

# Online-Magazin

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

*Wir wünschen Ihnen von Herzen eine schöne, erholsame und besinnliche Weihnachtszeit sowie ein gesundes und erfolgreiches 2022.*

**Fachbeiträge in dieser Ausgabe**

**MATERIALMODELLIERUNG**

**Multiphysikalische FEM Modellierung in Brennstoffzellen-Fahrzeugen beim Abdichten von Wasserstoff-Tanks**  
 Ing.-/Sachverständigenbüro Achenbach / University of Luxembourg

**STRUKTUROPTIMIERUNG**

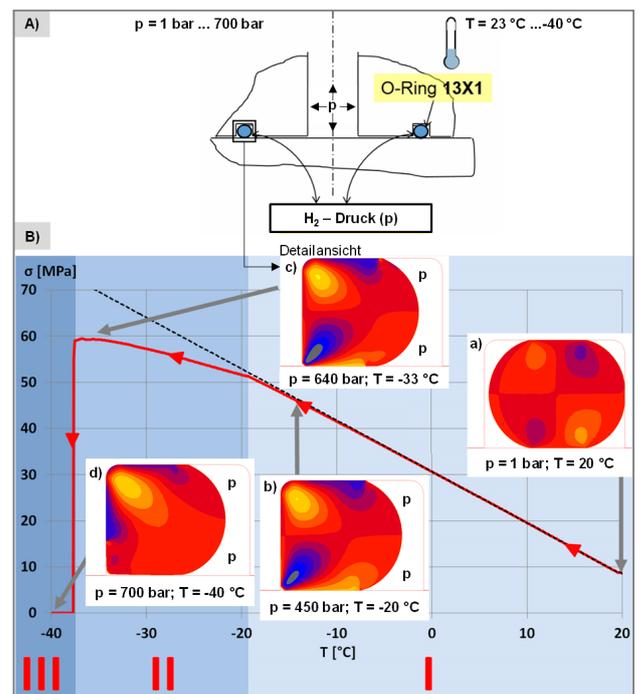
**Prozessbasierte Sickenoptimierung langfaserverstärkter Kunststoffbauteile**  
 Karlsruher Institut für Technologie, IPEK / University of Toronto

**REFABRIKATION**

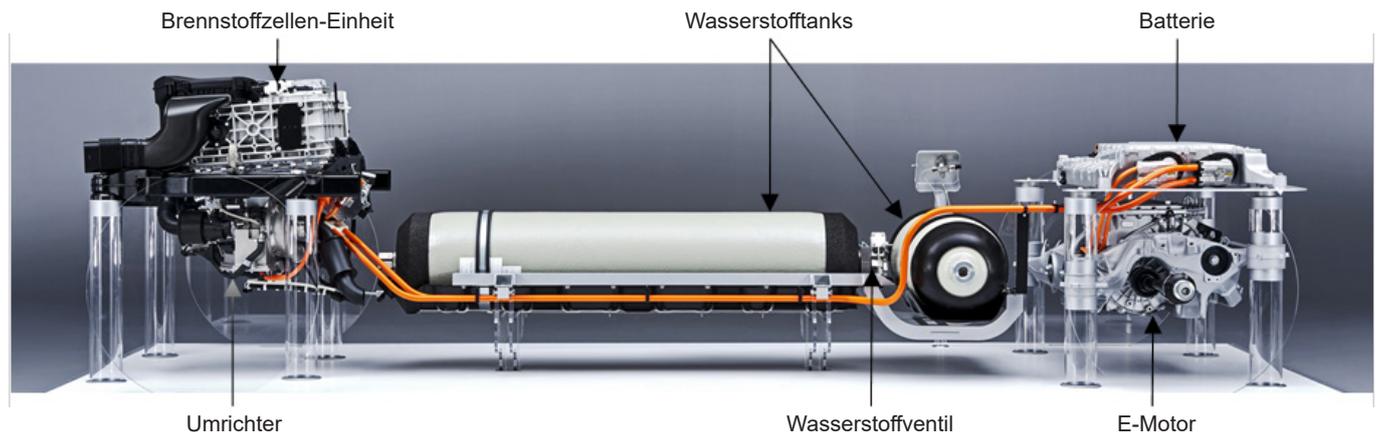
**Methodik zur zerstörungsfreien Zustandsermittlung von Getriebekomponenten basierend auf effizienten Lebensdauer-tests für ein zweites Produktleben**  
 Mercedes-Benz / Universität Stuttgart

**MODELLOPTIMIERUNG**

**Einsatz maschineller Lernverfahren zum Model-Updating von FEM Modellen in der Vibroakustik**  
 Karlsruher Institut für Technologie, IPEK / Intes / Renumics



A) Axial-abdichtender O-Ring mit B) Detailansicht der Schubspannung im O-Ringquerschnitt für den Tankvorgang



Schematische Darstellung eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges mit Wasserstoff-Tanksystem (Quelle: Achenbach/Repplinger, Literaturhinweis [3])

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

Sponsoren dieser Ausgabe:



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

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

das NAFEMS Online Magazin befasst sich mit den mannigfaltigen Aspekten der Simulation realer Vorgänge durch eine virtuelle Abbildung. Der Begriff Simulation geht zurück auf das lateinische Verb *simulare*, das man mit ähnlich machen oder abbilden übersetzen kann. Es kann aber auch vorspiegeln oder heucheln heißen. Eine solche Bedeutung wird auch in dem abwertenden Begriff *Simulant* angesprochen. Das Herausgeber-Team setzt sich dafür ein, dass diese zweite Bedeutung in den Beiträgen des NAFEMS Online-Magazins nicht zum Zuge kommt. Wichtig ist dafür, dass das Modell, mit dem die Realität abgebildet werden soll, mindestens die für die Ergebnisse entscheidenden Eigenschaften hinreichend genau beschreibt. Es ist nicht immer ganz leicht herauszufinden, welche Eigenschaften wesentlich sind. Es besteht die Tendenz, das Modell zu überfrachten, also mit Kanonen nach Spatzen zu schießen. Das hat eine unnötig komplexe Analyse zur Folge, im Extremfall kann es sogar zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Auch dieser Fehlentwicklung versucht das Herausgeber-Team, einen Riegel vorzuschieben. Die wissenschaftlichen Beiträge dieses Heftes sind entlang der beschriebenen Leitlinien geprüft und für gut befunden.



*Prof. Dr.-Ing.  
Klaus Rohwer*

Der erste Beitrag behandelt Probleme bei der Abdichtung des Wasserstofftanks von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb. Ein komplexes Materialmodell beschreibt das Verhalten von O-Ringen in Abhängigkeit von den realen Betriebsbedingungen, wobei insbesondere die Tieftemperatureigenschaften des Elastomers für die Dichtigkeit von Bedeutung sind. Zur Optimierung versickerter Bauteile aus Sheet Molding Compounds wird im zweiten Beitrag vorgeschlagen, zunächst das Sickenmuster aus den Trajektorien der Hauptbiegespannungen zu ermitteln. In einem zweiten Schritt werden dann die Sickenquerschnitte optimiert. Nachhaltigkeit gewinnt auch im Automobilbau zunehmend an Bedeutung. Um Teile eines Automatikgetriebes für ein zweites Leben aufzubereiten, muss der aktuelle Zustand jeder einzelnen Komponente ermittelt werden. Im dritten Beitrag wird dazu vorgeschlagen, neben einer datenbasierten Vorsortierung ein Kamerasystem zur optischen Bewertung des Bauteilzustands einzusetzen. Kleine Abweichungen von den Nennwerten einer Struktur können erheblichen Einfluss auf das Systemverhalten und die Lebensdauer haben. Der vierte Beitrag zeigt auf, wie künstliche Intelligenz helfen kann, solche Abweichungen in der Simulation zu berücksichtigen und damit realistischere Optimierungsergebnisse zu erreichen.

Diese wissenschaftlichen Beiträge spiegeln die Vielfältigkeit der Aufgaben wider, die mit Hilfe der numerischen Simulation untersucht werden können. Ich hoffe und wünsche mir, dass auch für Sie eine Anregung dabei ist, die Ihnen bei der Lösung anstehender Probleme hilft.

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)



**HEXAGON**

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



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

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

**NAFEMS Events**  
 Übersicht: Konferenzen, Schulungen.....5  
 Int. Seminar: Advances in Structural Dynamic Simulation .....6  
 NAFEMS DACH Regionalkonferenz 2022 .....7  
 ML und AI in der Strömungsmechanik und der Strukturanalyse .....8  
 Generative Design .....9  
 Kurzer Rückblick: NAFEMS World Congress 2021 ..... 10

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

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

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

**Neuigkeiten** ..... 22

**Veranstaltungskalender** ..... 29

**Fachbeiträge**

**Materialmodellierung**  
**Multiphysikalische FEM Modellierung in Brennstoffzellen-Fahrzeugen beim Abdichten von Wasserstoff-Tanks** ..... 31  
 M. Achenbach (Ingenieur- und Sachverständigenbüro Achenbach);  
 C. Replinger (Univ. of Luxembourg)

**Strukturoptimierung**  
**Prozessbasierte Sickenoptimierung langfaserverstärkter Kunststoffbauteile**.....41  
 S. Revfi, M. Fünkner, A. Albers (Karlsruher Institut für Technologie (KIT)); K. Behdian (Univ. of Toronto)

**Refabrikation**  
**Methodik zur zerstörungsfreien Zustandsermittlung von Getriebekomponenten basierend auf effizienten Lebensdauertests für ein zweites Produktleben**..... 50  
 A. Kroner (Mercedes-Benz/Univ. Stuttgart);  
 T. Herzig, F. Wellhäuser, M. Dazer, B. Bertsche (Univ. Stuttgart)

**Modelloptimierung**  
**Einsatz maschineller Lernverfahren zum Model-Updating von FEM Modellen in der Vibroakustik** ..... 61  
 T. Gohlke, M. Bopp, M. Behrendt, A. Albers (Karlsruher Institut für Technologie (KIT)); N. Wagner (Intes); S. Slavetinsky (Renumics)

**PSE**  
 PSE - Professional Simulation Engineer Zertifizierung ..... 70/78

**Über NAFEMS**

Join - Übersicht und Ziele ..... 71  
 Mitglied werden ..... 74  
 Mitgliedsmodelle ..... 75  
 Technische Arbeitsgruppen ..... 76  
 Veranstaltungen ..... 77  
 Training ..... 79  
 Resource Centre ..... 80  
 Publikationen..... 81

**Impressum**

**Editor-in-Chief**

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

**Redaktioneller Beirat**

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

**Redaktion**

Albert Roger Oswald  
 Tel. +49 (0) 176 - 217 984 01  
 roger.oswald@nafems.org

**Gestaltung / Layout / Anzeigen**

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

**Bezugspreis / Aboservice**

Kostenlos  
 Tel. +49 (0) 176 217 984 01  
 magazin@nafems.de

**Anzeigenpreise**

Preisliste vom 01.01.2021

**Verteilung / Bezug**

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

**Copyright © 2021, Werbos GbR.**

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

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

**ISSN 2311-522X**

## NAFEMS Konferenzen/Seminare in DACH 2022

<b>Advances in Structural Dynamic Simulation</b> Int. Seminar, <a href="http://www.nafems.org/dyn22">www.nafems.org/dyn22</a>	29. - 30. März	München
<b>Machine Learning und Artificial Intelligence in der Strömungsmechanik und der Strukturanalyse</b> Seminar, <a href="http://www.nafems.org/mlai22">www.nafems.org/mlai22</a>	16. - 17. Mai	Wiesbaden
<b>Generative Design</b> Seminar, <a href="http://www.nafems.org/gen22">www.nafems.org/gen22</a>	18.-19. Mai	Wiesbaden
<b>NAFEMS DACH Regionalkonferenz 2022</b> Konferenz, <a href="http://www.nafems.org/dach22">www.nafems.org/dach22</a>	04. - 06. Oktober	Bamberg

### Please note:

All above events are planned as on-site with opportunities to stream in presentations. All will be in line with the official Covid19 rules and regulations. If an event can't be held due to restrictions, we will either postpone or switch the event(s) to live online.

Weitere NAFEMS Seminare und Konferenzen ausserhalb von DACH finden Sie unter [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events).

## Schulungen in DACH Q1/Q2 2022

<b>Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear</b> 2-tägig, Online, <a href="http://www.nafems.org/fkm-nonlin22-1">www.nafems.org/fkm-nonlin22-1</a>	23. - 24. Februar	Online
<b>Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</b> 2-tägig, Online, <a href="http://www.nafems.org/fem22-1">www.nafems.org/fem22-1</a>	09.-10. März	Online
<b>Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie (7. Ausgabe, 2020)</b> 2-tägig, Online, <a href="http://www.nafems.org/fkm22-1">www.nafems.org/fkm22-1</a>	05. - 06. April	Online
<b>Verification and Validation in Engineering Simulation</b> 2,5-tägig, Online, <a href="http://www.nafems.org/vandv22-1">www.nafems.org/vandv22-1</a>	10. - 12. Mai	Online
<b>Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung</b> <a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a>	Auf Anfrage	Online

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

Weitere Schulungen und Kurse ausserhalb von DACH finden Sie unter [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events).

NAFEMS International Seminar

Advances in Structural Dynamic Simulation

29. - 30. März 2022, München, Hilton City

CALL FOR PAPERS

Bitte Titel und kurzen Abstract bis 4. Februar an roger.oswald@nafems.org senden

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

The numerical methods that are used to simulation dynamic events are relatively mature but new capabilities are constantly appearing that allows more complex behaviour to be represented. The use of model reduction techniques allows larger models to be analysed in a time efficient manner, helping dynamic analysis to be more easily integrated into the design process. The boundaries between the different dynamic simulation toolkits have become blurred and the engineer now has a range of options to choose from when tackling a problem. As the range of applications that can be tackled by the different toolkits increases it provides the opportunity to chain different methods together, to go beyond component and part simulation and start to analyse the whole dynamic system.

The conference will be of interest to all engineers using Implicit/Explicit FEA and MBD software codes to solve structural dynamic problems. Presenters from around Europe will be demonstrating how their organisation uses Dynamic Simulation to address topics like:

- > design of structures using explicit analysis to protect occupants from blast/crash events
- > fine tuning of vehicle handling characteristics using Multibody dynamic codes

- > mitigation of drive train vibration issues using implicit FEA.

Dynamic Simulation comes with unique challenges and the event will also :

- > investigate how AI/ML techniques can help interrogate and make sense of the huge data set of results produced by dynamic simulation.
- > demonstrate how to optimise in a dynamic environment
- > establish how organisations are integrating their dynamic simulation and test capabilities

This conference provides an opportunity to gain an appreciation for the wide range of methods that organisations are leveraging it design better products that operate in dynamic environments.

The conference will include keynotes, technical presentations, and exhibits.

You are invited to submit an abstract by latest 4 February to roger.oswald@nafems.org.

Your NAFEMS team

-----

**Organization**

**Abstract submission**

Short abstract to roger.oswald@nafems.org latest 4 February 2022. It is possible to stream in presentations.

**Author notification**

Approx. 2 weeks after submission deadline. Authors whose abstracts

are accepted will be asked to prepare an extended abstract (typically 1-4 pages) and a PowerPoint presentation. Full written papers will not be required. Extended abstracts must be submitted latest 11 March 2022. Templates will be provided (ppt and word) with the author notifications.

**Venue / hotel**

Hilton Munich City

**Delegate fee**

Not-NAFEMS members: 800 Euro  
 Presenter from companies for the production/ processing of material goods/goods in factories/plants: free  
 NAFEMS members using 4 seminar credits: free\*  
 NAFEMS member with no seminar credits: 500

**Online streamings:**

We will record all presentations and offer streamings after the event at a reduced fee.

**Conference language**

English

**Hardware and software exhibition**

Please request further information.

**Covid-19**

The seminar will be carried out in accordance with the local Covid-19 regulations. If an on-site event won't be possible, we will either postpone the event or switch to purely online.

**Contact**

roger.oswald@nafems.org

**Informationen und Anmeldung**

[www.nafems.org/dyn22](http://www.nafems.org/dyn22)



## Fachkonferenz für Berechnung & Simulation im Engineering

4.- 6.Oktober 2022 | Bamberg | Deutschland

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

### Vorankündigung - ein Call for Papers wird in Kürze veröffentlicht.



Wir laden Sie herzlich zur 6. deutschsprachigen NAFEMS Konferenz vom 4. - 6. Oktober 2022 nach Bamberg, Deutschland, ein.

Die alle zwei Jahre stattfindende Konferenz bietet Ihnen wie immer ein unabhängiges, übergreifendes und umfassendes Informationsangebot im Bereich der numerischen Simulationsmethoden – eine Plattform, auf der neue Techniken, Tools und „Best Practices“ präsentiert werden.



Für Teilnehmer ergibt sich hier die Möglichkeit, auf breiter Basis erfolgreiche Anwendungen und Trends mit Spezialisten aus Forschung und im besonderen Maße aus der Industrie zu diskutieren.

Es erwarten Sie interessante Plenarvorträge, Fachbeiträge von Anwendern verschiedener Softwareprodukte, von Softwareherstellern und Dienstleistern, sowie Workshops und Kurztrainings.



Eine große Ausstellung von Hard- und Softwareausstellern begleitet die Konferenz.

Die Teilnahme ist offen für NAFEMS Mitglieder und Nichtmitglieder, wobei NAFEMS Mitglieder im Rahmen ihrer Mitgliedschaft unter Verwendung von „seminar credits“ kostenlos teilnehmen.

Wir freuen uns sehr, Sie in Bamberg begrüßen zu dürfen. Ein Call for Papers wird in Kürze versendet.

Ihr NAFEMS DACH Lenkungsausschuss

Albert Roger Oswald und das gesamte NAFEMS Team

#### Weitere Regionalkonferenzen

- > UK  
7. - 8. Juni, Milton Keynes, UK
- > NORDIC  
14.-15. Juni, Göteborg, S
- > Americas  
21.-23. Juni, Indianapolis, USA
- > Eastern Europe  
Sept./Okt., Prague, CZE
- > France  
23. - 24. Nov., Paris, F
- > Iberia, ASEAN, India -> tbc



#### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/dach22](http://www.nafems.org/dach22)

## NAFEMS DACH Seminar

# Machine Learning und Artificial Intelligence in der Strömungsmechanik und der Strukturanalyse

Grundlagen, Potenzial für den industriellen Einsatz, Anwendungen

16. - 17. Mai 2022, Wiesbaden, Hotel Oranien

## CALL FOR PAPERS

Bitte Titel und kurzen Abstract bis 18. Februar an [roger.oswald@nafems.org](mailto:roger.oswald@nafems.org) senden

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

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

Auf Grund der Dynamik des Themas sollen in diesem Seminar unterschiedliche Bereiche beleuchtet werden.

Wir freuen uns über Beiträge aus den Bereichen:

- > Anwendungsbeispiele von ML und AI in der Industrie
- > AI-gestützte Optimierung multidimensionaler Strömungs- und Strukturaufgaben
- > Anwendung von AI zur Beschleunigung von physikalischen Modellen in CFD, FE, MBS
- > Organisation und Gliederung der in ML-Prozessen anfallenden Daten

Zielsetzung des Seminars

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

Wir freuen uns auf Ihre Beiträge.

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

## Organization

### Einreichung von Abstracts

Bitte senden Sie Titel mit kurzem Abstract bis spätestens 18. Februar 2022 an [roger.oswald@nafems.org](mailto:roger.oswald@nafems.org).

### Manuskript/PPT

Autoren, deren Abstracts akzeptiert wurden, werden gebeten, ein englischsprachiges Manuskript (typischerweise 4-10 Seiten) zu erstellen.

### Veranstaltungsort / Hotel

Hotel Oranien Wiesbaden  
Wiesbaden

### Fachausstellung und Sponsoring

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

### Teilnahmegebühr

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

### Covid-19

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

## Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/mlai22](http://www.nafems.org/mlai22)

## NAFEMS DACH Seminar

# Generative Design

18. - 19. Mai 2022, Wiesbaden, Hotel Oranien

### CALL FOR PAPERS

Bitte Titel und kurzen Abstract bis 18. Februar an [roger.oswald@nafems.org](mailto:roger.oswald@nafems.org) senden

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

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

Als Simulationsdisziplinen haben sich Strukturmechanik und CFD

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

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

Abgerundet wird die Veranstaltung durch eine Ausstellung von Anbietern auf dem Gebiet von Simulation und Produktentwicklung, die einen Überblick über verfügbare kommerzielle Lösungen geben.

Wir freuen uns über Ihre Vortragsanmeldung mit Abstract bis spätestens 18. Februar 2022 an [roger.oswald@nafems.org](mailto:roger.oswald@nafems.org).

Ihr NAFEMS DACH Steering Committee

### Organization

#### Einreichung von Abstracts

Bitte senden Sie Titel mit kurzem Abstract bis spätestens 18. Februar 2022 an [roger.oswald@nafems.org](mailto:roger.oswald@nafems.org).

#### Manuskript/PPT

Autoren, deren Abstracts akzeptiert wurden, werden gebeten, ein englischsprachiges Manuskript (typischerweise 4-10 Seiten) zu erstellen.

#### Veranstaltungsort / Hotel

Hotel Oranien Wiesbaden  
Wiesbaden

#### Fachausstellung und Sponsoring

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

#### Teilnahmegebühr

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

#### Covid-19

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

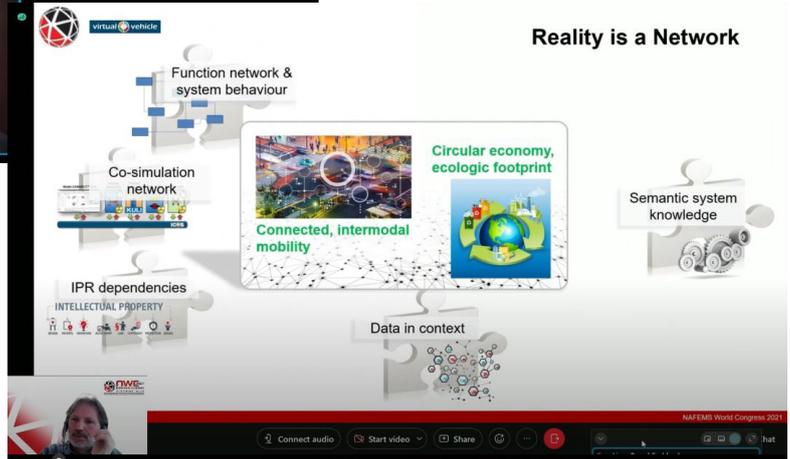
### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/gen22](http://www.nafems.org/gen22)

Kurzer Rückblick:



Über 450 hochqualitative, zumeist live-online Vorträge, live-Diskussionen und live-trainings



Der NWC21 in aller Kürze

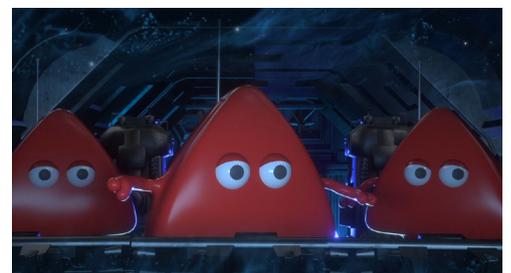
- > 5 Kongresstage
- > über 450 Vorträge in bis zu 12 parallelen Sessions
- > 10 großartige Keynotes
- > zahlreiche Panel-Diskussionen/Workshops
- > NAFEMS-Kurztrainings
- > Download-Zugang zu allen eingereichten Manuskripten
- > Interactive, virtuelle 3D-Ausstellung „World of Simulation“
- > 5th International SPDM Conference
- > Multiphysics Simulation Conference
- > CAE in Automotive Development Symposium
- > ...und sehr viel mehr!

Einen großen Dank auch von den Simus, die dank der fleißigen „Code“-Sammlung von Teilnehmern mit Ihrem Raumschiff zum Planeten „Simu“ heimkehren konnten. Sie sind gut angekommen!

Herzlicher Dank

Wir danken allen Vortragenden, Session chairs, Sponsoren, Ausstellern, Trainern, Reviewern, Partnern, Teilnehmern und allen Beteiligten.

Das war ein Mammut-Projekt und nur deshalb möglich, weil alle an einem Strang gezogen haben. Eine echte Engineering Community - keine leere Worthülse. Wirklich, ganz herzlichen Dank!



## Sponsoren

PLATINUM



GOLD



SPDM



SILVER



## Aussteller

Ansys

Aras

BETA CAE Systems

Cadence

CFX Berlin Software

Dassault Systèmes SIMULIA

Datadvance

Eikosim

Endurica

EnginSoft

ESSS

ESTECO

FEMFAT by Magna Powertrain

GNS Systems

Hexagon - MSC.Software

HBM/HBK

HPC-CoEs EXCELLERAT & POP

INCOSE

JMatPro - MATPLUS

Lautsch Finite Elemente

Microsoft

Neural Concept

Penguin Computing

Siemens Digital Industries Software

Tech Soft 3D

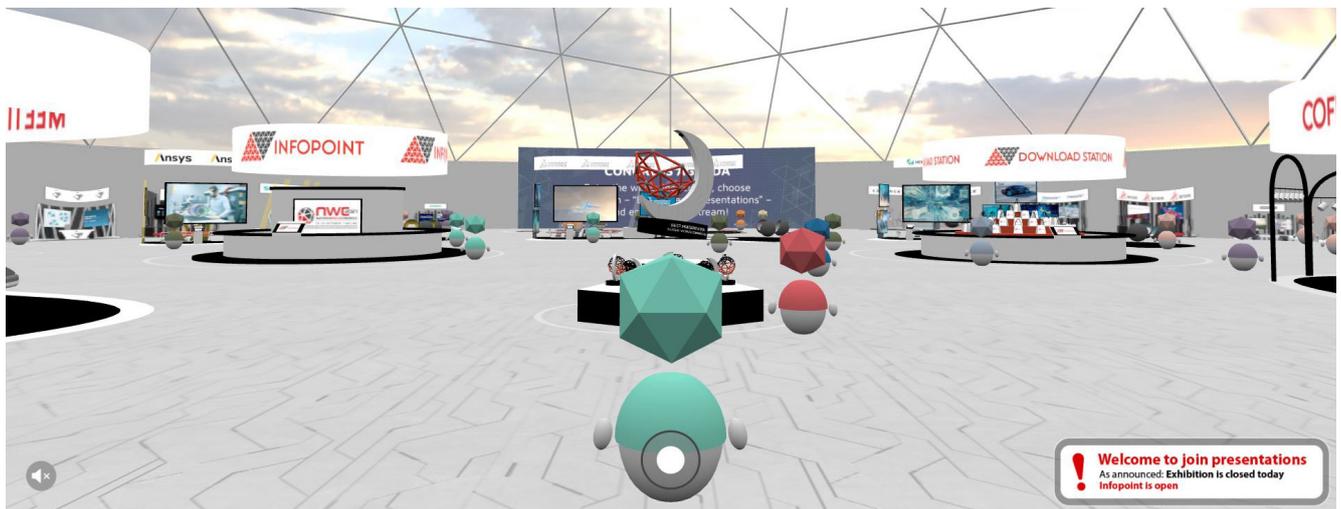
Volume Graphics

## „Regiezentrale“ in Esslingen



## 3D interaktive Ausstellung „World of Simulation“

Teilnehmer steuern mit Ihrem Avatar durch die Ausstellung und konnten per Audio/Video kommunizieren, z. B. mit Ausstellern oder anderen Teilnehmern



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>30</b> Nov 2021</p> <p>Practical Introduction to Finite Element Analysis</p> <p>Cheshire, UK</p> <p>Training Course</p>	<p><b>30</b> Nov 2021</p> <p>Verification and Validation in Engineering Simulation</p> <p>Webex, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>6</b> Dec 2021</p> <p>Today's Opportunities and Challenges of Data Science in Engineering</p> <p>WebEx, Online</p> <p>Technical Community Event</p>
<p><b>8</b> Dec 2021</p> <p>The UC Simulation Center – A P&amp;G and University of Cincinnati Collaborative</p> <p>WebEx, Online</p> <p>Webinar</p>	<p><b>9</b> Dec 2021</p> <p>Un Jumeau Numérique Pour Mieux Connecter La Simulation Multiphysiques Et Le Monde Réel</p> <p>Seminar</p>	<p><b>8</b> Jan 2022</p> <p>Dauids Test Webinar</p> <p>Webinar</p>
<p><b>25</b> Jan 2022</p> <p>La simulación aplicada a la resolución de problemas de ingeniería</p> <p>Webinar</p>	<p><b>23</b> Feb 2022</p> <p>AI, Data Driven Models &amp; Machine Learning: How Will Advanced Technologies Shape Future Simulation...</p> <p>Zuddl, Online</p> <p>Seminar</p>	<p><b>23</b> Feb 2022</p> <p>Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear</p> <p>Webex, Online</p> <p>Training Course</p>
<p><b>29</b> Mar 2022</p> <p>Advances in Structural Dynamic Simulation</p> <p>Munich, Germany</p> <p>Seminar</p>	<p><b>5</b> Apr 2022</p> <p>Festigkeitsnachweis mit der FKM-Richtlinie</p> <p>online, Online</p> <p>Training Course</p>	<p><b>16</b> May 2022</p> <p>Machine Learning und Artificial Intelligence in der Strömungsmechanik und der Strukturanalyse</p> <p>Wiesbaden, Germany</p> <p>Seminar</p>
<p><b>18</b> May 2022</p> <p>Generative Design</p> <p>Wiesbaden, Germany</p> <p>Seminar</p>	<p><b>1</b> Jun 2022</p> <p>DQ Test Event</p> <p>Glasgow, UK</p> <p>Training Course</p>	<p><b>7</b> Jun 2022</p> <p>NAFEMS UK Conference 2022</p> <p>Milton Keynes, UK</p> <p>Regional Conference</p>
<p><b>21</b> Jun 2022</p> <p>NAFEMS Americas Conference 2022</p> <p>Indianapolis, USA</p> <p>Regional Conference</p>	<p><b>4</b> Oct 2022</p> <p>DACH Regionalkonferenz 2022</p> <p>Bamberg, Germany</p> <p>Regional Conference</p>	<p><b>23</b> Nov 2022</p> <p>NAFEMS France Conference 2022</p> <p>Paris, France</p> <p>Regional Conference</p>



**NAFEMS**  
**LEARNINGHUB**  
Your Central Location ::  
for Continuous Professional Development

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

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

## available courses

### Extended Courses:

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

### Quick Courses:

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



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

## NAFEMS Schulung

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

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

10. - 12. Mai 2022 (tbc), online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

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

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

### The Course

#### Participants of this master class will:

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

### Who Should Attend?

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

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

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

### Program

#### Introduction

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

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

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

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

**V&V and Simulation Management**

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

**Realistic Simulation**

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

**V&V Fundamentals and Standards**

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

**Verification**

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

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

**Uncertainty Quantification**

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

**V&V Implementation Strategies**

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

**Course Language**

Englisch

**Tutors**



Jean-Francois Imbert

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



Philippe Pasquet

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

**Informationen und Anmeldung**

[www.nafems.org/vandv22-1](http://www.nafems.org/vandv22-1)

## NAFEMS Schulung

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

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

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

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

### Gliederung

Grundlegendes zur FKM-Richtlinie  
 > Was leistet ein Festigkeitsnachweis?  
 > Historie, Quellen und rechtlicher

Status der Richtlinie  
 > Anwendungsbereich und Umfang  
 Theorie zum statischen Festigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile  
 > Gliederung des Nachweises  
 > Spannungsarten  
 > Werkstoffkennwerte  
 > Konstruktionsfaktor  
 > Sicherheitskonzept  
 > Nachweis  
 Beispiel „Getriebegehäuse“ zum statischen Nachweis  
 > Auswahl der Nachweispunkte für manuelle Berechnung  
 > Programmgestützte Berechnung  
 Vertiefung zum statischen Nachweis - Plastische Formzahl  
 > Ertragbare Dehnung  
 > Plastische Traglast  
 > Beispiele zur Berechnung der plastischen Formzahl  
 Theorie zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis nichtgeschweißter Bauteile  
 > Überblick zu Nachweisbereichen (Zeit-, Dauer-, Betriebsfestigkeit)  
 > Gliederung des Nachweises  
 > Konstruktionsfaktor  
 > Mittelspannungseinfluss  
 > Sicherheitskonzept  
 Beispielrechnung „Getriebegehäuse“ zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis  
 > Auswahl der Nachweispunkte für manuelle Berechnung  
 > Ermittlung des Spannungsgradienten  
 > Programmgestützte Berechnung  
 Vertiefung zum Ermüdungsfestigkeitsnachweis  
 > Stützwirkungskonzept  
 > Details zum Mittelspannungsfaktor  
 > Betriebsfestigkeitsfaktor  
 > Beispiel zum Betriebsfestigkeitsfaktor  
 Einführung in die Spannungskonzepte für die Schweißnahtbewertung  
 > Nennspannungskonzept  
 > Strukturspannungskonzept  
 > Kerbspannungskonzept

> Modellierung für Kerbspannungskonzept  
 Theorie Statischer Nachweis für geschweißte Bauteile  
 > Spannungskomponenten  
 > Werkstoffkennwerte  
 > Temperatureinfluss  
 > Konstruktionskennwerte  
 > Sicherheiten  
 > Nachweis  
 Beispiele zum statischen Nachweis geschweißter Bauteile  
 > Strukturspannungsnachweis  
 > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis  
 Theorie Ermüdungsnachweis für geschweißte Bauteile  
 > Maßgebende Spannungskomponenten  
 > Werkstoffkennwerte (Temperaturkennwerte)  
 > Konstruktionskennwerte  
 > FAT-Klasse  
 > Mittelspannungseinfluss  
 > Betriebsfestigkeitskonzept  
 Beispiele zum Ermüdungsnachweis geschweißter Bauteile  
 > Strukturspannungsnachweis  
 > Vergleich Strukturspannungs- und Kerbspannungsnachweis

### Referent

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

**Informationen und Anmeldung**  
[www.nafems.org/fkm22-1](http://www.nafems.org/fkm22-1)

## NAFEMS Schulung

# Festigkeitsnachweis in die FKM-Richtlinie Nichtlinear

23. - 24. Februar 2022 online (Webex) / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens

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

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

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

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

### Gliederung

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

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

### Referenten

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

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

**Informationen und Anmeldung**  
[www.nafems.org/fkm-nonlin22-1](http://www.nafems.org/fkm-nonlin22-1)

# Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation

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

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

### Inhalte

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

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

### Referent



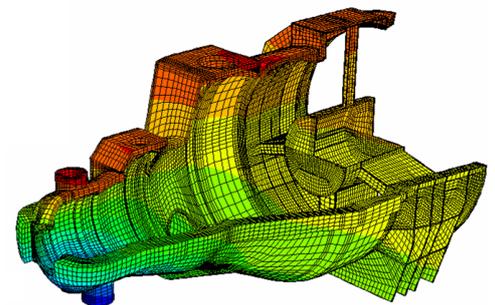
*Prof. Dr.-Ing. Armin Huß verfügt über mehr als 30 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der Technischen Mechanik, Technischen Schwingungslehre und der Anwendung der Finiten Elemente Methode, davon über 20 Jahre Praxis-Erfahrung als freiberuflicher Ingenieur für die Anwendung der FEM in den unterschiedlichsten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

### Kurssprache

Deutsch

### Inhouse-Kurs

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



### Informationen und Anmeldung

[www.nafems.org/fem22-1](http://www.nafems.org/fem22-1)

## NAFEMS Schulung

# Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

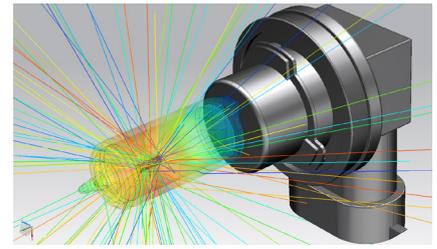
Die Schulung vermittelt praxisorientiert und programmunabhängig die Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung (CFD). Neben der Funktionsweise von Programmen, die anhand zahlreicher einfacher Beispiele erläutert wird, steht die Vermittlung des gesamten Lösungsprozesses im Vordergrund. Mit Hilfe von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

### Inhalte

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

Problemen / Fehlerquellen beim Lösungsprozess

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



### Referent



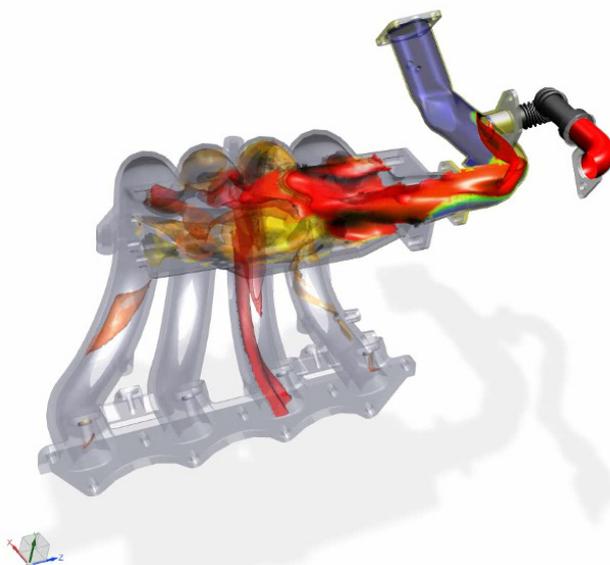
*Prof. Dr.-Ing. Gangolf Kohnen hat über 25 Jahre Erfahrung mit CAE-Anwendungen mit Schwerpunkten auf dem Gebiet der Strömungsberechnung CFD in Lehre, Forschung und Industrie. Herr Kohnen leitet den Bereich Maschinenbau und Virtual Engineering an der Hochschule Baden-Württemberg Mosbach.*

### Kurssprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

### Inhouse-Kurs

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

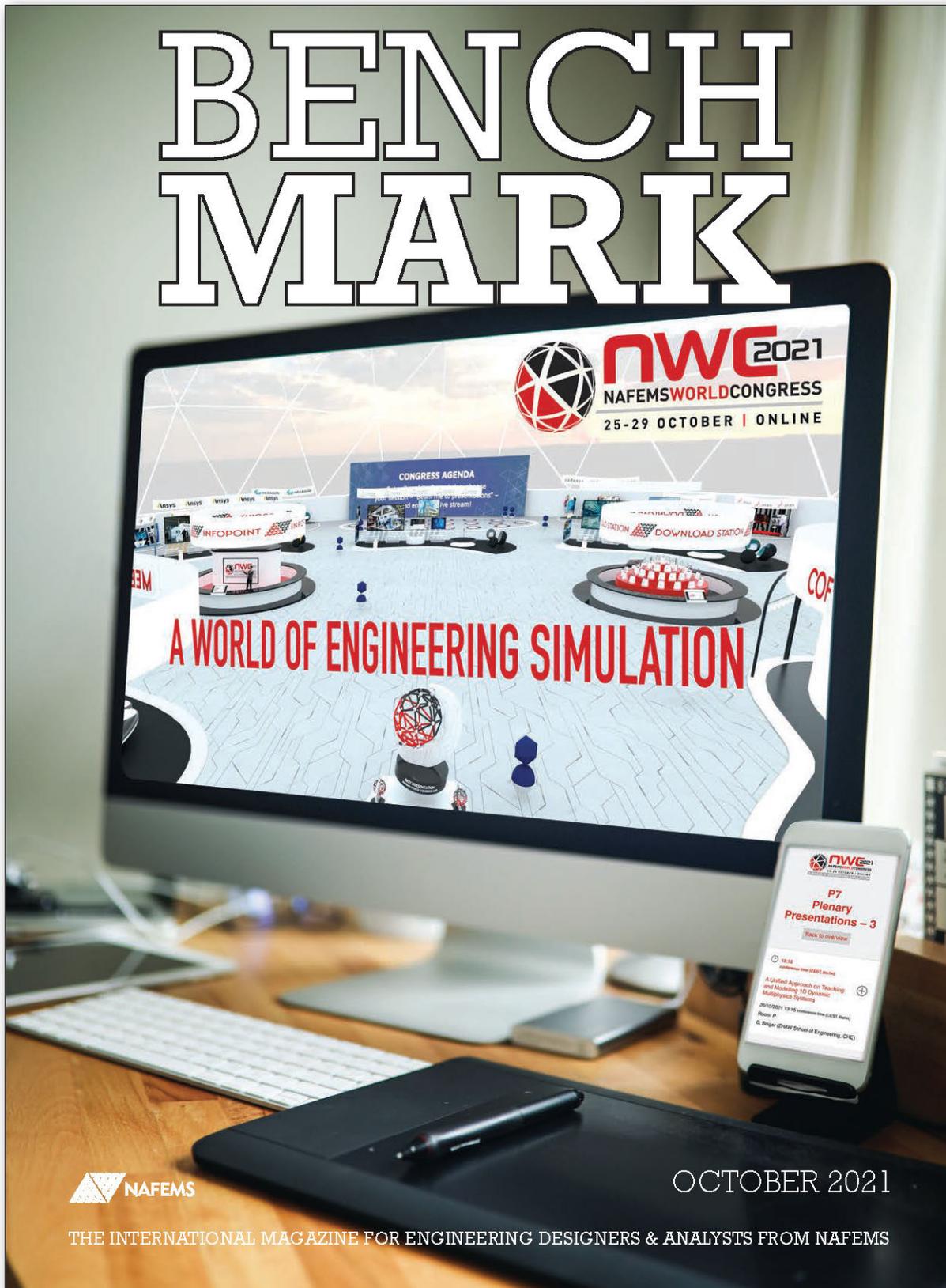


Internationales NAFEMS Magazin

# Benchmark Magazin, Ausgabe Oktober 2021

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

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





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

**What Next for Engineering Simulation?**

**Engineering Data Science**

The Fourth Paradigm

**Process Simulation**

Predicting & Optimising Systems

**Simulation Supporting Certification**

Relying Less on Test

**Simulation Data Management**

Making the Data Work

**Generative Design**

Making the Impossible a Reality

**Code Verification**

Keeping you Accurate

**Communicating Complexity**

Ensuring Simulation is Understood

**Autonomous Things**

Artificial Intelligence becomes Real

**The Digital Twin**

Connecting Virtual with Physical

**The Failure Test**

Modelling Structural Failure

**Simulating Tomorrow**

Ensuring a Sustainable Future

**Rapid Manufacturing**

Towards Distributed Digital Production

**Simulation Governance**

Building a Simulation Capability

**Multiscale Simulation**

Analysis Great and Small

**Designer-Oriented Simulation**

Putting Simulation Upfront

**Systems Level Simulation**

Modelling the Sum of the Parts

**Diffusion of Innovation**

Crossing the Chasm

**NAFEMS.ORG/AGENDA**

## BETA CAE Systems

### Neue Version

BetaCAE Systems hat die neuen Versionen 22.0.1 der Beta CAE Systems Suite ANSA/ EPILYSIS/ META and KOMVOS bekanntgegeben.

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

## CADFEM

### Live-Simulation für alle im Science Centre

Was passiert, wenn man den Winkel des Flügels einer Windkraftanlage ändert? Oder die Windstärke? Oder der Flügel neu ausgerichtet wird, weil der Wind zunimmt? „Blade Pitch“ ist ein pfiffiges Exponat der Firma Hüttinger, einem Spezialisten für interaktive Ausstellungskonzepte, mit dem die jungen Besucher in der Energy Area des Aberdeen Science Centre (ASC) genau solche Szenarien durchspielen können. Der Clou: Per Live-Simulation werden die Experimente zeitgleich am Bildschirm visualisiert, was beim Verständnis der physikalischen Zusammenhänge enorm hilft.

Auf die Effizienz kommt es an. Wie sehr bereits kleine Modifikationen bei der Energieerzeugung durch Windkraft ins Gewicht fallen, können die Gäste der Energy Area im Aberdeen Science Centre (ASC) anhand eines einzigartigen neuen Exponats ausprobieren. Die detailgetreue Miniaturversion einer Windkraftanlage samt Umgebung lädt dazu ein, relevante Parameter zu verändern und dann auch gleich die Auswirkung auf die erzeugte Energieleistung zu sehen. Eine Besonderheit von „Blade Pitch“, das speziell für das ASC und den Themenbereich zu regenerativen Energien entwickelt wurde, ist die digitale Komponente: Alles, was durch die Änderungen physikalisch ausgelöst wird, ist sofort live als Simulation an einem Bildschirm zu sehen. Rechts: Experiment. Links: Simulation. Erdacht und umgesetzt wurde „Blade Pitch“ von der Firma Hüttinger aus Schwaig bei Nürnberg, deren Mission es ist, komplexe wissenschaftliche Phänomene durch außergewöhnliche interaktive Exponate für Museen, Science Center

und andere Institutionen im wahren Sinne des Wortes be„greifbar“ zu machen. Die Ausstellungsstücke von Hüttinger sind fast immer Unikate und in Einrichtungen auf der ganzen Welt zu erleben. Mehr als 60 Hüttinger-Exponate stehen in Aberdeen, einer Region, die wie keine andere in Großbritannien für das Thema Energieerzeugung steht. David Rodger, CEO Aberdeen Renewable Energy Group (AREG): „Auf unserem Weg zur Klimaneutralität war es noch nie so wichtig, dass junge Menschen etwas über die Komplexität der Energiewirtschaft und die Erzeugung unserer Energie lernen. Dieses Exponat macht Lust darauf und ist eine fantastische Ergänzung im ASC“.

Simulationssoftware aus der Welt der Ingenieure

„Blade Pitch“ ist die weltweit erste wissenschaftliche Installation überhaupt, die die noch sehr junge Technologie der Live-Simulation integriert – die digitale Transformation lässt grüßen! Die Software dahinter ist seit einigen Jahren in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen von Unternehmen und in der Ingenieursausbildung an Hochschulen auf dem Vormarsch. Wie beim Exponat versetzt sie ihre Anwender – meistens Konstrukteure und Produktmanager – in die Lage, die Auswirkungen von Designänderungen auf die generelle Produktperformance sofort am Bildschirm vorherzusagen. Auf fast schon spielerische Weise können Ideen so einfach und schnell ausgetestet, Varianten miteinander verglichen werden. Anders als im ASC erfolgt dort das Zusammenspiel der Simulationssoftware nicht mit dem realen Produkt, sondern mit seinem digitalen Abbild, d.h. einem 3D-CAD-Modell.

Bemerkenswert am „Blade Pitch“ ist auch, dass im ASC nicht irgendeine Software oder gar Freeware zum Einsatz kommt, sondern mit Ansys Discovery ein besonders leistungsfähiges und bei Ingenieuren weltweit stark verbreitetes Programm für Live-Simulationen. Ansys Discovery ist ein Produkt von ANSYS, Inc. (Nasdaq ANSS), dem Marktführer auf Gebiet der Engineering Simu-

lation. Praktische Unterstützung bei der Implementierung von Ansys Discovery erhielten die Macher bei Hüttinger von der Cadfem GmbH mit Sitz in Grafing bei München, die sich ganz dem Thema Simulation verschrieben hat und die eine jahrzehntelange Partnerschaft mit dem Softwareentwickler Ansys verbindet. Matthias Rudloff, Projektleiter bei Hüttinger: „Als ich Live-Simulation zum ersten Mal gesehen habe, dachte ich ‘OK, eine Animation‘. Aber das greift zu kurz. Denn was man sieht, passiert buchstäblich live und zeigt das reale physikalische Geschehen. Ein solcher Wow-Effekt ist eine großartige Erweiterung unseres Spektrums an interaktiven Exponaten.“

Dieses Video liefert Einblicke in die „Blade Pitch“-Installation im ASC und in ihre Entstehungsgeschichte: <https://youtu.be/5WonVqvtnFc>

### Simulationstool für passgenaue und langlebige hydrodynamische Gleitlager

Schmierfilmbildung, Lagerverformungen, oder Mischreibung – eine Software des Grafinger Simulationshauses Cadfem GmbH und des Magdeburger Tribologiespezialisten Tribo Technologies GmbH bildet das komplexe Verhalten von Gleitlagerungen präzise ab und hilft, sie zu optimieren. Komfortabel in das populäre Simulationsprogramm Ansys Workbench integriert, wird Tribo-X inside Ansys – so der Name der Applikation – bereits bei namhaften Unternehmen wie der Hammelmann GmbH produktiv eingesetzt. Beim 23. International Colloquium Tribology im Januar in Ostfildern bei Stuttgart wird die praktische Anwendung einem großen Tribologie-Fachpublikum vorgestellt.

Wichtige Qualitätsmerkmale von hydrodynamischen Gleitlagern sind ihre Belastbarkeit und ihre Lebensdauer. Diese hängen wiederum ab von einem möglichst perfekten Zusammenspiel von Welle, Lager und Lagergehäuse. Angesichts unterschiedlichster Einbauszenarien und der Komplexität der Tribologie in Gleitlagersystemen ist die Dimensionierung der Komponenten kein einfaches Unterfangen. Entsprechend

hoch ist der Entwicklungsaufwand. Ein großer Zeitfresser sind dabei Prüfstanduntersuchungen, denn es kann Tage dauern, bis sich im Trial-and-Error-Verfahren eine akzeptable Konfiguration der Baugruppe ergibt. Die Firma Hammelmann aus Oelde hat sich schon früh durch die typische Innovationsfreude eines klassischen mittelständischen Unternehmens eine weltweite Spitzenposition im Segment Hochdruckpumpen und -systeme erarbeitet. Hydrodynamische Gleitlager nehmen eine Schlüsselfunktion bei vielen Hammelmann-Produkten ein. „Die Gleitlager sind als kraftübertragende Teile eine Kernkomponente der Hochdruckpumpe. Da kommt es auf wenige Mikrometer an. Hier geht's um echte Tribologie“, erklärt Felix Hartmann, Teamkoordinator Konstruktion Pumpen bei Hammelmann.

Präzision ist also gefragt. Und um keine Potenziale zu verschenken, geht man bei Hammelmann auch bei der Auslegung der Gleitlager zeitgemäße digitale Wege. Mit der Spezialsoftware Tribo-X inside Ansys erfolgt die Dimensionierung der Bauteile und ihres Zusammenwirkens am Computer. Die Applikation ist eine gemeinsame Entwicklung der Tribologie-Experten von Tribo Technologies und den Ansys- und Simulationsspezialisten von Cadfem. Erst wenn mit Tribo-X inside Ansys eine perfekte Lösung gefunden wurde, wird sie einmalig am Prüfstand verifiziert. Felix Hartmann fasst zusammen: „Der Simulationseinsatz ermöglicht den einfachen Vergleich von unterschiedlichen Designvarianten und das bei verhältnismäßig kurzen Antwortzeiten“. Anwendungsbeispiel: Redesign der Lagerschale einer Plungerpumpe Reinigung, Schichtabtrag oder Wasserstrahlschneiden sind typische Einsatzgebiete für Plungerpumpen. Die Produkte von Hammelmann sind sowohl für hohe Drücke, bis 4500bar, als auch für hohe Fördermengen, bis zu 3000 l/min ausgelegt. Solche Geräte unterliegen strengen Vorschriften, die sich immer wieder ändern können. Hersteller wie die Fa. Hammelmann müssen darauf reagieren. Ein typisches Beispiel ist

die EU-Verordnung REACH zur Vermeidung von Blei in der Legierung der Gleitlagerschalen.

Die Vorteile der Simulation liegen auf der Hand: Die Lagerschale konnte unmittelbar im Simulationsmodell mit der neuen, vorschriftskonformen Legierung versehen und das elasto-hydrodynamische Verhalten mit Tribo-X inside Ansys untersucht werden. Schnell fiel auf, dass das neue, bleifreie Material - bei ansonsten unveränderten Parametern - zu mehr Reibung und Verschleiß und damit zu einer signifikant verschlechterten Tragfähigkeit der Gleitlagerung führt. Am Simulationsmodell haben die Hammelmann-Ingenieure anschließend verschiedene Strategien zur Kompensation des Leistungsverlustes analysiert. Als besonders effektiv kristallisierten sich dabei die Neupositionierung der beiden Schmierstoffaschen und eine Modifikation des Lagerdesigns heraus. Diese Konfiguration hat sich dann auf Anhieb am Prüfstand bestätigt. Felix Hartmann: „Ein weiterer Vorteil der Simulation ist, dass im Vergleich zu den Prototypen bei der Simulation die kritischen Bereiche und die erforderlichen Toleranzgrenzen genauer analysierbar sind. Ferner können die Belastungsgrenzen exakt ermittelt werden und das gesamte Maschinenverhalten ist besser steuerbar.“ Das wurde auch bei diesem Projekt ausgenutzt: Denn die Optimierung der Lagerschale hat sogar dazu geführt, dass Reibungsverluste und demzufolge auch der Energieverbrauch der Pumpe signifikant verringert und Einsatzzeiten verlängert werden konnten.

Präsentation auf dem 23. International Colloquium Tribology 2022

Vom 25. – 27. Januar 2022 treffen sich in Ostfildern bei Stuttgart Tribologie-Experten aus der ganzen Welt anlässlich des 23. International Colloquium Tribology der Technischen Akademie Esslingen. Die Veranstaltung findet im Hybrid-Modus statt. Vincent Hofmann von Tribo Technologies wird dem Fachpublikum am 26. Januar im Rahmen der Session „Digitalization in Tribology“ die skizzierte Anwendung bei Hammelmann in einem ausführlichen Vortrag „Designing a REACH

Conform Small Conrod Bearing of a Plunger Pump with the Help of EHD Simulation“ unter tribologischen Gesichtspunkten vorstellen. Informationen zum Colloquium: [www.tae.de/go/tribology](http://www.tae.de/go/tribology).

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

## CARHS

### Automotive CAE Companion 2021/22

Der neue automotive CAE Companion bietet umfassende Informationen zu unseren Konferenzen und Seminaren im CAE und im Engineering. Auf über 70 Seiten CAE-Wissen liefern Experten wertvolle Informationen zu Theorie und Anwendung der numerischen Simulation in der CAE-basierten Fahrzeugentwicklung. Bestellen Sie jetzt Ihr kostenloses Exemplar!

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

## DYNAMORE

### CO2-HyChain: DYNAMore Teil des Forschungsprojekts zur CO2-Einsparung im funktionalen Leichtbau

Mit etwa 160 Millionen Tonnen verursacht der Straßenverkehr circa 20% des gesamten CO2-Ausstoßes in Deutschland. Eine Möglichkeit, diesen Wert zu senken, liegt in der Reduktion des Fahrzeuggewichts durch funktionalen Leichtbau. Das Forschungsprojekt „CO2-HyChain“ soll die Erforschung innovativer Leichtbaukonstruktionen vorantreiben und die bisherigen Lösungen zur Herstellung von hochfesten Aluminium- und hybriden Aluminium-Stahl-Tailor Welded Blanks weiterentwickeln. Ziel ist eine erhebliche Verringerung der CO2-Emissionen von PKWs.

DYNAMore ist Teil eines Konsortiums aus drei Instituten der Universität Stuttgart und 8 weiteren industriellen Partnern, die das Projekt „CO2-HyChain“ erfolgreich gestartet haben. Mit einem Finanzierungsumfang von 5,7 Mio. Euro und einer Laufzeit von drei Jahren handelt es sich um das bislang größte durch das Technologietransferprogramm

Initiative Leichtbau (BMW) geförderte Projekt.

„DYNAmore ist sehr glücklich darüber, Teil dieses Forschungsprojektes zu sein. Die Entwicklung neuer, innovativer Ansätze im Leichtbau wird bei der Fahrzeugkonstruktion in Zukunft eine noch bedeutendere Rolle spielen,“ erklärt Professor André Haufe, Leiter des Material Competence Centers der DYNAmore GmbH. „Automobile müssen zukünftig signifikant leichter werden, ohne dabei Aspekte der passiven Sicherheit zu vernachlässigen. Hierin liegt sowohl die Herausforderung als auch die Chance, mit neuen Werkstoffen und Verfahren automobiler Konstruktionen weiterzuentwickeln und neue Bauweisen maßgeblich voranzutreiben,“ so Haufe weiter.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden an der MPA unter Laborbedingungen entwickelte Lösungen zum Fügen von Blechplatten aus Aluminium und Stahl durch Rührreibschweißen im interdisziplinären Forschungsverbund weiterentwickelt, skaliert und in die industrielle Praxis transferiert.

Durch Fügen von Aluminium und Stahl lassen sich die positiven Eigenschaften der beiden Werkstoffe wie z.B. hohe Festigkeit des Stahls und das geringe Gewicht des Aluminiums in positiver Weise kombinieren. Damit lässt sich das Gewicht von Fahrzeugkarosserien im zweistelligen Prozentbereich reduzieren, woraus sich erhebliche Treibstoff, Strom und CO<sub>2</sub>-Einsparungen ergeben.

Kernelemente des Vorhabens sind die Entwicklung von zwei sich komplementär ergänzenden Prototypen serientauglicher Produktionsanlagen für die Herstellung sogenannter Tailor Welded Blanks und Tailor Welded Coils, sowie ein entwickeltes Werkzeugkonzept, welches die als flache Platinen gefügten Bleche anschließend zu einem leichtbauoptimierten Bauteil durch Tiefziehen umformt.

Als Vertreter der Universität Stuttgart sind neben der MPA auch das Institut für Umformtechnik (IFU) sowie das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) in das

Projekt eingebunden. Von industrieller Seite sind als Anlagenhersteller die Matec GmbH und Profilmittel Engineering mit dabei. Klaus Raiser GmbH & Co. KG sowie Preter CNC Dreh- und Frästechnik wirken in Konstruktion und Fertigung der Anlagentechnik mit und von CeramTec werden verschleißbeständige Werkzeuge bereitgestellt. Für die Absicherung des Prozesses entwickelt die Optimess Engineering GmbH Konzepte zur zerstörungsfreien Prüfung. Als Entwicklungsdienstleister beteiligen sich außerdem csi entwicklungstechnik GmbH sowie die DYNAmore GmbH am Projekt. Die voestalpine Automotive Components Schwäbisch Gmünd GmbH & Co KG unterstützt dabei, wie auch die Speira GmbH (ehemals Hydro Aluminium Rolled Products GmbH) mit Versuchsmaterial. Mit dabei sind darüber hinaus die assoziierten Partner Audi AG und Mercedes Benz AG.

### Europäische LS-DYNA Konferenz 2021: ein gelungenes Event

Mit über 170 hochklassigen technischen Vorträgen in neun parallelen Sessions, 230 Teilnehmern vor Ort und 600 Teilnehmern online sowie über 20 Sponsoren und Ausstellern war die 13. Europäische LS-DYNA Konferenz ein großer Erfolg. DYNAmore bedankt sich bei allen Beteiligten, die diese besondere Konferenz ermöglicht haben.

Die 13. Ausgabe der Europäischen LS-DYNA Konferenz, die von 5. bis 7. Oktober 2021 stattfand, war in vielerlei Hinsicht eine besondere Veranstaltung. Zum ersten Mal überhaupt war die Konferenz eine hybride Veranstaltung, bei der die Teilnahme sowohl vor Ort in Ulm als auch online möglich war. Dieses neue Format verlangte von den Teilnehmern einen höheren Aufwand, da die Präsentationen im Vorfeld aufgezeichnet werden sollten. Für dieses Engagement bedankt sich die DYNAmore GmbH sehr herzlich bei allen Vortragenden.

Das positive Feedback aller Beteiligten zeigt, wie wichtig eine Konferenz für Anwender und Entwickler ist. Der direkte und persönliche Austausch ist für die Entwicklung neuer Ideen

und Lösungen unerlässlich und wird auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Dies belegt auch die, für die derzeitige Situation, hohe Zahl an Sponsoren und Ausstellern, die sich über die Möglichkeit, ihr Leistungsspektrum wieder live präsentieren zu dürfen, sehr zufrieden zeigten.

„Wir sind mit dem Ergebnis der Konferenz rundum glücklich“, erklärt Ulrich Franz, Geschäftsführer der DYNAmore GmbH. „Unser Mut, in der jetzigen Zeit eine Präsenzveranstaltung durchzuführen wurde von den Teilnehmern, Sponsoren und Ausstellern durchweg sehr positiv aufgenommen. Wir freuen uns, dass es uns wieder gelungen ist, ein internationales Fachpublikum anzusprechen und Entscheider von vielen Firmen, darunter zahlreiche OEMs wie etwa BMW, Daimler, Honda, Porsche und Volvo, von der persönlichen Teilnahme auf unserer Konferenz zu überzeugen. Dies belegt den hohen Stellenwert, den DYNAmore und die Konferenz bei den Kunden im In- und Ausland genießt“, so Franz weiter.

Für alle, die nicht in Ulm teilnehmen konnten, gab es dieses Jahr zum ersten Mal die Möglichkeit, die Vorträge im Rahmen der Online-Konferenz zu verfolgen. Die Vorträge der Online-Konferenz wurden einen Tag später ins Netz gestellt, da die Keynote-Vorträge und einige andere Präsentationen live in Ulm aufgezeichnet und über Nacht bearbeitet wurden.

„Die Verlängerung der Konferenz ins Internet ermöglicht es uns, neue Zielgruppen auf der ganzen Welt zu erreichen, die sonst nie zur Konferenz gekommen wären“, meint Professor Ulrich Göhner, Vertriebs- und Marketingleiter von DYNAmore. „Wir sind mit den gemachten Erfahrungen sehr zufrieden und denken, dass wir auch bei den kommenden Konferenzen einen Online-Teil anbieten werden.“

Alle Papers und auch die Aufzeichnungen werden von DYNAmore in den nächsten Wochen veröffentlicht. Der genaue Termin wird im Newsletter, der DYNAmore Infomail, sowie auf der Webseite des Unternehmens mitgeteilt.

Die nächste Konferenz ist das 16.

Deutsche LS-DYNA Forum, das voraussichtlich im Oktober 2022 in Bamberg stattfinden wird. DYNAMORE freut sich schon heute auf ein erneutes Zusammenkommen und viele interessante Vorträge.

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

## FLUIDON

### Fluidon veröffentlicht neue DSH-plus Version 3.13

Fluidon GmbH, der erfahrene Dienstleister für Simulation und Analyse von fluidtechnisch-mechatronischen Systemen, hat die neue Version 3.13 seiner Simulationsumgebung DSH-plus am 12. November veröffentlicht. Schwerpunkte sind Neuerungen in Bezug auf die Lauffähigkeit exportierter DSH-plus-Modelle, der numerischen Stabilität und die Einbindung geschachtelter FMUs (Functional Mock-up Units) in das VEL (Virtual Engineering Lab) Real-time System. Lauffähigkeit exportierter DSH-plus-Modelle:

Als FMU exportierte DSH-plus-Modelle sind jetzt auf allen Plattformen Win32, Win64, Linux, macOS - ohne DSH-plus-Lizenz - lauffähig. Bei einer Weitergabe der Modelle und deren Weiterverwendung in anderen Simulationsumgebungen fallen somit keine zusätzlichen DSH-plus-Lizenzgebühren an.

Numerische Stabilität:

Durch Feintuning an etlichen Stellen wurde die numerische Stabilität von DSH-plus-Modellen nochmals erhöht. Insbesondere komplexe Modelle profitieren von dem jetzt robusteren Solver.

Einbindung geschachtelter FMUs in das VEL Real-time System:

Zur direkten Einbindung geschachtelter FMUs in das VEL Real-time System können diese jetzt komfortabel adressiert und verwaltet werden. „Wir freuen uns, unseren Kunden das neue Release 3.13 von DSH-plus ab sofort zur Verfügung zu stellen“, sagt Oliver Breuer, Head of Software Engineering der Fluidon GmbH. „Besonders die barrierefreie Lauffähigkeit von DSH-plus-Modellen auf anderen Plattformen und deren Integrierbarkeit ohne zusätzliche Kosten birgt für interdisziplinäre Enginee-

ring-Projekte ein hohes Potential. Um Anwendern eine störungsfreie Berechnung vielschichtiger Modelle zu ermöglichen, haben wir die numerische Stabilität nochmals hochgeschraubt. So verhindern wir, dass komplexe Lösungsansätze schon früh eingegrenzt werden. Uns ist wichtig, das Genie des Entwicklers bestmöglich zu unterstützen.“

Das neue Release DSH-plus 3.13 kann ab sofort im Downloadbereich der Fluidon Webseite heruntergeladen werden: [www.fluidon.com/downloads](http://www.fluidon.com/downloads).

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

## FRAUNHOFER SCAI

### Projekt VMAP erhält den »ITEA Award of Excellence for Standardisation«

Die Forschungsinitiative ITEA zeichnet das Projekt VMAP für hervorragende Ergebnisse auf dem Gebiet der Standardisierung mit dem »ITEA Award of Excellence for Standardisation« aus. In dem von Fraunhofer SCAI geleiteten internationalen Projekt ist es gelungen, einen herstellernneutralen Standard für die Speicherung und Übertragung von Daten im Computer Aided Engineering (CAE) zu entwickeln. Der VMAP-Standard verbessert die Interoperabilität in Workflows des virtuellen Engineerings und wird bereits von vielen Unternehmen eingesetzt. Ein neu gegründeter Verein, die »VMAP Standards Community«, führt die Arbeiten zur Standardisierung fort. Die meisten CAE-Softwarewerkzeuge nutzen jeweils eigene Datenformate für die Speicherung ihrer Modelle und Rechenergebnisse. Ein Austausch von Daten zwischen Programmen unterschiedlicher Hersteller ist wegen fehlender Kompatibilität oft mühsam. Solange Standards fehlen, müssen Unternehmen maßgeschneiderte Lösungen für den Datentransfer implementieren – mit enormem Aufwand an Zeit und Geld. Der im Projekt VMAP (A new Interface Standard for Integrated Virtual Material Modelling in Manufacturing Industry) entwickelte Standard schließt diese Lücke und ist der weltweit erste Schnittstellenstandard

für CAE-Workflows.

Für diese Leistung erhält das Projekt, das vom Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI geleitet wurde, den »ITEA Award of Excellence for Standardisation« der Forschungsinitiative ITEA 4.

»VMAP hat hervorragende Ergebnisse erzielt, die den Digitalisierungsprozess in allen industriellen Branchen beschleunigen werden«, sagt die Vorsitzende von ITEA, Zeynep Sarilar.

ITEA ist Teil der europäischen Förderungsinitiative Eureka für marktnahe Forschung und Entwicklung. Zu den Vollmitgliedern zählen 42 Staaten und die Europäische Kommission. Das VMAP-Projekt lief von September 2017 bis Oktober 2021 mit 29 Industriepartnern aus Belgien, Deutschland, Kanada, den Niederlanden, Österreich und der Schweiz. Erhöhung des Innovationstempos und Reduzierung von Vorlaufzeiten Die Integration des VMAP-Schnittstellenstandards in multidisziplinäre und softwareübergreifende Simulationsprozesse in der Fertigungsindustrie ist einfach. Die Input-/Output-Routinen lassen sich leicht in jede CAE-Software implementieren. Das Ergebnis: Computergestütztes Engineering ist jetzt schneller und einfacher als je zuvor. Die Industrie profitiert von einem um 50 Prozent höheren Innovationstempo bei komplexen Produkten wie einem Rasierapparat (siehe Bild, Philips NL). Die Einrichtungszeit virtueller Prozessketten für leichte Automobilkomponenten mit Verbundwerkstoffen verringert sich um 40 Prozent. Da die Entwicklung hauseigener Lösungen entfällt, reduzieren sich zudem durch menschliche Fehler verursachte Verzögerungen deutlich.

Insgesamt macht VMAP die Nutzung von CAE-Workflows einfacher, effizienter und kostengünstiger. Daher hat der VMAP-Standard in der CAE-Gemeinschaft bereits breite Akzeptanz gefunden. Das bestätigt auch Oliver Kunc vom Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): »Der Entwurf von Düsentriebwerken ist ein

sehr interdisziplinärer Prozess. Der VMAP-Standard trägt wesentlich zur Automatisierung bei, da er sich nahtlos in die jeweiligen Prozessabläufe einfügt.«

Da ein Standard nur so stark ist wie seine Nutzer, wird im Herbst 2021 die VMAP Standards Community e.V. (VMAP SC) von 15 Gründungsmitgliedern ins Leben gerufen. Die VMAP SC wird den VMAP-Standard verbreiten und sich um dessen Weiterentwicklung sowie die Sicherstellung und Pflege einer einheitlichen Bibliothek kümmern. Die VMAP SC steht allen Interessierten offen, die die Standardisierungsbemühungen der VMAP SC nutzen oder zu ihnen beitragen wollen.

Nächste Schritte: Eine Stärke des VMAP-Standards ist sein breites Anwendungspotenzial, das weit über die Simulation von Fertigungsteilen hinausgeht. Dies demonstriert die VMAP SC in dem ITEA-Folgeprojekt ‚VMAP-Analytics‘, das von Swerim AB (Schweden) koordiniert wird. Dieses Projekt wird den VMAP-Standard für den Datentransfer in Computational Fluid Dynamics (CFD) und Multiskalensimulationen, bei der Speicherung von Test- und Sensordaten sowie bei der Nutzung von KI-Methoden für die Datenanalyse nutzen, analysieren und gegebenenfalls weiterentwickeln. Das Ziel des Projekts ist die Konzeptentwicklung einer digitalen Zwillingsplattform für die Implementierung von Analysewerkzeugen, Methoden, Modellen und Prozessdaten über standardisierte Schnittstellen.

VMAP stellt somit nur die Spitze des Eisbergs dar. In dem Maße, wie die Zahl der an der Gemeinschaft beteiligten Organisationen steigt, nimmt auch die Zahl der technischen Bereiche zu, die von den schnelleren Prozessen und den geringeren Kosten der CAE-Interoperabilität profitieren können.

VMAP-Ansprechpartner: Klaus Wolf, Fraunhofer SCAI, Projektleiter klaus.wolf@scai.fraunhofer.de  
 ITEA-Ansprechpartnerin: Linda van den Borne-Toupet linda.van.den.borne@itea4.org

[www.scai.fraunhofer.de](http://www.scai.fraunhofer.de)  
[www.itea4.org](http://www.itea4.org)

## GNS SYSTEMS

### SDM in der Cloud: Scale und GNS Systems schließen Partnerschaft

- siehe auch Scale -

Die beiden Partner adressieren gezielt das Simulations-Daten-Management (SDM) in der virtuellen Produktentwicklung. Der Kernnutzen für Simulationsingenieure: Höchste Integration innovativer Lösungen und Services für ein durchgängiges Daten- und Prozessmanagement – in der Cloud und On-Premise. So wird GNS Systems Scale.sdm künftig auch auf seiner Engineering Cloud-Plattform, dem Digital Engineering Center, integrieren.

Christopher Woll, Geschäftsführer von GNS Systems, ist von der gemeinsamen Strategie überzeugt: „Der schnelle und zugleich strukturierte Zugriff auch auf riesige Datenmengen von überall ist aktuell wichtiger denn je. Ein hochgradig automatisiertes Simulations-Daten-Management ist heute im Engineering essenziell. Die Stichworte sind hier Nachverfolgbarkeit und Revisionsicherheit der Daten.“ Durch die Partnerschaft mit Scale hebt GNS Systems wesentliche Knowhow-Synergien: Das Unternehmen ist seit über 20 Jahren als Spezialist für CAE-IT am Markt, zuletzt auch mit einer eigenen Engineering-Cloud-Plattform. Heiner Müllerschön, Geschäftsführer der Scale GmbH, betont: „Wir beobachten bei unseren Kunden eine zunehmende Nachfrage für den Betrieb unserer SDM-Lösung in der Cloud. Mit GNS Systems gewinnen wir einen starken, global agierenden Partner, mit hervorragender Expertise für die Integration von Systemapplikationen in der Cloud. Ich bin davon überzeugt, dass uns GNS Systems beim Thema Simulations-Daten-Management im Markt optimal ergänzt und unsere Ideen für eine effizientere Datendurchgängigkeit in den Unternehmen unterstützt. Gemeinsam können wir langfristig den Bedarf der Anwender nach innovativen, skalierbaren und hochverfügbaren Lösungen im stark wachsenden Bereich Simulations- und Prozessmanagement bedienen.“

Scale stellt im Rahmen des Prozess- und Datenmanagements seine integrative Software-Lösung Scale.sdm mit den Modulen Scale.model, Scale.result und Scale.project zur Verfügung. Diese bilden vereint eine leistungsstarke Systemlösung für die virtuelle Produktentwicklung. GNS Systems gewährleistet mit seinen Dienstleistungen die reibungslose Integration der Lösungen auf Wunsch in der Cloud sowie die vollständige Automatisierung von Simulationsprozessen in meist hochkomplexen IT-Umgebungen. Eine vollautomatisierte Simulationsumgebung für Entwicklungsingenieure bildet dabei eine solide Plattform, die jederzeit den reibungslosen Entwicklungsprozess und die zuverlässige Datendurchgängigkeit gewährleistet. Ingenieure profitieren insgesamt von einem schnelleren und qualitativ besseren Simulations-Daten-Management (SDM).

[www.gns-systems.de](http://www.gns-systems.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

### Hexagon unterstützt mit Laser-auftragsschweißen (DED) die additive Fertigung

Der Geschäftsbereich Manufacturing Intelligence von Hexagon hat seine Entwicklung für die Anwendung von Directed Energy Deposition (DED) bekannt gegeben, darunter die Zusammenarbeit mit den Druckerherstellern pro-beam, Sciaky, DM3D, Gefertec und Meltio, die die DED-Technologien weiter voranbringt.

DED umfasst mehrere Metall-3D-Drucktechnologien zur Teileherstellung, wie das Schmelzen und Verschmelzen vom Material. DED

ist zudem für ein breites Spektrum von Teilgrößen anwendbar und eignet sich für die kosteneffiziente Herstellung großer Teile von einem bis zu sechs Metern -, die mit Pulverbettschmelztechnologien (PBF) möglicherweise nicht hergestellt werden können. SmarTech Analysis schätzt, dass die Umsätze aus großformatigen additiven Metalltechnologien und verwandten Bereichen im Jahr 2026 739 Millionen US-Dollar erreichen werden.

Die DED-Technologie mit derselben Basistechnologie wie bereits etablierte Beschichtungs- und Schweißverfahren, gewinnt bei der Wartung, Reparatur und Instandhaltung (MRO) im Militär- und Luftfahrtsektor rasch an Bedeutung, da sie hochwertige Ausrüstungen, wie z. B. Turbinenschaufeln, reparieren oder wiederherstellen kann. Außerdem bietet sie Innovationspotenzial für hybride Fertigungsverfahren, bei denen Werkstücke, die durch Drahterosieren oder Fräsen bearbeitet wurden, mit Material und Merkmalen versehen werden können. Das Interesse an dieser Fertigungstechnologie ist besonders in der Luft- und Raumfahrt- sowie der Verteidigungsindustrie hoch, weshalb sie die Teile häufig aus Hochleistungsmetalllegierungen wie Titan, hochwarmfesten und rostfreien Stählen herstellen. Hexagon arbeitet mit Drucker-OEMs, Kunden und Dienstleistern zusammen, um vorherzusagen, wie sich diese Werkstoffe verhalten, wenn sie den thermisch-mechanischen Belastungen von DED-Prozessen ausgesetzt sind, die in großen Strukturen zusammenkommen.

„Wir sehen eine große Nachfrage nach dem Einsatz unserer Technologien in Kooperation mit unseren Partnern für maßgeschneiderte, kosteneffiziente Lösungen, die den Anforderungen spezifischer additiver Fertigungstechnologien in einer Vielzahl von Anwendungen gerecht werden“, so Mathieu Pérennou, Global Business Development Director für additive Fertigung im Geschäftsbereich Manufacturing Intelligence von Hexagon. „Die Depositionsfertigungsprozesse umfassen die Nutzung von leistungsstarken Simulationswerkzeugen, modernster

Scantechnologie, robuster Reverse-Engineering- und Analysesoftware sowie eine Kombination all dieser Technologien. So wird die erforderliche Qualität und Wiederholbarkeit gewährleistet.“

### **Hexagon-Studie: Autobauer riskieren, von neuen hochdigitalisierten Elektrofahrzeugherstellern überholt zu werden**

Laut einer neuen Studie, die von Wards Intelligence für die Hexagon Manufacturing Intelligence Division durchgeführt wurde, messen traditionelle Fahrzeughersteller der Umstellung auf Industrie-4.0-Prozesse nicht die höchste Priorität bei und laufen somit Gefahr, von neuen Marktteilnehmern überholt zu werden.

Große Technologiekonzerne sowie sogenannte Unicorn-Startups aus dem Silicon Valley, dem Vereinigten Königreich und China sprengen den E-Fahrzeugmarkt mit hochmoderner Digitalisierung und Automatisierung und verkürzen die Markteinführungszeiten von mehreren Jahren auf nur drei Monate. Die weltweiten Umsätze auf dem E-Fahrzeugmarkt könnten bis 2030 auf 34,7 Millionen steigen. Um ihre Marktposition zu halten, müssen OEMs mit dem Innovationstempo der Mitbewerber Schritt halten. Trotzdem planen nur 48 % der Hersteller in der Automobilbranche höhere Investitionen in die von ihren Mitbewerbern genutzten intelligenten Fertigungsstrategien ein, während 25 % keine entsprechenden Pläne verfolgen.

Ein Vorteil für die neuen Marktteilnehmer sind die niedrigen Auftragsvolumen bei E-Fahrzeugen, die dazu beitragen, dass die Produktionsgeschwindigkeit eine hohe Stückzahl als Schlüsselfaktor in der Automobilindustrie ablöst. Damit sind traditionelle Automobilhersteller Elektronikunternehmen wie Foxconn und Huawei unterlegen. Diese Unternehmen sind mit schnellen Innovationszyklen vertraut und müssen weniger Hürden meistern, da Verbraucher von ihnen digitale Technologien mit einem höheren Integrationsgrad erwarten. Darüber hinaus machen neue Fahrzeugdesigns bis zu 90 % der Autoteile existierender

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor überflüssig und ihre Strategien sind von den derzeitigen Lieferketten und Massenproduktionsanlagen weniger abhängig. Basierend auf den Studienergebnissen betrachten lediglich 8% der Autobauer die neuen Hersteller von E-Fahrzeugen als Bedrohung, obwohl Tesla bereits Marktführer im Bereich batterieelektrische (BEV) Fahrzeuge ist, und Unternehmen wie Lucid sich mit einer vertikal integrierten E-Fahrzeugfertigung rasch vergrößern.

Die Daten decken im Gegensatz dazu eine Diskrepanz bei den größeren OEMs in Bezug auf die entsprechende Entwicklung hin zur digitalen Transformation auf. Während sich das Interesse an der intelligenten Fertigung in der Automobilindustrie definitiv verstärkte, zeigt sich, wie die Anerkennung ihres Wertes nicht mit der entsprechenden Umsetzung einhergeht. Gemäss der Studie sind die kritischsten Faktoren für den Erfolg der E-Fahrzeug-Lieferketten für die Branche die Beschaffung der erforderlichen Teile-Volumina sowie die fehlenden Größenvorteile.

Dazu erläutert Paolo Guglielmini, Präsident der Hexagon Manufacturing Intelligence Division: „Unsere Studie offenbart, dass die Herausforderungen für Fahrzeughersteller, die einen festen Platz auf dem E-Fahrzeugmarkt suchen, sowohl interner als auch externer Natur sind. Da es notwendig ist, bei derzeitigem Auftragsvolumen eine größere Auswahl an erschwinglichen Elektrofahrzeugen oder gar „Fahrzeugen nach Maß“ anzubieten, müssen traditionelle für große Stückzahlen konzipierte Fertigungslinien von einer agileren Fertigung abgelöst werden, die auf eine schnelle Markteinführung ausgerichtet ist und das Just-in-Time-Modell möglichst endgültig hinter sich lässt. Die Aufgabe für die etablierten Unternehmen besteht darin, dies umzusetzen und gleichzeitig die erforderlichen Gewinnspannen zu erzielen. Dies lässt sich nur mithilfe einer vertikalen Integration der Entwicklungs- und Fertigungsprozesse lösen, was jedoch nicht einfach ist und einen kulturellen Wandel benötigt, der mit den technologischen Investitionen

einhergeht.

„Die derzeitige Umstellung traditioneller Geschäftsmodelle in der Automobilfertigung stellt Flexibilität über Prozesse. Sie unterstützt Fachkräfte durch integrierte Prozesse und stärkere Automatisierung. Digitale Konstruktions- und Fertigungsansätze sind der Schlüssel zur Agilität und ein wesentlicher Grund dafür, weshalb die „Digital Natives“ auf dem Markt für Aufruhr sorgen. Die großen OEMs stehen zwar nicht still – wir sehen unglaubliche Innovationen bei Unternehmen, die mit hohem Tempo ihre weltweiten Betriebsabläufe neu ordnen. Sie müssen jedoch kontinuierliche Optimierungsprozesse gezielt nutzen sowie den Umfang und die Art der Zusammenarbeit mit ihren Lieferanten überdenken, um die E-Wende in der Automobilindustrie zu gewährleisten.

Insgesamt belegen die Daten ein wachsendes Interesse an intelligenten Fertigungsansätzen, die sich umfassende Konnektivität, Cloud- und Edge-Computing in der Datenanalyse, KI und Robotik zu Nutze machen. Die Branche befindet sich an der Schwelle beispielloser Veränderungen, mit sehr unterschiedlichen Vorstellungen und Entwicklungsständen auf ihrem Weg hin zur Industrie 4.0. Die Konvergenz dieser zusätzlichen Technologien wird die Einführung und Umsetzung vorantreiben. OEMs und ihre Lieferketten werden versuchen, sich an diese Veränderungen anzupassen, während sie sich mit dem Markt weiterentwickeln.

Das von Wards Intelligence für Hexagon erstellte Whitepaper The Electric Vehicle Pivot (Die E-Wende im Fahrzeugbau) bietet Einblicke und Analysen basierend auf Forschungs- und Umfragedaten zur sich weiterentwickelnden Lieferkette in der Automobilbranche sowie der

Entstehung intelligenter Fertigungsprozesse im Zusammenhang mit der verstärkten Verlagerung zum Elektrofahrzeug (EV). Mehr dazu unter: <https://emobility.hexagonmi.com/shaping-the-future-of-ev>

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

## SCALE

### SDM in der Cloud: Scale und GNS Systems schließen Partnerschaft

- siehe auch GNS Systems - Die beiden Partner adressieren gezielt das Simulations-Daten-Management (SDM) in der virtuellen Produktentwicklung. Der Kernnutzen für Simulationsingenieure: Höchste Integration innovativer Lösungen und Services für ein durchgängiges Daten- und Prozessmanagement – in der Cloud und On-Premise. So wird GNS Systems Scale.sdm künftig auch auf seiner Engineering Cloud-Plattform, dem Digital Engineering Center, integrieren.

Christopher Woll, Geschäftsführer von GNS Systems, ist von der gemeinsamen Strategie überzeugt: „Der schnelle und zugleich strukturierte Zugriff auch auf riesige Datenmengen von überall ist aktuell wichtiger denn je. Ein hochgradig automatisiertes Simulations-Daten-Management ist heute im Engineering essenziell. Die Stichworte sind hier Nachverfolgbarkeit und Revisionsicherheit der Daten.“ Durch die Partnerschaft mit Scale hebt GNS Systems wesentliche Knowhow-Synergien: Das Unternehmen ist seit über 20 Jahren als Spezialist für CAE-IT am Markt, zuletzt auch mit einer eigenen Engineering-Cloud-Plattform. Heiner Müllerschön, Geschäftsführer der Scale GmbH, betont: „Wir beobachten bei

unseren Kunden eine zunehmende Nachfrage für den Betrieb unserer SDM-Lösung in der Cloud. Mit GNS Systems gewinnen wir einen starken, global agierenden Partner, mit hervorragender Expertise für die Integration von Systemapplikationen in der Cloud. Ich bin davon überzeugt, dass uns GNS Systems beim Thema Simulations-Daten-Management im Markt optimal ergänzt und unsere Ideen für eine effizientere Datendurchgängigkeit in den Unternehmen unterstützt. Gemeinsam können wir langfristig den Bedarf der Anwender nach innovativen, skalierbaren und hochverfügbaren Lösungen im stark wachsenden Bereich Simulations- und Prozessmanagement bedienen.“

Scale stellt im Rahmen des Prozess- und Datenmanagements seine integrative Software-Lösung Scale.sdm mit den Modulen Scale.model, Scale.result und Scale.project zur Verfügung. Diese bilden vereint eine leistungsstarke Systemlösung für die virtuelle Produktentwicklung. GNS Systems gewährleistet mit seinen Dienstleistungen die reibungslose Integration der Lösungen auf Wunsch in der Cloud sowie die vollständige Automatisierung von Simulationsprozessen in meist hochkomplexen IT-Umgebungen. Eine vollautomatisierte Simulationsumgebung für Entwicklungsingenieure bildet dabei eine solide Plattform, die jederzeit den reibungslosen Entwicklungsprozess und die zuverlässige Datendurchgängigkeit gewährleistet. Ingenieure profitieren insgesamt von einem schnelleren und qualitativ besseren Simulations-Daten-Management (SDM).

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

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).

2021

**MULTIPHYSICS 2021**

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

**Euro NCAP UpDate 2021**

14.-15.12.21 Online [www.carhs.de](http://www.carhs.de) Carhs

2022

**Fachkongress Composite Simulation**

17.02. tba [www.composites-united.com](http://www.composites-united.com) Compositated United

**NAFEMS Kurs: Festigkeitsnachweis FKM Nichtlinear**

23.-24.02. Online [www.nafems.org/fkm-nonlin22-1](http://www.nafems.org/fkm-nonlin22-1) NAFEMS

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

09.-10.03. Online [www.nafems.org/fem22-1](http://www.nafems.org/fem22-1) NAFEMS

**NAFEMS Seminar: Advances in Structural Dynamic Simulation**

29.-30.03. München [www.nafems.org/dyn22](http://www.nafems.org/dyn22) NAFEMS

**NAFEMS Kurs: Festigkeitsnachweis FKM (7. Ausgabe, 2020)**

05.-06.04. Online [www.nafems.org/fkm22-1](http://www.nafems.org/fkm22-1) NAFEMS

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

10.-12.05. Online [www.nafems.org/vandv22-1](http://www.nafems.org/vandv22-1) NAFEMS

**NAFEMS Seminar: Machine Learning und Artificial Intelligence in Strömung/Struktur**

16.-17.05. Wiesbaden, D  
[www.nafems.org/mlai22](http://www.nafems.org/mlai22)

**NAFEMS Seminar: Generative Design**

18.-19.05. Wiesbaden, D [www.nafems.org/gen22](http://www.nafems.org/gen22) NAFEMS

**ISNVH Int. Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress**

22.-24.06.22 Graz, A [www.isnvh.at](http://www.isnvh.at) ViF/SAE

**4a Technology Days**

27.-29.06. Schladming, A [www.technologietag.4a.at](http://www.technologietag.4a.at) 4a Engineering

**GSVF 2022**

31.08.-01.09. Graz, A [www.v2c2.at](http://www.v2c2.at) ViF

**NAFEMS UK Regional Conference**

07.-08.06. Milton Keynes, UK [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events) NAFEMS

**NAFEMS NORDIC Regional Conference**

14.-15.06. Göteborg, SWE [www.nafems.org/nordic22](http://www.nafems.org/nordic22) NAFEMS

**NAFEMS AMERICAS Regional Conference**

21.-23.06. Indianapolis, USA [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events) NAFEMS

**NAFEMS DACH Regional Conference**

04.-06.10. Bamberg, D [www.nafems.org/dach22](http://www.nafems.org/dach22) NAFEMS

**NAFEMS France Regional Conference**

23.-24.11. Paris, F [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events) NAFEMS

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



# NAFEMS

## Technical Communities

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

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

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

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

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

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

## Community

Home ▸ Community

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

### Your Community

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

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

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

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



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

# Multiphysikalische FEM Modellierung in Brennstoffzellen-Fahrzeugen beim Abdichten von Wasserstoff-Tanks

Manfred Achenbach<sup>1</sup>, Christian Replinger<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Manfred Achenbach, Ingenieur- und Sachverständigenbüro Achenbach

<sup>2</sup>Christian Replinger, University of Luxembourg, Faculty of Science, Technology and Medicine

## 1 Einleitung

Der Klimawandel und immer knapper werdende Ressourcen erfordern eine verstärkte Entwicklung hin zur emissionsfreien Mobilität aufgrund der steigenden Umweltbelastung durch Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb. Hier bietet die vielseitige Verwendung von grünem Wasserstoff großes Potenzial. Dabei können die Brennstoffzelle und der Wasserstoff als Energiespeicher eine zentrale Rolle für die Erzeugung elektrischer Energie zum Antrieb emissionsfreier Fahrzeuge spielen. Die relativ kurze Tankdauer von ca. 3-4 Minuten, als auch die hohe Reichweite machen diese Technologie für den gesamten Verkehrssektor interessant, insbesondere für den Transportsektor.

Die dabei entstehenden Systemdrücke wie auch das abzudichtende Medium Wasserstoff stellen die Dichtungstechnik vor neue konstruktive und werkstofftechnische Herausforderungen, die im nachfolgenden Beitrag näher beleuchtet werden. Eine Aufgabe davon ist die zuverlässige und wirtschaftliche Abdichtung der Brennstoffzellen. Hier sind teilweise andere Anforderungen zu bewältigen als bei der Abdichtung des Wasserstoff-Tanksystems inklusive der Leitungen und Ventile. Die Analyse und Optimierung der Lebensdauer eines komplexen Hochdruck-Ventils aus einer Aluminiumlegierung (EN AW 6061 T6) ist in der Literatur numerisch und experimentell nachgewiesen.[1]

In diesem Artikel werden lediglich die Abdichtungsaufgaben des Tanksystems betrachtet, wobei ein zukünftiger Beitrag die spezifischen Abdichtungsaufgaben in den Brennstoffzellen selbst behandeln soll. Um die unkontrollierte Freisetzung von Wasserstoff in die Umgebung zu verhindern und eine sichere Betankung, Speicherung und Zufuhr zur Brennstoffzelle zu gewährleisten, müssen die Dichtstellen genauer betrachtet werden. Um gewisse Fertigungstoleranzen, große Temperaturunterschiede ( $T = -40^{\circ}\text{C} / +85^{\circ}\text{C}$ ) und einen hohen Druck ( $p_{\text{nom}} = 700 \text{ bar}$ ) aufnehmen zu können, ist die Verwendung eines geeigneten Werkstoffes und eine gezielte Auslegung des Dichtungselementes (z.B. O-Ring) zu beachten.

### 1.1 Dichtstellen zum Tank und in den Ventilen

Aktuelle Entwicklungen zeigen, dass die gasförmige Speicherung von Wasserstoff in Tanksystemen bis 350 bar technisch sicher beherrschbar ist. Damit jedoch Brennstoffzellenfahrzeuge eine Alternative zu konventionellen Fahrzeugen darstellen können, muss der Systemdruck weiter erhöht werden, um eine gleichwertige Reichweite der Fahrzeuge auf kompaktem Bauraum sicherstellen zu können. Um eine Reichweite von ca. 750 km [2] mit einem Brennstoffzellenfahrzeug zu ermöglichen, werden 2-3 Tanks mit nominal 700 bar Systemdruck benötigt. Dieser hohe Druck und das abzudichtende Medium Wasserstoff stellen die Dichtungstechnik vor anspruchsvolle Herausforderungen im Hinblick auf die Auslegung der Dichtungselemente und deren Materialeigenschaften.

Mehrere Hersteller bieten bereits Brennstoffzellenfahrzeuge an, jedoch ist es bis zur Großserie noch in anderer Hinsicht ein längerer Weg. Abb. 0 zeigt eine schematische Darstellung eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges mit 2 Hochdruck-Wasserstofftanks. Ein multifunktionales Ventil ist jeweils an jedem Hochdruck-Wasserstofftank befestigt und ermöglicht eine sichere Betankung und die Speicherung des Wasserstoffs. Außerdem versorgt es die Brennstoffzellen-Einheit über eine Druckleitung mit Wasserstoff. Die Brennstoffzelleneinheit besteht aus mehreren Brennstoffzellen und wird als „Stack“ bezeichnet und erzeugt aus Wasserstoff aus den Tanks und Sauerstoff aus der Umgebung elektrische Energie. Ein elektrischer Umrichter ist direkt unter dieser Einheit angebracht und passt die benötigte Spannung für Batterie und E-Motor an. Die Batterie wird somit stetig versorgt und ermöglicht eine erhöhte elektrische Leistungsbereitstellung. Letztlich treibt der E-Motor das emissionsfreie Fahrzeug an.

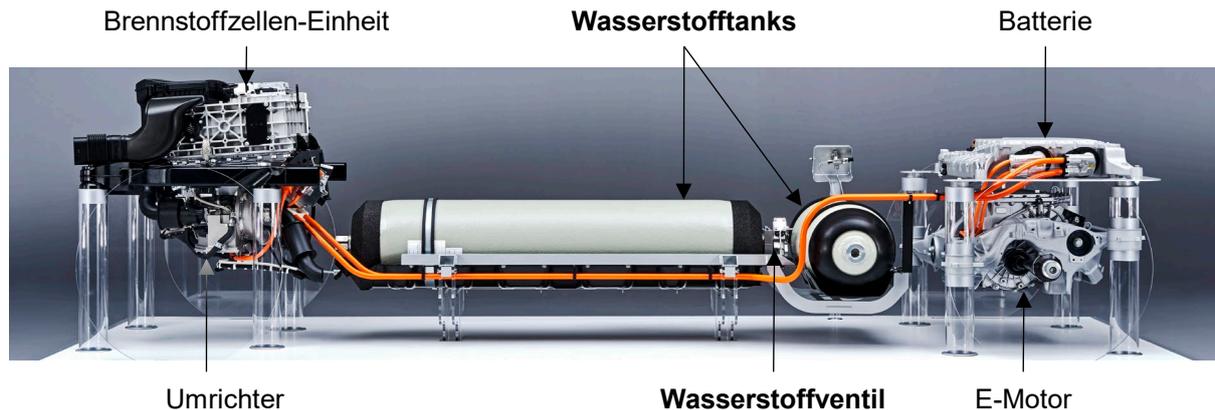


Abb. 0: Schematische Darstellung eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs mit Wasserstoff-Tanksystem [3]

Einer der größten technischen Herausforderungen ist die Wasserstoffspeicherung. Zwar ist die Energiedichte von Wasserstoff etwa viermal größer als die von Benzin oder Diesel, aber der gasförmige Wasserstoff lässt sich nur unter hohem Druck relativ kompakt verstauen. Stand der Dinge sind also Hochdrucktanks, die das Wasserstoffgas mit stattlichen 700 bar speichern, was dem 700-fachen des Atmosphärendrucks entspricht. [4,5,6] Etwa 5-6 Kilogramm Wasserstoff nehmen sie auf diese Weise auf. Damit schafft ein Brennstoffzellenfahrzeug tatsächlich die von den Automobilherstellern geforderte Reichweite von mindestens 600 Kilometern. Auf ein Volumen von ca. 150 Litern bringt es ein solches Hochdrucktanksystem, die Konstrukteure möglichst unauffällig und sicher im Fahrzeug verstauen müssen. Ein Dieselfahrzeug benötigt für dieselbe Strecke zwar etwa 30 Kilogramm Treibstoff, aber nur ca. 40 Liter Speichervolumen. Erschwerend kommt hinzu, dass die 700-bar-Tanks deutlich höhere Sicherheitskriterien erfüllen müssen und derzeit relativ teuer sind. Die Forderungen an die Entwickler von Wasserstoffspeichern lauten also: kompakter, leichter und günstiger! Aber dieses Problem soll hier nicht betrachtet werden. Dieser Artikel befasst sich mit der Frage der sicheren Abdichtung der aktuellen Wasserstofftanks.

### 1.1.1 Herausforderung: Druck und Temperatur

Die besonderen Eigenschaften des Wasserstoffs fordern von den elastomeren Werkstoffen spezielle Fähigkeiten hinsichtlich ihrer Eignung als Dichtungswerkstoff. Neben dem sehr hohen Druck ( $p_{nom} = 700 \text{ bar}$ ) spielen vor allem die auftretenden Temperaturen ( $T = -40 \text{ °C} / +85 \text{ °C}$ ) [7] eine entscheidende Rolle bei der Auswahl des geeigneten Dichtungswerkstoffes. Ein wichtiges Kriterium bei der Auslegung von Wasserstofftanksystemen mit einem Systemdruck von 700 bar ist die Betankung des Fahrzeuges mit Wasserstoff innerhalb einer anwenderfreundlichen Zeitdauer. Da Wasserstoff sich bei der Expansion erwärmt, muss das Gas an der Tankstelle mit  $-40 \text{ °C}$  bereitgestellt werden, damit eine Betankungsdauer von 3 bis 4 Minuten erreicht werden kann. Gleichzeitig werden für die Komponenten in Fahrzeugen immer höhere Gebrauchstemperaturen gefordert. Diese große Temperaturdifferenz muss von den Werkstoffen abgedeckt werden können. Da austretender Wasserstoff ein hohes Sicherheitsrisiko darstellt, darf bei der Auslegung der Dichtungssysteme nur eine sehr geringe Leckage toleriert werden (siehe [7]). Dabei muss neben der primären Leckage entlang der Dichtflächen auch die sekundäre Leckage in Form von Permeation (bzw. Diffusion) durch das Dichtungsmaterial berücksichtigt werden.

### 1.1.2 Herausforderung: Permeation und Quellung

Permeation bezeichnet die Durchwanderung eines anstehenden Mediums durch ein Material. Aufgrund der geringen Molekülgröße des Wasserstoffs spielt neben der Permeation durch das Material auch die Einlagerung in das Material eine entscheidende Rolle. Die dabei auftretende Quellung kann die Auslegung der Dichtung entscheidend beeinflussen. Aktuelle Forschungsvorhaben zielen darauf ab, die Wasserstoffquellung von Elastomeren zu untersuchen. Wenn Wasserstoff sich im Dichtungswerkstoff einlagert, kommt es bei einem sehr schnellen Druckabfall zu einer schlagartigen Volumenausdehnung des eingelagerten Wasserstoffs. Dabei kann es zu einer Zerstörung des Dichtungsmaterials kommen, wenn das Gas nicht schnell genug aus dem Material entweichen kann oder die Reißfestigkeit des Materials zu gering ist. Die Eignung der Werkstoffe hinsichtlich dieser sogenannten „explosiven Dekompression“ muss bei der Auswahl des Dichtungsmaterials ebenfalls berücksichtigt werden.

## 2 Modifiziertes Materialmodell für Finite Elemente Analyse (FEA)

Für relativ einfache elastomere Anwendungsfälle ist die Verwendung eines hyperelastischen Materialmodells ausreichend. Dies ist jedoch nicht der Fall für das komplexe Hochdruck-Dichtungssystem mit großem Temperaturbereich. Ein hyperelastisches, kombiniert mit einem thermo-viskoelastischen Materialmodell wird benötigt, um die Zeit- und vor allem die Temperaturabhängigkeit des Werkstoffes darzustellen und kann sogar darüber hinaus durch die druckabhängige Glasübergangstemperatur  $T_g$  erweitert werden. Dabei wird  $T_g$  als diejenige Temperatur bezeichnet, bei der der Werkstoff vom gummielastischen in den glasartig spröden Zustand übergeht und somit einen wichtigen Parameter für die Dichtheit im Tieftemperaturbereich darstellt. Der lokal wirksame hydrostatische Druck im Querschnitt des Dichtungsmaterials verschiebt die effektive Glasübergangstemperatur  $T_g$  des Materials zu höheren Werten und muss daher berücksichtigt werden. Ein so kombiniertes Materialmodell kann „piezo-rheologisch“ genannt werden. Multiphysikalisch wird das eingesetzte FEM-Modell aber erst, wenn auch der Stofftransport des Wasserstoffs (Permeation) durch die Dichtungen mitberücksichtigt wird. Die Sorption des abzudichtenden gasförmigen Wasserstoffs durch das Dichtungsmaterial führt zu einer Volumen-Quellung der Dichtungs-Elastomere, was wiederum dem soeben beschriebenen Effekt entgegenwirkt und eine Abnahme der Glasübergangstemperatur  $T_g$  bewirkt. Welcher Effekt schließlich die Oberhand gewinnt, hängt von den Diffusionseigenschaften des Dichtungswerkstoffes, als auch von den konkreten Betriebsbedingungen ab und muss dementsprechend bei den FE-Simulationen berücksichtigt werden.

Das komplexe „piezo-thermo-rheologisch-hyperelastische“ Materialmodell liefert eine detaillierte Beschreibung des Materialverhaltens in Abhängigkeit von den realen Betriebsbedingungen, insbesondere der Temperatur, der Zeit und dem Druck.

### 2.1 Werkstoffdaten und Materialmodellierung

Neben dem typischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird eine dynamisch-mechanisch-thermische-Analyse (DMTA) benötigt. Die DMTA gibt eine sinusförmig oszillierende Verformung bzw. Dehnung vor und misst die resultierende, phasenverschobene Kraft bzw. Spannung. Hierbei können unterschiedliche Belastungsfälle betrachtet werden (z.B. Zug, Biegung, Torsion, Schub). Im Folgenden wird der uniaxiale Zugversuch betrachtet.

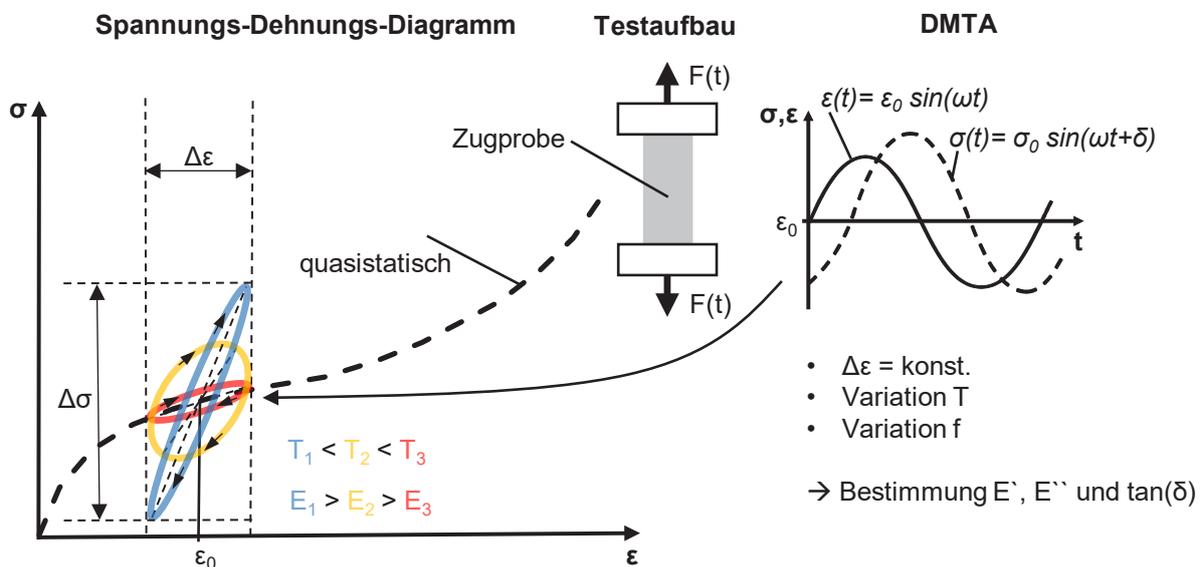


Abb. 1: Uniaxiales Spannungs-Dehnungs-Diagramm und DMTA

Abb. 1 zeigt eine quasistatische Spannungs-Dehnungs-Kurve mit typischem nichtlinearem Verlauf für Elastomere. Außerdem ist die zugehörige DMTA für einen definierten Dehnungsbereich dargestellt. Bei der DMTA werden meist definierte Isothermen für einen bestimmten Frequenzbereich abgefahren, welcher vom versuchstechnischen Zeitaufwand vertretbar ist (z.B.  $f = 0.1-30$  Hz) und ausreicht, um später die Masterkurve zu generieren. In Abb. 1 sind exemplarisch 3 Isothermen im Spannungs-Dehnungs-Diagramm gezeigt und verdeutlichen den Einfluss der Temperatur auf die Steifigkeit des Materials. Dieses Messverfahren liefert die viskoelastischen Materialeigenschaften als Speichermodul ( $E'$ ), Verlustmodul ( $E''$ ), komplexen Modul ( $E^*$ ) und Verlustfaktor ( $\tan(\delta)$ ) abhängig von der Verformungsgeschwindigkeit (Frequenz) und der Temperatur.

Anschließend werden die einzelnen Isothermen in doppel-logarithmischer Darstellung über der Frequenz visualisiert und weiterbearbeitet. Dabei wird meist das Speichermodul verwendet, um die sogenannte „Masterkurve“ mittels des „Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips“ zu generieren. Dieses Prinzip besagt, dass sich Elastomere bei tiefen Temperaturen wie bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten (bzw. hohen Frequenzen) verhalten und umgekehrt. Es liegt also ein klarer Zusammenhang zwischen Zeit und Temperatur vor. Diese Zeit-Temperatur-Äquivalenz kann als „thermo-rheologisch-einfaches“ Materialverhalten bezeichnet werden.[8] Folglich wird eine beliebige Isotherme aus den Messdaten als Referenztemperatur  $T_{ref}$  definiert und die übrigen Isothermen Kurven werden diesbezüglich horizontal mittels des Shiftfaktors  $a_T$  verschoben. Dafür kann der Ansatz von Williams-Landel-Ferry (WLF) oder Arrhenius genutzt werden (siehe Glg. (1) und (2)).

WLF: 
$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})} \tag{1}$$

Arrhenius: 
$$\log(a_T) = \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \tag{2}$$

Hierbei ist  $a_T$  der Shiftfaktor,  $T$  die relevante Temperatur,  $T_{ref}$  die Referenztemperatur,  $C_1$  und  $C_2$  jeweils eine Materialkonstante,  $E_a$  die Aktivierungsenergie und  $R$  die allgemeine Gaskonstante. Die isothermen DMTA-Messdaten sind in Abb. 2 dargestellt. Der Temperaturbereich umfasst -120 °C bis +150 °C, wobei die Frequenz für jede Isotherme von 0.1 bis 30 Hz variiert (Frequenz-Sweep). Es wird deutlich, dass bei niedrigen Temperaturen ein hohes Speichermodul und bei hohen Temperaturen ein niedriges Speichermodul vorliegt. Außerdem sind diese für die gemessenen Temperaturgrenzen nahezu konstant über den Frequenz-Sweep, während große Änderungen im Bereich um  $T_g = -52^\circ\text{C}$  zu sehen sind.

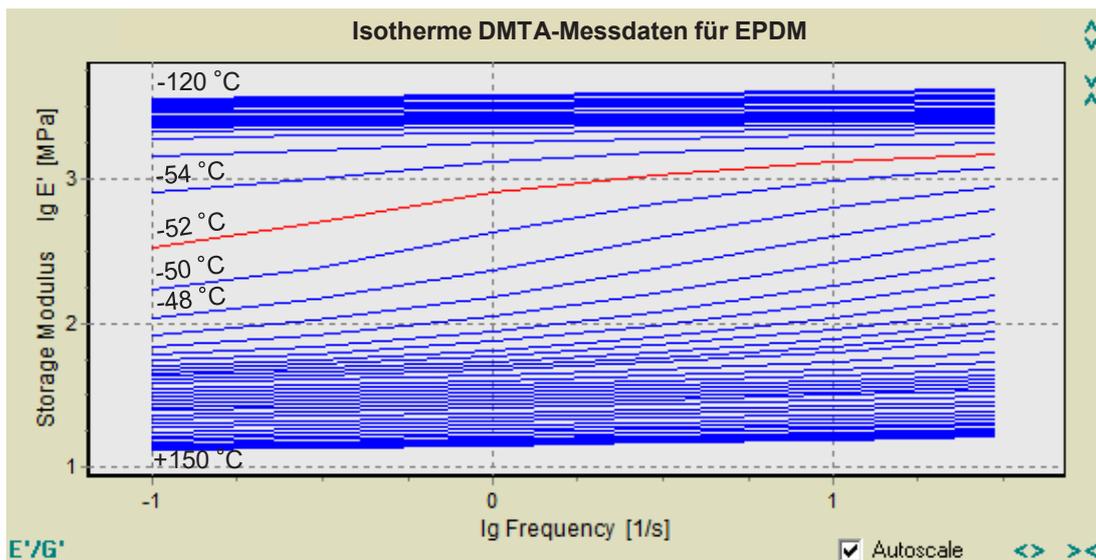


Abb. 2: Isotherme DMTA-Messdaten für EPDM als Speichermodul über der Testfrequenz

Der Shift der einzelnen Isothermen hin zu einer kontinuierlich verlaufenden Kurve, der sogenannten „Masterkurve“, beschreibt final das gesamte Frequenzspektrum für die Referenztemperatur  $T_{ref}$ . Diese Masterkurve kann nun für jede beliebige Temperatur mittels des zugehörigen Shiftfaktors  $a_T$  horizontal verschoben werden. Somit kann auf einfache Art und Weise das Verhalten des Werkstoffes für einen großen und absolut ausreichenden Temperatur- und Frequenzbereich näherungsweise beschrieben werden, ohne zeitaufwändige Materialtests durchzuführen, die zeitlich gesehen nahezu unmöglich umsetzbar sind. Die Erstellung der Masterkurve wurde hier mit der Software ViscoShift umgesetzt und ist in Abb. 3 dargestellt. Diese Darstellung berücksichtigt bisher den Zusammenhang von Zeit und Temperatur („thermo-rheologisches“ Verhalten). Die Glasübergangstemperatur  $T_g = -52^\circ\text{C}$  wird hier als Referenztemperatur  $T_{ref}$  verwendet.  $E_0$  stellt dabei den initialen Elastizitätsmodul und  $E_\infty$  den quasistatischen E-Modul für unendlich langsame Verformungsgeschwindigkeiten dar. Dieses Vorgehen weist meist keine perfekte Übereinstimmung einer kontinuierlich verlaufenden Masterkurve vor, jedoch beschreibt es weitestgehend eine gute Übereinstimmung der Materialeigenschaften.

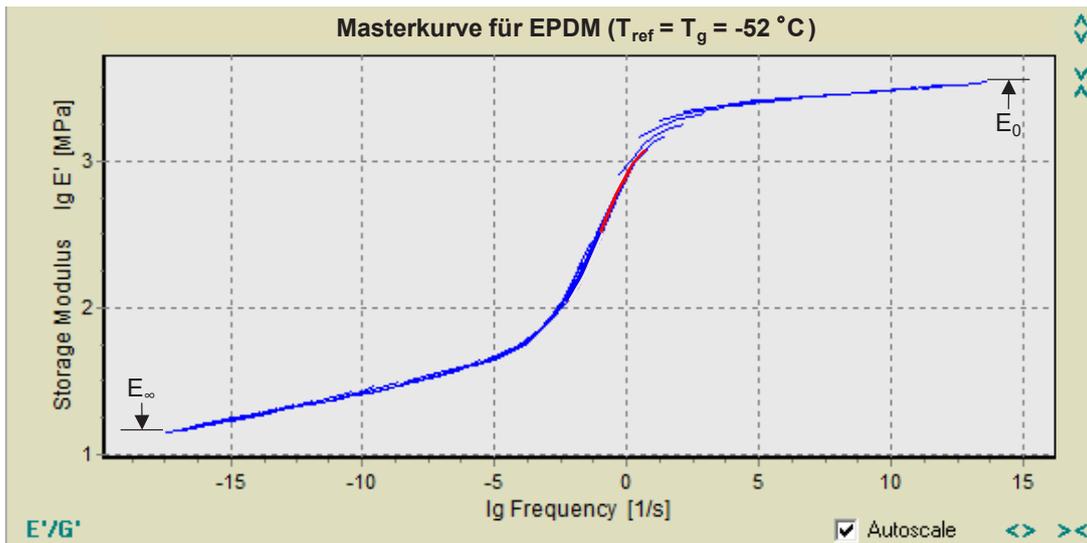


Abb. 3: Masterkurve für EPDM mit  $T_g = T_{ref}$

Diese Masterkurve wird in Abb. 4 zur Verdeutlichung exemplarisch zur Temperatur  $T = -40\text{ °C}$  verschoben, wobei der zugehörige Shiftfaktor  $a_T(T)$  verwendet wird. Somit verschiebt sich die Masterkurve nach rechts hin zu höheren Frequenzen äquivalent zu  $-40\text{ °C}$ . Der gelblich eingezeichnete, mittlere Verformungsgeschwindigkeitsbereich stellt den typischen Anwendungsbereich dar und beinhaltet die beiden Punkte P1 und P2. P1 beschreibt dabei eine hohe Steifigkeit der Glasübergangstemperatur ( $-52\text{ °C}$ ), wohingegen P2 gummielastisches Materialverhalten bei  $-40\text{ °C}$  für die gleiche Verformungsgeschwindigkeit zeigt.

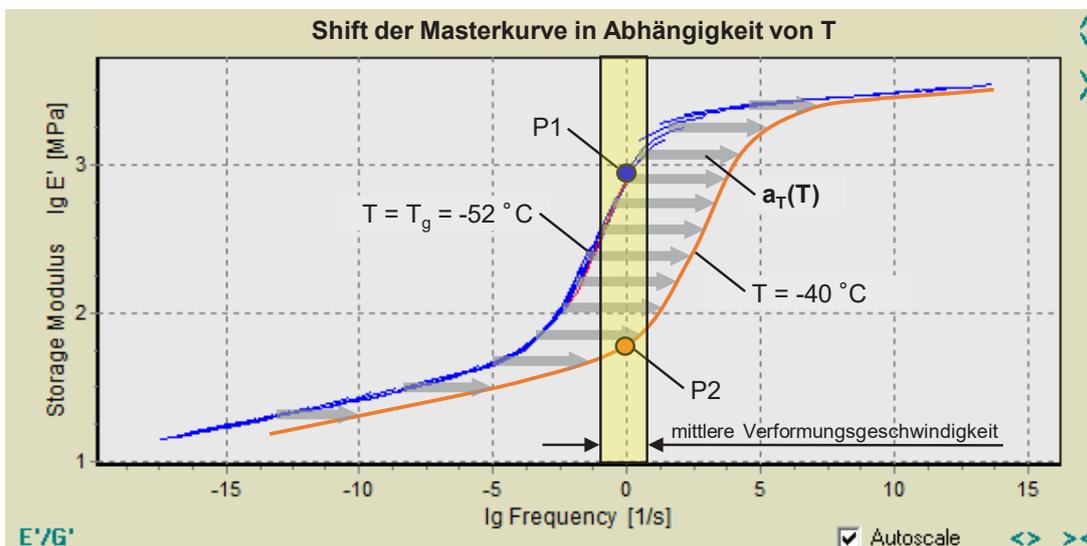


Abb. 4: Exemplarischer Shift der Masterkurve von  $-52\text{ °C}$  zu  $-40\text{ °C}$

Nun wird zusätzlich der Einfluss der druckabhängigen Glasübergangstemperatur betrachtet. Hierzu sind in der Literatur typische Werte von ca.  $0,02\text{-}0,03\text{ K/bar}$  gegeben.[9] Dies bedeutet, dass sich die Glasübergangstemperatur  $T_g$  bei  $1000\text{ bar}$  um  $+20\text{ K}$  bis  $+30\text{ K}$  verschiebt. Für das weitere Vorgehen wird der Parameter wie folgt definiert:

$$\beta = \frac{dT_g}{dp} = 0.025 \frac{\text{°C}}{\text{bar}} \quad (3)$$

Dieser Parameter berücksichtigt nun die Abhängigkeit der Glasübergangstemperatur von dem zugrundeliegenden hydrostatischen Druck innerhalb des Dichtungselementes. Betrachtet man nun einen erhöhten Druck von  $700\text{ bar}$ , so stellt sich eine Glasübergangstemperatur von  $T_g = -34.5\text{ °C}$  ein, und somit ändert

sich natürlich auch der Shiftfaktor signifikant.  $a_T(T,p)$ . Abb. 5 verdeutlicht den Vergleich der Masterkurve bei -40 °C für den Atmosphärendruck ( $p = 1$  bar) und bei Hochdruck ( $p = 700$  bar).

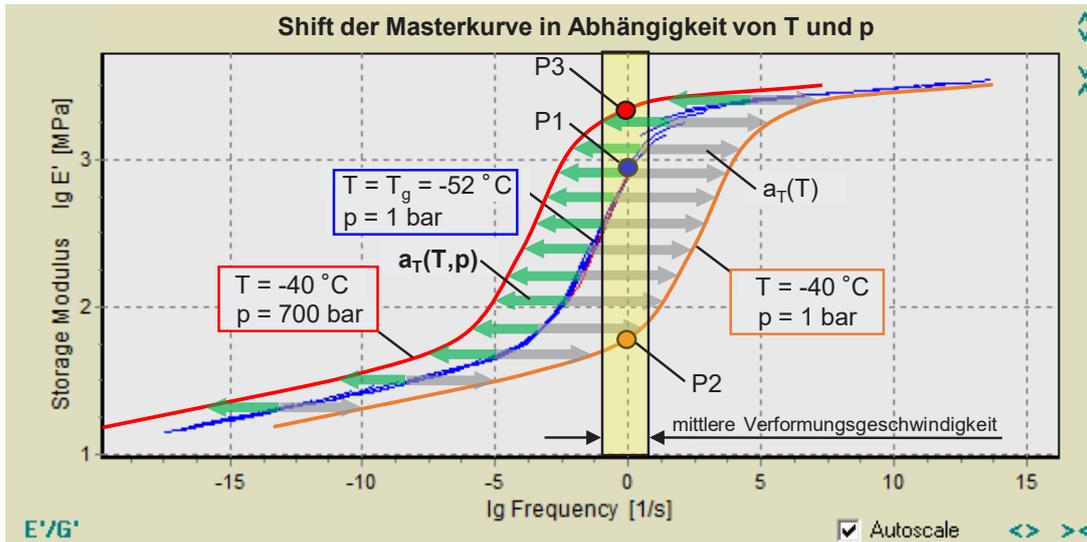


Abb. 5: Vergleich der Masterkurve mit Druckabhängigkeit

Es wird deutlich, dass bei gleicher Temperatur (-40 °C) ein vollkommen unterschiedliches Materialverhalten in Abhängigkeit vom Druck vorliegt. Während die orange Kurve ein gummielastisches Verhalten bei  $p = 1$  bar und  $T = -40$  °C hat (siehe P2), beschreibt die rote Kurve das Materialverhalten bei gleicher Temperatur und  $p = 700$  bar. Für die gleiche mittlere Verformungsgeschwindigkeit liegt bei 700 bar glasartiges, sehr steifes Materialverhalten vor (siehe P3) und beeinflusst somit das Dichtungsverhalten.

Die Masterkurve selbst wird mathematisch mittels einer Prony-Reihe beschrieben. Hier wird die Software ViscoData verwendet, um mit einer hinreichenden Anzahl an n-Gliedern die Masterkurve möglichst genau wiederzugeben. Diese Prony-Reihe beinhaltet Relaxationszeiten  $\tau_n$  und Relaxationsstärken  $e_n$ , die gemeinsam das sogenannte „diskrete Relaxationsspektrum“ beschreiben.

Prony-Reihe: 
$$E^*(\omega, T) = E_0 \left[ 1 - \sum_{n=1}^N e_n \frac{1}{1 + \omega^2 (\tau_n a_{T,T_g})^2} \right] \quad (4)$$

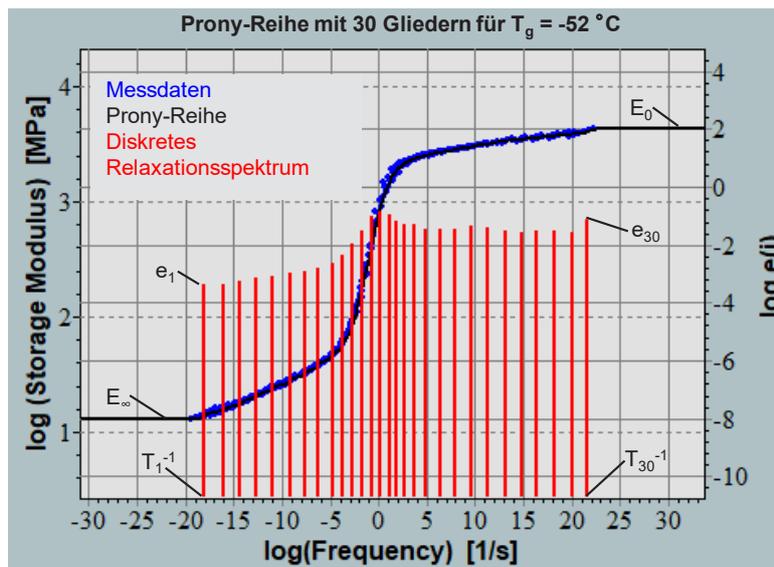


Abb. 6: Generierung der Prony-Reihe und Darstellung des diskreten Relaxationsspektrums

Die erzeugten Prony-Parameter, die verwendeten Shift-Parameter und ein hyperelastischer Materialansatz sind im Materialmodell der FE-Simulation zu definieren. Die zusätzliche Berücksichtigung der druckabhängigen Glasübergangstemperatur erfordert die Integration einer Subroutine in das definierte Materialmodell.

## 2.2 FEA – Einfluss des Drucks auf das Tieftemperaturverhalten von Dichtungs-Elastomeren

Das Tieftemperaturverhalten von Elastomeren wird durch die Glasübergangstemperatur  $T_g$  beschrieben, welche den Übergang des Materialverhaltens vom gummielastischen in den glasartig spröden Zustand beschreibt. Dies hat zur Folge, dass die für die Abdichtung relevanten elastischen Eigenschaften des Werkstoffs verloren gehen. Die Glasübergangstemperatur ist eine individuelle werkstoffabhängige Größe, die jedoch druckabhängig ist [9,10]. Im Folgenden soll dieser Zusammenhang zwischen dem anstehenden Druck und der Glasübergangstemperatur am Beispiel eines O-Ringes bei einem typischen Betankungsvorgang mit Wasserstoff demonstriert werden. Dazu wird ein vereinfachtes 2D-axialsymmetrisches Modell des O-Ringes (13 mm x 1 mm; EPDM) verwendet, um den Rechenaufwand deutlich zu reduzieren. Während des Betankungsprozesses wird gleichzeitig der Druck erhöht und die Temperatur reduziert (siehe Abb. 7).

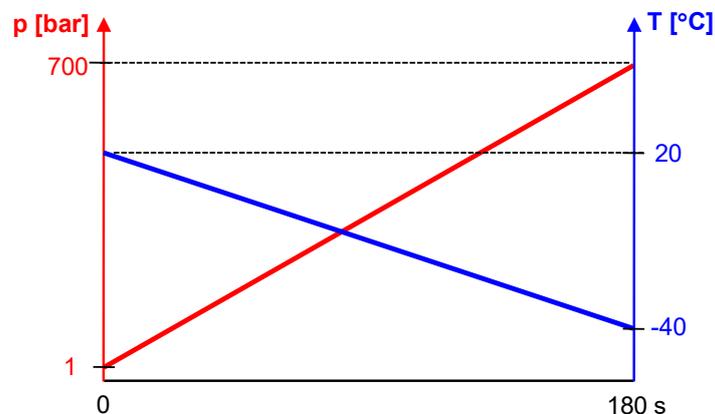


Abb. 7: Betankungsprozess

Abb. 8A veranschaulicht die axial-dichtende Einbaulage des O-Ringes, während Abb. 8B die Detailansicht des O-Ringquerschnittes für unterschiedliche Betriebszustände während der Betankung darstellt. Der O-Ring aus dem Werkstoff EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) mit einer Glasübergangstemperatur von  $T_g = -52$  °C dichtet axial Wasserstoff mit 700 bar Systemdruck gegen die Umgebung hin ab. Bei der Berechnung mit Hilfe der Finiten Elemente Analyse (FEA) wird der Druck kontinuierlich auf 700 bar erhöht, gleichzeitig wird die Temperatur von Raumtemperatur auf  $-40$  °C abgesenkt, was den realen Tankprozess näherungsweise darstellt (siehe Abb. 8B). Hier ist die resultierende Dichtpressung über der Temperatur aufgetragen (rote Kurve): Man erkennt drei Zonen (I, II, III) mit jeweils charakteristischen Verläufen. Zone I zeigt den dichten, unkritischen Zustand, Zone II beschreibt die Spaltentstehung mit abnehmender Dichtpressung bis hin zur vollständigen Ausprägung des Leckagespaltes ohne Dichtpressung in Zone III. Ausgehend vom Atmosphärendruck wird bei Raumtemperatur eine Dichtpressung von ca. 8 MPa erreicht. Während der Tank-Befüllung wird unter Drucksteigerung und gleichzeitiger Temperaturabsenkung die Dichtpressung stetig angehoben (Zone I). Die Zunahme entspricht einer Überlagerung des Systemdrucks (schwarz gestrichelte Linie) mit der bereits zu Beginn der Befüllung bestehenden Dichtpressung. Diese strikte Proportionalität ist beendet bei ca.  $-20$  °C und eine stetig stärkere Abweichung der Dichtpressungskurve von der extrapolierten Geraden des Systemdrucks stellt sich ein. In dieser Phase leistet der Systemdruck (Wasserstoff-Gasdruck) Arbeit an der elastomeren Dichtung und es kommt zur sogenannten Volumendilatation. Das bedeutet, das Material wird kompressibel und das Dichtungsvolumen nimmt ab. Nur noch ein kleiner Teil des zusätzlich aufgebracht Gas-Druckes kommt jetzt noch der Dichtpressung zugute (Zone II). Dieser Anteil wird stetig kleiner, bis schließlich bei etwa  $-38$  °C jede weitere Drucksteigerung vollständig in Volumenänderung umgesetzt wird, was schließlich zu einem voll ausgebildeten Spalt an der Dichtfläche führt und eine Leckage hervorruft (Zone III). Die rot dargestellte Dichtpressung stellt nur den Betankungsvorgang dar, aber liegt anfänglich eigentlich über dem Systemdruck aufgrund der Vorverpressung durch den Einbauzustand. Die in Abb. 8B eingeführten Bilder a)-d) mit der jeweils existierenden Spannungsverteilung im O-Ringquerschnitt illustrieren den Beginn einer Spaltbildung, die schließlich zur Leckage führt. Ausnahmsweise sind hier Scherspannungen gezeigt und nicht wie üblich Axialspannungen. Scherspannungen bleiben konstant, wenn eine Dichtung in ihrem Bauraum derart gekammert ist, dass praktisch keine zusätzlichen Verformungen (Gestaltsänderungen) mehr möglich sind. Dieses Verhalten ist bereits unter moderaten Gasdrücken gegeben.

Bei weiter zunehmendem Druck (Zone I) bleibt zunächst die Verteilung der Schubspannung im Querschnitt des O-Ringes unverändert. Die Situation ändert sich erst, wenn hohe Drücke und niedrige Temperaturen gleichzeitig agieren und das Dichtungsmaterial kompressibel werden lassen. In diesem Zustand kommt es zur Volumenabnahme und indirekt auch zu einer Veränderung der Scherspannungsverteilung (deviatorischer Spannungszustand: vergleiche b) mit c) und d) in Abb. 8B). Der Unterschied ist nicht groß, jedoch signifikant und signalisiert zusätzliche Verformungsmöglichkeiten am O-Ring, die zunächst sowohl im Nutgrund als auch an der gegenüberliegenden Dichtfläche zur Bildung eines Spaltes führen, wobei das Wachstum des Spaltes mit weiter zunehmendem Druck unten ausgeprägter ist und schließlich die Dichtung als Ganzes nach oben drückt und somit oben den Spalt wieder schließt und ihn damit gleichzeitig unten vergrößert (siehe Abb. 9).

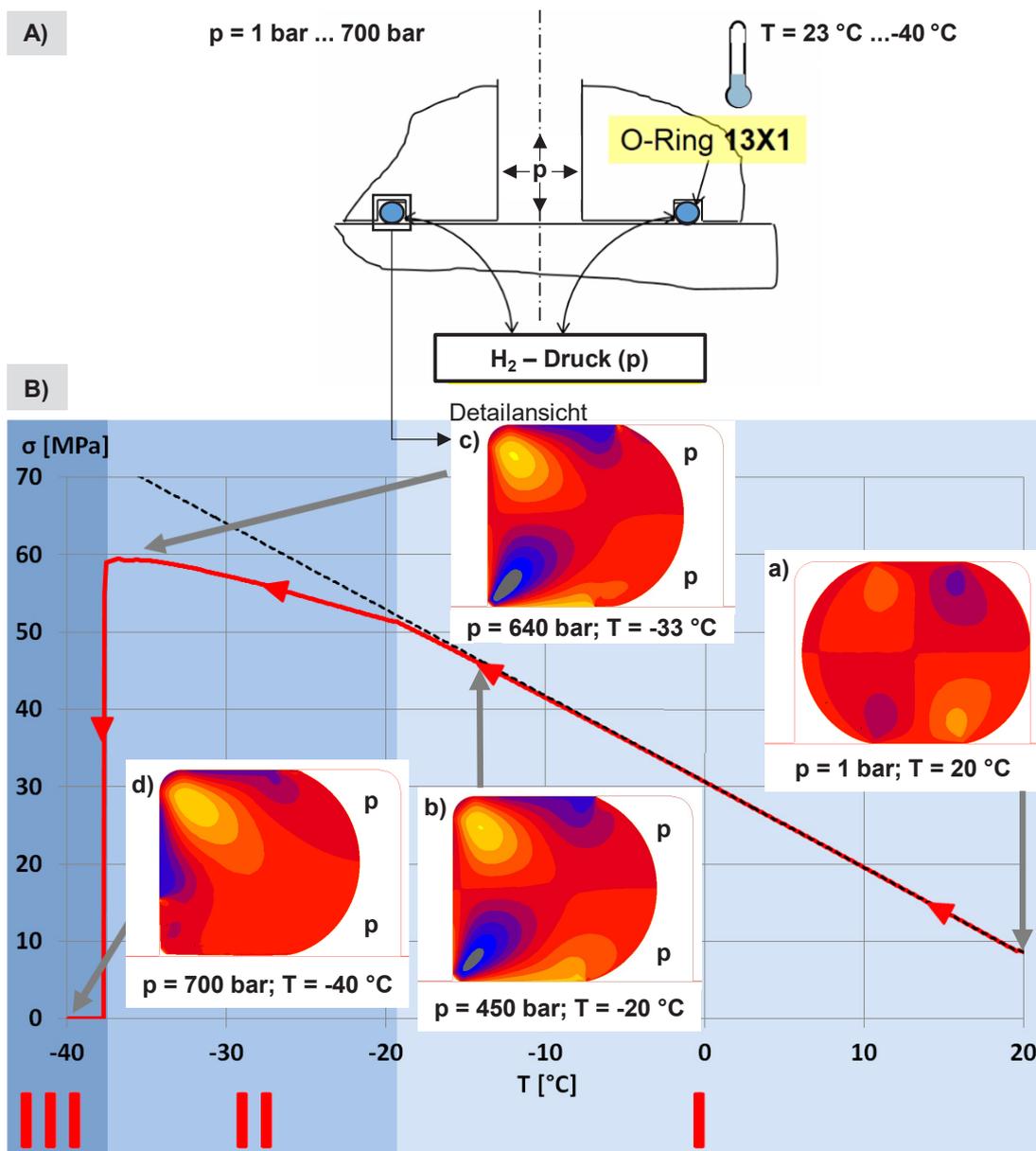


Abb. 8: A) Axial-abdichtender O-Ring mit B) Detailansicht der Schubspannung im O-Ringquerschnitt für den Tankvorgang

In der vergrößerten Darstellung in Abb. 9 (Vergrößerung von c) und d) in Abb. 8B) ist zu erkennen, dass sich bei einem Druck von 700 bar und einer Temperatur von -40 °C ein Spalt gebildet hat. Dies erklärt sich aus der Verschiebung der Glasübergangstemperatur durch den hohen Druck und die damit verbundene Kompressibilität des Dichtungsmaterials. Man ist geneigt zu denken, je höher der anstehende Gasdruck ist, desto besser wird die

Dichtfunktion erfüllt. Das ist auch prinzipiell so, jedoch hat dies seine Grenzen. Wenn sich zu einem hohen Systemdruck auch noch eine sehr niedrige Temperatur einstellt, kann sich das genannte Prinzip gegensätzlich verhalten. Verwendet man z.B. für die Abdichtung von gasförmigem Wasserstoff unter hohen Drücken ein Elastomer mit einer guten Tieftemperaturflexibilität (z.B.  $T_g \approx -50\text{ °C}$ ), so zeigt sich, dass der  $T_g$ -Wert ein bemerkenswertes Verhalten an den Tag legt. Der  $T_g$ -Wert steigt an und kann bei Drücken von ca. 1000 bar um ca. 25 K zu höheren Werten verschoben sein. Letzteres kann bedeuten, dass ein solches Dichtungsmaterial bereits bei  $-25\text{ °C}$  den effektiven Glasübergangspunkt erreicht hat. Gleichzeitig verändern sich weitere Eigenschaften des elastomeren Dichtungsmaterials in charakteristischer Weise. Das unter normalen Bedingungen vorherrschende inkompressible Verhalten der Elastomere wird abgelöst durch ein kompressibles Verformungsverhalten, und damit kommt es zu einer Volumenabnahme bei zunehmendem Systemdruck. Dadurch kann ein traditionell sehr gut geeigneter Tieftemperatur-Dichtungswerkstoff bereits bei Temperaturen zwischen  $-30\text{ °C}$  und  $-40\text{ °C}$  Leckage zeigen.

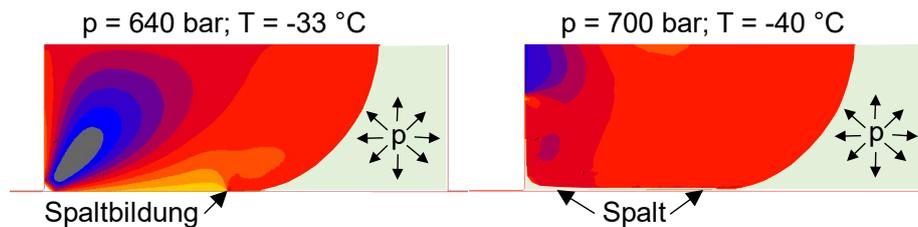


Abb. 9: Detailansicht der Spaltbildung zwischen O-Ring und Nutgrund (Detail Abb. 9B c) und d))

### 3 Lösungsansatz

Die gezeigte Druckabhängigkeit der Glasübergangstemperatur ist praktisch eine materialunabhängige Größe und beträgt, wie bereits angedeutet, ca. 0,025 K/bar. Zur Illustration dieser Tatsache wird eine weitere Berechnung mit einem O-Ring aus einem Brombutyl Elastomer mit einer Glasübergangstemperatur von  $T_g = -62\text{ °C}$  durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 10 dargestellt. Selbst bei 900 bar Druck und einer Temperatur von  $-40\text{ °C}$  ist hier die effektive Glasübergangstemperatur im gesamten Querschnitt noch nicht erreicht. Spaltbildung tritt nicht auf und der O-Ring kann die geforderte Funktion der sicheren Abdichtung beim Betankungsvorgang erfüllen. Ob Brombutyl aber wirklich geeignet ist, muss noch geprüft werden. Auch die übrigen Anforderungen, wie z.B. eine geringe Neigung zur explosiven Dekompression, müssen erfüllt sein.

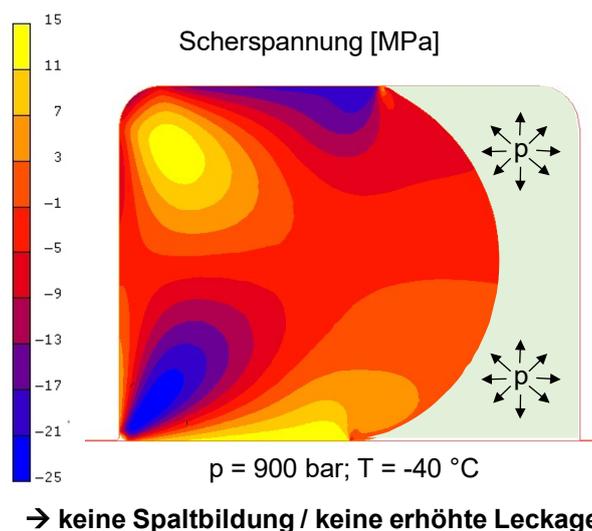


Abb. 10: Spannungsverteilung im Querschnitt eines Brom-Butyl-O-Ringes mit  $T_g=-62\text{ °C}$

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisher bei der Entwicklung von Dichtungen für Wasserstofftanksysteme gesammelten Ergebnisse und Erfahrungen zeigen, dass die Tieftemperatureigenschaften der verwendeten Dichtungs-Elastomere der entscheidende Faktor für eine sichere Abdichtung von Wasserstoff sind. Die dargestellte komplexe Materialmodellierung samt detaillierter Beschreibung des zusätzlichen Einflusses der druckabhängigen Glasübergangstemperatur und der damit verbundenen Kompressibilität des Dichtungswerkstoffes verdeutlichen das Auftreten eines Leckagespaltes bei gemeinsamem Agieren von Hochdruck und Tieftemperatur. Aktuelle Projekte zielen darauf ab, Werkstoffe mit einer sehr geringen Permeation bei gleichzeitig sehr niedrigem  $T_g$ -Wert von unter  $-60\text{ °C}$  zu entwickeln, um diesen Problemstellungen gerecht zu werden. Man verwendet für den Einsatz in Wasserstofftanksystemen verschiedene Werkstoffe mit herausragenden Tieftemperatureigenschaften, z.B. thermoplastische Elastomere, Silikon Elastomere oder die zuvor genannten EPDM-Elastomere (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk). Aufgefallen ist in diesem Zusammenhang auch die Klasse der Butyl-Kautschuke, die eine ganz außerordentliche Gasdichtheit besitzen sowie eine außerordentliche Tieftemperaturflexibilität aufweisen. Dennoch muss der jeweilige Anwendungsfall mit allen Einflussgrößen detailliert betrachtet werden, um den passenden Dichtungswerkstoff und Dichtungstyp zu definieren.

## 5 Literatur

- [1] Repplinger C., Sellen S., Kedziora S., Zürbes A., Cao T. B., Maas S., "Numerical determination and experimental verification of the optimum autofrettage pressure for a complex aluminium high-pressure valve to foster crack closure", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 43, pp. 2183–2199, 2020
- [2] Tanaka Y.; New Mirai Press Information 2020; [https://global.toyota/pages/news/images/2020/12/09/1200/20201209\\_01\\_02\\_en.pdf#page=27](https://global.toyota/pages/news/images/2020/12/09/1200/20201209_01_02_en.pdf#page=27); 2020
- [3] BMWgroup; Das Antriebssystem des BMW I HydriGen Next; <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0306930DE/das-antriebssystem-des-bmw-i-hydrogen-next-bmw-group-bekraeftigt-weiterfuehrendes-engagement-bei-wasserstoff-brennstoffzellen-technologie?language=de>; 2020
- [4] Achenbach, M.; Alternative Fahrzeugantriebe erfordern neue Dichtungskonzepte; 94. Zusammenkunft der Bezirksgruppe Süd - und Südwestdeutschland / DKG, 2009
- [5] Achenbach, M.; Albrecht, D.; Sealing upon high Pressure and low Temperature; 17th International Sealing Conference, Stuttgart, 2012
- [6] Pasięka, L. Achenbach, M.; Dichtigkeit und Permeation in Wasserstoffanwendungen; Dichtungstechnik Jahrbuch 2016, ISGATEC, 2016
- [7] Commission Regulation (EU) No. 406/2010, Implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles, *Official Journal of the European Union*, 2010
- [8] Schwarzl, F. R.; *Polymermechanik: Strukturen und mechanisches Verhalten von Polymeren*, Berlin, 1990
- [9] Fillers R. W., Tschoegl N. W.: The Effect of Pressure on the Mechanical Properties of Polymers, *Transactions of the Society of Rheology*, 21, pp. 51-100, 1977
- [10] Ferry I. D.: *Viscoelastic Properties of Polymers*, 3rd edition, John Wiley, New York, 1980

# Prozessbasierte Sickenoptimierung langfaserverstärkter Kunststoffbauteile

Sven Revfi, Moritz Fünkner, Albert Albers  
(Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung)

Kamran Behdinan (University of Toronto – Department of Mechanical & Industrial Engineering)

## Zusammenfassung

Zur Erhöhung der Biegesteifigkeit von dünnwandigen Bauteilen können Sicken als konstruktive Versteifungselemente eingebracht werden. Bei Bauteilen aus langfaserverstärkten Kunststoffen ergibt sich dabei jedoch ein komplexer Designprozess, da die Sickengeometrie einen direkten Einfluss auf die sich im Herstellungsprozess einstellenden Faserorientierungen besitzt. Dabei resultieren die finalen Materialeigenschaften erst nach dem Herstellungsprozess, wodurch eine Bewertung der erzielbaren Biegesteifigkeit in frühen Phasen der Produktentwicklung erschwert wird.

Zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der Gestaltfindung versickter Bauteile aus Sheet Molding Compound (SMC) wurde eine FE-basierte Sickenoptimierungsmethode entwickelt, die durch eine Kopplung von Prozess- und Struktursimulation die lokal anisotropen Materialeigenschaften linear-elastisch berücksichtigt. In einem ersten Schritt werden zur Bestimmung des prozessbasierten Sickenmusters aus den im belasteten Bauteil vorliegenden Hauptbiegespannungen resultierende Trajektorien berechnet. Im zweiten Schritt werden mögliche Sickenquerschnitte auf Basis des ermittelten Sickenmusters variiert. Dabei können sowohl Festigkeits- als auch Prozessrandbedingungen berücksichtigt werden.

In diesem Beitrag wird einerseits die Methode zur Trajektorienberechnung untersucht und andererseits die Potentiale der entwickelten prozessbasierten Sickenoptimierungsmethode für die Unterstützung des Produktentwicklers bei der Gestaltfindung in frühen Phasen aufgezeigt.

## 1 Einleitung & Stand der Forschung

Die systematische Untersuchung der Gestaltung von Sicken begann in den 1950er Jahren. Dabei wurde hauptsächlich auf Basis experimenteller Forschungsarbeiten versucht, allgemeingültige Konstruktionsrichtlinien und Designkataloge abzuleiten [1]. Der Nachteil solcher allgemeingültiger Herangehensweisen ist, dass reale, komplexe Biegebeanspruchungen in der Regel nicht auf die betrachteten, vereinfachten Lastfälle reduziert werden können. Deshalb stellen die Designkataloge lediglich Kompromisslösungen in Hinblick auf eine lastfallspezifische Auslegung dar.

Um die Sickengestaltung auch für komplexere Lastfälle vornehmen zu können, bietet sich der Einsatz von numerischen Optimierungsmethoden an. Dabei wird zwischen direkten und indirekten Methoden unterschieden. Bei den direkten Methoden wird die Sicke dreidimensional im Optimierungsergebnis ausgebildet, während indirekte Methoden lediglich Verlauf und Position der Sicken (Sickenmuster) vorgeben. Da die Versteifungswirkung von Sicken allerdings durch die zwei Faktoren Sickenmuster und Sickenquerschnitt beeinflusst wird, finden häufig direkte Verfahren Anwendung.

Weiterhin kann bei den direkten Verfahren zwischen sensitivitätsbasierten und optimalitätskriterienbasierten Optimierungsansätzen unterschieden werden. Sensitivitätsbasierte Ansätze können beispielsweise in den Softwares Optistruct [2] oder Abaqus/TOSCA [3] gewählt werden. Zusätzlich bietet Abaqus/TOSCA einen optimalitätskriterienbasierten Ansatz an, der auf die Forschungsarbeiten von Albers und Emmrich [4] zurückgeht. Das dahinterliegende Optimalitätskriterium besagt, dass die Sicken optimalerweise den im Bauteil vorliegenden Hauptbiegespannungsrichtungen (HBSR) folgen. Mithilfe dieses Ansatzes lassen sich allerdings noch immer keine direkt herstellbaren Sickendesigns erzeugen, da nicht notwendigerweise durchgängig zusammenhängende Sickenmuster und konstante Sickenbreiten als Ergebnis resultieren [5]. Weiterhin lassen sich die einzelnen Sickenparameter (siehe Abb. 1) nicht individuell beeinflussen. Dies ist jedoch notwendig, um herstellungsspezifische Sickendesigns zu erzeugen, da durch die Fertigung beispielsweise Vorgaben hinsichtlich Kopf- oder Fußradien oder maximaler Sickentiefe gemacht werden können, sodass Rissbildung in der Herstellung

vermieden werden kann. Deshalb entwickelte Majic [5] eine trajektorienbasierte Sickenoptimierungsmethode, die entlang von berechneten Biegetrajektorien über stückweise definierte Funktionen individuell anpassbare Sickenquerschnitte ausbildet. All diese Untersuchungen belaufen sich auf metallische Werkstoffe, vorwiegend Stahl, bei denen ein isotropes Materialverhalten angenommen werden kann.

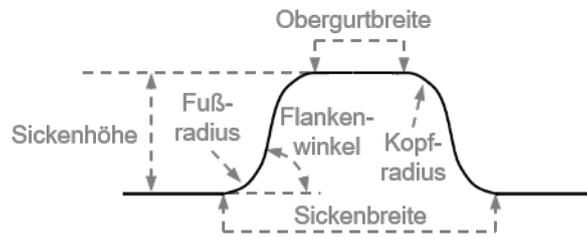


Abb. 1. Sickenquerschnitt mit Sickenparametern nach Emmrich [6]

Bei der Gestaltung von Sicken in Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen wie Sheet Molding Compound (SMC) wird die beschriebene Designkomplexität zusätzlich von der Anisotropie des Materials überlagert, da sich die Biegesteifigkeit von Bauteilen durch das Produkt aus Flächenträgheitsmoment und E-Modul berechnet. Bei isotropen Bauteilen, die einen konstanten, richtungsunabhängigen E-Modul aufweisen, kann die Biegesteifigkeit demnach rein durch die Veränderung des Sickenmusters und des Sickenquerschnitts eingestellt werden. Bei Bauteilen aus SMC, die durch das Einlegen eines Halbzeugzuschnitts in ein heißes Presswerkzeug in ihre finale Bauteilform überführt werden, resultieren die finalen Materialeigenschaften erst im Herstellungsprozess. Dabei führt eine Veränderung des Sickenquerschnitts zu einem anderen Fließverhalten und damit zu einer anderen Faserorientierung. Daher gilt es, die Disziplinen Design, Herstellung und Material integriert zu betrachten, um ein herstellungsbasiertes, lastgerechtes Sicken-Design gestalten zu können. Zur Unterstützung des Produktentwicklers bei der komplexen Gestaltung von Sicken-Designs in SMC-Bauteilen entwickelten Revfi et al. [7] eine Methode zur herstellungsbasierten Sickenoptimierung.

Im vorliegenden Beitrag wird untersucht, wie sich das zur Berechnung des Sickenmusters nötige zweistufige Mappingverfahren (siehe Kap. 2.1) der Prozesssimulationsergebnisse aus Moldflow in Abaqus auf die berechneten Hauptbiegespannungen und die Lage der darauf basierenden Hauptbiegespannungstrajektorien auswirkt. Anschließend werden die Potentiale der SMC-basierten Sickenoptimierungsmethode in der Anwendung bei realen Strukturen vorgestellt.

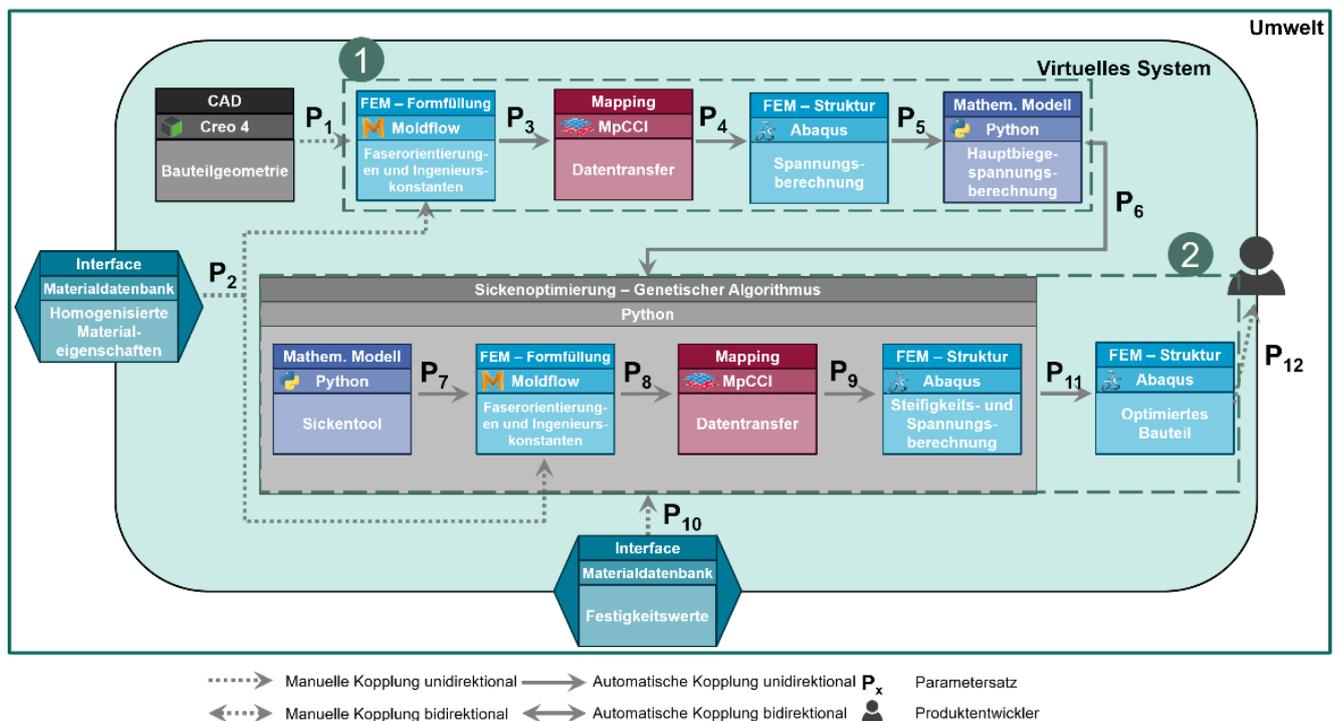


Abb. 2. Herstellungsbasierte Optimierung für lastgerechte, versickte SMC-Bauteile

## 2 Methode

Die Gesamtmethode zur Sickenoptimierung ist in Abb. 2 dargestellt. Im Rahmen dieses Beitrags werden die herstellungsbasierte Trajektorienberechnung (relevante Methodenbausteine: (1) in Abb. 2) und die Potentiale bei der Optimierung (relevante Methodenbausteine: (2) in Abb. 2) betrachtet, weshalb die Teilmethoden nachfolgend getrennt voneinander vorgestellt werden.

### 2.1 Trajektorienberechnung

Zur Berechnung der herstellungsbasierten Sickenmuster wurde ein zweistufiges Mappingverfahren entwickelt, das die Ergebnisse der Prozesssimulation aus Moldflow in die Struktursimulation in Abaqus überträgt (siehe Abb. 3). Dabei werden im ersten Schritt die neun Ingenieurskonstanten ( $E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ ) mithilfe der MpCCI MapLib des Fraunhofer SCAI elementweise aus Moldflow gemäß der durch die Fasern vorgegebenen Vorzugsrichtungen auf ein regelmäßiges Abaqus-3D-Volumennetz übertragen. Dieses regelmäßige Netz wird durch eine Bottom-Up Vernetzung auf Basis der Bauteilmittelfläche erzeugt. Durch dieses Vorgehen ist es möglich, die Anzahl der Layer in Bauteildickenrichtung zu variieren. Im zweiten Schritt werden die im Abaqus-3D-Volumennetz vorliegenden Materialeigenschaften mithilfe eines Pythonskripts automatisiert in eine 2D-Shell-Layup-Beschreibung (gleiche Anzahl an Shell-Layer wie Anzahl an Volumenelemente) übersetzt. Dazu werden die Schwerpunktkoordinaten der 3D-Elemente und die Flächenschwerpunkte der Shells ermittelt und die Materialeigenschaften der 3D-Elemente an die nächstgelegenen Shells übergeben. Dieses Mapping ist notwendig, damit die Sickenquerschnitte im Nachgang über stückweise definierte Funktionen erzeugt werden können. Außerdem bringt die 2D-Modellierung den Vorteil eines geringeren Rechenaufwands mit sich. [8]

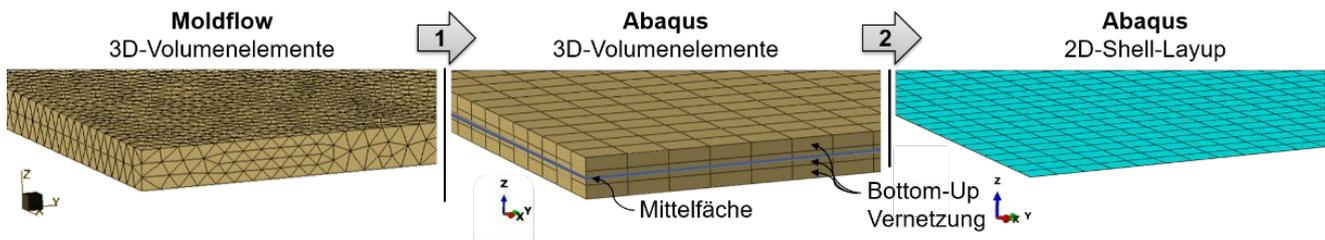


Abb. 3. Zweistufiges Mappingverfahren beispielhaft für drei Layer über die Dicke [8]

Basierend auf dem mithilfe des zweistufigen Mappingverfahrens erzeugten Shell-Modellaufbau, erfolgt eine Struktursimulation der Belastungssituation des Bauteils. Die hieraus resultierenden Spannungstensoren werden zur Berechnung der Sickenmuster (Trajektorien) verwendet, indem daraus die Hauptbiegespannungen (HBS) ermittelt werden. Mithilfe der Spannungswerte an der Bauteiloberseite  $\sigma_o$  und der Bauteilunterseite  $\sigma_u$  werden die Biegespannungen  $\sigma_B$  aus dem Gesamtspannungszustand extrahiert (siehe Gleichung 1). Durch die Lösung des daraus resultierenden Eigenwert-Eigenvektor-Problems können die HBS und HBSR des betrachteten Elements bestimmt werden. [8]

$$\begin{pmatrix} \sigma_{B,x} \\ \sigma_{B,y} \\ \tau_{B,xy} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{o,x} - \sigma_{u,x} \\ \sigma_{o,y} - \sigma_{u,y} \\ \tau_{o,xy} - \tau_{u,xy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Danach erfolgt die Berechnung der Trajektorien. Die Elemente, in denen die höchsten HBS vorliegen, dienen als Trajektorienstartpunkte, die gemäß der vorliegenden HBSR fortgesetzt werden. Um die Sickenquerschnitte zu erzeugen (direkte Methode), werden die Knoten im für die Sicke partitionierten Bereich (siehe Abb. 4 (b)) normal zur Bauteilmittelfläche, gemäß stückweise definierter Funktionen entlang der berechneten Trajektorien, verschoben. [8]

Im Rahmen dieses Beitrags werden die Auswirkungen des zweistufigen Mappingverfahrens auf die Lage der Trajektorienstartpunkte entlang der y-Achse (siehe Abb. 4 (b)) untersucht und bewertet. Dazu wird ein einfach gehaltenes Beispiel einer einseitig eingespannten, quadratischen Platte (siehe Abb. 4 (a)) verwendet, um die Plausibilität der Ergebnisse bewerten zu können. Die nachfolgenden Ergebnisse basieren alle auf demselben Moldflow-Simulationsergebnis, bei dem über der Bauteildicke acht Volumenelemente im Bauteilinneren gewählt wurden. Weiterhin wurde der Halbzeugzuschnitt mit einer Abmessung von 130 x 130 mm mittig platziert (siehe Abb. 4 (a)). [8]

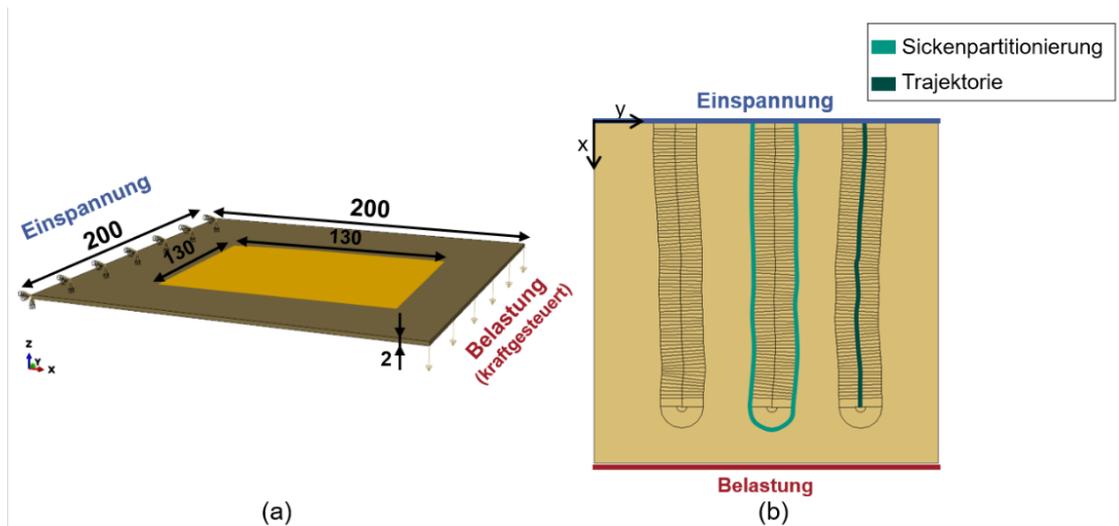


Abb. 4. (a) Untersuchungsgegenstand: Einseitig eingespannte Platte mit Position des Halbzeugzuschnittes (b) HBS-Trajektorie und Partitionierung für die Sickenherstellung nach Revfi et al. [8]

## 2.2 Optimierung

Auf Basis der mithilfe in Kapitel 2.1 beschriebenen Methode erzeugten Sickenmuster werden anschließend die Sickenquerschnitte optimiert. Dazu wird ein genetischer Algorithmus verwendet, der die Sickenparameter (siehe Abb. 1) strategisch variiert. Für jede erzeugte Sickengeometrie wird eine Formfüllsimulation in Moldflow durchgeführt und die resultierenden Faserorientierungstensoren und Materialeigenschaften auf das entsprechende 3D-Volumenmodell in Abaqus gemappt (siehe erster Schritt in Abb. 3). Dieses Volumenmodell wird dann mit den vorliegenden Randbedingungen/Lasten versehen und die Steifigkeit des Bauteils bestimmt. Dabei muss beachtet werden, dass jede Veränderung des Sickenquerschnitts zu einer Änderung des Bauteilvolumens führt. Deshalb muss der in Moldflow verwendete Halbzeugzuschnitt im Optimierungsprozess für jeden erzeugten Sickenquerschnitt angepasst werden. Es ist dafür zu sorgen, dass bei jedem Fließpressvorgang ein konstant gehaltenes relatives Mehrvolumen vorliegt, um trotz des kompressiblen Materialverhaltens eine vollständige Füllung des Presswerkzeugs zu gewährleisten. [9]

Zur Bewertung eines durch ein Parameterset erzeugten Sickenquerschnitts wird ein Fitnesswert berechnet, der als Zielfunktion für die Optimierung dient. Dieser Fitnesswert  $f$  wird gemäß Gleichung 2 durch den Quotienten aus dem Bauteilvolumen  $V$  und der Arbeit der externen Kräfte  $ALLWK$  definiert. Die Minimierung dieses Fitnesswertes ist das Ziel der Optimierung, wodurch ein Designvorschlag mit der maximalen spezifischen (d. h. volumenbezogenen) Steifigkeit erzeugt wird. [9]

$$f = \frac{V}{ALLWK} \quad (2)$$

Um Designvorschläge zu generieren, die der Beanspruchbarkeit des Materials genügen, wird weiterhin eine Spannungsrestriktion als Randbedingung für die Optimierung implementiert. Dafür wird ein konservatives, dafür aber einfach anzuwendendes Maximalspannungskriterium (siehe Gleichung 3) verwendet, da die Methode den Anspruch hat, bei der initialen Designfindung zu unterstützen und nicht die Detailauslegung vorzunehmen. Die Detailauslegung muss in späteren Entwicklungsphasen durchgeführt werden. [7]

$$1 \geq \max \left\{ \frac{\sigma_I}{-R^c}, \frac{\sigma_{III}}{R^t}, \left| \frac{\sigma_{III} - \sigma_I}{2 \cdot R_{shear}} \right| \right\} \quad (3)$$

Die Potentiale der entwickelten Optimierungsmethode im Vergleich zu einer Designfindung auf Basis isotroper Materialkennwerte wird nachfolgend bewertet. Dazu wird ein beidseitig eingespanntes Demonstratorbauteil verwendet, das mit zwei Druckkörpern belastet (weggesteuerte Verschiebung von 3 mm) wird (siehe Abb. 5).

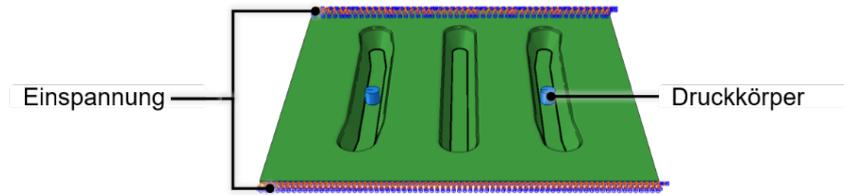


Abb. 5. Demonstratorbauteil inklusive Lasten und Randbedingungen

### 3 Ergebnisse

Zunächst werden in Kapitel 3.1 die Einflüsse des zweistufigen Mappingverfahrens auf die errechneten HBS entlang der y-Achse/Einspannung sowie auf das Sickenmuster (siehe Abb. 4 (b)) untersucht. Anschließend erfolgt in Kapitel 3.2 die Potentialbewertung der entwickelten Sickenoptimierungsmethode anhand der steifigkeitsoptimierten Sickenquerschnitte des Demonstratorbauteils.

#### 3.1 Trajektorienberechnung

In diesem Kapitel wird sowohl der Einfluss einer unterschiedlichen Element- sowie Layeranzahl in Bauteildickenrichtung ausgewertet als auch der Verlauf der HBS zwischen einer Modellierung mit 3D-Elementen mit quadratischen Ansatzfunktionen (C3D20R) und 2D-Shell-Layer mit linearen und quadratischen Ansatzfunktionen (S4 und S8R) verglichen. Für die Simulationen mit 3D-Elementen in Abaqus werden quadratische Ansatzfunktionen verwendet. Dabei dienen die Modelle mit den 3D-Elementen als Vergleichsgrundlage zur Bewertung der Auswirkung der Übersetzung des 3D-Volumenmodells in 2D-Shell-Layup Modelle variierender Layeranzahl über der Bauteildicke.

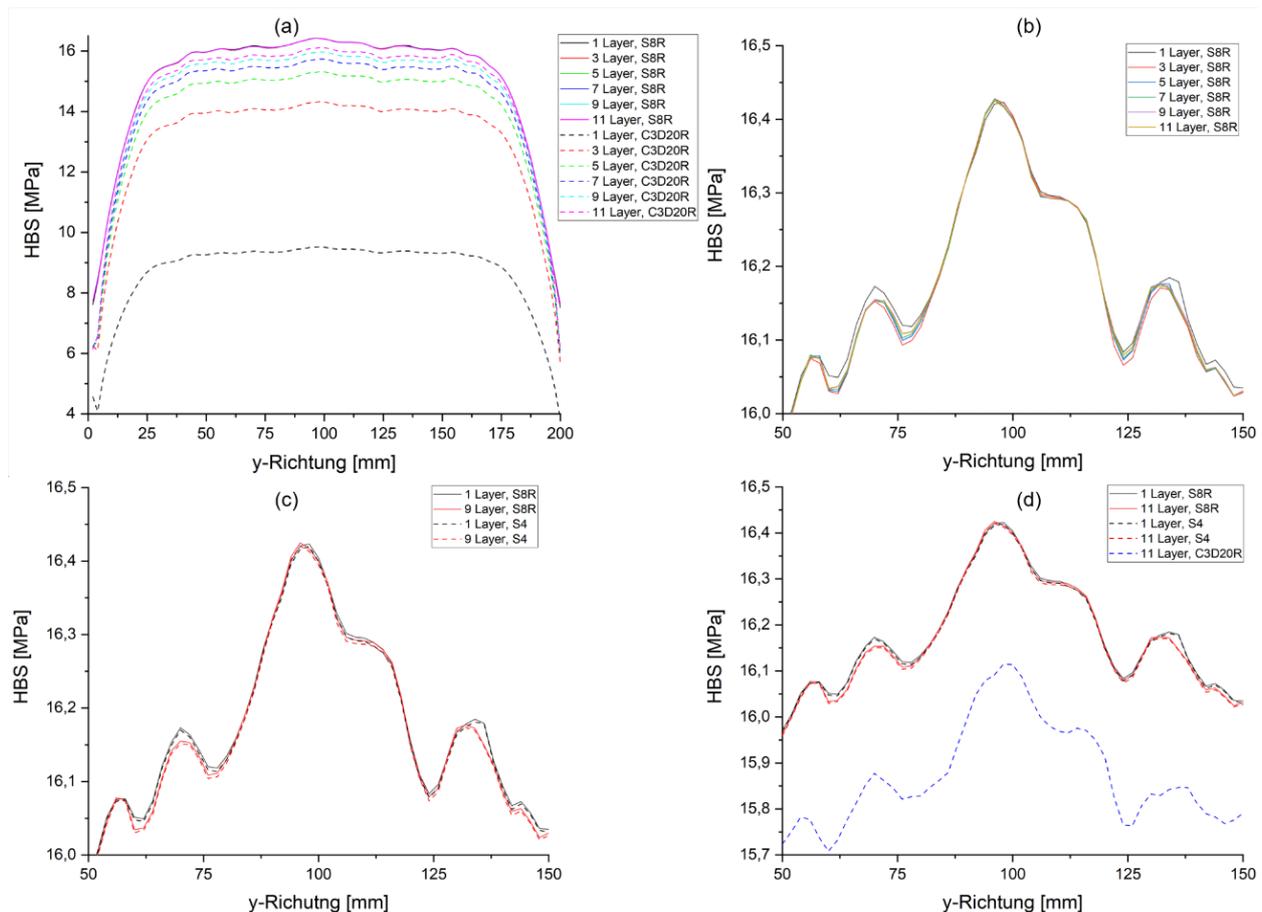


Abb. 6. Errechnete HBS entlang der y-Achse (a) Vergleich unterschiedlicher 3D- und 2D-Dickenmodellierungen (b) 2D-Shell-Layup: quadratische Ansatzfunktionen (c) 2D-Shell-Layup: lineare vs. quadratische Ansatzfunktionen (d) Vergleich der besten 3D- und ausgewählten 2D-Modellierungen nach Revfi et al. [8]

Die auf Basis quadratischer 3D-Volumenelemente ermittelten HBS zeigen mit steigender Elementanzahl über der Bauteildicke höhere Werte an (siehe Abb. 6 (a)). Dies kann durch die Position der Integrationspunkte, in denen die Spannung berechnet wird, in C3D20R-Elementen begründet werden. Je mehr Elementlagen über der Bauteildicke modelliert werden, desto näher liegen die Integrationspunkte, die sich im Inneren der Elemente befinden, an der Bauteiloberfläche. Aufgrund der Lage im Inneren werden sie jedoch nie die durch den Biegelastfall der einseitig eingespannten Platte bewirkten größten Spannungen an der Bauteiloberseite und -unterseite abbilden können. Anders sieht das bei den Shell-Elementen aus, bei denen sich die Integrationspunkte direkt an den Bauteiloberflächen befinden. Deshalb weisen diese eine höhere HBS auf (siehe Abb. 6 (a)). Ebenfalls ist aus Abb. 6 (a) bei einem qualitativen Vergleich zwischen den Ergebnissen der 3D-Volumenelemente (C3D20R) und der Shell-Elemente (S8R), jeweils mit quadratischen Ansatzfunktionen, eine sehr gute Übereinstimmung der HBS-Verläufe ersichtlich. Dies weist darauf hin, dass die Übertragung der Materialeigenschaften aus dem 3D-Volumenmodell in das 2D-Shell-Layup-Modell keinen Einfluss auf die berechneten HBS-Verläufe besitzt. Gleichzeitig fällt in Abb. 6 (a) auch auf, dass bei der 2D-Shell-Modellierung optisch kein Einfluss der Elementanzahl in Bauteildickenrichtung wahrgenommen werden kann. Deshalb wird in Abb. 6 (b) der Bereich zwischen 50 mm und 150 mm detaillierter dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass die HBS für alle Elementanzahlen in Bauteildickenrichtung nahe beieinander liegen. Allerdings ist erst ab der Anzahl von 9 Layer keine optische Veränderung der HBS bei einer weiteren Erhöhung der Layeranzahl mehr erkennbar (Unterschied zwischen 9 und 11 Layer  $<0,022\%$ ). Für eine Verallgemeinerung dieser Beobachtung kann festgehalten werden, dass dies einem 2D-Shell-Layer mehr in Abaqus als die in Moldflow eingestellten Volumenlagen entspricht. In Hinblick auf die Reduktion der Simulationszeit wird außerdem der Einfluss der gewählten Ansatzfunktionen untersucht. In Abb. 6 (c) sind die berechneten HBS für lineare (S4) und quadratische Ansatzfunktionen (S8R) für 1 Layer und 9 Layer dargestellt. Dabei zeigt sich, dass in der vorliegenden Untersuchung lineare Ansatzfunktionen in den Shell-Layups ebenfalls geeignet sind, um den HBS-Verlauf hinreichend gut abzubilden ( $<0,19\%$  Abweichung zu den quadratischen Ansatzfunktionen). Abb. 6 (d) fasst die generierten Erkenntnisse zusammen und veranschaulicht die hohe Übereinstimmung der Layup-Modellierung mit der Modellierung auf Basis von 3D-Volumenelementen. Der Unterschied liegt lediglich im zuvor bereits thematisierten konstanten Offset der Kurven. In Bezug auf die 2D-Shell-Layer-Modellierung lässt sich festhalten, dass sich die Kurven immer weiter annähern, je mehr Layer über die Bauteildicke verwendet werden. [8]

Weiterhin werden im Folgenden die Auswirkungen der unterschiedlichen Shell-Layeranzahlen in Bauteildickenrichtung auf die Trajektorienpositionen und deren Verlauf untersucht. Aufgrund der zuvor gewonnenen Erkenntnisse für den betrachteten Untersuchungsgegenstand der einseitig eingespannten Platte werden lediglich die HBS-Ergebnisse, die auf Basis linearer Ansatzfunktionen erzeugt wurden, verwendet. Aus Abb. 7 (a) ist ersichtlich, dass sich der Verlauf der mittleren Trajektorie zwischen der Modellierung der Bauteildickenrichtung mit 5 Layer und 7 Layer noch ändert. Bei einer weiteren Erhöhung der Layeranzahl auf 9 Layer über die Bauteildicke ist jedoch kein Unterschied mehr erkennbar (siehe Abb. 7 (b)). Daraus lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass die Mindestanzahl an Solid- bzw. Shell-Layer in Abaqus in diesem Fall der einseitig eingespannten Platte um eins niedriger ist als die in Moldflow eingestellte Layeranzahl. An dieser Stelle sei allerdings darauf hingewiesen, dass die Autoren im Rahmen einer Verallgemeinerung aufgrund der Analyse der HBS im Abschnitt zuvor mindestens die gleiche Layeranzahl wie in Moldflow empfehlen. Dadurch können auch bei komplexeren Fließwegen und Lastfällen alle für die Trajektorienberechnung wichtigen Informationen durch das Mapping überführt werden. [8]

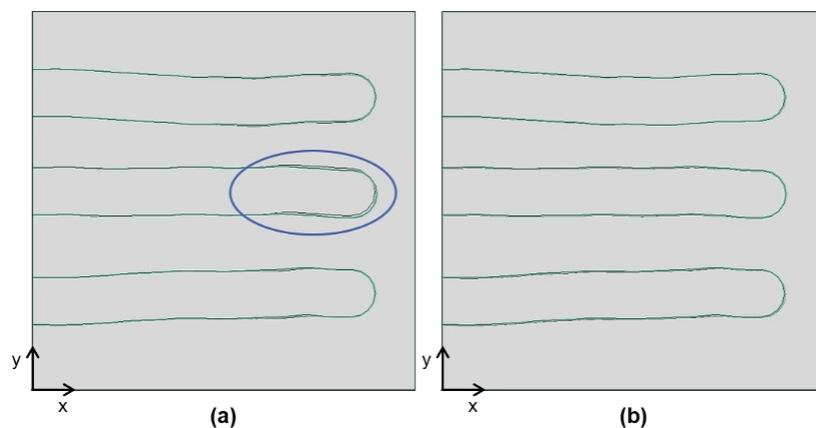


Abb. 7. (a) 5 Layer (schwarz) und 7 Layer (grün) (b) 7 Layer (grün) und 9 Layer (schwarz) nach Revfi et al. [8]

### 3.2 Sickenoptimierung

Nachdem die prozessbasierten Trajektorienverläufe bzw. Sickenmuster verifiziert wurden, wird in diesem Unterkapitel das Potential der entwickelten Sickenoptimierungsmethode für SMC-Bauteile aufgezeigt. Dazu werden die Optimierungsergebnisse für eine isotrope und eine prozessbasierte Materialmodellierung miteinander verglichen, die unter Berücksichtigung einer Spannungsrestriktion erzeugt wurden.

In der Optimierung wurden die Wertebereiche der Sickenparameter gemäß Tab. 1 initialisiert.

Tab. 1. Parameterbereiche für die Sickenoptimierung des Demonstratorbauteils

Parameter	Bereich	Einheit
Sickenhöhe	11-18	mm
Sickenbreite	25-30	mm
Flankenwinkel	70-86	°
Fußradius	2-4	mm
Kopfradius	2-4	mm

Tab. 2 stellt die beiden Optima der jeweiligen Optimierungen vergleichend gegenüber. Die Netze für die anisotrop und die isotrop simulierte Geometrie sind jeweils vollkommen identisch, wodurch die Ergebnisse für die Spannungen element- bzw. netzunabhängig sind. Dadurch können die Ergebnisse direkt miteinander verglichen werden.

Aus dem Vergleich der Optimierungsergebnisse ist ersichtlich, dass sich außer dem Kopfradius alle Werte der Sickenparameter unterscheiden. Der für die Bauteilsteifigkeit maßgeblich relevante Parameter der Sickenhöhe unterscheidet sich um 3 mm.

Tab. 2. Optimierungsergebnisse für das lastgerechte initiale Design des Demonstratorbauteils

Parameter	Werte	
	Isotrope Optimierung	Anisotrope Optimierung
Sickenhöhe	17 mm	14 mm
Sickenbreite	29 mm	28 mm
Flankenwinkel	71°	72°
Fußradius	3 mm	4 mm
Kopfradius	2 mm	2 mm

Der Unterschied der beiden resultierenden steifigkeitsoptimierten Sickenquerschnitte ist zur Visualisierung der Differenzen in Abb. 8 noch einmal grafisch dargestellt. Daraus lässt sich erkennen, dass ein auf Basis isotroper Materialeigenschaften abgeleitetes initiales Design nicht zielführend ist. Die Validität der berechneten Faserorientierungen sowie des strukturmechanischen Bauteilverhaltens konnte in weiteren Untersuchungen gezeigt werden [10]. Dabei wurde deutlich ersichtlich, dass die auf Basis isotroper Materialeigenschaften vorhergesagten Steifigkeiten zu gering ausfallen.

Um Bauteile herstellen zu können, müssen die notwendigen Presswerkzeuge in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses konstruiert werden. Fällt bei der experimentellen Untersuchung erster Prototypen auf, dass Festigkeits- oder Steifigkeitsanforderungen nicht erfüllt werden, wäre eine kosten- und zeitintensive Trial-and-Error Nachbearbeitung des Presswerkzeugs nötig.

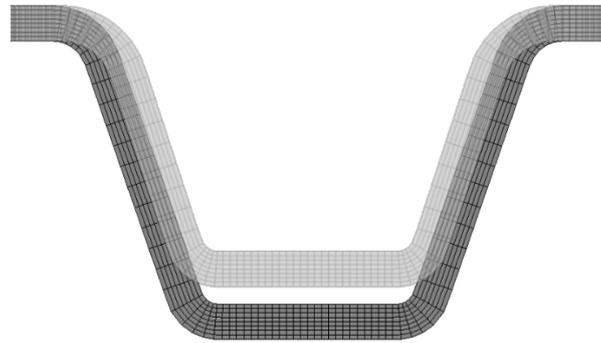


Abb. 8. Optimierte Sickenquerschnitte unter Berücksichtigung der Spannungsrestriktion: isotrop (dunkelgrau) und SMC-prozessbasiert, anisotrop (hellgrau)

#### 4 Fazit und Ausblick

Die im vorliegenden Beitrag vorgestellte prozessbasierte Sickenoptimierung für langfaserverstärkte Kunststoffbauteile beruht auf der Berechnung der im Bauteil vorliegenden HBS und HBSR. Für die Gestaltung von langfaserverstärkten SMC-Bauteilen, deren anisotrope Materialeigenschaften vom Herstellungsprozess abhängen, muss die Optimierung iterativ gekoppelt mit Prozesssimulationen durchgeführt werden. Dafür wurde ein zweistufiges Mappingverfahren entwickelt, welches die aus dem Herstellungsprozess resultierenden Materialeigenschaften auf ein 2D-Shell-Layup-Modell überträgt. Im ersten Teil des vorliegenden Beitrags wurden die Auswirkungen dieses Mappings untersucht. Dabei wurde eine Sensitivität der Trajektorienlage und der berechneten HBS in Abhängigkeit der gewählten Bauteildickenmodellierung aufgezeigt. Deshalb ist es in der Anwendung der Methode wichtig, dass der Produktentwickler die Shell-Layeranzahl in Dickenrichtung bewusst auswählt.

Als weitere Erkenntnis aus der Anwendung der prozessbasierten Sickenoptimierung im zweiten Teil des vorliegenden Beitrags lässt sich festhalten, dass die für ein initiales Design in der frühen Phase der Produktentwicklung gerne verwendete isotrope Materialmodellierung zu erheblichen Abweichungen bei lastfallspezifischen Sickenesigns führt. Ein auf Basis der isotropen Ergebnisse ausgelegtes Presswerkzeug ist im weiteren Verfahren nur durch teure Nachbearbeitung zu optimieren. Eine generelle Aussage bezüglich der Wahl der individuellen Sickenparameter lässt sich dabei nicht treffen. Sie sind jeweils unter Berücksichtigung des Lastfalls, der Prozessrandbedingungen (Initial Charge Geometrie, Initial Charge Position), der sich einstellenden Faserorientierungen etc. zu wählen. Dies macht die entwickelte Methode unabdingbar für die Unterstützung des Produktentwicklers bei der initialen Designfindung versickter SMC-Bauteile.

Zukünftige Forschungsarbeiten widmen sich der Untersuchung anderer Materialsysteme. Für langfaserverstärkte Thermoplaste, bei denen die im Prozess induzierten Eigenspannungen eine nicht vernachlässigbare Rolle spielen, ergeben sich weitere Einflüsse auf den steifigkeitsoptimierten Sickenquerschnitt [9]. Außerdem soll eine kombinierte Sicken-Rippen-Optimierung entwickelt werden, um weiteres Leichtbaupotential heben zu können.

#### Danksagung

Die dokumentierte Forschung wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Internationalen Graduiertenkollegs "Integrated engineering of continuous-discontinuous long fiber reinforced polymer structures" (GRK 2078) gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Förderung.

#### 5 Literatur

- [1] Oehler G., Weber A. (1972). *Steife Blech- und Kunststoffkonstruktionen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Altair Engineering, Inc (2017). *OptiStruct User Guide 2017*.
- [3] Dassault Systèmes (2016). *Simulia User Assistance 2017*. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [4] Albers, A., Weiler, H., Emmrich, D., & Lauber, B. (2005). A new Approach for Optimization of Sheet Metal Components. *Advanced Materials Research*, 6, 255–262.

- [5] Majic N. (2014). Entwicklung einer FEM-basierten Methode zur fertigungsorientierten Sickenmustergestaltung für biegebeanspruchte Tragstrukturen. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung*. ISSN: 1615-8113 (Bd. 80). Karlsruhe.
- [6] Emmrich D. (2004). Entwicklung einer FEM-basierten Methode zur Gestaltung von Sicken für biegebeanspruchte Leitstützstrukturen im Konstruktionsprozess, In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung*. ISSN: 1615-8113 (Bd. 13). Karlsruhe.
- [7] Revfi, S., Mikus, M., Behdinan, K., & Albers, A. (2020). Bead optimization in long fiber reinforced polymer structures: Consideration of anisotropic material properties resulting from the manufacturing process. *Advances in Engineering Software*, 149, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102891>
- [8] Revfi, S., Fünkner, M., Albers, A., & Behdinan, K. (2020). Einfluss der Volumen- und Shell-Dickenmodellierung auf die hauptspannungsbasierte Trajektorienberechnung zur Bestimmung von Sickenverläufen. In *NAFEMS DACH Konferenz* (pp. 98–101). Online-Conference.
- [9] Revfi, S., Mikus, M., Behdinan, K., & Albers, A. (2021). On the bead design in LFT structures: the influence of manufacturing-induced residual stresses. *Design Science*, 7, 1–22. <https://doi.org/10.1017/dsj.2021.4>
- [10] Revfi, S., Albers, A., Meyer, N., Kärger, L., Schöttl, L., Bartkowiak, M. & Behdinan, K. (2021). Manufacturing Simulation of Sheet Molding Compound (SMC). In *NAFEMS World Congress*. Salzburg, Austria: NAFEMS.

# Methodik zur zerstörungsfreien Zustandsermittlung von Getriebekomponenten basierend auf effizienten Lebensdauertests für ein zweites Produktleben

Andreas Kroner (Mercedes-Benz AG / Universität Stuttgart)

Thomas Herzig, Felix Wellhäuser, Dr. Martin Dazer, Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche  
(Universität Stuttgart)

## 1 Abstract

Die Refabrikation von Produkten bietet eine wirtschaftliche und ökologische Alternative für die industrielle Bereitstellung von Ersatzteilen. Hierfür durchlaufen Baugruppen bzw. Aggregate einen industriellen Aufbereitungsprozess, der es ermöglicht, Ersatzteile, die den aktuellen Entwicklungsstand darstellen, mit einem Kostenvorteil gegenüber Neuteilen bereitzustellen.

Innerhalb des Aufbereitungsprozesses ist es erforderlich, den Zustand jeder einzelnen Komponente für ein zweites Produktleben zu ermitteln und zu bewerten. Im aktuellen Stand der Technik durchlaufen alle defekten Produkte, welche als „core“ [1] bezeichnet werden, die folgenden Prozessschritte: Demontage, Reinigung, Prüfen der Komponenten bezüglich Wiederverwendung, Nachbearbeitung, Montage mit geprüften Altteilen oder Neuteilen.

In dieser Arbeit wird ein kombiniertes Bewertungsverfahren vorgestellt, das den gängigen Aufbereitungsprozess von Automatikgetrieben erweitert. Die vorgestellte Methode ermöglicht unter anderem eine prozessunabhängige Bewertung der Bauteile bei gleichzeitiger Reduzierung des Zeit- und Kostenaufwandes. Für diesen Ansatz wird ein datenbasierter Vorsortierungsprozess eingesetzt, der auf Fahrzeug internen CAN-Informationen (Controller Area Network) beruht, die innerhalb der Betriebszeit ermittelt werden.

Der Vorsortierungsprozess basiert auf dem linearen Schadensakkumulationsansatz und ist mit einem automatisierbaren zerstörungsfreien Prüfsystem kombiniert. Dies ermöglicht eine genauere Bestimmung des aktuellen Zustandes der Komponente. Für die Zustandsbestimmung wird ein Kamerasystem zur zerstörungsfreien optischen Bewertung des aktuellen Bauteilzustandes eingesetzt.

Hierfür sind geeignete Bewertungsgrenzen erforderlich, die durch eine effiziente Prüfstrategie, welche unterschiedliche Randbedingungen berücksichtigt, gefunden werden sollen. Die dabei notwendigen Alterungstests werden auf einem Verspannungsprüfstand mit Getrieben durchgeführt, um Grenzen für die Bestimmung des Schädigungsgrades zu definieren. Diese ermittelten Grenzwerte sind für die automatisierte Prüfung innerhalb des Aufbereitungsprozesses notwendig. Durch die Kombination der datenbasierten Vorsortierung und der automatisierten Prüfung kann der gesamte Aufbereitungsprozess im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und die nachgewiesene Lebensdauer für ein zweites Produktleben optimiert werden.

## 2 Einleitung

In den meisten technischen Anwendungen ist die nutzbare Lebensdauer vieler Komponenten durch Alterungsmechanismen begrenzt [1]. Dabei hängt die Alterung, z. B. der Verschleiß, hauptsächlich von der Konstruktion, dem Aufbau der Bauteile, den Betriebsbedingungen und den Umgebungsparametern ab [2]. Dies gilt insbesondere für Fahrzeuggetriebe, da die Nutzungsprofile u. a. aufgrund des weltweiten Einsatzes stark variieren.

Bei Funktionsverlust des Gesamtsystems Getriebe, kann die Ursache meist auf einen einzelnen aufgetretenen Fehler in einer Komponente innerhalb des Getriebes zurückgeführt werden, wie beispielsweise das Versagen eines Zahnrades (serielle Zuverlässigkeitssystemstruktur). Im Fall eines Defektes oder einer Fehlfunktion besteht die Möglichkeit, das vorhandene Aggregat mithilfe gängiger Instandsetzungsmethoden wie der Reparatur, der Grundüberholung oder der Refabrikation (engl. Remanufacturing) wieder in einen funktionsfähigen Zustand zu überführen, oder das gesamte Aggregat durch ein Neuteil zu ersetzen. Der Aufwand und das Ziel der genannten Maßnahmen variieren dabei erheblich. Dabei besitzt die Reparatur das Ziel, den Fehler, der zum Ausfall geführt hat, zu lokalisieren und zu beheben [3]. Die Grundüberholung verfolgt das Ziel, den Fehler zu beheben und dabei alle Verschleißteile zu ersetzen und strebt eine erweiterte Nutzungsdauer des Produktes an [3]. Im Gegenzug hierzu beabsichtigt die Refabrikation, das fehlerhafte Aggregat in einen neuwertigen Produktzustand zu überführen, der zudem den letzten Entwicklungsstand repräsentiert. Hierfür werden standardisierte Prozessschritte angewendet die, verglichen mit Neuteilprozessen, gleichwertige Qualitätssicherungsschritte und Anforderungen vorweisen [4].

Die Refabrikation von Komponenten und Gesamtaggregate stellt folglich eine kosteneffiziente und ökologische Alternative zu üblichen Generalüberholungs- und Reparaturansätzen dar. Ziel ist es dabei, durch die Wiederverwendung von Komponenten Ressourcen zu sparen und durch einen Industrieprozess qualitativ gleichwertige Produkte zu dem jeweiligen Neuteil bereitzustellen. Die Einsparung an Energie und Arbeitsschritten kann dem Kunden dabei durch einen Kostenvorteil weitergegeben werden [1]. Dies gilt gerade in der Formgebung durch energieintensive Fertigungsverfahren bspw. das Gießen und Zerspanen der Gehäuse. Weiterhin bietet die Refabrikation den Vorteil einer hohen Qualitätssicherung im Vergleich zu einer Grundüberholung oder der klassischen Reparatur. Aus diesem Grund kann bei aufbereiteten Produkten durch die Refabrikation eine Gewährleistung auf das gesamte Produkt/Aggregat gegeben werden. Im Gegensatz dazu wird bei einer Reparatur meist nur eine Gewährleistung auf den Reparaturumfang gegeben. Daher ist es notwendig den aktuellen Zustand der eingesetzten Komponenten zu kennen.

Innerhalb des Refabrikationsprozesses (Abbildung 1) werden defekte Produkte (sog. "Cores" [1]) in Zusammenarbeit mit Werkstätten und Händlern aus dem Feld gesammelt und zu zentralen Aufbereitungsstandorten gesendet. Um hierbei dem Kunden ein Ersatzteil ohne längere Wartezeiten bereitstellen zu können, wird über ein Pfandsystem das defekte Getriebe durch ein wiederaufbereitetes Getriebe aus dem Refabrikationsprozess ersetzt. Als Rückläufer des beschriebenen Pfandsystems kommen die gesammelten Cores in einem unbekanntem technischen Zustand an einem der Aufbereitungsstandorte an und durchlaufen die wesentlichen Prozessschritte: Demontage, Reinigung, Prüfen (Zustandsbestimmung auf Bauteil- oder Komponentenebene), Aufbereitung sowie Montage. Der Prozessschritt "Prüfen" ist hierbei von zentraler Bedeutung. Da erst innerhalb des Prozessschrittes „Prüfen“ der Zustand der Komponente festgestellt werden kann und in die Kategorien „Wiederverwendung“ (guter Zustand) oder „Recycling“ (schlechter Zustand) einsortiert wird. Demnach findet innerhalb dieses Prozessschrittes die größtmögliche Wertschöpfung des Refabrikationsprozesses statt, da alle Komponenten bis zu diesem Schritt nur ihren eigenen Schrottwert besitzen und erst bei positiver Bewertung (Kategorie: „Wiederverwendung“) einen geminderten Neuteilwert zugeschrieben bekommen. Der systematische Ablauf des Refabrikationsprozesses ist in Abbildung 1 dargestellt.

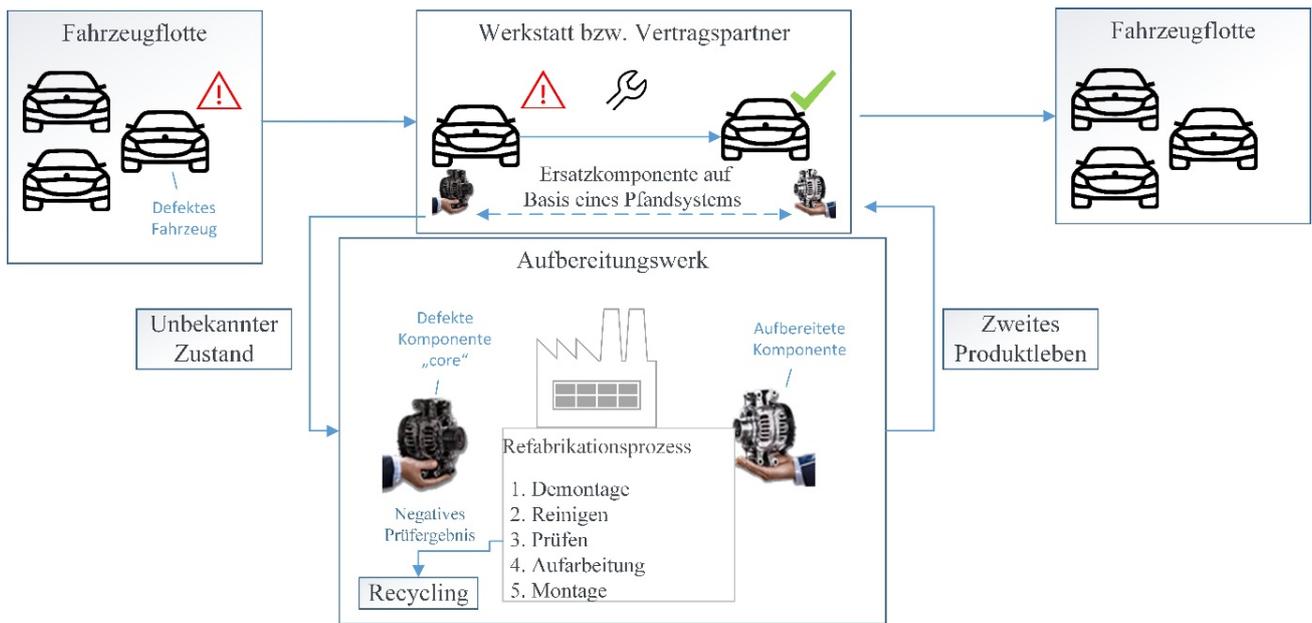


Abb. 1 Stand der Technik des Vereinfachter "Core"-Zyklus mit den zentralen Schritten in der Wiederaufbereitung. [5]

Nach Stand der Technik durchläuft jedes Core den Wiederaufbereitungsprozess, so dass viele Komponenten nach den zeit- und kostenintensiven Prozessschritten „Demontage“, „Reinigen“ und „Prüfen“ recycelt werden. In dieser Arbeit wird eine Methodik vorgestellt, welche den beschriebenen Refabrikationsprozess auf zwei Arten optimiert. Zum einen wird eine datenbasierte Bewertung der betrachteten Komponenten in einer Vorsortierung implementiert. Des Weiteren wird eine automatisierte zerstörungsfreie Prüfung, welche geeignete Grenzwerte benötigt, in den bestehenden Aufbereitungsprozess integriert, siehe Abbildung 2

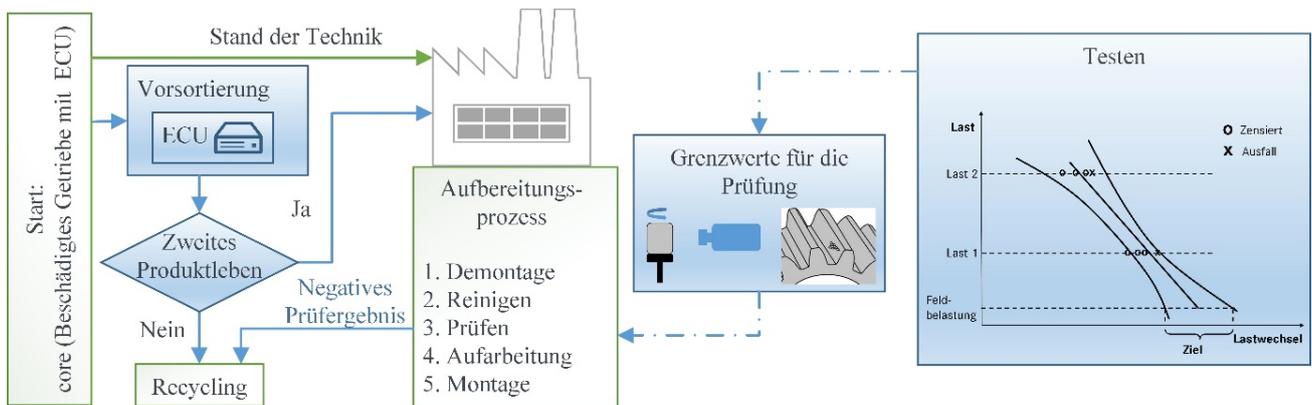


Abb. 2 Erweiterter Wiederaufbereitungsprozess mit Vorsortierung und zerstörungsfreier Prüfung mit einem Kamerasystem unter Verwendung generierter Prüfergebnisse.

Diese Methodik soll am Beispiel der Planetenräder des Automatikgetriebes „9G-Tronic“ von der Mercedes-Benz AG angewendet werden, da diese Komponenten in hoher Stückzahl produziert werden und der Produktionsprozess der Planeten hinsichtlich Qualität und Prozessstreuung optimiert wurde. Hieraus folgt die Annahme, dass der Herstellungsprozess nur einen geringfügigen Einfluss auf die späteren Schadensbilder aufweist.

In einem ersten Schritt wird auf die datenbasierte Vorsortierung der Cores eingegangen. Automatische PKW-Getriebe besitzen eine elektrische Steuereinheit („electronic control unit“, ECU), welche in das fahrzeugeigene Steuergerätenetzwerk integriert ist. In diesem können Informationen und Anforderungen vom gesamten Antriebsstrang, wie das Motordrehmoment, Motorabtriebsdrehzahl und aktuelle Wellendrehzahlen mit Hilfe von

Bordnetz-Signalen wie den CAN-Signalen ausgetauscht werden [6]. Basierend auf dem Ansatz der linearen Schadensakkumulation ist das Getriebesteuergerät in der Lage, eine betriebspunktabhängige Schadenszahl für jeden Gang zu ermitteln. Basierend auf dem Ansatz nach Kroner [5] kann eine zahnradspezifische Schädigung bestimmt werden. Wird die so bestimmte Schadenszahl mit weiteren Informationen wie z. B. der Laufleistung im Vorsortierprozess korreliert, gelingt es, den aktuellen Zustand der Komponenten innerhalb des „Core“ abzuschätzen. Basierend auf dieser Prognose wird eine Empfehlung gegeben, ob das Getriebe recycelt oder dem Wiederaufbereitungsprozess zugeführt werden soll. Dadurch bereits können frühzeitig, vor „Demontage“ und „Reinigung“ Getriebe aussortiert werden. Getriebe mit einer sehr hohen Laufleistung in Kombination mit einer hohen berechneten Schadenszahl, durchlaufen somit keinen Schritt des Aufbereitungsprozesses.

Der zweite Schritt der Methode stellt eine Optimierung innerhalb des Prozessschrittes „Prüfen“ durch eine zerstörungsfreie optische Zustandsbewertung dar. Die aktuelle Prüfung der Planeten basiert auf einer visuellen und damit subjektiven Bewertung eines Mitarbeiters und ist daher aufgrund der hohen Anzahl Komponenten in einem Getriebe zeit- und kostenintensiv. Der neuartige Ansatz hingegen verwendet zur Auswertung der Zahnradoberflächen ein Kamerasystem mit Auswertalgorithmus, welches eine automatisierte Beurteilung und Bewertung von Oberflächenschäden ermöglicht. Dies wird durch die Kenntnisse aus der datenbasierten Vorsortierung unterstützt, welche die ermittelte Belastungshistorie berücksichtigt. Für diesen zweiten Schritt des Ansatzes werden geeignete Grenzwerte benötigt, die eine automatisierte Auswertung der Bauteile mit Hilfe des Kamerasystems ermöglichen. Um das Alterungsverhalten der betrachteten Planeten besser zu verstehen und zu bewerten, sind gezielte Alterungstests notwendig. So können die Beanspruchungshistorien der Oberflächen ermittelt und die Belastungen mit den detektierten Schadensbildern korreliert werden.

Für eine genauere Abschätzung der aufgetretenen Belastungen werden gezielt erzeugte Oberflächenmuster definierter Schädigung mit bekannten Belastungen in Bezug gesetzt. Da die Alterungstests mit dem kompletten Getriebe durchgeführt werden sollen, ist es nicht möglich, die Oberflächen der Planeten während eines Testlaufs zu bewerten. Eine hierfür notwendige Demontage des Getriebes ist nicht möglich, da eine exakte Wiederherstellung des Originalzustandes (Positionierung der Komponenten) nach der Messung der Oberflächen nicht sichergestellt werden kann, ohne Einfluss auf den Alterungsprozess zu nehmen. Daher werden während des Prüflaufs geeignete Messgrößen wie Drehmoment, Drehzahl, Lastwechsel und Körperschallsignale während des Prüflaufs überwacht. Mit Hilfe dieser Eingangsgrößen soll ein virtueller Sensor gebildet werden, der eine Abschätzung des aktuellen Zustands der Planeten in Abhängigkeit von der am Prüfstand bekannten Belastungshistorie im Betrieb ermöglicht.

### 3 Methodik

Die in dieser Arbeit angewandte Methodik zur Festlegung der Grenzwerte für eine optische Prüfung der betrachteten Planeten gliedert sich in folgende Schritte:

1. Ableitung der Versuchsumgebung und Bestimmung der Prüfparameter für gezielte Alterungstests
2. Durchführung der geplanten Alterungsversuche
3. Auswertung der Versuche
4. Visuelle Bewertung der Zahnflankenflächen
5. Ableitung einer zerstörungsfreien Zustandsbewertung infolge der Korrelation von Oberflächenstrukturen und der Belastungshistorie

#### 3.1 Ableitung der Versuchsumgebung und Bestimmung der Prüfparameter für gezielte Alterungstests

Der in dieser Arbeit verwendete Prüfstands Aufbau stellt eine Inline-Anordnung dar, worin das untersuchte Getriebe (9G-Tronic) zwischen der elektrischen Antriebs- und Abtriebsmaschine eingespannt und gezielt belastet werden kann. Das genannte Getriebe besitzt vier Planetensätze mit jeweils vier Planetenrädern, welche durch unterschiedliche Verschaltungen verschiedene Kraftfluss-Kombinationen innerhalb des Getriebes ermöglichen und dadurch neun Vorwärtsgänge und einen Rückwärtsgang bereitstellen. Im Rahmen der Versuche wird der 8. Gang (Übersetzungsverhältnis  $i = 0,717$ ) ausgewählt, da hier lediglich ein Planetensatz lastübertragend im Eingriff ist und dadurch wenige Störgrößen zu erwarten sind.

Der verwendete Prüfstands Aufbau, bestehend aus An- und Abtriebsmaschine, Ausgleichkupplungen sowie einer Sicherheitskupplung, schränkt den möglichen Versuchsraum ein. Eine weitere Einschränkung ergibt sich durch den Prüfling selbst, welcher ein maximal zulässiges übertragbares Antriebsmoment besitzt. Zudem muss die begrenzte Anzahl an Prüflingen berücksichtigt werden, da das komplette Getriebe für die Versuche verwendet wird und nicht nur die betrachtete Zahnradstufe. Dies führt zu erhöhten Prüflingskosten. Alle relevanten Daten sind in Tabelle 1 aufgeführt und ergeben den möglichen Parameterraum.

Tab. 1: Parameterraum möglicher Betriebspunkte

	Antriebs- maschine	Ausgleichs- kupplung	Getriebe	Ausgleichs- kupplung	Überlast- kupplung	Abtriebs- maschine
Drehzahl	8000 1/min	7300 1/min	6000 1/min	5100 1/min	4500 1/min	8000 1/min
Drehmoment	704 Nm	1000 Nm	700 Nm	1000 Nm	1100 Nm	1484 Nm

Basierend auf dem definierten Parameterraum und der DIN 3990 [7] können Lastpunkte errechnet werden, die einerseits das erwünschte Schadensbild „Pitting“ erzeugen und gleichzeitig unerwünschte Schädigungen wie Zahnbruch und Fressen ausschließen. Unter Berücksichtigung der Prüfdauer und den damit verbundenen Prüfkosten sind optimale repräsentative Laststufen festzulegen.

Abhängig von den oben genannten Randbedingungen werden zwei Lastpunkte definiert. Ein möglichst hoher Lastpunkt, welcher nahe dem zulässigen Eingangsdrehmoment des Getriebes liegt, besitzt die folgenden Parameter:

- Drehzahl Antriebsmaschine: 2150 1/min
- Drehmoment Antriebsmaschine: 92% des maximalen Getriebeeingangsmoments

Dieser Lastpunkt ermöglicht kurze Prüfdauern sowie einen Erkenntnisgewinn, welcher für die Festlegung des zweiten Lastpunktes genutzt wird. Der zweite Lastpunkt ist charakterisiert durch eine niedrigere Belastung, welche sich durch ein geringeres Antriebsdrehmoment darstellt. Mit Hilfe dieses zweiten Lastpunktes kann ein Lebensdauermodell interpoliert werden. Basierend auf den definierten Lastpunkten und dem Lebensdauermodell werden die Erkenntnisse auf niedrigere Lasten (Feldlast) extrapoliert.

Der zweite gewählte (niedrigere) Lastpunkt besitzt die folgenden Parameter:

- Drehzahl Antriebsmaschine: 2150 1/min
- Drehmoment Antriebsmaschine: 78% des maximalen Getriebeeingangsmoments

Infolge der geringeren Belastung durch das abgesenkte Eingangsdrehmoment resultiert ein Anstieg der Prüfdauer um den Faktor 2,7.

Die gewählte Versuchsplanung sieht vor, die Prüfläufe bei den gewählten Lastpunkten zu unterschiedlichen Schadens- bzw. Alterungszuständen der Planeten zu beenden. Dabei kann die Lastwechselzahl der Planeten nur als Anhaltspunkt genutzt werden, da sie keinen direkten Rückschluss auf den Zustand der Planeten zulässt. Bei den ersten Prüfläufen ist ein höherer Grad an Schädigung der betrachteten Bauteile anzustreben, um Grenzdrehzahlen zunächst abschätzen zu können. Die weiteren Prüfläufe, die auf dem identischen Lastniveau durchgeführt werden, können aufgrund der gewählten Überwachungsgrößen bei Detektion geringerer Schädigung im virtuellen Sensor abgebrochen werden. Dies ermöglicht das synthetische Erzeugen von unterschiedlichen Schadensbildern zur Charakterisierung von Zuständen.

### 3.2 Durchführung der geplanten Alterungsversuche

Um während den Versuchen die benötigten Zustandsinformationen über die Planeten zu erlangen und den virtuellen Sensor zu erstellen, werden zusätzlich drei Beschleunigungssensoren an den untersuchten Getrieben angebracht (siehe Abbildung 3) und die Zahnräder über einen definierten Einlaufzyklus belastet. Dieser umfasst zwei Stunden, bestehend aus zwei Drehzahlstufen und fünf Drehmomentstufen. Der entsprechende systematische Ablauf ist in Abbildung 4 dargestellt. Ziel des Einlaufzyklus ist es, die fertigungsbedingten Rauheitsspitzen einzuebnen und die Zahnradpaare aufeinander einlaufen zu lassen. Dies führt zu einer homogeneren Kontaktfläche der Zahnflanken zu Beginn der Versuche und erhöht dadurch die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse. Nach dem absolvierten Einlaufzyklus werden die Lastpunkte angefahren und auf Basis der gewählten Überwachungsgrößen gezielt beendet.

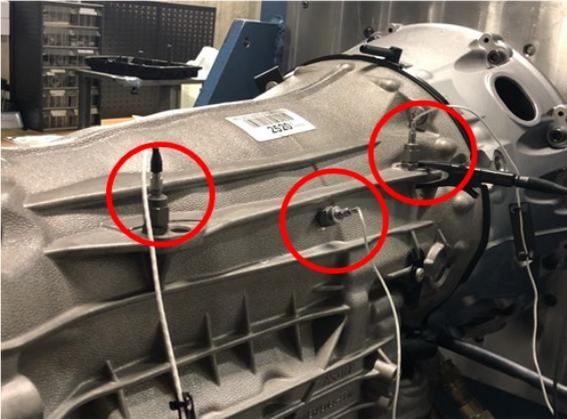


Abb. 3: Prüfling mit Körperschallsensoren

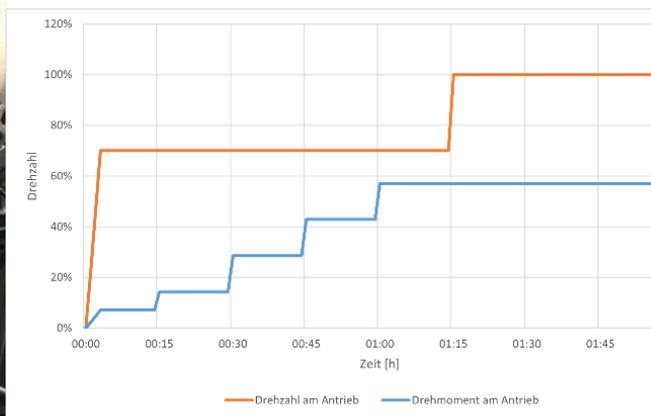


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf des Einlaufzyklus

### 3.3 Auswertung der Versuche

Bis heute sind drei Getriebe auf dem ersten Lastpunkt getestet worden. Hierbei wurden 40 bis ca. 42 Millionen Lastwechsel an der Getriebeeingangswelle erreicht. Zudem konnte ein systematischer Verlauf der festgelegten Überwachungsgrenzen ermittelt werden. Während der Einlaufphase besitzt das Körperschallsignal der Sensoren einen undefinierten Signalverlauf. Dieser stabilisiert sich nach kurzer Zeit und die Körperschallsignale nehmen reproduzierbar nach dem Anfahren des Lastpunktes stetig ab. Die Abnahme der Körperschallsignale kann auf ein Einlaufen der Verzahnungen zurückgeführt werden. Nach höheren Laufzeiten weist die Kurve einen Tiefpunkt auf, ab welchem die Körperschallsignale ansteigen. Dieses Verhalten konnte bei allen Prüfläufen festgestellt werden. Der systematische Kurvenverlauf dient als Indikator des internen Zustandes der Planeten und ist in Abbildung 5 dargestellt.

#### Schematischer Verlauf des Körperschallsignals

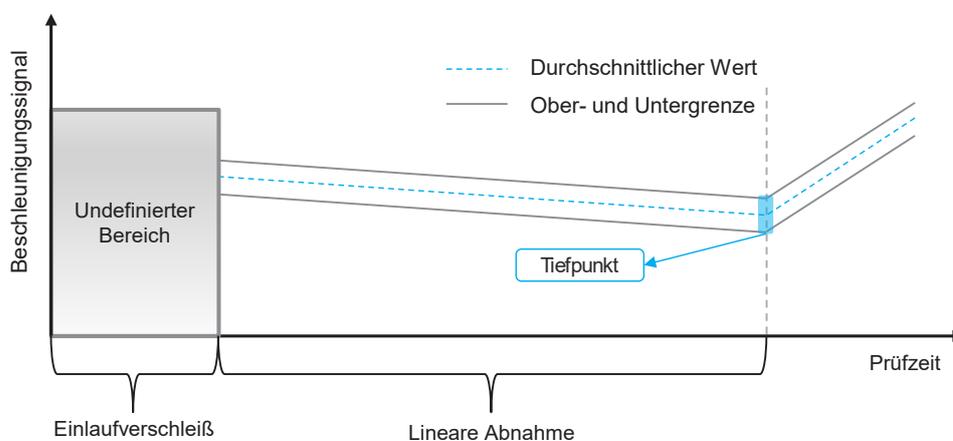


Abb. 5: Schematischer Verlauf des Körperschallsignals

#### Getriebe 1:

Der Prüflauf von Getriebe 1 wurde aufgrund einer Spitze im Körperschallsignal abgebrochen. Zuvor folgten die Signale der Beschleunigungsaufnehmer dem schematischen aufgezeigten Verlauf. Bis zum Zeitpunkt der Abschaltung des Prüflaufes, stieg das Schwingungssignal um 84%, bezogen auf den Tiefpunkt der Funktion an.

#### Getriebe 2:

Der Prüflauf von Getriebe 2 wurde planmäßig beendet nachdem, bezogen auf den Tiefpunkt der Funktion, ein Anstieg des Körperschallsignals um 30% vorlag.

#### Getriebe 3:

Der Prüflauf von Getriebe 3 wurde planmäßig beendet nachdem, bezogen auf den Tiefpunkt der Funktion, ein Anstieg des Körperschallsignals um 17% vorlag.

Eine Zusammenfassung der durchgeführten Prüfstandsversuche ist mit den ermittelten Messwerten für die Getriebe 1 bis 3 in Tabelle 2 angegeben.

Tab. 2: Messwerte der drei Prüfläufe

Prüfling	Lastwechsel Eingangswelle	Lastwechsel bis Minimum	Änderung Schwingungssignal	Bemerkung
Getriebe 1	40 411 301	18 739 301	84%	Inbetriebnahme, Ausfall durch Lagerschaden
Getriebe 2	40 425 786	37 587 786	30%	Abschaltung: 22 h nach Erreichen des Tiefpunkts des Körperschallsignals
Getriebe 3	42 331 353	40 331 853	17%	Abschaltung: 15,5 h nach Erreichen des Tiefpunkts des Körperschallsignals

### 3.4 Visuelle Bewertung der Zahnflankenflächen

Die visuelle Befundung der Planeten erfolgt nach der Demontage des Getriebes und der Entnahme der einzelnen Planeten. Dabei werden die nachfolgenden Bewertungskriterien betrachtet:

- Pitting
- Mikropitting (Ausprägung der Oberflächenrauigkeit)
- Beschädigung der Zahnflankenoberfläche (Mikropitting)
- Beschädigung der äußeren Zahnflankenfläche am Auslauf der Planeten

Die Bewertung der Planeten erfolgte anhand der angegebenen Kriterien mit Hilfe von vier Klassen. Die Merkmale Pitting und Mikropitting werden durch die Klassen „keine“, „schwach“, „mittel“ und „stark“ beschrieben. Die Klassen für die beiden flächenbezogenen Merkmale sind folgendermaßen definiert: „unter 50%“, „zwischen 50% und 75%“, „zwischen 75% und 90%“ und „über 90%“ der Fläche. Ein beispielhaft bewerteter Zahn ist in Abbildung 6 mit den vier Bewertungskriterien abgebildet.



Abb. 6: Bewerteter Zahn von Planet 4 aus Getriebe 3 mit der folgenden Klassifizierung: Pitting, schwach; Mikropitting, mittel; Beschädigung Oberfläche der Zahnflanke, zwischen 50% und 75%; Beschädigung Oberfläche der äußeren Zahnflanke, zwischen 50% und 75%

Die visuelle Bewertung von Getriebe 1 zeigt Lagerschäden der Planeten. Hierbei weisen zwei der demontierten Nadellager Grübchenschäden auf. Die beiden anderen Lager wurden vollständig zerstört. Dies erklärt das frühe Minimum des Körperschallsignals im Vergleich zu Getriebe 2 und 3 und den plötzlichen Anstieg, welcher zum Abbruch des ersten Versuches führte. Außerdem weisen die Planetenbolzen aufgrund der Lagerschäden Einlaufspuren auf, was infolgedessen zum Verkippen der Planeten und zu einem geänderten Wälzpunkt geführt hat. Resultierend daraus haben die Planeten einen überproportionalen Verschleiß erfahren. Folglich ist der Ausfall des Getriebes 1 auf einen anderen Fehlermechanismus zurückzuführen, was gesondert berücksichtigt werden muss. Desweiteren muss berücksichtigt werden, dass mit diesem Getriebe Inbetriebnahme- und Resonanztests durchgeführt wurden. Aufgrund der Vorversuche ist eine mögliche Vorschädigung der Lager nicht auszuschließen. Der Schwerpunkt der optischen Bewertung liegt daher auf den Getrieben 2 und 3, bei welchen der Prüflauf bewusst frühzeitig beendet wurde.

Für die Auswertung wurden alle Zahnflanken der Planeten, der vier Planetensätze der Getriebe 2 und 3 betrachtet. Die Schadensmechanismen Pitting und Mikropitting zeigen vergleichbare Schadensbilder und

unterscheiden sich nicht innerhalb der eingeführten Klassen der betrachteten Zahnflanken. Im Gegensatz hierzu konnte ein Unterschied bei den flächenbezogenen Bewertungskriterien der Getriebe 2 und 3 festgestellt werden, siehe Abbildung 7. Erwartungsgemäß, aufgrund des geringen Anstieg des Körperschallsignals, zeigt das Getriebe 3 eine hohe Anzahl an gering beschädigten Zahnflanken. Insgesamt befinden sich 69% der Zahnflanken in den Klassen < 50% und 50-70%. Auffällig ist, dass trotz der geringeren Zunahme des Körperschallsignals des Getriebes 3, im Vergleich zu Getriebe 2, 13% der 104 Zahnflanken, Flächenschäden der Klasse > 90% aufweisen und 18% der Klasse 75%-90%. Eine genauere Betrachtung der einzelnen Planeten legt offen, dass 78% der geschädigten Zahnflanken der Klasse > 90%, sich auf dem Planet 1 befinden. Die Mehrzahl der geschädigten Zahnflanken der Klasse 75%-90% befindet sich auf dem Planeten 3. Eine genauere Darstellung der Verteilung der Schäden des dritten Getriebes ist in Abbildung 8 dargestellt.

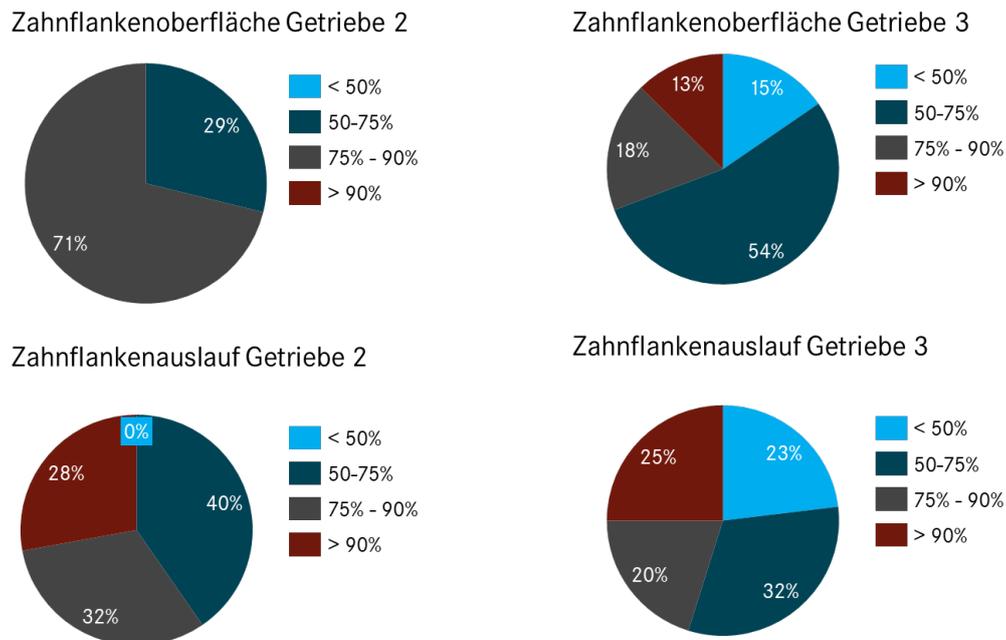


Abb. 7: Überblick über die Ergebnisse der visuellen Auswertung: Klassifizierung der geschädigten Oberfläche der Planetenzahnflanken von Getriebe 2 und 3

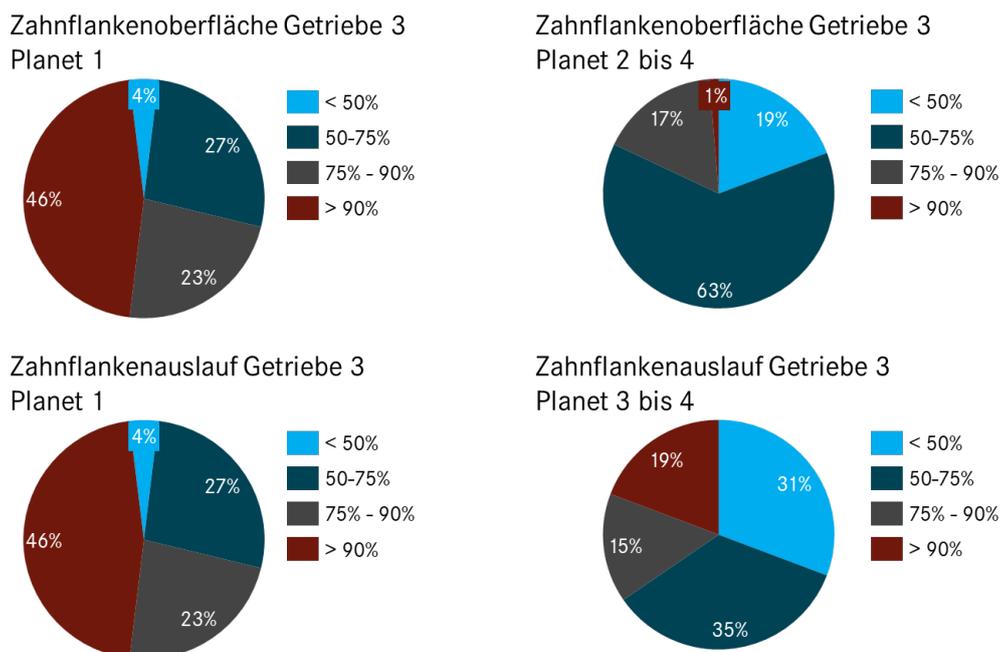


Abb. 8: Überblick über die Ergebnisse der visuellen Auswertung von Getriebe 3: Klassifizierung der beschädigten Oberfläche der unterschiedlichen Planeten

#### 4 Ableitung einer zerstörungsfreien Zustandsbewertung infolge der Korrelation von Oberflächenstrukturen und der Belastungshistorie

Die Auswertung der Körperschallsignale und die visuelle Bewertung der Planeten bestätigen einen direkten Zusammenhang zwischen den gemessenen Körperschallcharakteristika und der Anzahl an Lastwechseln. Ein Anstieg des Körperschallsignals von ca. +15%, bezogen auf den individuellen Tiefpunkt, führt zu einer Vergrößerung der Mikropittingfläche um bis zu 25%. Aufgrund des gewählten hohen Momentes des ersten Lastpunktes, bezogen auf die zulässige Belastungsgrenze des Getriebes, werden die Zahnflanken am Zahnaustritt stärker geschädigt.

Darüber hinaus weisen die untersuchten Planeten nach mehr als 40 Millionen Lastwechseln an der Antriebswelle nur kleine einzelne Pittings mit einer durchschnittlichen Größe von 0,01 mm<sup>2</sup> bei dem gewählten Lastpunkt auf. Des Weiteren konnten Einlaufgrübchen über die gesamte Zahnflankenfläche verteilt festgestellt werden. Diese Grübchen entstehen bereits in der Einlaufphase und wachsen während der Betriebszeit nicht weiter an. Werden die gewonnenen Erkenntnisse auf Kundengetriebe, welche unter Feldbelastung gealtert sind, übertragen, können nachfolgende Annahmen abgeleitet werden. Es ist davon auszugehen, dass Planeten, die eine geringe Belastung erfahren haben und eine hohe Laufleistung (Abwälzvorgänge) aufweisen, in der Mitte der Zahnflanken Mikropitting von bis zu 50% der Zahnflankenfläche aufweisen. Durch den zu Beginn stattfindenden Einlaufprozess werden jedoch über die gesamte Flanke geringe Pittingschäden erwartet. Die zweite Annahme bezieht sich auf die Planeten von Getrieben, welche hohe Drehmomente über einen längeren Zeitraum erfahren haben, wie sie z. B. bei schwerem Anhängerbetrieb auftreten. Diese Planeten weisen Schäden an der äußeren Zahnflanke und große Bereiche (über 50%) mit Mikropitting auf. Diese Bereiche breiten sich je nach Alterungszustand aus der Mitte in Richtung Zahnkopf und Zahnfuß auf der Zahnflanke aus. Gleichermaßen wachsen die Grübchen über die Dauer der Belastung an und unterscheiden sich von den Grübchen durch den Einlaufprozess durch ihre Größe.

#### 5 Fazit

Der berechnete Lastpunkt erzeugt die gewünschten Schadensbilder. Dabei konnten bisher drei Getriebe auf einem hohen Lastpunkt gealtert werden. Das Getriebe 1 fiel aufgrund von Nadellagerschäden an den Planetenbolzen aus. Die Prüfläufe der Getriebe 2 und 3 wurden, bezogen auf den Tiefpunkt des entsprechenden Körperschallsignals, nach einem Anstieg von 17% bzw. 30% planmäßig beendet. Die Befundung der Planeten weist eine direkte Abhängigkeit der Oberflächenschädigung der einzelnen Planeten von den Messgrößen auf. Anhand der Oberflächenschädigung im Bereich der Zahnflanken kann auf die Belastung der Planeten geschlossen werden und somit auf den Zustand des jeweiligen Planeten. Die Erkenntnisse des höheren Lastpunktes werden auf die darunterliegende Stufe übertragen. Diese ermöglichen eine präzisere Abschätzung des Abbruchkriteriums und führt zu einer Optimierung der Prüfzeit durch das gewonnene Ermüdungsverhalten der Planeten, was geringere Prüfkosten auf dem unteren Lastpunkt ermöglicht.

Die gewonnenen Erkenntnisse können auf das Kamerasystem zur Bewertung der Planeten übertragen werden. Die Belastungshistorie dieser Planeten wird hierfür aus den Steuergerätedaten der Getriebe abgeleitet. Stichproben, die mit dem Kamerasystem an Planetenrädern aus Kundengetrieben durchgeführt wurden, zeigen die erwarteten Schadensbilder und wurden mithilfe der gewonnenen Schädigungsparameter erkannt. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die zu erwartenden Schäden, wie leichte Mikropittingschäden der Klasse 1 (> 50%), welche bei hoher Laufleistung und geringer Belastung auftreten. Zudem zeigen diese Planeten keine Ermüdungserscheinungen am Zahnflankenauslauf auf.

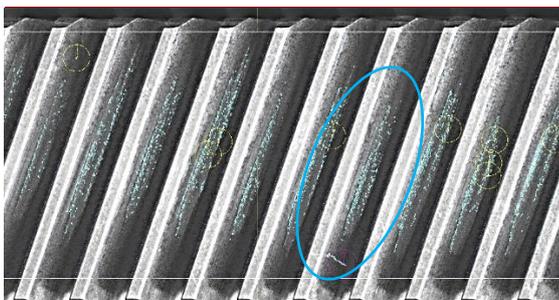


Abb. 9: Planetenrad eines Getriebes mit einer Laufleistung von über 200.000km und geringen Schadenswerten, automatische Kameraaufnahme

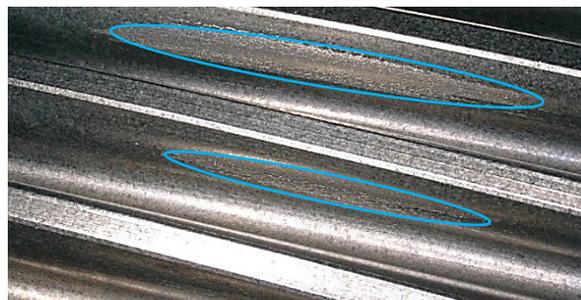


Abb. 10: Zeigt den markierten Bereich aus Abbildung 9 mit Mikropitting an zwei Zahnflanken des Planetenrads, manuelle Mikroskopaufnahme

## 6 Ausblick

In weiteren Prüfläufen ist unter anderem ein Versuch mit einem zusätzlichen Getriebe auf dem hohen Lastpunkt angesetzt. Das Abschalten dieses Prüflaufes erfolgt geplant vor Erreichen des Tiefpunktes. Dies entspricht, abhängig von der Charakteristik der Körperschallkurve, einer Lastwechselzahl zwischen 35 und 38 Millionen. Darauf folgen Prüfläufe auf dem zweiten (niedrigen) Lastpunkt mit einem verringerten Eingangsdrehmoment mit weiteren Getrieben. Infolgedessen wird ein möglicher Einfluss der Belastung auf die Fehlergröße und Schadenshöhe, insbesondere bei Pitting, untersucht. Als weiteres Bewertungskriterium soll die Oberflächenrauheit der Zahnflanken vermessen werden. Aus der Korrelation mit den Erkenntnissen und Befunden von Feldrückläufen resultiert die Ableitung von Grenzwerten für eine automatisierte Bewertung. Hierdurch gelingt es, den wertschöpfenden Prozessschritt „Prüfen“ durch die Implementierung eines automatisierten Kamerasystems effizienter zu gestalten und dadurch die Wirtschaftlichkeit des gesamten Aufbereitungsprozesses zu erhöhen.

## 7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein kombiniertes Bewertungsverfahren vorgestellt, das den gängigen Aufbereitungsprozess von Automatikgetrieben erweitert. Die vorgestellte Methode stützt sich dabei auf einem datenbasierten Vorsortierungsprozess [5] und eine automatisierte zerstörungsfreie Prüfung. Diese ermöglicht unter anderem eine prozessunabhängige Bewertung der Bauteile bei gleichzeitiger Reduzierung des Zeit- und Kostenaufwandes innerhalb des Aufbereitungsprozesses von Automatikgetrieben. Die Kombination eines datenbasierten Vorsortierungsprozesses mit einem optischen zerstörungsfreien Prüfsystem, welches zur Zustandsbewertung der betrachteten Planeten eingesetzt wird, bietet den größtmöglichen Nutzen hinsichtlich Zustandsprognose und Wirtschaftlichkeit.

Die für dieses Vorgehen benötigten Modellparameter und Grenzwerte werden aus effizienten Lebensdauertests ermittelt. Hierfür wurde eine geeignete Prüfumgebung definiert, Lastpunkte bestimmt und Abbruchkriterien definiert. Für die Überwachung der Prüfläufe wurde ein Virtueller Sensor mithilfe von Messgrößen gebildet, der eine Zustandsüberwachung der untersuchten Planeten während den Testläufen ermöglicht. Auf Basis der durchgeführten Alterungstests auf dem gewählten hohen Lastpunkt war es möglich, erste Grenzwerte für das automatisierte Kamerasystem abzuleiten, sowie den datenbasierten Vorsortierungsprozess weiter zu optimieren.

Eine erste Zustandsbewertung auf Basis der gewonnenen Ergebnisse von im Feld gealterten Planeten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der mikroskopischen Validierung.

## 8 Literatur

- [1] Steinhilper, Rolf. Remanufacturing - The ultimate form of recycling, Stuttgart 1998, p. 40-56.
- [2] Bertsche Bernd. Reliability in Automotive and Mechanical Engineering – Determination of Component and System Reliability. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [3] DIN EN 13306: 2019-02, Maintenance terminology
- [4] Lange, Ulrike: Kurzanalyse Nr. 18: Ressourceneffizienz durch Remanufacturing
- [5] Kroner, Andreas: Prediction of the remaining useful life of transmission components within a remanufacturing process to ensure the second product life. Proceedings IRF2020: 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure. pp. 825-832.
- [6] Foulard S, Rinderknecht S, Ichchou M.: Real-time and on-line lifetime monitoring system for automotive transmissions Application to a manual transmission. The 14th IFToMM Word Congress, Taipei, Taiwan (Oct.) 2015.
- [7] DIN EN 3990: 12-1987 Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern

### Autoren

- M. Sc. Andreas Kroner, Versuchsingenieur, Abteilung: Hydraulische Getriebesteuerungen, Mercedes-Benz AG, 70546 Stuttgart, Deutschland, [andreas.a.kroner@daimler.com](mailto:andreas.a.kroner@daimler.com)  
Doktorand, Bereich Antriebstechnik, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, [andreas.kroner@ima.uni-stuttgart.de](mailto:andreas.kroner@ima.uni-stuttgart.de)
- M. Sc. Thomas Herzig, Doktorand, Bereich Zuverlässigkeitstechnik, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, [thomas.herzig@ima.uni-stuttgart.de](mailto:thomas.herzig@ima.uni-stuttgart.de)
- B. Sc. Felix Wellhäuser, Wissenschaftliche Hilfskraft, Bereich Antriebstechnik, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart [st143286@stud.uni-stuttgart.de](mailto:st143286@stud.uni-stuttgart.de)
- Dr. Martin Dazer, Bereichsleiter Zuverlässigkeits- und Antriebstechnik, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, [martin.dazer@ima.uni-stuttgart.de](mailto:martin.dazer@ima.uni-stuttgart.de)
- Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Institutsleiter, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, 0711-685-66170, [bernd.bertsche@ima.uni-stuttgart.de](mailto:bernd.bertsche@ima.uni-stuttgart.de)

# Einsatz maschineller Lernverfahren zum Model-Updating von FEM Modellen in der Vibroakustik

T. Gohlke, M. Bopp, M. Behrendt, A. Albers (KIT-IPEK)

N. Wagner (INTES mbH)

S. Slavetinsky (Renumics GmbH)

## 1 Zusammenfassung

Schwingungsanalysen und die Strukturodynamik sind ein wichtiger Bestandteil des Produktentwicklungsprozesses und sowohl für akustische und komfortbezogene Fragen als auch für sicherheitskritische Überlegungen relevant. Da solche Messungen meist sehr zeitaufwändig sind und nur von erfahrenen Ingenieur\*innen durchgeführt werden können, besteht das Bestreben, diese Untersuchungen so weit wie möglich in die Simulation zu verlagern. Jedoch rechnen Simulationen in der Regel mit perfekten geometrischen Modellen, wohingegen reale Bauteile Abweichungen aufweisen, die z.B. durch den Herstellungsprozess verursacht werden. Je nach Bauteil können bereits kleine Abweichungen einen großen Einfluss auf das dynamische Systemverhalten und damit auch auf die Dauerfestigkeit und Lebensdauer haben. Damit die Simulation realistische Ergebnisse liefert, ist es daher notwendig, die Simulationsmodelle an die realen Bauteile anzupassen. Die Erstellung und Anpassung solcher Modelle ist jedoch sehr zeitaufwändig: Basierend auf umfangreichen Messungen sind für diese Kalibrierung viel Fachwissen, ein hoher manueller Aufwand und viele Simulationsdurchläufe notwendig.

Im Projekt „VibroAI“ wird ein neuartiger, auf maschinellem Lernen (ML) basierender Ansatz zur Optimierung von Simulationsmodellen im Bereich der Schwingungsanalyse umgesetzt: Mittels ML-basierter Ähnlichkeitsanalyse werden zu untersuchende Messdaten analysiert, abstrahiert und mit einer Datenbank bestehender Mess- und Simulationsdaten verglichen. Als Ergebnis liefert der Algorithmus Aussagen über ähnliche Messungen in der Vergangenheit sowie über erkannte Abweichungen und Vorschläge zur Anpassung des Simulationsmodells. Dies können z.B. geometrische Abweichungen oder Abweichungen von Materialparametern wie Elastizitätsmodul oder Dichte sein, da diese z.B. von der Qualität des Rohmaterials abhängen und im realen Prozess variieren können.

Gleichzeitig ermöglicht dieser Ansatz neben der beabsichtigten Analyse des Bauteils auch eine Plausibilitätsanalyse der Messung selbst. Systematische Abweichungen von früheren Messungen, Ausreißer einzelner Messpunkte oder falsch zugeordnete Kanäle können automatisch erkannt werden. Im realen Entwicklungsprozess stellt dies eine nicht zu unterschätzende Fehlerquelle dar, da akustische und strukturdynamische Messungen oft mehrere Dutzend Messpunkte in mehreren Raumrichtungen aufweisen, die manuell eingerichtet und zugeordnet werden müssen. Durch die Vereinfachung der Messauswertung und die schnellere Erstellung von Simulationsmodellen können die zu entwickelnden Methoden die Entwicklungszyklen in vielen Branchen stark verkürzen. Darüber hinaus können entsprechende Modelle zukünftig auch in der vorausschauenden Instandhaltung eingesetzt werden.

Zentrales Ergebnis des Projekts wird ein Technologiedemonstrator sein, der ohne vertieftes Simulations- und ML-Wissen angewendet werden kann. Langfristiges Ziel des Ansatzes ist es, die Schwingungsanalyse im Ingenieuralltag bei der Plausibilitätsprüfung von Messergebnissen, beim Abgleich von Messdaten und Simulationsmodellen sowie bei der Fehleranalyse und Modelloptimierung zu unterstützen.

## 2 Projektansatz - Vorgehensweise

Der vorgesehene Arbeitsablauf der Methode ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Zunächst werden die Demonstratorbauteile konstruiert, gefertigt und geometrisch vermessen. Die Teile weisen bewusst einige kleine geometrische Abweichungen auf, um eine breite Datenbasis zu schaffen. Parallel dazu werden Simulationsmodelle für die Demonstratorbauteile erstellt. Durch Mesh-Morphing der Simulationsmodelle ist es ebenfalls möglich, umfangreiche Varianten mit geometrischen Abweichungen zu erzeugen. Anschließend werden Trainingsdaten für das maschinelle Lernen generiert. Dafür werden die Demonstratoren mit einem 3D Laser-Scanning-Vibrometer (*Polytec PSV-400*) experimentell, sowie die Simulationsmodelle numerisch untersucht. Die Messdaten werden darauffolgend in *PolyWave*, ebenfalls von Polytec, verarbeitet, um die modalen Parameter und Modenformen zu erhalten. Die Ergebnisse aus den experimentellen und den Simulationsdaten werden dann abgeglichen und nach Defekttypen geordnet. Anschließend wird ein neuronales Netz mit den verarbeiteten Daten trainiert, um die Auswirkungen bestimmter geometrischer Abweichungen zu erkennen.

Als Ergebnis erhält der Anwender eine Visualisierung der Ähnlichkeitsanalyse der komplexen 3D-Daten, Aussagen über die Gesamtplausibilität der Daten sowie einen Vorschlag, welche Art von Abweichung im Bauteil vorliegt und wie das Simulationsmodell angepasst werden sollte.

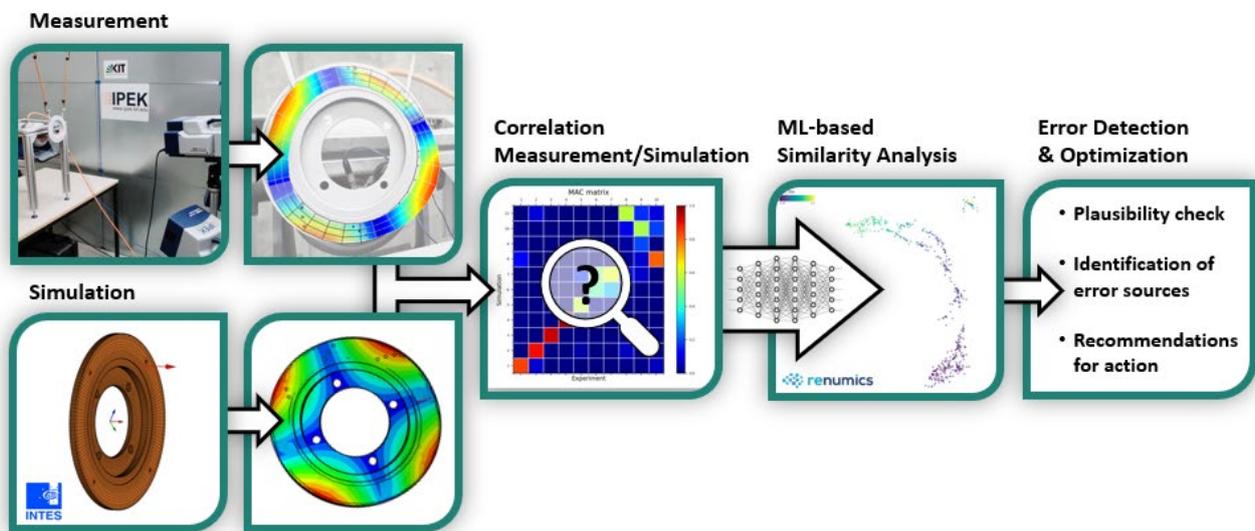


Abb. 1: Prinzipielles Flussdiagramm der VibroAI-Methode

## 3 Demonstratorgestaltung und Messaufbau

### 3.1 Demonstratorgestaltung

Als Demonstratorbauteil wurde eine Bremsscheibe gewählt. Sie ist leicht herzustellen und das modale Verhalten solcher Geometrien ist gut erforscht. Die endgültige Gestaltung ist in Abbildung 2 dargestellt; die Scheibe hat vier Bohrungen im inneren Ring und bis zu acht mal drei Bohrungen im äußeren Ring. Die symmetrische Form ermöglicht ein effizientes Simulationsmodell mit Viertelschnitten. Insgesamt gibt es 4 verschiedene Varianten mit zunehmender Anzahl von Bohrungen und unterschiedlichen Bohrungsdurchmessern.

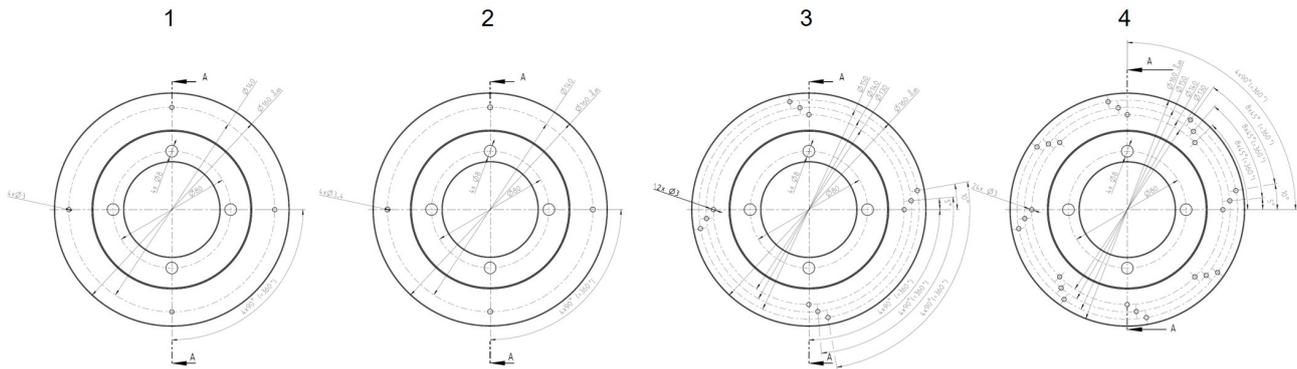


Abb. 2: Bremsscheiben-Varianten für die experimentelle Modalanalyse  
 1: 4x1 Bohrungen  $\varnothing$  3,0 mm, 2: 4x1 Bohrungen  $\varnothing$  3,4 mm,  
 3: 4x3 Bohrungen  $\varnothing$  3,0 mm, 4: 8x3 Bohrungen  $\varnothing$  3,0 mm

### 3.2 Aufbau der Messungen

Für die experimentelle Analyse der Demonstratoren wurden diese mit Hilfe eines 3D Laser-Scanning-Vibrometers untersucht. Die einzelnen Bremsscheiben wurden elastisch und frei an der Decke des Raumes aufgehängt. Um Spiegelungen an den metallischen Oberflächen der Bremsscheiben zu reduzieren und die Reflektivität zu verbessern, wurden sie gleichmäßig und fein mit einem weißen Partikelspray besprüht. Auf der Rückseite der Scheiben erfolgt die Anregung über einen Shaker. Als Anregungssignal wurde hierfür pseudo-random Rauschen verwendet. Die einzelnen Scanpunkte wurden gleichmäßig auf dem Außenring verteilt. Abbildung 3 zeigt den Messaufbau, eine vorbereitete und montierte Bremsscheibe und den Anregungspunkt mit Impedanzmesskopf auf der Rückseite.

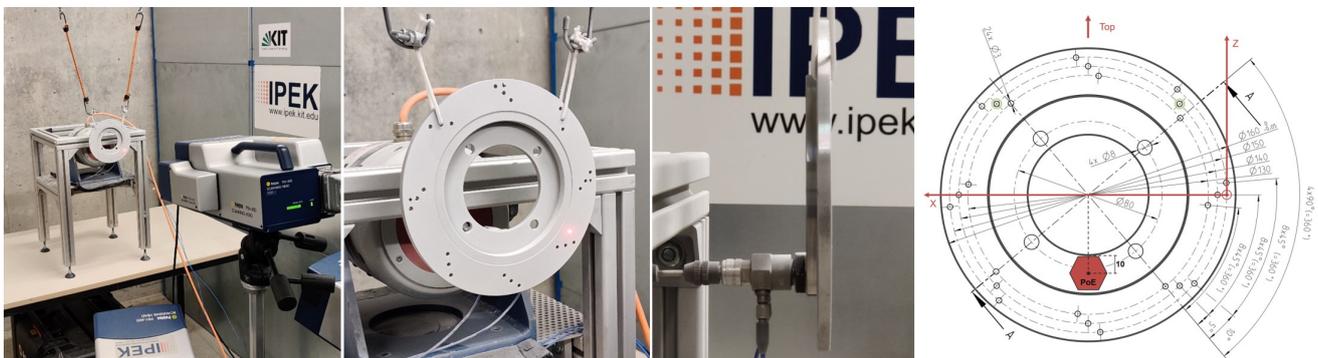


Abb. 3: links: Messaufbau mit dem PSV, Mitte links: eingerichtete Bremsscheibe, Mitte rechts/ rechts: Anregungspunkt (rot)

### 3.3 Modalanalyse

Die Messdaten wurden im Folgeschritt mit der Modalanalysesoftware PolyWave analysiert, um die modalen Parameter und Eigenvektoren zu erhalten. Hierfür wurde ein AI-verbesserter Poly-Reference Least-Square Complex Frequency-Domain Estimator (Poly-LSCF-AI) verwendet. Doppelmoden wurden in der Simulation identifiziert (Vgl. Abbildung 5) und in der Software im Detail analysiert. Die Ergebnisse wurden dann als Universal-Datei exportiert, die zur weiteren Verarbeitung, zum Vergleich mit der Simulation und als Eingabedaten für die ML-basierte Ähnlichkeitsanalyse verwendet werden kann.

#### 4 Simulation – Finite-Elemente-Analyse

Aus den vier verfügbaren CAD-Geometrievarianten wurden im ersten Schritt Finite-Elemente-Modelle erstellt. Abbildung 4 zeigt links ein Beispiel für ein Finite-Elemente-Modell, in Abbildung 5 ist eine doppelte Mode mit 45° gedrehten Knotenlinien dargestellt. Auf dem Umfang des Außenrings der Bremsscheibe sind 8x3 Bohrungen verteilt, während sich auf dem Innenring vier Bohrungen befinden. Es handelt sich also nicht um eine zyklisch symmetrische Struktur [1]. Für die Diskretisierung der Bremsscheibe wurde ein strukturiertes Netz mit 149056 Hexaederelementen und acht Knoten verwendet. Eine harmonische Kraft wurde über einen Shaker durch eine Platte auf der Rückseite der Bremsscheibe aufgebracht. Die Platte wurde mit 4608 tetraedrischen Elementen zweiter Ordnung vernetzt. Die Kopplung zwischen der Bremsscheibe und der Platte erfolgte über inkompatible MPCs, d.h. \$MPC ISURFACE. Für dieses System wurde eine Modalanalyse unter frei-frei Randbedingungen durchgeführt.

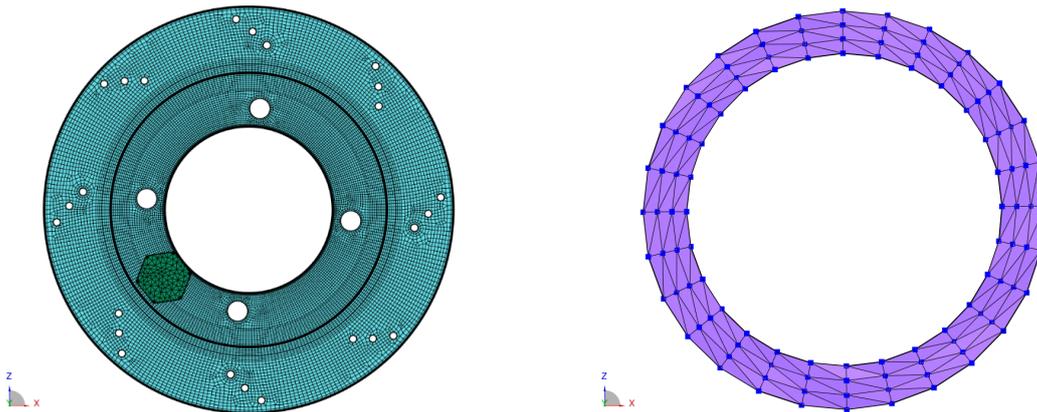


Abb. 4: links: Netz der Variante 8x3, rechts: Modell der Messpunkte

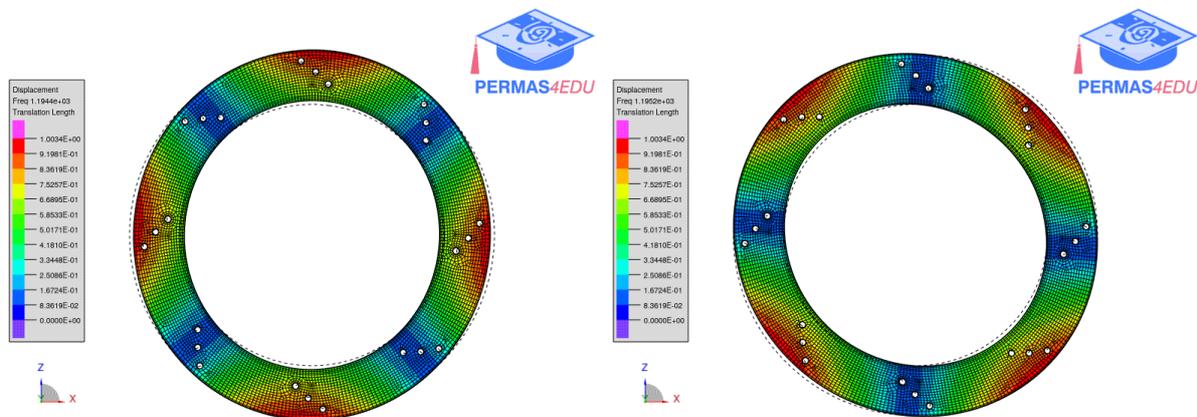


Abb. 5: Modenformen in der FEM Simulation

In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse über das User Control Interface (.uci) mit Hilfe der erweiterten Schnittstelle zum IDEAS Universal File Format (.unv, .uff) importiert. Derzeit unterstützt die Schnittstelle (d.h. READ EMA = <measurement.unv>) die Datensätze 55 (Normalmoden), 82 (Trace Lines), 15 und 2411 (Knotenpunktkoordinaten) und 2412 (Dreiecks- und Viereckselemente). Mess- und Simulationsdaten liegen oft in unterschiedlichen Einheitensystemen vor. Mit dem Schalter PARAM EMA SCALE = 1000 ist es z.B. möglich, das Meter-Modell in ein Millimeter-Modell umzuwandeln. Zur Integration des Messmodells in das Finite-Elemente-Modell bietet VisPER [2] den sogenannten Add & Replace Wizard. Dieser Assistent ermöglicht die nahtlose Integration des Messmodells. Die in Abbildung 4 rechts durch blaue Kreise dargestellten Messpunkte (z.B. Datensatz 15/2411) sind in der Regel nicht deckungsgleich mit den Knoten des Finite-Elemente-Modells. Aus diesem Grund wurden deshalb die Messpunkte über inkompatible MPCs in das

Finite-Elemente-Modell eingekoppelt. Der Datensatz 2412 wird in PERMAS [3] in PLOTA3-Elemente umgewandelt.

Anschließend kann die MAC-Matrix (Abbildung 6) direkt in PERMAS berechnet werden. Ein Python-Skript erzeugt über den erweiterten Python-Interpreter pyINTES eine grafische Visualisierung der MAC-Matrix und den Export in eine Excel-Datei. Die MAC-Matrix ist ein Maß für die Korrelation zwischen den Eigenmoden aus der experimentellen (EMA) und numerischen Modalanalyse (NMA). Sie ist in der Regel eine diagonal dominante Matrix, wenn eine gute Übereinstimmung vorliegt. Der Wertebereich der Matrixeinträge liegt zwischen Null und Eins. Je höher der Wert, desto größer ist die Ähnlichkeit. Natürlich gibt es Diskrepanzen zwischen den Eigenfrequenzen und Eigenformen zwischen der experimentellen und der numerischen Modalanalyse. Ein Vergleich der Eigenfrequenzen ist in Tabelle 1 dargestellt.

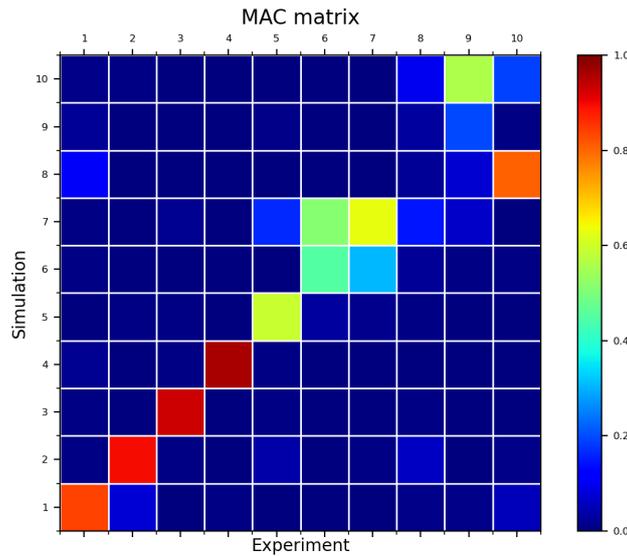


Abb. 6: MAC Matrix der 8x3 Bremsschreibe ohne Optimierung

Tab. 1: Eigenfrequenzen

Natural frequency $f_i$	EMA [Hz]	NMA [Hz]
1	1.20036E+03	1.20002E+03
2	1.22860E+03	1.20057E+03
3	3.10329E+03	3.13065E+03
4	3.09231E+03	3.13279E+03
5	3.48209E+03	3.49637E+03
6	4.41367E+03	4.44994E+03
7	4.45784E+03	4.49533E+03
8	5.19926E+03	5.36747E+03
9	5.37358E+03	5.44843E+03
10	5.41647E+03	5.49784E+03

Die in PERMAS vollständig integrierten Optimierungsmöglichkeiten ermöglichen die Anpassung von physikalischen Parametern wie Dichte und E-Modul, sowie von Formparametern, die sich aus geometrischen Abweichungen von der Zielgeometrie ergeben, durch Model-Updating [4]. In der vorliegenden Arbeit wird ein neuer Ansatz verfolgt, der sich zunächst auf geometrische Abweichungen des Finite-Elemente-Modells konzentriert.

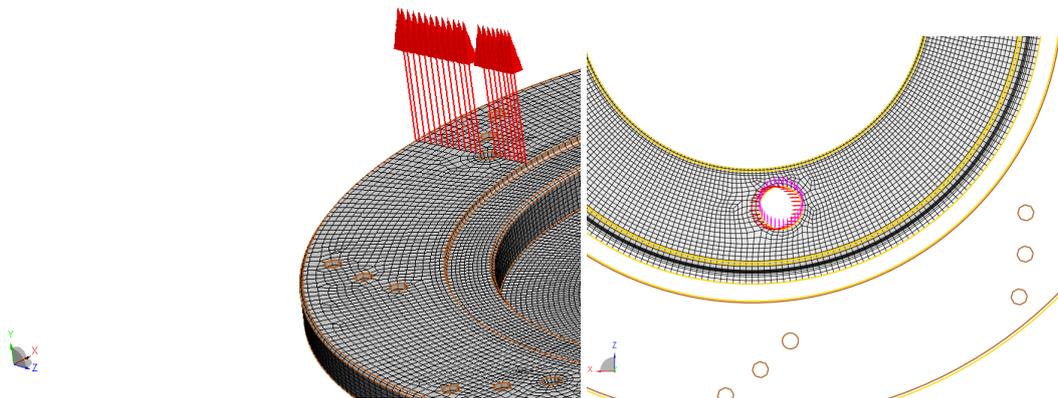


Abb. 7: Shape Basis Vektoren – links: Dickenvariation, rechts: Position eines Bohrlochs

Mit Hilfe des Shape Wizards in VisPER werden die geometrischen Abweichungen beschrieben. So werden z.B. die Positionen der 4 inneren Löcher, die Radien und die Dicke der Bremsscheibe durch sogenannte Shape-Basis-Vektoren beschrieben, siehe Abbildung 7. Dieses Mesh-Morphing-Verfahren hat den Vorteil, dass sich die Topologie des Finite-Elemente-Modells, d. h. die Anzahl der Elemente und Knoten, nicht ändert. Dadurch entfällt die Notwendigkeit einer erneuten Vernetzung. Die einzige Einschränkung ist die Qualität der Elemente, die sich natürlich durch die Verzerrung des Netzes ändert. Die Fertigungstoleranzen liegen jedoch in einem Bereich, der diesen Ansatz rechtfertigt. Mit der Anzahl der Entwurfsvariablen steigt die Anzahl der möglichen Parameterkombinationen exponentiell an. Um die Anzahl der möglichen Parameterkombinationen zu reduzieren, können Abhängigkeiten zwischen den Designvariablen durch Designvariablenverknüpfung hergestellt werden. Das sogenannte Sampling-Verfahren in PERMAS, das die numerische Modalanalyse für die Parametervariationen sequentiell durchführt, hat auch die Möglichkeit, einen Latin Hypercube zu verwenden (d.h. SAMPLING METHOD = LHC NSAMPLES = 1000).

So kann die Anzahl der möglichen Kombinationen auch auf eine benutzerdefinierte Anzahl von Analysen beschränkt werden. Für jede einzelne Analyse wird ein reduziertes Post-Processing-Modell im hdf-Format [5] exportiert. Dazu werden auf der Messfläche (d.h. dem Außenring der Bremsscheibe) sogenannte PLOTA-Elemente definiert. Für die Weiterverarbeitung der Daten stellt Renumics eine Python-Schnittstelle zur Verfügung, die die Daten verarbeitet.

## 5 Ansatz für das maschinelle Lernen – Architektur

Um effizient Simulationsergebnisse bzw. Messungen untereinander oder mit einer vorhandenen Datenbasis an Simulationsergebnissen oder Messungen vergleichen zu können, wird eine maschineninterpretierbare Distanzmetrik benötigt. Idealerweise kann man die Ähnlichkeit zwischen zwei Proben unter Berücksichtigung verschiedener Merkmale, wie bspw. geometrische Merkmale, oder skalare oder zeitaufgelöste Messdaten, messen. Die daraus resultierende Ähnlichkeitsmetrik kann dann verwendet werden, um vorhandenes Wissen abzufragen, indem ähnliche Fälle identifiziert werden, die bereits früher verarbeitet oder gemessen wurden, oder um eine große Datenmenge in Clustern ähnlicher Fälle zu organisieren.

Im Projekt VibroAI wird eine viel beachtete und sich schnell entwickelnde Unterfamilie von tiefen neuronalen Netzen, so genannte Autoencoder-Netze, verwendet. Ein Hauptmerkmal von Autoencoder-Netzwerken ist, dass sie nicht auf gelabelte Trainingsdaten angewiesen sind, um ihre Aufgabe zu erfüllen. Sie können effiziente Datenkodierungen für Daten aus verschiedenen Modalitäten erstellen, die die domänenspezifischen Merkmale der Daten beschreiben, während sie lernen, Rauschen in den Eingabedaten zu ignorieren.

Ein Autoencoder ist in der Regel ein sanduhrförmiger Graph, der aus einem kodierenden und einem dekodierenden Teil besteht. Der Kodierer wird darauf trainiert, seine Eingabe zu reproduzieren, indem er sie aus der Kodierung eines gleichzeitig trainierten Kodierers rekonstruiert. Indem der Autoencoder gezwungen wird, seine Informationen durch eine reduzierte Repräsentation zu leiten, die oft als „Bottleneck“ bezeichnet wird, muss er eine Beschreibung der wichtigsten Merkmale der bereitgestellten Daten lernen, um seine Eingabe reproduzieren zu können. Nach dem Training wird der Dekodiereteil des Autoencoders verworfen und der Kodiereteil

wird verwendet, um aussagekräftige Beschreibungen von Daten aus verschiedenen Datenquellen zu erzeugen. Um eine Beschreibung aus mehreren unterschiedlichen Datenquellen zu erstellen, können die von verschiedenen Encodern erzeugten Kodierungen miteinander verknüpft werden und so mehrere Modalitäten in einem maschineninterpretierbaren Deskriptor kombinieren. Es gibt viele Erweiterungen der ursprünglichen Autoencoder-Architektur, die den Encoder dazu zu zwingen, ähnliche Eingabedaten in "nahe" Kodierungen zu kodieren und somit eine maschineninterpretierbare Distanzmetrik zu ermöglichen, die die menschliche Wahrnehmung von "ähnlichen" Datenproben nachahmt. Eine solche Erweiterung ist der Variational Autoencoder [6].

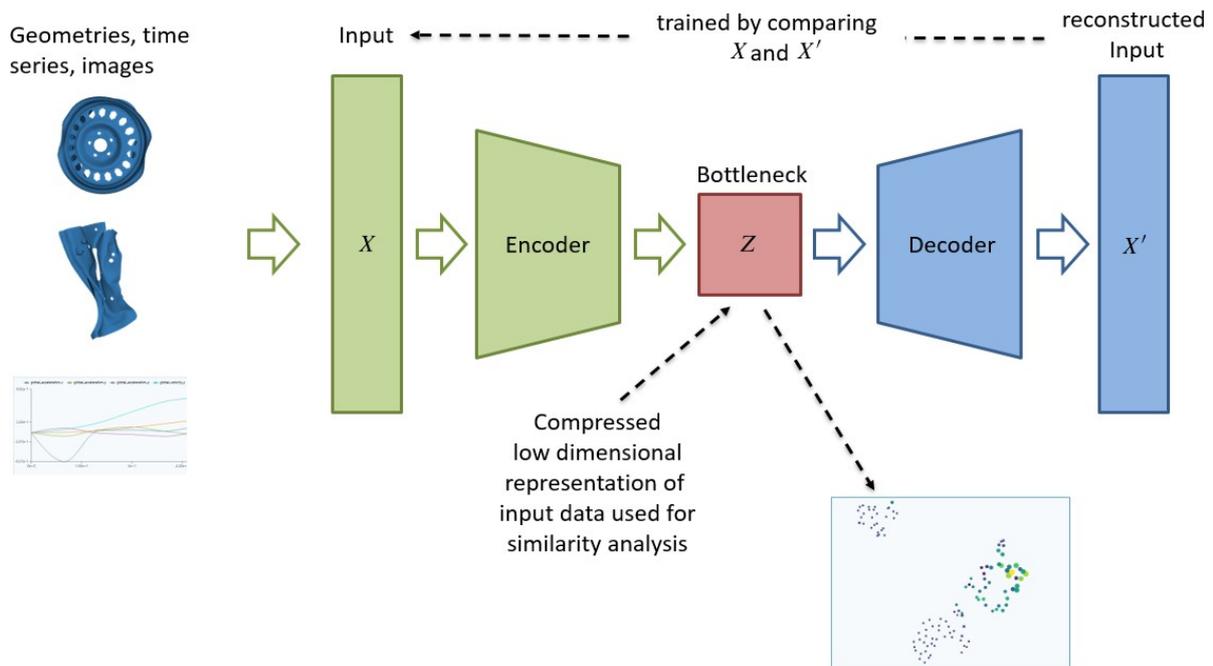


Abb. 8: Architektur für Autoencoder Training

Die ersten Experimente in VibroAI werden an einer 2D-Darstellung der schwingenden Bremsscheibe durchgeführt, um einen ersten Eindruck von den verschiedenen Clustern in den simulierten und gemessenen Daten zu erhalten. Weitere Schritte zur Verbesserung der Deskriptoren der bereitgestellten Daten werden den Vergleich von Kodierungen über verschiedene Modalitäten und deren Kombinationen beinhalten. Die Identifizierung aussagekräftiger Eingabemodalitäten und der besten Autocodierungsarchitektur ist ein manueller und interaktiver Prozess, bei dem die Ingenieur\*in für maschinelles Lernen verschiedene Kombinationen von Codierungen bewertet, um den Deskriptor zu ermitteln, der das vorliegende Problem am besten löst. Die generierten Kodierungen können auf eine zweidimensionale Karte projiziert werden, die es der Ingenieur\*in ermöglicht, die Leistung des Netzwerks bei der Beschreibung der präsentierten Daten in einer Weise zu beurteilen, die der gewünschten nachgelagerten Aufgabe entspricht. Dieser Schritt wird in Renomics Spotlight durchgeführt, wo beliebige Kombinationen von Beschreibungen für verschiedene Modalitäten aus verschiedenen Netzwerken automatisch auf eine zweidimensionale Ähnlichkeitskarte projiziert werden und interaktiv erkundet und im Detail bewertet werden können, wodurch ein tiefgreifender Einblick in den Datensatz und die Potenziale der Netzwerke ermöglicht wird.

Die Dimensionsreduktion erfolgt mittels UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection [7]), einer Reduktionsmethode, die sich sehr gut für die Visualisierung von Ähnlichkeiten eignet.

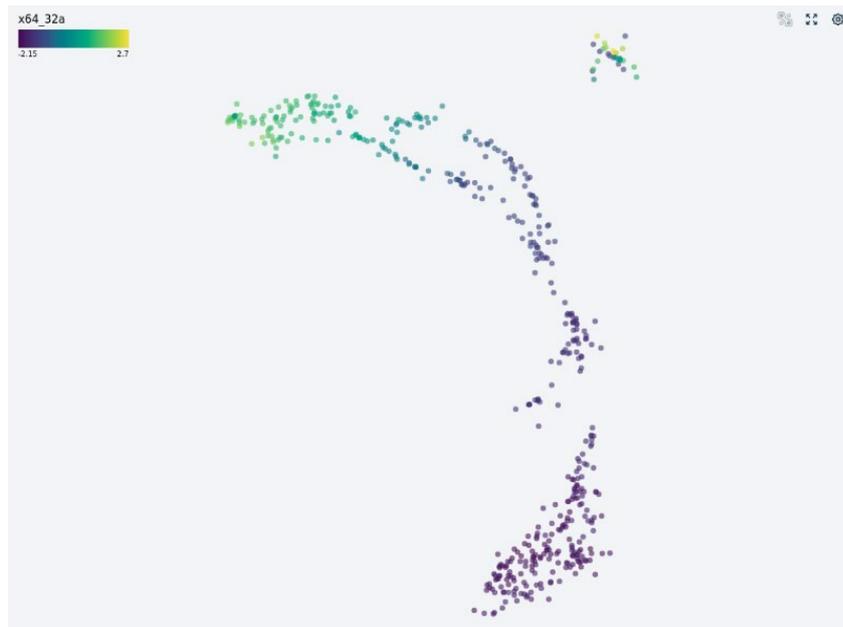


Abb. 9: Beispielhaftes Ergebnis der UMAP-Dimensionsreduktion von XD auf 2D

Wenn eine optimale Kombination von Kodierungen gefunden wurde, kann der Ansatz leicht erweitert werden, um verschiedene nachgelagerte Aufgaben auf der Grundlage der Ähnlichkeitsanalyse zu erfüllen. Um einen Fehler in einer Teilegeometrie zu klassifizieren, kann man für jede (Schwing-)Mode der Simulation eine Kodierung berechnen und diese zu einer Beschreibung des gesamten Teils und seines Verhaltens zusammenfügen.

Durch Anpassung der Distanzmetrik, die den Abstand zwischen zwei solchen Deskriptoren berechnet, können doppelte Moden und andere ähnliche Phänomene direkt berücksichtigt werden, um ein robustes Klassifikationsergebnis zu erhalten. Mit den erzeugten Kodierungen und einer geeigneten Abstandsmetrik kann die Klassifizierung mit Hilfe eines K-NN-Ansatzes (k-nearest neighbor) erfolgen, der erstmals von [8] eingeführt wurde. K-NN klassifiziert eine Probe, indem es ein Pluralvotum über die nächsten Nachbarn mit bekannten Labels durchführt. Bei hinreichend guten Deskriptoren benötigt dieser Ansatz nur wenige beschriftete Beispiele und ermöglicht ein gewisses Maß an Erklärbarkeit, da das Netz mitteilen kann, wie es zu seiner Schätzung gekommen ist, indem es die am nächsten gelegenen berücksichtigten Beispiele angibt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Bisher wurden im Projekt VibroAI verschiedene Varianten von Demonstratorbauteilen und die entsprechenden Simulationsmodelle erstellt. Die damit durchgeführten Messungen und Simulationen konnten bereits erste Ergebnisse liefern und die zu erwartenden Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsergebnissen in den zugehörigen MAC-Matrizen deutlich aufzeigen. Auf der Basis der vibroakustischen Datenbank wird eine Grundlage für das Training der ML-Methoden geschaffen. Darauf aufbauend wird derzeit ein KI-Ansatz zur automatischen Ähnlichkeitsanalyse entwickelt, um Abweichungen zwischen den Mess- und Simulationsdaten automatisch erkennen und Optimierungsmaßnahmen für die Simulation ableiten zu können.

Nächste Schritte in VibroAI sind weitere Untersuchungen zur Machbarkeit des Ansatzes sowie Untersuchungen zusätzlicher Varianten und alternativer Geometrien, um die Robustheit zu erhöhen und die Verifikation der neuen Methode zu ermöglichen.

## 7 Danksagungen

Die Autoren möchten sich beim *Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg* bedanken, das dieses Projekt ermöglicht hat. Ebenso möchten wir uns auch bei den Kollegen der *Polytec GmbH* für die tatkräftige Unterstützung bei diesem Projekt bedanken.

## 8 Literatur

- [1] Wagner, A., Spelsberg-Korspeter, G., Hagedorn, P.: Structural optimization of an asymmetric automotive brake disc with cooling channels to avoid squeal, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333(7), pp. 1888-1898, 2014
- [2] VisPER Version 18 User's Reference Manual, INTES Publication No. 470, 2020
- [3] PERMAS Version 18 User's Reference Manual, INTES Publication No. 450, 2020
- [4] Bi, S., Wagner, N., Beer, M., Ouisse, M.: Model updating of model parameters and model form error in a uniform framework, *Proceedings of the 29<sup>th</sup> European Safety and Reliability Conference (ESREL)*, Hannover, Germany 2019
- [5] Colette, A.: *HDF5 for Python*, 2014, accessed 10. May 2021 on <https://docs.h5py.org/en/stable/>
- [6] Kingma, D. P., Welling, M.: *An Introduction to Variational Autoencoders*, 2019
- [7] McInnes, L., Healy, J., Melville, J.: "UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction", 2018
- [8] Fix, E., Hodges, J. L.: *Discriminatory Analysis. Nonparametric Discrimination: Consistency Properties*, 1951



Professional Simulation Engineer

It's Time  
to Get Certified

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



Join Us

WE ARE NAFEMS

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

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

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

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

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

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

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

Die Mitglieder sind:

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

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

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

Folgende Gruppen sind aktuell bei NAFEMS aktiv:

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

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

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

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

**Mitglieder erhalten unter anderem:**

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

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

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

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

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

Establish best practice in engineering simulation

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

Promote collaboration and communication

Act as an advocate for the deployment of simulation

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

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

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

## Why Join?

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

### Better Collaboration

#### **BUILD LASTING BUSINESS ALLIANCES**

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

#### **EXCHANGE KNOWLEDGE & EXPERIENCE**

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

#### **LEARN ABOUT THE RESOURCES AVAILABLE**

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

#### **ENHANCE YOUR COMPANY'S VISIBILITY WORLDWIDE**

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

### Increased Productivity

#### **OPTIMIZE THE DESIGN PROCESS**

Learn about potential pitfalls and pick up time saving techniques.

#### **MINIMISE COSTLY PHYSICAL TESTING**

Increase confidence in your company's engineering simulation capabilities.

### Improved Quality

#### **BE COMMITTED TO THE HIGHEST STANDARDS**

NAFEMS membership reinforces your focus on best practice.

#### **BENCHMARK YOUR ORGANISATION'S SIMULATION PROCESS**

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

### Enhanced Innovation

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

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

#### **BE AT THE FOREFRONT**

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

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

Customer satisfaction will always be key. NAFEMS provides you with the opportunity 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

NAFEMS Training

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

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

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

**QUALITY**

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

**VARIETY**

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

**FLEXIBILITY**

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

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

# Resource Centre

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

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

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

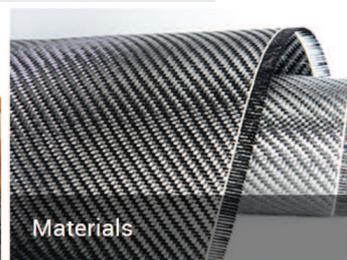
There are currently over 1,500 resources in the centre with this number growing weekly. NAFEMS Members have access to numerous types of resource as part of their membership, including presentations from previous events, conference papers, webinar archives, and much more.



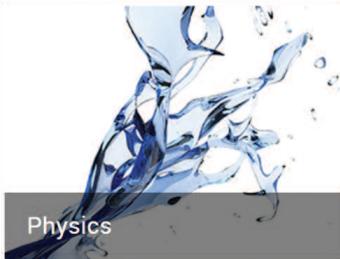
Analysis Management



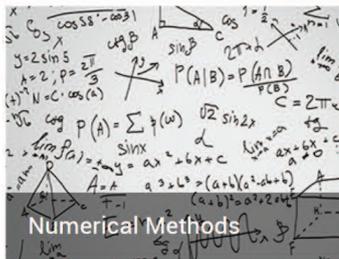
Industry & Products



Materials



Physics



Numerical Methods



All

## Nafems Publications

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

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

# BENCH MARK

# eLibrary

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

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

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

