquates Datenmanagement sinnvoll ist. Es werden Wege aufgezeigt, wie man die Daten der beiden Arbeitsfelder effizient miteinander verknüpfen kann.

Ich bin davon überzeugt, dass auch für Sie interessante und lehrreiche Beiträge dabei sind und wünsche Ihnen beim Lesen hilfreiche Erkenntnisse.

Mit freundlichen Grüßen

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

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



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



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



[www.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 World Congress 2021 - **Achtung neuer Termin!!!** .....7  
**NEU:** CFD-Methoden in der Entwicklung alternativer Antriebssysteme..8  
**NEU:** Integration von Simulation und Test in der Produktentwicklung ..9

**NAFEMS Student Award 2020-2021** ..... 10

**Analysis Agenda Survey**..... 15

**NAFEMS Trainings**  
 E-learning, Trainings und Events ..... 16  
 Verification and Validation in Engineering Simulation ..... 18  
 Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie.....20  
**NEU:** Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear .....21  
 Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation.....22  
**NEU:** The Complete Guide to Automatic Design Optimization ..... 23  
 Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis..... 24  
 Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung ..... 25

**NAFEMS Literatur**  
 Invitation 2 Tender / Benchmark Magazin ..... 26

**Neuigkeiten** .....29

**Veranstaltungskalender** ..... 35

**Fachbeiträge**

**Modellerstellung**  
**Eine generische Programmstruktur zur automatisierten Durchführung von Simulationsschemata**..... 36  
 M. B. Geilen, M. Klein, E. Sharma, M. Oechsner (TU Darmstadt)

**Strukturmechanik**  
**Effiziente und strukturierte Bewertung von allgemeinen Gewindeverbindungen mittels FEM auf Basis des örtlichen Konzepts**.....45  
 F. Schüssler, M. Strummer (ACAM Engineering)  
**Eine Raum-Zeit-Finite-Elemente-Methode für die Entleerung von Silos** ..... 54  
 S. Reinstädler (Cenit AG)

**Datenmanagement**  
**Effiziente und vernetzte Produktentwicklung durch die Integration von Simulationsdatenmanagement (SDM) und Prüfstands-/Testdatenmanagement (TDM)** ..... 65  
 D. Rensink, M. Krastel, J. Tetzlaff (:em engineering methods AG)

**Über NAFEMS**  
 Übersicht und Ziele ..... 78  
 Mitglied werden ..... 79  
 Mitgliedsmodelle ..... 80  
 Technische Arbeitsgruppen ..... 82  
 Veranstaltungen ..... 83  
 PSE - Professional Simulation Engineer Zertifizierung ..... 76/85  
 Training ..... 85  
 Resource Centre ..... 86  
 Publikationen..... 87

**Werbeanzeigen**  
 DYNAmore ..... 32  
 Microsoft..... 30  
 PSE - Professional Simulation Engineer Zertifizierung ..... 76  
 VMAP Projekt..... 11

**Rückmeldeformulare** ..... 88

**Impressum**

**Editor-in-Chief**

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

**Redaktioneller Beirat**

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

**Redaktion**

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

**Gestaltung / Layout / Anzeigen**

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

**Bezugspreis / Aboservice**

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

**Anzeigenpreise**

Preisliste vom 01.01.2020

**Verteilung / Bezug**

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

**Copyright © 2020, Werbos GbR.**

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

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

**ISSN 2311-522X**

## Konferenzen/Seminare in DACH

### CFD-Methoden in der Entwicklung alternativer Antriebssysteme

Spezielle neue Herausforderungen bei der Berechnung von E-Motoren, Batterien, Brennstoffzellen, Leistungselektronik uvm.  
www.nafems.org/simtest21

14. - 15. Juni 2021

Online-Interaktiv

### Integration von Simulation und Test in der Produktentwicklung

www.nafems.org/simtest21

16. - 17. Juni 2021

Online-Interaktiv



www.nafems.org/congress

25. - 29. Oktober 2021 Salzburg/Hybrid

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

## Schulungen in DACH

### Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation

2-tägig, Webex  
www.nafems.org/fem21-1

10. -11. März 2021

Online

### The Complete Guide to Automatic Design Optimization

2-tägig, Webex  
www.nafems.org/opt21-1

15. - 16. März 2021

Online

### Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie

2-tägig, Webex  
www.nafems.org/fkm21-1

17. - 18. März 2021

Online

### Verification and Validation in Engineering Simulation

2,5-tägig, Webex  
www.nafems.org/vandv21-1

23. - 25. März 2021

Online

### NEU: Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear

2-tägig, Webex  
www.nafems.org/fkm-nonlin21-1

30. Juni - 1. Juli 2021

Online

### Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

www.nafems.org

Auf Anfrage

Online

### Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis

www.nafems.org

Auf Anfrage

Online

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



**nwc** 2021  
NAFEMSWORLDCONGRESS

25-29 OCTOBER | SALZBURG | AUSTRIA

A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION

THE FIRST HYBRID NAFEMS WORLD CONGRESS

New conference dates!



incorporating

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



**You've spoken - We've listened.  
NAFEMS World Congress 2021**

**- Now taking place 25 - 29 October 2021 -**

A few weeks ago, we asked everyone in the engineering analysis community how they felt about our plans for next years NAFEMS World Congress. The message is clear - more people are confident they can take part if the Congress takes place later in the year.

**So, we've made that change.**

**The NAFEMS World Congress 2021 (NWC21) incorporating the Int. SPDM Conference and the Int. Multiphysics Simulation Conference will now take place October 25th-29th 2021 in Salzburg, Austria.**

This will be the first hybrid NAFEMS World Congress, available to attend online from around the globe, as well as on-site in Salzburg.

By moving the date to later in 2021, we are confident that the in-person aspect of the event will be much more significant and accessible. No-one can predict the future, but with recent announcements and advances in the fight against COVID-19, we want to give you the best opportunity to be part of this flagship international event.



**nwe** 2021  
NAFEMSWORLD CONGRESS

25-29 OCTOBER | SALZBURG | AUSTRIA

A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION

THE FIRST HYBRID NAFEMS WORLD CONGRESS

**New abstract submission  
deadline: 16 April 2021**



## Call for Abstracts

We already have a significant number of abstracts submitted for the Congress. As the dates have shifted, there is now even more time to get your abstract in and be a part of this ground-breaking event. The **abstract deadline is now April 16th 2021**, although you can submit at any time before then.

We're looking for abstracts covering every aspect on engineering modelling, analysis & simulation. If you think it's relevant, it probably is. We have put together an extensive list of relevant topics, but even this is not exhaustive. Take a look at [nafems.org/congress](http://nafems.org/congress)

Abstracts for both the 5<sup>th</sup> International SPDM Conference, and the International Multiphysics Simulation Conference, should be submitted using the same process.

**This is your Congress, and this is your community.**

We thank you for your support so far, and we sincerely hope you consider being a part of what we now hope to be a significantly stronger and larger event.

## Sponsorship & Exhibition

There are a number of packages available to you, each tailored to focus on your own objectives. All packages are hybrid, combining the live, in-person exhibition, with the online experience.

Find out more at [nafems.org/congress](http://nafems.org/congress)



## NAFEMS Seminar

# CFD-Methoden in der Entwicklung alternativer Antriebssysteme

**Abstracteinreichungen  
bitte bis 26. März 2021**

Spezielle neue Herausforderungen bei der Berechnung von E-Motoren, Batterien, Brennstoffzellen, Leistungselektronik uvm.

14. - 15. Juni 2021, Online-Interaktiv

Alternative Antriebskonzepte gewinnen heute zunehmend an Bedeutung. Die Abkehr von fossilen Brennstoffen ist ein Trend, der weit über die Automobilbranche hinaus geht. Die Auslegung von Batterien, Brennstoffzellen aber auch Elektromotoren und kompakter Leistungselektronik sind Themenfelder, die für viele der betroffenen Anbieter neu sind. Die geringere Erfahrung und der hohe Innovationsdruck machen einen verstärkten Einsatz von Simulation hier unverzichtbar.

CFD-Simulation deckt heute weit mehr als reine Strömungen ab und kann bei vielen dieser Anforderungen helfen: Von der Thermalauslegung der immer kompakter werdenden Komponenten bis zur Simulation mehrphasiger oder chemischer Vorgänge in Batterien oder Brennstoffzellen ist CFD bei der virtuellen Produktauslegung integraler Bestandteil. Auch die dabei auftretende Herausforderung unterschiedlicher Größen- und Zeitskalen kann heute durch gekoppelte Simulationen bewältigt werden.

Mangels Erfahrung sind Aspekte wie Lebensdauer oder sicherheitsrelevante Anforderungen ohne Simulation kaum einschätzbar und stellen bei innovativen Produkten ein hohes Risiko dar, dass durch Simulation kosteneffizient begrenzt werden kann.

Wir freuen uns über Ihre Beiträge zu diesem spannenden Thema. Dabei sind Beiträge zu Anwendungen von CFD für unterschiedliche Antriebskonzepte, Modellierung unterschiedlicher physikalischer Phänomene (Strömung, magnetische, thermische, elektrochemische Effekte, usw.) als auch gekoppelter Fragestellungen (auf unterschiedlichen Skalen) willkommen.

Wir freuen uns über Ihre Abstracteinreichung bis spätestens 26. März 2021 an [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de).

Ihr NAFEMS CFD Advisory Board (CAB)

## Organisation

### Teilnahmegebühren

Nicht-Mitglieder: Euro 380,- pP  
NAFEMS-Mitglieder: frei\*

\* NAFEMS Mitglieder erhalten sog. „seminar credits“ pro Jahr. Für dieses Seminar werden zwei credits je Teilnehmer benötigt.

Falls bereits verwendet, können NAFEMS Mitglieder zu einem reduzierten Preis teilnehmen: Euro 230,- pP  
Vortragende entrichten die reguläre Teilnahmegebühr.

### Teilnahmegebühr für Studenten

Für Studenten steht ein begrenzte Anzahl an freien Seminarplätzen zur Verfügung. Die Annahme erfolgt in der Reihenfolge der Anmeldungen und setzt die Bereitschaft zur Mithilfe bei der Organisation vor Ort voraus - bitte Immatrikulationsbescheinigung beifügen.

### Kosten für Stornierung

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

Ersatzteilnehmer können gestellt werden. Die Stornierung muß schriftlich erfolgen.

### Tagungssprache

Deutsch (in Ausnahmen in englischer Sprache)

### Virtuelle Fachausstellung und Sponsoring

Bitte fordern Sie Unterlagen an.

Alle Preis zzgl. ges. MwSt.

## Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/cfd21](http://www.nafems.org/cfd21)

## NAFEMS Seminar

# Integration von Simulation und Test in der Produktentwicklung

14. - 15. Juni 2021, Online-Interaktiv

**Abstracteinreichungen  
bitte bis 26. März 2021**

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

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

- > Wie qualifizieren und ergänzen sich beide Seiten gegenseitig?
- > Wie und womit sollen der Informationsfluss und der Datenfluss auf verschiedenen Ebenen und die Dokumentation erfolgen?
- > Wie sehen produktspezifische Workflows aus (welche Elemente haben diese), die Simulation und physische Tests auf verschiedenen Produktebenen verbinden?
- > Welche Rolle spielen in diesem Zusammenhang Testmanagement-Systeme?
- > Wie müssen Datenablagen mit

den Workflows verzahnt sein, damit Anforderungen und Tasks in Test und Simulation abgesichert und für alle Rollen im Unternehmen verknüpft und transparent sind?

- > Wie gestaltet sich das Zusammenspiel zwischen Simulation und Versuch bei der Absicherung und dem Zuverlässigkeitsnachweis mechatronischer Systeme?
- > Können Prozess-Reifgradmessung, wie z. B. Automotive SPI-CE, sinnvolle Aussagen zum richtigen Zusammenspiel zwischen Simulation und Versuch liefern?

... sollen Denkanstöße geben, aber keinesfalls inhaltlich begrenzen; Fragen, deren Diskussion und Beantwortung uns näher an die optimale Einbindung von Simulation und Versuch in den Produktentwicklungsprozess bringen soll. Dazu erwarten wir Beiträge aus der industriellen Praxis und der Forschung sowie der Ausbildung und Qualifizierung der Ingenieure. Für das Seminar sind auch Beiträge erwünscht, die zeigen, wie Regelwerke, Standards, etc. das Zusammenwirken von Simulation und Test unterstützen. Ebenso von Interesse ist es, wie der Prozess in PDL-Systemen organisiert bzw. unterstützt wird. Natürlich sind Best-Practice-Beispiele aus dem Zusammenwirken von Test und Simulation sehr erwünscht. Ein nicht unbedeutender Teilaspekt ist, wie weit Fragen der Produkthaftung eine wesentliche Rolle spielen. Gerne würden wir im Seminar auch diskutieren, welche Anforderungen sich für die akademische Ausbildung unseres Ingenieur Nachwuchses aus der Symbiose von Test und Simulation ergeben.

Diese hier nur angedeutete Vielfalt, der zu bedenkenden Probleme

und neuen Möglichkeiten macht es dem Anwender oft schwer, die richtigen Entscheidungen zu treffen. Fehlentscheidungen können aber zu erheblichen Zeitverlusten und kostenintensiven Nachbesserungen führen. Mit dem Seminar will NAFEMS dazu beitragen, sicherer und effizienter mit den vorhandenen Werkzeugen umzugehen und auf Trends und wichtige Entwicklungen eingehen. Ziel ist es, den aktuellen Stand der Technik und Trends zu diskutieren und einen offenen Dialog von Anwendern, Forschern und Lösungsanbietern zu fördern. Abgerundet wird die Veranstaltung durch eine Ausstellung von Anbietern auf dem Gebiet von Simulation und Test, die einen Überblick über verfügbare kommerzielle Lösungen geben.

Wir freuen uns über Ihre Abstracteinreichung bis spätestens 26. März 2021 an [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de).

Ihre NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH

Technische Leitung:

- > Prof. Dr.-Ing. Manfred Zehn  
TU Berlin Vice Chairman of NAFEMS
- > Dipl.-Ing. Gerhard Göß  
Schaeffler Technologies AG & Co. KG Mitglied SC NAFEMS DACH
- > Dipl.-Ing. Jens Krämer  
Festo AG & Co. KG Mitglied SC NAFEMS DACH Organisation

## Organisation

Identisch zum CFD-Seminar auf Seite 8.

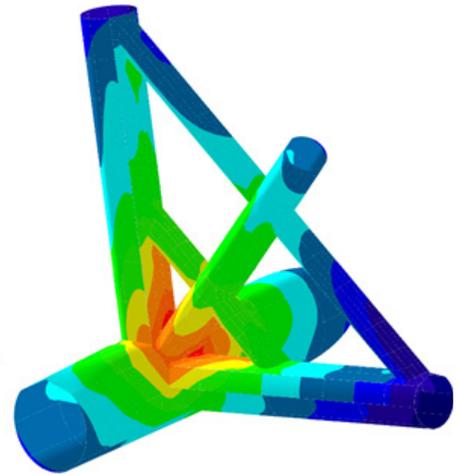
**Informationen und Anmeldung**  
[www.nafems.org/simtest21](http://www.nafems.org/simtest21)

# NAFEMS DACH Student Award 2020-2021

## Auszeichnung für hervorragende studentische Arbeiten: Berechnung und Simulation im Bereich der Ingenieurwissenschaften

Auch in diesem Jahr wird NAFEMS den Studierendenwettbewerb starten, um begabte Studierende zu fördern und für eine weitere Tätigkeit auf dem Gebiet der Berechnung und Simulation im Bereich der Ingenieurwissenschaften zu motivieren. Damit wird gleichzeitig auch die Bedeutung der akademischen Institutionen für die Weiterentwicklung der numerischen Simulation in Lehre und Forschung gewürdigt.

Die Auszeichnung richtet sich an Studierende, die Abschlussarbeiten (Bachelorarbeit, Masterarbeit, u. ä.) im Bereich Berechnung und Simulation (z. B. Strukturfestigkeit und -dynamik, Strömung, Optimierung, Elektromagnetismus, etc.) in einem Gebiet der Ingenieurwissenschaften angefertigt haben.



**Abgabetermin: 26. März 2021**

### 1. Preis: 1.000 Euro\*

\* Preisgeld mit freundlicher Unterstützung der Mvoid Group ([www.mvoid-group.com](http://www.mvoid-group.com))

Der NAFEMS Student Award wird in verschiedenen NAFEMS Regionen ausgeschrieben. Aus den Siegern der Regionen wird wiederum ein Gesamtgewinner ausgewählt, der dann kostenlos am NAFEMS World Congress 2021 teilnimmt und die Arbeit einem internationalen Fachpublikum präsentiert ([www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress)).

Informationen zur Online-Einreichung sowie Teilnahmebedingungen finden Sie in Kürze unter: [www.nafems.org/professional-development/student-awards/dach/](http://www.nafems.org/professional-development/student-awards/dach/)



# 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.

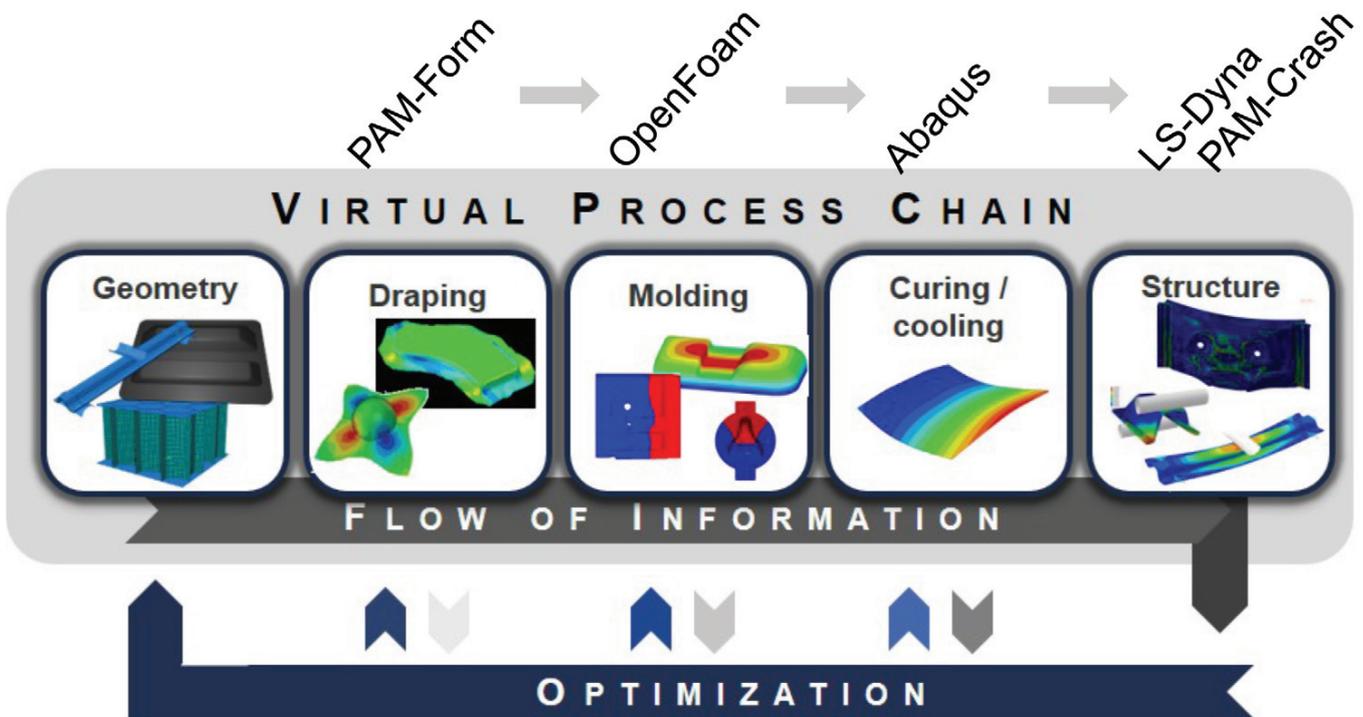
Implementations are under development for ANSYS Mechanical, Autodesk FUSION 360Platform and Forge (Transvalor).

*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?

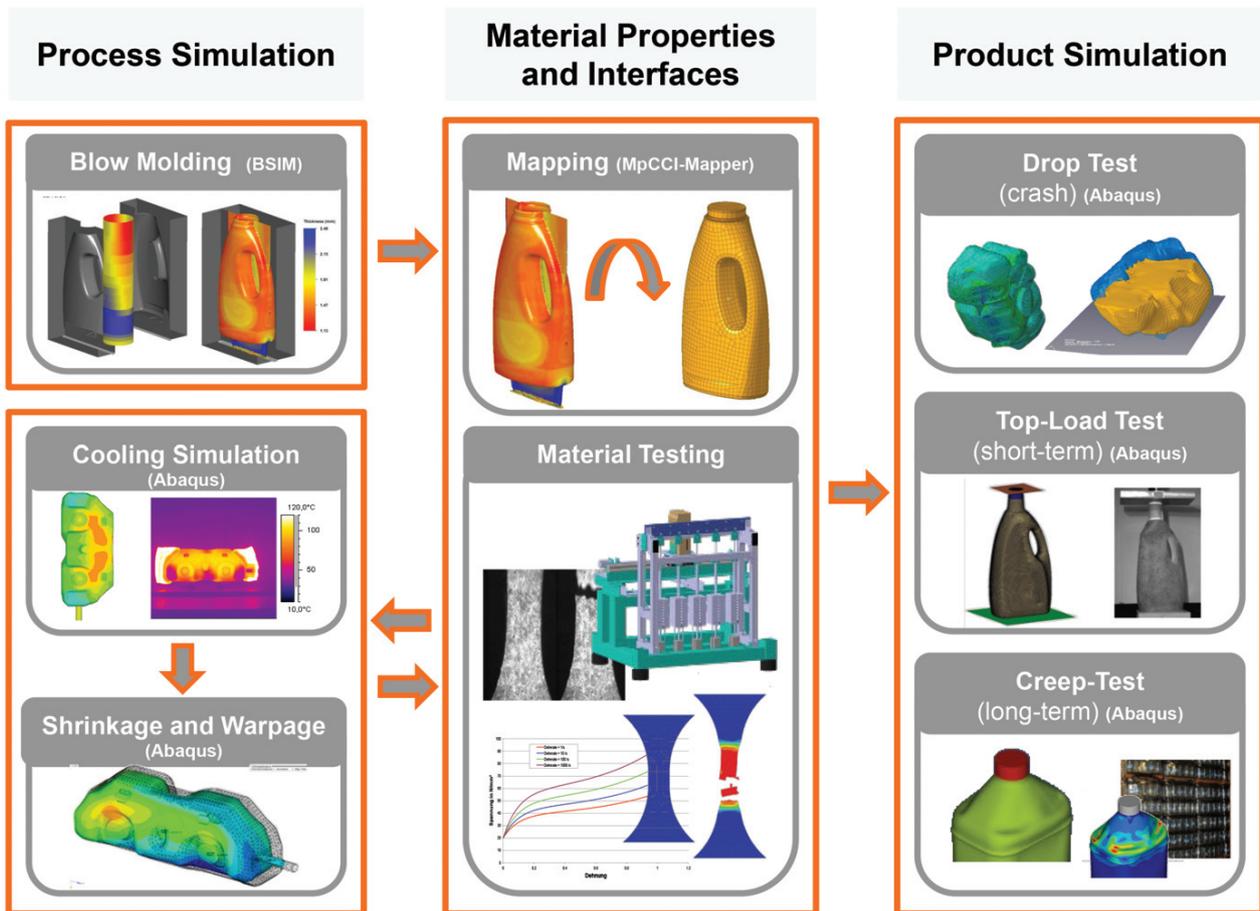
## Difficult material data transfer?

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).



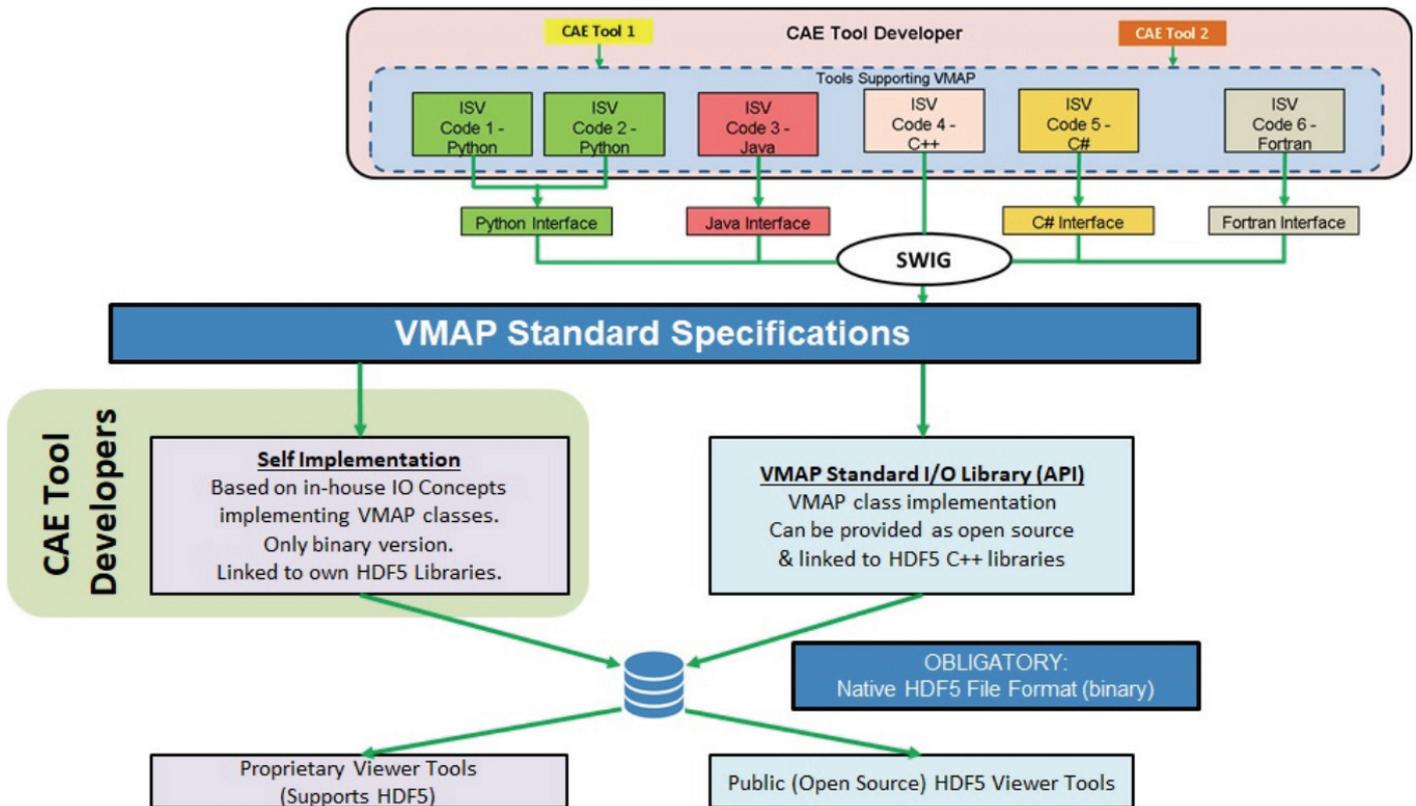
## VMAP help for software developers

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 \(itea3.org/project/vmap.html\)](https://itea3.org/project/vmap.html). The project period is from October 2017 to September 2020

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

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

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





**THE** nafems.org/agenda  
**ANALYSIS**  
**AGENDA**

**What Next for Engineering Simulation?**

**GET INVOLVED IN SETTING THE AGENDA.**  
**SURVEY NOW LIVE AT 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**

# learn from anywhere.... always

FEA & CFD online training that suits how you work



## e-LEARNING

03 Nov 2020	Introduction to Dynamics using FEA
06 Nov 2020	Basic Finite Element Analysis
11 Nov 2020	Elements of Turbulence Modeling
12 Nov 2020	Structural Optimization in FEA
23 Nov 2020	10 Steps to Successful Explicit Dynamic Analysis
02 Dec 2020	CFD for Structural Designers & Analysts
15 Dec 2020	Advanced Dynamic FEA
17 Dec 2020	Practical Modelling of Joints and Connections
07 Jan 2021	Non-Linear FEA
08 Jan 2021	Composite Finite Element Analysis
13 Jan 2021	Introduction to Practical CFD
19 Jan 2021	Fatigue & Fracture Mechanics in FEA

work  
home  
anywhere

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>14</b> Dec 2020</p> <p>Optimisation Community - Bayesian Optimisation for Multi-concept, Multi-task and Robust</p> <p style="text-align: right;">WebEx, Online</p> <p>Technical Community Event</p>	<p><b>22</b> Jan 2021</p> <p>Diversity &amp; Inclusion in Engineering - Turning Words into Actions</p> <p style="text-align: right;">Webex, Online</p> <p>Webinar</p>	<p><b>26</b> Jan 2021</p> <p>Multiphysics Community - Multiphysics for Electric Motors</p> <p style="text-align: right;">WebEx, Online</p> <p>Technical Community Event</p>
<p><b>2</b> Feb 2021</p> <p>Simulation in the Automotive Industry: Creating the Next Generation Vehicle 2021</p> <p style="text-align: right;">ON24, Online</p> <p>Seminar</p>	<p><b>10</b> Feb 2021</p> <p>Welding Simulation – How Much Validation is Enough?</p> <p style="text-align: right;">Webex, Online</p> <p>Seminar</p>	<p><b>23</b> Feb 2021</p> <p>Optimisation Community Event</p> <p style="text-align: right;">WebEx, Online</p> <p>Technical Community Event</p>
<p><b>4</b> Mar 2021</p> <p>Role of Engineering Simulation within Digital Transformation</p> <p style="text-align: right;">ON24, Online</p> <p>Seminar</p>	<p><b>15</b> Mar 2021</p> <p>Online-Course: The Complete Guide to Automatic Design Optimization</p> <p style="text-align: right;">Online, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>17</b> Mar 2021</p> <p>Online-Kurs: Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie</p> <p style="text-align: right;">Online, Online</p> <p>Training Course</p>
<p><b>23</b> Mar 2021</p> <p>Online-Course: Verification and Validation in Engineering Simulation</p> <p style="text-align: right;">Online, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>23</b> Mar 2021</p> <p>Physics-Based Digital Twins</p> <p style="text-align: right;">Online, Online</p> <p>Seminar</p>	<p><b>23</b> Mar 2021</p> <p>AI, Data Driven Models &amp; Machine Learning: How Will Advanced Technologies Shape Future Simulation...</p> <p style="text-align: right;">ON24, Online</p> <p>Seminar</p>
<p><b>1</b> Apr 2021</p> <p>Online-Kurs: Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</p> <p style="text-align: right;">Online, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>14</b> Jun 2021</p> <p>CFD-Methoden in der Entwicklung alternativer Antriebssysteme</p> <p style="text-align: right;">Online, Online</p> <p>Seminar</p>	<p><b>16</b> Jun 2021</p> <p>Integration von Simulation und Test in der Produktentwicklung</p> <p style="text-align: right;">Online, Online</p> <p>Seminar</p>
<p><b>30</b> Jun 2021</p> <p>Online-Kurs: Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear</p> <p style="text-align: right;">Online, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>25</b> Oct 2021</p> <p>SPDM-International Conference on Simulation Process &amp; Data Management</p> <p style="text-align: right;">Salzburg, Austria</p> <p>User Conference</p>	<p><b>25</b> Oct 2021</p> <p>NAFEMS World Congress 2021</p> <p style="text-align: right;">Salzburg, Austria</p> <p>World Congress</p>
<p><b>26</b> Oct 2021</p> <p>Multiphysics Simulation Conference</p> <p style="text-align: right;">Salzburg, Austria</p> <p>User Conference</p>		

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

## NAFEMS Schulung

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

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

23. - 25. März 2021, online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Engineering simulation plays an increasing role in industry's search for competitiveness and technology based innovation at every stage of the design, qualification and certification of products. Key decisions and product qualification/certification increasingly rely on virtual tests and digital simulation, creating a major paradigm shift in which the objective of physical tests is progressively moving from a demonstration of compliance to a reference for analysis validation. This trend in industry is shown through adoption of new terms such as 'realistic simulation' and 'virtual testing'. This situation creates new responsibility for the engineer to guarantee the required confidence level.

This new approach requires secured processes for the verification and validation of models and analyses bringing evidence of their predictive capability. In particular, programme managers now require formal evidence on "simulation fit for purpose" on which they can build confidence and take decisions. In addition, the increasing situation for extended enterprise creates new constraints to guarantee safe and robust analysis processes.

At the same time, and due to the economic pressure, V&V activities are frequently seen as an additional cost that can easily be reduced or even fully cut, thus underestimating the induced risks. In addition, V&V is not easy to implement because of the diversity of involved persons: managers, simulation experts, test specialists, software developers and quality controllers, software vendors...

### The Course

#### Participants of this master class will:

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

### Who Should Attend?

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

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

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

### Program

#### Introduction

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

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

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

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

**V&V and Simulation Management**

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

**Realistic Simulation**

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

**V&V Fundamentals and Standards**

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

**Verification**

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

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

**Uncertainty Quantification**

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

**V&V Implementation Strategies**

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

**Course Language**

Englisch

**Tutors**



Jean-Francois Imbert

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



Philippe Pasquet

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

**Informationen und Anmeldung**

[www.nafems.org/vandv21-1](http://www.nafems.org/vandv21-1)

## NAFEMS Schulung

# Festigkeitsnachweis in die FKM-Richtlinie

17. - 18. März 2021 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, ist ein vom Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) entwickelter Standard für einen statischen und zyklischen Festigkeitsnachweis. Durch die breite Anwendbarkeit hat der Festigkeitsnachweis eine hohe Verbreitung im Maschinenbau und anderen Branchen gefunden. In diesem Seminar lernen Sie den richtlinienkonformen Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen sowohl für nichtgeschweißte als auch für geschweißte Bauteile kennen. Neben der Theorie des Nachweises steht dabei auch die praktische Anwendung der 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/fkm21-1](http://www.nafems.org/fkm21-1)

Theorie zum statischen Festigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

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

Beispiel „Getriebegehäuse“ zum statischen Nachweis

- > Auswahl der Nachweispunkte für manuelle Berechnung
- > Programmgestützte Berechnung
- Vertiefung zum statischen Nachweis - Plastische Formzahl

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

Theorie zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile

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

Beispielrechnung „Getriebegehäuse“ zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis

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

Einführung in die Spannungskonzepte für die Schweißnahtbewertung

- > Nennspannungskonzept
- > Strukturspannungskonzept
- > Kerbspannungskonzept

- > Modellierung für Kerbspannungskonzept

Theorie Statischer Nachweis für geschweißte Bauteile

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

Beispiele zum statischen Nachweis geschweißter Bauteile

- > Strukturspannungsnachweis
- > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis

Theorie Ermüdungsnachweis für geschweißte Bauteile

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

Beispiele zum Ermüdungsnachweis geschweißter Bauteile

- > Strukturspannungsnachweis
- > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis

### Referent

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

## NAFEMS Schulung

# Festigkeitsnachweis in die FKM-Richtlinie Nichtlinear

NEU

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

Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens

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

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

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

#### Zielgruppe:

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

#### Ihr Nutzen:

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

#### Referent

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

**Informationen und Anmeldung**  
[www.nafems.org/fkm-nonlin21-1](http://www.nafems.org/fkm-nonlin21-1)

# Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation

10. - 11. März 2021 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

### Inhalte

- Einführung, Grundbegriffe und Prinzipien
  - Freiheitsgrade / Lagerung / Freischneiden / Gleichgewichtsbetrachtung
  - Innere Kräfte / Beanspruchung / Schnittgrößen
  - Spannungszustände / Hauptspannungen
- Typische Beanspruchungsfälle
- Werkstoffparameter / Versagenshypothesen / Sicherheitsfaktor
- Wechsel- und Dauerfestigkeit, Ermüdung und Kerbwirkung

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

### Referent



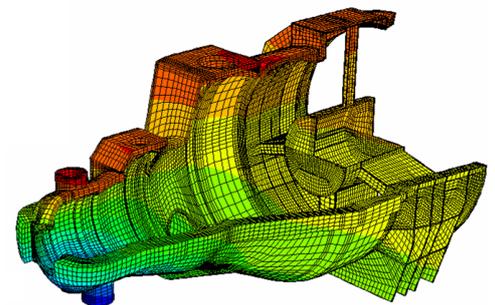
*Prof. Dr.-Ing. Armin Huß verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Technischen Mechanik, Technischen Schwingungslehre und der Anwendung der Finiten Elemente Methode, davon über 20 Jahre Praxis-Erfahrung als freiberuflicher Ingenieur für die Anwendung der FEM in den unterschiedlichsten Bereichen der Technik. Seit Mitte 2009 ist er als Professor für Technische Mechanik, Schwingungslehre und Finite Elemente an der Frankfurt University of Applied Sciences tätig.*

### Kurssprache

Deutsch

### Inhouse-Kurs

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



### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/fem21-1](http://www.nafems.org/fem21-1)

## The Complete Guide to Automatic Design Optimization

15. - 16. März 2021 online (Webex)/ auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

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

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

Interaction is encouraged throughout the course. Questions and

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

### Who should attend

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

### Course Program

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

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

### Tutor

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



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

### Course Language

English

### Inhouse-Kurs

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

### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/opt21-1](http://www.nafems.org/opt21-1)

## 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**

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

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

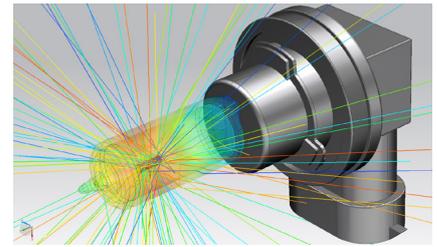
Die Schulung vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung (CFD). Neben der Funktionsweise von Programmen, die anhand zahlreicher einfacher Beispiele erläutert wird, steht die Vermittlung des gesamten Lösungsprozesses im Vordergrund. Mit Hilfe von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

**Inhalte**

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

Problemen / Fehlerquellen beim Lösungsprozess

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



**Referent**



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

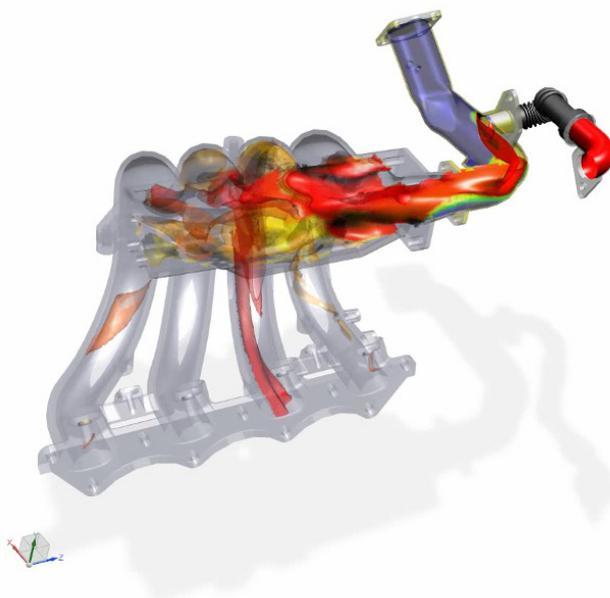
*der Strömungsberechnung CFD in Lehre, Forschung und Industrie. Herr Kohnen leitet den Bereich Maschinenbau und Virtual Engineering an der Hochschule Baden-Württemberg Mosbach.*

**Kurssprache**

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

**Inhouse-Kurs**

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



# 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)

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

## 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 October 2020

Die internationale NAFEMS Zeitschrift „Benchmark“ erschien zuletzt im Oktober 2020.  
Download für Mitglieder und Abonnenten sowie Informationen zum Abonnement finden Sie unter:

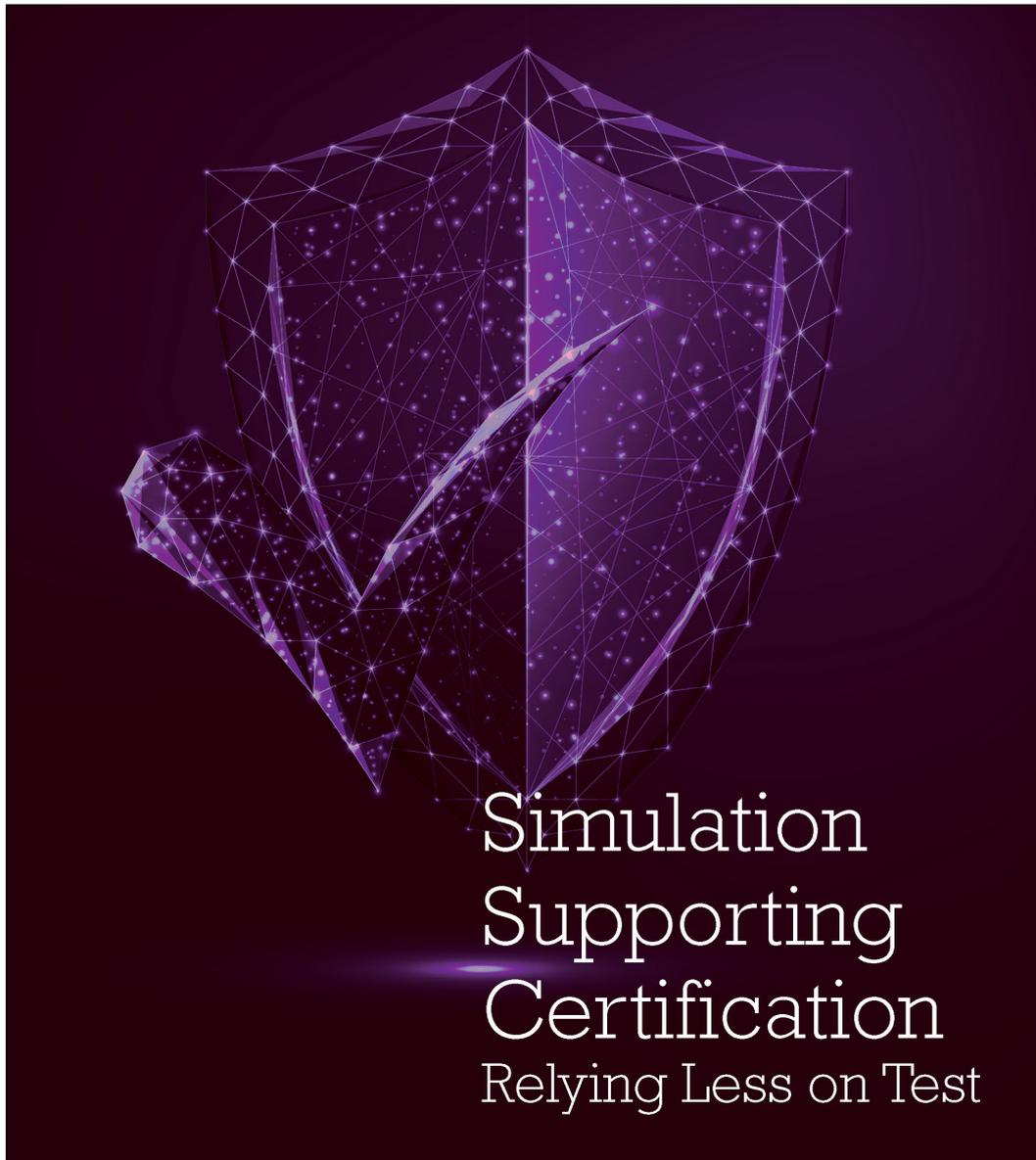
[www.nafems.org/publications/benchmark](http://www.nafems.org/publications/benchmark)

# BENCH MARK

October 2020 issue . . .

- Simulation Supporting Certification – NAFEMS View
- Virtual Testing For Certification
- The use of CFD to Support COMAH and SEVESO Safety Reports
- The First Hybrid NAFEMS World Congress
- Designer Oriented Software - Is it Accurate? Part 2
- Towards a Virtual Nuclear Reactor
- Ahead of the Curve

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



## ADDITIVE WORKS

### Neue Amphyon Version 2021 enthält neues Thermal Adaptation Modul

Additive Works, führender Anbieter von hochgradig praktikablen Lösungen für die additive Fertigung, hat Amphyon 2021, die neueste Version der simulationsbasierten Prozesssoftware für das additive Fertigungsverfahren des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens (LBM), veröffentlicht. Die Version 2021 enthält neben anderen wichtigen Erweiterungen das neue Thermal Adaptation Modul für die Prozessvorbereitung, basierend auf thermischen Simulationsdaten des LBM-Prozesses.

Das Thermal Adaptation Modul ermöglicht es Anwendern, Probleme zu lösen, die durch Überhitzungen während des LBM-Prozesses verursacht werden, indem die Schichtzeiten angepasst werden. Da dies normalerweise durch die Verwendung fester Mindestschichtzeiten, die den gesamten Prozess verlangsamen, vermieden wird, wird die Prozessdauer durch den Einsatz von Simulation zur Berechnung der individuellen Wartezeiten pro Schicht erheblich verkürzt. Selbst bei komplexen Applikationen können Ingenieure die richtigen Schichtzeiten mühelos ableiten, um reproduzierbare Formen und Materialeigenschaften für verschiedenste Setups und Nestings von Aufbauprozessen zu erhalten. Beim pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen wird Metallpulver durch selektives Schmelzen von Querschnitten einer Geometrie zu Schichten verfestigt. Für die Komponentenerstellung werden Schichten auf den vorherigen Schichten hinzugefügt. Abhängig von der Geometrie, des Nestings, den Prozessparametern und weiteren Eingabegrößen einer Applikation, können die Temperaturen mit der Bauteilhöhe deutlich ansteigen, was zu unzureichender Bauteilqualität führt. Insbesondere für Multi-Laser- und große Anlagen, die innerhalb kurzer Zeit eine enorme Energiemenge in ein Werkstück einbringen, ist dies problematisch. Aber was ist der geeignete Temperaturbereich

und wie lange müssen Sie warten, um bekannte Probleme zu vermeiden, ohne den Prozess unnötig zu verlangsamen?

Die Antworten auf diese Fragen können jetzt mit dem neuen Thermal Adaptation Modul gefunden werden, das Amphyon, der Lösung von Additive Works für simulationsbasierte Prozessvorbereitung, hinzugefügt wurde. Mithilfe von Amphyons thermischer Simulations- und Optimierungsfähigkeiten kann vor Simulationsbeginn eine Zieltemperatur angegeben werden. Auf der Grundlage dieser Zieltemperatur werden die Aufbauraten automatisch angepasst. Dadurch wird in allen Komponenten verhindert, dass die Zieltemperatur überschritten wird. Durch die Verwendung eines virtuellen physik-basierten Ansatzes anstelle von trial-and-error, können die Wartezeiten für jede einzelne Schicht genau bestimmt werden. Daher entspricht die zusätzliche Zeit für jede Schicht der Zeit, die benötigt wird, um auf die Zieltemperatur abzukühlen. Für Schichten, bei denen keine Überhitzung beobachtet wird (z. B. in der Nähe der Basisplatte), wird natürlich keine zusätzliche Zeit hinzugefügt.

„Zusätzlich zu den vielen anderen Erweiterungen von Amphyon 2021, wie einer verbesserten Materialhandhabung, ist das neue Thermal Adaptation Modul ein Gamechanger“, sagt Dr. Hongxiao Xu, CTO, Additive Works. „Die Gewährleistung thermisch stabiler LPBF-Prozesse, ohne die Fertigungsdauer durch eine feste Mindestschichtzeit extrem zu verlängern, wird die Grenzen von AM-Anwendungen erweitern.“

Für dünne Bauteile mit massiven Ausführungen in den oberen Abschnitten wird der Vorteil dieser Herangehensweise schnell deutlich. Wird ein solches Bauteil in einem Aufbauprozess, der 21 Stunden für den Druck braucht, auf 700°C aufgeheizt, und die Mindestschichtzeiten sollen für alle Schichten eine Temperatur von unter 250°C gewährleisten, resultiert dies in einem etwa 10 Tage andauernden Aufbauprozess. Mithilfe des neuen simulationsbasierten Ansatzes

kann das Bauteil innerhalb von 2,5 Tagen mit dem gleichen Ergebnis gedruckt werden. Obwohl die Dauer des ursprünglichen Prozesses mehr als verdoppelt wurde, hat sich die Zeitspanne, um eine Komponente mit optimaler Qualität zu erhalten, um den Faktor 4 verkürzt.

[www.additive.works](http://www.additive.works)

## ALTAIR

### Altair Inspire Mold revolutioniert das Spritzgießen

Altair stellt Altair Inspire Mold, eine revolutionäre End-to-End Lösung für Spritzgussimulation, vor. Inspire Mold bringt damit erstmalig Altairs Kernphilosophie, das simulationsgetriebene Design und die Demokratisierung der Simulation, in diesen 250 Milliarden Dollar schweren Fertigungssektor. Spritzgegossene Kunststoffkomponenten spielen in einer Vielzahl von Anwendungen eine entscheidende Rolle, von Spielzeug und Unterhaltungselektronik bis hin zu hochleistungsfähigen, lasttragenden Komponenten in Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt und der Automobilindustrie.

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

## BETA CAE Systems

### Neue Versionen

Beta CAE Systems veröffentlichte kürzlich die neue Version 21.0.1 der ANSA, Epilysis, META und Komvos software suite.

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

## COMSOL

### Comsol veröffentlicht Version 5.6

Comsol, Anbieter von Softwarelösungen für Multiphysik-Modellierung, Simulation und App-Design und -Bereitstellung, hat Version 5.6 der Comsol Multiphysics-Software veröffentlicht. Die neue Version bietet schnellere und speicherschonendere Löser für Multicore- und Cluster-Berechnungen, eine effizientere Handhabung von CAD-Baugruppen



## Azure HPC

Unlock Your Innovation with the **leading cloud HPC solution**

[Learn More](#)

und App-Layout-Templates. Eine Reihe von neuen Grafikfunktionen bieten eine verbesserte Visualisierung der Simulationsergebnisse. Vier neue Produkte erweitern die Fähigkeiten von Comsol Multiphysics für die Modellierung von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren, Polymerströmung, Steuersystemen und hochpräzisen Fluidmodellen.

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

### CARHS

#### Automotive CAE Companion

Der automotive CAE Companion 2020/2021 bietet umfassende Informationen zu Konferenzen und Seminaren von Carhs im CAE und Engineering. Auf über 60 Seiten CAE-Wissen liefern Experten wertvolle Informationen zu Theorie und Anwendung der numerischen Simulation in der CAE-basierten Fahrzeugentwicklung. Der Automotive CAE Companion kann ab sofort bestellt werden.

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

### FORD-WERKE

#### Ford baut neue Crahs-Testanlage im Entwicklungszentrum in Köln

Ford investiert 15,5 Millionen US-Dollar in den Ausbau seiner Crash-Testanlage im Kölner Entwicklungszentrum. Zudem hat der Autohersteller bereits sechs neue Crash-Test-Dummies für 5 Millionen US-Dollar angeschafft. „Das ist eine Investition in den Standort Köln, in die Zukunft unseres innovativen Entwicklungszentrums und natürlich in die Sicherheit unserer Kunden“, betont Jörg Beyer, Geschäftsführer Produktentwicklung der Ford-Werke GmbH. „Unsere neue Anlage ermöglicht, Crash-Tests auf höchstem technologischen Niveau durchzuführen.“

Schon seit der Gründung des Entwicklungszentrums im Jahr 1968 untersuchen die Ingenieure im Crash-Testzentrum, welche Folgen Kollisionen für die Fahrzeuge und ihre Insassen haben. Seitdem sind die Autos sicherer geworden und die Anforderungen an die Testprozeduren stetig gewachsen. Um den künftigen Bestimmungen von Euro NCAP – der Organisation, die die Fahrzeugsicherheit bewertet – zu genügen, baut Ford nun an die

bestehende Anlage einen neuen Flügel. „Bisher fahren wir die Fahrzeuge im Frontalcrash gegen eine feststehende Wand, in Zukunft wird sich diese Barriere ebenfalls bewegen“, erklärt Stephan Knack, Leiter der Crash-Testanlage.

Die Crash-Experten haben festgestellt, dass ein mobiler Widerstand im Vergleich zu einem starren Hindernis Einfluss auf die Unfallfolgen hat, etwa auf die Rotation des Fahrzeugs nach dem Zusammenprall. In Zukunft fahren also Fahrzeuge und Barriere mit jeweils 50 km/h aufeinander zu. Bei der Kollision überdecken sich Fahrzeugfront und Barriere zu 50 Prozent. Die neuen Testreihen bilden so einen Frontalzusammenprall von zwei Fahrzeugen noch realistischer ab und ermöglichen damit noch bessere Rückschlüsse für den Entwicklungsprozess.

Um dies zu realisieren, brauchen die Ford-Crash-Tester mehr Platz. Deshalb entsteht derzeit in Merkenich die neue, 100 Meter lange Anlaufbahn. Auf einer Schiene werden hier die Probanden, also die Crash-Test-Dummies in ihren Testkarossen, von einem Stahlseil gezogen und auf das vorgesehene Tempo beschleunigt. Diese Bahn mündet in der Crash-

Arena, ebenfalls ein Neubau. In der mehr als 2.000 Quadratmeter großen Halle crasht es dann über einer sechs Meter tiefen Filmgrube mit neuester Video-Technik. Der Aufprall wird nicht nur von unten, sondern auch seitlich und von oben mit High-Speed-Kameras festgehalten. Spezielle Lichtsysteme werden dafür installiert. Die Barriere fährt für den Crash-Test aus der bestehenden Anlage in die Arena ein. Dabei laufen die Mittelachsen von bestehender und neuer Halle genau aufeinander zu.

Den elektrischen Antrieb, der Proband und Barriere beschleunigt, erneuert Ford ebenfalls. Er wird wesentlich leistungstärker, schließlich sind ja nun zwei Komponenten zu bewegen. Der bisherige Motor hatte eine Leistung von 400 Kilowatt, beim neuen werden es 1.470 Kilowatt sein. Damit die Barriere so realistisch wie möglich ein entgegenkommendes Auto simuliert, besteht ihre Oberfläche aus Aluminium-Waben, deren Wandstärke zunimmt. „Dadurch nimmt die Steifigkeit – wie bei Karossen auch – nach innen immer mehr zu“, erklärt Stephan Knack. Auch künftig wird es noch Tests mit feststehenden Barrieren geben. Dafür entsteht in der Crash-Arena ein Schwerlastfundament für den 130 Tonnen-Betonblock, auf den die Probanden auffahren. Zudem fährt die Anlage Crash-Tests mit Kollisionen von hinten und der Seite.

Mit den sechs neuen Dummies verfügt Merkenich nun über eine 40-köpfige Dummy-Familie, an der die Unfallfolgen für Menschen nachgeahmt werden. Zwar kann man – wie überall in der Fahrzeugentwicklung – immer mehr physikalische Vorgänge am Computer simulieren, so auch bei der Sicherheit. Reale Testreihen mit echten Kollisionen bleiben aber fester Bestandteil der Homologation eines neuen Modells. Stephan Knack schätzt, dass ein Modell wie der Ford Focus mit einer Vielzahl von Motor- und Karosserievarianten rund 70 Mal vor der Typzulassung gecrasht wird. In Merkenich werden im Jahr etwa 250 Autos „vor die Wand“ gefahren. Die neue Anlage ist für das gesamte

Produktportfolio von Ford geeignet, vom Fiesta bis zum Transit mit langem Radstand.

Systeme des Insassenschutzes im Fahrzeug, also vor allem Sicherheitsgurte und Airbags, testen die Ford-Ingenieure ohne Crash auf einer so genannten Schlittenanlage. Hier simuliert man das Unfallgeschehen durch enorme Beschleunigungskräfte, wobei die Karosse unbeschädigt bleibt.

Da auf dem Neubaugebiet Waldkäuze und Fledermäuse heimisch waren, hat sich Ford um Ersatzquartiere für die Tiere gekümmert und außerdem neue Bäume gepflanzt. Die neue Anlage soll bis Mitte 2021 fertig gestellt sein. Anschließend wird die bestehende Anlage modernisiert. Das gesamte Projekt will Ford bis Ende 2021 abschließen.

[www.media.ford.com](http://www.media.ford.com)

## FRAUNHOFER IAPT

### Und plötzlich bremst die gedruckte Radaufhängung ...

Eine Innovation über die Grenzen von Hamburg bis Turin lässt Automobilisten aufhorchen: Fiat Chrysler Automobiles (FCA) und die Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT entwickelten gemeinsam ein 3D-gedrucktes Radaufhängungssystem mit integriertem Bremsattel für einen FCA-Sportwagen.

Das Bauteil steht symbolisch für den Einstieg in den serienmäßigen 3D-Druck von Fahrzeugkomponenten von FCA. Zu den ehrgeizigen Zielen meint Carlo Carcioffi, Leiter des Bereichs Head of Advanced Processes and Materials Body, Interiors, Chassis: „Gemeinsam mit unserem Innovationspartner Fraunhofer IAPT senken wir die Kosten und den Produktionsaufwand für wichtige Fahrzeugkomponenten. Der Wissenstransfer wird uns helfen, unsere Kompetenz für Additive Manufacturing in den Bereichen integriertes Design, Werkstoffe und Prozesstechnologie konzernweit zu verbessern“.

All inclusive: Radaufhängung mit integriertem Bremsattel

Die additive Forschungszusammenarbeit begann mit einer mutigen Frage: Wie lässt sich ein komplettes Aufhängungssystem für einen Sportwagen per 3D-Druck realisieren? Derzeit besteht dieses noch aus zahlreichen Einzelkomponenten wie beispielsweise Radaufhängung, Bremsattel sowie Hydraulik und Hitzeschild. Bisher werden diese Bauelemente einzeln gefertigt und anschließend in mehreren Schritten mithilfe von Schrauben, Dichtungen und Unterlegscheiben zu einem kompletten, funktionsfähigen System montiert. Alles in allem ein komplexer, zeitaufwendiger und teurer Prozess.

„Wir mussten zusammen mit dem FCA-Konstruktionsteam die gesamte Radaufhängung völlig neu denken, um eine einteilige bionische Struktur zu erschaffen, die alle Funktionen der bisherigen Baugruppe mindestens gleich gut erfüllt, alle Kräfte aufnimmt, gewichtsoptimiert ist und additiv hergestellt werden kann“, blickt Design-Projektingenieur Yanik Senkel zurück.

Ökoeffizienz durch Leichtbau und Integralbauweise

Das Ergebnis ist beeindruckend: Durch Topologieoptimierung hat das Team einen Prototyp entwickelt, der 36 % weniger wiegt als die 12 Einzelteile des bisher konventionell gefertigten Bauteils. Das bionisch optimierte Design reduziert den Montageaufwand enorm, erhöht dank der robusteren Konstruktion die Dauerfestigkeit und soll auch in Bezug auf Geräusch, Vibration und Rauigkeit (NVH) besser abschneiden. Die intelligente Integralbauweise eliminiert viele typische Schwachstellen und verlängert damit die Lebensdauer. „Das Bauteil demonstriert das Potenzial der additiven Fertigung für zukünftige Autos“, sagt Carcioffi stolz. „Und obendrein ist es ein echter Hingucker“, fügt er hinzu.

Doch die 3D-gedruckte Radaufhängung mit integriertem Bremsattel, die weltweit erste ihrer Art, ist erst der Anfang: Sie ist der Ausgangspunkt für viele andere Projekte. In zahlreichen gemeinsamen Workshops, die auch die Bereiche Ma-

# Simulation and More



## Finite Element Solutions

### ■ LS-DYNA Applications

- Crash
- Occupant safety
- Implicit statics/dynamics
- Process simulation
- Multiphysics



### ■ Service

- LS-DYNA support
- Consulting
- Material characterization
- Pilot projects
- Training



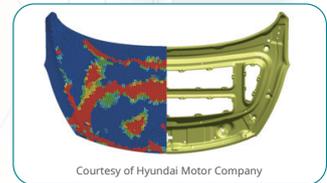
### ■ Development

- Process integration
- Material modeling
- Dummy models



### ■ Optimization

- Parameter identification
- Robustness investigations
- DOE/sensitivity studies



DYNAmore GmbH

Stuttgart • Dresden • Ingolstadt • Berlin • Wolfsburg • Langlingen • Zurich (CH) • Linköping (S) • Gothenborg (S) • Turin (I) • Versailles (F) • Dublin, Ohio (USA)  
 Tel.: +49 (0)711 - 45 96 00 - 0 • E-Mail: info@dynamore.de • www.dynamore.de

terial- und Prozessentwicklung sowie Qualitätssicherung umfassten, wurden mehrere Komponenten in Leicht- und Integralbauweise komplett neu entwickelt.

„Der Gesamtfokus liegt auf der Senkung der Herstellungskosten, etwa durch eine deutliche Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit“, erklärt Ruben Meuth, Leiter Business Development am IAPT. „Dieses Bauteil ist ein herausragendes Beispiel für die Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung. Es zeigt, wie Additive Manufacturing in der Serienfertigung von Luxus- und Sportwagen eingeführt werden kann“, resümiert Meuth. Doch welche Fahrzeugteile identifiziert das Kooperationsteam als die nächsten Kandidaten für den 3D-Druck? Die Ergebnisse dürften spannend sein, ist Carcioffi überzeugt. In einem Punkt ist sich der FCA-Experte schon jetzt sicher: „Das Projekt hat gezeigt, dass wir durch Additive Manufacturing viele Bereiche des Automobils völlig neu denken und damit den Grundstein

für zukünftige Innovationen legen können“.

[www.iapt.fraunhofer.de](http://www.iapt.fraunhofer.de)

### INSTAL

#### Instal-News

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

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

### HEXAGON - MSC Software

#### Safran Transmission Systems entscheidet sich für SimManager

Safran Transmission Systems, wählt MSC Software (MSC) für die Verwaltung von Simulationsdaten- und -prozessen. Das Projekt wird mithilfe von SimManager, der MSC-Simulationsplattform für das Prozess- und Datenmanagement (SPDM) umge-

setzt. Die leicht einsetzbare webbasierte Software bietet ein hochgradig konfigurierbares Simulations- und Testdaten-Managementsystem, das Safran Transmission Systems gestattet, alle Projektphasen zu verbinden – vom Projektstart bis hin zur Produkteinführung und darüber hinaus. SimManager löst typische Probleme kritischer Simulationsprozesse und unterstützt damit Unternehmen im Bereich Computer-Aided-Engineering-(CAE)-Analyse bei der Steigerung des Durchsatzes und der Effizienz ihrer Simulationsprozesse.

Loïc Martin, OMC Ingenieur bei Safran Transmission Systems erläutert: „Seit einigen Jahren nutzen wir die fortschreitende Entwicklung digitaler Technologien in Design, Entwicklung und Industrialisierung. So steigern wir die Leistung, Effizienz und Robustheit unserer Prozesse, sind innovativer und verkürzen die Markteinführungszeiten.“

Arnaud Curtet, Strategic Aerospace Account Manager, bei MSC Software

fügt hinzu: „Simulationen tragen wesentlich zur Entscheidungsfindung in der Konstruktion bei. Sowohl der Umfang an Daten als auch die Komplexität von Simulationen wachsen rasant. Unsere Kunden wissen nicht nur unser tiefgreifendes Verständnis im Bereich CAE zu schätzen. Sie profitieren auch von der Art und Weise, wie sich die aus Erfahrungen gewonnenen Erkenntnisse mit SimManager erfassen lassen und dadurch eine höhere Effizienz erzielt werden kann.“

Loïc Martin, OMC Ingenieur bestätigt dies: „Safran Transmission Systems stellte eine Angebotsanfrage für die Ausstattung der Technischen Abteilung mit einer nachhaltigen Plattform für mechanisches Design & Komponentenauslegung, die für die nächsten 20 Jahre erweiterbar sein sollte. Nach der Einführung des Simulationsprozess- und Datenmanagements werden Simulationen nun effizient und effektiv durchgeführt. Zudem werden Ressourcen optimal genutzt. Durch den Echtzeit-Zugriff auf relevante Daten, verbesserte Rückführbarkeit sowie die Standardisierung von Werkzeugen und Prozessen kann Safran Transmission Systems die Entwicklungszykluszeiten erheblich verkürzen. Darüber hinaus steigt dank des massiven Einsatzes der numerischen Simulation im Entwicklungsprozess die Produktleistung.“ Mit SimManager bietet MSC Software leistungsstarken Industrieunternehmen eine Komplettlösung für optimierte Simulationsabläufe, die Menschen, Prozesse sowie Technologien zusammenführt und dabei hilft, Entwicklung und Konstruktion digital zu verknüpfen.

### **Volvo Cars gewinnt ersten MSC Nastran Excellence Award**

MSC Software (MSC), einer der international führenden Anbieter von CAE- (Computer-Aided Engineering) Simulationssoftware, kürte die schwedische Volvo Car Corporation als Gewinner des ersten MSC Nastran Excellence Awards. Der Preis würdigt herausragende Engineering- und Design-Innovationen der Simulationsplattform Nastran

weltweit.

MSC Nastran ist ein weitverbreiteter, bewährter und hochpräziser FEA (Finite-Elemente-Analyse)-Solver für die Strukturanalyse, der bereits seit den Apollo-Missionen der NASA in den 1960er-Jahren als Standard in der Luft- und Raumfahrtindustrie gilt – und heute in einigen Industrie-segmenten eingesetzt wird. Die eingereichten Entwürfe für das Debut dieser neuen Auszeichnung beweisen die große Bandbreite dieser Lösung. Hierzu gehören beispielsweise die Simulation der Auswirkungen von Erdbeben auf Kernreaktoren oder die Multiskalenanalyse von gewebten Verbundwerkstoffen. Bewertet wurden die Entwürfe von einem siebenköpfigen Gremium, das aus Technik- und Marketing-Experten von MSC sowie einem externen Branchenberater zusammengesetzt war.

Den ersten Platz erhielt Volvo für seine kreative Nutzung von MSC Nastran. Das Team von Volvo nutzte Nastran, um einerseits zu simulieren, wie die Vibrationen einer Fahrzeugstruktur die Leistung des Audiosystems bei verschiedenen Frequenzen beeinträchtigen können, andererseits generierte die Analyse die nötigen Daten, damit Ingenieure diese Auswirkungen abmildern konnten.

Andrzej Pietrzyk, leitender Ingenieur der Volvo Car Corporation, sagte: „MSC Nastran ist für unsere tägliche Arbeit von unschätzbarem Wert. Unser Fokus lag auf Akustik-CAE, da Automobil-Erstausrüster einem wachsenden Druck ausgesetzt sind, immer kürzere Markteinführungszeiten zu realisieren. MSC Nastran stellt eine neue Möglichkeit dar, dieser Forderung gerecht zu werden. Darüber hinaus sind die meisten Autobauer bei ihren Audiosystemen auf die Zusammenarbeit mit spezialisierten Akustik-Entwicklern angewiesen, wobei die Verantwortung für den Einbau letztlich beim Erstausrüster bleibt. Die Fähigkeit, das Verhalten des Systems bereits vor dem Einbau vorherzusagen, kann im Nachhinein wertvolle Zeit für die Feinabstimmung einsparen.“ Die beiden Zweitplatzierten sind

das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die japanische Estech Corporation. Das DLR evaluierte mithilfe der MSC Nastran-Plattform die Belastungen, denen ein Flugzeug üblicherweise standhalten muss, und anhand dieser Daten die Konstruktion der einzelnen Komponenten optimiert. Die Technologie-Beratungsfirma Estech simulierte, wie sich ssDNA-SWCNTs – mit einsträngiger DNA umhüllte, einwandige Kohlenstoffnanoröhren für die Verabreichung von Krebswirkstoffen – in Wasser bewegen. Estechs Ziel war, medizintechnische Ingenieure dabei zu unterstützen, die optimale Länge und Festigkeit der komposit-basierten Nanoröhren zu ermitteln, um ihre bio-nanotechnische Wirksamkeit zu maximieren.

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

## **RESCALE**

### **Kooperation von Rescale und Hyundai Motor Group**

Rescale Inc., Marktführer im Bereich Enterprise Big Compute, in Zusammenarbeit mit Hyundai Motor Group, hat heute angekündigt, dass die beiden Unternehmen eine Multi-Cloud High Performance Computing (HPC)-Umgebung für Innovationen für Smart Mobility aufbauen. Diese neue agile und flexible Umgebung wird es Forschungs- und Entwicklungsingenieuren ermöglichen, ihre Leistungsfähigkeit durch die Cloud zu erhöhen und die Grenzen der traditionellen Forschung und Entwicklung (F&E) zu überwinden.

„Für die digitale Transformationsstrategie von Hyundai Motor ist eine enge Zusammenarbeit zwischen IT und Praxis unerlässlich“, sagte JungSik Suh, Senior Vice President und Head of ICT Division von Hyundai Motor Group. „Wir freuen uns, dass diese Zusammenarbeit auf der Rescale Cloud-Plattform stattfindet. Wir erwarten eine höhere Effizienz in der F&E, indem wir uns von den physischen Einschränkungen einer statischen On-premise-Umgebung lösen.“

Zusätzliche Kapazitäten und Leis-

tion in der Cloud für HPC ermöglichen den Mobilitätsforschern, wichtige digitale Simulationen mit kürzeren Iterationen durchzuführen. Dies macht den Weg frei für schnellere technologische Durchbrüche, wie die Entwicklung von KI-betriebenen autonomen Fahrzeugen oder die Verbesserung von Kraftstoffeffizienz und Sicherheitsmerkmalen. Die schlüsselfertige Rescale Plattform ermöglicht es auf einfache Weise, hunderte von Simulationsanwendungen auf einer Multi-Cloud HPC Infrastruktur auszuführen. So können Wissenschaftler ihre Forschungen auf einer einzigen, jederzeit und von überall zugänglichen Plattform betreiben, ihre Modelle nach Bedarf skalieren und ihre Forschung beschleunigen.

Bisher war das für die Aerodynamik verantwortliche Team des Hyundai Motor Group Research Instituts durch die Ressourcen einer On-premise-Infrastruktur eingeschränkt. Dadurch war die Anzahl der Simulationen, die gleichzeitig durchgeführt werden konnten, begrenzt. Durch den Umstieg auf eine von Rescale betriebene, individuelle Multi-Cloud-Umgebung können die Forscher der Hyundai Motor Group die Simulationen nach Bedarf skalieren. So können wesentlich mehr Aufgaben, mit einer optimalen Zusammenarbeit innerhalb des Teams, gleichzeitig ausgeführt werden. Das führt zum schnelleren "Time-to-Market".

„Als intelligente Kontrollebene für Big Compute ermöglicht Rescale Forschern eine nahtlose Zusammenarbeit und stellt sicher, dass Simulations-Workloads immer auf den leistungsfähigsten Architekturen unseres Multi-Cloud-Provider-Infra-

strukturnetzes ausgeführt werden“, sagte Edward Hsu, Vice President of Product, Rescale. „Wir freuen uns über die Zusammenarbeit mit Hyundai Motor Group, um im Bereich Mobilität beispiellose Innovationen voranzutreiben.“

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

## SICOS-BW

### **EuroCC: Neues EU-Projekt ermöglicht Unternehmen europaweiten Zugang zu Zukunftstechnologien**

Um wettbewerbsfähig zu bleiben, sind Unternehmen mehr denn je darauf angewiesen, zukunftsweisende Technologien wie High Performance Computing (HPC), High Performance Data Analytics (HPDA) und Künstliche Intelligenz (Artificial Intelligence, AI) zu nutzen. Ziel des neuen EU-Projekts „National Competence Centres in the framework of EuroHPC“ (EuroCC) ist es deshalb, die 33 beteiligten EU- und assoziierten Länder auf ein einheitlich hohes Level in diesen Technologiefeldern zu heben (Excellence Baseline). Ermöglichen sollen dies nationale Kompetenzzentren, die die landesspezifischen Angebote und Fähigkeiten in den Bereichen HPC, HPDA und AI erfassen, bewerten, koordinieren und netzwerkweit zugänglich machen – für Wissenschaft, Industrie und öffentliche Verwaltung gleichermaßen. Neben dem federführenden Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) ist die Stuttgarter Sicos BW GmbH als Experte für den Einsatz von HPC und Data Analytics in der Industrie (speziell bei KMU) maßgeblich an

der Umsetzung des EU-Projektes in Deutschland beteiligt.

„Unternehmen, die Zukunftstechnologien nutzen möchten, sollen dank EuroCC europaweit die passenden Experten finden“, sagt Dr. Andreas Wierse, Geschäftsführer von Sicos BW. „So lassen sich die Wissenslücken einzelner Länder schließen und die Hürden zur Nutzung dieser Technologien senken.“ Und Wierse weiter: „Es freut uns, dass wir als Projektpartner unsere Beratungsexpertise auf nationaler Ebene in die Schaffung eines europaweiten Kompetenznetzwerks mit einbringen können.“ Sicos BW wurde 2011 vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Universität Stuttgart gegründet, um speziell KMU den Zugang zu Simulation und Höchstleistungsrechnen sowie Big Data und Smart Data Themen zu erleichtern – nicht zuletzt durch die Vermittlung geeigneter Technologie- und Projektpartnerschaften. Aufgrund seiner langjährigen Erfahrung in diesem Bereich steht Sicos BW bei EuroCC dem Projektpaket „Collaboration with Industry“ vor. Darüber hinaus ist das Unternehmen im Task „Technology Transfer/Business Development“ sowie im Bereich Öffentlichkeitsarbeit involviert.

EuroCC umfasst ein Projektvolumen von 56 Mio. Euro. Diese Summe wird zu 50 Prozent aus Mitteln des European High Performance Computing Joint Undertaking (EuroHPC JU) finanziert, die restlichen 50 Prozent stammen aus nationalen Finanzierungsprogrammen der Partner-Länder. Die Projektdauer beträgt zunächst zwei Jahre. Projektstart war der 1. September 2020.

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

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).

2020

**Multiphysics 2020**

10.-11.12. Online [www.multiphysics.org/programme](http://www.multiphysics.org/programme) Int. Soc. of Multiphysics

**Euro NCAP UpDate**

15.-16.12. Online [www.carhs.de](http://www.carhs.de) Carhs

2021

**NAFEMS Seminar: Simulation in the Automotive Industry**

02.-04.02. Online [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events) NAFEMS

**NAFEMS Seminar: Role of Engineering Simulation within Digital Transformation**

04.03. Online [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events) NAFEMS

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

10.-11.03. Online [www.nafems.org/fem21-1](http://www.nafems.org/fem21-1) NAFEMS

**NAFEMS Kurs: NEU: The Complete Guide to Automatic Design Optimization**

15.-16.03. Online [www.nafems.org/opt21-1](http://www.nafems.org/opt21-1) NAFEMS

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

17.-18.03. Online [www.nafems.org/fkm21-1](http://www.nafems.org/fkm21-1) NAFEMS

**NAFEMS Kurs: Verification and Validation in Engineering Simulation**

23.-25.03. Online [www.nafems.org/vandv21-1](http://www.nafems.org/vandv21-1) NAFEMS

**NAFEMS Seminar: Physics-Based Digital Twins**

23.-24.03. Online [www.nafems.org/oslo21](http://www.nafems.org/oslo21) NAFEMS

**NAFEMS Seminar: AI, Data Driven Models & Machine Learning**

23.-24.03. Online [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events) NAFEMS

**CAE Grand Challenge**

20.-21.04. Hanau, D [www.carhs.de](http://www.carhs.de) Carhs

**NAFEMS Seminar: CFD-Methoden in der Entwicklung alternativer Antriebssysteme**

14.-15.06. Online [www.nafems.org/cfd21](http://www.nafems.org/cfd21) NAFEMS

**NAFEMS Seminar: Integration von Simulation und Test in der Produktentwicklung**

16.-17.06. Online [www.nafems.org/simtest21](http://www.nafems.org/simtest21) NAFEMS

**NAFEMS Kurs: NEU: Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear**

30.06.-01.07. Online [www.nafems.org/fkm-nonlin21-1](http://www.nafems.org/fkm-nonlin21-1) NAFEMS

**Europäische LS-DYNA Konferenz**

04.-07.10. Ulm, D [www.dynamore.de](http://www.dynamore.de) DYNAmore



**A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION**

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

incorporating



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

incorporating



26.-27.10. Salzburg/Online [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress) NAFEMS

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

# Eine generische Programmstruktur zur automatisierten Durchführung von Simulationsschemata

M. B. Geilen, M. Klein, E. Sharma, M. Oechsner

Zentrum für Konstruktionswerkstoffe MPA-IW TU Darmstadt

In diesem Beitrag wird eine generische Programmstruktur zur automatisierten Durchführung von Simulationsschemata in Abaqus® vorgestellt. Anhand einer abgeleiteten, konkreten Klasse wird gezeigt, wie sich Finite-Elemente (FE) Modelle von Tellerfedern innerhalb dieser Programmstruktur voll automatisiert erstellen lassen.

Die Interaktion mit Hilfsprogrammen wie einem MeshLab® Script und einem Python 3® Script werden dargestellt. Die sich aus der FE-Berechnung ergebenden Spannungsfelder werden zu Graphen vereinfacht. An diesen Graphen lässt sich die kritisch belastete Oberfläche ablesen. Weiter wird eine Charakteristik abgeleitet und mit einem physikalischen Experiment verglichen. Die Integration der Auswertung der Walker-Schädigung in die Programmstruktur wird dargestellt.

## 1 Motivation

Die Automatisierung des Aufbaus und der Auswertung von FE-Simulationen erlaubt es Berechnungsabteilungen, bei sich wiederholenden Aufgaben den Personalaufwand zu reduzieren. Die Automatisierung von Simulationsprozessen hilft bei der Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses, da die Zeit zwischen der Definition und dem Abschluss einer Simulationsaufgabe reduziert wird. Automatisierte Simulationsschemata erlauben aber nicht nur, Kosten und Zeit zu sparen, sondern auch den Einsatz neuartiger Konstruktionsmethoden. Beispielsweise sind die Parameter- und die Topologieoptimierung auf eine Automatisierung des Berechnungsprozesses angewiesen, also auf eine automatisierte Modifikation des FE-Modells, das automatisierte Erstellen und Durchführen von Berechnungsjobs und die automatisierte Auswertung. Die Automatisierung weiterer Schritte ist Gegenstand aktueller Forschung [1, 2]. Komplett automatisierte Simulationsschemata erlauben Optimierungsalgorithmen mit neuen Suchräumen sowie komplexen Zielfunktionen und Nebenbedingungen, beispielsweise die Lebensdauervorhersage nach der Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ [3] bei gegebener Funktionalität.

Die Automatisierung von FE-Simulationen ist für Berechnungsabteilungen jedoch auch eine Herausforderung. Die Schulung des Personals erfordert hohe einmalige Aufwendungen, und auch die Erstellung neuer automatisierter Simulationsschemata ist insbesondere in der Einführungsphase mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden. Insbesondere die Überprüfung der Zuverlässigkeit neuer Simulationsschemata ist herausfordernd, weil automatisierte Softwaretests durch die hohen Rechenzeiten sehr zeitaufwendig und in der Literatur kaum dargestellt sind. An dieser Stelle sei das Modul Abaverify [4] hervorgehoben, durch das Möglichkeiten zum Testen von Subroutinen sehr gut dargestellt sind. Unzuverlässige automatisierte Simulationsschemata bringen nicht nur einen geringeren Nutzen, sondern reduzieren die Akzeptanz der neuen Technologie unter Mitarbeitenden erheblich.

In diesem Beitrag wird eine Programmstruktur für Algorithmen, die Simulationsschemata realisieren, vorgestellt. Sie hilft Anwendern, die zurzeit monolithische Programmabläufe ohne zugrundeliegende Struktur produzieren, ihre Programme zu strukturieren.

Strukturierte Programme sind weniger fehleranfällig, und die einzelnen Bestandteile der Struktur können einzeln getestet werden. Weiter ist die Wiederverwendung von bereits geschriebenem Programmcode vereinfacht. Durch den konsequenten Einsatz der Programmstruktur können unterschiedliche Simulationsschemata denselben Quellcode verwenden. Beim Beseitigen von Fehlern im geteilten Anteil des Quellcodes werden so Fehler aus mehreren Simulationsschemata gleichzeitig entfernt. So beinhalten implementierte Simulationsschemata insgesamt weniger Fehler.

In Abbildung 1 ist das Zusammenspiel zwischen der abstrakten Basisklasse und der abgeleiteten, konkreten Klasse „Spring\_stack“ dargestellt. Spring\_stack ist durch eine Vererbungsschnittstelle an die abstrakte Basisklasse angehängt. Beide Klassen sind über dieselbe Programmierschnittstelle mit dem Abaqus Kernel

verknüpft. Der Verbund dieser drei Module wird durch eine Programmierschnittstelle und Eingabedateien gesteuert. Andere Simulationsschemata können Spring\_stack ersetzen, dann bleiben alle Schnittstellen außer den Eingabedateien gleich. Es ist erstrebenswert, dass die Eingabedaten unterschiedlicher Simulationsschemata ähnlich sind, eine globale, immer gleiche Struktur liegt jedoch nicht vor.

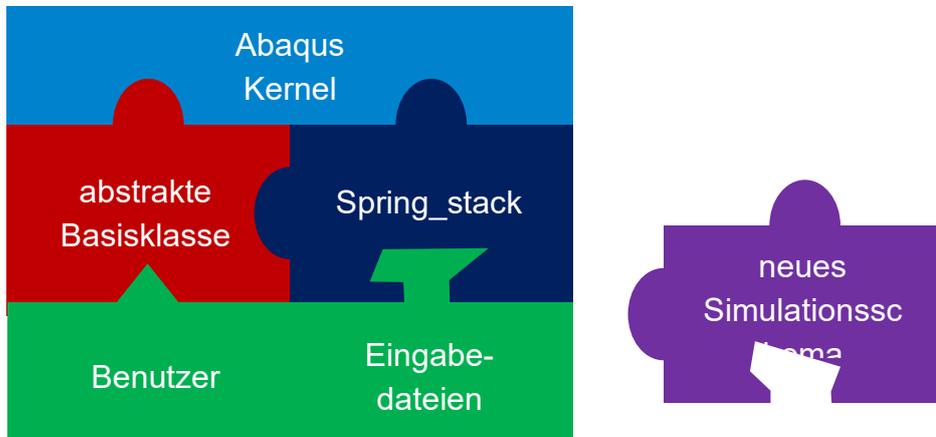


Abb. 1: Abstrakte Basisklasse und Spring\_stack als Bindeglied zwischen Nutzer und FE-Programm

In Abschnitt 2 wird ein Anwendungsbeispiel der Programmstruktur dargestellt. In Abschnitt 3 wird die Programmstruktur anhand des Anwendungsbeispiels erläutert. In Abschnitt 4 werden Möglichkeiten zum automatisierten Testen gegebener Simulationsschemata dargestellt. In Abschnitt 5 wird der Beitrag zusammengefasst.

## 2 Anwendungsbeispiel

In diesem Abschnitt wird als Anwendungsbeispiel der Aufbau eines FE-Modells sowie dessen Auswertung beschrieben. Dabei wird auf die Implementierung in den verwendeten Programmen eingegangen. Die zugrundeliegende Programmstruktur wird in Abschnitt 3 dargestellt. Das Anwendungsbeispiel Tellerfeder wird in [5 bis 7] mit verschiedenen Schwerpunkten detaillierter betrachtet. In dieser Untersuchung liegt der Schwerpunkt auf der Interaktion des Algorithmus mit Programmen und Bibliotheken.

Der Simulation werden hier keine abstrahierten Geometrien zugrunde gelegt, wie sie mit einem CAD-Programm oder dem Abaqus Kernel modelliert werden können, sondern mithilfe eines optischen 3D-Scanners des Typs GOM ATOS® (GOM GmbH) vermessene Geometrien.

Nach der Vermessung mithilfe eines 3D-Scanners liegt die Geometrie der Tellerfeder nicht als im Koordinatenursprung ausgerichtetes, durch B-Spline- oder NURBS-Flächen definiertes Volumen vor, sondern als beliebig im Raum liegendes Oberflächennetz aus Dreiecken. Im Rahmen dieses Beitrags wird davon ausgegangen, dass dieses Oberflächennetz geschlossen ist. Die Geschlossenheit des Oberflächennetzes ist ein Resultat eines guten Scanprozesses und im Fall eines nicht hinreichend optimierten Scanprozesses nachträglicher Netzoperationen. Weiter wird davon ausgegangen, dass das Netz bereits geglättet ist. Sowohl die Geschlossenheit des Netzes als auch die Glättung kann durch Einbinden von durch eine Programmierschnittstelle ansprechbare kommerzielle Software wie GOM Scan oder durch selbstgeschriebene Softwareelemente [8] in den Prozess eingliedert werden.

Aus dem 3D-Scan ergeben sich sehr feine Oberflächennetze. Bei der im Abaqus Kernel implementierten Vernetzung von orphan meshes ist die sich ergebende Anzahl an Knoten und damit der Rechenaufwand des Modells abhängig von dem zugrundeliegenden Oberflächennetz und kann nicht durch Parameter oder ähnliches beeinflusst werden. Daher wird die Knotenzahl des Oberflächennetzes mithilfe eines Quadric Edge Collapse Decimation Algorithmus [9] reduziert.

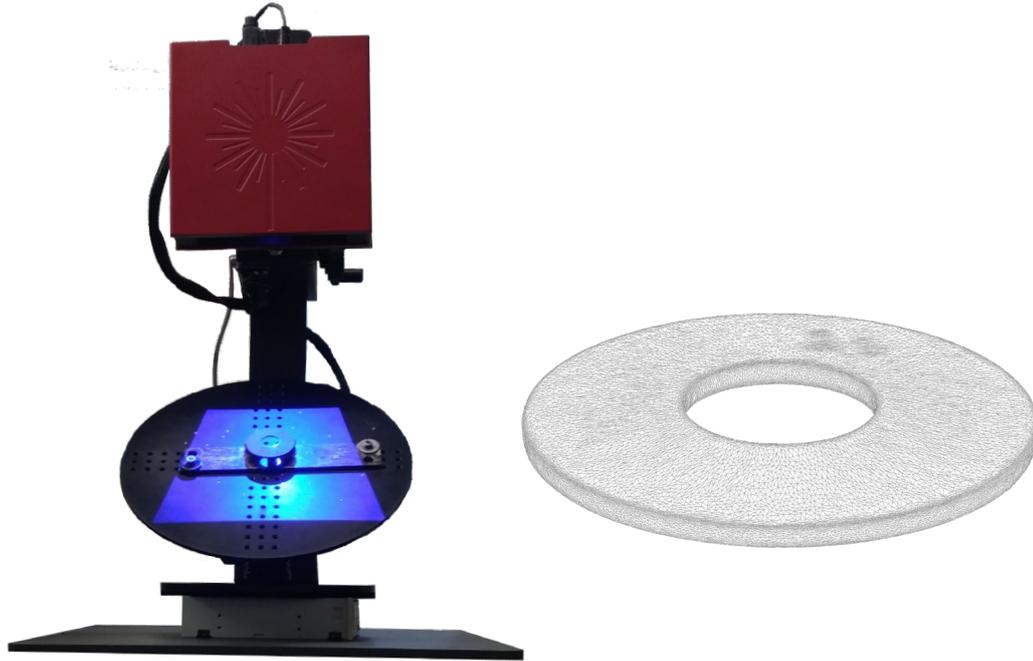


Abb. 2: verwendeter 3D-Scanner (links) und Ergebnis der Vermessung einer Tellerfeder (rechts)

Zum Ausrichten der Feder wird ein Python-Modul eingesetzt. Dieses verschiebt zunächst den Volumenschwerpunkt der Feder in den Koordinatenursprung. Dann dreht es die Feder so, dass sie näherungsweise drehsymmetrisch zur y-Achse ausgerichtet ist. Um die passende Drehmatrix zu finden, wird das Netz der gedrehten Feder als Punktwolke aufgefasst. Diese Punktwolke wird durch Drehung um die y-Achse auf die xy-Ebene projiziert, und der Flächeninhalt der konvexen Hülle der sich ergebenden zweidimensionalen Punktwolke wird durch Variation der Drehmatrix minimiert [10 bis 13].

Um ein FE-Modell aufzubauen, werden die wie beschrieben vorbereiteten Geometriedaten in Abaqus/CAE als Bauteile eingelesen. Die Bauteile werden vernetzt, ihnen werden Materialgesetze zugeordnet und sie werden zu einer Baugruppe zusammengesetzt. Führungselemente werden anhand idealisierter übergebener Geometrien erstellt. Zeitschritte und Randbedingungen zur Abbildung zyklischer Belastung werden definiert, eine Eingabedatei für den Solver Abaqus Standard wird ausgeschrieben und dem Solver überreicht.

Nach Abschluss der Berechnung durch den Solver wird die Walker-Schädigung [14] mithilfe eines Ansatzes nach Manson-McKnight [15] in jedem Integrationspunkt des FE-Modells berechnet. Dabei werden den Lastspannungen gemessene Eigenspannungen überlagert. In Abbildung 3 sind die Spannungsamplituden und die Walker-Schädigungen auf der Unterseite der Beispielfeder dargestellt.

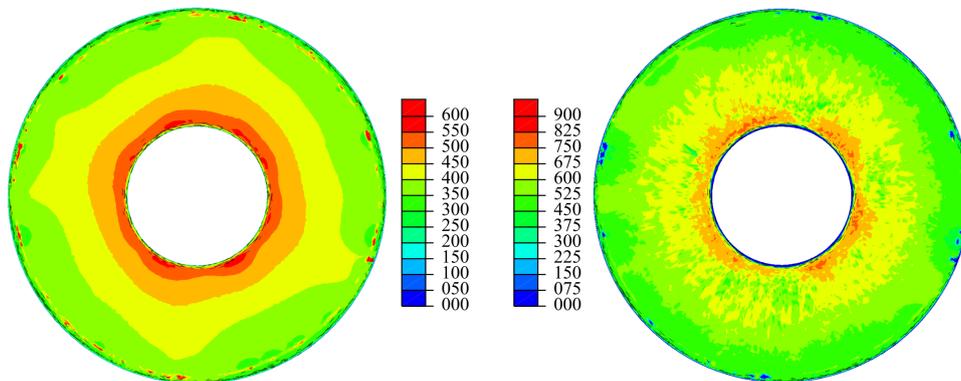


Abb. 3: Spannungsamplitude (links) und Walker-Schädigung (rechts) in MPa

Die Walker-Schädigung an der Oberfläche der Bauteile wird aufintegriert und als Walker-Flächen-Diagramm sowie als csv-Datei ausgegeben.

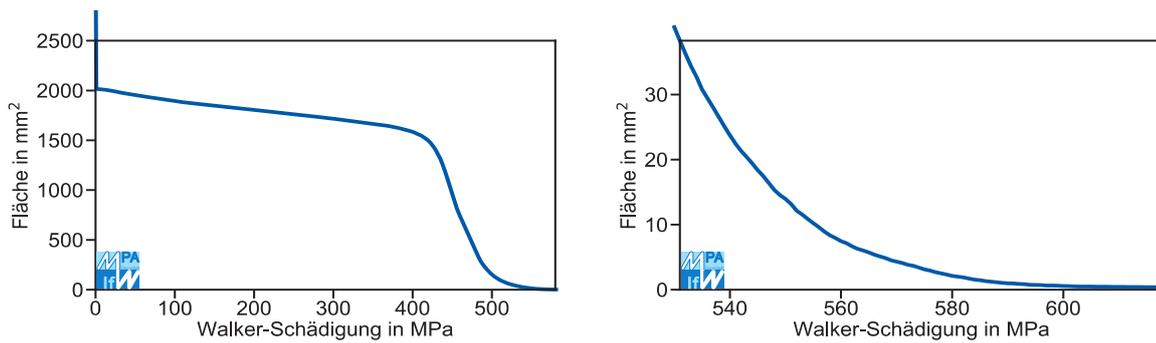


Abb. 4: Walker-Flächen-Diagramm, gesamt (links) und Detail (rechts)

Durch das Walker-Flächen-Diagramm können die zur Lebensdaueranalyse relevanten Ergebnisse visuell erfasst werden. Die ausgegebene csv-Datei kann von Algorithmen zur Berechnung der maximalen Walker-Schädigung und der kritisch belasteten Fläche und damit zur Lebensdauer vorhersage weiterverwendet werden.

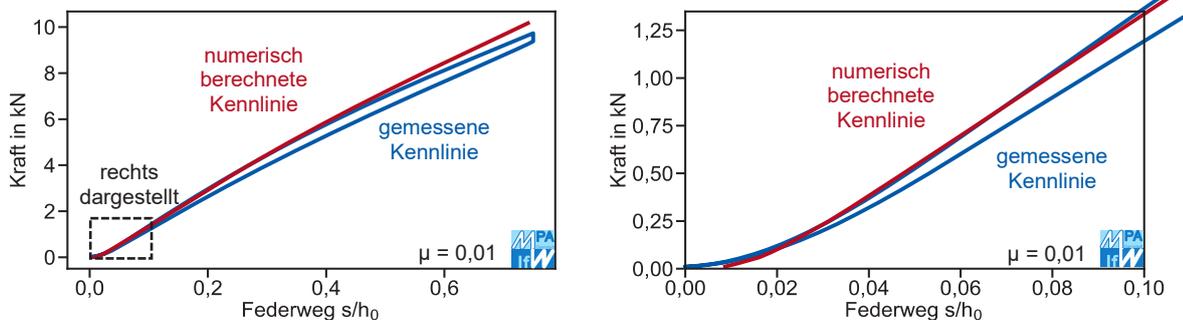


Abb. 5: Kennlinie einer an einer gemessenen und einer automatisch berechneten Kennlinie, gesamt (links) und Detail (rechts)

Neben dem Walker-Flächen-Diagramm kann ebenfalls die intuitiv zu erfassende Charakteristik, also im Fall einer Feder die Kennlinie, ausgewertet werden. In Abbildung 5 ist die numerisch berechnete Erstbelastungskennlinie der gemessenen Erstbelastungskennlinie und Erstentlastungskennlinie gegenübergestellt. Die Kennlinien sind auf die Ausgangskegelhöhe  $h_0$  (hier 1,7 mm) normiert.

Die berechnete Kennlinie zeigt genau wie die gemessene Kennlinie anfänglich einen progressiven Verlauf. Gegenüber der klassischen Abbildung von Tellerfedern durch ideal achsensymmetrische Modelle ist das neu. Insgesamt ist die Übereinstimmung der Kennlinien gut, die numerisch berechnete Kennlinie steigt etwas steiler an, als die experimentell bestimmte Kennlinie. Zum praktischen Einsatz der berechneten Kennlinie würde sich eine Anpassung des E-Moduls anbieten, um ein phänomenologisch besseres Ergebnis zu erzielen.

### 3 Zugrundeliegende Programmstruktur

In diesem Abschnitt wird die grundsätzliche Programmstruktur erläutert und folgend die Implementierung des in Abschnitt 2 beschriebenen Simulationsschemas beschrieben.

#### 3.1 Abstrakte Basisklasse

Die beschriebene Programmstruktur ist zum Einsatz im in Abaqus/CAE integrierten Python-Interpreter vorgesehen. Daher ist sie in Python 2 implementiert. Das hat den Vorteil, dass direkt auf den Abaqus Kernel zugegriffen werden kann. Sie ist als Pipeline aufgebaut. Das bedeutet, dass basierend auf Eingabedateien eine

Instanz für jede Anwendung des Simulationsschemas erzeugt wird und diese Instanz eine Anzahl an (Bearbeitungs-) Stationen durchläuft. Die Instanz wird wie ein physisches Produkt an einer Produktionsstraße an jeder Station modifiziert, bis sie nach der letzten Station im gewünschten Zustand vorliegt. Im Fall des in Abschnitt 2 beschriebenen Simulationsschemas ist das ein Walker-Flächen-Diagramm.

Jede Instanz hat Konfigurationsdaten als Attribute. Große Dateien wie stl-Dateien und output databases sind als Link hinterlegt. Der grundlegende Programmablauf ist in Abbildung 6 dargestellt. Für jede Anwendung des Simulationsschemas werden der Konstruktor, die Methoden „solve“, „evaluate“ und „postprocess“ sowie der Destruktor durchlaufen.

Die als erstes ausgeführte Methode ist der Konstruktor, der zunächst eine Konfigurationsdatei einliest, die beispielsweise die Ober- und Unterlast sowie Materialgesetze beinhaltet. Danach ruft er die Methode „build\_model“ auf, die ebenfalls als Pipeline implementiert ist. Sie beinhaltet neun abstrakte Methoden (Verarbeitungsstationen), die analog zu den Abaqus/CAE-Modulen in der hier verwendeten Reihenfolge die part-Objekte in einer model database erstellen, sie vernetzen, ihnen Materialgesetze zuweisen, sie in einem assembly-Objekt instanziiieren und anordnen sowie step-Objekte, interaction-Objekte, load- und boundary condition-Objekte und output-Objekte definieren. Abstrakte Methode bedeutet hier, dass diese Methoden nicht in der generischen Programmstruktur umgesetzt sind, sondern für jedes Simulationsschema einzeln umgesetzt werden. Im Fall des Beispiels Tellerfeder bedeutet dies, dass eine abgeleitete Klasse mit dem Namen Spring\_stack erzeugt wird, die konkrete Implementierungen dieser Methode beinhaltet. Zuletzt ist im Konstruktor eine konkrete Methode implementiert, die ein input-File zur Übergabe an die Methode solve erzeugt. Zusätzlich beinhaltet der Konstruktor eine konkrete Methode, die ein job-Objekt erzeugt.

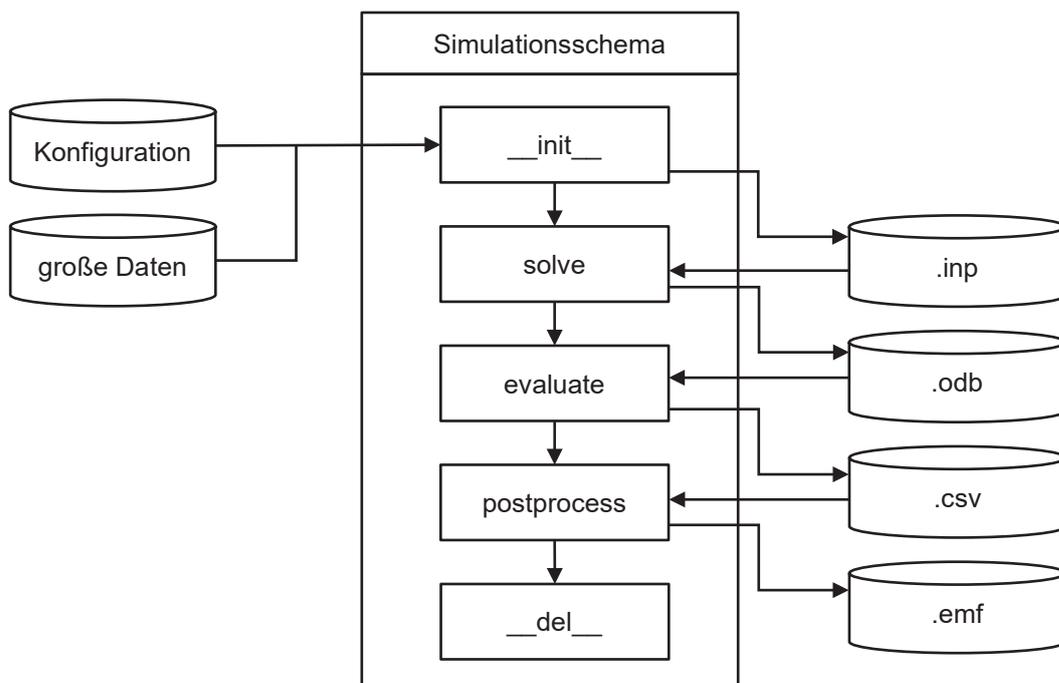


Abb. 6: Ablaufdiagramm eines Simulationsschemas

Die Methoden solve, evaluate und postprocess sowie der Destruktor sind direkt in der Basisklasse als konkrete Methoden implementiert, da sie unabhängig von der simulierten Baugruppe sind. Die Methode evaluate verwendet einige abstrakte Methoden, beispielsweise zum Erzeugen von zu superponierenden Eigenspannungsfeldern. Eigenspannungen sind beispielsweise bei Schrauben ganz anders verteilt, als bei Tellerfedern und auch abhängig von der Ausrichtung der Bauteile. Daher ist eine baugruppenspezifische Implementierung der Methode unumgänglich. Die Methoden evaluate und postprocess können auch überschrieben oder abgewandelt werden. Dies bietet sich etwa an, wenn nicht die Walker-Schädigung von Interesse ist, sondern eine Lebensdauervorhersage, z.B. nach einer der FKM-Richtlinien.

### 3.2 Abgeleitete Klasse

Von der abstrakten Basisklasse wird die konkrete Klasse Spring\_stack abgeleitet. Damit der Konstruktor ausgeführt werden kann, werden alle abstrakten Methoden durch konkrete Methoden überschrieben.

Das Vorbereiten der Geometriedaten ist in die Methode zum Generieren der part-Objekte implementiert. Diese Methode ist selbst in eine Methode je verwendetem Bauteiltyp untergliedert, die der Anzahl verwendeter Bauteile des Typs entsprechend oft aufgerufen wird. Hier wird näher auf die Methode zum Erstellen einer Tellerfeder auf Basis einer stl-Datei eingegangen. Der aus der Konfiguration ausgelesene und als Attribut hinterlegte Link zur stl-Datei wird verwendet, um MeshLab [9] durch einen Systemaufruf über die Programmierschnittstelle anzusteuern und eine neue stl-Datei mit reduziertem Oberflächennetz zu erzeugen. Das Attribut, das auf die ursprüngliche stl-Datei zeigt, wird aktualisiert und zeigt nun auf die erzeugte stl-Datei mit reduziertem Oberflächennetz.

Der in Python 3 implementierte Algorithmus zur Ausrichtung von Tellerfedern wird ebenfalls durch einen Systemaufruf ausgeführt. Das Netz mit ausgerichteter Feder wird nicht als stl-Datei, sondern als input-Datei ausgegeben, da dies das Einlesen mithilfe des Abaqus Kernels vereinfacht. Ein neues Attribut, das auf die input-Datei zeigt, wird erzeugt und beim Wiedereinlesen verwendet. Diese input-Datei wird ausschließlich in der Methode zum Generieren der part-Objekte verwendet und unterscheidet sich grundsätzlich von der input-Datei, die vom Konstruktor erstellt und von der Methode solve weiterverwendet wird, da sie außer einer Geometrie keine Informationen beinhaltet. Die weiterverwendete input-Datei kommuniziert ein komplettes FE-Modell an den Solver. Theoretisch ist es möglich, bereits im Konstruktor FE-Berechnungen auszuführen, das widerspricht jedoch dem Gedanken der vorliegenden Programmstruktur.

Alle anderen Methoden des Konstruktors der abgeleiteten Klasse werden direkt vom in Abaqus/CAE integrierten Python 2 Interpreter ausgeführt. Daher sind hier keine weiteren Systemaufrufe notwendig. Die im Beispiel in Abschnitt 2 als Führungselemente verwendeten Platten und Dorne werden beispielsweise automatisch mithilfe des Sketch-Moduls gezeichnet und durch die in Abaqus implementierte Methode CreatePart erzeugt. Im Wesentlichen erfolgt der Aufbau so, als würde ein Nutzer durch die einzelnen Module von Abaqus/CAE gehen und über die Schaltflächen das Modell aufbauen. Tatsächlich sendet Abaqus/CAE als Reaktion auf die Bedienung der Schaltflächen Python-Befehle an den Abaqus Kernel (Ausnahme: Toolboxes).

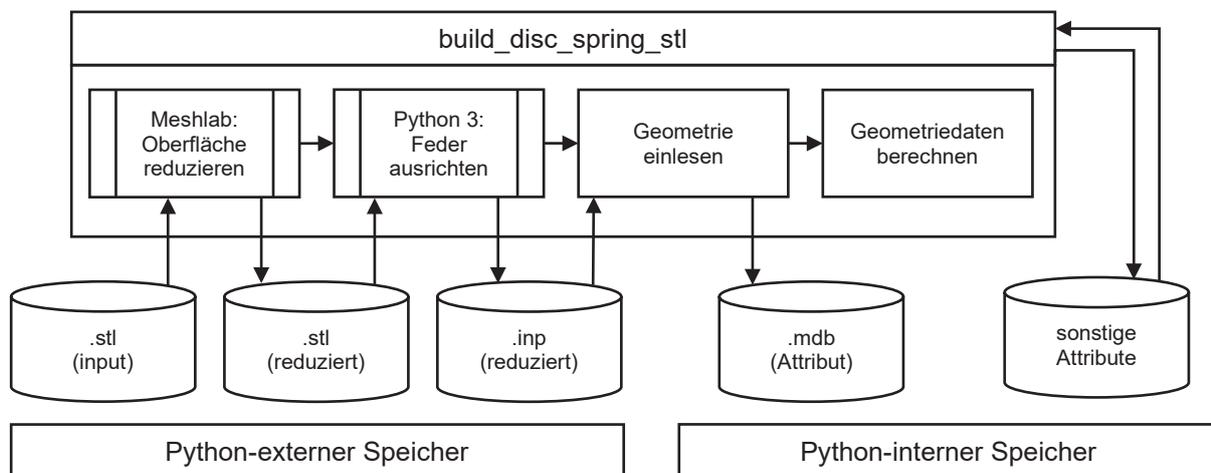


Abb. 7: Implementierung der Methode build\_part in der abgeleiteten Klasse

Die größte zusätzlich aufkommende Herausforderung bei der Automatisierung von Simulationsschemata liegt darin, dass Objekte – beispielsweise Knoten, Linien, Flächen oder Zellen - nicht durch Klicken angewählt werden können. Features werden in der model database durchnummeriert. Bei einfachen Skizzen, die sich nur in ihren Proportionen unterscheiden und in gleicher Reihenfolge gezeichnet wurden, ist die Nummerierung der Linien (Features) gleich. Eine beliebte Lösung zur Auswahl einer Linie in einer solchen Skizze ist, die Nummer in Abaqus/CAE auszulesen und direkt in den Quellcode zu implementieren. Dies geschieht auch wenn Quellcode, wie er im replay file aufgezeichnet wird, übernommen und angepasst wird. Das funktioniert für einfache Scripte und zunächst auch bei komplexen Programmen; wenn jedoch Änderungen im Simulationsschema vor der Anwendung der zum Referenzieren verwendeten Nummern vorgenommen werden, kann es sein, dass die Nummerierung sich ändert und die gewünschten Aktionen mit Bezug auf die falschen Linien durchgeführt werden. So kommt es zu Fehlern in den erstellten Modellen. Daher ist das Referenzieren von Objekten durch

Referenznummern schlechter Stil. Bei Skizzen ist eine deutlich bessere Lösung, vorab eine parametrisierte Skizze zu erstellen, die parametrisierte Skizze innerhalb des Simulationsschemas einzulesen und die Parameter durch ihre Namen anzusprechen und anzupassen. Bei großen Sprüngen in Parametern empfiehlt sich eine schrittweise Erhöhung. Bei mehreren sich ändernden Parametern kann es notwendig sein, die Parameter abwechselnd in kleinen Schritten zu erhöhen, damit die Skizze nicht degeneriert. Soweit ein Anpassen von komplexeren Objekten, also Bauteilen, Baugruppen oder sogar vollständigen Modellen zuverlässig und übersichtlich möglich ist, ist dies ebenfalls zu empfehlen.

Im in Abschnitt 2 dargestellten Beispiel ist dies jedoch nicht möglich; durch die hohe Komplexität des Algorithmus würde ein Ändern des Bauteils Tellerfeder bereits zu einem nicht mehr nachvollziehbaren Änderungsprozess führen, da nicht eine erfassbare Anzahl an Geometrieparametern geändert werden, sondern die Anzahl, Geometrie und Koinzidenz unzähliger Oberflächendreiecke ohne abstrakte Repräsentation. Dementsprechend wird ein Modell von Grund auf aufgebaut. Features werden entweder beim Erstellen benannt (dies ist nicht immer ohne weiteres möglich) oder durch ihre Position im Koordinatensystem angesprochen.

Nur einmal vorhandene Features, beispielsweise ein Referenzpunkt auf einem Bauteil, werden in der vorgestellten Implementierung anhand ihrer Referenznummer angesprochen. Das kann zwar beim Einführen weiterer Referenzpunkte zu Problemen führen, das Risiko ist aber durch den reduzierten Umfang des Quellcodes gerechtfertigt.

Nachdem die model database erstellt wurde, wird der Solver Abaqus Standard in der Methode solve aufgerufen. Dies erfolgt durch einen Systemaufruf, der jedoch nicht explizit, sondern im Abaqus Kernel implementiert ist.

Die Auswertung der von Abaqus Standard erstellten output database erfolgt durch die Methode evaluate, die in der abgeleiteten Klasse nicht implementiert ist, da sie bereits in der Basisklasse allgemeingültig implementiert ist. In der abgeleiteten Klasse ist jedoch zusätzlich eine Methode zur Definition von Eigenspannungen implementiert, die gemessene Eigenspannungen mithilfe des Abaqus Kernels als rotationssymmetrischen field output in die output database integriert. Die Methode evaluate gibt die berechneten Walker-Schädigungen als csv-Datei aus.

Die abgeleitete Klasse erbt die Methode postprocess vollständig von der Basisklasse. Sie ist aufgrund der einfacheren Integrierbarkeit von Bibliotheken und des höheren Komforts beim Programmieren in Python 3 implementiert und wird durch einen Systemaufruf aktiviert.

Alle allokierten Ressourcen der Instanz der abgeleiteten Klasse werden durch den Destruktor der Basisklasse aus dem Programmspeicher gelöscht. Optional werden entstandene Simulationsdaten gelöscht.

## 4 Testen abgeleiteter Klassen

Automatisierte Berechnungsabläufe sind nur dann eine Hilfe für Berechnungsabteilungen und nur dann sinnvoll in Optimierungsalgorithmen zu verwenden, wenn sie zuverlässig funktionieren und wenn der Algorithmus den Nutzer warnt, wenn die Grenzen seiner Anwendbarkeit überschritten werden.

Wenn der Quellcode geändert wird, müssen nicht nur die neuen Funktionalitäten getestet werden, sondern auch die bereits vor der Änderung des Quellcodes vorhandenen Funktionalitäten, da es möglich ist, dass diese versehentlich beschädigt wurden. Würden die Tests manuell durchgeführt, würden sie den Fortschritt in der Weiterentwicklung abgeleiteter Klassen ausbremsen. Daher werden sie automatisiert.

Das grundlegende Problem beim Testen der Software ist, dass zunächst keine korrekten Lösungen der modellierten physikalischen Probleme bekannt sind. Daher müssen andere Sachverhalte getestet werden. Regressionstest überprüfen, ob die vorliegende Version des Programms bei gleichen Eingabedaten gleiche Ausgabedaten liefert wie eine ältere Version. So muss die Lösung der älteren Version nur einmal manuell überprüft werden. Beispielsweise können die Walker-Flächen-Diagramme, die mit zwei unterschiedlichen Versionen erzeugt wurden, verglichen werden. So lassen sich zuverlässig Fehler identifizieren, allerdings sprechen diese Tests auch auf gewünschte Veränderungen, beispielsweise eine Verbesserung der Netzqualität, an.

Die Netzqualität lässt sich mithilfe der Methode verifyMeshQuality testen. Diese wurde zur manuellen Inspektion von erzeugten Netzen in Abaqus/CAE integriert. Durch zufälliges Generieren von Eingabedaten für ein automatisiertes Simulationsschema kann für einen Eingabeparameterraum sichergestellt werden, dass bei der Erstellung des FE-Netzes im automatisierten Simulationsschema immer definierte Gütekriterien eingehalten werden. Diese Überprüfung kann auch direkt in das Simulationsschema integriert werden, sodass bei Anwendung immer sichergestellt wird, dass das Netz definierten Kriterien entspricht. Das ist als Erweiterung der bereits in Abaqus implementierten Überprüfung des input files beim Starten eines Berechnungsjobs zu verstehen.

Analog zur Netzqualität kann auch das Konvergenzverhalten von Simulationsschemata mit zufällig generierten Eingabedaten getestet werden. Je nachdem, wie aufwendig die mithilfe des Simulationsschemas generierten FE-Modelle sind, dauern diese Tests jedoch sehr lange.

Das Fehlermanagement wird durch das Erstellen von fehlerhaften Eingabedaten und den Vergleich der ausgegebenen mit der gewünschten Fehlermeldung getestet.

Die beschriebenen Tests sind empfindlich gegenüber Anpassungen der Simulationsschemata. Insbesondere eine Änderung der Eingabedaten bedeutet, dass die Tests entsprechend angepasst werden müssen. Insgesamt ist eine tiefere wissenschaftliche Aufarbeitung des automatisierten Testens von Simulationsschemata wünschenswert.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein Simulationsschema und seine Umsetzung in einer generischen Programmstruktur dargestellt. Die Implementierung der generischen Programmstruktur sowie die Vernetzung zwischen dieser und unterschiedlichen kommerziell verfügbaren sowie selbst geschriebenen Softwaremodulen wurde beschrieben. Möglichkeiten zum automatisierten Testen von abgeleiteten Klassen wurden aufgezeigt.

## Literatur

- [1] Deese, K., Glamsch, J. u. Rieg, F.: Automatisierung der Strukturoptimierung für eine einfache und fehlerfreie Prozesskette. NAFEMS-Magazin 46 (2018) 2
- [2] Glamsch, J., Deese, K. u. Rieg, F.: Methods for Increased Efficiency of FEM-Based Topology Optimization. International Journal of Simulation Modelling 18 (2019) 3, S. 453–463
- [3] Forschungskuratorium Maschinenbau: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. FKM-Richtlinie. Frankfurt am Main: VDMA-Verl. 2012
- [4] A. C. Bergan, F. Leone u. S. Boys: Abaqus User Subroutine Verification (Abaverify), 2016. <https://github.com/nasa/abaverify>
- [5] Geilen, M. B., Klein, M. u. Oechsner, M.: Building Models with 3D-Scanned Geometry using Abaqus Scripting - A Case Study on Disc Springs. 3DEXPERIENCE Conference - Design, Modeling & Simulation. Darmstadt 2019
- [6] Geilen, M. B., Klein, M. u. Oechsner, M.: Spring\_stack - ein Modul zur numerischen Simulation von Tellerfedern und Tellerfedersäulen. Ilmenauer Federntag 2019. Ilmenau 2019, S. 77–86
- [7] Geilen, M. B., Klein, M. u. Oechsner, M.: A Novel Algorithm for the Determination of Walker Damage in Loaded Disc Springs. Materials 13 (2020) 7, S. 1661
- [8] Deese, K., Geilen, M. B. u. Rieg, F.: A two step smoothing algorithm for an automated product development process. International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM) 17 (2018) 2
- [9] Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F. u. Ranzuglia, G.: Meshlab: an open-source mesh processing tool. Eurographics Italian chapter conference, Bd. 2008. 2008, S. 129–136
- [10] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W. u. Bright, J.: SciPy 1.0--Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. arXiv preprint arXiv:1907.10121 (2019)
- [11] Barber, C. B., Dobkin, D. P. u. Huhdanpaa, H.: The quickhull algorithm for convex hulls. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS) 22 (1996) 4, S. 469–483
- [12] Byrd, R. H., Lu, P., Nocedal, J. u. Zhu, C.: A limited memory algorithm for bound constrained optimization. SIAM Journal on Scientific Computing 16 (1995) 5, S. 1190–1208
- [13] Zhu, C., Byrd, R. H., Lu, P. u. Nocedal, J.: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS) 23 (1997) 4, S. 550–560
- [14] Walker, K.: The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum. In: Effects of environment and complex load history on fatigue life. ASTM International 1970
- [15] NASALIFE-Component fatigue and creep life prediction program, Gyekenyesi, J. Z., Murthy, P. L. N. u. Mital, S. K., 2014

### **Danksagung**

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojekts AVIF A 309 „Bewertung des Einflusses realer Bauteilgeometrien auf die Beanspruchbarkeit von Tellerfedern anhand numerischer Simulation“. Dieses wird gefördert von der gemeinnützigen Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V. Zweck der Stiftung ist die Förderung der Forschung auf dem Gebiet der Stahlverarbeitung und –anwendung in der Bundesrepublik Deutschland. Geprüft wurde das Forschungsvorhaben von einem Gutachtergremium der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF), das sich aus Sachverständigen der Stahl anwendenden Industrie und der Wissenschaft zusammensetzt. Begleitet wird das Projekt von einem Arbeitskreis des VDFI (Verband der deutschen Federnindustrie e.V.).

# Effiziente und strukturierte Bewertung von allgemeinen Gewindeverbindungen mittels FEM auf Basis des örtlichen Konzepts

Florian Schüssler, Moritz Strummer (ACAM Engineering)

Schraube-Mutter Verbindungen und Gewindeverbindungen im Allgemeinen zählen zu den meist verwendeten Fügetechniken im Maschinenbau und in den verwandten Disziplinen. Aus diesem Grund besteht ein großes Interesse darin, Vorhersagen über die Lebensdauer dieser Verbindungen zu tätigen und entsprechend mit konstruktiven Gegenmaßnahmen, falls notwendig, entgegenzuwirken. Problematisch ist bei Gewindeverbindungen unter zyklischer Belastung vor allem die Kerbwirkung durch die notwendigen Gewindegänge, wodurch die Lebensdauer stark eingeschränkt wird. Die Auswertung der Lebensdauer mit Hilfe des örtlichen Konzepts ist anspruchsvoll, da sich diverse Nichtlinearitäten koppeln und somit ein stark iterativer Prozess notwendig ist.

Bei Gewindeverbindungen muss bei Versagen zwischen den klassischen und den allgemeinen unterschieden werden. Klassische Verbindungen sind jene, bei denen ein Versagen im ersten Gewindegang auftritt, wie beispielsweise bei Schraube-Mutter-Verbindungen. Bei allgemeinen Verbindungen muss dies nicht der Fall sein. Hier besteht die Wahrscheinlichkeit, dass ein Versagen an anderen belasteten Stellen auftritt, beispielsweise bei unterschiedlichen Werkstoffkombinationen. Zur Lebensdauerbewertung von klassischen Gewindeverbindungen wird in der Industrie häufig die VDI2230 herangezogen, welche hauptsächlich auf dem Nennspannungskonzept basiert, bei dem jedoch nicht die Form des Querschnitts berücksichtigt wird. Beim örtlichen Konzept hingegen werden die gesamte Geometrie und somit jeder Gewindegang berücksichtigt. Somit können mit Hilfe von diesem auch allgemeine Gewindeverbindungen betrachtet werden.

Die Lebensdauerbewertung auf Basis des örtlichen Konzepts oder auch Kerbgrundkonzepts ist bei Schrauben jedoch selten dokumentiert und es existiert wenig Literatur dazu. Die einzige anwendungsorientierte Vorgehensweise wurde diesbezüglich 2014 vom Forschungskuratorium Maschinenbau im Vorhaben 297 präsentiert, in dem ein Konzept vorgestellt wird mit dem Gewindeverbindungen unter zyklischer Belastung untersucht werden können. Diese Vorgehensweise wurde konzeptgerecht adaptiert und die entsprechende Anwendung nachfolgend beschrieben.

## 1 Einleitung und Motivation

Wir wurden als Ingenieurbüro, das den Fokus auf CAE- Dienstleistung und PreSales hat, immer häufiger mit Anfragen zur Bewertung von allgemeinen Gewindeverbindungen, welche nicht durch die VDI2230 abgedeckt sind, konfrontiert. Da Gewindeverbindungen häufig sind und im Sondermaschinenbau, oder bei großen Maschinen Sondergewinde oftmals besser den Anforderungen genügen, gibt es auch entsprechenden Bedarf an der Bewertung und Dimensionierung. Das FKM Vorhaben 297 liefert dafür die ideale Basis, jedoch musste für die praxisgerechte Anwendung auf Dienstleistungsbasis ein entsprechendes Bewertungskonzept etabliert werden, was uns gelungen ist und nachfolgend beschrieben wird.

## 2 Simulationsablauf

Zur örtlichen Bewertung mit Hilfe des modifizierten Verfahrens nach Schneider wird ein fest vorgegebener Prozess durchgeführt, der unabhängig von Gewinde- und Belastungsart ist. Durch diesen strikten Ablauf ist Reproduzierbarkeit und Anwendbarkeit durch einen unerfahrenen Nutzer gewährleistet.

Nach Auftragseingang und Ableitung eines Grad-Modells werden die benötigten Materialkennwerte mit Hilfe von Excel über die Implementierung der Ramberg-Osgood-Beziehungen und des UMLs für die elastisch-plastischen Analysen abgeleitet. Im Anschluss erfolgt eine 2D-Vernetzung, wobei im Bereich des Gewindegrunds und der Flanken auf eine Quad-Vernetzung geachtet werden muss. Das 2D-Netz wird dann je nach Grad-Modell um diese

Gradanzahl rotiert, um ein Volumennetz zu erhalten. Im Anschluss wird der maximal belastete Knoten bei der höchsten Betriebslast mit Hilfe von einer elastischen FE-Berechnung ermittelt. Danach können die nichtlinearen Materialparameter in die Software implementiert und die lokalen Spannungs-Dehnungs-Zustände abgebildet werden. Die Auswertung der Hysterese und die Berechnung des Schädigungsparameters erfolgt wiederum in Excel. Zuletzt erfolgt der Vergleich der lokalen Schädigung mit der ertragbaren Schädigung aus der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie. Der Ablauf in der Praxis mit Hilfe von FEMAP als Pre-Prozessor und Nastran als Solver wird in Abb. 1 verdeutlicht.

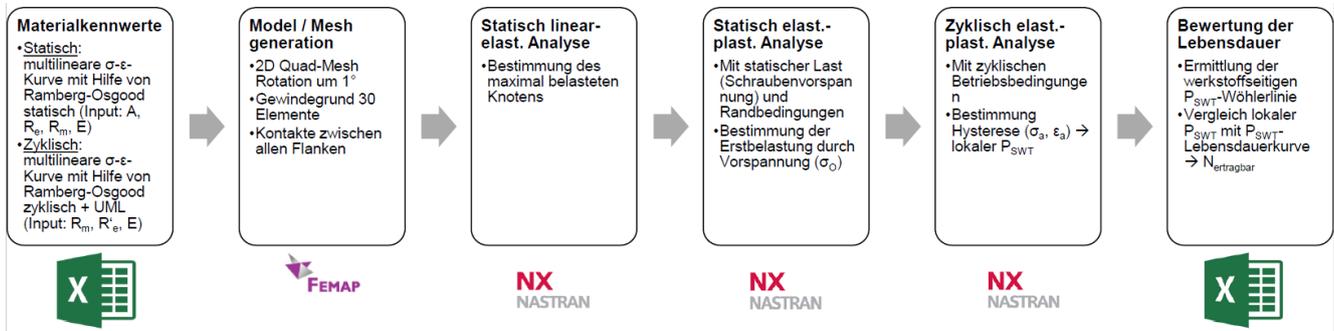


Abb. 1: Ablauf zur Bewertung anhand des örtlichen Konzepts

### 3 Erforderliche Parameter

Bei Spannungs-Dehnungs-Kurven muss grundsätzlich zwischen der zügigen (statischen) und der zyklischen Kurve unterschieden werden. Diese sind bei jedem Werkstoff klar voneinander zu unterscheiden. So können metallische Werkstoffe grundsätzlich 2 verschiedene Materialverhalten aufweisen:

- entfestigendes Verhalten
- verfestigendes Verhalten

Dieses Verhalten wird in den jeweiligen Spannungs-Dehnungs-Kurven deutlich. Verläuft die statische Kurve ab der Elastizitätsgrenze oberhalb der Zyklischen, dann spricht man von entfestigendem Verhalten. Verlaufen die Kurven entgegengesetzt zum vorherigen Fall, bezeichnet man dies als verfestigendes Verhalten. Daraus folgt, dass verfestigende Werkstoffe bei zyklischer Belastung eine erhöhte Belastbarkeit aufweisen, und die Schwingfestigkeit wird somit gesteigert (Radaj, et al., 2007).

Zur Bestimmung von Werkstofffließkurven existieren verschiedene Möglichkeiten. In dieser Arbeit werden folgende Ansatz herangezogen:

- Ramberg-Osgood-Gesetz mit statischen Parametern (SSDK)
- Ramberg-Osgood-Beziehung mit zyklischen Parametern und dem Coffin-Manson-

#### Ansatz (ZSDK)

So wird eine Ermittlung der Kurven ohne aufwendige Versuche sichergestellt. Die hier berechneten Datensätze werden später zur Definition des Werkstoffverhaltens im FE-Programm Femap benötigt.

Als Basis für die Erstellung eines FE-Modells werden im ersten Schritt die notwendigen Materialparameter für die elastisch-plastischen Analysen ermittelt. Neben den Kennwerten für die Modellierung wird zur Bewertung der Lebensdauer im örtlichen Konzept die werkstoffseitig ertragbare Schädigungsparameter-Wöhlerlinie benötigt.

Für die elastisch-plastischen Analysen (sowohl statisch als auch zyklisch) sind die relevanten Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge als Eingabe notwendig. Dies erfolgt mit Hilfe eines multilinearen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Ansatzes, der durch die Ramberg-Osgood-Beziehung mit statischen (Gl.1) und zyklischen (Gl.2) Parametern bestimmt wird (Fiedler, et al., 2016).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \cdot \left(\frac{\sigma}{R_e}\right)^n \quad (1)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2)$$

Die Ermittlung der statischen  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurve basiert auf folgenden Materialkennwerten: Zugfestigkeit  $R_m$ , Streckgrenze  $R_{p0,2}$ , Elastizitätsmodul  $E$  und der Bruchdehnung  $A$ . Daraus werden die Gleichmaßdehnung  $A_g$  und der Ramberg-Osgood-Koeffizient  $n$  ermittelt, und somit ist die Gleichung für den statischen Fall vollständig definiert. Für die zyklische  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurve werden lediglich der Elastizitätsmodul  $E$  und die Zugfestigkeit  $R_m$  benötigt. Mit Hilfe des Uniform Material Law werden der zyklische Verfestigungskoeffizient  $K'$  und der Verfestigungsexponent  $n'$  bestimmt.

Da in diesem Verfahren die Bewertung mit Hilfe des Schädigungsparameters  $P_{SWT}$  getätigt wird, ist folglich die  $P_{SWT}$ -Wöhlerlinie zu ermitteln. Diese ist über den Coffin-Manson-Ansatz direkt von der Lebensdauer abhängig darstellbar (siehe. Gl.3) (Wächter, 2016).

$$P_{SWT}(N) = \sqrt{\sigma_f' \cdot (2N)^{2b} + \sigma_f' \cdot \varepsilon_f' \cdot E (2N)^{b+c}} \quad (3)$$

Die aus dieser Gleichung ermittelte Lebensdauerkurve dient später zum Vergleich mit dem lokalen Schädigungsparameter, wodurch ein direktes Ermitteln der ertragbaren Schwingspielzahl der Verbindung möglich ist. Die Parameter  $\sigma_f'$  und  $\varepsilon_f'$  werden ebenso mit Hilfe des Uniform Material Law ermittelt (siehe Abb. 2).

Die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven mit verschiedenen Eingangsdaten (aus der Literatur und nach UML) für den Werkstoff 34CrNiMo6 werden in Abb. 3 gezeigt. Diese Kurven werden im weiteren Verlauf als Eingabe in das FE-Programm benötigt, da die M16-Verbindung der Festigkeitsklasse 12.9 ist.

Parameter	unlegierte und niedrig legierte Stähle	Aluminium- und Titanlegierungen
$K' =$	$1,65 \cdot R_m$	$1,61 \cdot R_m$
$n' =$	0,15	0,11
$\sigma_f' =$	$1,50 \cdot R_m$	$1,67 \cdot R_m$
$b =$	-0,087	-0,095
$\varepsilon_f' =$	$0,59 \cdot \psi$	0,35
$c =$	-0,58	-0,69

wobei für  $\psi$  gilt:

$$\psi = \begin{cases} 1 & \text{für } \frac{R_m}{E} \leq 3 \cdot 10^{-3} \\ (1,375 - 125 \cdot \frac{R_m}{E}) \geq 0 & \text{für } \frac{R_m}{E} > 3 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

Abb. 2: Beziehungen des UML

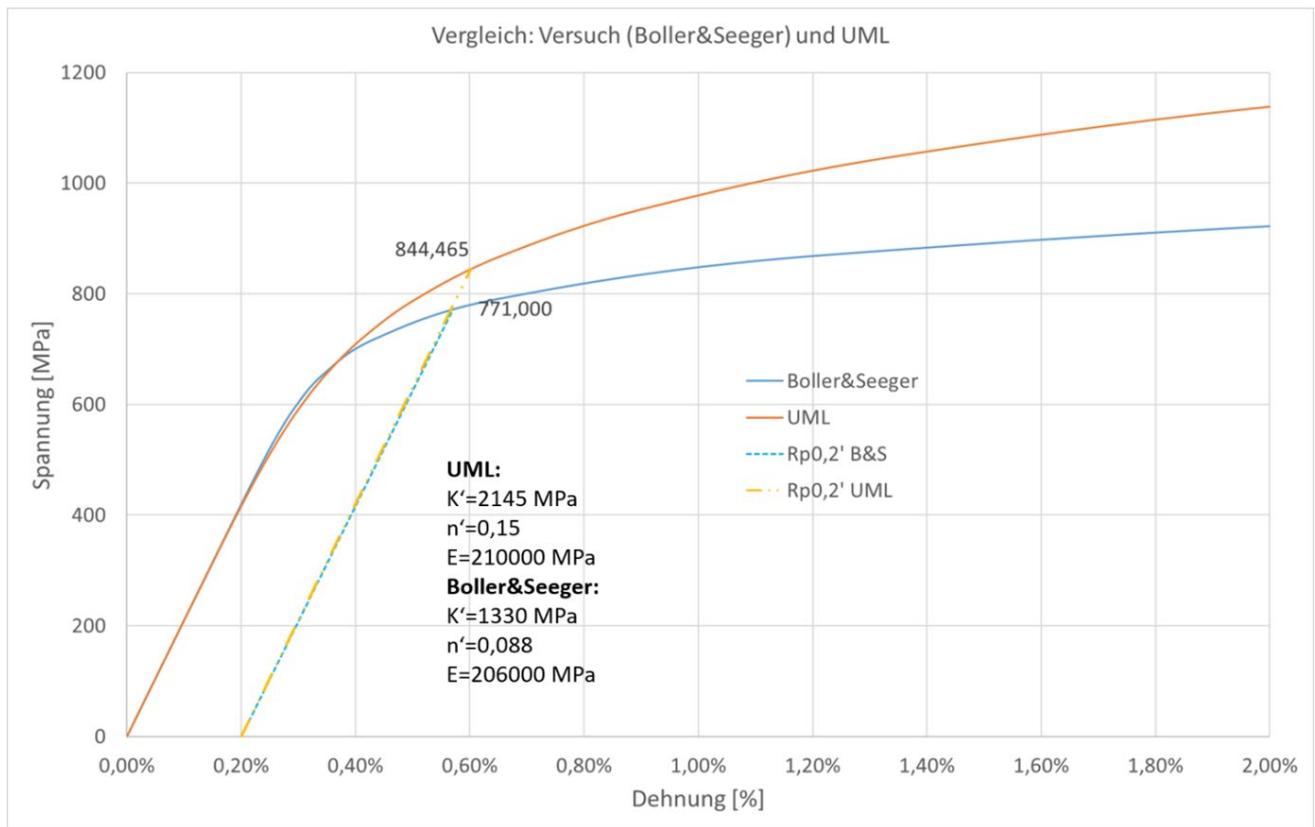


Abb. 3: Verlauf der werkstoffseitigen zykl.  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven für 34CrNiMo6

#### 4 Finite Elemente Modell

Das entwickelte 3D-Modell basiert auf den Daten der M16 Regelgewinde-Verbindung nach DIN 13-1. Aus dem 360° Volumenmodell wurde anschließend das 1° Volumenmodell abgeleitet. Die Wahl dieser Modellierung anstatt der dreidimensionalen ist zulässig, da gute Konformität des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens aus dem Vergleich mit Versuchen und 3D-Modellen existieren (Seybold, 2006). Dazu wurde die Bolzenfläche um ihre Symmetrieachse rotiert und die Mutter ebenso um ihre.

Das FE-Modell besteht somit aus 2 Komponenten, die über sog. „Zero Gap“ bzw. „Calculated“ „Surface-to-Surface“ Kontakte verbunden sind. Es entsteht im Bereich der Flanken ein flächiger Kontakt, wodurch eine 3D-Kontakt-Modellierung notwendig ist. Als Master wird die gröber vernetzte Mutterflanke zugewiesen, wohingegen Slave immer der feinere Bereich ist (hier die Bolzenflanke).

Als Kontaktbedingung wurde die Option „Small Sliding“ ausgewählt, da die Kontaktbedingungen bei der Inkrementierung möglichst gleichbleiben sollen. Zusätzlich wird die Einstellung „No Separation“ verwendet, die für eine Stabilisierung der Kontakte bei Lastwechselforgängen sorgt.

Neben den Kontaktbedingungen wird die obere Fläche der Mutter gegen Verschieben in vertikaler Richtung gesperrt. Die Lasteinleitung erfolgt über die obere Schraubenbolzenfläche, unabhängig davon ob statisch oder zyklisch. Um eine plausible eindimensionale Modellierung zu gewährleisten, wird jeweils auf der Vorder- und Rückseite der Schraube und Mutter eine Symmetrierandbedingung gesetzt. Abb. 4 zeigt die Geometrie mit Randbedingungen, Lasten und zusätzlich die Partitionierungen für die Vernetzung.



„Subcases“ realisiert, wobei die Lastaufbringung immer in Form einer Rampenfunktion erfolgt. Eine schematische Abbildung der Last-Zeit-Funktion ist in Abb. 6 zu sehen. Für die elastisch-plastischen Analysen werden neben dem Elastizitätsmodul  $E$ , der Dichte  $\rho$  und der Poissonzahl  $\nu$  zusätzlich die Streckgrenze  $R_{p0,2}$  bzw.  $R'_{p0,2}$  (bei schwingender Last), die Spannungs-Dehnungs-Kurve (zyklisch oder statisch je nach Belastungsart) und ein Materialmodell benötigt. Für die Berechnung der Vorspannung wird lediglich die isotrope Verfestigungsregel ausgewählt. Bei der zyklischen Last wird der „Mixed Hardening“ Ansatz gewählt, der außerdem die kinematische Verfestigung nach Prager und Ziegler besitzt.

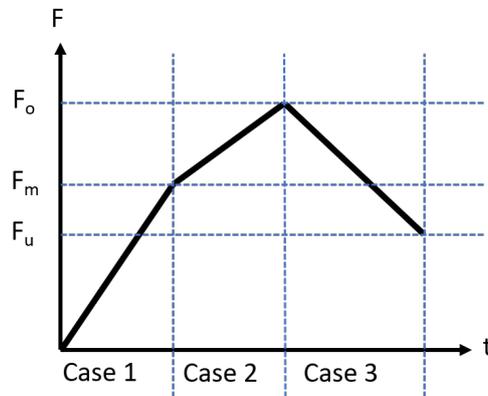


Abb. 6: Last-Zeit-Funktion

## 5 Ergebnisse der numerischen Untersuchung und Bewertung der Lebensdauer

In diesem Kapitel wird der Simulationsablauf inklusive der Bewertung nochmals verdeutlicht. Anschließend werden die Ergebnisse präsentiert und die Aussagekraft durch einen Vergleich mit der Literatur diskutiert

### 5.1 Allgemeiner Ablauf der Bewertung

Im **ersten Schritt** wird die werkstoffseitige Belastbarkeit mit Hilfe der originalen  $P_{SWT}$ -Wöhlerlinie beschrieben. Sie dient zum Vergleich des lokalen Schädigungsparameter  $P_{SWT}$  mit der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie. Als Alternative zur originalen Wöhlerlinie kann die bilineare Annäherung verwendet werden. Diese beiden Ansätze wurden im Zuge der Arbeit verglichen. Anschließend werden die ertragbaren Wöhlerlinien mit der Stützziffer multipliziert, um die Stützwirkung des Werkstoffs zu berücksichtigen. Dadurch wird die Belastbarkeit erhöht und somit auch die Lebensdauer. Zusätzlich erfolgt eine Korrektur der Ausfallwahrscheinlichkeit  $P_A$  durch den Faktor  $f_m$  auf 50%.

Im **zweiten Schritt** wird die maximal belastete Stelle in der Verbindung bestimmt, welche im Knoten mit der höchsten Normalspannung liegt. Von dort aus geht nämlich der Bauteilanriss aus. Ermittelt wird diese über eine linear elastische Berechnung unter der höchsten Betriebslast, aber unter statischem Werkstoffverhalten.

Im **dritten Schritt** wird die Oberspannung  $\sigma_0$  durch die Schraubenvorspannung ermittelt. Dazu wird eine statische FE-Berechnung (elastisch-plastisch) mit der Vorspannkraft der Schraube durchgeführt und so eine lokale SSDK ermittelt. Dies ist die Erstbelastung der Schraube. Dieser Schritt wird im nachfolgend gezeigten Beispiel nicht benötigt, da die hier analysierte M16-Verbindung nicht verspannt wird.

Im **vierten Schritt** wird die lokale Spannungs- und Dehnungsschwingbreite bedingt durch die zyklische Betriebslast berechnet. Dies erfolgt mit Hilfe einer zyklischen FE-Analyse (elastisch-plastisch). Mit Hilfe der Kennwerte der Hysterese kann der lokale Schädigungsparameter ( $P_{SWT}$  oder  $P_j$ ) berechnet werden. In diesem Vorhaben erfolgt die Auswertung mit Hilfe von  $P_{SWT}$ .

Im **fünften Schritt** erfolgt dann eine Gegenüberstellung des lokalen Schädigungsparameters mit der Schädigungsparameter-Wöhlerlinie, wodurch die Lebensdauer direkt eruiert werden kann und somit der Bereich der Schwingfestigkeit festgelegt wird.

### 5.2 Ergebnisse unter hoher Mittellast

Die hier gezeigten Ergebnisse basieren auf einer schwellenden Belastung mit einem Mittelspannungseinfluss von  $S_m=0,5R_{p0,2}$  und verschiedenen Amplituden. Diese Werte wurden gewählt, um die Vergleichbarkeit mit dem FKM-Vorhaben Nr.297 herzustellen. Die Beanspruchung wurde mit dem Verlauf aus Abb. 6 in 3 Schritten aufgebracht. Vor der elastisch-plastischen Analyse findet die Ermittlung des maximal belasteten Knoten bei einer elastischen Analyse statt. Von diesem Knoten geht der technische Anriss aus; das bedeutet, dieser ist schädigungsrelevant. Im Post-Processing der zyklisch elastisch-plastischen Analyse wird an diesem Knoten das  $\sigma$ - $\epsilon$ -Verhalten ausgewertet. Abb. 7 zeigt diese Kurven für verschiedene Amplituden. Aus diesen werden jeweils die Oberspannung, die Dehnungs- und Spannungsschwingbreite ermittelt. Aus den Kenngrößen der Hysterese kann jeweils die Amplitude für Spannung und Dehnung berechnet werden. Im Anschluss ist der lokale Schädigungsparameter  $P_{SWT}$  zu eruiieren. Dies erfolgt über  $P_{SWT} = \sqrt{(\sigma_0) \cdot \epsilon_a \cdot E}$ . So ist es möglich, die bauteilseitige Schädigung mit der werkstoffseitigen zu vergleichen. Dazu wird die  $P_{SWT}$ -Wöhlerlinie, wie in Kap. 3 gezeigt, ermittelt. Um einen Vergleich zwischen verschiedenen Wöhlerlinien Formen zu ziehen, wird sowohl eine Bewertung mit dem originalen als auch dem bilinearem Ansatz durchgeführt. Die Stützzahlen sind für die bilineare Form bei  $N_1 = 10, N_2 = 10^3, N_3 = 10^5$  nach Fiedler et al. gewählt. Anschließend wird eine Korrektur der Ausfallwahrscheinlichkeit durch den Faktor  $f_m=0,94$  durchgeführt.

Das adaptierte Bewertungsverfahren richtet sich nach jenem von Schneider, welches in *Örtliche Bewertung der Schwingfestigkeit von Gewindeverbindungen* vorgestellt wurde.

Die Adaptierung wurde vor allem hinsichtlich der Praktikabilität vorgenommen. Denn das hier gezeigte Verfahren kommt ohne jegliche Werkstoffversuche aus und ermöglicht eine schnelle Aussage über die Schwingfestigkeit von Gewindeverbindungen. Zudem ist durch die Erweiterung einer bilinearen Wöhlerlinie ein direktes Ablesen der ertragbaren Schwingspielzahl möglich.

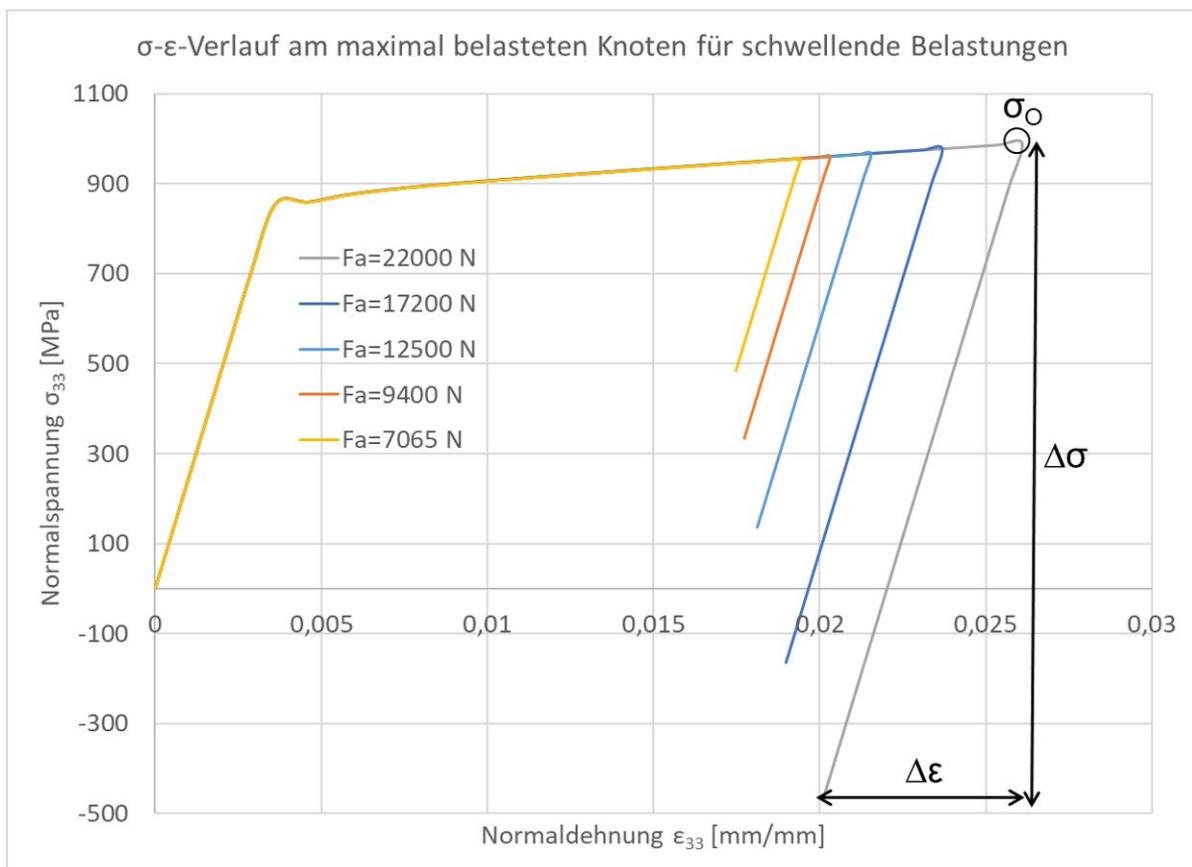


Abb. 7: lokale Spannungs-Dehnungs-Kurven

Relevante Aussagekraft der Ergebnisse liefert der Vergleich zwischen den berechneten Bauteilwöhlerlinien dieser Arbeit mit denen nach *Örtliche Bewertung der Schwingfestigkeit von Gewindeverbindungen II* (2014). Abb. 8 zeigt die Gegenüberstellung der Bauteilwöhlerlinien. Neben der Berücksichtigung der Ergebnisse des FKM Forschungsberichts wird ebenso die Wöhlerlinie der VDI 2230 grafisch abgebildet. Alle Kurven in dieser Grafik, ausgenommen jener nach der vereinfachten Methode nach FKM, sind auf eine Ausfallwahrscheinlichkeit von  $P_A = 50\%$  normiert. Der Vergleich liefert, dass die Berechnung mit dem bilinearen Ansatz die Ergebnisse der Versuche am besten annähert.

Der Wert der Dauerfestigkeit wird marginal überschätzt, ansonsten wird eine gute Übereinstimmung im Kurzzeitfestigkeits-, Zeitfestigkeits- und Dauerfestigkeitsbereich festgestellt. Die Festlegung der geringen Grenzschwingspielzahl beim bilinearen Verhalten kommt in diesem Beispiel der Grenzschwingspielzahl aus dem Versuch der Literatur sehr nahe. Zusammengefasst gesagt, liefert die Modifikation nach der bilinearen Methode insgesamt eine gute Annäherung der Versuchskurve. Die VDI 2230 hingegen weist eine starke Überschätzung im Bereich vor der Dauerfestigkeit auf, liefert jedoch die konservativste Annahme für die Dauerfestigkeit selbst. Die Berechnung mit der originalen Wöhlerkurve nach UML schätzt die Dauerfestigkeit im Vergleich mit dem Versuch am besten ab. Die Zeitfestigkeit wird überschätzt und die Grenzschwingspielzahl wird hingegen durch die Vorabfestlegung unterschätzt. Entsprechend den Erwartungen überschätzt die originale Kurve nach Versuchsdaten aus der Literatur die gesamte Versuchskurve weitestgehend. Problematisch ist vor allem die starke Überschätzung der Dauerfestigkeit. Dies ist vor allem auf die Abweichung des zyklischen Schwingfestigkeitsexponenten  $b$  zurückzuführen.

Beim Vergleich mit der rechnerisch ermittelten Bauteilwöhlerlinie nach der vereinfachten Methode nach FKM zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit dem bilinearen Ansatz dieser Arbeit. Wie bereits in „*Örtliche Bewertung der Schwingfestigkeit von Gewindeverbindungen*“ (2011) gezeigt, liefert auch in dieser Arbeit der Schädigungsparameter  $P_{SWT}$  bei hoher Mittelspannung zufriedenstellende Ergebnisse. Durch die Anwendung von  $P_{SWT}$  kann keine Mehrachsigkeit der Spannungen im Gewindegrund berücksichtigt werden. Bei Gewindeverbindungen unter hoher Mittelspannung wirkt sich jedoch selbst ein hoher Grad an Mehrachsigkeit nicht auf die Schwingfestigkeit aus (R. Schneider, 2011).

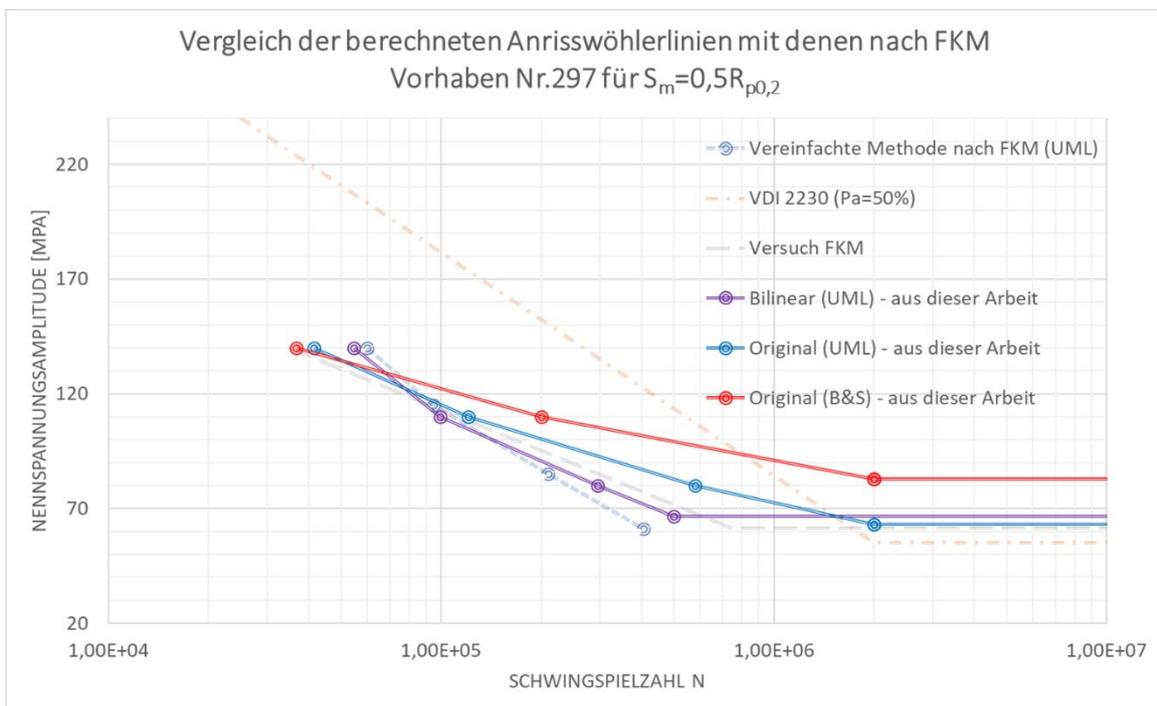


Abb. 8: Vergleich der Anriss-Wöhlerlinien

## 6 Fazit

Die beschriebene Vorgehensweise schafft uns und unseren Kunden einen Wettbewerbsvorteil, da Gewindeverbindungen komplett neu gedacht werden können. Selbst entworfene Gewindekonturen, die entsprechende Vorteile mit sich bringen, können nun dimensioniert und bewertet werden. Dieses Bewertungskonzept wurde bereits erfolgreich bei 3 unterschiedlichen Kundenprojekten eingesetzt.

## 7 Literatur

- Fiedler, M., Varfolomeev, I. und Wächter, M. 2016.** Richtlinie Nichtlinear. Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens. s.l. : VDMA Verlag, 2016. FKM Project No. 301, No. 326, final report. 2016.
- Haibach, E. 2005.** Betriebsfestigkeit. 3. Wiesbaden : Springer Verlag, 2005.
- Oechsner, M., et al. 2014.** Örtliche Bewertung der Schwingfestigkeit von Gewindeverbindungen II. s.l. : VDMA Verlag, 2014.
- Radaj, D. und Vormwald, M. 2007.** Ermüdungsfestigkeit. s.l. : Springer, 2007.
- Schneider, R. 2011.** Örtliche Bewertung der Schwingfestigkeit von Gewindeverbindungen. Darmstadt : TU Darmstadt, 2011.
- Seybold, R. 2006.** Finite-Elemente-Simulation örtlicher Beanspruchungen in Schraubengewinden. s.l. : Shaker Verlag, 2006.
- Wächter, M. 2016.** Zur Ermittlung von zyklischen Werkstoffkennwerten und Schädigungsparameterwöhlerlinien. Clausthal : s.n., 2016.

# Eine Raum-Zeit-Finite-Elemente-Methode für die Entleerung von Silos

Dr.-Ing. Sven Reinstädler, CENIT AG

Es ist ein Verfahren vorgestellt, mit dem Entleerungen von dünnwandigen Silos numerisch analysiert werden können. Das Verformungsverhalten der Siloschalen ist mit einem kontinuumsmechanischen Modell für elastisches Materialverhalten beschrieben. Das mechanische Verhalten des Schüttgutes ist als viskoplastisches Fluid mit den Navier-Stokes-Gleichungen formuliert. Dabei wird der Phasenübergang zwischen nahezu ruhendem und strömendem Schüttgut mit einer Regularisierung modelliert. Die Lage der freien Schüttgutoberfläche ist implizit mit einer vorzeichenbehafteten Abstandsfunktion beschrieben. Sie ist nach der Level-Set-Methode in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsfeldes durch das Raum-Zeit-Gebiet bewegt. Mit Berücksichtigung der Wandreibung zwischen Schüttgut und Siloschale wird ein Gesamtmodell vorgestellt, mit dem das Zusammenwirken der Verformung von Siloschalen mit dem Strömungszustand von Schüttgütern numerisch untersucht werden kann.

Die Modellgleichungen sind mit dem Prinzip der virtuellen Arbeit angegeben. Die Approximation der Zustandsgrößen erfolgt sowohl im Raum als auch in der Zeit mit Polynomansätzen. Die Schalen werden mit gemischt-hybriden Elementen unter Verwendung von vollständigen, quadratischen Lagrange-Ansätzen diskretisiert. Die Mechanik von inkompressiblen Fluiden ist mit Taylor-Hood-Elementen angenähert, deren Lösungsverhalten mit Stabilisierungen verbessert ist. Die Lösung der diskretisierten Modellgleichungen erfolgt mit dem Newton-Raphson-Verfahren. Dies schließt Modellgleichungen einer Pseudo-Struktur mit ein, mit der das Gebiet des Fluids an die deformierbare Struktur angepasst wird.

Für ein effizientes Verfahren werden im Inneren des Silos nur die Elemente ausgewertet, die vom Fluid durchströmt werden. So ist zwischen aktiven und passiven Elementen unterschieden. Die Auswertung von Elementen mit freier Oberfläche erfolgt mit Integrationsformeln, die mit einem Algorithmus für die Parkettierung von Teilgebieten vierdimensionaler Elemente bestimmt sind. Im Vergleich zu semi-diskreten Verfahren ist mit der Raum-Zeit-Finite-Elemente-Methode sichergestellt, dass die Konvergenzordnung des enthaltenen Zeitintegrationsverfahrens auch dann erhalten ist, wenn zuvor passive Elemente durch die Bewegung der freien Oberfläche innerhalb einer Raum-Zeit-Scheibe aktiviert werden. Dies und der Sachverhalt, dass die Modellgleichungen im Raum und in der Zeit mit einem einheitlichen, physikalisch motivierten Verfahren näherungsweise gelöst werden, machen die Raum-Zeit-Finite-Elemente-Methode besonders attraktiv. Die präsentierte Methodik ist auf zylindrische Silos mit zentrischen und exzentrischen Auslauftrichtern angewendet.

## 1 Motivation

Werden Silos mit einem Massenfluss zentrisch entleert, kann die Wichte des Schüttgutes bereits mit dünnen Schalen sicher abgetragen werden. Ist der Auslauftrichter exzentrisch angeordnet, werden sie verstärkt auf Biegung beansprucht. Diese Beanspruchung kann die Ausbildung von Beulen begünstigen, mit denen Schalen deutlich an Stabilität verlieren, bis hin zum Kollaps des gesamten Silos. Nicht rotationssymmetrische Lasten können auch entstehen, wenn das Schüttgut in einem exzentrisch verlaufenden Fließkanal abgetragen wird, der von konsolidiertem Schüttgut in Toten Zonen gebildet wird. Da zylindrische Schalen nur rotationssymmetrische Belastungen effizient abtragen können, ist die Analyse von Spannungszuständen in Silos während exzentrischen Entleerungen von grundlegendem Interesse.

## 2 Modellbildung und Diskretisierung

Mit dem Ziel, die Entleerung von Silos untersuchen zu können, die mit pulvrigen Schüttgütern befüllt sind, werden die Differentialgleichungen der Kontinuumsmechanik zur Modellbildung verwendet. Für Näherungslösungen wird das Prinzip der virtuellen Arbeit angewendet. Es führt auf eine Raum-Zeit-Finite-Elemente-Formulierung die im Folgenden näher diskutiert wird. Bevor auf die einzelnen Arbeitsintegrale näher eingegangen wird, wird die Unterteilung des Raum-Zeit-Gebietes in Raum-Zeit-Scheiben dargestellt. Des Weiteren wird das enthaltene Zeitintegrationsverfahren bezüglich wesentlicher Eigenschaften bewertet.

### Raum-Zeit-Finite-Elemente-Methode

Das Raum-Zeit-Kontinuum  $Q$  vereint das räumliche Gebiet  $\Omega$  mit dem Zeitbereich  $I$ . Es ist vom Rand  $P$  umschlossen, der in Bezug auf die Randbedingungen in den Dirichlet-Rand  $P^D$  und den Neumann-Rand  $P^N$  weiter unterteilt ist. Mit dem Ziel eines effizienten Verfahrens wird das Raum-Zeit-Kontinuum in einzelne Raum-Zeit-Scheiben unterteilt (siehe Abb. 1). Sie werden für sich ändernde Übergangsbedingungen nacheinander gelöst.

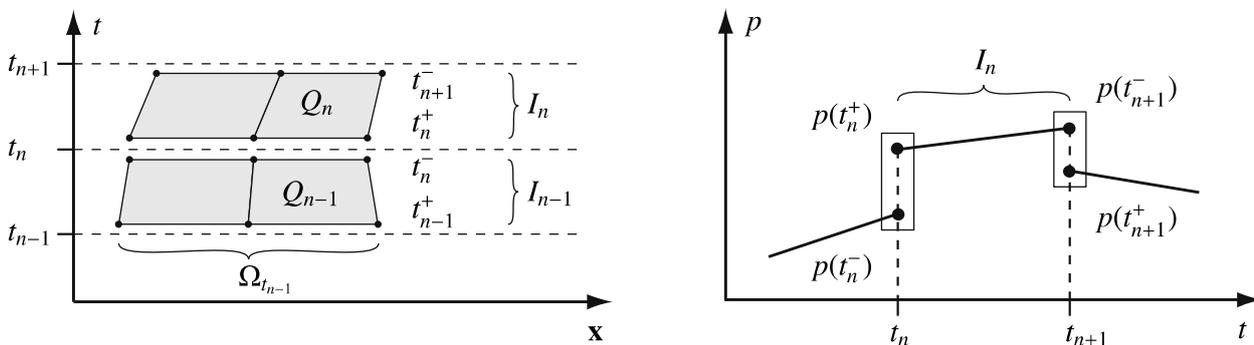


Abb. 1: Raum-Zeit-Scheiben

Mathematisch gesehen ist die Raum-Zeit-Finite-Elemente-Methode die konsistente Erweiterung der Finite-Elemente-Methode mit einem Zeitintegrationsverfahren nach Galerkin. So wird neben dem räumlichen Verlauf auch die zeitliche Entwicklung der Beschreibungsvariablen mit Polynom-Ansätzen beschrieben. Die Raum-Zeit-Finite-Elemente-Formulierung enthält Zeitableitungen erster Ordnung, sodass die zeitliche Entwicklung jeder Beschreibungsvariablen mit linearen Polynomen angenähert wird. Mit dem Ziel quadratischer Konvergenz, werden diskontinuierliche Zeitansätze verwendet [5] (siehe Abb. 1). Damit können die Variablen unmittelbar vor und nach den diskreten Zeitpunkten  $t_n$  unterschiedliche Werte annehmen, indiziert mit - beziehungsweise +.

### Zeitintegration

Die numerische Dämpfung und die Güte des zeit-diskontinuierlichen Galerkin-Verfahrens werden mit der freien Schwingung eines Ein-Masse-Schwingers bewertet. Als Referenz wird die Generalisiert- $\alpha$ -Methode mit  $\varrho_\infty = 0$  verwendet [4,8].  $\varrho$  ist der spektrale Radius,  $\varrho_\infty$  der spektrale Radius bei einer Zeitschrittweite  $\Delta t = \infty$ . In Abb. 2 sind die zu den beiden verglichenen Verfahren gehörenden spektralen Radien im Bereich  $10^{-3} < \Delta t/T < 10^3$  dargestellt.  $T$  ist die Schwingungsperiode des Ein-Masse-Schwingers. Die Verläufe zeigen, dass das zeit-diskontinuierliche Galerkin-Verfahren Schwingungen höherer Frequenzen ein wenig effektiver filtert. Die in Abb. 2 dargestellten Konvergenzen zeigen, dass die Zeitschrittweite mehr als zu halbieren ist, wenn mit der Generalisiert- $\alpha$ -Methode gleichwertige Ergebnisse berechnet werden sollen. Hierbei ist berücksichtigt, dass beim zeit-diskontinuierlichen Galerkin-Verfahren in jedem Zeitschritt nach zwei anstelle von einem Freiwert zu lösen ist.

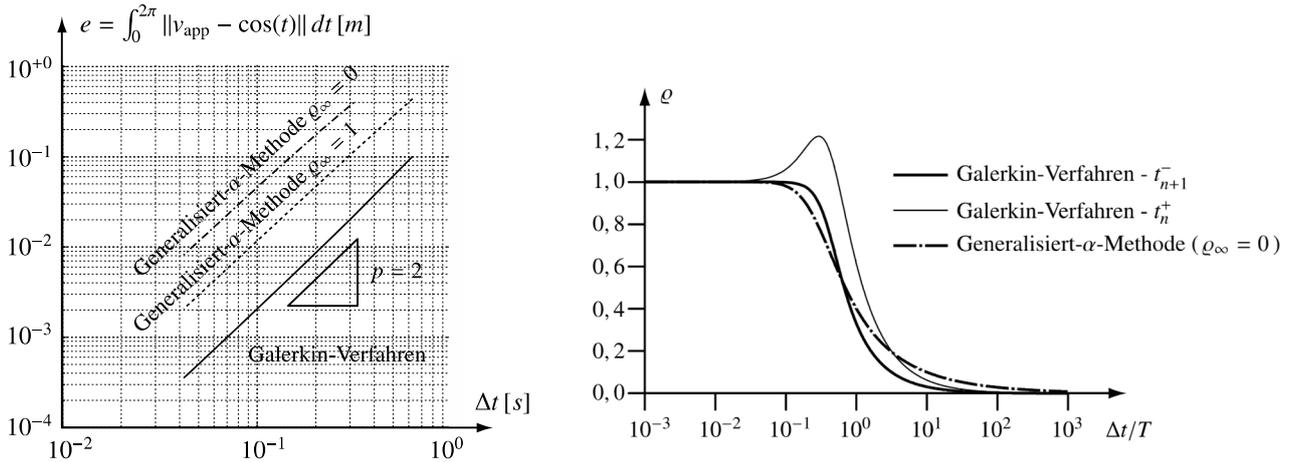


Abb. 2: Genauigkeit und spektraler Radius von Zeitintegrationsverfahren

**Raum-Zeit-Finite-Elemente-Formulierung**

Für eine bessere Übersicht ist im Folgenden die Raum-Zeit-Finite-Elemente-Formulierung bezüglich der Struktur  $S$ , des Fluids  $F$  und der Kopplungsbedingungen  $K$  getrennt voneinander diskutiert.

Das Verformungsverhalten der Struktur ist mit

$$\int_{Q_n} \delta \mathbf{v} \cdot \rho \dot{\mathbf{v}} dQ + \int_{Q_n} \delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} : \boldsymbol{\sigma} dQ - \int_{Q_n} \delta \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{g} dQ \tag{1a}$$

$$- \int_{P_n^N} \delta \mathbf{v} \cdot \bar{\mathbf{t}} dP^N \tag{1b}$$

$$+ \int_{\Omega} \delta \mathbf{v}(t_n^+) \cdot \rho (\mathbf{v}(t_n^+) - \mathbf{v}(t_n^-)) d\Omega \tag{1c}$$

$$+ \sum_e \int_{Q_n^e} \delta \boldsymbol{\sigma} : (\mathbb{C}^{-1} : \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) dQ \tag{1d}$$

$$+ \sum_e \int_{\Omega^e} \delta \boldsymbol{\sigma}(t_n^+) : \mathbb{C}^{-1} : (\boldsymbol{\sigma}(t_n^+) - \boldsymbol{\sigma}(t_n^-)) d\Omega = 0 \tag{1e}$$

in Raum und Zeit beschrieben [6].

Die Zeilen (1a) und (1b) entsprechen der Impulserhaltung  $\rho \dot{\mathbf{v}} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} - \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}$ . Gleichung (1) ist mit dem Geschwindigkeitsvektor  $\mathbf{v}$ , dem Cauchy Verzerrungsgeschwindigkeitstensor  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = 1/2 ((\nabla \mathbf{v})^T + \nabla \mathbf{v})$  und dem Cauchy Spannungstensor  $\boldsymbol{\sigma}$  in Abhängigkeit der Dichte  $\rho$ , des Gravitationsfeldes  $\mathbf{g}$  und der einwirkenden Randspannung  $\bar{\mathbf{t}}$  formuliert. Mit Zeile (1d) ist die Verformungsbedingung in schwacher Form berücksichtigt. Sie enthält den Flexibilitätstensor  $\mathbb{C}^{-1}$ , der mit dem elastischen Potential eines St. Venant-Kirchhoff Materials  $\Psi = \lambda_L/2 \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})^2 + \mu_L \boldsymbol{\varepsilon} : \boldsymbol{\varepsilon}$  beschrieben ist.  $\lambda_L$  und  $\mu_L$  sind die erste und zweite Lamé-Konstante. Die kinetische Energie und die Verformungsenergie sind mit den Übergangsbedingungen in den Zeilen (1c) und (1e) im Zeitbereich übertragen.

Mit den Cauchy Verzerrungen muss nicht zwischen Momentan- und Ausgangskonfiguration der Struktur unterschieden werden. Des Weiteren ist in diesem Fall die Arbeitsgleichung mit Geschwindigkeiten als alleinige Weggrößen beschrieben (für geometrisch nichtlineares Verformungsverhalten siehe [13]). Das Verschiebungsfeld berechnet sich unabhängig von Gleichung (1) mit dem Zeitintegral über das Geschwindigkeitsfeld:

$$\mathbf{u} = \int_{t=0} \mathbf{v} dt \tag{2}$$

Die Arbeitsgleichung ist mit vollständigen, quadratischen Lagrange-Ansätzen für die Geschwindigkeiten und die Spannungen diskretisiert. Mit abgestimmten Spannungsansätzen kann das Verformungsverhalten der finiten Elemente verbessert werden. Da mit quadratischen Ansätzen Schublocking unterbunden ist und hier kein nahezu inkompressibles Materialverhalten zu modellieren ist, werden die Spannungen gleich den Geschwindigkeiten approximiert. Abgestimmte Spannungsansätze bei quadratischen Serendipity-Ansätzen für die Geschwindigkeiten können [12] entnommen werden. Die Summenzeichen in den Zeilen (1d) und (1e) zeigen, dass das Spannungsfeld von Element zu Element diskontinuierlich sein kann, Stetigkeit ist nur für das Geschwindigkeitsfeld gefordert. So werden für eine reduzierte Anzahl an Freiwerten auf Systemebene die Spannungsfreiwerte auf Elementebene statisch kondensiert.

Die Raum-Zeit-Finite-Elemente-Formulierung des inkompressiblen Bingham-Fluids ist mit

$$\int_{Q_n} \delta \mathbf{v} \cdot \rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) dQ \quad (3a)$$

$$+ \int_{Q_n} \delta \mathbf{D} : 2\mu_{\text{ef}} \mathbf{D} dQ - \int_{Q_n} \nabla \cdot \delta \mathbf{v} p dQ - \int_{Q_n} \delta \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{g} dQ \quad (3b)$$

$$- \int_{P_n^N} \delta \mathbf{v} \cdot \bar{\mathbf{t}} dP^N \quad (3c)$$

$$+ \int_{Q_n} \delta p \nabla \cdot \mathbf{v} dQ \quad (3d)$$

$$+ \int_{\Omega_n} \delta \mathbf{v}(t_n^+) \cdot \rho (\mathbf{v}(t_n^+) - \mathbf{v}(t_n^-)) d\Omega \quad (3e)$$

$$+ \sum_e \int_{Q_n^e} (\tau_{\text{SUPG}} \mathbf{v} \cdot \nabla \delta \mathbf{v}) \cdot \mathcal{R}(\mathbf{v}, p) dQ \quad (3f)$$

$$+ \sum_e \int_{Q_n^e} \kappa_{\text{Kont}} \rho \nabla \cdot \delta \mathbf{v} \nabla \cdot \mathbf{v} dQ = 0. \quad (3g)$$

gegeben.

Die schwache Form der Impulsbilanz

$$\mathcal{R} = \rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} - \rho \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (4)$$

ist in den Zeilen (3a) und (3b) mit dem Verzerrungsgeschwindigkeitstensor  $\mathbf{D} = 1/2 ((\nabla \mathbf{v})^T + \nabla \mathbf{v})$ , der effektiven Viskosität  $\mu_{\text{ef}}$  und dem Druck  $p$  formuliert. Mit Zeile (3c) sind Spannungsrandbedingungen auf dem Neumann-Rand berücksichtigt. Die Kontinuitätsgleichung  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$  ist mit Zeile (3d) erfasst. Die kinetische Energie ist mit Zeile (3e) von Zeit-Scheibe zu Zeit-Scheibe übertragen. Mit dem Ziel einer hohen Courant-Zahl ist die Finite-Elemente-Formulierung mit einer SUPG-Stabilisierung erweitert (siehe Zeile (3f)). Die Stabilisierung der Kontinuitätsgleichung in Zeile (3g) ermöglicht die Abbildung von Kernflüssen, die sich über die gesamte Höhe von Silos erstrecken (siehe Kapitel 4). Die zugehörigen Stabilisierungsparameter

$$\tau_{\text{SUPG}} = 1 / \sqrt{\frac{4}{\Delta t^2} + \frac{4 \|\Delta \mathbf{v}\|^2}{h^2} + \frac{144 \mu_{\text{ef}}^2}{\rho^2 h^4}} \quad (5)$$

und

$$\kappa_{\text{Kont}} = \frac{h \|\Delta \mathbf{v}\|}{4} \zeta \quad \text{mit} \quad \zeta = \frac{\text{Re}_e}{3} \quad \text{und} \quad \text{Re}_e = \frac{\rho \|\Delta \mathbf{v}\| h}{\mu_{\text{ef}}} \quad \text{für} \quad \text{Re}_e < 3 \quad \text{sonst} \quad \zeta = 1 \quad (6)$$

sind mit der Differenzgeschwindigkeit  $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}$  und der charakteristischen Länge  $h$  formuliert [2,14]. Die Differenzgeschwindigkeit berücksichtigt die Geschwindigkeit des Beobachters  $\mathbf{v}$ , die charakteristische Länge ist mit dem Durchmesser einer Kugel bestimmt, deren Volumen dem Volumen des jeweiligen finiten Elementes entspricht.

Die effektive Viskosität

$$\mu_{ef} = \frac{\langle p \tan(\phi_i) \rangle}{2(\dot{\gamma} + \epsilon)} + \rho\nu \tag{7}$$

ist in Abhängigkeit des inneren Reibwinkels  $\phi_i$  und der dynamischen Viskosität  $\rho\nu$  beschrieben [11]. Der innere Reibwinkel legt zusammen mit dem Druck das Spannungsniveau fest, bei dem das Schüttgut zu strömen beginnt. Der Regularisierungsparameter  $\epsilon$  sichert für verschwindende Verzerrungsgeschwindigkeiten  $\dot{\gamma} = \sqrt{I_2(\mathbf{D}^d)} \rightarrow 0$  die Bijektivität in der Spannungs-Verzerrungs-Beziehung (siehe Abb. 3).  $I_2(\mathbf{D}^d)$  ist die zweite Invariante des deviatorischen Teils des Verzerrungsgeschwindigkeitstensors. Bei inkompressiblen Fluiden gilt  $\mathbf{D}^d = \mathbf{D}$ .

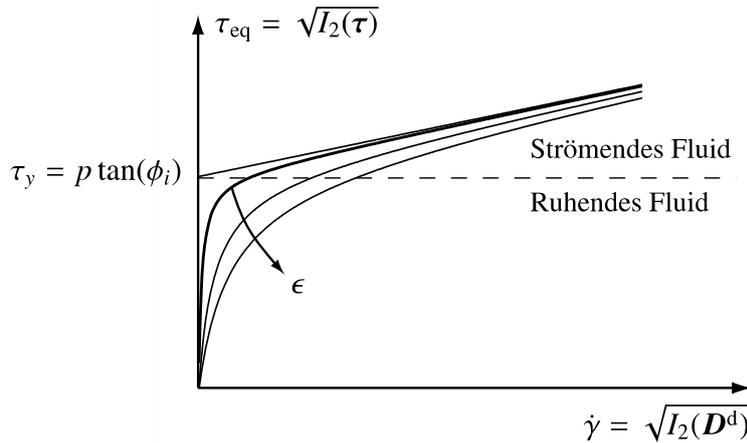


Abb. 3: Spannungs-Verzerrungs-Beziehung

Gleichung (3) ist mit vollständigen quadratischen Lagrange-Ansätzen für die Geschwindigkeiten und mit vollständig linearen Ansätzen für den Druck diskretisiert [15]. Damit können Näherungslösungen berechnet werden, selbst wenn die SUPG-Stabilisierung für  $\Delta t \rightarrow 0$  verschwindet. Eine Pseudo-Struktur ist nur am Ende einer jeden Zeit-Scheibe definiert. Sie adaptiert die deformierbare Berandung der reellen Struktur auf das Gebiet des Fluids.

Die schwachen Formen der Kopplungsbedingungen

$$+ \int_{P_n^K} \delta t_n (\mathbf{v}^F - \mathbf{v}^S) \cdot \mathbf{n} dP^K + \int_{P_n^K} \delta t_l ((\mathbf{v}^F - \mathbf{v}^S) \cdot \mathbf{l} - \Delta v_l) dP^K \tag{8a}$$

$$+ \int_{P_n^K} \delta \Delta v_l (t_l - \langle -t_n \rangle (\text{sgn}(\Delta v_l) \mu(1 - e^{-a|\Delta v_l|}) + \frac{\mu}{b} \Delta v_l)) dP^K \tag{8b}$$

$$+ \int_{P_n^K} \delta \mathbf{v}^F \cdot (t_n \mathbf{n} + t_l \mathbf{l}) dP^K - \int_{P_n^K} \delta \mathbf{v}^S \cdot (t_n \mathbf{n} + t_l \mathbf{l}) dP^K \tag{8c}$$

vervollständigen die Arbeitsgleichung des Gesamtmodells. Mit Zeile (8a) ist sichergestellt, dass Fluid und Struktur sich nicht gegenseitig durchdringen. In tangentialer Richtung kann das Fluid hingegen entlang der Struktur mit der Differenzgeschwindigkeit  $\Delta v_l$  abgleiten. Wie in Abb. 4 dargestellt, ist die Fließrichtung mit den Geschwindigkeitsfeldern festgelegt:

$$\mathbf{l} = \frac{\mathbf{v}_l^{rel}}{\|\mathbf{v}_l^{rel}\|} \quad \text{mit} \quad \mathbf{v}_l^{rel} = \mathbf{v}^{rel} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}^{rel}) \mathbf{n} \quad \text{und} \quad \mathbf{v}^{rel} = \mathbf{v}^F - \mathbf{v}^S \tag{9}$$

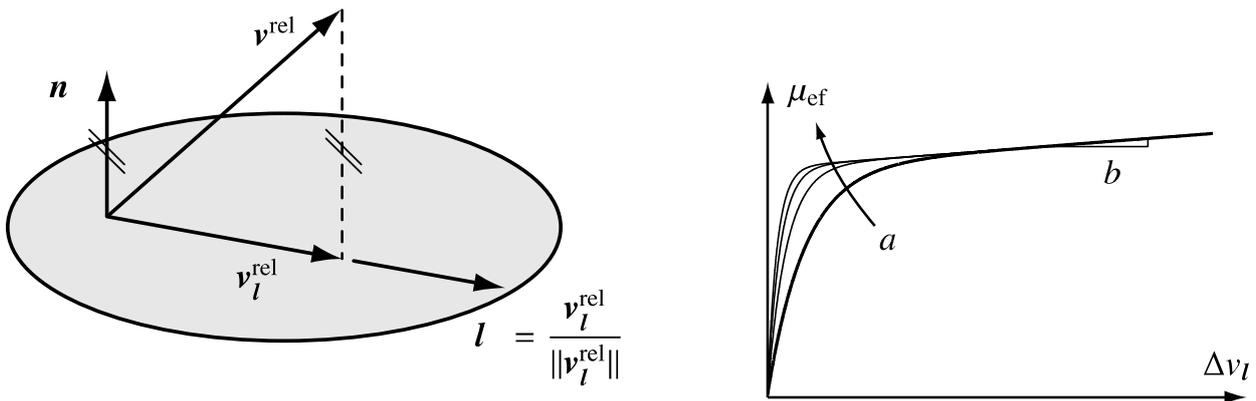


Abb. 4: Fließrichtung und effektiver Reibungskoeffizient

Der Zugang zur Differenzgeschwindigkeit ist mit dem Reibmodell gegeben, das mit Zeile (8b) in schwacher Form aufgenommen ist. Die Abhängigkeit des effektiven Reibungskoeffizienten

$$\mu_{\text{ef}} = \mu(1 - e^{-a|\Delta v_l|}) + \frac{\mu}{b} \Delta v_l \quad (10)$$

von den Modellparametern  $a$  und  $b$  ist in Abb. 4 dargestellt. An dieser Stelle ist darauf hingewiesen, dass  $\mu_{\text{ef}}$  für die effektive Viskosität des Fluids und den effektiven Reibungskoeffizienten verwendet wird. Da  $\mu_{\text{ef}}$  in beiden Fällen kein primärer Modellparameter ist, wird auf die Einführung eines weiteren Symbols hier verzichtet. Mit  $\text{sgn}(\Delta v_l)$  ist Zeile (8b) kontinuierlich differenzierbar, auch im Bereich  $\Delta v_l = 0$ . Die Arbeitsterme in Zeile (8c) berücksichtigen die Interaktionsspannung  $\mathbf{t} = t_n \mathbf{n} + t_l \mathbf{l}$  in der Impulserhaltung des Fluids und in der Impulserhaltung der Struktur. Die Vektoren  $\mathbf{n}$  und  $\mathbf{l}$  sind stets bezüglich des Fluids ausgewertet, sodass das Vorzeichen in Zeile (8c) wechselt.

Die Lage der freien Schüttgutoberfläche ist implizit mit der vorzeichenbehafteten Abstandsfunktion  $\phi$  beschrieben. Sie definiert für jeden materiellen Punkt dessen kürzesten Abstand zur freien Oberfläche. Die Abstandsfunktion wird in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsfeldes mit der Level-Set-Gleichung

$$\mathcal{L}_L = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (11)$$

durch das Raum-Zeit-Gebiet bewegt. Für ein konsistentes Verfahren ist auch die Level-Set-Gleichung mit dem zeit-diskontinuierlichen Galerkin-Verfahren näherungsweise gelöst [10]. Sowie die Arbeitsgleichung ist auch

$$\int_{Q_n} \delta \phi \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \phi \right) dQ + \int_{\Omega_n} \delta \phi(t_n^+) (\phi(t_n^+) - \phi(t_n^-)) d\Omega + \sum_e \int_{Q_n} \tau_L \mathcal{L}_L(\delta \phi) \mathcal{L}_L(\phi) dQ = 0 \quad (12)$$

mit

$$\tau_L = 1 / \sqrt{\frac{4}{\Delta t^2} + \frac{4 \|\Delta \mathbf{v}\|^2}{h^2}} \quad (13)$$

stabilisiert. Die Stabilisierung ermöglicht insbesondere bei quadratischer Approximation von  $\phi$  ein hinreichend glattes Lösungsfeld. Da die Näherungslösung nicht vollständig frei von Oszillationen im Raum ist, wird die Abstandsfunktion in zeitlichen Intervallen reinitialisiert.

### 3 Lösungsstrategie

Mit Anwendung der Raum-Zeit Single-Phase Level-Set-Methode wird das gesamte Gebiet des Beobachters mit aktiven und passiven Elementen belegt. Als aktiv sind nur die Elemente ausgewertet, die innerhalb einer Zeitscheibe vom Fluid bedeckt sind (siehe Abb. 5). Die Approximation der Beschreibungsvariablen führt auf Freiwerte, die Knoten zugewiesen sind, die außerhalb des Fluidgebietes liegen. Auch wenn nicht alle Freiwerte direkt physikalisch interpretiert werden können, wird im gesamten Gebiet ein und derselbe Polynom-Typ verwendet.

Die Single-Phase Level-Set-Methode erfordert spezielle Integrationsformeln, mit denen die Arbeitsgleichung auch in Elementen korrekt ausgewertet werden kann, die nur zum Teil mit Fluid gefüllt sind. Sie sind allgemeingültig, in Abhängigkeit der Abstandsfunktion, auf Grundlage einer Tesselierung bestimmt. Dabei ist berücksichtigt, dass die Delaunay-Triangulierung auch in der vierdimensionalen Raumzeit angewendet werden kann. Tesselierungen führen zu einer Vielzahl an Integrationspunkten, sodass die einzelnen finiten Elemente parallel ausgewertet werden.

Mit dem Sachverhalt, dass die Abstandsfunktion mit dem Geschwindigkeitsfeld bewegt wird, und die Ansatzräume für die Geschwindigkeiten und den Druck in Abhängigkeit der Lage der freien Oberfläche bestimmt werden, ist ein gestaffeltes Lösungsschema verwendet. Mit dem in Abb. 6 dargestellten Schema, wird die Level-Set-Gleichung für bekannte Geschwindigkeitsfelder ausgewertet, so dass die Abstandsfunktion innerhalb einer Zeitscheibe mit einem einzigen Rechenschritt aktualisiert wird. Würde man die Level-Set-Gleichung in das Newton-Raphson-Verfahren für die Fluid-Struktur-Wechselwirkung [7] miteinbeziehen, müsste man die Level-Set-Gleichung linearisieren. Da die totale Zeitableitung der Abstandsfunktion der totalen Zeitableitung des Geschwindigkeitsfeldes ähnelt (siehe Zeile (3a)) ist der grundlegende Aufbau der Jacobi-Matrix bekannt. Würde man die Level-Set-Gleichung in das Newton-Raphson-Verfahren für die Fluid-Struktur-Wechselwirkung miteinbeziehen, müsste man für eine konsistente Tangente beachten, dass sich die Lagen und die Wichtungen der Integrationspunkte mit der Bewegung der freien Oberfläche in partiell befüllten Elementen ändern. Auch wenn die Modellgleichungen des Fluids bezüglich der Integrationspunkte linearisiert werden können, wäre es ein hoher numerischer Aufwand, die Linearisierung auszuwerten. Aus diesem Grund und mit dem Ziel eines effizienten numerischen Verfahrens, wird die Level-Set-Gleichung mit einem Fixpunktschema gelöst.

Berechnungen haben gezeigt, dass die Level-Set-Gleichung schnell konvergiert, wenn die Abstandsfunktion mit gültigen Geschwindigkeitsfeldern bewegt wird. In der Regel sind zwei, maximal drei Iterationsschritte erforderlich. Die erforderliche Zeitschrittweite wird im Wesentlichen von den nichtlinearen Modellgleichungen der Fluid-Struktur-Wechselwirkung bestimmt. Numerische Analysen zeigen, dass eine quadratische Konvergenz erst gegeben ist, wenn die Abhängigkeit der Arbeitsgleichung von der Netzbewegung in der Linearisierung beachtet ist. Die Netzbewegung wird in Raum-Zeit-Elementen mit deren lokalen Raum- und Zeitkoordinate  $\xi$  beziehungsweise  $\tau$  in der Jacobi-Matrix

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x(\xi, \tau)}{\partial \xi} & \mathbf{0} \\ \frac{\partial x(\xi, \tau)}{\partial \tau} & \frac{\partial t(\tau)}{\partial \tau} \end{bmatrix} \quad (14)$$

erfasst [2] und beeinflusst über die Raum-Zeit-Integrale und die Raum-Zeit-Ableitungen jeden Arbeitsterm des Fluids.

Passive Elemente werden bei der Auswertung der Finite-Elemente-Formulierung nicht beachtet, sodass in diesen keine Informationen in Bezug auf die Geschwindigkeiten und den Druck vorliegen. Bewegt sich das Fluid in zunächst passive Elemente, müssen die neu mit aufgenommenen Freiwerte gut geschätzt werden, damit der Lösungsvektor innerhalb des Newton-Raphson-Verfahrens gut konvergiert. Aus diesem Grund wird mit der vorgestellten Methodik das Geschwindigkeitsfeld in neu aktivierte Elemente extrapoliert.

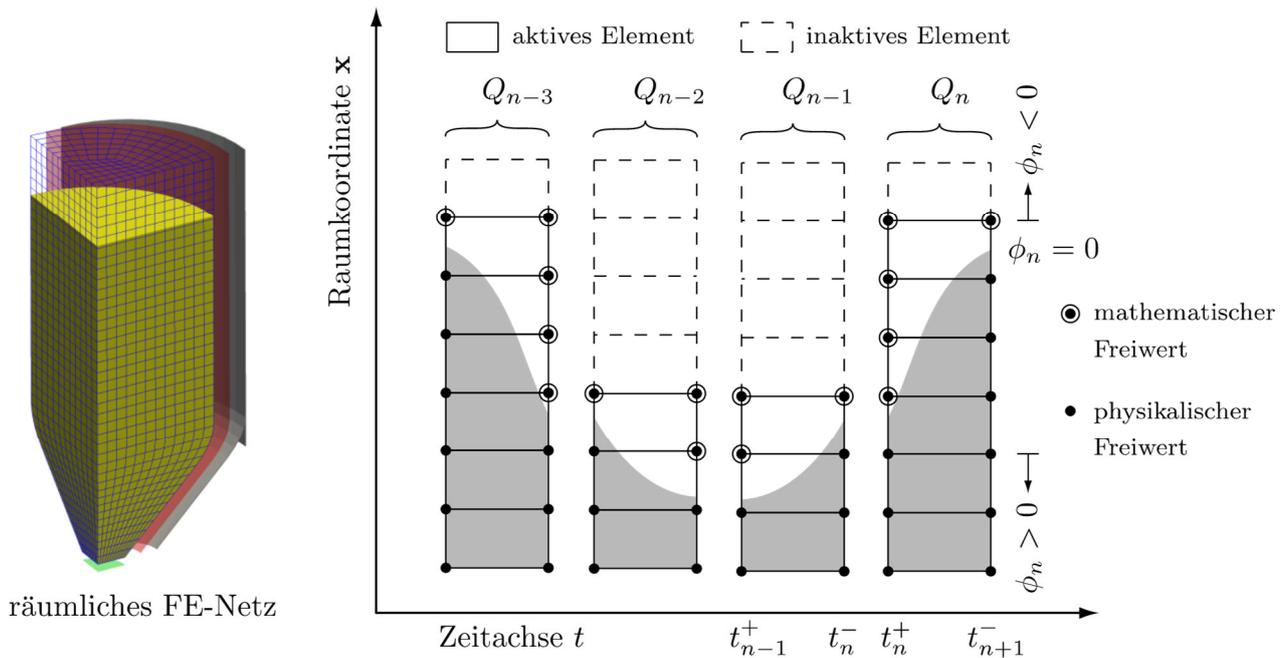


Abb. 5: Freiwerte im Raum-Zeit-Gebiet

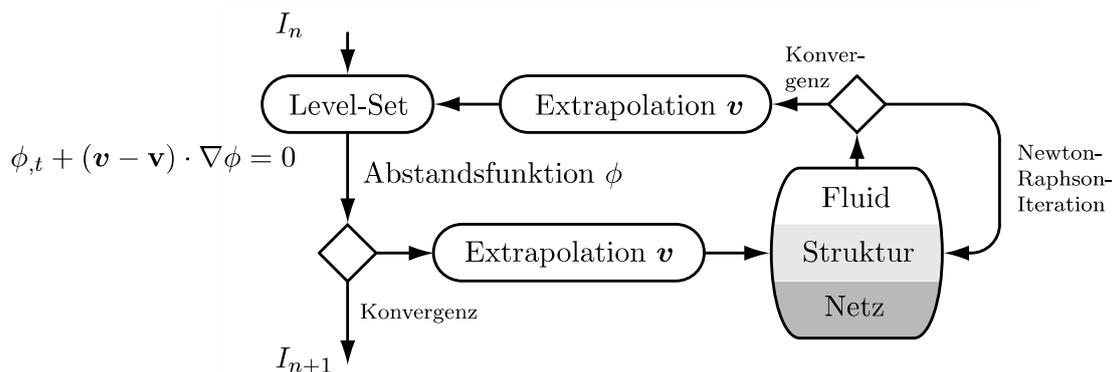


Abb. 6: Gestaffeltes Lösungsschema

Das extrapolierte Geschwindigkeitsfeld  $\tilde{v}$  wird mit der Differentialgleichung

$$h^2 (\mu_L \nabla^2 \tilde{v} + (\mu_L + \lambda_L) \nabla(\nabla \cdot \tilde{v})) = H(\phi(\mathbf{x}))(\tilde{v} - v) \tag{15}$$

unter Verwendung der Heaviside-Funktion  $H(\phi(\mathbf{x})) = 1$  für  $\phi(\mathbf{x}) > 0$  sonst  $H(\phi(\mathbf{x})) = 0$  bestimmt [1]. Die Werte des extrapolierten Feldes weichen umso mehr von den physikalischen Werten ab, je größer der Wert für die charakteristische Länge  $h$  ist. Da das Geschwindigkeitsfeld zugleich weiter jenseits der freien Oberfläche extrapoliert wird wenn  $h$  ansteigt, wird die charakteristische Länge in Abwägung ihrer Auswirkungen mit den Abmessungen des jeweiligen finiten Elementes festgelegt (siehe Gleichung (5) und (6)).

Ist das Geschwindigkeitsfeld mit einem gültigen Lösungsvektor beschrieben, werden die Geschwindigkeiten erneut extrapoliert, jetzt um die Güte der Näherungslösung für die Abstandsfunktion zu verbessern, indem die freie Oberfläche nun beidseitig von physikalisch sinnvollen Geschwindigkeitsfeldern eingebettet ist. Es ist darauf hingewiesen, dass mit der Extrapolation bezüglich der Fluid-Struktur-Wechselwirkung nur die Konvergenz der Lösungsvektoren verbessert ist. Die berechneten Werte für die Geschwindigkeiten und den Druck sind allein mit der Diskretisierung der Modellgleichungen mit Raum-Zeit-Ansätzen bestimmt. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber semi-diskreten Verfahren, die eine Kollokation in Zeitrichtung verwenden (vergleiche [3]).

#### 4 Siloentleerungen

Im Folgenden sind Entleerungen zylindrischer Silos numerisch analysiert. Die Strukturelemente modellieren Stahlschalen mit einem Innendurchmesser von  $d_i = 6$  m, bestehend aus  $t = 10$  mm dicken Blechen. Der zylindrische Schaft hat eine Höhe von  $h_s = 10$  m. Der konische Auslaufrichter verjüngt den inneren Durchmesser bis auf  $d_i = 1,4$  m an der Auslauföffnung. Die Neigung des flachen Auslaufrichters beträgt  $\beta = 20^\circ$ . Für exzentrische Entleerungen ist die Öffnung des Auslaufrichters um  $e = 1,5$  m im Grundriss verzogen. Es ist Stahl mit einem E-Modul von  $E = 210.000$  MPa und einer Querdehnzahl von  $\nu = 0,3$  modelliert, die Dichte beträgt  $\rho = 7,85$  g/cm<sup>3</sup>. Zu Beginn der Simulation sind die Silos über eine Höhe von  $h_{\text{füll}} = 10$  m mit Schüttgut befüllt. Das Schüttgut hat eine Dichte von  $\rho = 1,3$  g/cm<sup>3</sup> und einen inneren Reibwinkel von  $\phi_i = 20^\circ$ . Die dynamische Viskosität ist mit  $\rho\nu = 5 \cdot 10^3$  kg/s/m angenommen. Das Finite-Elemente-Modell modelliert raue Wände mit einem Wandreibungswinkel von  $\mu = 0,4$ . Die Silos sind anfangs geschlossen. Die als starr angenommenen Auslaufrichter werden nach 25 Sekunden, innerhalb von 5 Sekunden, langsam geöffnet. Die initial ebene Oberfläche des Schüttgutes setzt sich infolge Gravitation mit  $\|g\| = 9,81$  m/s<sup>2</sup> in Bewegung.

Abb. 7 zeigt die Absenkung der freien Oberfläche. Das Silo entleert sich mit einem Massenfluss, die freie Oberfläche senkt sich zu Beginn der Entleerung gleichmäßig ab. Auch wenn sich das Schüttgut nahezu gleichförmig absenkt, ist der Einfluss der Wandreibung deutlich zu sehen. Erst wenn das Silo nur noch zur Hälfte befüllt ist, bildet die freie Oberfläche einen Fließkanal. An der Druckverteilung entlang der Siloschale ist zu sehen, dass das mechanische Verhalten von strömenden Schüttgütern in guter Näherung mit einem Bingham-Fluid modelliert ist. Wie Janssen zeigt [9], strebt der Druck in Schüttgutsilos gegen einen Grenzwert. Der Janssen-Gleichung folgend, entwickelt sich der Druck von der freien Oberfläche her gesehen nichtlinear mit einer Exponentialfunktion.

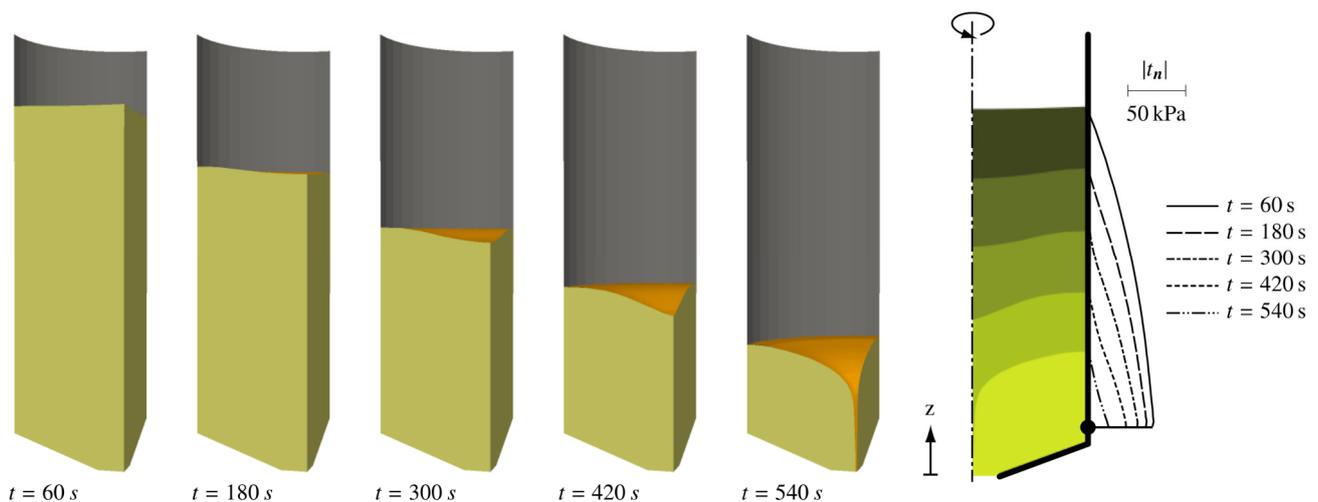


Abb. 7: Massenfluss - Absenkung des Schüttgutes und Druckverteilung

Hat das Schüttgut einen erhöhten inneren Reibwinkel von  $\phi_i = 40^\circ$ , ist ein Kernfluss zu beobachten (siehe Abb. 8). Mit einer erhöhten Geschwindigkeit senkt sich die freie Oberfläche vorrangig über der Auslauföffnung ab. Der Druck baut sich im Wesentlichen in der Toten Zone auf. Die Mises-Spannung zeigt, dass die Kreiszyinderschale im Übergangsbereich zum Auslaufrichter erhöht beansprucht ist. Der starre Auslaufrichter spannt die Kreiszyinderschale sichtlich ein.

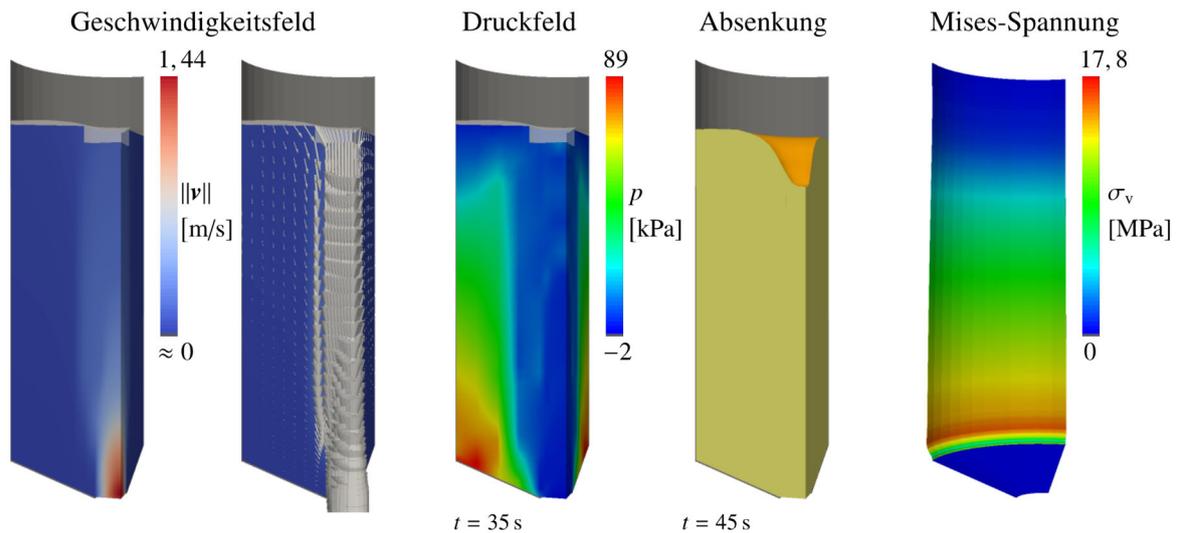


Abb. 8: Kernfluss - Zustandsgrößen zu Beginn der Entleerung

Ist die Auslauföffnung exzentrisch im Grundriss angeordnet, wirkt im unteren Teil des Silos ein deutlich unterschiedlich hoher Druck. Obwohl sich das Silo mit einem Massenfluss entleert und sich dabei die Oberfläche des Schüttgutes auf Seite der Auslauföffnung nur geringfügig schneller absenkt, ist der Druck dort wesentlich niedriger (siehe Abb. 9). Dies ist zu berücksichtigen, wenn die Stabilität der Schale nachzuweisen ist. Sie ist insbesondere dann reduziert, wenn sich Zugnormalspannungen in Umfangsrichtung nicht voll ausbilden können.

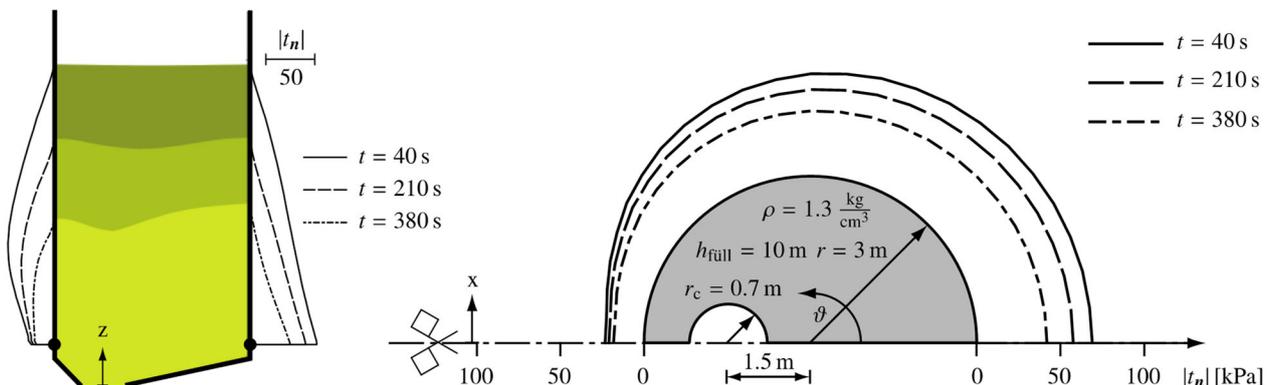


Abb. 9: Druckverteilung während exzentrischer Entleerung

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es ist ein kontinuumsmechanisches Modell vorgestellt, mit dem die Beanspruchungen von Silos während dessen Entleerungen numerisch analysiert werden können. Das mechanische Verhalten von Schüttgütern ist in einer ersten Näherung mit einem inkompressiblen Bingham-Fluid modelliert, die Wandreibung ist mit einem geschwindigkeitsbasierten Reibmodell berücksichtigt. Numerische Analysen zeigen, dass die für Schüttgüter charakteristische Druckverteilung innerhalb von zylindrischen Silos während Entleerungen gut abgebildet wird. Neben Massenflüssen können auch Entleerungen mit Ausbildung von Kernflüssen untersucht werden. Die analysierte Druckverteilung während einer exzentrischen Entleerung weicht von einer rotationssymmetrischen Belastung deutlich ab. Für eine Abbildung von Kompressionswellen soll zukünftig die Kompressibilität in den Navier-Stokes-Gleichungen berücksichtigt werden. Für realistische Ergebnisse bei ruhenden Schüttgütern ist darüber hinaus geplant, eine ALE-Formulierung für Strukturen umzusetzen. Ist der Phasenübergang zwischen Struktur und Fluid beschrieben, soll das kontinuumsmechanische Schüttgutmodell mit Modellen der Partikelmechanik verglichen werden.

## 6 Literatur

- [1] Ausas R.F., Buscaglia G.C.: A pde-based velocity extrapolation method for the transport of the level set function in two phase liquid-gas flows. *Serie Mecanica Computacional*, XXIX, 3189-3206, 2010.
- [2] Behr M., Tezduyar T. E.: Finite element solution strategies for large-scale flow simulations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 112, 3-24, 1994.
- [3] Carrica P.M., Wilson R.V., Stern F.: An unsteady single-phase level set method for viscous free surface flows. *Numerical Methods in Fluids*, 53, 2, 229-256.
- [4] Chung J., Hulbert G.M.: A Time Integration Algorithm for Structural Dynamics with Improved Numerical Dissipation: The Generalized- $\alpha$  Method. *Journal of Applied Mechanics*, 60(2), 371-375, 1993.
- [5] Delfour M., Hager W., Trochu F.: Discontinuous Galerkin methods for ordinary differential equations. *Mathematics of Computation*, 36, 154, 455-473, 1981.
- [6] Hughes T., Hulbert G.: Space-time finite element methods for elastodynamics: Formulations and error estimates. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 66, 3, 339-363, 1988.
- [7] Hübner B., Walhorn E., Dinkler D.: A monolithic approach to fluid-structure interaction using space-time finite elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193, 23-26, 2087-2104, 2004.
- [8] Jansen K. E., Whiting C. H., Hulbert G. M.: A generalized- $\alpha$  method for integrating the filtered Navier-Stokes equations with a stabilized finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190, 305-319, 2000.
- [9] Janssen H. A.: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 39, 1045-1049, 1985.
- [10] Kölke A.: Modellierung und Diskretisierung bewegter Diskontinuitäten in randgekoppelten Mehrfeldsystemen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2005.
- [11] McTigue D.F.: A Nonlinear Constitutive Model for Granular Materials: Application to Gravity Flow. *Journal of Applied Mechanics*, 49, 291-296, 1982.
- [12] Reinstädler S.: Modellierung und numerische Analyse der Entleerung von dünnwandigen Silos. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2015.
- [13] Reinstädler S., Kowalsky U., Dinkler D.: Analysis of landslides employing a space-time single-phase level-set-method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 347, 639-662, 2019.
- [14] Shakib F., Hughes T.J.R.: A new finite element formulation for computational fluid dynamics: IX. Fourier analysis of space-time Galerkin/least-squares algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 87, 35-58, 1991.
- [15] Taylor C., Hood P.: A numerical solution of the Navier-Stokes equations using the finite element technique. *Computer & Fluids*, 1, 73-100, 1973.

# Effiziente und vernetzte Produktentwicklung durch die Integration von Simulationsdatenmanagement (SDM) und Prüfstands-/Testdatenmanagement (TDM)

Dr. Dirk Rensink, Dr. Marcus Krastel, Julian Tetzlaff (:em AG)

Die heutige Produktentwicklung ist durch immer kürzere Entwicklungszeiten, eine wachsende Variantenvielfalt und neuartige Herstellungsverfahren wie die additive Fertigung gekennzeichnet.

Das Wissen über das Materialverhalten von additiv gefertigten Bauteilen ist oft mit großen Unsicherheiten verbunden. Daher muss nach der Auslegung mit CAE-Simulationsmethoden das Produkt auf Prüfständen getestet werden, um die Eigenschaften abzusichern. Die Verbindung von Simulationsdatenmanagement (SDM) und Prüfstands-/Testdatenmanagement (TDM) ist hier entscheidend, um den notwendigen Abgleich zwischen Simulation und Daten von Prüfstandstests effizient zu gestalten.

Auch in der Entwicklung von Produkten, die mit klassischen Herstellungsverfahren produziert werden, ist es notwendig, Daten aus CAE-Simulationen mit virtuellen Prototypen und Testdaten vom Prüfstand im Rahmen der Produktentwicklung miteinander zu vergleichen. Als Beispiel sei der Containment-Test in der Entwicklung eines Turboladers genannt. Dieser Test soll zeigen, dass die Gehäusestruktur eines Turboladers im Fall eines Nebenversagens ausreichend dimensioniert ist. Die Tests sind aufwendig und werden daher von CAE-Struktursimulationen begleitet, um die Zahl der Tests zu minimieren. Eine effiziente Rückführung der Testdaten in die Simulation hilft, das CAE-Modell schnell zu validieren und damit die Vorhersagekraft zu optimieren [5], [12].

In diesem Beitrag werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Datenmodelle zwischen Simulations-, Prüfstands-, Test- und Produktdatenmanagement beleuchtet sowie in verschiedenen Szenarien gezeigt, wie eine effektive Verknüpfung aussehen kann. Zudem wird eine methodische Vorgehensweise bei der Auswahl und Einführung eines verknüpften SDM/TDM-Systems vorgestellt.

## 1 Simulations- und Prüfstands-/Testdatenmanagement in der Unternehmensarchitektur

Zur Klärung der Begrifflichkeiten soll nachfolgend ein Bild einer generischen Unternehmensarchitektur und deren für dieses Thema relevanten Bestandteile entworfen werden. Anschließend werden die Komponenten des Simulations- und des Prüfstands-/Testdatenmanagements in diesem Bild lokalisiert.

Wichtige Komponente einer Unternehmensarchitektur ist die Geschäftsarchitektur mit Prozessen, Produkten, der Geschäftsorganisation und den Unternehmenszielen. Die Anwendungsarchitektur beschreibt mit Schnittstellen, Anwendungsschichten, den Anwendungen an sich, deren Funktionsdomänen und den bereitgestellten Services aller Anwendungen, die für die verschiedenen Bereiche der Geschäftsarchitektur notwendig sind. Die Basis bildet die Infrastrukturarchitektur, welche die physikalisch vorhandene Hardware wie Computer aber auch Prüf- und Teststände erfasst. Flankierend zu den drei Ebenen sind Querschnittsthemen wie unternehmerische Standards oder Projekte sowie die Informationsarchitektur angeordnet, welche die geschäftlichen Datenobjekte, Datenmodelle, Datenflüsse, Rollen/Rechte und die Informationssemantik beschreiben. Mit der zunehmenden Digitalisierung nimmt die Pflege einer Informationsarchitektur eine immer zentralere Rolle für den unternehmerischen Erfolg ein.

Eine Unternehmensarchitektur kann auf vielfältige Weise dargestellt werden. Eine mögliche Darstellungsart ist in Abb. 1 zu sehen.

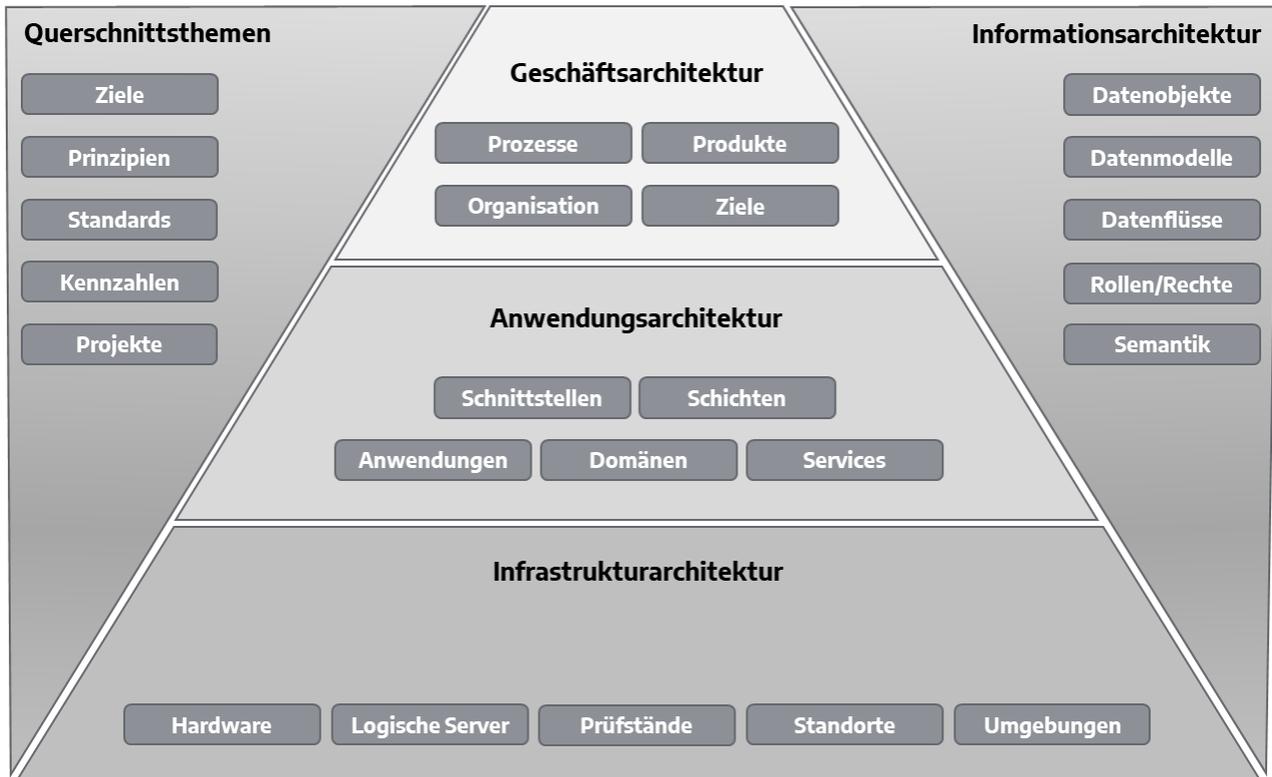


Abb. 1: Eine Darstellungsmöglichkeit der Unternehmensarchitektur.

Das SDM fokussiert sich auf die Daten, die während einer virtuellen Validierung anfallen, typischerweise während einer CAE-Simulation. Der Kern eines erfolgreichen SDMs bildet das Datenmodell mit den Beziehungen zwischen den relevanten Datenobjekten. Eine Analyse der verwendeten Autorentools (Anwendungen) und der Datenflüsse ergibt die Dimensionierung der notwendigen Hardware zum Betrieb des SDM-Systems und zeigt Optimierungspotentiale im Datenmanagement auf. Das Rollen- und Rechtesystem sollte sich an den gängigen Unternehmensstandards für die Regelung des Zugangs zu Informationen der verschiedenen Kritikalitätsstufen orientieren, aber auch an den speziellen Bedürfnissen der unternehmerischen CAE-Landschaft. Die Schnittstellen zu den angrenzenden Systemen des SDM wie PLM- oder Dokumentmanagementsystem sowie zu den Autorentools müssen analysiert und implementiert bzw. angepasst werden, um eine nahtlose Integration der verschiedenen Datenquellen im SDM zu gewährleisten und eine einheitliche Datenumgebung für die Simulation zur Verfügung zu stellen. Die unternehmerische Organisation sollte bei der Strukturierung der Datenebenen im SDM berücksichtigt werden. Die bestehenden Prozesse müssen analysiert und nahtlos in das SDM integriert werden, um keinen Bruch zu bestehenden Prozessen im Unternehmen herbeizuführen. Die nahtlose Prozessintegration ist auch ein wesentliches Element in der Akzeptanz des SDM während der Einführung.

Sämtliche Elemente und ihre Zusammenhänge sind auch für das TDM relevant. Zusätzlich kommt hier noch der Infrastrukturaspekt hinzu, denn die Daten für das TDM kommen von Prüf- und Testständen, die mit in das TDM integriert werden müssen. Zudem bietet das TDM eine Basis zur Verwaltung der Prüfstände an den jeweiligen Standorten.

## 2 Datenmodelle – Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Der Kern eines leistungsfähigen Datenmanagementsystems bildet ein vollständiges Datenmodell. Anhand von generischen Datenmodellen einer Simulations- und einer Prüfstands-Testprozesskette sollen die Gemeinsamkeiten und die Unterschiede beider Datenmanagementsysteme gezeigt werden. Ein Datenmodell ist ein Modell der zu beschreibenden und verarbeitenden Daten eines Anwendungsbereiches und ihrer Beziehung zueinander [1]. Im Allgemeinen werden konzeptuelle, logische und physische Datenmodelle unterschieden. Für die Analyse der Datenmodelle eines SDM und TDM werden konzeptionelle Datenmodelle verwendet und mit Hilfe eines ER-Diagramms dargestellt. Zur Strukturierung wird der zugrundeliegende generische Prozess eines CAE- und eines Messworkflows genommen, um die Rolle der Datenobjekte in den verschiedenen Phasen herauszustellen. Erste Vorarbeiten dazu wurden im prostep ivip Verein in der Projektgruppe SimPDM durchgeführt und als Grundlage verwendet [2]. Ein generischer CAE-Workflow mit einem generischen Datenmodell ist in Abb. 2 zu sehen. Der CAE-Workflow besteht aus den vier Schritten Anfrage, Datenzusammenstellung, Durchführung der Berechnung und die Ergebnisdarstellung.

In der Anfrage wird der Bedarf einer Berechnung angezeigt und die zu bearbeitende Aufgabe genau definiert. Nach Abschluss dieser Phase müssen im nächsten Schritt in der Datenzusammenstellung alle für die Bearbeitung der Aufgabe notwendigen Daten zusammengefasst werden. Für eine geometriebasierte Simulation sind das typischerweise CAD-Daten, Randbedingungen, Materialeigenschaften, Anforderungen und Richtlinien z. B. für die Vernetzung. Dies ist nach bisheriger Erfahrung auch derjenige Schritt, in dem mit einem SDM die meiste Zeit gespart und damit der größte Return on Investment (ROI) erzeugt werden kann, denn viele dieser Daten lassen sich zu Bibliotheken zusammenfassen, die immer wieder verwendet werden können. Hierbei spielt ein gut durchdachtes Konzept für eine Versionierung der Bibliotheken eine wichtige Rolle. Im nachfolgenden Schritt, der Durchführung der Berechnung, stehen die Datenobjekte der Autorentools im Fokus sowie das Datenmanagement der eigentlichen Berechnung, z. B. im Kontext eines Computer-Clusters (HPC). Eine gute Schnittstelle des SDM zu dem Cluster hilft auch hier, Zeit im Vergleich zu einem manuellen Datenmanagement zu sparen. Ist die Berechnung erfolgreich durchgeführt worden und liegen die Rohdaten der Berechnung vor, müssen diese analysiert und in Berichtsform gebracht werden. Dies ist der Inhalt des letzten Schrittes in dem typischerweise Daten von Office-Paketen verwaltet werden. Eine besondere Rolle spielt in hier das Rollen- und Rechtemanagement, denn diese Berichte werden typischerweise von Rollen außerhalb der Berechnungsabteilung gelesen, so dass hier auf die Zugangsberechtigung geachtet werden muss.

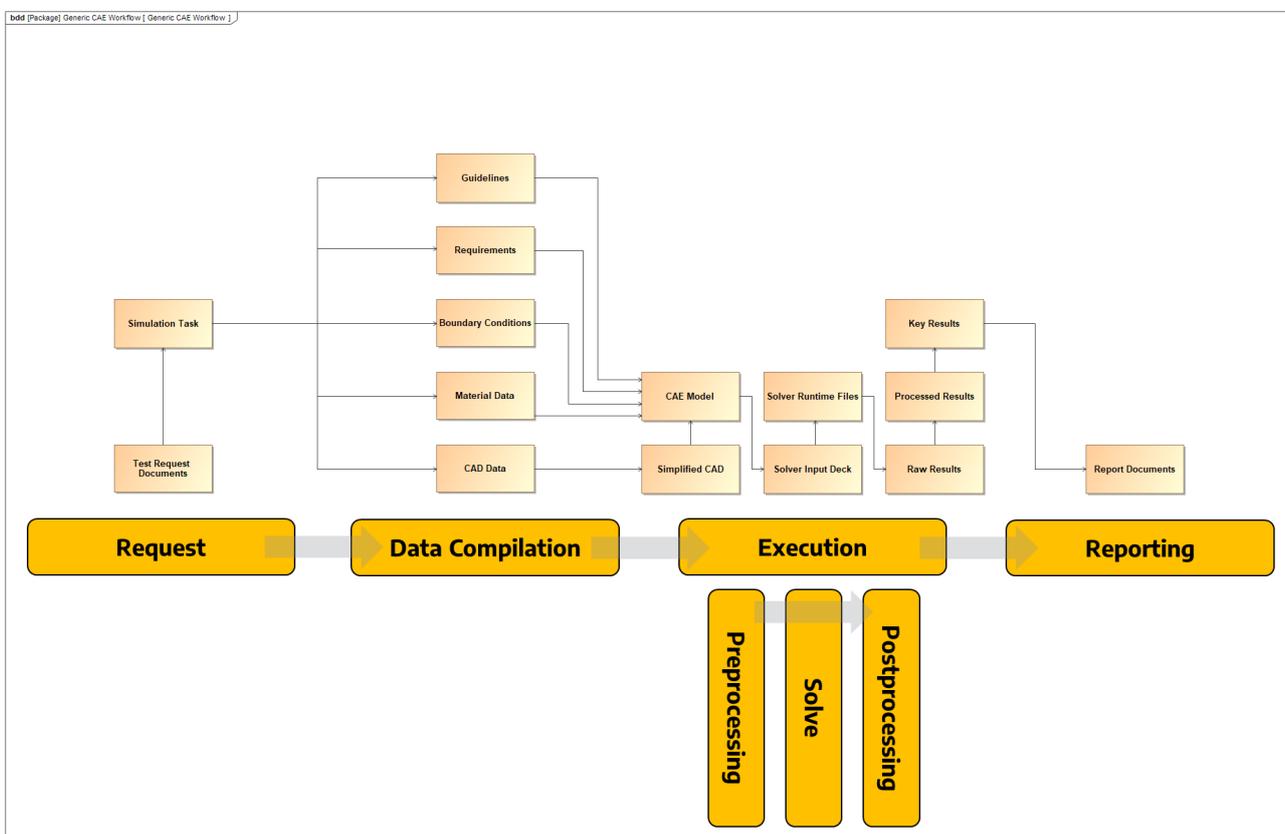


Abb. 2: Generisches Datenmodell einer Simulationsprozesskette.

Vollkommen analog zum CAE-Workflow hat die Prozesskette eines Prüfstands-Tests vier Phasen (s. Abb. 3). Die ersten beiden Phasen unterscheiden sich vom Zweck her nicht von denen im CAE-Workflow: In der Anfrage wird der Bedarf einer Messung angezeigt und die Messaufgabe genau definiert. In der Phase der Datenzusammenstellung werden Anforderungen, Randbedingungen für das Testen und auch Materialdaten gesammelt. CAD-Daten spielen ebenfalls eine Rolle, wenn zum Beispiel eine Aufnahmevorrichtung für das zu testende Objekt konstruiert werden muss. CAD-Daten spielen auch in der Festlegung von Sensorpositionen im Hinblick auf einen späteren Vergleich mit Simulationsergebnissen eine große Rolle. Analog zum CAE-Workflow ergibt sich auch hier ein großes Potential für eine Zeitersparnis. Im nächsten Schritt, während des eigentlichen Tests, müssen die anfallenden Messdaten gesammelt und für die spätere Verarbeitung strukturiert werden. Nach erfolgreichem Abschluss des Tests müssen die Daten weiterverarbeitet und zum Beispiel zu einem Bericht zusammengefasst werden.

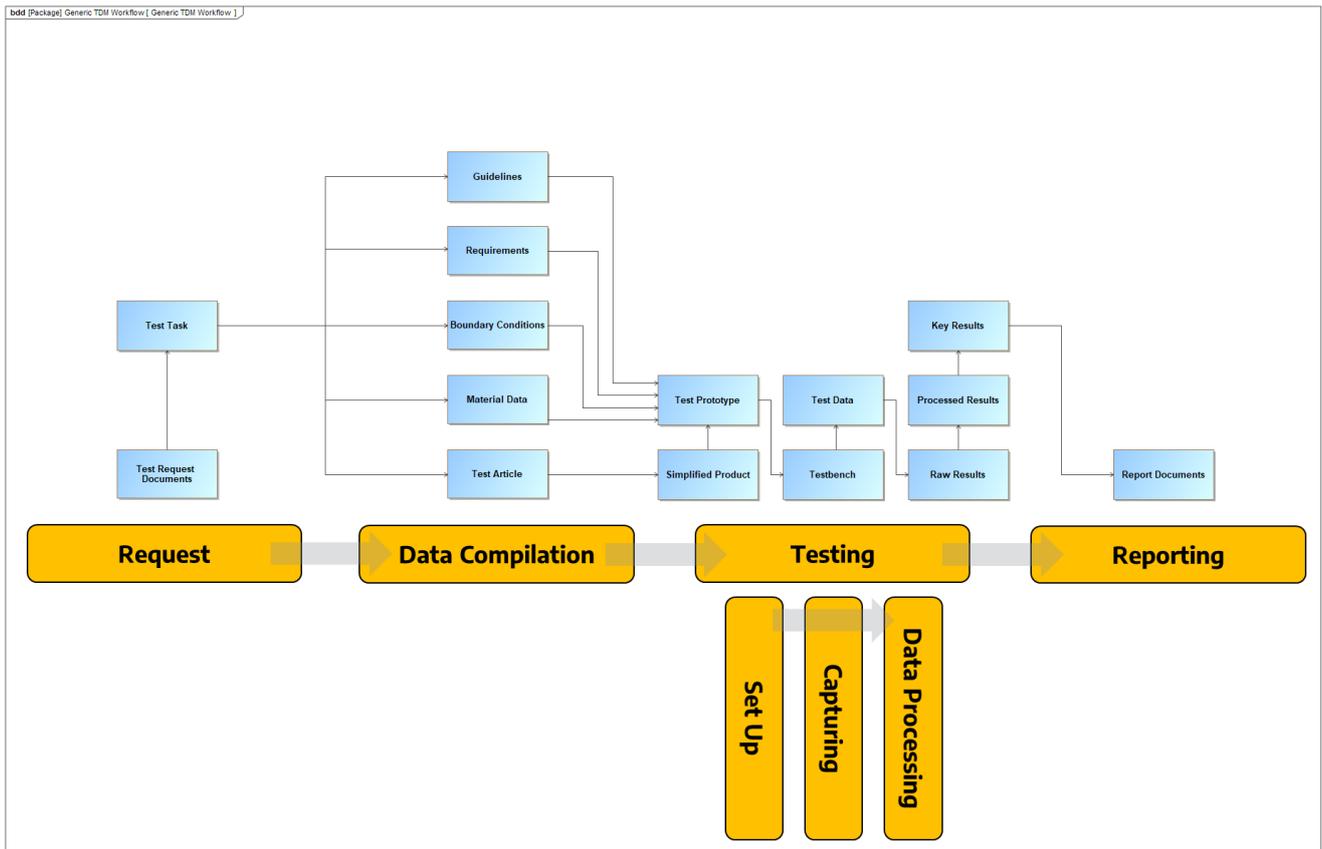


Abb. 3: Generisches Datenmodell einer Prüfstands-Testprozesskette.

Es gibt viele Gemeinsamkeiten und Schnittstellen zwischen Simulations- und Prüfstands-/Testdaten. So helfen Simulationen, gemessene Daten zu interpretieren oder besser zu verstehen oder Hilfskonstruktionen z. B. zur Halterung eines Testobjektes auszulegen und zu optimieren. Testdaten wiederum können herangezogen werden, um Randbedingungen für Simulationen zu generieren oder um die Qualität einer Simulation zu verbessern, indem Messungen mit Simulationsergebnisse direkt verglichen werden mit dem Ziel, die Anzahl der notwendigen Tests auf ein sinnvolles Minimum zu reduzieren. Hier spielt die genaue Lokalisierung von Sensoren auf dem Testobjekt und deren digitale Repräsentation in der Simulation eine entscheidende Rolle. Eine Verknüpfung der beiden Datenmanagementsysteme hilft, den Datenaustausch effizient zu gestalten und auch hier Zeit einzusparen. Gerade dem Austausch von Parametern kommt dabei eine große Bedeutung zu [7], [8]. Verschiedene Verknüpfungsszenarien werden im nächsten Kapitel beleuchtet.

### 3 Verknüpfungsszenarien

#### 3.1 Ein Blick in die Praxis – der Anwender-Roundtable SDM

In den Kontext der Digitalisierung gerückt erscheint die Einführung eines SDM offensichtlich unabdingbar zu sein, um von einer hardware-dominierten Funktionsabsicherung den Weg zu einer überwiegend virtuellen Systemabsicherung durch häufigeres Simulieren des Systemverhaltens über die einzelnen Domänen hinweg zu ebnen [9]. Ein Blick auf die industrielle Praxis zeigt jedoch schnell: Die Umsetzung der Verknüpfung von Simulationsdaten-, Prüfstands-Testdaten- und Produktdatenmanagement ist eine große Herausforderung und gleichzeitig die zentrale Fragestellung, um reibungslose Arbeitsprozesse zu gewährleisten. Die Lösungsvarianten einzelner Unternehmen gehen bisweilen weit auseinander.

Im Dezember vergangenen Jahres versammelte die dem engineering methods AG und das digital Agenda Magazin im Rahmen des ersten Anwender-Roundtable Simulationsdatenmanagement mehr als 40 Expertenvertreter in Darmstadt [10]. Der Roundtable fand unter der Maxime „Digitalisierung ohne professionelles Simulationsdatenmanagement – kaum vorstellbar aber gelebte Praxis“ statt und hatte die Absicht, als eine anbieterneutrale Austauschplattform für Unternehmensvertreter zu dienen. Nach Impulsvorträgen aus dem Teilnehmerkreis stand der Erfahrungsaustausch während des Workshops im Mittelpunkt der Veranstaltung.

Als Ergebnis des Dialogs wurden einige Fokusthemen identifiziert, die in kommenden Veranstaltungen weitreichend behandelt werden sollen. Unter anderen war das Zusammenspiel zwischen Simulationsdaten-, Testdaten- und Produktdatenmanagement eine zentrale Streitfrage, die kontrovers diskutiert wurde.

Die Experten waren sich darüber einig, dass eine klare Haltung zur Integration von SDM ins PLM-System oder zu festdefinierten Schnittstellen nötig sei. Hinzu stelle sich die Frage, wie sich Simulationsdatenmanagement vom Testdatenmanagement im Detail abgrenzen könne.

Im Grunde genommen gibt es drei Möglichkeiten, eine solche Integration erfolgreich umzusetzen. Die Nutzung eines vollintegrierten Gesamtsystems – die häufig beschworene eierlegende Wollmilchsau –, die Umsetzung über voneinander separierte Systeme, welche sich über Schnittstellen synchronisieren oder eine Data Lake-Lösung könnten das Zusammenspiel der Daten ermöglichen.

Doch was unterscheidet, basierend auf den in Abschnitt zwei vorgestellten generischen Datenmodellen, die verschiedenen Szenarien in der praktischen Anwendung? Wo liegen Mehrwerte und Herausforderungen der einzelnen Optionen? Eine detaillierte Betrachtung folgt auf den nächsten Seiten.

#### 3.2 Vollintegriertes Gesamtsystem

Als erstes Verknüpfungsszenario wird ein vollintegriertes Gesamtsystem mit einer festen Datenstruktur betrachtet, d. h. ein Datenmanagementsystem, welches die Funktionalität eines SDM und TDM bietet und in dem eine feste Datenstruktur implementiert ist, in dem die Daten einsortiert werden. Der Vorteil liegt auf der Hand: Ein vollintegriertes System bietet eine einheitliche Umgebung, um die Aufgaben eines SDM und TDM zu bewältigen und den Datenaustausch zwischen den beiden Domänen einfach zu gestalten, ohne den Umweg z. B. mit Datenexport und -import über diverse Datenaustauschformate gehen zu müssen. Während die Ähnlichkeit der beiden zuvor betrachteten Datenmodelle die Implementierung eines vollintegrierten Gesamtsystems nahelegt, ergibt sich die Komplexität eines solchen Systems aus der Natur der Daten in dem Prozessschritt der Ausführung. Insbesondere ist die Integration der Prüf- und Versuchsstände in einem solchen System sehr aufwändig, wenn z. B. direkt Daten aus dem Prüfstand vom System aufgezeichnet werden sollen.

Mit derzeitigem Kenntnisstand gibt es kein vollintegriertes Gesamtsystem auf dem Markt. Es gibt Ansätze, welche ein generisches Datenmodell nutzen und erweitern (s. Abb. 4). Diese Lösungen sind allerdings nicht auf dem freien Markt verfügbar.

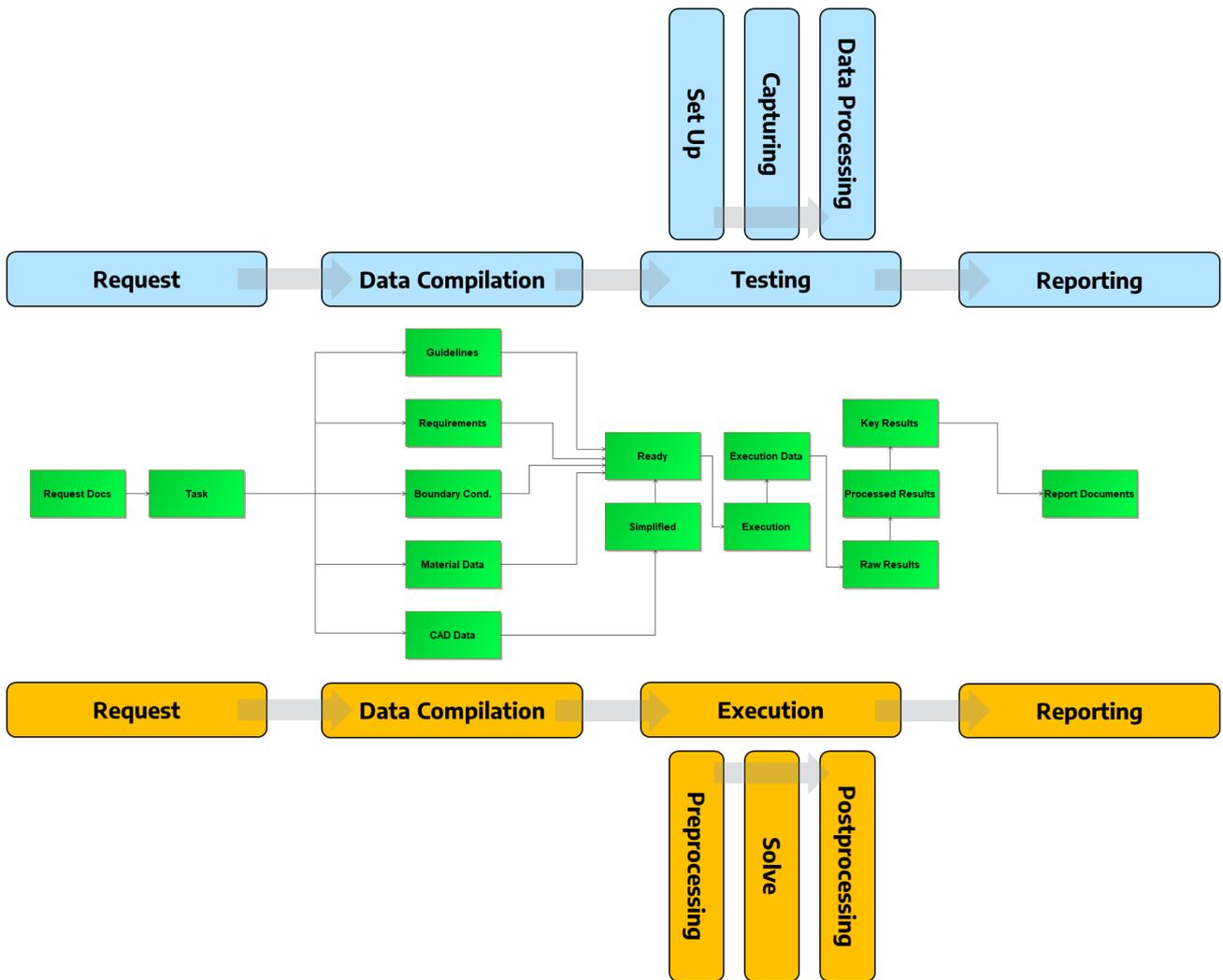


Abb. 4: Generisches Datenmodell eines integrierten Gesamtsystems.

### 3.3 Separate Systeme mit Schnittstellen

Als nächstes Szenario werden separate SDM- und TDM-Systeme betrachtet, die Daten über Schnittstellen austauschen oder bei denen gemeinsame Datenpflege außerhalb der Datenmanagementsysteme betrieben wird. In dem in Abb. 5 gezeigten Schema kommen die Schnittstellen in der Ausführungsphase und der Berichtsphase zum Tragen, während die gemeinsam gepflegten Daten wie Richtlinien und Anforderungen in der Datenzusammenstellung genutzt werden.

Die Schnittstellen können auf verschiedene Art realisiert werden. Die komfortabelste aber pflegeintensivste Lösung ist eine direkte Verbindung, mit der die Datenabfrage direkt aus dem Ursprungssystem in das Zielsystem möglich ist. Sie ist deswegen pflegeintensiv, da diese Schnittstelle mit jeder neuen Version eines der Datenmanagementsysteme zumindest vollumfänglich auf Funktionalität getestet und – sofern notwendig – angepasst werden muss. Eine andere Realisierungsmöglichkeit bedient sich des Datenaustausches mit Hilfe von anerkannten Standards. Einmal realisiert ist der Pflegeaufwand geringer als eine direkte Schnittstelle. Der Nachteil dieser Realisierung ist aber, dass nur Daten ausgetauscht werden können, die im Austauschformat beschrieben sind.

In dem in Abb. 5 gezeigten Schema werden Daten in der Ausführungsphase ausgetauscht, wenn z. B. die Sensorpositionen im CAE-Modell mit den Sensorpositionen auf dem Testobjekt verglichen werden oder Prüfstands-Lastprofile mit Hilfe eines CAE-Modells gesteuert werden. Entsprechend aufbereitete Schlüsselresultate werden ebenfalls ausgetauscht, wenn z. B. Daten aus dem CAE-Modell helfen, die

Prüfstandsdaten zu reduzieren. Zum Schluss ist es naheliegend, die Auswertungsdokumente wechselseitig zugänglich zu machen, um die Berechnungsergebnisse mit den Prüfstandsergebnissen vergleichen zu können. Gemeinsam gepflegte Daten können Richtlinien und Anforderungen sein. So können aus den Anforderungen für ein Test auch Anforderungen (z. B. Randbedingungen) für eine CAE-Berechnung abgeleitet werden. Richtlinien z. B. für eine CAE-Vernetzung können über die Art des Bauteils und deren Belastungsprofil abgeleitet werden. So unterscheidet sich die Vernetzung für einen Crash-Versuch von einer Vernetzung zur Berechnung der Betriebsfestigkeit. Eine gemeinsame Datenpflege verknüpft beide Bereiche, so dass hier eine enge Verzahnung zwischen Versuch und CAE-Berechnung realisiert wird.

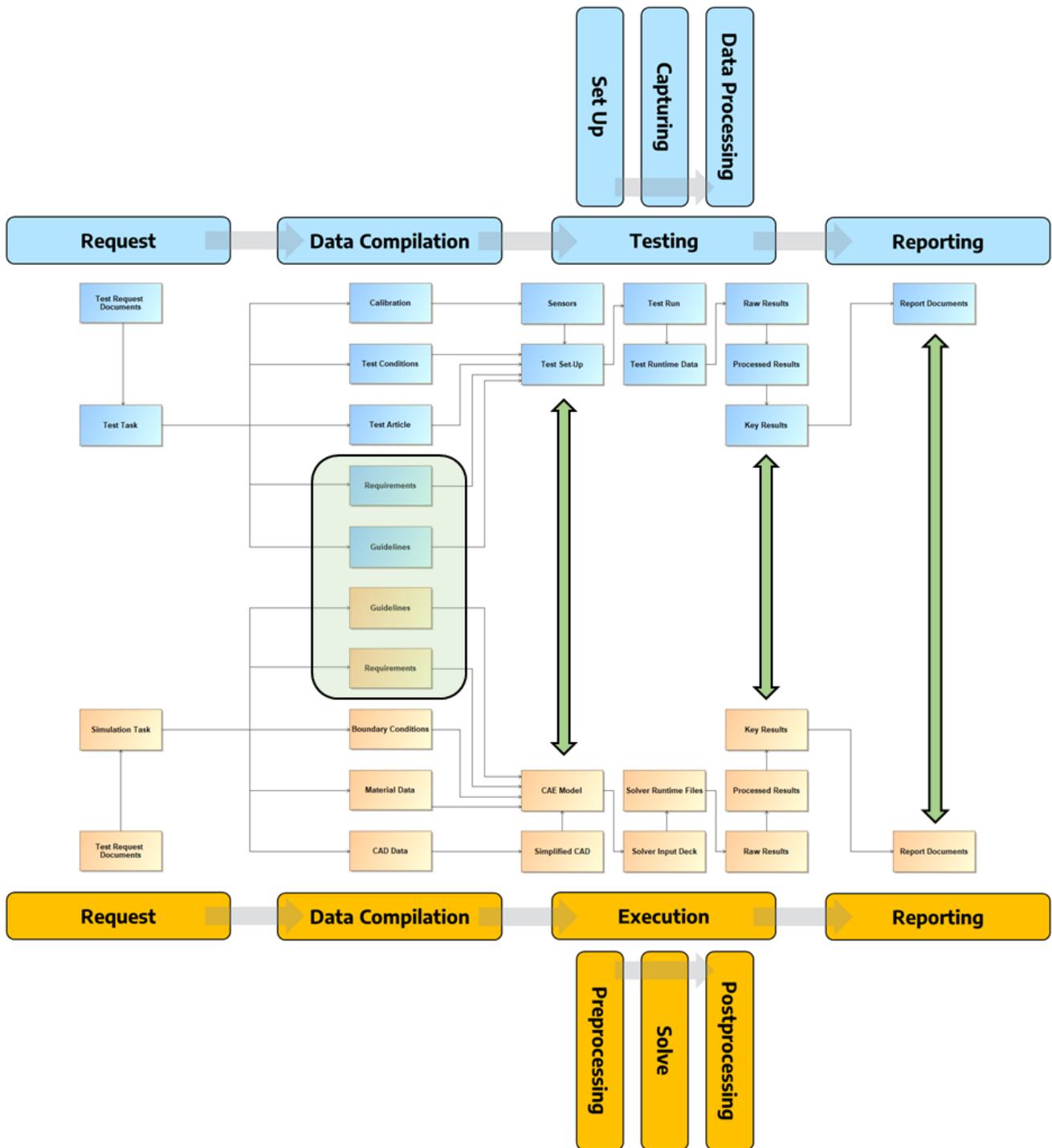


Abb. 5: Datenmodelle zweier separater Systeme und Verknüpfungen zwischen einzelnen Objekten.

### 3.4 Integration mittels eines Data Lakes

Als dritter Ansatz soll die Integration mittels des Konzepts eines Data Lakes betrachtet werden. Dieser Ansatz zeichnet sich dadurch aus, dass alle Daten in einem Datenspeicher gesammelt werden, ohne sie in einer festen Datenstruktur einzuordnen. Alle Daten werden mit Metadaten versehen, so dass sie anhand dieser Metadaten wieder identifiziert und weiterverarbeitet werden können. Dabei ist es zunächst nicht von Bedeutung, ob diese Daten aus einer Simulation oder von einer Messung kommen. Ein Datenmanagement erfolgt hier auf der Ebene der Metadaten, die Unternehmensarchitektur wird in der Struktur der Metadaten abgebildet. Über eine entsprechende Kombination von Metadaten können anschließend Projekte angelegt oder einzelne Simulationen identifiziert werden. Auch die Versionierung und die Implementierung eines Rollen- und Rechtesystems ist mit Hilfe entsprechender Metadaten möglich. Dieser Ansatz bietet den großen Vorteil, dass er die Basis für die Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens bietet. Die Metadaten wiederum können von einem Expertensystem genutzt werden, um einen Mehrwert aus den Daten und den Strukturen zu ziehen.

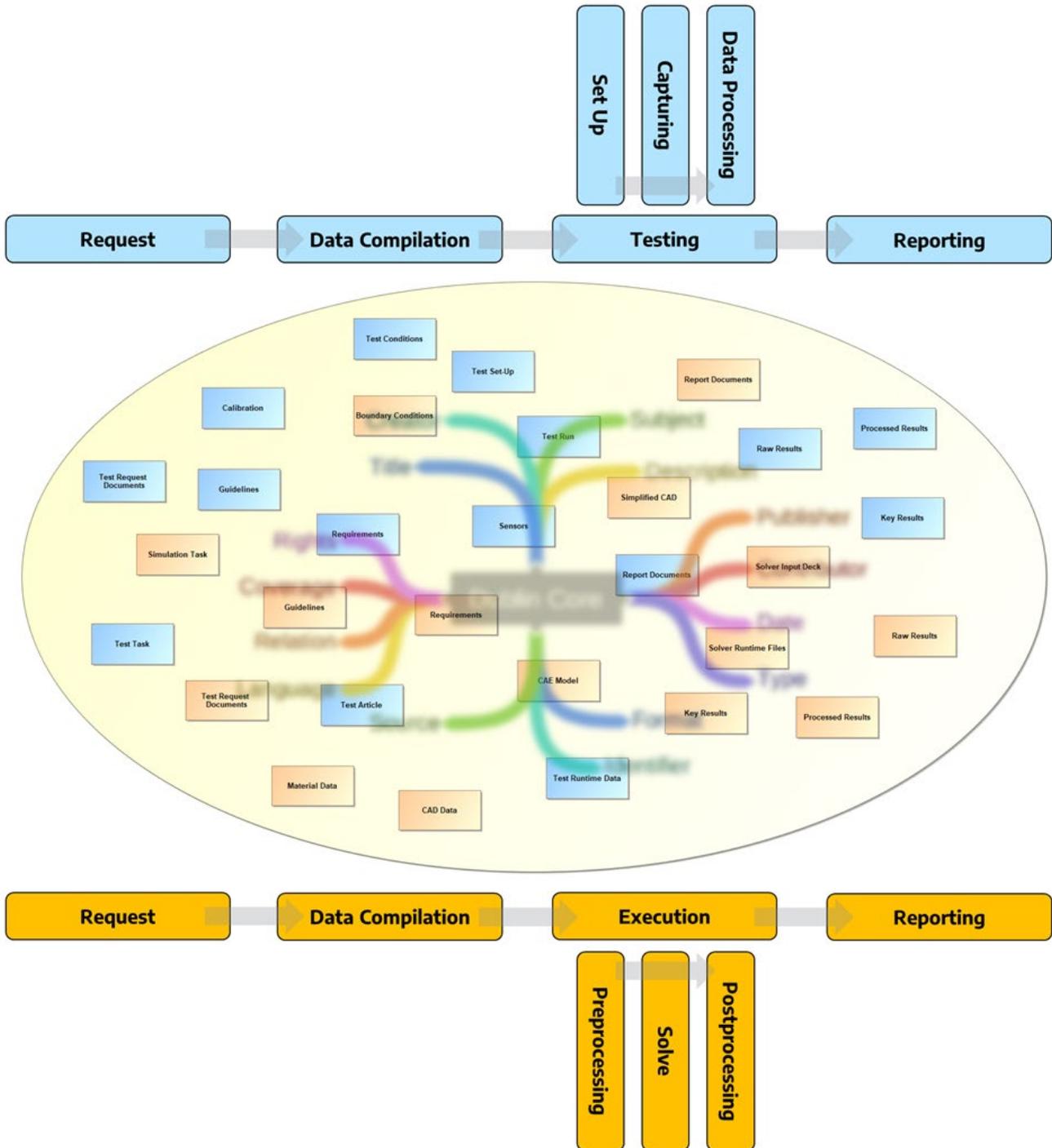


Abb. 6: Konzept eines Data Lakes und der Verknüpfung mit Metadaten.

#### 4 Methodische Vorgehensweise zur Einführung eines verknüpften Datenmanagements

Zur erfolgreichen Realisierung eines Simulations- und Prüfstands-Testdatenmanagements braucht es eine methodische Vorgehensweise, welches Zeit und Ressourcen spart. Übergreifend wird dieses neue Konzept als Systems Engineering Datenmanagement (**SE-DM**) bezeichnet. In Abb. 7 sind zehn Schritte bis zu einer fundierten Systemempfehlung gezeigt.

Nach dem Kick-Off werden zunächst die Ziele definiert und die Rahmenbedingungen für das Datenmanagementsystem festgesteckt (In Scope – Out of Scope). Danach werden Workshops mit den Stakeholdern abgehalten, um Klarheit über die Roadmap zu schaffen und die Potentiale und die Vorteile des neuen Systems gemeinsam herauszuarbeiten. Im nächsten Schritt wird die Anwenderbasis in Form von Key Users mit hinzugezogen. Use Cases und einzelne, repräsentative Workflows werden analysiert. Basierend auf diesen Informationen werden die verwendete IT-Architektur und die notwendigen Schnittstellen definiert. Diese Informationen dienen als Grundlage einer Fit/Gap-Analyse hinsichtlich der notwendigen zusätzlichen Investitionen zur Einführung des Datenmanagementsystems. Ein wichtiger Schritt ist auch die Sammlung und Priorisierung der Anforderungen an das System. Mit Hilfe dieser Anforderungen können Systemtests spezifiziert werden, um genaue Abnahmekriterien abzuleiten. Zum Schluss wird eine Roadmap zur Implementierung festgelegt, und das technische Konzept des Datenmanagementsystems wird dokumentiert. Auf Basis dieser Vorarbeiten können Anbieter mit genauen Informationen für ein Angebot versorgt werden, so dass eine Vorauswahl (Tool Benchmark) von Systemen getroffen werden kann, um dann in die Pilotierung und den Rollout einzusteigen.

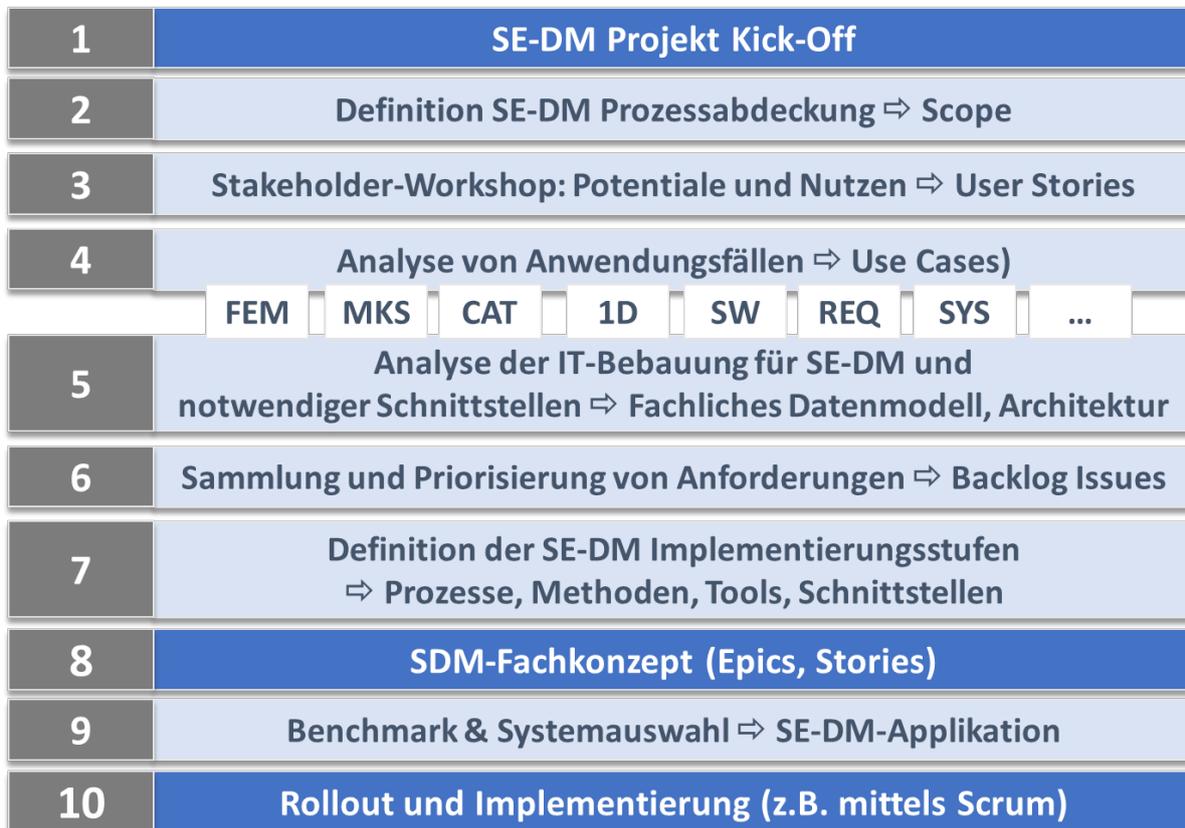


Abb. 7: In zehn Schritten zu einer fundierten Systemempfehlung.

Alle Schritte erfordern ein großes Know-How in der Beratung und im Systemverständnis. Stellvertretend für die Komplexität der einzelnen Schritte ist die Analyse der Use Cases von Schritt 4 in Abb. 8 dargestellt. Ein Ansatz, um die Use Cases herauszuarbeiten, fängt mit der Analyse von repräsentativen Workflows an. Diese können zuerst in einem Interview mit Key Users erfasst und anschließend in einem Diagramm mit dem Standard BPMN (Business Process Model and Notation) visualisiert werden [11]. Aus diesen Informationen lassen sich Use Cases definieren und in einem Use Case-Diagramm darstellen, um das Verhalten der einzelnen Systeme darzustellen. Aus den Use Case-Diagrammen ergibt sich ein erstes Konzept für Rollen und Rechte, und die Use

Cases aus der Sicht einer Rolle werden in einem Szenario zusammengefasst. Das Szenario bietet wiederum die Grundlage für ein agiles Projektmanagement in der Einführungsphase des Systems, denn ein Szenario legt fest, wie sich das System aus Anwenderperspektive verhält, welches anschließend in der Regel agil implementiert und realisiert wird.

Aus dem Use Case-Diagramm ergibt sich außerdem ein erstes Gerüst für Anforderungen, welche in einem nachfolgenden Beratungsschritt verfeinert werden. Aus den Anforderungen können idealerweise direkt Tests abgeleitet werden, welche auch als Abnahmekriterien verwendet werden können.

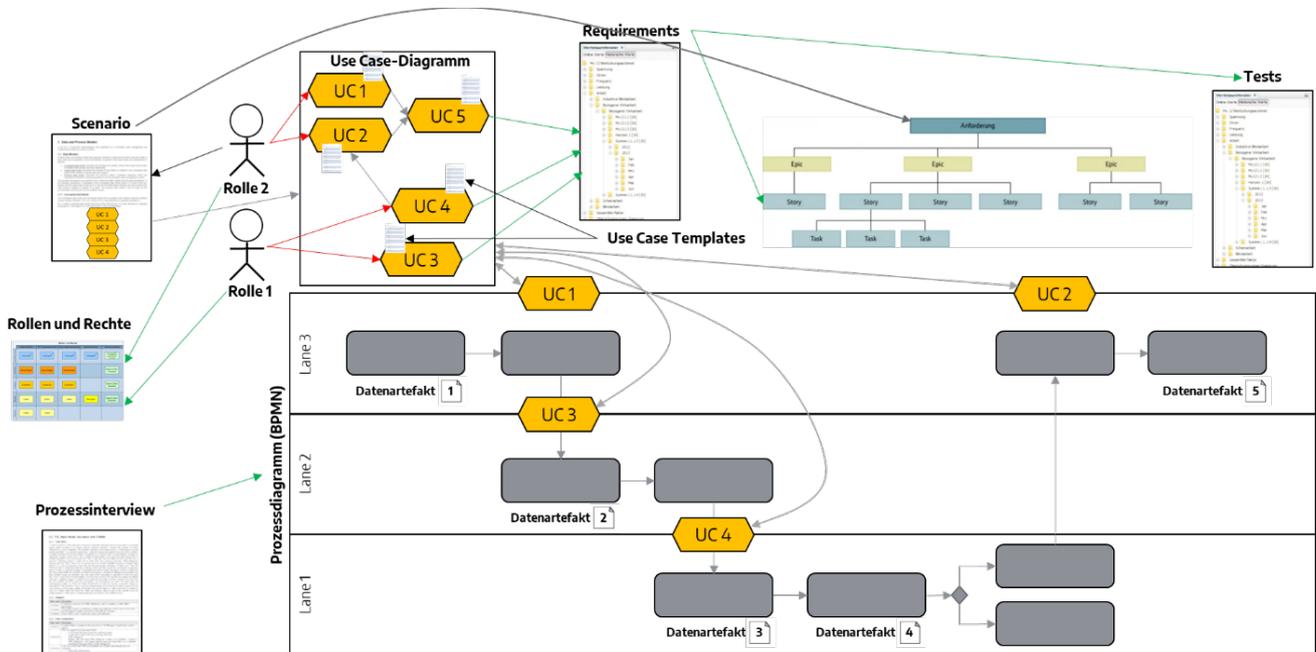


Abb. 8: Die Analyse eines Workflows bietet die Grundlage für Use Cases, Use Case-Diagramme, Szenarien und weiteren Informationen, welche in ihrer Gesamtheit das Verhalten und die Eigenschaften des betrachteten Systems wiedergeben.

### 5 Mehrwerte eines erfolgreich verknüpften Datenmanagements (SE-DM)

Im Zuge der erfolgreichen Verknüpfung von Simulations-, Testdaten sowie Produktdaten im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung können massiv Nutzenpotentiale gehoben und die eigene Wettbewerbsfähigkeit gesichert werden [3],[4]. Kosteneffekte sind dabei vielfältig und können sich auswirken auf z.B.:

- **Verkürzung Time-to-Market** durch schnellere Angebotserstellung. Mehr Angebote in kürzerer Zeit durch bessere Anforderungsbewertung und dadurch mehr Auftragsvolumen (bei gleichbleibender Abschlussrate).
- **Bessere Qualität der Produkte** durch mehr Simulation in gleicher Zeit. Dadurch weniger Tests notwendig, weniger Prototypen und letztendlich weniger Rückläufer, integrierte Auswirkungsanalyse (FMEA) durch Verbindung mit Simulation und Datenvernetzung mit reduziertem Aufwand durchführbar.
- **Höhere Effizienz im Entwicklungsprozess** durch bessere Datenvernetzung und Automatisierung von Prozessen. Die gleiche Anzahl Mitarbeiter kann mehr Entwicklungsleistung erzeugen. Mehr wertschöpfende Tätigkeiten durch Abnahme der „Nebentätigkeiten“ zur Datensuche und Datenverwaltung.
- **Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit** durch Erfüllung der höheren Kundenanforderungen hinsichtlich Datenlieferung für den Digitalen Zwilling (Simulationsmodelle) und Anforderungen an Auditierung von Lieferanten (Nachvollziehbarkeit von digitalen Informationen, Sicherheitsstandards).

Zusammengefasst liegt der Mehrwert in den Folgen der effizienteren Verwaltung großer Mengen Engineering relevanter Daten über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg. Zur erfolgreichen Umsetzung eines solchen Datenmanagementkonzepts ist es essentiell, alle Bausteine entlang des Entwicklungsprozesses, wie Anforderungsmanagement, Entwicklung, Simulation, Testing, Produktion, Maintenance oder Service,

hinsichtlich Strukturierung und Nachvollziehbarkeit zu optimieren sowie auf ihre Zukunftsfähigkeit für den Unternehmenserfolg zu prüfen [6].

Disziplinen wie Systems Engineering und die Umsetzung eines Digital Twin – unter Zuhilfenahme von Techniken der Datenintegration, Datenvernetzung und des Datenmanagements – sind Hilfsmittel, um einen echten Nutzen aus der sich kontinuierlich weiter digitalisierenden Produktentwicklung zu ziehen.

Dabei spielt auch die Validierung von Bauteilen und Komponenten zum Nachweis des geforderten Verhaltens eine entscheidende Rolle. Eine Investition in digitale Methoden und Tools führt in der Regel zur Verkürzung der Entwicklungszeiten bei gleichzeitiger Reduktion der Validierungskosten wie der Effekt in der nachfolgenden Abbildung zeigt.

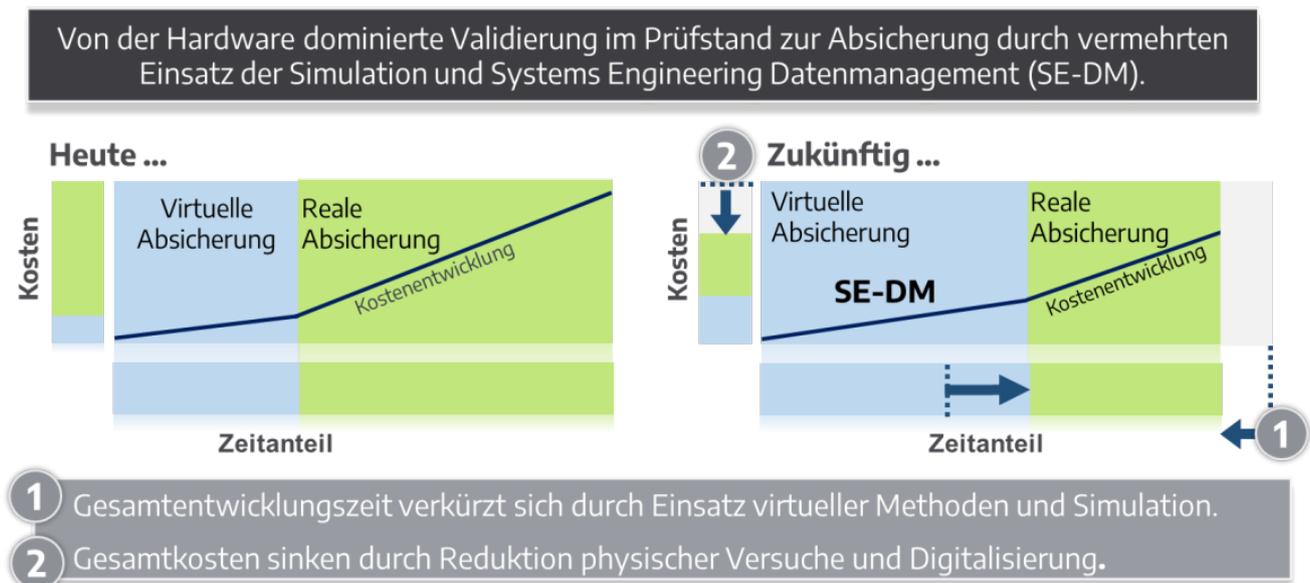


Abb. 9: System Engineering Datenmanagement (SE-DM).

Nachfolgend soll der quantitative Nutzen des SE-DM an Hand eines kurzen Beispiels in Bezug auf das Zusammenspiel von Simulations- und Testdaten aufgezeigt werden.

Annahme (aus Projekterfahrungen der :em engineering methods AG):

**100 SE-DM Anwender (Berechner, Tester, Projektleiter etc.) mit einem internen Stundensatz von 100,00 EUR und 1500h/Jahr Arbeitszeit.**

Dies ergibt ein verfügbares Potential von:

**Potential: 100 \* 100,00 EUR \* 1.500h = 15.000.000 EUR/Jahr**

Gerade beim Aufbau neuer Modelle ist es ohne Datenmanagement unmöglich, wiederverwendbare Modelle zu finden, die ähnliche Simulationsparameter beinhaltet haben. Der manuelle Vergleich von nicht miteinander verknüpften Versuchs- und Simulationsergebnissen wird schnell extrem zeitaufwändig, wenn die Versionsstände definiert werden sollen. Eine durchgängige Nachvollziehbarkeit (Traceability) ist ohne SE-DM überhaupt nicht zu erreichen.

Die Modellerstellungszeit wird meistens mit ca. 30 % der Arbeitszeit angegeben. Damit wäre ein rechnerisches **Potential von 4.500.000 EUR** vorhanden. Der ROI einer SE-DM Lösung wird in der Regel in den ersten 9-12 Monaten erreicht.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Simulations- und Testdatenmanagement ist ein wichtiger Bestandteil in der Unternehmensarchitektur. An sich bieten beide Systeme einen unternehmerischen Mehrwert durch Zeitersparnis in der Datensuche und der Bearbeitung von Aufgaben. Eine Verknüpfung beider Systeme bietet einen zusätzlichen Mehrwert durch eine tiefere Integration von Versuch und Berechnung.

Diese Verknüpfung kann auf unterschiedlicher Weise realisiert werden. Es wurden drei Szenarien betrachtet, wobei ein realistisches Szenario auf der punktuellen Verknüpfung zweier getrennter Datenmanagementsysteme beruht.

Die erfolgreiche Einführung solcher Systeme beruht auf einer holistischen Betrachtung des Unternehmens. In zehn Schritten können die Bedarfe und Ziele sowie die Anforderungen an ein Datenmanagementsystem formuliert werden, um das richtige System passend zur Unternehmensarchitektur zu wählen.

### Literatur

- [1] Gabler Wirtschaftslexikon.
- [2] Dr. M. Krastel (:em AG): Integration der Simulation und Berechnung in eine PDM Umgebung – die Arbeitsgruppe SimPDM. Produktdatenjournal 2/2004.
- [3] Dr. M. Krastel (:em AG), T. Merkt (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG): Virtuelle Produktabsicherung auf Basis eines CAE Datenmanagements. VDI Tagung „Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau“, 2006.
- [4] Dr. M. Krastel (:em AG): Erfolge bei Integration der Simulation und Berechnung in eine PDM-Umgebung. Produktdatenjournal 2/2007.
- [5] Dr. M. Krastel (:em AG): Integration of Simulation and Computation in a PDM-Environment (SimPDM). NAFEMS Seminar Konstruktionsnahe Berechnung - Potenzial und Herausforderung. 2008.
- [6] Dr. M. Krastel (:em AG): Beitrag zum Unternehmenserfolg durch Simulationsdatenmanagement. Digital Engineering Magazin 04/2008.
- [7] P. Tabbert (:em AG): Requirements for a parametric simulation data management for mechatronic engineering. NAFEMS Tagung „Simulation Data Management - Integration in die Produktentwicklung. 2009.
- [8] Dr. M. Krastel (:em AG), P. Tabbert (:em AG): Parametrisches CAE-Datenmanagement im Zentrum des V-Modells. Economic Engineering Nr. 1/2011.
- [9] Dr. Sven Kleiner, Dr. Marcus Krastel: Model-based Systems Engineering: von der dokumentenzentrierten zur modell-basierten Arbeitsweise. Economic Engineering, Ausgabe Dez. 2015/Jan. 2016.
- [10] Dr. Bernhard Valnion: Roundtable offenbart Handlungsbedarf bei Simulationsdatenmanagement. D1g1tal AGENDA, 1/2020, S. 86 ff.
- [11] <http://www.bpmn.org/>
- [12] Boy, J.; Grau, M.; Trautmann, T.: Management und interdisziplinäre Integration von CAE-Daten. NAFEMS Magazin Ausgabe 15 (März 2010), S. 46 ff.



Professional Simulation Engineer

A New Standard for  
Simulation Engineers

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

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

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

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

Um die Aktivitäten von NAFEMS in den 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 (Cascate)
- R. Stauch (Hochschule Esslingen)
- M. Stephan (DHBW Mosbach)
- A. Stück (DLR)

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

Folgende Gruppen sind aktuell bei NAFEMS aktiv:

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

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

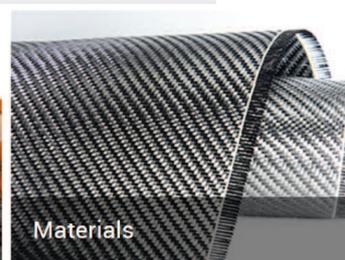
There are currently over 1,500 resources in the centre with this number growing weekly. NAFEMS Members have access to numerous types of resource as part of their membership, including presentations from previous events, conference papers, webinar archives, and much more.



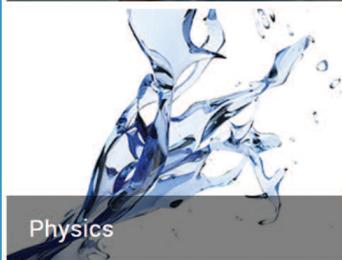
Analysis Management



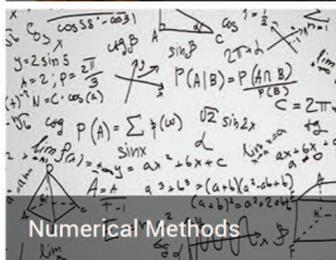
Industry & Products



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

Adresse für Fensterkuvert



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

## Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (4/2020)

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

**Absender**

Firma: \_\_\_\_\_

Abt.: \_\_\_\_\_

Titel, Vor-/Nachname: \_\_\_\_\_

Straße: \_\_\_\_\_

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

Tel.: \_\_\_\_\_

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

e-mail: \_\_\_\_\_

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

Firma: \_\_\_\_\_

Abt.: \_\_\_\_\_

Titel, Vor-/Nachname: \_\_\_\_\_

Straße: \_\_\_\_\_

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

Tel.: \_\_\_\_\_

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

e-mail: \_\_\_\_\_

