



# Online-Magazin

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

## Fachbeiträge

### STRUKTURDYNAMIK

**Instabilitätsprobleme bei der impliziten transienten FEM-Simulation schnell rotierender elastischer Strukturen – Beschreibung des Phänomens und Lösungsmöglichkeiten**

TU Cottbus-Senftenberg / Rolls-Royce

**Analyse und Gegenüberstellung verschiedener Zeitintegrationsmethoden am Beispiel einer Windenergieanlage**

Universität Bayreuth

### OPTIMIERUNG

**Untersuchung von Eigenschwingung und Leichtbaupotenzial unterschiedlicher Gitterstrukturen am Beispiel von Magnetuntergestellen von Teilchenbeschleunigern**

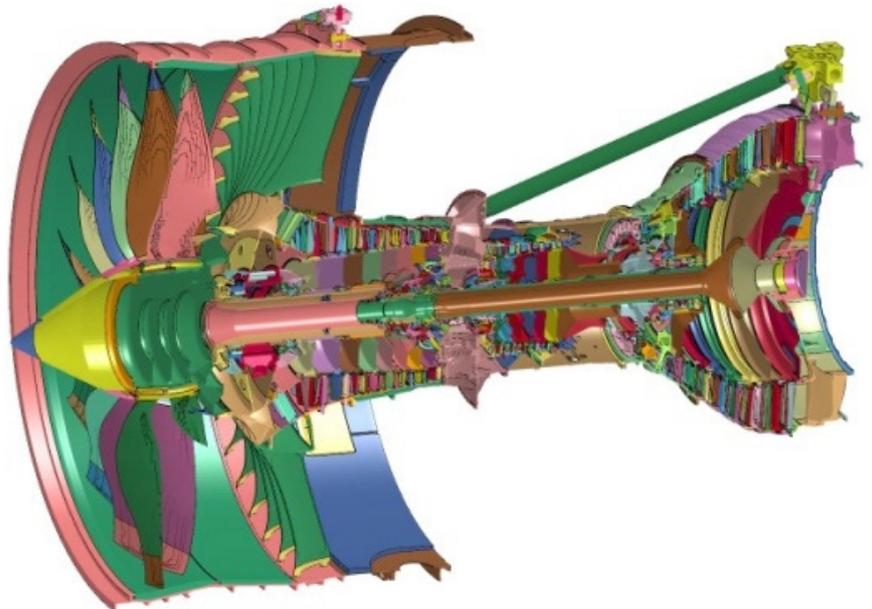
Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

**Last-spezifische Strukturentwicklung basierend auf evolutionärer Programmierung**

TU Clausthal

*Wir wünschen Ihnen eine schöne Weihnachtszeit, einen guten Rutsch sowie Gesundheit, Erfolg und viel Spaß im neuen Jahr.*

*Ihr NAFEMS Team*



incorporating the

**NWC** NAFEMS  
**NAFEMSWORLDCONGRESS 2019**

17-20 JUNE | QUEBEC CITY | CANADA  
**A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION**

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

- Fast 500 eingereichte Abstracts
- Keynotes aus Industrie und Hochschule
- Trainings, Workshops, Diskussionsrunden
- Networking und Informationsaustausch
- Große Hard- und Softwareausstellung
- Offen für Mitglieder und Nichtmitglieder

Das Vortragsprogramm ist ab Anfang März 2019 verfügbar. Seien Sie dabei!

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

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

Sponsoren dieser Ausgabe:



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

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

Ausgangspunkt und Ziel einer numerischen Simulationen ist in der Regel ein konkretes Problem, dessen reale Untersuchung entweder zu aufwendig oder zu riskant ist. Deswegen werden Modelle erstellt, die die wesentlichen Aspekte des Problems hinreichend genau beschreiben müssen; in komplexen Fällen kann es sich dabei auch um Meta-Modelle handeln. Meist liegen diesen Modellen Kennwerte zugrunde, die in gesonderten Versuchen gemessen werden müssen. Die Aussagekraft der Simulationsergebnisse beruht daher sowohl auf der Realitätsnähe und der Treffsicherheit des Modells, als auch auf der Güte der gemessenen Kennwerte. Zudem können noch die Umsetzung des Modells in eine digitale Form, deren numerische Lösung und die Darstellung der Ergebnisse die Aussagekraft beeinflussen. Bei aller berechtigten Begeisterung über die erzielten Erfolge der numerischen Simulation und bei aller Bewunderung über die Vorhersagegenauigkeit der eingesetzten Modelle sollte nicht vergessen werden, dass die reale Welt immer noch etwas Anderes ist, oder wie der Fußballtrainer Otto Rehhagel einmal gesagt hat: „Die Wahrheit liegt auf dem Platz“.

Simulation wird in vielen Bereichen angewendet, zum Beispiel in der Medizin, in der Finanzwirtschaft oder in den Sozialwissenschaften. Besonders zahlreich sind die Anwendungen aus dem Bereich der Technik, vielleicht weil viele numerische Verfahren wie die Methode der finiten Elemente oder finite Volumen von Ingenieuren entwickelt und in leistungsfähige Programme implementiert wurden. Auch die Fachbeiträge in diesem Heft stammen aus diesem Bereich. Da sind zunächst zwei Beiträge, die Anwendungen aus der Strukturmechanik beinhalten. Der erste Beitrag behandelt das Verhalten schnell rotierender Triebwerksschaufeln. Es werden Wege aufgezeigt, wie man unerwünschte Instabilitäten bei der impliziten Simulation vermeiden kann. Dann schließt sich ein Vergleich von verschiedenen impliziten Lösungsmethoden für dynamische Probleme an. Die Unterschiede werden am Beispiel des abstrahierten Turms einer Windkraftanlage verdeutlicht. Die Natur hat sich viel Zeit genommen, optimale Strukturen zu entwickeln. Die beiden Beiträge aus der Optimierung haben sich von den Ergebnissen der natürlichen Entwicklung inspirieren lassen. Durch die Verwendung unregelmäßiger Strukturen für Magnetuntergestelle von Teilchenbeschleunigern ließen sich sowohl die erste Eigenfrequenz, als auch die Steifigkeit erhöhen. Der letzte Beitrag konzipiert ein Verfahren zur Entwicklung selbstorganisierter Strukturen, das alternativ zu kommerziellen Topologieoptimierern eingesetzt werden kann.

Ich bin zuversichtlich, dass dieses Angebot auch für Sie interessante Aspekte enthält und wünsche Ihnen aufschlussreiche Anregungen beim Lesen.

Mit freundlichen Grüßen

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



*Prof. Dr.-Ing.  
Klaus Rohwer*

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



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



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



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



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



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

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

**NAFEMS Events**  
 Übersicht: Konferenzen/Seminare, Schulungen, e-learnig Kurse .....5  
 NAFEMS World Congress & Int. SPDM Conference 2019 .....6 - 7  
 Seminar: Werkstoffeigenschaften in der Strukturberechnung .....8 - 9

**NAFEMS Trainings**  
 Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation..... 10  
 Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung ..... 11  
 Verification and Validation in Engineering Simulation ..... 12 - 13  
 Simulation und Analyse von Composites .....14  
 Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis..... 15

**Über NAFEMS**  
 Übersicht ..... 16  
 Ziele ..... 17  
 Mitglied werden ..... 18  
 Mitgliedsmodelle ..... 19  
 Technische Arbeitsgruppen .....20  
 Veranstaltungen .....21  
 PSE Zertifizierung .....22  
 Training .....23  
 Resource Centre .....24  
 Publikationen / Benchmark Magazin .....25 - 26

**Neuigkeiten** .....28 - 34

**Veranstaltungskalender** ..... 35

**Fachbeiträge**

**Strukturdynamik**  
**Instabilitätsprobleme bei der impliziten transienten FEM-Simulation schnell rotierender elastischer Strukturen – Beschreibung des Phänomens und Lösungsmöglichkeiten**  
 M. Kober, A. Kühhorn (TU Cottbus-Senftenberg);  
 A. Keskin (Rolls-Royce) .....36 - 49

**Analyse und Gegenüberstellung verschiedener Zeitintegrationsmethoden am Beispiel einer Windenergieanlage**  
 J. Wittmann, C. Glenk, F. Hüter, F. Rieg (Univ. Bayreuth) .....50 - 56

**Optimierung**  
**Untersuchung von Eigenschwingung und Leichtbaupotenzial unterschiedlicher Gitterstrukturen am Beispiel von Magnetuntergestellen von Teilchenbeschleunigern**  
 S. Andresen (Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung) .....57 - 63

**Last-spezifische Strukturentwicklung basierend auf evolutionärer Programmierung**  
 D. Meiners, L. Steuernagel, G. S. Dutta (TU Clausthal) .....64 - 74

**Werbeanzeigen**  
 ITEA3 VMAP Projekt.....27

**Rückmeldeformulare** .....75

**Impressum**

**Editor-in-Chief**

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

**Redaktioneller Beirat**

Dr. Alfred Svobodnik  
 Mvoid Technologies  
 Prof. Dr. Manfred Zehn  
 TU Berlin / Femcos mbH

**Redaktion**

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

**Gestaltung / Layout / Anzeigen**

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

**Bezugspreis / Aboservice**

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

**Anzeigenpreise**

Preisliste vom 01.01.2018

**Verteilung / Bezug**

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

**Copyright © 2018, 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**

## Seminare in DACH 2019

Konferenz-/Seminartitel	Termin	Ort
<b>Werkstoffeigenschaften in der Strukturberechnung – Modellierung, Kalibrierung, Simulation &amp; Optimierung</b> <a href="http://www.nafems.org/werkstoffe19">www.nafems.org/werkstoffe19</a>	27.-28.03.	Dresden
<b>Konstruktionsnahe CFD-Berechnung</b> <a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a> (ab Frühjahr 2019)	11.-12.11.18	Wiesbaden
<b>Simulation von Elektromotoren</b> <a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a> (ab Frühjahr 2019)	13.-14.11.18	Wiesbaden

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

## Schulungen in DACH 2019

Schulungstitel	Termin	Ort	Teilnahmegebühr
<b>Verification and Validation in Engineering Simulation</b> <a href="http://www.nafems.org/events/nafems/2019/vandv1/">www.nafems.org/events/nafems/2019/vandv1/</a>	26.-27.03.	Wiesbaden	1.950 / 1.560 <sup>1)</sup>
<b>FKM-Richtlinie</b>	in Planung	bei Interesse bitte melden	
<b>NVH</b>	in Planung	bei Interesse bitte melden	
<b>Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation</b>	auf Anfrage / Inhouse		
<b>CFD Analysis: Theory and Applications</b>	auf Anfrage / Inhouse		
<b>Non-Linear Finite Element Analysis</b>	auf Anfrage / Inhouse		
<b>Simulation und Analyse von Composites</b>	auf Anfrage / Inhouse		

<sup>1)</sup> in Euro zzgl. ges. MwSt. je Teilnehmer (Nichtmitglied / NAFEMS Mitglied)

Eine Beschreibung der Schulungsinhalte finden Sie auf Seiten 10 - 15. Weitere Schulungen und Kurse, die web-basiert (e-learning bzw. Webinare) oder ausserhalb der deutschsprachigen Region stattfinden, finden Sie unter [www.nafems.org/events](http://www.nafems.org/events).

## e-Learning Kurse

E-Learning ermöglicht schnelle, höchst effektive und kostengünstige Trainings.

Folgende Themen werden regelmäßig angeboten:

- 10 Steps to Successful Explicit Dynamic Analysis
- Advanced Dynamic FEA
- Basic FEA
- Composite FEA
- CFD for Structural Designers and Analysts
- Elements of Turbulence Modeling
- Fatigue & Fracture Mechanics in FEA
- Introduction to Dynamics using FEA
- Introduction to Engineering Simulation for Non-Specialists
- Introduction to Practical CFD
- Non-Linear FEA
- Practical Modelling of Joints and Connections
- Structural Optimization in FEA

Aktuelle Termine und weitere Infos unter [www.nafems.org/e-learning](http://www.nafems.org/e-learning)





# NWC

NAFEMS WORLD CONGRESS

NAFEMS  
2019

17-20 JUNE | QUEBEC CITY | CANADA  
**A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION**

incorporating the

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

Die internationale Konferenz für Berechnung und Simulation in der Produktentwicklung:

- Fast 500 eingereichte Abstracts
- Keynotes aus Industrie und Hochschule
- Trainings, Workshops, Diskussionsrunden
- Networking und Informationsaustausch
- Große Hard- und Softwareausstellung
- Offen für Mitglieder und Nichtmitglieder

Das Vortragsprogramm ist ab März 2019 verfügbar.

Seien Sie dabei! Es gibt nichts vergleichbares!

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



**Konferenzprogramm ab März unter [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress)**

Engineering analysis, modelling and simulation are dynamic and ever-evolving fields. Gone are the days when everything could be categorised as either FEA or CFD. The rate of progress in software, hardware, techniques and best practice continues at a blistering pace, while the community driving that change also continues to grow and develop to incorporate every part of the product development process.

NAFEMS remains proud to be the only independent, international body dedicated to serving the community, and we want you to play an active role in driving progress and shaping the future of the sector.

Our 2019 World Congress will take place from the 17–20 June in Quebec City, Canada.

As well as hosting the **4<sup>th</sup> international SPDM conference** the Congress will also be hosting Technical Symposia on:

- **Manufacturing Process Simulation & Additive Manufacturing**
- **Systems Modelling & Simulation**
- **Digital trends and what they mean for the engineering simulation community**
- **VMAP - Interface Standard for Integrated Virtual Material Modelling in Manufacturing Industry**

As part of the focus on digital trends, we will be looking at new 'digital' areas from the cutting edge of technology. AI, Digital Twins, VR&AR and Industry 5.0 are just some of the pertinent topics that the Congress will cover.

This is the only major international event dedicated to your community and your technology.

Every aspect of analysis, modelling and simulation will be addressed, covering numerous industries globally.

**There's nothing quite like it.**



**Anmeldung ab sofort unter [www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress)**

## Einladung / Vortragsprogramm

# Seminar: Werkstoffeigenschaften in der Strukturberechnung – Modellierung, Kalibrierung, Simulation & Optimierung

Besichtigung der Prüflabore des Entwicklungs- und Prüfzentrums IMA Dresden

27. - 28. März 2019, Dresden

### Einladung

Die Effizienz von Simulationsverfahren basiert auf der Güte der eingesetzten Modelle. Dies gilt im besonderen Maße für die Analyse von Bauteilstrukturen. Wenn auch Details der Geometrie weitgehend exakt nachgebildet werden können, sind Beschreibungen der Werkstoffeigenschaften oft nicht verfügbar. Es müssen Annahmen getroffen werden, deren Auswirkungen auf das Ergebnis meist nicht absehbar sind. Verlässliche Designentscheidungen sind so nicht möglich, ebenso darüberhinausgehende neue Anwendungen wie z. B. der Digital Twin.

Dieses Seminar soll zeigen und zur Diskussion stellen, mit welchen Methoden das Design von Leichtbaustrukturen, deren Nutzen auf optimierte Eigenschaften der Werkstoffe beruht, unterstützt werden kann.

Die physikalischen Eigenschaften der Materialien von Tragstrukturen wie lineare / nichtlineare Elastizität, Versagen, Dämpfung, Wärmeleitfähigkeit usw. werden mittels Stoffgesetzen beschrieben. Diese müssen mit geeigneten Methoden bestimmt werden und bilden die Basis zur Erstellung von Materialmodellen. Damit werden in geeigneten Softwaresystemen zur Strukturanalyse die Materialeigenschaften simuliert, je nach Aufgabenstellung unter Berücksichtigung von z. B. Verformungsgeschwindigkeit, Temperatur usw.

Besondere Herausforderungen bieten Werkstoffe mit komplexen Stoffgesetzen wie Polymere und Composites aufgrund ihrer inneren Struktur, und außerdem werden in vielen Fällen deren Eigenschaften

im Wesentlichen durch Einflüsse während der Produktion des Bauteils bestimmt.

Dies führt zur Forderung, innerhalb einer Produktentwicklung auch den Herstellungsprozess zu simulieren, um Auswirkungen z. B. der Temperatur, plastischer Vorverformungen usw. auf das Werkstoffverhalten zu ermitteln. Mit den Ergebnissen einer derartigen Simulation können Parameter in der Fertigung gezielt beeinflusst werden, um die Materialeigenschaften zu optimieren. Praktische Anwendungen sind die Steuerung von Gießvorgängen, das Härten von Stahlteilen und vor allem die neue Technologie des Additive Manufacturing.

Wir hoffen, Ihr Interesse geweckt zu haben und freuen uns auf Ihre Teilnahme.

Ihre NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH

Technische Leitung:  
W. Dirschmid (Consultant), Chairman des NAFEMS Steering Committees für Deutschland, Österreich und der Schweiz  
Technische Leitung

### Tagungssprache

Deutsch (in Ausnahmen in englischer Sprache)

### Veranstaltungsort / Zimmer

Dorint Hotel Dresden  
Grunaer Straße 14  
01069 Dresden  
[www.www.hotel-dresden.dorint.com](http://www.www.hotel-dresden.dorint.com)

### Fachausstellung und Sponsoring

Ausstellungsfläche: 600 Euro  
Bitte fordern Sie Informationen zum Sponsoring an.



### Besichtigung der Prüflabore des Entwicklungs- und Prüfzentrums IMA Dresden

Im Rahmen des Seminars findet am 27.3. eine Führung durch die akkreditierten Prüflabore des Entwicklungs- und Prüfzentrums IMA Dresden statt. Hier werden verschiedene Einflüsse auf die Festigkeit experimentell untersucht, Berechnungsverfahren verifiziert sowie Materialeinsatz und Konstruktionsprinzipien verglichen. Die Teilnehmer erhalten einen Einblick in die modernen Prüfanlagen mit neuesten Prüftechnologien zum Beispiel für die Automobil-, Luftfahrt- und Schienenfahrzeugbranche.

### Teilnahmegebühr

Nicht-Mitglieder: 620 Euro  
NAFEMS-Mitglieder: frei  
NAFEMS Mitglieder erhalten acht „seminar credits“ pro Jahr. Für dieses Seminar werden drei credits je Teilnehmer benötigt. Falls bereits verwendet, können NAFEMS Mitglieder zu einem reduzierten Preis teilnehmen: 420 Euro. Für Studenten steht eine begrenzte Anzahl an freien Seminarplätzen zur Verfügung und setzt die Bereitschaft zur Mithilfe bei der Organisation vor Ort voraus.

Alle Preise jeweils zuzügl. ges. MwSt.

**Informationen und Anmeldung**  
[www.nafems.org/werkstoffe19](http://www.nafems.org/werkstoffe19)

**27. März**

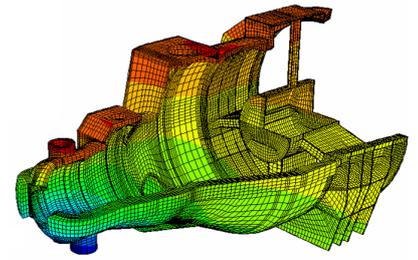
- 12:45 Begrüßung und Einführung**  
W. Dirschmid (Consultant, Chairman des NAFEMS DACH Steering Committees); T. Morris (NAFEMS)
- 13:00 Keynote-Vortrag: Nachvollziehbare Daten-Prozesskette vom Labor bis zur Simulation – Unerlässlich für Produktqualität und Produkthaftung**  
T. Ehrig (IMA Materialforschung und Anwendungstechnik)
- 13:35 Einflüsse des additiven Herstellungsprozesses auf lokale Betriebsfestigkeitseigenschaften bei metallischen Bauteilen**  
M. Hack, N. Lammens, H. Erdely (Siemens Industry Software); T. Craegh (Materialise); B. Van Hooreweder (KU Leuven); W. Van Paepegem (University of Gent)
- 14:00 Lebensdauerabschätzung von Bauteilen aus Sphäroguss auf der Grundlage der lokalen Materialeigenschaften**  
J. Wang (Knorr-Bremse)
- 14:25 Herausforderungen bei der Ermittlung der zyklischen Werkstoffkennwerte von dünnem Elektrobond unter dehnungsgeregelter Beanspruchung**  
M. Thum, P. Schwarz, P. Haefele (Hochschule Esslingen)
- 14:50 Kaffeepause**
- 15:30 Führung durch die Prüflabore des Entwicklungs- und Prüfzentrums IMA Dresden**
- 18:00 Get together in der Ausstellung (Ende ca. 20:00 Uhr)**

**28. März**

- 08:30 Keynote-Vortrag: Improving Simulation Quality With Reliable Materials Methods**  
H. Lobo (DatapointLabs Technical Center for Materials, USA)
- 09:05 Simulation des Herstellungsprozesses technischer Textilien für den Leichtbau**  
S. Gramsch (Fraunhofer ITWM)
- 09:30 Zuverlässige Strukturbewertung von Faserverbundbauteilen durch Berücksichtigung der Prozesseinflüsse in einer virtuellen Prozesskette**  
M. Hohberg, D. Dörr, B. Fengler (Karlsruher Institut für Technologie (KIT) / Simutence); L. Kärger, F. Henning (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))
- 09:55 Kaffeepause**
- 10:40 Modellierung des anisotropen Werkstoffverhaltens von kurzfaserverstärkten spritzgegossenen Kunststoffbauteilen**  
W. Korte (PART Engineering)
- 11:05 Einfluss der Werkstoffkennwerte auf die Genauigkeit der Festigkeitsbewertung eines kurzfaserverstärkten, spritzgegossenen Formteils**  
F. Lang, M. Brehm (Merkle und Partner); A. Frick, R. Boßler (Hochschule Aalen)
- 11:30 Dynamische Bauteil- und Werkstoffprüfung über fünf Dehnratendekaden in Größenbereiche von Metern bis Mikrometern**  
F. Huberth, S. Klitschke, J. Lienhard, J. Tlatlik (Fraunhofer IWM)
- 11:55 Modellierung der zyklischen Thermoviskoplastizität in Chrom-Nickel-Stahl mit Chaboche-Konstitutivgleichungen**  
S. Dimitrov (Cadferm)
- 12:20 Mittagspause**
- 13:20 Fehlende Engineeringdaten – hohes Gefahrenpotenzial bei kritischen Entscheidungen in der Produktentwicklung**  
H. Ruhland (Ricone)
- 13:45 Inhomogene Materialmodelle**  
M. Achenbach (Consultant)
- 14:10 Integration von Test- und Simulationsdaten**  
T. Kerber (Granta Design)
- 14:35 Kaffeepause**
- 15:00 Gewichtsreduktion durch Composites und Optimierung**  
N. Wagner (Intes)
- 15:25 Inverse Identifikation der individuellen, nicht-linearen und orthotropen Materialeigenschaften humaner innerer anatomischer Strukturen auf Basis von nicht-invasiven Vollfeldmessungen mit Ultraschall**  
A. Wittek (Frankfurt University of Applied Sciences/Universität Siegen); C.-P. Fritzen (Universität Siegen); A. Huß, C. Blase (Frankfurt University of Applied Sciences)
- 15:50 Material Charakterisierung von Composite Materialien mit Hilfe des multiskalen Ansatzes: Ein effizienter und hochgenauer Ansatz für den industriellen Einsatz**  
J. Bold (Boeing Research and Technology); F. Ehrhart (Altair Engineering); E. Mertic (LZS Dresden)
- 16:15 Wrap-up / Diskussion**

## NAFEMS Schulung

# Praktische Anwendung der FEM und Ergebnisinterpretation



Auf Anfrage / 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

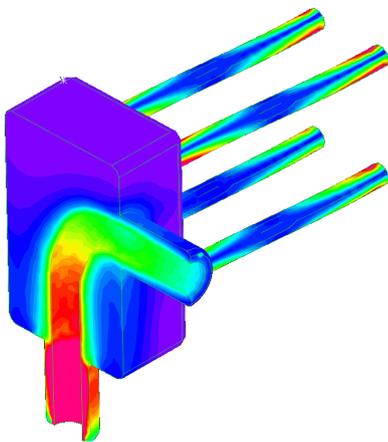
Dieser Kurs wird auch als Inhouse-Kurs bei Ihnen vor Ort angeboten. Bitte fordern Sie nähere Informationen an - Rückmeldeformular auf der vorletzten Seite.

## NAFEMS Schulung

# Strömungssimulation (CFD): Theorie und Anwendung

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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



### Inhalte

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

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

### Kurssprache

Englisch / Deutsch, falls nur deutschsprachige Teilnehmer.

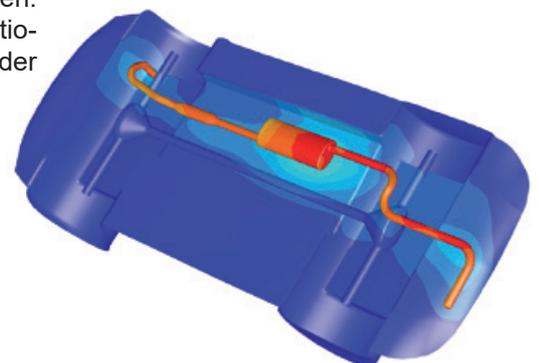
### Inhouse-Kurs

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

### Referent



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



## NAFEMS Schulung

*Dieser Kurs wurde bereits über 30 Mal in ganz Europa gehalten!*

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

26. - 27. März 2019 in Wiesbaden / 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/events/nafems/2019/vandv1/](http://www.nafems.org/events/nafems/2019/vandv1/)

## NAFEMS Schulung

# Simulation und Analyse von Composites

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

Faserverbundwerkstoffe haben sich inzwischen in verschiedensten Industriebereichen etabliert. Durch verschiedenste Faserarchitekturen und Harzsysteme sind Verbundwerkstoffe für unterschiedlichste Anwendungsfälle und Einsatzbereiche konfektionierbar. Der Konstrukteur und Berechnungsingenieur wird daher mit einer Vielfalt unterschiedlichster Werkstoffe konfrontiert, deren Festigkeitsanalyse vergleichsweise komplex ist. Ganz wesentlich für das Tragverhalten von Faserverbundwerkstoffen ist das Delaminations- und Schädigungsverhalten. Die Ablösung der Einzelschichten voneinander ist für gewöhnlich der entscheidende Versagensfall.

Das Ziel dieses Kurses ist die Einführung in die Schädigungsmechanik für Faserverbundwerkstoffe und die Modellierung der Delaminationen. Dem in der Praxis arbeitenden Ingenieur werden die Grundlagen der Schädigungsmechanik, die Möglichkeiten der Delaminationsanalyse und die typischen Verfahren zur Bestimmung relevanter Materialeigenschaften vermittelt.

### Training

Der Kurs vermittelt die Inhalte über die Schädigungsmechanik und Delaminationsmodellierung von Faserverbundwerkstoffen bei statischen Belastungen. Dazu werden die Grundlagen der Schichtentheorie, der Mischungstheorie und der Festigkeitstheorie für Faserverbunde dargestellt. Anhand von Beispielen

aus der industriellen Praxis wird die Schädigungsmechanik eingeführt und die typischen Modelle zur Delaminationsanalyse vorgestellt.

Neben den theoretischen Grundlagen werden Tipps und Hinweise für die Anwendung der Modellierungsansätze in der FE-Analyse vorgestellt.

In dem Kurs soll auch die Möglichkeit bestehen, Anwendungsfälle der Teilnehmer aus der industriellen Praxis zu berücksichtigen.

### Wer sollte teilnehmen

Berechnungsingenieure, Konstrukteure und Mitarbeiter, die als Simulationsingenieure arbeiten. Der Kurs vermittelt die wesentlichen Inhalte, um die Tragfähigkeit von Faserverbundstrukturen simulieren zu können.

### Inhalte

- Klassische Laminattheorie und Laminattheorien höherer Ordnung
- Mischungstheorien und Mikro-mechanik
- Festigkeitskriterien und Materialdegradationsmodelle
- Einführung in die Schädigungsmechanik
- Schädigungsmodelle für Verbundwerkstoffe
- Delaminationsmodellierungen

### Referent



*Dr.-Ing. Daniel Hartung (Premium Aero-tec GmbH) hat langjährige Erfahrung in der Anwendung und Entwicklung von Materialmodellen,*

*Analysemethoden und Finite Elemente Modellierungen für Faserverbundwerkstoffe. Während seiner Tätigkeit für das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat er sich intensiv in die Modellierung und Analyse der Faserverbundwerkstoffe eingearbeitet und neuartige Analysemethoden entwickelt. Zusätzlich hat sich Hr. Hartung während dieser Zeit umfassend mit der Prüfung und Kennwertermittlungen von Faserverbundwerkstoffen befasst. Zurzeit arbeitet Hr. Hartung in der Industrie und entwickelt unter anderem Berechnungsmodelle und Analysemethoden für Verbundwerkstoffe im Flugzeugbau. Aus der Leitung und Mitarbeit unterschiedlicher Industrie- und Forschungsprojekte kennt Herr Hartung die Herausforderungen bei der Anwendung verschiedenster Modelle sowie die wissenschaftlichen Herausforderungen bei der Modellentwicklung.*

### Kurssprache

Deutsch

### Inhouse-Kurs

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

## NAFEMS Schulung

# Practical Introduction to Non-Linear Finite Element Analysis

Auf Anfrage / auch als Inhouse-Schulung buchbar

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

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

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

### Who Should Attend

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

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

### Technical Content

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

and non-linear FE analysis, Non-linear algorithms and procedures, Difficulties in modelling non-linear problems.

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

### Tutor



*Dr. Gino Duffett has over 30 years of experience in CAE software development, training, industrial implementation and usage on an interna-*

*tional level in various sectors, mostly automotive and renewable energy. Currently a Technology Project Manager focussing on innovative simulation driven design and automatic optimization.*

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

### Course Language

English

### Inhouse-Kurs

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

NAFEMS 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.

Das oberste Gremium bei NAFEMS ist das **Council of Management**. Deren Mitglieder sind:

- C. Stavrinidis (IABG, D), Chair
- M. Zehn (Vice Chairman, TU Berlin, D)
- R. L. Dreisbach (The Boeing Company, USA)
- D. Ellis (Cadferm Ireland, UK)
- M. Felice (Ford, USA)
- G. Miccoli (Imamoter, I)
- M. Moatamedi (University of Narvik, N)
- S. Morrison (Lusas, UK)
- P. Newton (GBE, UK)
- M.-C. Oghly (Micado, F)
- A. Ptchelintsev (DynaPredict, FI)
- A. Puri (Selex Sensors & Airborne Systems, UK)
- J. Wood (formerly Strathclyde University, UK)

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)
- R. Helfrich (Intes)
- C. Hühne (DLR)
- F. Jurecka (Dassault Systèmes)
- C. Katz (Sofistik)
- W. Moretti (Schindler Elevator)
- E. Niederauer (Siemens PLM Software)
- A. Pfaff (PD Tec)
- A. Starlinger (Stadler Altenrhein)
- A. Svobodnik (Mvoid Technologies)
- E. Wang (Cadferm)
- M. Zehn (TU Berlin)

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)
- 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:

- Composites
- Computational Fluid Dynamics
- Computational Structural Mechanics
- Dynamics and Testing
- Education and Training
- Geotechnics
- High Performance Computing
- Manufacturing Process Simulation
- Multiphysics
- Optimisation
- Simulation Data Management
- Simulation Governance and Management
- Stochastics
- Systems Modeling & Simulation
- Neu in Gründung: Business Impact

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

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

NAFEMS hat weltweit über **1.400 Mitgliedsunternehmen und -Institutionen**. Mitglieder erhalten unter anderem:

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

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

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

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

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

Establish best practice in engineering simulation

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

Promote collaboration and communication

Act as an advocate for the deployment of simulation

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

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

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

## Why Join?

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

### Better Collaboration

#### BUILD LASTING BUSINESS ALLIANCES

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

#### EXCHANGE KNOWLEDGE & EXPERIENCE

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

#### LEARN ABOUT THE RESOURCES AVAILABLE

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

#### ENHANCE YOUR COMPANY'S VISIBILITY WORLDWIDE

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

### Increased Productivity

#### OPTIMIZE THE DESIGN PROCESS

Learn about potential pitfalls and pick up time saving techniques.

#### MINIMISE COSTLY PHYSICAL TESTING

Increase confidence in your company's engineering simulation capabilities.

### Improved Quality

#### BE COMMITTED TO THE HIGHEST STANDARDS

NAFEMS membership reinforces your focus on best practice.

#### BENCHMARK YOUR ORGANISATION'S SIMULATION PROCESS

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

### Enhanced Innovation

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

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

#### BE AT THE FOREFRONT

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

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

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

## Membership Levels

	<b>Entry</b>	<b>Standard</b>	<b>Corporate Select</b>	<b>Corporate Global</b>
	Ideal for small companies and consultancies, or smaller analysis teams. Also appropriate in areas without a NAFEMS Regional Group.	The perfect level of membership for medium-sized organisations who are looking to get maximum benefit from their involvement.	Tailored for companies who need to share the benefits of membership across several teams and locations. Choose what you need, and where you need it.	Meeting the needs of large multi-national organisations. Covers every employee at every site in your organisation. A truly all-encompassing membership option.
Sites Covered	<b>single site</b>	<b>single site</b>	<b>multiple named sites</b>	<b>all sites globally</b>
Copies of new NAFEMS Publications	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>multiple</b>	<b>multiple</b>
Copies of Benchmark Magazine	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>multiple</b>	<b>multiple</b>
Reduced Rates on NAFEMS Training	4	4	4	4
Discounted Attendance at all NAFEMS Events	4	4	4	4
Preferential Sponsorship rates at NAFEMS Events	4	4	4	4
Access to the PSE Competency Tracker	4	4	4	4
Discounted PSE Certification for all employees	4	4	4	4
Access to the NAFEMS Resource Centre	4	4	4	4
Members-Only Area of the NAFEMS Website	4	4	4	4
Participate in our Technical Working Groups	4	4	4	4
Use of the NAFEMS Member Logo on your Website	4	4	4	4
Free Places at NAFEMS Seminars and Conferences	<b>0</b>	<b>up to 4</b>	<b>multiple</b>	<b>multiple</b>
Company Details, Description and Links on nafems.org	8	4	4	4
Post your Press Releases and News on nafems.org	8	4	4	4
Promotion of your Events on nafems.org	8	4	4	4

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

## Technical Working Groups

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

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

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

### Technical working groups currently include:

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

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

## Nafems Events

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

### World Congress

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

### Conferences

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

### Seminar

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

### Webinars

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

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

## PSE

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

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

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



### THE PSE CERTIFICATION STANDARD

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

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

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

### PSE CERTIFICATION HAS BEEN DESIGNED TO:

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

NAFEMS Training

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

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

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

**QUALITY**

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

**VARIETY**

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

**FLEXIBILITY**

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

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

# Resource Centre

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

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

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

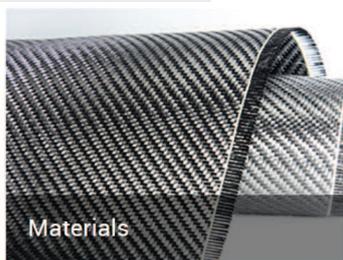
There are currently over 1,500 resources in the centre with this number growing weekly. NAFEMS Members have access to numerous types of resource as part of their membership, including presentations from previous events, conference papers, webinar archives, and much more.



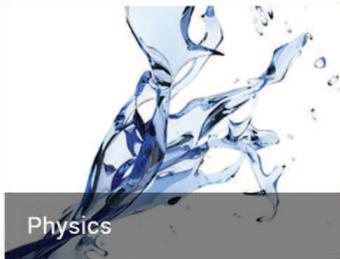
Analysis Management



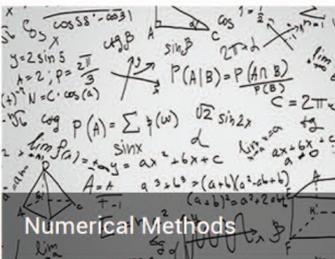
Industry & Products



Materials



Physics



Numerical Methods



All

## Nafems Publications

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

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

**BENCH  
MARK**

**e**library

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

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

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

Internationales NAFEMS Magazin

## Benchmark Magazin, Ausgabe Oktober 2018

Die internationale NAFEMS Zeitschrift „Benchmark“ erschien in der Druckauflage zuletzt im Oktober 2018. Download für Mitglieder und Abonnenten sowie Informationen zum Abonnement finden Sie unter:

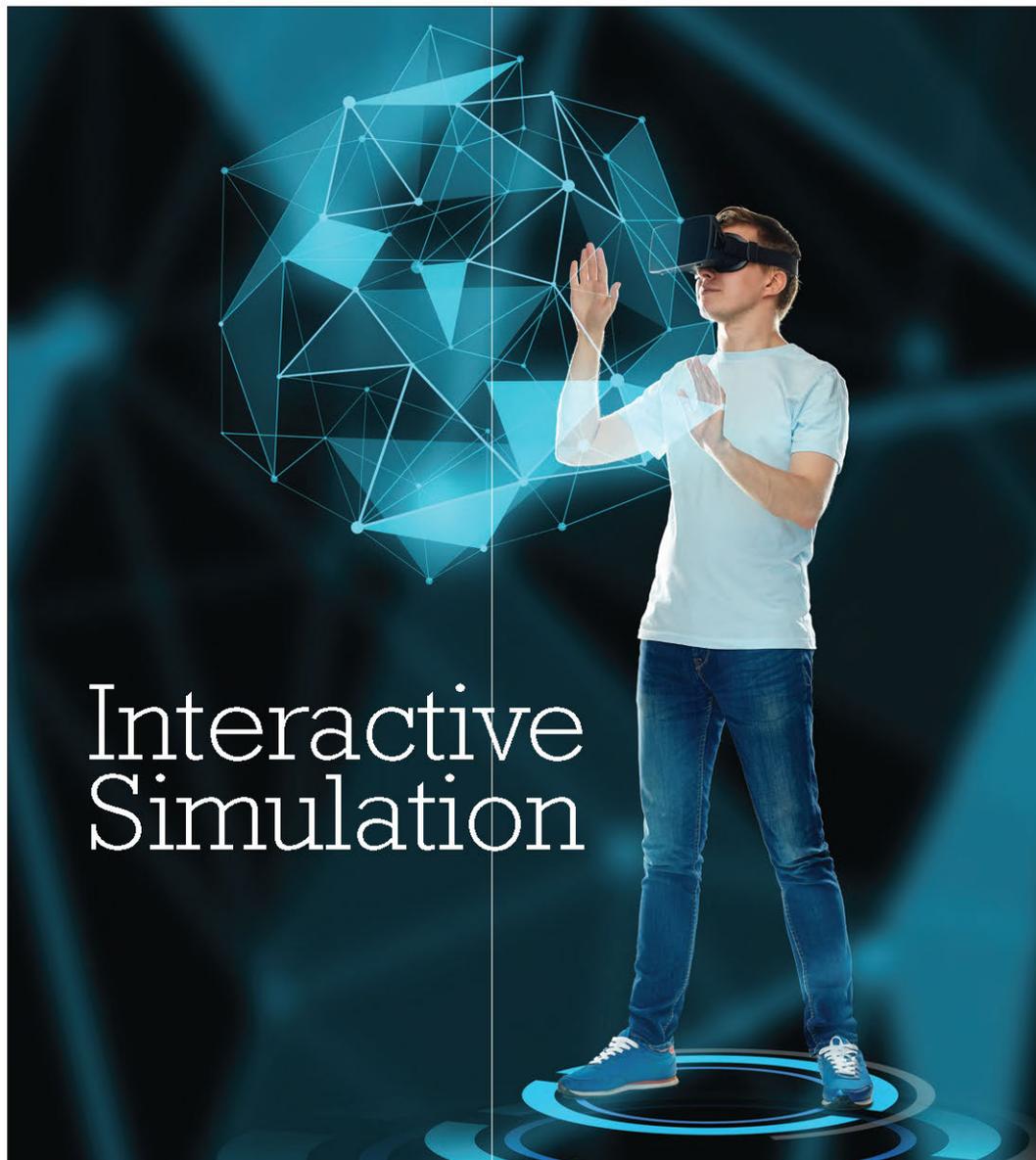
[www.nafems.org/publications/benchmark](http://www.nafems.org/publications/benchmark)

# BENCH MARK

### October 2018 issue ...

- Interactive Simulation - From Far-fetched Sci-Fi to Valuable Engineering Tool
- Virtual and Augmented Reality - The Future of how we Interact with Computers?
- Interactive Modelling and Simulation for Virtual Engineering Design and Analysis
- FEA Puzzler: How Confident Are You?
- Real-time Mechanism and System Simulation Supporting Human-in-the-loop Simulators
- Simulation Data Management - The Next Challenges
- NAFEMS World Congress 2019
- Vendor Viewpoint
- Analysis Origins - A Brief History of MSC and NASTRAN
- Applications of Extended Reality
- Insight from a NAFEMS Technical Fellow
- Excel for Engineers and other STEM Professionals

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



Interactive  
Simulation



Project Profile

# VMAP

<https://itea3.org/project/vmap.html>

## Virtual Material Modelling in Manufacturing

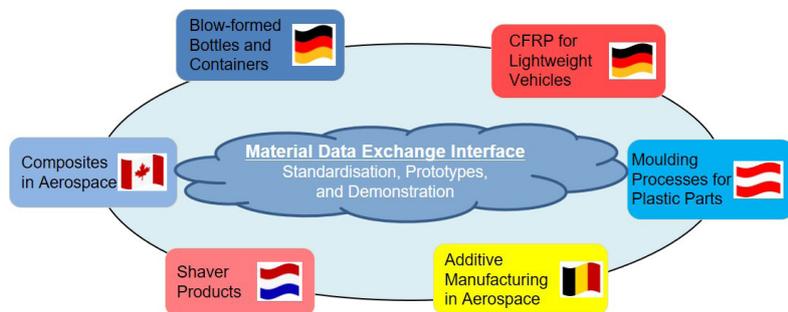
The ITEA VMAP project aims to gain a common understanding of and interoperable definitions for virtual material models in CAE. Using industrial use cases from major material domains and with representative manufacturing processes, new concepts will be created for a universal material exchange interface for virtual engineering workflows.

### ADDRESSING THE CHALLENGE

The lack of software standards in virtual engineering workflows and incompatible interfaces for the transfer of virtual material information not only cause additional costs and complex manual adaptation but also lead to inflexible IT solutions, loss of information and significant delays in the overall design process. The standardisation of material interfaces in CAE is therefore vital for all industry segments where material behaviour is central to product and process design.

### PROPOSED SOLUTIONS

The concepts generated within the VMAP project will be concretised in an open software interface standard and implemented in a number of software tools. The advantages of integrated material handling will be demonstrated by six industrial use cases from different material categories, manufacturing domains and industry segments. In brief, VMAP will generate universal concepts and open software interface specifications for the exchange of material information in CAE workflows. Implementation will be realised for extended CAE tool interfaces and, where necessary, translation tools that follow the open interface specification. VMAP will also implement virtual industrial demonstrators for relevant material domains and manufacturing processes as well as provide best-practice guidelines for the



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

community. The establishment of an open and vendor-neutral 'Material Data Exchange Interface Standard' community will ensure that standardisation efforts continue into the future.

### PROJECTED RESULTS AND IMPACT

Interoperable virtual material models and a seamless transfer of material data history in a CAE workflow enables industry users to develop and produce better products in a shorter time and in more efficient manufacturing processes. Interface standards will also help CAE software developers and vendors to realise further virtual material models that can be easily integrated in

holistic design, simulation and optimisation workflows. In Europe's growing and future manufacturing market whereby materials technology is a key factor, especially in the rapidly emerging market of additive manufacturing for metal and plastics, an open software interface standard for virtual material modelling can have significant benefits.

*ITEA is the EUREKA Cluster programme supporting innovative, industry-driven, pre-competitive R&D projects in the area of Software-intensive Systems & Services (SiSS). ITEA stimulates projects in an open community of large industry, SMEs, universities, research institutes and user organisations. As ITEA is a EUREKA Cluster, the community is founded in Europe based on the EUREKA principles and is open to participants worldwide. <https://itea3.org>*

## ARAS

### Schnelle Expansion: Aras erhält 70 Millionen US-Dollar von Goldman Sachs

Aras, führender Anbieter von Open-Product-Lifecycle-Management (PLM)-Software für Unternehmen, hat ein Investment in Höhe von 70 Millionen US-Dollar erhalten. Die Minderheitsbeteiligung wird von der Goldman Sachs Private Capital Investing Group angeführt. Auch Silver Lake Kraftwerk ist an dem Investment beteiligt. Das Wachstumskapital aus der Series-D-Runde wird Aras bei der globalen Expansion unterstützen. Mit der Investition soll außerdem das Wachstum der offenen PLM-Plattform durch In-House-Entwicklung und Technologieakquisitionen beschleunigt werden. Im Rahmen der Transaktion werden Hillel Moerman und Holger Staude von Goldman Sachs dem Aufsichtsrat von Aras beitreten, Moerman als Mitglied des Aufsichtsrats und Staude als Beobachter.

Aras setzt mit seiner offenen Software-Plattform neue Maßstäbe im Markt für industrielle Software. Zu den adressierten Bereichen gehören zum Beispiel Product Lifecycle Management (PLM), Wartung, Reparatur und Instandsetzung (MRO) sowie Qualitätsmanagementsysteme (QMS). Die Plattform ermöglicht es den weltweit größten produzierenden Unternehmen, sich digital zu transformieren.

„Unser Fokus bei Goldman Sachs liegt auf wachstumsstarken Unternehmen mit echten Wettbewerbsvorteilen, führender Technologie und einem erfahrenen Management. Deshalb interessieren wir uns für Aras“, sagt Hillel Moerman, Leiter Private Capital Investing, Goldman Sachs. „Industrieunternehmen weltweit mühen sich mit dem Übergang in die digitale Ära, beispielsweise wenn geschäftskritische Applikationen erneuert werden sollen oder Unternehmen sich am Markt neu aufstellen müssen. Die innovative Software-Plattform von Aras ermöglicht es solchen Unternehmen, Projekte zur digitalen Transformation umzusetzen.“

Bereits im September erhielt Aras ein Investment von 40 Millionen US-Dollar. Diese Beteiligung wurde von Silver Lake Kraftwerk angeführt, unter Beteiligung von GE Ventures. Seitdem hat Aras strategische Akquisitionen abgeschlossen, um seine Applikations-Suite weiter auszubauen. Dazu gehören die Zukäufe von Impresa MRO für In-Service Assets und Comet SPDM für Simulationsmanagement. Darüber hinaus hat Aras seine weltweiten Geschäftsaktivitäten ausgebaut und Büros in Großbritannien sowie Italien eröffnet. An seinem Hauptsitz in den USA hat das Unternehmen ein neues Office mit doppelter Kapazität bezogen. Die Zahl der Mitarbeiter weltweit stieg um mehr als 50 Prozent. Zudem wurde Aras als Leader in der Forrester Wave für Product Lifecycle Management für produzierende Unternehmen eingestuft.

„Aras transformiert weiterhin den Markt und vertieft seine Beziehungen zu führenden produzierenden Unternehmen“, sagt Martin Fichtner, Managing Director von Silver Lake Kraftwerk. „In der Vergangenheit hat Aras innovative Funktionen erworben, um sein Wachstum zu beschleunigen und seine globale Präsenz auszubauen. Wir freuen uns darauf, Goldman Sachs als neuen strategischen Partner zu begrüßen und unser Investment in Aras auszubauen.“

Peter Belillo, President, CIMdata: „Aras hat unter Beweis gestellt, dass es selbst die größten Hersteller mit ihren komplexen Use Cases unterstützen kann. Mit den vorangegangenen Investments hat das Unternehmen seine Aktivitäten und Fähigkeiten effektiv ausgebaut. Das aktuelle und bedeutende Investment bestätigt die Tragfähigkeit des Geschäftsmodells von Aras erneut. Es unterstreicht außerdem das Vertrauen, das der Markt Aras Innovator, der Product-Innovation-Plattform von Aras, entgegenbringt. Dieses Vertrauen wird zusätzlich dadurch bestätigt, dass Aras digitale Transformationsprozesse in Unternehmen ermöglichen und strategische Mehrwerte liefern kann.“

Peter Schroer, CEO und Gründer

von Aras: „Durch die Finanzierungsrunde mit Goldman Sachs PCI können wir in mehreren Bereichen schnell voranschreiten. Darüber hinaus ermöglicht uns die Finanzierung, wichtige Funktionen bereitzustellen, die unsere Kunden für Innovationen und die Transformation ihres Geschäftsbetriebes benötigen. Das zusätzliche Kapital stellt für unsere gesamte offene PLM Community einen weiteren positiven Schritt nach vorn dar. Dadurch können wir Funktionen schneller und in größerem Maßstab bereitstellen.“

Zusätzlich zu Silver Lake Kraftwerk haben sich andere Teilnehmer aus der vorangegangenen und von Silver Lake geführten Series-C-Runde an der aktuellen Series-D-Runde beteiligt, darunter GE Ventures.

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

## BETA CAE Systems

### BETA CAE Systems suite v18.1.4

Beta CAE Systems veröffentlichte die neue Version BETA CAE Systems suite v18.1.4.

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

## COMSOL

### Neue Produkte und Technologien dank multiphysikalischer Simulation

Die Comsol Multiphysics GmbH freut sich, die Veröffentlichung der neuesten Ausgabe des Multiphysics Simulation Fachmagazins bekannt zu geben. In der neuen Ausgabe finden sich Artikel über Innovationen und Arbeiten rund um die numerische Simulation von Ingenieuren und Wissenschaftlern aus aller Welt. Die Themen reichen von lebensrettender Wearable-Technologie bis hin zum Schutz der globalen Wirtschaft vor Falschgeld.

„Wir sind immer wieder darüber erstaunt, was Ingenieure und Wissenschaftler mit Hilfe multiphysikalischer Simulation erreichen können“, erläutert Valerio Marra, Marketing Director von Comsol. „Jedes Anwen-

dungsbeispiel im Multiphysics Simulation Magazin verdeutlicht uns, wie stark ein virtueller Prototypenbau und digitale Zwillinge Einfluss auf Unternehmen genommen haben, die sich durch herausragendes Design und einzigartige Produkte ausgezeichnet haben.“

Einige der wichtigsten Themen:

- Kejako erstellt einen kompletten digitalen Zwilling eines menschlichen Auges, unter Berücksichtigung des gekoppelten mechanischen und optischen Verhaltens.
- General Atomics kommt dem heiligen Gral der Energieerzeugung näher.
- G+D Currency Technology entwickelt Systeme zur Verarbeitung von Banknoten. Die Systeme sind in der Lage, jeden Tag Millionen von Banknoten sicher zu sortieren und zu verarbeiten.
- NARI Group entwickelt angepasste Simulations-Applications zur Vorhersage von Kabeldefekten und verbessert so die Effizienz bei der Problembehandlung.

Darüber hinaus bietet das Magazin technische Artikel von branchenführenden Unternehmen wie ABB, National Grid UK und STMicroelectronics. Multiphysics Simulation 2018 ist als Online-Magazin verfügbar und kann unter [www.comsol.de/offers/multiphysics-simulation-2018](http://www.comsol.de/offers/multiphysics-simulation-2018) gelesen oder im PDF-Format heruntergeladen werden.

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

## GRANTA DESIGN

### CES Selector 2019 setzt neue Maßstäbe bei der Materialauswahl

Granta Design hat die Veröffentlichung von CES Selector 2019, dem branchenführenden Werkzeug der Industrie für Werkstoffauswahl und grafische Analysen von Materialkennwerten, angekündigt. Die neue Version bietet verbesserte Daten und Werkzeuge, die bei der Entscheidung helfen, ob die additive Fertigungstechnologie eine gangbare Option für ein Projekt ist. Darüber

hinaus bietet sie Orientierungshilfen zur Identifikation entscheidender Designanforderungen – z. B. durch die Verknüpfung zu schwingungstechnischen Eigenschaften – und spart dadurch bei Simulationsprojekten Zeit und Aufwand. Die 2019er Version umfasst außerdem nachhaltige Aktualisierungen der CES Selector Werkstoffdaten Bibliothek. Neues in CES Selector 2019

Vergleichen Sie Maschinen und Materialien zur additiven Fertigung mit konventionell gefertigten Produkten und Technologien und erhalten Sie so ein besseres Verständnis für die Leistungsfähigkeit. Die neue Additive Manufacturing (AM) Edition von CES Selector deckt alle wichtigen industriellen AM Technologien ab. Sie bietet Daten von über 950 industriellen Maschinen und über 1.700 kompatiblen Werkstoffen. CES Selector ermöglicht außerdem den Zugriff auf Lieferanteninformationen aus der aktualisierten Senvol Datenbank. Diese wurde mit Daten von über 190 gleichwertigen Materialien, die mit konventionellen Technologien produziert wurden, ergänzt. Dadurch können AM Werkstoffe bei der Materialauswahl frühzeitig berücksichtigt werden. Sehen Sie sich Grantas on-demand Webinar 'Comparing additive manufacturing materials with conventional technologies' an und erfahren Sie in einer Anwendungsstudie, wie diese Version eingesetzt werden kann: [www.grantadesign.com/webseminars/2018/compare-additive-materials.htm](http://www.grantadesign.com/webseminars/2018/compare-additive-materials.htm)

Vermeiden Sie in Ihrem Projekt, durch die frühe Auswahl von Werkstoffen, unnötige Iterationen und teure Gegenmaßnahmen. Stellen Sie durch die Anwendung der neuen Performance Indizes für Längs- und Biegeschwingungen sicher, dass die richtigen lasttragenden Eigenschaften ausgewählt wurden. Muss ein Material ersetzt werden, bietet CES Selector 2019 einen schnellen Überblick über alle wahrscheinlichen Änderungen der Schwingungseigenschaften.

Modellierungs- und Simulationsprojekte können schwierig und zeitaufwändig sein. Ermöglichen Sie es Ihrem Simulationsteam, sich durch die

Vorabprüfung von Werkstoffen mit CES Selector in ihrer Simulationsarbeit auf die geeignetsten Materialien zu konzentrieren. Stellen Sie dem Team korrekt formatierte Eingabedaten zur Verfügung, darunter der Zugriff auf Prospector Plastics und die CAMPUS und MBase Plastics Datensätze. Die erweiterte Export-Technologie vereinfacht den Export der Daten zu noch mehr Softwarewerkzeugen, darunter Altair Inspire. Auch die Trainingsmaterialien und Informationen zu bewährten Praktiken auf Grantas eLearning Webseite wurden aktualisiert. Sie wurden um zusätzliche Inhalte für den 'Professional Level' des CES Selector Zertifizierungsprogrammes erweitert und umfassen nun auch das szenarien-basierende Entscheidungsbaum-Modul sowie Techniken für die Definition entscheidender Designanforderungen.

Profitieren Sie von Verbesserungen im MaterialUniverse, Grantas umfassender Datensatz für technische, ökonomische und umwelttechnische Eigenschaftsprofile, das direkte Vergleiche über das komplette Spektrum an Werkstoff- und Prozessmöglichkeiten ermöglicht. Das MaterialUniverse liegt in einem durchsuchbaren, elektronischen Format vor und umfasst über 4000 einzigartige Einträge, die nahezu alle im Markt verfügbaren technischen Materialien abdecken sowie 240 Einträge über dazugehörige Prozesse. Die Werkstoffeinträge decken die komplette Bandbreite an Materialklassen ab, jeder Eintrag hat über 80 allgemeine, mechanische, thermische, optische, elektrische, umwelttechnische, ökonomische, korrosionsrelevante und andere Eigenschaften.

Darüber hinaus bietet CES Selector die neuesten Updates dieser Datensätze:

- Prospector Plastics
- Campus & M-Base Plastics
- Mmpds-12 Luftfahrtlegierungen
- JAHM Curve Data für die Simulation
- Senvol Database für die additive Fertigung

„Die Feinheiten der Materialauswahl beeinflussen alles, vom Design und

dem Entwicklungsplan bis hin zu Kosten und der Einhaltung gesetzlicher Vorgaben“, erklärt Dr. Charlie Bream, Product Manager für CES Selector bei Granta Design. „CES Selector ermöglicht auf einzigartige Weise neue Einblicke und stellt so sicher, dass unsere Kunden die benötigten Werkstoffe finden, Einblicke in Materialeigenschaften erhalten und die Auswahl klar kommunizieren können. Die Verbesserungen in unserem 2019er Release bieten durch den fokussierten Support für die Simulation, die additive Fertigung und für Schwingungsbelastungen einen noch größeren Wettbewerbsvorteil.“

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

## INSTAL

### Instal-News

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

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

## MSC SOFTWARE

### Neue Version Actran verbessert Akustiksimulation

Free Field Technologies (FFT), ein Unternehmen von MSC Software, gab die Veröffentlichung der neuen Version Actran bekannt. Die neue Version Actran 19 bringt in mehreren Bereichen einen bedeutenden Durchbruch für effektivere akustische, vibroakustische und strömungsakustische Simulationen. Anwender können so ihre geräuschtechnischen Designprobleme besser und schneller lösen.

Highlights der neuen Version:

- Hochfrequenz-Vibroakustik: In Actran 19 bringt FFT das brandneue Actran SEA-Modul auf den Markt, das auf dem Prinzip der virtuellen statistischen Energieanalyse (SEA) basiert. Dieses Modul ermöglicht „SEA aus FEA“ für gekoppelte vibroakustische Aufgaben. Das bedeutet,

die Simulation großer Systeme bei mittleren & hohen Frequenzen verwendet bestehende Finite-Elemente-Modelle (für niedrige Frequenzen) aus MSC Nastran als Eingabe.

- Lüftergeräusche: Strömungsakustische Simulationen von Lüftern profitieren vom Blattdesign-Generator. Dieser erzeugt Blattgeometrien, die verbunden mit einer Lösung für die Potentialströmung, die Druckverteilung um Rotorblätter ermitteln. Zudem lassen sich die Ergebnisse unkomplizierter stationärer CFD-Berechnungen verwenden. Mit diesen Arbeitsmitteln können die Entwickler von Lüftern die tonalen Geräusche ihrer Konzepte schon sehr früh im Entwicklungszyklus evaluieren.
- Vollfahrzeugakustik: Die Wirkung der Verkleidung auf das akustische Verhalten des Fahrzeugs kann bedeutend besser berechnet werden. Erstens ist der Ansatz der reduzierten Impedanz nun auch in der direkten Frequenzganganalyse verfügbar, dies eröffnet Simulationsmöglichkeiten für mehr physikalische Vorgänge und Ausbreitungswege. Zweitens beschleunigt die automatische Vernetzung von Verkleidungen den Arbeitsablauf drastisch, da die komplizierten Schalldämmpakete nicht mehr von Hand vernetzt werden müssen. Und schließlich macht der Export von Trim-Modellen aus Actran VI nach MSC Nastran PEM das Aufsetzen von Fahrzeugmodellen mit Verkleidung in MSC Nastran einfacher.
- Demokratisierung: Actran 19 bringt eine neue Entwicklungsumgebung für benutzerdefinierte Wizards, mit der sich eigene Menüs für alle möglichen Simulationsarten bauen lassen. Der Wizard führt den Anwender durch die verschiedenen Berechnungsschritte, wobei ein vordefiniertes Modelltemplate nur die relevanten Eingabeoptionen anzeigt. Dies gibt auch Nicht-CAE-Experten umfang-

reiche Möglichkeiten, die Simulation bei der Entwicklung ihrer Produkte zu nutzen.

- Benutzererlebnis: In Actran 19 wird die Produktivität durch verschiedene neue Funktionalitäten deutlich erhöht. Dazu gehören die Implementierung einer automatischen Fluid-Struktur-Kopplung für nicht zusammenpassende Netze, eine Tabellenansicht für Felddaten, ein Werkzeug zur Kombination von Anregungen mit Transferfunktionen, neue 3D-Visualisierungen der Richtwirkung und ein neues Modul, das automatische Parameterstudien aufsetzt. In dieser Version laufen auch die meisten Simulationen schneller, dank neuer Funktionalitäten zur Netzadaptivität, erweiterter Nutzung des MUMPS-Solvers mit einfacher Genauigkeit, schnellerem SNGR und weiteren Verbesserungen.

„Actran 19 erweitert den Anwendungsbereich der numerischen Akustiksimulation“, sagt Diego d’Udekem, Geschäftsführer und CEO von Free Field Technologies. „Die neuen SEA-Funktionalitäten eröffnen die vibroakustische Simulation bei mittleren und hohen Frequenzen mit begrenzten Benutzereingaben. Das tonale Geräusch von Lüftern kann nun dank des Blattdesign-Tools komplett in Actran ermittelt werden, oder auch basierend auf stationären CFD-Ergebnissen. Zusammengenommen mit den neuen Möglichkeiten zur Simulation von Verkleidungen, liefert unser Team hier eine gelungene Kombination von mehr Anwenderfreundlichkeit und schnellerer Berechnung.“

### Adams und Vires verbessern virtuelle Echtzeittests autonomer Fahrzeuge

MSC Software (MSC), führender Anbieter von Simulationssoftware und Dienstleistungen, hat die neue Version Adams 2018.1 vorgestellt. Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) ist die am häufigsten eingesetzte Software für die Simulation mechanischer Systeme und Standard in der Mehrkörpersimulation. Entscheidende

# e-LEARNING



Learn Anytime, Anywhere.

Neuheit in Adams 2018.1 ist die Integration mit Vires VTD.

Mit der Software Virtual Test Drive (VTD) von der MSC-Tochterfirma Vires Simulationstechnologie GmbH werden Fahrerassistenzsysteme und aktive Sicherheitssysteme entwickelt und getestet. VTD wirkt dadurch maßgeblich an Lösungen für das autonome Fahren mit. In Adams 2018.1 gibt es eine neue Verbindung zwischen Adams Car und VTD. Damit lässt sich ein Vollfahrzeugmodell aus Adams Car auf einfache Weise in die VTD-Simulationsumgebung importieren, um die Fahrdynamik realistisch abzubilden.

„Wir haben unsere Virtual Test Drive Plattform schon früher mit verschiedenen Fahrzeugdynamik-Plattformen verbunden, doch erst jetzt können wir diese Funktionalität mit der ultimativen, exakten Lösung von Adams ausbauen. Zum ersten Mal präsentieren wir eine Kombination der Goldstandards für Umgebungs- und Fahrzeugsimulation“, sagt Marius Dupuis, Geschäftsführer von Vires.

„Es ist entscheidend für die Simu-

lation selbstfahrender Autos, dass die branchenführenden Simulationslösungen für Fahrdynamik und Fahrzeugumgebung verknüpft sind“, ergänzt Dr. Luca Castignani, Chief Autonomous Driving Strategist bei MSC Software. „Ein hochgenaues Fahrzeugmodell kombiniert mit einer realistischen 3D-Umgebung gibt den Ingenieuren Sicherheit bei der Beurteilung komplexer autonomer Szenarien.“

Außerdem enthält die neue Adams-Version Verbesserungen bei der Rechenleistung und Visualisierung. Während ein Adams Car Modell läuft, kann die Bewegung in Echtzeit angesehen werden. So kann der Anwender die Antwort des Fahrzeugs auf geänderte Modelleingaben animieren. Performance-Steigerungen in Adams Solver und Adams Tire verkürzen die Rechenzeiten.

Durch diese Erweiterungen bietet MSC nun einen vollständigen Workflow für virtuelle Entwicklung, Test und Visualisierung von Fahrerassistenzsystemen. Die Lösung simuliert exakte Echtzeit-Fahrzeugmodelle und physikbasierte Sensormodelle

in einer fotorealistischen Umgebung.

- Mehr Informationen über die neue Version Adams 2018.1:
- [www.mscsoftware.com/events\\_assets/Webcasts/2018\\_Webinars/introducing-adams-20181-real-time-animation-and-vtd-integration.html](http://www.mscsoftware.com/events_assets/Webcasts/2018_Webinars/introducing-adams-20181-real-time-animation-and-vtd-integration.html)
- Mehr Informationen über Adams: [www.mscsoftware.com/de/product/adams](http://www.mscsoftware.com/de/product/adams)
- Mehr Informationen über VTD: [www.mscsoftware.com/de/product/virtual-test-drive](http://www.mscsoftware.com/de/product/virtual-test-drive)
- Mehr Informationen über Vires: [www.vires.com](http://www.vires.com)

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

## NOESIS SOLUTIONS

### Optimus Version 2018.2

Noesis Solutions veröffentlichte die neue Version Optimus 2018.2.

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

## SIEMENS PLM SOFTWARE

### Siemens akquiriert Comsa

Siemens übernimmt die Comsa Computer und Software GmbH. Das Unternehmen mit Sitz in München entwickelt Software für das Design elektrischer Systeme und Bordnetze. Die LDorado-Produktreihe ist in der deutschen Automobilindustrie führend in der Konstruktion von Bordnetzen und im Bereich Engineering-Software. Sie zeichnet sich durch eine starke lokale Kompetenz und Marktpräsenz aus und verfügt über ein bewährtes Produktportfolio mit hohem Fokus auf Standards. Das Comsa -Team und die Technologie werden in den Bereich von Mentor, einer Sparte von Siemens PLM Software, integriert. Dort ergänzen sie das Angebot von Siemens um wichtige Funktionen für die Bordnetztechnik und die Analyse von Konstruktionsdaten.

„Siemens investiert kontinuierlich in Technologien für die Automobilindustrie – die Akquisition von Comsa ist der nächste wichtige Schritt in dieser Strategie“, sagt Tony Hemmelgarn, President und CEO von Siemens PLM Software. „Die Kombination aus den Lösungen und Fachleuten von Siemens und Comsa ist einzigartig im Markt. Gemeinsam werden wir die Entwicklung elektrischer Systeme und Bordnetze auf ein neues Niveau bringen, das den Anforderungen der elektrischen und autonomen Fahrzeugentwicklung gerecht wird. COMSA- und Siemens-Kunden weltweit werden von den tief integrierten technischen Fähigkeiten profitieren.“

Das Institut Bishop and Associates schätzt, dass der weltweite Marktumsatz für die Kabelkonfektion im Jahr 2017 155 Milliarden US-Dollar betrug. Davon stammten etwa 30 Prozent aus der Automobilindustrie. Laut Cowen Research (Stand 19. Oktober 2018) ist „das Bordnetz heute die dritthöchste Kostenkomponente in einem Auto (nach Motor und Fahrwerk). „Kabelbäume werden stückweise erstellt und können etwa 50 Prozent der Arbeitskosten für das gesamte Auto ausmachen. Darüber hinaus ist es die drittschwerste

Komponente (hinter Fahrwerk und Motor). Jede Technologie, die dieses Gewicht reduziert, trägt direkt zur Kraftstoffersparnis bei.“ Mit der Übernahme plant Siemens die weltweite Ausweitung seines Angebotes an Technologien, die Veränderungen in der Bordnetzindustrie durch Megatrends wie autonomes Fahren und Elektrofahrzeuge adressieren. Die Capital-Toolsuite von Siemens, Teil des Portfolios des kürzlich übernommenen Unternehmens Mentor Graphics, reicht von der Entwicklung der elektrischen/elektronischen Architektur über das Design elektrischer Systeme und Service bis hin zur Konstruktion und Herstellung von Bordnetzen. Comsa ergänzt das Angebot um Schlüsseltechnologien in der Bordnetzfertigung und der Analyse von Konstruktionsdaten mit starkem Fokus auf neue Datenstandards, vor allem in Europa.

„Die Übernahme von Comsa durch Siemens eröffnet uns Möglichkeiten und Standorte, um in diesem wachsenden Markt zu agieren, wie wir es allein nicht hätten erreichen können. Die Stärke unserer LDorado-Software im Bereich Bordnetzkonstruktion und -analytik ist die perfekte Ergänzung für das Capital-Portfolio von Mentor. „Wir freuen uns, Teil der bevorstehenden gemeinsamen Reise zu sein“, so Josef Biermeier, CEO von Comsa. „Dieser Zusammenschluss ist ein Gewinn für beide Unternehmen, für unsere Kunden und für die gesamte Automobilindustrie.“

„Wir bewundern das Team von Comsa und die Produkte schon lange. Mit dieser Akquisition bringen wir die komplementären Fähigkeiten der beiden stärksten Akteure der Branche zum Vorteil unserer Kunden zusammen“, ergänzt Martin O'Brien, Senior Vice President, Integrated Electrical Systems der Siemens-Sparte Mentor. „Mit den Technologien von Capital und LDorado gepaart mit der Siemens-Expertise in angrenzenden Bereichen für Konstruktion und Fabrikautomatisierung können wir unsere Kunden noch besser dabei unterstützen, technisch wettbewerbsfähig zu bleiben und die Rentabilität zu steigern.“

Die Transaktion wurde am 3. Dezember 2018 abgeschlossen. Die Bedingungen der Transaktion wurden nicht bekannt gegeben.

### Siemens stellt neue Lösung zur Simulation des additiven Fertigungsprozesses vor

Siemens präsentiert eine neue Prozesssimulationslösung für die additive Fertigung (AM), die den Verzug beim 3D-Druck vorhersagt. Das Produkt ist vollständig in die End-to-End-Lösung von Siemens für die additive Fertigung integriert. Sie unterstützt Anwender dabei, Bauteile maßstabsgetreu zu entwerfen und zu drucken. Basierend auf der umfassenden digitalen Innovationsplattform von Siemens und dem Simcenter-Portfolio simuliert die AM-Prozesssimulationslösung den Bauprozess vor dem Druck, basierend auf einem digitalen Zwilling. Dadurch wird der Verzug im Druckprozess ermittelt; es kann eine kompensierte Geometrie erstellt werden, um die sich im Druck ergebenden Verformungen auszugleichen. Diese Simulation ist von entscheidender Bedeutung für die Realisierung des „print first time right“-Prinzips und notwendig, um die erforderliche Leistungsfähigkeit für einen vollständig industrialisierten additiven Fertigungsprozess zu erreichen.

„Mit der Simcenter 3D Additive Manufacturing-Prozesssimulationslösung können wir bei toolcraft unseren additiven Fertigungsablauf vervollständigen“, sagt Christoph Hauck, Geschäftsführer der MBFZ toolcraft GmbH. „Durch eine Vielzahl von Praxistests können wir mit Sicherheit sagen, dass uns die Lösung dabei unterstützt, hochwertige Ergebnisse während des Druckprozesses sicherzustellen.“

Beim 3D-Metalldruck wird durch das lokale Aufschmelzen der Druckschichten Energie in Form von Wärme in die schichtweise aufgebauten Bauteile eingebracht. Das führt möglicherweise zu strukturellen Problemen innerhalb des gedruckten Bauteils oder sogar zum Druckstopp. Die Konsequenz: viele Drucke schlagen fehl. Die Simulati-

on des Druckprozesses hilft, diese Probleme zu erkennen und frühzeitig zu beheben, um somit beim ersten Druck auf der Maschine erfolgreich zu sein („print first time right“).

Das neue Produkt zur Prozesssimulation von Siemens ist vollständig in die Prozesskette des 3D-Drucks im Pulverbett aus dem Siemens PLM Software Portfolio für additive Fertigung integriert. Es dient zur Vorhersage des Verzugs für den Metalldruck. Der Anwender profitiert von einem geführten Workflow, der den Verzug, Kollisionen mit der Beschichtungseinheit, lokale Überhitzung und weitere wichtige Rückmeldungen zum Druckprozess ermöglicht.

Die Lösung „Simcenter 3D Additive Manufacturing“ ermöglicht die Optimierung des Druckprozesses im Zusammenspiel der Konstruktion, der Druckvorbereitung und der Simulation des Fertigungsprozesses, bevor die Bauteile gedruckt werden. Dieser geschlossene Kreislauf entsteht durch die enge Integration der digitalen Innovationsplattform von Siemens. Die erzeugten Simulationsdaten fließen in den digitalen Informationsfaden ein, der jeden Schritt des Druckprozesses begleitet. Mit diesem digitalen Rückgrat kann das System vorgegebene Modelle entwickeln und diese ohne zusätzliche Datenkonvertierung nahtlos in die Modellierungs- und Fertigungsprozesse zurückspielen. Um bei der Industrialisierung der additiven Fertigung erfolgreich zu sein, brauchen Kunden diesen hohen Integrationsgrad.

Die Lösung ergänzt unsere integrierte Plattform für die additive Fertigung. Sie entwirft und druckt Bauteile maßstabsgetreu und unterstützt unsere Kunden so, die additive Fertigung zu industrialisieren, sagt Jan Leuridan, Senior Vice President für Simulation und Test Solutions bei Siemens PLM Software. „Durch die Kombination aus empirischen und rechnerischen Methoden können wir die Genauigkeit des Simulationsprozesses erhöhen, den digitalen Zwilling mit den notwendigen Daten versorgen und Kunden dabei helfen, bessere Druckergebnisse zu erzie-



**NWC** NAFEMS  
**NAFEMSWORLD CONGRESS 2019**

17-20 JUNE | QUEBEC CITY | CANADA  
**A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION**

incorporating the

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

**Die internationale Konferenz für Berechnung und Simulation in der Produktentwicklung:**

- **Fast 500 eingereichte Abstracts**
- **Keynotes aus Industrie und Hochschule**
- **Trainings**
- **Workshops**
- **Diskussionsrunden**
- **Networking**
- **Informationsaustausch**
- **Große Hard- und Softwareausstellung**
- **Offen für Mitglieder und Nichtmitglieder**

**Das Vortragsprogramm ist ab März 2019 verfügbar.**

**Seien Sie mit dabei! Es gibt nichts vergleichbares!**



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

len. Wir haben das in monatelangen Praxistests mit einigen ausgewählten Unternehmen bewiesen. Dank der korrigierten Geometrie und des geschlossenen Kreislaufs erzielen unsere Kunden letztendlich den „first time right“-Druck in der additiven Fertigung und realisieren weitere Innovationen mit dieser Technologie.“ Die AM-Prozesssimulationslösung wird voraussichtlich im Januar 2019 als Teil der neuesten Version der NX- und Simcenter-3D-Software verfügbar sein. Für weitere Informationen zur Herstellung qualitativer Teile mit industrieller Software für die additive Fertigung, besuchen Sie bitte: [www.siemens.com/plm/additivemanufacturing](http://www.siemens.com/plm/additivemanufacturing).

**Teamcenter unterstützt eCl@ss-Standard zur Optimierung des Datenaustauschs**

Siemens gab bekannt, dass das Teamcenter Portfolio, die am weitesten verbreitete Product Lifecycle Management Software weltweit, ab sofort den eCl@ss-Standard für Klassifizierung und Produktbeschreibung unterstützt. eCl@ss hat sich seit mehr als 18 Jahren international als einzige ISO/IEC-konforme Industrienorm etabliert und ist zum weltweiten Referenzdatenstandard für die Klassifizierung und eindeutige Beschreibung von Produkten und Dienstleistungen geworden. Die Unterstützung eines Standard-Klassifizierungssystems ermöglicht es Anwendern von Teamcenter, Konstruktions-, Beschaffungs-, Lager-, Produktions- und Vertriebsaktivitäten in und zwischen Unternehmen zu standardisieren, und zwar branchen-, länder- und sprachübergreifend. Dieser standardisierte Datenaustausch trägt zur Verbesserung der Datenqualität bei, vereinfacht den Beschaffungsprozess und senkt die Kosten der Kunden durch die wirtschaftliche und effiziente Integration von PLM-Produktdaten in Customer Supplier-Relationship-Management- (SRM) und Customer-Relationship-Management-Systeme (CRM). Siemens PLM Software ist einer der ersten großen PLM-Anbieter, der den eCl@ss-Standard für einen umfassenden PLM-Einsatz

unterstützt.

„Eine gemeinsame „Sprache“ ist ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Digitalisierung und kann dazu beitragen, Fehler im Informationsaustausch mit unseren Kunden und Lieferanten zu minimieren“, sagt Robert Jung, Leiter des Intelligent Data Logistics Program der Siemens AG. „Die Unterstützung von eCl@ss-Infrastrukturen durch Teamcenter bietet vielfältige und produktive Vorteile innerhalb unserer Prozesse. Wir werden nicht nur in der Lage sein, Produktinformationen, die in Teamcenter gehostet werden, nach internationalen Standards zu pflegen und bereitzustellen, sondern auch eine Standardstruktur zu schaffen, um Informationen über Komponenten auf der Fertigungsseite zu importieren.“ In der gegenwärtigen PLM-Umgebung bestimmen die Kunden ihre individuelle Systematik und ihre Kategorien. Das bietet eine maximale Flexibilität und die Möglichkeit, so gut wie alles zu klassifizieren, einschließlich Bauteile, Dokumente und Prozesse. Dieses offene System erzeugt allerdings Daten in verschiedenen Formaten. Das kann zu Verlusten von Informationen bei der Übersetzung, zu unvernetzten und ineffizienten Systemen und letztlich zu höheren Kosten und geringerer Qualität führen. Der Einsatz von eCl@ss kann den Austausch geschäftlicher Daten rationalisieren, indem sichergestellt wird, dass Kunden und Lieferanten die gleiche „Sprache“ sprechen.

Das ist besonders in komplexen Lieferketten wichtig: Geschäftspartner benötigen hier die Möglichkeit, dieselben Informationen, die auf die gleiche Weise gekennzeichnet sind, entlang der gesamten Wertschöpfungskette von SCM-, PLM- und CRM-Systemen auszutauschen. Detaillierte spezifische Komponenten, die über den eCl@ss-basierten Datenaustausch übertragen werden,

tragen dazu bei, dass Simulationen physische Produkte genauer modellieren, da der digitale Zwilling während des gesamten Produktlebenszyklus definiert und validiert wird. Die Verwendung eines integrierten Systems auf einem einzigen Standard ist ein entscheidender Faktor bei der Realisierung einer ganzheitlichen digitalen Unternehmensvision. „Als eines der ersten PLM-Systeme, das eCl@ss für den digitalen Datenaustausch unterstützt, hilft Teamcenter dabei, Datenaustauschprozesse über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg zu optimieren. So lässt sich letztendlich ein stabiler digitaler Zwilling schaffen“, sagt Joe Bohman, Senior Vice President of Lifecycle Collaboration Software bei Siemens PLM Software. „Alle Anwender von Teamcenter können von unserer neuen Klassifizierungssystem profitieren, die nicht nur eCl@ss unterstützt, sondern auch mehr Flexibilität und Leistung in allen Bereichen bietet. Wir freuen uns darauf, unseren Kunden dabei zu helfen, das kombinierte Potenzial von eCl@ss und Teamcenter zu nutzen, um besser vernetzte Systeme zu betreiben.“

Teamcenter wird weiterhin sowohl das traditionelle als auch das neue Klassifizierungssystem eCl@ss innerhalb der neuen Engine Teamcenter for eCl@ss Data Management unterstützen. Zudem trägt die Software dazu bei, Daten nahtlos in das neue System zu migrieren, sobald die Kunden dazu bereit sind. Die Verwendung dieser Funktion innerhalb der Active Workspace für Teamcenter-Software bietet eine verbesserte Benutzerfreundlichkeit und Flexibilität. Zudem ermöglicht sie es Kunden, die Klassifizierungshierarchie eCl@ss sofort zu nutzen. Teamcenter für eCl@ss Datenmanagement in Active Workspace ist für Ende Frühjahr 2019 geplant.

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

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

<b>4a Technologietag</b>				4a engineering
26.-27.02.	Schladming, A	<a href="http://technologietag.4a.co.at/">http://technologietag.4a.co.at/</a>		
<b>NAFEMS Kurs:</b>	<b>Master Course V&amp;V: Verification and Validation in Engineering Simulation – Building Simulation Credibility in an Industrial Context</b>			
26.-27.03.	Wiesbaden, D	<a href="http://www.nafems.org/events/nafems/2019/vandv1/">www.nafems.org/events/nafems/2019/vandv1/</a>		
<b>NAFEMS Seminar:</b>	<b>Werkstoffeigenschaften in der Strukturberechnung – Modellierung, Kalibrierung, Simulation &amp; Optimierung</b>			
27.-28.03.	Dresden, D	<a href="http://www.nafems.org/werkstoffe19">www.nafems.org/werkstoffe19</a>		
<b>Hannover Messe</b>				
01.-05.04.	Hannover, D	<a href="http://www.hannovermesse.de">www.hannovermesse.de</a>		Hannover Messe
<b>Permas Technologietag</b>				
11.04.	Stuttgart, D	<a href="http://www.intes.de">www.intes.de</a>		Intes
<b>automotive CAE Grand Challenge</b>				
16.-17.04.	Hanau, D	<a href="http://www.carhs.de">www.carhs.de</a>		Carhs
<b>Int. Femfat User Meeting</b>				
08.-09.05.	Steyr, A	<a href="http://www.femfat.magna.com">www.femfat.magna.com</a>		Magna
<b>VI-grade Conference</b>				
13.-14.05.	Hanau, D	<a href="http://www.vi-grade.com">www.vi-grade.com</a>		VI-grade
<b>European LS-DYNA Conference</b>				
14.-16.05.	Koblenz, D	<a href="http://www.dynamore.de">www.dynamore.de</a>		DYNAmore
<b>Safety Week</b>				
14.-16.05.	Würzburg, D	<a href="http://www.carhs.de">www.carhs.de</a>		Carhs
<b>Before Reality Conference</b>				
20.-22.05.	München, D	<a href="http://www.beta-cae.com">www.beta-cae.com</a>		BETA CAE Systems
<b>Composites Convention</b>				
12.-13.06.	Stade, D	<a href="http://www.carbon-composites.eu">www.carbon-composites.eu</a>		CFK Valley
<b>Automatisierte Fertigung im Bauwesen von Bauteilen mit Polymermatrix und Betonmatrix</b>				
13.06.	Innsbruck, A	<a href="http://www.carbon-composites.eu">www.carbon-composites.eu</a>		CCeV
<b>NAFEMS World Congress inc. the Int. SPDM Conference</b>				
17.-20.06.	Quebec City, CAN	<a href="http://www.nafems.org/congress">www.nafems.org/congress</a>		



**NWC** NAFEMS  
**2019**  
 NAFEMSWORLDCONGRESS  
 17-20 JUNE | QUEBEC CITY | CANADA  
 A WORLD OF ENGINEERING SIMULATION

incorporating the

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

**NAFEMS Seminar:** **Konstruktionsnahe CFD-Berechnung**  
 11.-12.11. Wiesbaden, D [www.nafems.org](http://www.nafems.org)

**NAFEMS Seminar:** **Simulation von Elektromotoren**  
 13.-14.11. Wiesbaden, D [www.nafems.org](http://www.nafems.org)

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

# Instabilitätsprobleme bei der impliziten transienten FEM-Simulation schnell rotierender elastischer Strukturen – Beschreibung des Phänomens und Lösungsmöglichkeiten

Markus Kober, Arnold Kühhorn  
Lehrstuhl für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen,  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

Akin Keskin  
Rolls-Royce plc, Derby, UK

Insbesondere für Triebwerkshersteller hat die thermomechanische FE-Simulation von schnell rotierenden elastischen Strukturen eine große Bedeutung. Dabei ist beispielsweise die Berechnung des Spaltverhaltens, also die Größe des Luftspalts zwischen Schaufelspitze und Gehäuse besonders wichtig für die Vorhersage der Gesamtperformance des Triebwerks. Um dieses Spaltverhalten über einen längeren Zeitraum von mehreren Sekunden unter gewissen Flugbedingungen zu simulieren, muss auf implizite Zeitintegrationsverfahren zurückgegriffen werden, da explizite Verfahren aufgrund der extrem kleinen Zeitschrittweiten zu viel Rechenzeit benötigen.

Es ist bekannt, dass es im Zusammenhang mit der impliziten Simulation elastischer rotierender Strukturen zu unerwünschten Instabilitätsphänomenen kommen kann, welche nicht nur bei komplexen Strukturen, sondern auch schon bei einfachsten Balkenmodellen auftreten. Wir wollen hier den Grund für diese Instabilitätsprobleme klären, welche nicht, wie vielleicht zu vermuten, im Zeitintegrationsverfahren liegen, und einfache Lösungsmöglichkeiten aufzeigen.

## 1 Einleitung

Mit der ständig steigenden verfügbaren Rechenleistung steigen auch die Anforderungen an die Simulationsmodelle. Neben der Tatsache, dass immer mehr Bauteile und Strukturen immer detaillierter modelliert werden, steigt gleichzeitig oftmals auch die Länge der Simulationszeiten, um einen besseren Überblick über das Strukturverhalten zu bekommen. Auch Triebwerkshersteller gehen dazu über, ihre klassischen „Whole-Engine-Modelle“ durch extrem detaillierte thermomechanische Gesamttriebwerksmodelle zu ergänzen und möglicherweise eines Tages zu ersetzen. Derartige Modelle enthalten kaum noch Vereinfachungen oder Idealisierungen der realen Struktur (Abb. 1) und weisen mehrere Millionen Freiheitsgrade auf. Ziel ist eine möglichst realitätsnahe Simulation des Triebwerksverhaltens, insbesondere im Hinblick auf die sich ergebenden Deformationen, unter verschiedenen Flugbedingungen.

Die aus entsprechenden CFD-Berechnungen entnommenen Drücke und Temperaturen versetzen dabei den Rotor in eine Drehbewegung. Gewünscht ist hierbei eine Simulationszeit im Bereich von mehreren Sekunden. Eine FE-Berechnung mit expliziter Zeitintegration würde hierbei zu Rechenzeiten von mehreren Monaten bzw. Jahren führen, auch auf Großrechnern mit tausenden von Rechenkernen. Implizite Zeitintegrationsverfahren ermöglichen wesentlich größere Zeitschrittweiten als explizite Verfahren, führen aber im Gegensatz zu expliziten Verfahren auf im Allgemeinen nichtlineare Gleichungssysteme, die anschließend z.B. durch ein Newton- oder Quasi-Newton-Verfahren gelöst werden müssen.

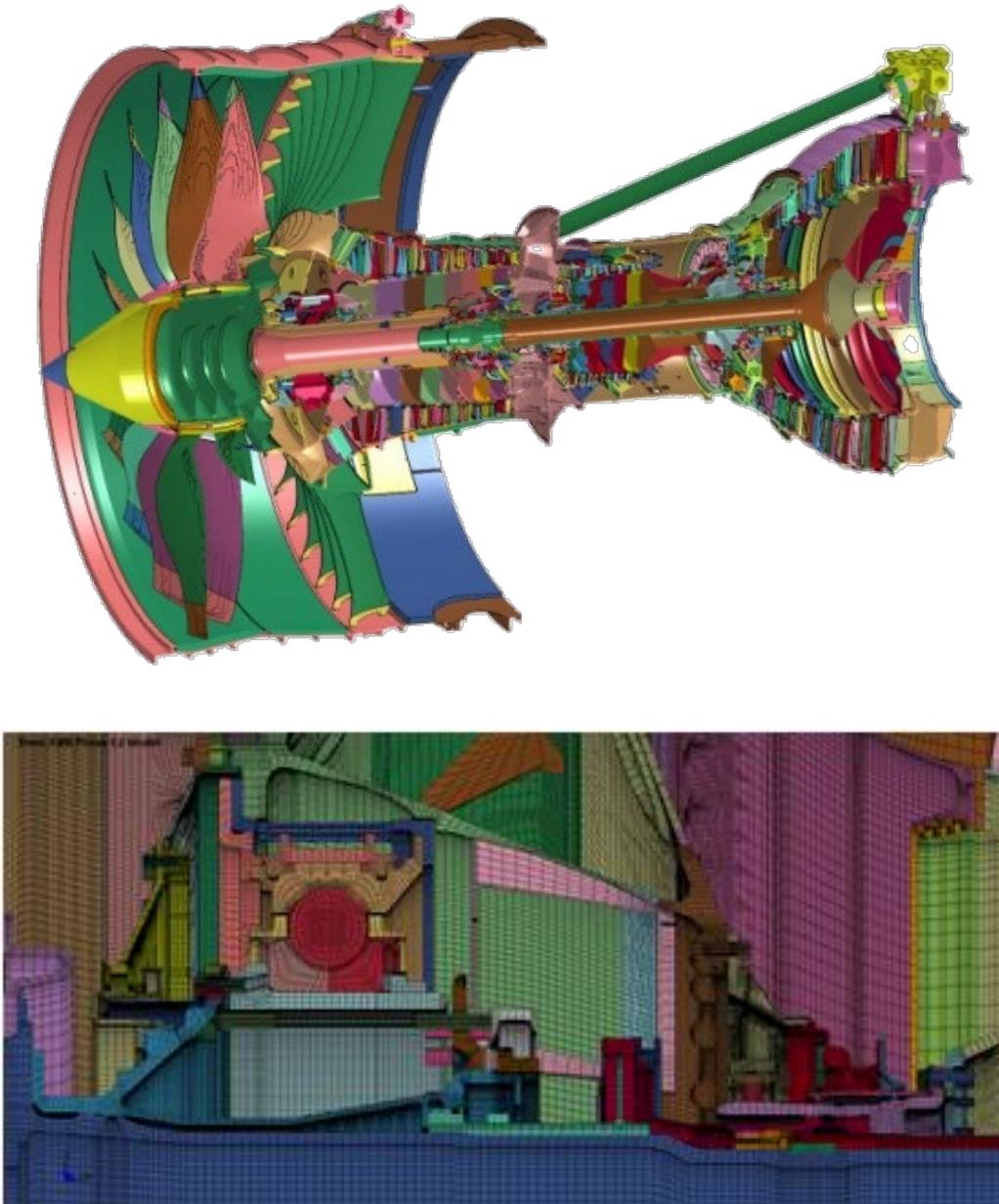


Abb. 1: Extrem detailliertes Gesamttriebwerksmodell

## 2 Impliziter Lösungsprozess

Im Allgemeinen lässt sich ein dynamisches FEM-Problem mit Hilfe der Bewegungsgleichung

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

beschreiben. Hierbei ist  $M$  die Massenmatrix,  $D$  die Dämpfungsmatrix,  $K$  die Steifigkeitsmatrix,  $F$  der Vektor der äußeren Lasten und  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$ , und  $x$  die Vektoren der unbekanntenen Beschleunigungen, Geschwindigkeiten bzw. Verschiebungen. Oftmals sind die Steifigkeitsmatrix sowie der Vektor der äußeren Lasten zeit- und ortsabhängige Größen. Um dieses nichtlineare Differentialgleichungssystem zu lösen, muss zunächst integriert werden. Dies geschieht numerisch mit Hilfe eines geeigneten Verfahrens. In kommerziellen FE-Umgebungen kommt hierfür in der Regel das Newmark-Verfahren [1] oder davon abgeleitete Verfahren, wie z.B. der HHT-Algorithmus [2], zum Einsatz. Bei Verwendung des klassischen Newmark-Verfahrens werden gemäß [1] die folgenden Ersetzungen für die unbekanntenen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten des nächsten Zeitschritts  $n+1$  genutzt:

$$\ddot{x}_{n+1} = \frac{-2x_n + 2x_{n+1} + \Delta t(-2\dot{x}_n + (2\beta - 1)\Delta t\ddot{x}_n)}{2\beta\Delta t^2} \quad (2a)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \frac{2\beta\Delta t(\dot{x}_n + \Delta t\ddot{x}_n) - \gamma(2x_n - 2x_{n+1} + 2\Delta t\dot{x}_n + \Delta t^2\ddot{x}_n)}{2\beta\Delta t} \quad (2b)$$

Setzt man die Gleichungen (2) in (1) ein, führt dies aufgrund der Orts- und Zeitabhängigkeit, beispielsweise der Steifigkeitsmatrix und des Vektors der äußeren Lasten, auf ein nichtlineares Gleichungssystem bezüglich  $x_{n+1}$ . Dieses muss anschließend gelöst werden, wozu normalerweise mehrere Gleichgewichtssimulationen notwendig sind. Die mit  $n$  indizierten Größen sind aus dem vorherigen Zeitschritt bekannt,  $\Delta t$  ist die Zeitschrittweite und  $\gamma$  bzw.  $\beta$  sind Parameter des Newmark-Verfahrens, welche u.a. die numerische Dämpfung beeinflussen. Typischerweise wählt man  $\gamma=0,5$  und  $\beta=0,25$ .

Das nichtlineare Gleichungssystem kann dann z.B. mit einem Newton-Verfahren oder einem Quasi-Newton-Verfahren gelöst werden. Zu den Quasi-Newton-Verfahren, welche häufig in FE-Systemen Verwendung finden, gehört zum Beispiel das Verfahren nach Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS-Verfahren) [3,4,5,6]. Im Gegensatz zum klassischen Newton-Verfahren werden bei Quasi-Newton-Verfahren die benötigten Ableitungen approximiert, was je nach Problemstellung zwar Vorteile hinsichtlich der Rechenzeit bringen kann, jedoch auch mehr Speicherplatz beansprucht und mehr Iterationen benötigt. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass bei FE-Problemen mit rotierenden Strukturen Newton-Verfahren gegenüber Quasi-Newton-Verfahren im Vorteil sind, weswegen in den folgenden Betrachtungen immer ein Newton-Verfahren (auch Full-Newton-Verfahren genannt) verwendet wird.

### 3 Implizite Simulation rotierender elastischer Strukturen

Bevor wir uns komplexeren Strukturen widmen, soll das Problem der Instabilitäten an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden. Dazu betrachten wir eine quadratische Platte mit den Abmaßen 200x200x10mm (siehe Abb. 2, links). Die Platte besteht aus einem linear elastischen Material mit  $E = 115000\text{N/mm}^2$ ,  $\nu = 0,32$  und  $\rho = 4,429 \cdot 10^{-9}\text{t/mm}^3$ . Die Platte ist in ihrer Mitte so gelagert, dass dort alle translatorischen Freiheitsgrade gesperrt sind. Somit ist nur noch eine Rotation um eine Achse möglich. An den Ecksegmenten der Platte werden Drucklasten aufgebracht, die der Rotation folgen und deren zeitlicher Verlauf durch die Kurve in Abb. 2 (rechts) beschrieben ist.

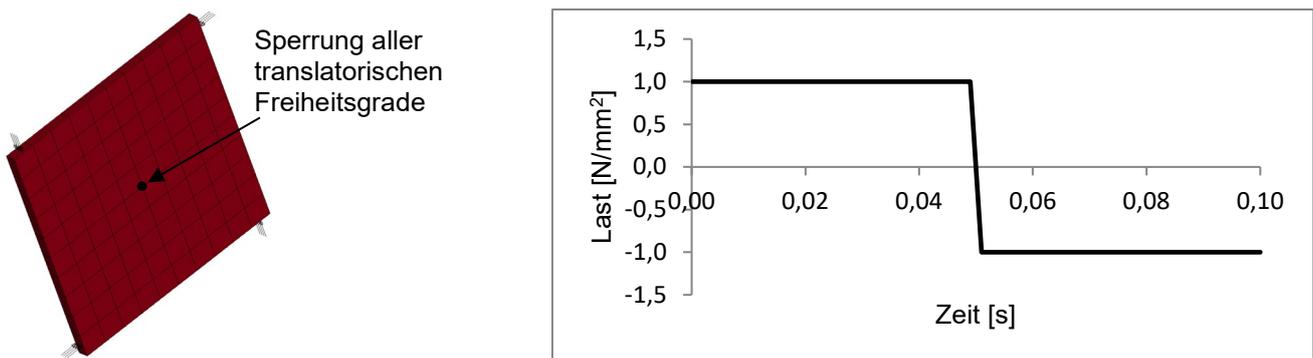


Abb. 2: Rotierende Platte (links) und Lastverlauf (rechts)

Zu Beginn der transienten dynamischen Simulation befindet sich die Platte in Ruhe. Infolge des definierten Lastverlaufs ist hinsichtlich der Rotationsgeschwindigkeit der Platte eigentlich mit einer linear ansteigenden Geschwindigkeit bis zu einem Zeitpunkt von etwa  $t = 0,05\text{s}$  und anschließend mit einem linearen Abfall der Geschwindigkeit auf 0 bei  $t = 0,1\text{s}$  zu rechnen. Die Simulation erfolgt mit dem klassischen Newmark-Verfahren zur Zeitintegration und einem Newton-Algorithmus zur Lösung der nichtlinearen Gleichungssysteme. Die Zeitschrittweite ist konstant und beträgt  $\Delta t = 0,001\text{s}$ . In Abb. 3 ist der Verlauf der Rotationsgeschwindigkeit der Plat-

te als Ergebnis der Simulation mit verschiedenen Parameterwahlen für  $\gamma$  und  $\beta$  dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Simulation mit den Standard-Newmark-Parametern  $\gamma=0,5$  und  $\beta=0,25$  zu einem instabilen Verhalten mit extrem hohen Geschwindigkeiten führt, woraus letztlich ein Abbruch der Rechnung resultiert. Durch eine Erhöhung der numerischen Dämpfung mit  $\gamma=0,55$  und  $\beta=0,2756$  lässt sich die Rechnung stabilisieren, jedoch erscheint der errechnete Geschwindigkeitsverlauf unphysikalisch und entspricht nicht dem erwarteten Ergebnis. Eine weitere Änderung der Newmark-Parameter auf  $\gamma=0,5$  und  $\beta=0,2756$  führt auf eine stabile und plausible Lösung.

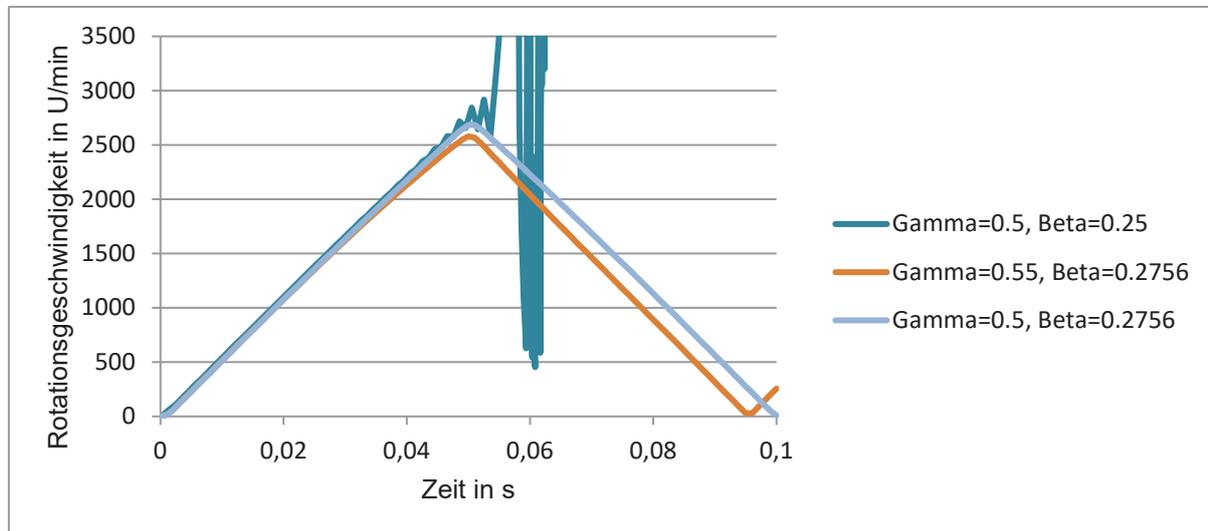


Abb. 3: Simulierte Rotationsgeschwindigkeit der Platte für verschiedene Parameterwahlen des Newmark-Algorithmus

Man könnte nun meinen, das Instabilitätsproblem sei durch die korrekte Wahl der Newmark-Parameter zu beheben. Dem ist allerdings nicht so, da die Wahl der Newmark-Parameter zur Vermeidung der Instabilität problemspezifisch ist. Bei einer leichten Modifizierung des Modells ergeben sich auch bei Wahl von  $\gamma=0,5$  und  $\beta=0,2756$  wieder Instabilitätseffekte. Dies trifft erst recht auf komplexere Strukturen zu, wie in Abb. 4 zu sehen ist. Hier ist die Rotationsgeschwindigkeit einer vereinfachten Turbinenstufe als Ergebnis einer ähnlichen Simulation dargestellt. Durch eine linear ansteigende Druckbeaufschlagung der Turbinenblätter wird mit einer quadratisch ansteigenden Rotationsgeschwindigkeit gerechnet. Das Modell ist am äußeren Rahmen fest eingespannt und im Bereich des Lagers gibt es Kontaktdefinitionen. Offenbar erscheint auch hier das Phänomen der Instabilitäten.

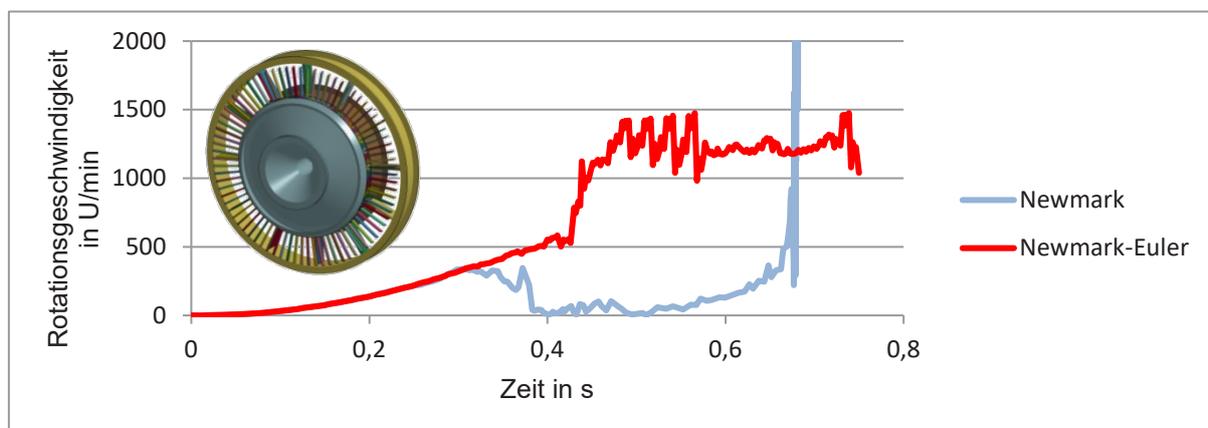


Abb. 4: Simulierte Rotationsgeschwindigkeit einer vereinfachten Turbinenstufe mit Auftreten von Instabilitäten

Auch bei Verwendung einer variablen Zeitschrittweite durch eine automatische Zeitschrittweitensteuerung treten die Instabilitäten auf, lediglich deren Beginn kann sich etwas verschieben.

Die Instabilitätsprobleme bei der impliziten Simulation elastischer rotierender Strukturen sind in der Literatur bereits beschrieben [7,8,9,10,11,12]. In [10] wird beispielsweise ein verbessertes Zeitintegrationsverfahren vorgeschlagen (Newmark-3-Punkt-Euler-Rückwärts-Verfahren, kurz Newmark-Euler-Verfahren), um dem Problem zu begegnen. Allerdings treten auch bei Verwendung dieses Verfahrens Instabilitäten für das Turbinenmodell auf, wie Abb. 4 zu entnehmen ist.

#### 4 Stabilitätsbetrachtungen von impliziten Zeitintegrationsverfahren

Als mögliche Quelle der Instabilitäten kommt natürlich auch das Zeitintegrationsverfahren selber in Betracht. Beispielsweise weiß man von expliziten Verfahren, dass eine gewisse kritische Zeitschrittweite nicht überschritten werden darf, da die Lösung sonst ins Unendliche wächst. Ähnliches kann auch für implizite Verfahren gelten, wenn deren Parameter entsprechend ungünstig gewählt werden.

In [13] wird eine Möglichkeit der Stabilitätsanalyse beschrieben. Dafür müssen die das Integrationsverfahren beschreibenden Gleichungen so umgeformt werden, dass sie die Beziehung

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{n+1} \\ \dot{x}_{n+1} \\ x_{n+1} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_n \\ \dot{x}_n \\ x_n \end{bmatrix} + \mathbf{L}_{n+1} r \tag{3}$$

erfüllen. Das Integrationsverfahren selber wird dabei durch die Matrix  $\mathbf{A}$  beschrieben (in der auch das zugrunde liegende mechanische Problem steckt),  $\mathbf{L}$  ist ein Lastoperator und  $r$  beschreibt die äußere Last. Das Stabilitätskriterium sagt nun aus, dass ein Integrationsverfahren unbedingt stabil ist, falls der spektrale Radius  $\rho$  der Matrix  $\mathbf{A}$  für alle Zeitschrittweiten kleiner oder gleich eins ist:

$$\rho(\mathbf{A}) \leq 1. \tag{4}$$

Für die Stabilitätsanalyse kann man als mechanisches Problem ein einfaches Beispielproblem, wie z.B. eine freie ungedämpfte Schwingung, nutzen, was den Vorteil bietet, dass die externe Last  $r$  zu null wird:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0. \tag{5}$$

In Abb. 5 ist der spektrale Radius der Matrix  $\mathbf{A}$  (also der betragsmäßig größte Eigenwert) für verschiedene Zeitintegrationsverfahren über der mit Hilfe der Periodendauer  $T$  normierten Zeitschrittweite  $\Delta t/T$  dargestellt. Offenbar ist der spektrale Radius des Newmark-Verfahrens, wie auch der anderen Verfahren, für alle Zeitschrittweiten kleiner oder gleich eins. Somit kann das Zeitintegrationsverfahren nicht die Quelle für die beobachtete Instabilität sein.

Es sei noch angemerkt, dass das genutzte Verfahren zur Stabilitätsbetrachtung nur für lineare Problemstellungen, also kleine Deformationen zulässig ist. Die genutzten Zeitschrittweiten sind jedoch so klein, dass die Deformationen zwischen zwei Zeitschritten als klein angesehen werden können. Darüber hinaus wird in [14] mit Hilfe von Stabilitätskriterien aus der Regelungstechnik gezeigt, dass das Newmark-Verfahren bei Nutzung der Standardparameter auch für nichtlineare Problemstellungen immer unbedingt stabil ist.

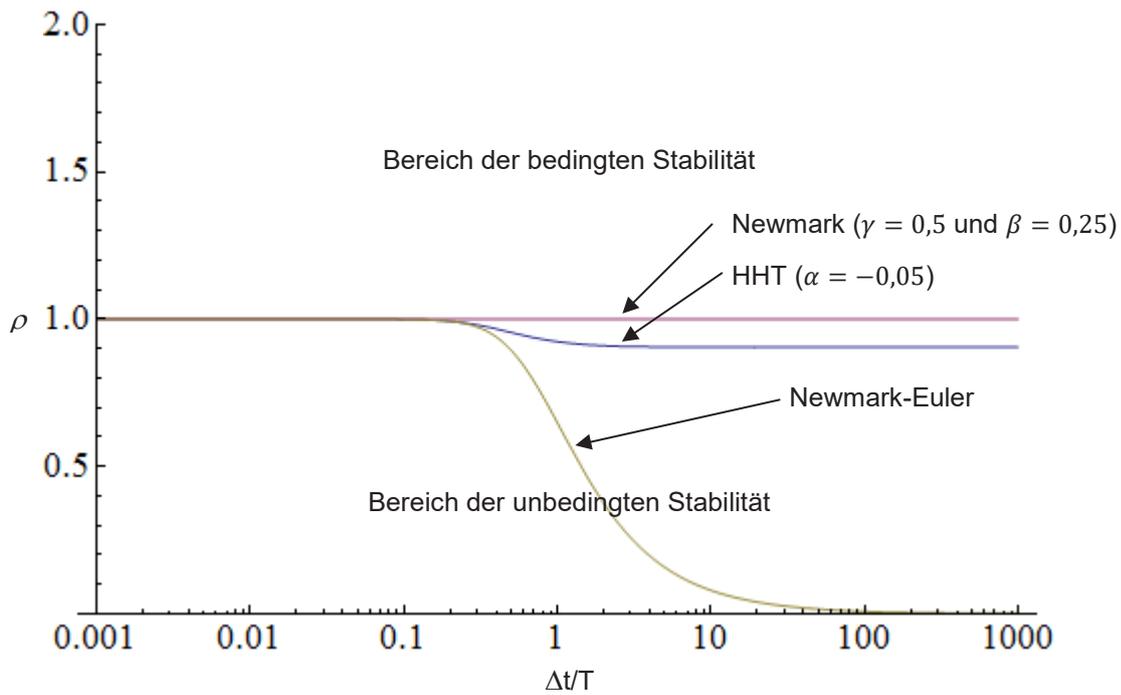


Abb. 5: Stabilitaetskarte für das Newmark-, HHT- und Newmark-Euler-Zeitintegrationsverfahren

### 5 Elastisches rotierendes Pendel

Um der Ursache für die beschriebenen Instabilitäten auf den Grund zu gehen, soll nun ein möglichst einfaches mechanisches Problem betrachtet werden, ein elastisches rotierendes Pendel unter Vernachlässigung der Gravitation (Abb. 6, links).

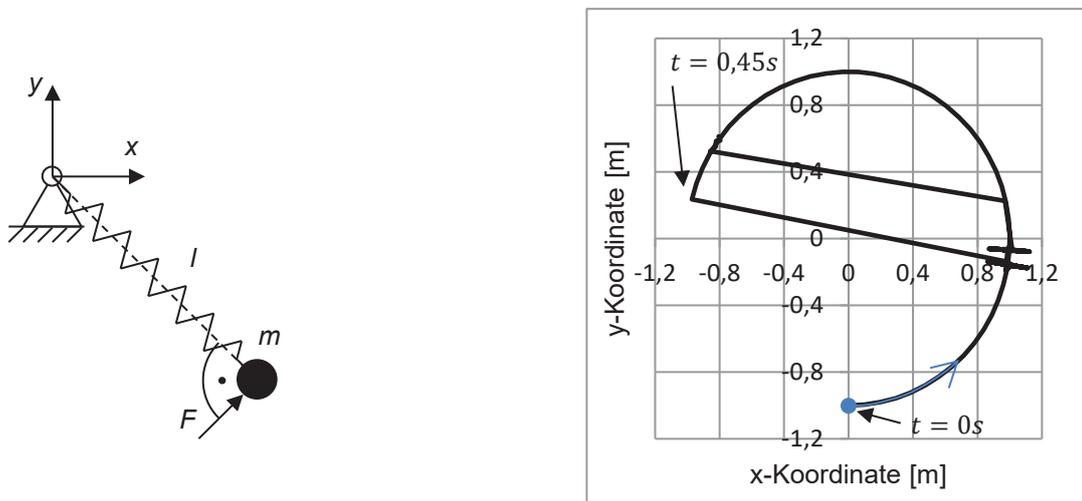


Abb. 6: Rotierendes elastisches Pendel (links) und Darstellung des Verlaufs der Simulation von x- und y-Koordinate des Massenpunktes bis zum Einsetzen der Instabilität [15]

Üblicherweise würde man die Bewegungsgleichungen für solch eine Struktur mit Hilfe von Polarkoordinaten aufstellen. Jedoch arbeiten FE-Programme mit kartesischen Koordinaten, und um das Auftreten der Instabilitäten nachvollziehen zu können, müssen daher auch die Bewegungsgleichungen in kartesischen Koordinaten aufgestellt werden:

$$m\ddot{x} + F \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} + kx \cdot \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - l_0}{\sqrt{x^2 + y^2}} = 0 \quad (6a)$$

$$m\ddot{y} - F \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} + ky \cdot \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - l_0}{\sqrt{x^2 + y^2}} = 0. \quad (6b)$$

Hierbei ist  $k$  die Federsteifigkeit und  $l_0$  die unausgelenkte Federlänge. Nimmt man aus Gründen der Einfachheit  $m = 1kg$  und  $F = 0N$  an, so vereinfachen sich die Gleichungen (6) zu

$$\ddot{x} + kx \cdot \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - l_0}{\sqrt{x^2 + y^2}} = 0 \quad (7a)$$

$$\ddot{y} + ky \cdot \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - l_0}{\sqrt{x^2 + y^2}} = 0. \quad (7b)$$

Dieses Differentialgleichungssystem soll nun mit Hilfe des Newmark-Zeitintegrationsverfahrens und einem Newton-Algorithmus gelöst werden. Hierzu ersetzt man zunächst die Beschleunigungen in (7) durch die Newmark-Ersetzungen aus (2a) und erhält:

$$f_x = \frac{-2x_n + 2x_{n+1} + \Delta t(-2\dot{x}_n + (2\beta - 1)\Delta t\ddot{x}_n)}{2\beta\Delta t^2} + kx_{n+1} \frac{\sqrt{x_{n+1}^2 + y_{n+1}^2} - l_0}{\sqrt{x_{n+1}^2 + y_{n+1}^2}} = 0 \quad (8a)$$

$$f_y = \frac{-2y_n + 2y_{n+1} + \Delta t(-2\dot{y}_n + (2\beta - 1)\Delta t\ddot{y}_n)}{2\beta\Delta t^2} + ky_{n+1} \frac{\sqrt{x_{n+1}^2 + y_{n+1}^2} - l_0}{\sqrt{x_{n+1}^2 + y_{n+1}^2}} = 0 \quad (8b)$$

mit den Verschiebungen  $x_n, y_n$ , Geschwindigkeiten  $\dot{x}_n, \dot{y}_n$  und Beschleunigungen  $\ddot{x}_n, \ddot{y}_n$  des gegenwärtigen Zeitschritts und den Verschiebungen  $x_{n+1}, y_{n+1}$  des nächsten Zeitschritts. Für die Lösung des in (8) gegebenen nichtlinearen Gleichungssystems kommt nun ein einfaches Newton-Verfahren mit der Iterationsvorschrift

$$\begin{bmatrix} x_{n+1}^{k+1} \\ y_{n+1}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{n+1}^k \\ y_{n+1}^k \end{bmatrix} - J^{-1}(x_{n+1}^k, y_{n+1}^k) \cdot \begin{bmatrix} f_x(x_{n+1}^k, y_{n+1}^k) \\ f_y(x_{n+1}^k, y_{n+1}^k) \end{bmatrix} \quad \text{mit } J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x_{n+1}} & \frac{\partial f_x}{\partial y_{n+1}} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x_{n+1}} & \frac{\partial f_y}{\partial y_{n+1}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

zur Anwendung. Als Konvergenzkriterium für das Newton-Verfahren wird die Bedingung

$$\begin{bmatrix} f_x(x_{n+1}^{k+1}, y_{n+1}^{k+1}) \\ f_y(x_{n+1}^{k+1}, y_{n+1}^{k+1}) \end{bmatrix} < 10^{-5} \quad (10)$$

verwendet. Die Anfangsbedingungen sind  $x(0) = 0m$ ,  $y(0) = -l(0)$ ,  $\dot{x}(0) = v_0 = 10 m/s$ ,  $\dot{y}(0) = 0 m/s$  und  $\ddot{x}(0) = 0 m/s^2$ ,  $\ddot{y}(0) = k \cdot (l(0) - l_0)$ . Für  $l_0 = 1m$  und eine Federsteifigkeit von  $k = 10^7 N/m$  ergibt sich infolge der Zentrifugalkraft eine initiale Federlänge von

$$l(0) = \frac{l_0}{2} + \sqrt{\frac{l_0^2}{4} + \frac{mv_0^2}{k}} = 1,00001m. \quad (11)$$

Nun wird zunächst eine Zeitschrittweite von  $\Delta t = 0.01s$  gewählt. In Kombination mit den Standard-Newmark-Parametern  $\gamma=0,5$  und  $\beta=0,25$  ergibt sich das in Abb. 6 (rechts) dargestellte Ergebnis. Der Massenpunkt bewegt sich zunächst, wie erwartet in Richtung des blauen Pfeils, auf einer Kreisbahn, bevor plötzlich kurz vor Vollendung eines dreiviertel Umlaufs die Lösung springt und infolgedessen instabil wird. Um dieses ungewöhnliche Verhalten zu erklären, ist es sinnvoll, sich die numerische Situation kurz vor Auftreten der Instabilität zum Zeitpunkt  $t = 0,46s$  anzuschauen. In Tabelle 1 sind alle relevanten Variablenwerte zum Zeitpunkt  $t = 0,45s$  aufgeführt.

Variable	Wert
$\beta$	0,25
$\Delta t$	0,01 s
$k$	$10^7$ N/m
$x_n$	-0,9717077973201222 m
$y_n$	0,23614647740490619 m
$\dot{x}_n$	-2,3517560831270767 m/s
$\ddot{x}_n$	-91,33130927254165 m/s <sup>2</sup>

Tab. 1: Relevante Variablenwerte zum Zeitpunkt  $t = 0,45s$  vor Einsetzen der Instabilität

Mit den in Tabelle 1 gegebenen numerischen Werten ist es nun möglich, zum Beispiel die Funktion  $f_x(x_{n+1}, y_{n+1})$  aus Gleichung (8a) zu plotten (Abb. 7).

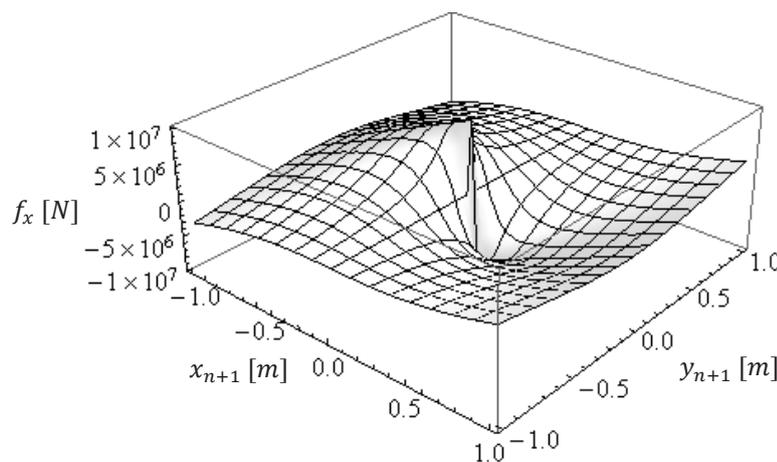


Abb. 7: Darstellung der Funktion  $f_x(x_{n+1}, y_{n+1})$  zum Zeitpunkt  $t = 0,45s$  [15]

Aufgabe des Newton-Verfahrens ist es nun, die Nullstelle(n) der Funktion  $f_x(x_{n+1}, y_{n+1})$  (und natürlich auch  $f_y(x_{n+1}, y_{n+1})$ ) zu bestimmen, welche die Lösungen  $x_{n+1}$  und  $y_{n+1}$  des gegenwärtigen Zeitschritts darstellen. Um die in Abb. 7 dargestellte Funktion besser zu verstehen, ist in Abb. 8 ein Schnitt durch die Funktion  $f_x$  an der Stelle  $y_{n+1}=y_n$  abgebildet. Offenbar gibt es mehr als eine Nullstelle. Die Instabilität entsteht nun dadurch, dass das Newton-Verfahren in die falsche Nullstelle und damit einen falschen Gleichgewichtszustand konvergiert. Erwarten würde man eine Lösung in der Nähe von  $x_{n+1} \approx -1$ , das Verfahren konvergiert jedoch bei  $x_{n+1} \approx +1$ . Dies erklärt den „Sprung“ der x-Koordinate in Abb. 6 (rechts).

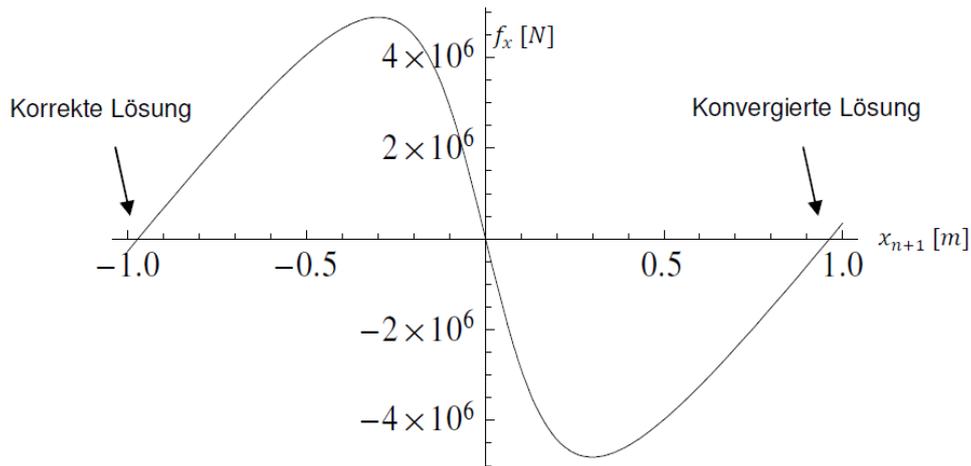


Abb. 8: Darstellung der Funktion  $f_x(x_{n+1}, y_{n+1})$  zum Zeitpunkt  $t = 0,45s$  für  $y_{n+1}=y_n$  mit korrekter (erwarteter) und konvergierter Lösung [15]

Es stellt sich nun die Frage, warum das Newton-Verfahren in einen falschen Gleichgewichtszustand konvergiert. Die Antwort hierauf lässt sich erahnen, wenn man nochmals Abb. 8 betrachtet. Im Bereich zwischen  $-1 \leq x_{n+1} \leq 1$  ist der Anstieg der Funktion  $f_x$  extrem steil. Werden bei der Berechnung dieses Anstiegs innerhalb des Newton-Verfahrens auch nur kleine Fehler gemacht, die aufgrund der Numerik immer entstehen, so hat dies große Auswirkungen auf die Lösung für die jeweilige Newton-Iteration bezüglich  $x_{n+1}$ .

Die Instabilität ist auch für das Beispiel des rotierenden elastischen Pendels im Geschwindigkeitsdiagramm zu erkennen (Abb. 9). Wegen der unphysikalisch großen Verschiebung, die sich aus den aufeinanderfolgenden Lösungen  $x_n$  und  $x_{n+1}$  ergibt, erhält man auch eine dramatische Änderung in der Geschwindigkeit des Pendels ab  $t = 0,46s$ .

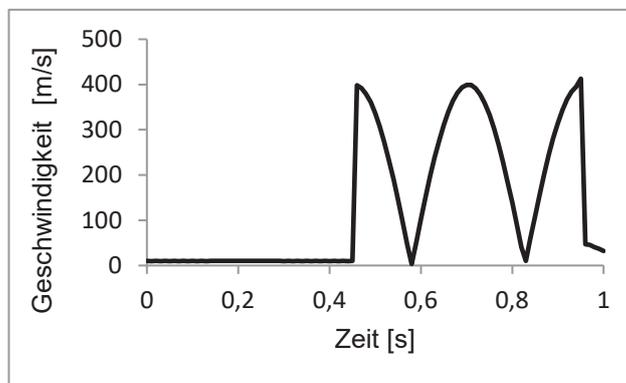


Abb. 9: Verlauf der Geschwindigkeit  $v_n = \sqrt{\dot{x}_n^2 + \dot{y}_n^2}$  des Massepunktes des elastischen Pendels [15]

### 6 Einfluss von Steifigkeit und Zeitschrittweite auf das Stabilitätsverhalten

Wir wollen nun den Einfluss der Zeitschrittweite  $\Delta t$  und der Federsteifigkeit  $k$  auf das Stabilitätsverhalten studieren. Hierzu lassen wir alle Variablenwerte in Tabelle 1 konstant und ändern lediglich  $\Delta t$  bzw.  $k$  und plotten wieder die Funktion  $f_x$  (Abb. 10). Man erkennt nun (Abb. 10, links), dass bei Verringerung der Zeitschrittweite von  $\Delta t = 0,01s$  auf  $\Delta t = 0,001s$  die Funktion  $f_x$  sich derart verändert, dass nur noch eine Nullstelle existiert und das Newton-Verfahren somit nicht mehr in einen falschen Gleichgewichtszustand konvergieren kann. Selbiges gilt für eine Verringerung der Federsteifigkeit von  $k = 10^7 N/m$  auf  $k = 10^5 N/m$  (Abb. 10, rechts).

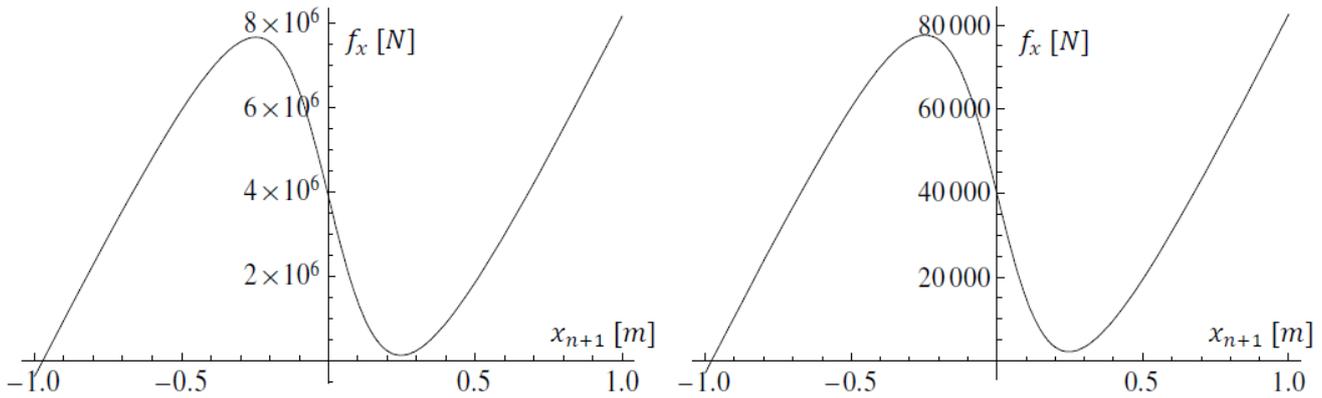


Abb. 10: Darstellung der Funktion  $f_x(x_{n+1}, y_{n+1})$  zum Zeitpunkt  $t = 0,45s$  für  $k = 10^7 N/m$  und  $\Delta t = 0,001s$  (links) und für  $k = 10^5 N/m$  und  $\Delta t = 0,01s$  (rechts) [15]

Aufgrund dieser Erkenntnis wird die vorangegangene Simulation mit dem rotierenden Pendel, welche instabil wurde, nun mit veränderter Zeitschrittweite bzw. veränderter Federsteifigkeit wiederholt. In Abb. 11 sind die resultierenden Geschwindigkeitsverläufe über eine Simulationszeit von jeweils 30s dargestellt. Offenbar tritt nun keine Instabilität und demzufolge auch kein Sprung im Geschwindigkeitsverlauf mehr auf, da das Newton-Verfahren nun nur noch in einen, den korrekten, Gleichgewichtszustand konvergieren kann.

Es ist also möglich das Verfahren zu stabilisieren, in dem man die Zeitschrittweite oder die Modellsteifigkeit verändert. Letzteres stellt eine bemerkenswerte Parallele zur Massenskalierung bei der expliziten Zeitintegration dar. Durch die Veränderung der Systemsteifigkeit ist es möglich, größere Zeitschrittweiten zu nutzen. Bei näherer Betrachtung der Gleichungen (8) erkennt man den Einfluss der Zeitschrittweite  $\Delta t$  und der Federsteifigkeit  $k$  auf das Funktionsverhalten: Je kleiner die Zeitschrittweite, desto dominanter wird der erste lineare Term, was die Tendenz zur Ausbildung einer zweiten Nullstelle verringert. Und je größer  $k$  wird, desto dominanter wird der zweite nichtlineare Term und damit die Tendenz weitere Nullstellen auszubilden. Interessanterweise existiert das Problem der Instabilitäten auch nicht, wenn die Federsteifigkeit unendlich groß wird, also ein starres Pendel vorliegt, wie wir in [15] zeigen.

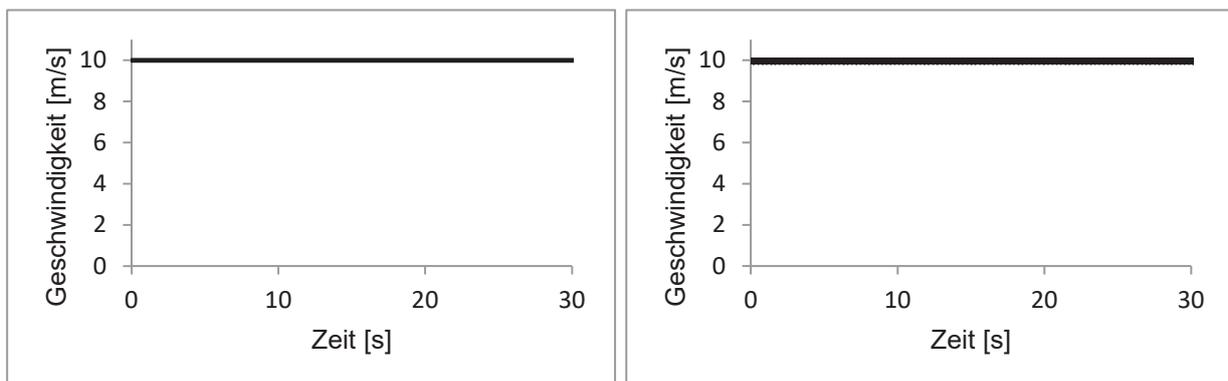


Abb. 11: Verlauf der Geschwindigkeit  $v_n(t)$  des Massenpunktes des elastischen Pendels mit  $k = 10^7 N/mm$  und  $\Delta t = 0,001s$  (links) und mit  $k = 10^5 N/mm$  und  $\Delta t = 0,01s$  (rechts) [15]

## 7 FEM-Beispiel

Um die Gültigkeit der bisherigen Ergebnisse auch für die FE-Welt zu demonstrieren, soll wieder das eingangs genutzte, einfache Problem der rotierenden Platte verwendet werden. Im Vergleich zu der ersten Simulation, welche bei Verwendung der Standard-Newmark-Parameter  $\gamma=0,5$  und  $\beta=0,25$  instabil wurde (siehe Abb. 3), wird nun lediglich der E-Modul der Platte von  $E = 115000N/mm^2$  auf  $E = 11500N/mm^2$  um eine Zehnerpotenz

reduziert. Das Ergebnis der FE-Simulation ist in Abb. 12 zu sehen. Instabilitäten treten nicht mehr auf und der Geschwindigkeitsverlauf entspricht den Erwartungen.

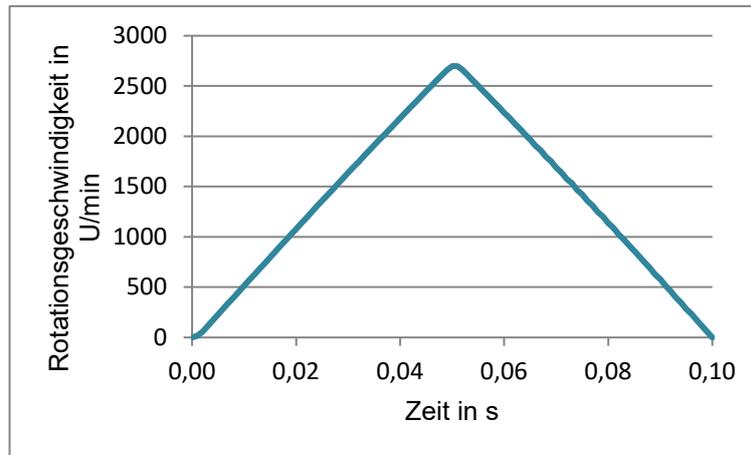


Abb. 12: Simulierte Rotationsgeschwindigkeit der Platte mit  $\gamma=0,5$  und  $\beta=0,25$  und reduziertem E-Modul [15]

## 8 Möglichkeiten zur Vermeidung von Instabilitäten

Eine Reduzierung der Steifigkeit einer Struktur, beispielsweise durch die Reduzierung des E-Moduls, ist für nicht-akademische reale Strukturen natürlich nicht praktikabel. Daher verbleibt als weitere „Stellschraube“ die Zeitschrittweite  $\Delta t$ . Im Folgenden werden nun zwei einfache Strategien vorgestellt, mit deren Hilfe dem Problem der Instabilitäten begegnet werden kann.

### 8.1 Erste Strategie

Ein Hinweis für eine ungünstige numerische Konditionierung eines nichtlinearen Gleichungssystems, welches mit einem Newton-Verfahren gelöst werden soll, kann die Anzahl der Iterationen sein, die das Newton-Verfahren pro Zeitschritt benötigt. Ist diese hoch, so ist dies Anzeichen für Probleme, da Newton-Verfahren typischerweise sehr schnell, innerhalb weniger Iterationen konvergieren. In Abb. 13 ist die Anzahl der Iterationen dargestellt, die das Newton-Verfahren für das elastische rotierende Pendel benötigte. Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Iterationen für das Pendel, welches instabil wurde (gestrichelte Linie) wesentlich größer ist, als bei der Lösung, die stabil blieb (durchgezogene Linie). Die Anzahl der Iterationen ist ähnlich niedrig, wenn statt der Änderung der Steifigkeit die Zeitschrittweite auf  $\Delta t = 0,001s$  reduziert wird.

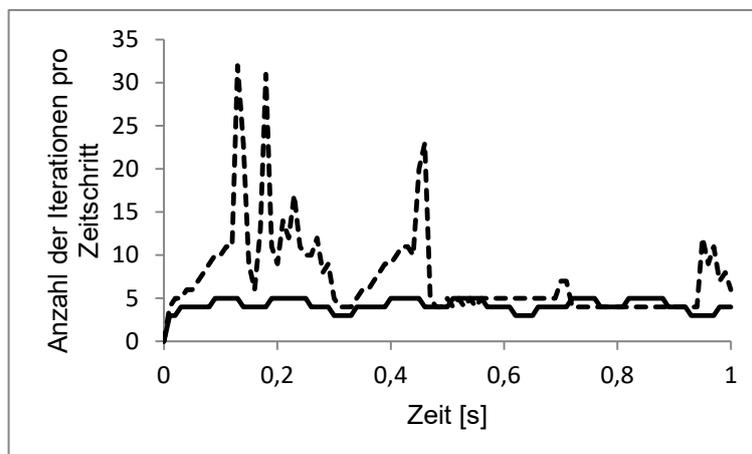


Abb. 13: Anzahl der Newton-Iterationen pro Zeitschritt ( $\Delta t = 10^{-2}s$ ) für das elastische rotierende Pendel für  $k = 10^7 N/mm$  (gestrichelte Linie) und  $k = 10^5 N/mm$  (durchgezogene Linie) [15]

Mit Hilfe dieser Erkenntnis lässt sich nun folgende einfache Zeitschrittweitensteuerung konstruieren:

- Wenn der Newton-Algorithmus mehr als eine bestimmte Anzahl an Iterationen benötigt ohne zu konvergieren, dann breche die aktuelle Gleichgewichtssuche ab, reduziere die Zeitschrittweite, zum Beispiel nach der Vorschrift

$$\Delta t_{neu} = \Delta t_{alt} - 0,5 \cdot \Delta t_{alt} \quad (12)$$

und setze die Gleichgewichtssuche mit der neuen, verringerten Zeitschrittweite fort.

- Ist die Anzahl der Iterationen in einem Zeitschritt kleiner als ein bestimmter Wert, so erhöhe die Zeitschrittweite im nächsten Zeitschritt zum Beispiel entsprechend

$$\Delta t_{neu} = \Delta t_{alt} + 0,5 \cdot \Delta t_{alt}. \quad (13)$$

Auch falls das Newton-Verfahren in einem Zeitschritt konvergiert, die Anzahl der Iterationen jedoch ungewöhnlich hoch ist, sollte das Ergebnis dieser Gleichgewichtssuche nicht weiter verwendet werden, sondern die Suche, mit entsprechend obiger Vorschrift verringerter Zeitschrittweite, wiederholt werden, da eine hohe Anzahl an Iterationen ein Hinweis auf Konvergenz in einen falschen Gleichgewichtszustand ist.

Implementiert man diesen einfachen Algorithmus nun für das rotierende Pendel, welches zuvor instabil wurde, so erhält man jetzt eine stabile Lösung, selbst für eine Simulationszeit von 30s (Abb. 14). Dabei variiert die automatisch angepasste Zeitschrittweite im Bereich  $0,0021s \leq \Delta t \leq 0,01s$ . Für dieses Problem stellte es sich als zielführend heraus, die maximal zulässige Anzahl an Iterationen pro Zeitschritt auf sieben zu setzen. Ist das Newton-Verfahren innerhalb dieser Iterationsanzahl nicht konvergiert, so wird die Zeitschrittweite reduziert und die Gleichgewichtssuche neu gestartet. Fiel die Anzahl der Gleichgewichtsiterationen unter einen Wert von drei, so wurde die Zeitschrittweite erhöht.

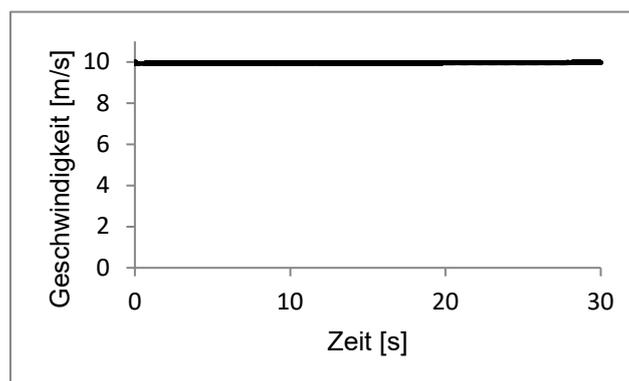


Abb. 14: Verlauf der Geschwindigkeit  $v_n(t)$  des Massenpunktes des elastischen Pendels mit  $k = 10^7 \text{ N/mm}$  und automatischer Zeitschrittweitensteuerung entsprechend der ersten Strategie [15]

## 8.2 Zweite Strategie

Als zweite einfache Möglichkeit zur Detektion möglicher Instabilitäten wird vorgeschlagen, die Fehler aufeinanderfolgender Newton-Iterationen auf deren Monotonie hin zu überprüfen:

- Sollte der Fehler einer Newton-Iteration  $k+1$  größer sein als der Fehler der vorangegangenen Iteration  $k$ , so ist dies ein Hinweis auf eventuelle numerische Probleme und die Gleichgewichtssuche sollte abgebrochen und mit einer verringerten Zeitschrittweite entsprechend Gleichung (12) neu gestartet werden.
- Falls die Anzahl der Iterationen pro Zeitschritt unter einen gewissen Wert fällt (ein Wert von drei stelle sich hier als günstig heraus), so ist die Zeitschrittweite entsprechend Gleichung (13) zu erhöhen.

Auch diese Strategie führt für das rotierende Pendel zu einer stabilen Lösung, allerdings ist die Anzahl der Funktionsauswertungen gegenüber der ersten Strategie um etwa den Faktor neun höher und das Verfahren damit langsamer.

## 9 Komplexes FEM-Beispiel

Die erste im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Strategie zu einer automatischen Zeitschrittweitensteuerung wurde nun auch für die Turbinenstufe aus Abb. 4 verwendet. Dabei wurde eine linear ansteigende Drucklast auf die Turbinenschaufeln aufgebracht, welche nach 0,53s auf null abfällt. Somit ist bezüglich der Rotationsgeschwindigkeit ein quadratischer Verlauf bis zum Zeitpunkt  $t = 0,53s$  und danach eine konstant bleibende Rotationsgeschwindigkeit zu erwarten. Wie in Abb. 15 dargestellt, entspricht das Simulationsergebnis genau diesen Erwartungen, und auch in diesem komplexen Modell treten mit der vorgestellten Strategie keine Instabilitäten mehr auf, obwohl Rotationsgeschwindigkeiten von nahezu 20.000 U/min erreicht werden. Dieses Ergebnis konnte sowohl mit dem klassischen Newmark-Zeitintegrationsverfahren, wie auch mit dem Newmark-Euler-Verfahren erreicht werden.

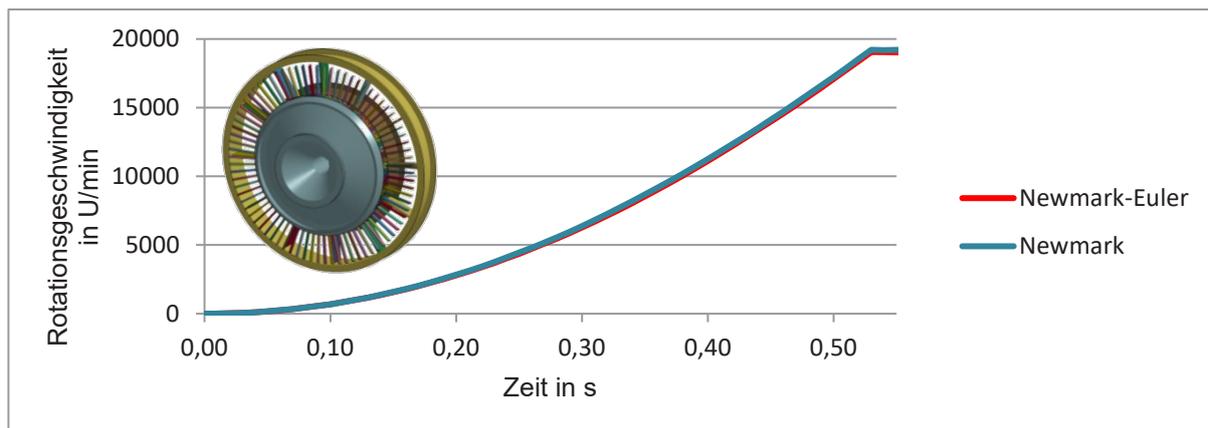


Abb. 15: Simulierte Rotationsgeschwindigkeit einer vereinfachten Turbinenstufe bei Verwendung der Zeitschrittweitensteuerung nach erster Strategie

## 10 Danksagung

Die hier aufgeführten Erkenntnisse wurden innerhalb eines Forschungsprojektes mit Rolls-Royce Deutschland gewonnen, welches im Rahmen des Programmes „ProFIT“ durch die Investitionsbank des Landes Brandenburg mit Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert wurde.

## 11 Literatur

- [1] Newmark, N.M. (1959): A method of computation for structural dynamics. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 85 (EM3), pp 67-94.
- [2] Hilber, H.M, Hughes, T.J.R und Taylor, R.L. (1977): Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 5, pp 282-292.
- [3] Broyden, C. G. (1970): The Convergence of a Class of Double-rank Minimization Algorithms - 1. General Considerations. Journal of Applied Mathematics, Volume 6, Issue 1, pp 76–90.
- [4] Fletcher, R. (1970): A New Approach to Variable Metric Algorithms. The Computer Journal, Volume 13, Issue 3, pp 317–322.
- [5] Goldfarb, D. (1970): A Family of Variable Metric Updates Derived by Variational Means. Mathematics of Computation, Volume 24, Issue 109, pp 23–26.
- [6] Shanno, D. F. (1970): Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization. Mathematics of Computation, Volume 24, Issue 111, pp 647–656.
- [7] Kuhl, D. und Crisfield, M.A. (1999): Energy-Conserving and Decaying Algorithms in Non-Linear Structural Dynamics. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 45, pp 569-599.
- [8] Simo, J.C. und Tarnow, N. (1992): The discrete energy-momentum method. Conserving algorithms for nonlinear elastodynamics. Z. angew. Math. und Phys., Vol. 43, pp 757-792.

- [9] Simo, J.C., Tarnow, N. und Doblare, M. (1995): Non-Linear Dynamics of Three-Dimensional Rods: Exact Energy and Momentum Conserving Algorithms. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 38, pp 1431-1471.
- [10] Bathe, K.-J. und Baig, M.M.I. (2005): On a composite implicit time integration procedure for nonlinear dynamics. *Computers and Structures*, Vol. 83, pp 2513–2524.
- [11] Crisfield, M.A. und Shi, J. (1994): A co-rotational element/time-integration strategy for non-linear dynamics. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 37, pp 1897–1913.
- [12] Galvantetto, U. und Crisfield, M.A. (1996): An Energy-Conserving Co-Rotational Procedure for the Dynamics of Planar Beam Structures. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 39, pp 2265–2282.
- [13] Bathe, K.J. und Wilson, E.L. (1973): Stability and Accuracy Analysis of Direct Integration Methods. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 1, pp 283-291.
- [14] Chen, Ch. und Ricles, J.M. (2008): Stability Analysis of Direct Integration Algorithms Applied to Nonlinear Structural Dynamics. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 134(9), pp 703-711.
- [15] Kober, M. und Kühhorn, A. (2018): Stable implicit time-integration of flexible rotating structures— explanation for instabilities and concepts for avoidance. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 60, pp 235-243.

# Analyse und Gegenüberstellung verschiedener Zeitintegrationsmethoden am Beispiel einer Windenergieanlage

J. Wittmann, C. Glenk, F. Hüter, F. Rieg  
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD  
Universität Bayreuth

In diesem Artikel werden implizite direkte Zeitintegrationsschemata vorgestellt, die in der linearen und nichtlinearen Strukturodynamik effektiv eingesetzt werden können. Um konventionelle Verfahren von kommerzieller und quelloffener computergestützter Ingenieursoftware zu vergleichen, wurde die Hybridmethode nach Bathe mit identischer Teilschrittweite angewendet. Es zeigten sich eine geringere numerische Dissipation und Dispersion im Vergleich zu konventionellen Methoden.

Nennenswerte Unterschiede in der numerischen Energiedissipation traten in den Hilber Hughes Taylor Verfahren hinsichtlich einer Variation des numerischen Dämpfungsparameters  $\alpha$  auf. Darüber hinaus zeigte sich ein dissipatives und starkes Konvergenzverhalten durch Verwendung der Rückwärts-Euler Methode.

## 1 Motivation

Nicht nur in ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen ist die Finite-Elemente-Analyse zur Simulation und Berechnung seit mehreren Jahrzehnten ein fester Bestandteil im Produktentstehungsprozess. Während die Anfänge eine Nachbildung von elastostatischer Festigkeit zum Ziel hatten, erlaubt die Methode derzeit u. a. durch stetig steigende Rechenleistungen eine Modellierung weitaus größerer Anwendungsgebiete. Einen derart anspruchsvollen Bereich stellt hierbei die Simulation komplexer dynamischer Vorgänge dar. Rotordynamische oder modale Aspekte bilden lediglich einen Teil der Möglichkeiten ab. Ein Lösungsansatz zur Berechnung transienter Schwingungsproblemstellungen wie beispielsweise Fallversuche oder Crash-Vorgänge liefern direkte Zeitintegrationsmethoden. Auf dieser Grundlage können sowohl lineare als auch nichtlineare Modelle berechnet werden. Nach dem aktuellen Stand der Technik finden in den Bereichen der expliziten Verfahren die zentrale Differenzenmethode und bei den impliziten Verfahren die Hilber Hughes Taylor Methode, welche auf den Annahmen nach Newmark basiert, Anwendung [2]. Neuere, noch wenig verbreitete Hybridansätze kombinieren Verfahrensoperatoren in beliebiger Weise, wie z. B. das Verfahren nach Bathe, in welchem die Newmark Methode und das Rückwärts-Euler-Schema miteinander gekoppelt sind [2]. Dieser Beitrag analysiert die Eigenschaften der Zeitintegrationsverfahren in Hinblick auf die Variation verschiedener Struktur- und Verfahrensparameter und stellt diese einander gegenüber. Als Anwendungsfall dient hierfür das Modell einer Windenergieanlage.

## 2 Strukturdynamische Verfahren

Eine dynamische Berechnung liegt zu Grunde, wenn Trägheitsterme enthalten sind. Wenn diese nicht berücksichtigt werden, handelt es sich um eine statische Simulation, die formal dem Hookschen Gesetz in Matrixform der linearen FEA folgt [1]. Darüber hinaus können Dämpfungseffekte in der dynamischen Berechnung einhergehen.

### 2.1 Bewegungsgleichung der Strukturdynamik

Im Falle eines Systems mit einer Gesamtmenge an Freiheitsgraden  $n$  führen kinetische Berechnungen für die Bewegungsgleichungen zu einem System gewöhnlicher linearer Differentialgleichungen, das aus Vektoren und quadratischen Matrizen der Ordnung  $n$  besteht [2]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{r}(t)$$

Die Terme der Trägheits-, Dämpfungs- und Steifigkeitskräfte auf der linken Seite stehen im Gleichgewicht mit den äußeren Kräften auf der rechten Seite. In Abb. 1 ist eine physikalische Interpretation der dynamischen Bewegungsgleichung für den Fall eines Systems mit einem Freiheitsgrad gezeigt. Im Allgemeinen können reale Finite-Elemente-Modelle vereinfacht als eine Zusammenstellung von mehreren Einmassenschwingern betrachtet werden.

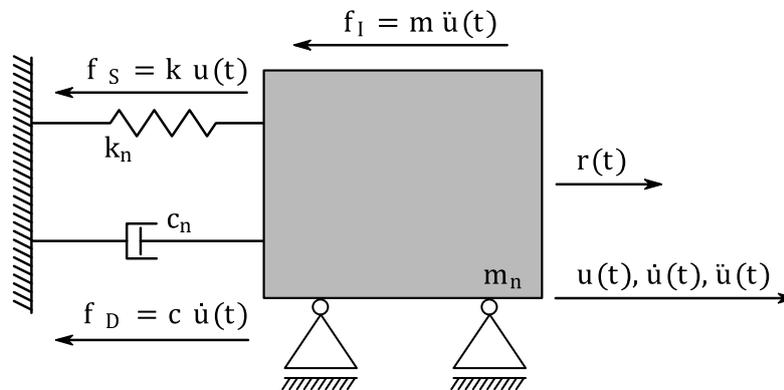


Abb. 1: Illustration der Bewegungsgleichungen eines Systems mit einem Freiheitsgrad [3]

Ein typischer Ansatz für die Generierung einer Dämpfungsmatrix ist unter anderem die Annahme nach Rayleigh. Demnach beinhaltet die Rayleigh-Dämpfungsmatrix  $C_R$  masse- und steifigkeitsproportionale Anteile und ist somit definiert als [3]:

$$C_R = \alpha_R M + \beta_R K$$

Somit hängt die Dämpfungsmatrix von der Struktur der Steifigkeit und der Massenmatrix ab, welche sowohl in konzentrierter als auch in konsistenter Form vorliegen kann.

## 2.2 Lösungsansätze der Strukturdynamik

Die numerischen Ansätze zur Lösung der Bewegungsgleichungen können in Modalanalyse (ungedämpft, symmetrisch oder gedämpft, asymmetrisch), Modenüberlagerung, transiente Analyse und Frequenzganganalyse unterschieden werden.

Eine weit verbreitete Lösungsmethode der transienten Strukturdynamik ist die direkte Zeitintegration, welche auch als Zeitschrittverfahren bekannt ist. Das Adjektiv „direkt“ verdeutlicht, dass dieser numerische Ansatz anders als bei der Modalanalyse ohne vorherige Transformation der Bewegungsgleichungen in eine neue Form funktioniert [2]. Es findet sowohl in linearen als auch in nichtlinearen, ungedämpften und auch gedämpften Problemfällen Anwendung, was einen Vorteil gegenüber anderen Lösungsmethoden darstellt.

Die Zeitintegration beinhaltet in ihrem Vorgehen zwei Aspekte [2, 3]:

- Die Zeitintegration erfolgt in diskreten Zeitintervallen  $\Delta t$ . Dies bedeutet, dass ein statisches Gleichgewicht mit äquidistanten Zeitsprüngen innerhalb des Lösungsintervalls gesucht wird.
- Die Verschiebung wird unter bestimmten Annahmen der Geschwindigkeit und der Beschleunigung in jedem Zeitschritt  $\Delta t$  berechnet.

### 3 Verfahren der direkten Zeitintegration

Die direkte Zeitintegration teilt sich in explizite und implizite Lösungsmethoden auf. Die Zeitschrittgröße ist bei den expliziten Methoden aus Gründen der Stabilität begrenzt, wodurch viele kleine Zeitschritte notwendig sind ( $\Delta t/T \leq 1/\pi \approx 0,3183$ ) [2]. Bei der impliziten Integration besteht die Möglichkeit einer unbedingten Stabilität, die eine geringere Anzahl größerer Zeitschritte mit einem jedoch erhöhten Rechenaufwand erlaubt [2].

Gegenwärtige Verfahren, die in kommerzieller Software verwendet werden, sind nachstehend beschrieben:

- *Newmark Methode*

Die Newmark-Integration ist eine Erweiterung der linearen Beschleunigungsmethode, auch Trapezregel genannt, und stellt ein implizites Verfahren dar [2]. Für die Verschiebungen und Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  werden folgende Gleichungssysteme angenommen [4]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} &= \dot{\mathbf{u}}_t + [(1 - \gamma)\ddot{\mathbf{u}}_t + \gamma\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}]\Delta t \\ \mathbf{u}_{t+\Delta t} &= \mathbf{u}_t + \dot{\mathbf{u}}_t\Delta t + \left[ \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{\mathbf{u}}_t + \beta\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \end{aligned}$$

Die Trapezregel ist ein Sonderfall mit den Newmark-Parametern  $\beta = 1/4$  und  $\gamma = 1/2$  und ist unbedingt stabil. Ein weiterer Spezialfall ist die Methode der zentralen Differenzen. Diese entstammt aus einem Ansatz der Newmark-Parameter  $\beta = 0$  und  $\gamma = 1/2$  und führt zu einem expliziten Zeitschrittverfahren [4]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}_t &= \frac{1}{2\Delta t}(-\mathbf{u}_{t-\Delta t} + \mathbf{u}_{t+\Delta t}) \\ \ddot{\mathbf{u}}_t &= \frac{1}{\Delta t^2}(\mathbf{u}_{t-\Delta t} - 2\mathbf{u}_t + \mathbf{u}_{t+\Delta t}) \end{aligned}$$

- *Hilber Hughes Taylor Methode*

Die in der Strukturdynamik weit verbreitete Hilber Hughes Taylor (HHT) Methode stellt eine implizite Zeitintegrationsmethode dar, welche als eine Erweiterung der Newmark-Methode betrachtet werden kann. Die Newmark-Parameter können abgeleitet werden, indem eine Steuervariable  $\alpha$  für die numerische Dämpfung eingeführt wird [5]:

$$\beta = \frac{1}{4}(1 - \alpha)^2; \quad \gamma = \frac{1}{2} - \alpha \quad \text{mit} \quad -\frac{1}{2} \leq \alpha \leq 0$$

Der Sonderfall  $\alpha = 0$  führt zu den Newmark-Gleichungen der oben gezeigten Trapezregel.

- *Rückwärts-Euler Methode*

Es werden in diesem Verfahren drei Punkte in einem Zeitschritt verwendet, um die zeitlichen Ableitungen der gesuchten Verschiebungen zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  mittels der Differentialquotienten der Verschiebung bzw. Geschwindigkeit anzunähern [6]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} &= \frac{1}{\Delta t}\mathbf{u}_t - \frac{4}{\Delta t}\mathbf{u}_{t+\Delta t/2} + \frac{3}{\Delta t}\mathbf{u}_{t+\Delta t} \\ \ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} &= \frac{1}{\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_t - \frac{4}{\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2} + \frac{3}{\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \end{aligned}$$

- *Bathe Methode*

Die Bathe Methode stellt ein sogenanntes hybrides Zeitschrittverfahren dar, bei welchem jedes Zeitintervall  $\Delta t$  in zwei Teilschritte  $\varepsilon\Delta t$  und  $(1 - \varepsilon)\Delta t$  untergliedert wird ( $0 < \varepsilon < 1$ ). In dieser Aufteilung, die sowohl gleichförmig als auch ungleichmäßig erfolgen kann, wird die Trapezregel ( $\beta = 1/4$ ,  $\gamma = 1/2$ ) im ersten Teilschritt mit der Rückwärts-Euler Methode im zweiten Teilschritt kombiniert. Im Falle einer gleichen Teilschrittgröße  $\Delta t/2$  sind die Gleichungen für Geschwindigkeit und Verschiebung nach dem ersten Teilschritt gegeben mit [2]:

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2} = \dot{\mathbf{u}}_t + \frac{\Delta t}{4}(\ddot{\mathbf{u}}_t + \ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2})$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{u}_t + \frac{\Delta t}{4}(\dot{\mathbf{u}}_t + \dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2})$$

Im zweiten Teilschritt folgen für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung die bereits erläuterten Annahmen des impliziten Eulerverfahrens [6]:

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t}\mathbf{u}_t - \frac{4}{\Delta t}\mathbf{u}_{t+\Delta t/2} + \frac{3}{\Delta t}\mathbf{u}_{t+\Delta t}$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_t - \frac{4}{\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t/2} + \frac{3}{\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$$

Im weiteren Verlauf der folgenden Untersuchungen wird das Bathe Integrationsverfahren bei dieser Aufteilung von zwei gleich großen Teilschritten ( $\varepsilon = 1/2$ ) herangezogen.

#### 4 Analyse der Genauigkeit

Im Vergleich zur analytischen Lösung  $x = \cos(\omega t)$  eines Anfangswertproblems  $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$  treten Fehler im numerischen Berechnungsergebnis in Form von Periodenverlängerung (Dispersion) und Amplitudenabnahme (Dissipation) auf [7]. Im Allgemeinen haben die veranschaulichten impliziten Integrationsverfahren eine hohe Genauigkeit bei einer ausreichend kleinen Zeitschrittgröße (Abb. 2). Es besteht keine Abnahme der Amplitude bei Verwendung der Trapezregel als Lösungsverfahren.

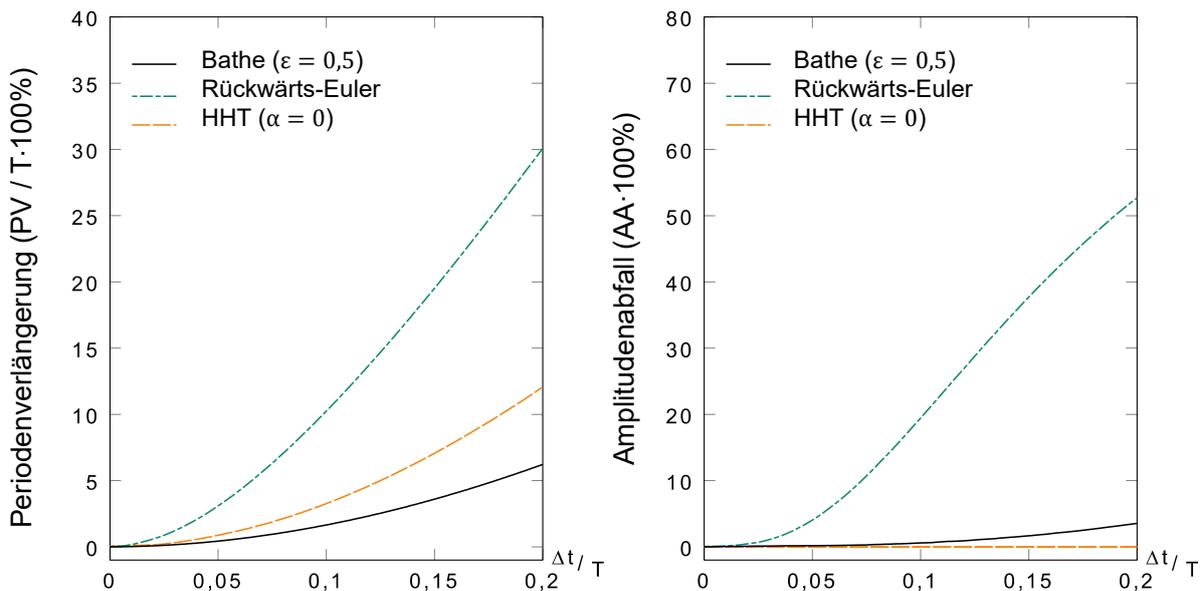


Abb. 2: Fehler impliziter Integrationsmethoden im vereinfachten Anfangswertproblem nach Bathe [2]

Die Ergebnisse der Bathe-Methode zeigen geringere Dissipations- und Dispersionsfehler im Vergleich zu den Lösungen der Rückwärts-Euler Methode. Im Folgenden werden die gezeigten impliziten Integrationsverfahren in einem FE-Modell als Lösungsverfahren angewendet und dabei auf die relative Genauigkeitsaussage der Literatur geprüft.

## 5 Vergleich der impliziten Methoden in einem Anwendungsbeispiel

Die vereinfachte Windkraftanlage von Abb. 3 stellt ein größeres Beispielmodell zur Analyse und zum Vergleich der impliziten Methoden vor. Für die Werkstoffparameter wird ein typischer Baustahl herangezogen:

- Dichte:  $7,85 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$
- Elastizitätsmodul:  $210000 \text{ N/mm}^2$
- Querkontraktion: 0,3

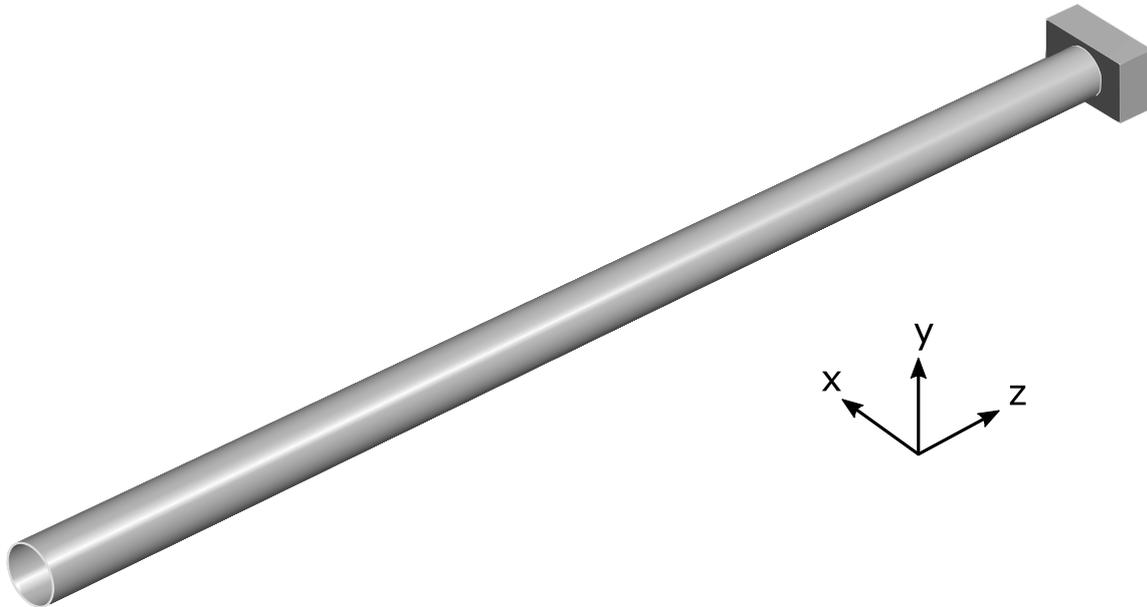


Abb. 3: Vereinfachte Geometrie einer Windkraftanlage

Ein Knotenset an der Unterseite des Turmes wird in allen drei Raumrichtungen fixiert (Abb. 4, links). Durch die neun markierten Knoten (Abb. 4, rechts) wird der Ort für eine Windlast auf die Gondel angegeben. Pro Knoten wird eine konzentrierte Kraft von 100 kN in x-Richtung ab dem ersten Zeitschritt angelegt, welche über den gesamten Beobachtungszeitraum besteht.

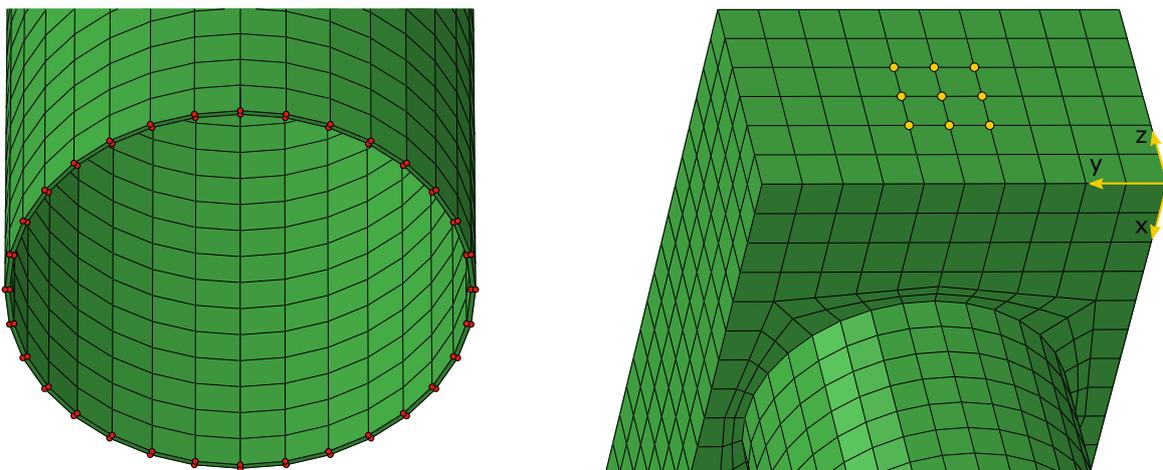


Abb. 4: Knotensets für Festhaltung und Beanspruchung

Die Zeitschrittgröße  $\Delta t$  beträgt 0,1 s. Darüber hinaus sind die Rayleigh-Parameter der betrachteten Dämpfungsmatrix auf  $\alpha_R = 0,5$  und  $\beta_R = 0,01$  gesetzt. Eine nahezu exakte Ergebnisübereinstimmung der HHT- und der Bathe-Integrationsmethode ergibt sich aus dem Kurvenverlauf der Oszillationen in Abb. 5. Im Gegensatz dazu führt die Rückwärts-Euler-Methode zu einer erhöhten numerischen Dämpfung in den Anfangsschwingungen. Gegen Ende des Beobachtungszeitraums  $t = 100$  s konvergieren alle Verfahren gegen einen identischen Verformungswert, der durch eine weitere statische Berechnung validiert ist [8].

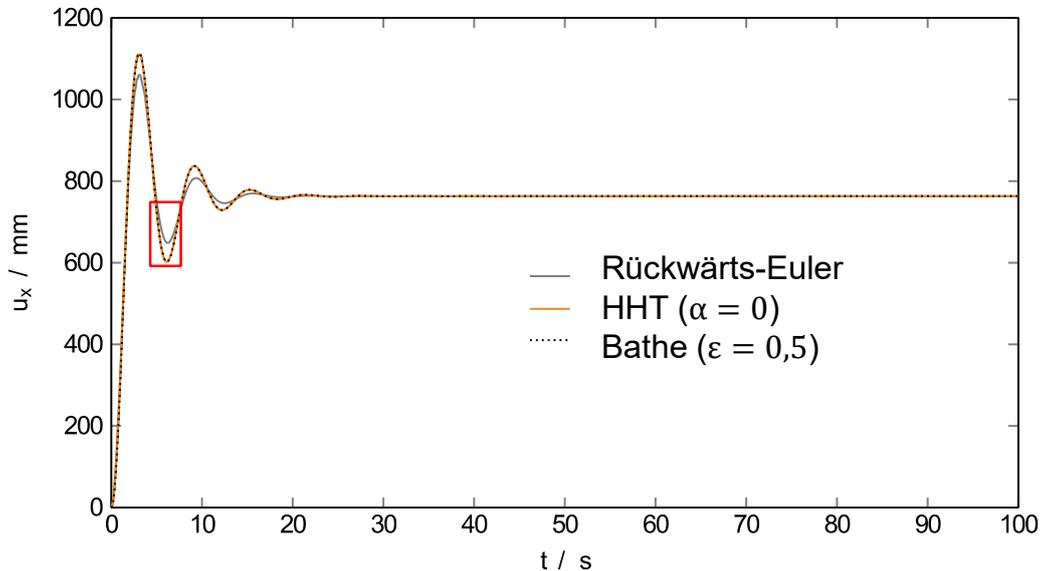


Abb. 5: Verschiebungsverlauf verschiedener impliziter Integrationsmethoden

Im Vergleich zu den Verschiebungen aus dem HHT Verfahren ( $\alpha = 0$ , Trapezregel) zeigen die Verläufe der Zeitintegrationen nach Rückwärts-Euler und Bathe eine Periodenverlängerung, wie in Abb. 6 dargestellt ist.

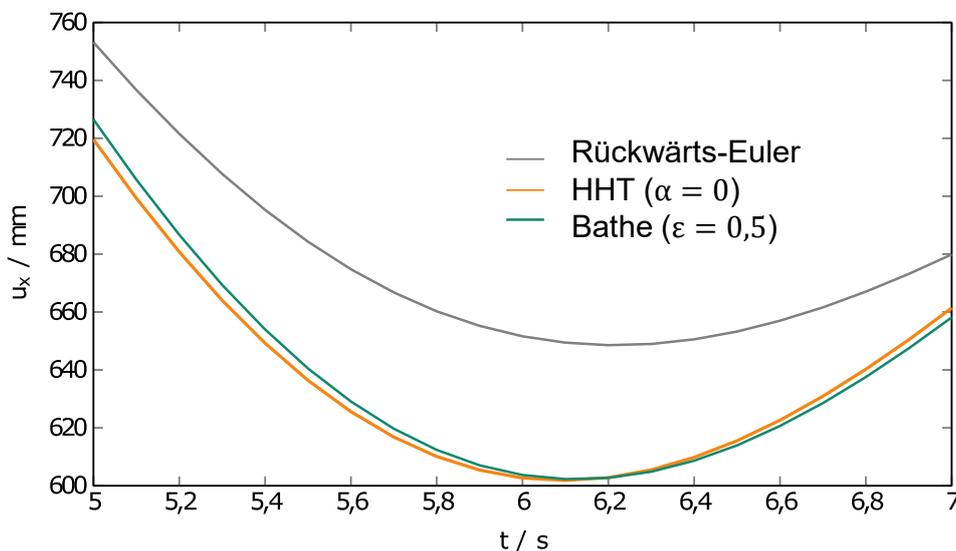


Abb. 6: Ausschnitt des Verschiebungsverlaufs verschiedener impliziter Integrationsmethoden

Im Rahmen aktueller Forschungsarbeiten konnte außerdem weiterhin beobachtet werden, dass bei der Berücksichtigung der Materialdämpfung nach Rayleigh vergleichsweise nur ein geringer numerischer Einfluss durch die Zeitintegrationsverfahren auf die Energiedissipationen einhergeht [8]. Ohne Verwendung dieser viskosen Dämpfungsmatrix ( $C = 0$ ) treten andererseits hochfrequente Oszillationen auf. Hierfür ist die Wahl einer sehr kurzen Zeitschrittweite für eine präzise und genaue Verlaufscharakterisierung erforderlich. Bei einem Verhältnis von  $\Delta t/T < 0,1$  erzielt das Bathe-Verfahren in einem harmonischen Belastungsfall (Beispiel einer Resonanzanregung) einen geringfügigeren Fehler der Periodenverlängerung als der resultierende Verschiebungsverlauf durch die Trapezregel [8].

## 6 Literatur

- [1] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.; Alber-Laukant, B.: „Finite Elemente Analyse für Ingenieure“. 1. Auflage, 2014
- [2] Bathe, K.-J.: “Finite Element Procedures”. 2. Auflage, 2016
- [3] Stelzmann, U.; Groth, C.; Müller, G.: „FEM für Praktiker - Band 2: Strukturtechnik“, 5. Auflage, 2008
- [4] Newmark, N. M.: “A Method of Computation for Structural Dynamics”. ASCE Journal of Engineering Mechanics Division, 1959, S. 67–94
- [5] Hilber, H. M.; Hughes, T. J. R.; Taylor, R. L.: “Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1977, S. 283–292
- [6] Dassault Systèmes: “Abaqus Online Documentation, Theory Guide - Implicit dynamic analysis”. 2015
- [7] Bathe, K.-J.; Wilson, E. L.: “Stability and Accuracy Analysis of Direct Integration Methods”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1973, S. 283–291
- [8] Wittmann, J.: “Methoden der Strukturtechnik im Vergleich mit Z88 am Beispiel einer Windkraftanlage”. Diplomarbeit, 2017

# Untersuchung von Eigenschwingung und Leichtbaupotenzial unterschiedlicher Gitterstrukturen am Beispiel von Magnetuntergestellen von Teilchenbeschleunigern

Simone Andresen  
Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Die Untersuchung des Einflusses struktureller Komponenten auf die Struktureigenschwingungen ist für viele Anwendungsbereiche wie Maschinenbau, Luft- und Raumfahrt, Bauwesen und Optik von großem Interesse.

Die Schalen von marinen Protozoen weisen eine enorme Vielfalt an regulären und irregulären Waben- und Gitterstrukturen auf, die häufig verschiedene Funktionen erfüllen. Die Silikatschalen von Diatomeen zeichnen sich beispielsweise durch eine hohe Steifigkeit bei geringer Masse aus und dienen bereits als Inspiration für Leichtbauweisen. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die unregelmäßigen Diatomeenstrukturen einen positiven Einfluss auf die Schwingungseigenschaften haben.

In dieser Studie wurde eine Magnetträgerstruktur (girder) eines Teilchenbeschleunigers durch biologisch inspirierte Gitterstrukturen ersetzt, um eine hohe erste Eigenfrequenz und Steifigkeit zu erreichen. Die biologisch inspirierten Strukturen ließen sich mit Hilfe von Algorithmen parametrisch konstruieren. Multikriterielle Optimierungsrechnungen unter Verwendung der Evolutionsstrategie erlaubten ein Auffinden bestmöglicher Parameterkombinationen zum Erreichen der gewünschten Ziele.

Die Ergebnisse verdeutlichten ein hohes Potenzial von Gitter- und Wabenstrukturen zur Beeinflussung der Schwingungseigenschaften. Unregelmäßige Strukturen führten hierbei zu signifikant höheren Eigenfrequenzen und Steifigkeiten als regelmäßige. Außerdem entstanden Strukturen gleicher Steifigkeit und unterschiedlicher erster Eigenfrequenzen, während die Massen innerhalb der zulässigen Werte blieben. Im Hinblick auf die Magnetträgerstruktur erhöhten sich durch den Einsatz der biologisch inspirierten Gitterstrukturen die erste Eigenfrequenz um einen Faktor von 1.4 und die Steifigkeit um einen Faktor von 1.9 im Vergleich zur Referenzstruktur.

## 1 Einleitung

Die Untersuchung des Einflusses struktureller Komponenten auf die Eigenschwingungen von Strukturen ist für viele Anwendungsbereiche, oft im Zusammenhang mit Leichtbau, von großem Interesse. Mögliche Anwendungsfelder sind u. a. Maschinenbau, Luft- und Raumfahrt, Bauwesen und Optik.

In der Natur finden sich verschiedenste reguläre und irreguläre Gitter- und Wabenstrukturen, die häufig unterschiedliche Funktionen erfüllen. Insbesondere die Schalen mariner Einzeller zeigen eine große Vielfalt solcher Geometrien (Round et al. [1], Abb. 1). So sind die Silikatschalen von Kieselalgen (Diatomeen) sehr leicht und permeabel und weisen gleichzeitig eine hohe Festigkeit auf. Ihre Druckresistenz liegt nach Hamm et al. [2] bei bis zu  $700 \text{ t m}^{-2}$ .

Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die Strukturen aufgrund ihrer Unregelmäßigkeiten spezielle Schwingungseigenschaften besitzen, u.a. um die Alge vor vibrierenden Mundwerkzeugen ihrer Fressfeinde zu schützen. Die komplexe, unregelmäßige Bauweise der Kieselalgenschalen wird bereits sehr erfolgreich als Basis für die bionische Leichtbauoptimierung technischer Bauteile eingesetzt (Maier et al. [3], Heinrichs et al. [4]).

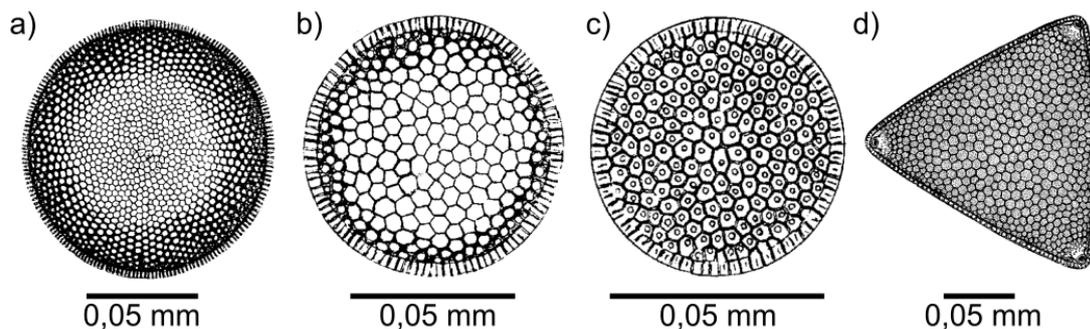


Abb. 1: Darstellungen verschiedener Diatomeenschalen nach Schmidt [5]. a) - c) zeigen unterschiedliche Spezies der Gattung *Coscinodiscus*, d) stellt *Triceratium distinctum* Janisch dar.

In dieser Studie wurde untersucht, inwiefern eine gezielte Nutzung der biologischen Strukturunregelmäßigkeiten auch die Schwingungseigenschaften positiv beeinflussen kann. Viele bereits durchgeführte Analysen zeigten für Schaum- und Gitterstrukturen eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (vor allem eine Zunahme des Elastizitätsmoduls) mit steigendem Grad an Strukturunregelmäßigkeiten auf (z.B. Zhu et al. [6], Li et al. [7] und Tekoğlu et al. [8]). Jedoch sind die Schwingungseigenschaften von biologisch inspirierten unregelmäßigen Gittern bisher nicht analysiert worden.

Betrachtet wurde eine Anwendung der Gitterstrukturen zur Optimierung eines Magnetuntergestells (Trägers) des Teilchenbeschleunigers PETRA III des DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron). In Teilchenbeschleunigern führt eine Anregung der Träger durch äußere Schwingungen zu einer Aufweitung des Teilchenstrahls. Da niedrige Anregungsfrequenzen zu hohen Schwingungsamplituden führen können, ist eine Erhöhung der Struktureigenfrequenzen des Trägers von großem Interesse. Des Weiteren sind aufgrund der schweren Magnete eine hohe Steifigkeit und transportbedingt eine geringe Masse notwendig. Das Ziel dieser Untersuchung bestand darin, den Einfluss von biologisch inspirierten Strukturen konstanten Materials auf das Schwingungsverhalten zu analysieren. Durch den Einsatz der Strukturen als Träger von Teilchenbeschleunigern sollten höhere erste Eigenfrequenzen und Steifigkeiten erreicht werden.

## 2 Methoden

### 2.1 Referenzstruktur

Die Grundlage für die Berechnung der Referenzstruktur war ein CAD-Modell eines stark belasteten Trägers des Teilchenbeschleunigers PETRA III, das von DESY-MEA zur Verfügung gestellt wurde. Nach Vereinfachung der Struktur und Definition der vorgegebenen Randbedingungen ergab sich das in Abb. 2 dargestellte Referenzmodell. Hierbei wurden die drei Auflagerpunkte des länglichen Trägers auf zwei darunterliegenden Füßen als Federn in Z-Richtung dargestellt. Drei Lenker, welche ein nachträgliches Verschieben der platzierten Struktur ermöglichen, ließen sich ebenfalls als Federn in X- und Y-Richtung abstrahieren. Auf dem Träger waren drei Magnete befestigt, die jeweils als Punktmassen aufgeteilt auf vier Zylinder herangezogen wurden. Tab. 1 beinhaltet die Magnetmassen, Federsteifigkeiten und Materialeigenschaften.

Die Durchführung einer Gitterstudie zeigte eine hinreichende Vernetzung aus 446.798 Knoten und 255.655 Elementen für die 3D-Struktur auf. Mit Hilfe der Software ANSYS Workbench (Version 18.0, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA) wurde in einer linear-statischen Berechnung die Verformung unter Eigenlast berechnet. Die anschließende Modalanalyse zeigte die Eigenfrequenzen und Eigenformen auf.

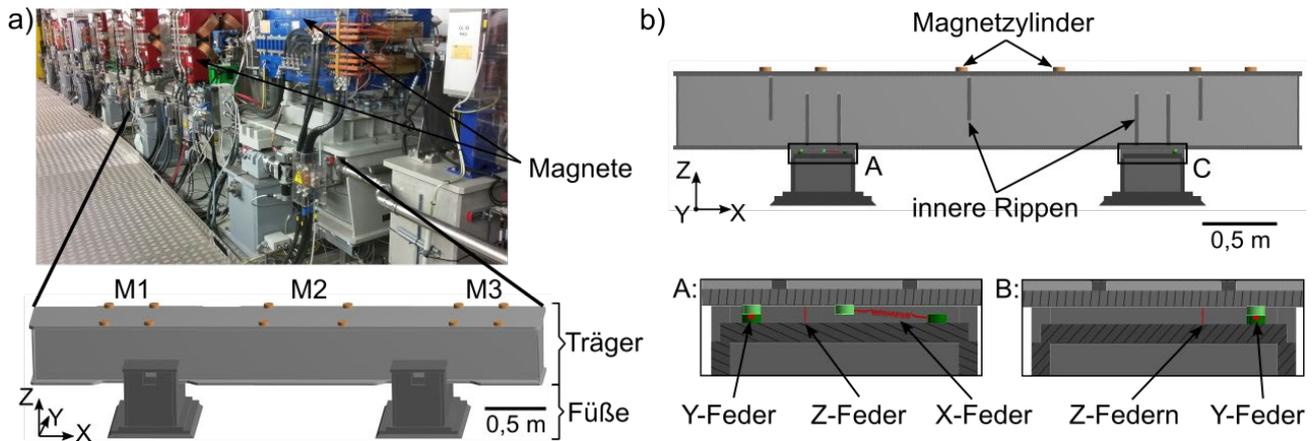


Abb. 2: a) Blick in den PETRA III Tunnel mit den Magnetträgerstrukturen, von denen die hier betrachtete Referenzstruktur mit den aufliegenden Magneten M1, M2 und M3 vereinfacht abgebildet ist. In b) ist der innere Aufbau des Trägers erkennbar sowie vergrößert die Verbindung zu den Füßen über insgesamt sechs Federn.

Tab. 1: Definierte Magnetmassen, Federsteifigkeiten und Materialeigenschaften

Magnetmassen	Federsteifigkeiten	Materialeigenschaften
M1: 1150 kg	X-Feder: $7,1 \cdot 10^8 \text{ N m}^{-1}$	Elastizitätsmodul: $2,1 \cdot 10^{11} \text{ N m}^{-2}$
M2: 1800 kg	Y-Feder: $7,1 \cdot 10^8 \text{ N m}^{-1}$	Dichte: $7850 \text{ kg m}^{-3}$
M3: 1150 kg	Z-Feder: $4,8 \cdot 10^9 \text{ N m}^{-1}$	Querkonstruktion: 0,3

## 2.2 Gitterstrukturen

Vier verschiedene Gitterstrukturen (Abb. 3) wurden unter Verwendung des Plug-Ins Grasshopper der Software Rhinoceros (Grasshopper-Version 0.9.0076 und Rhinoceros-Version 5.0, Robert McNeel & Associates, Seattle, WA, USA) parametrisch konstruiert:

1. Unregelmäßiges Gitter aus 3D-Voronoiwaben
2. Unregelmäßiges Gitter basierend auf der Verbindung benachbarter Punkte
3. Regelmäßiges Gitter aus Rechteckzellen
4. Regelmäßiges Gitter aus hexagonalen Zellen

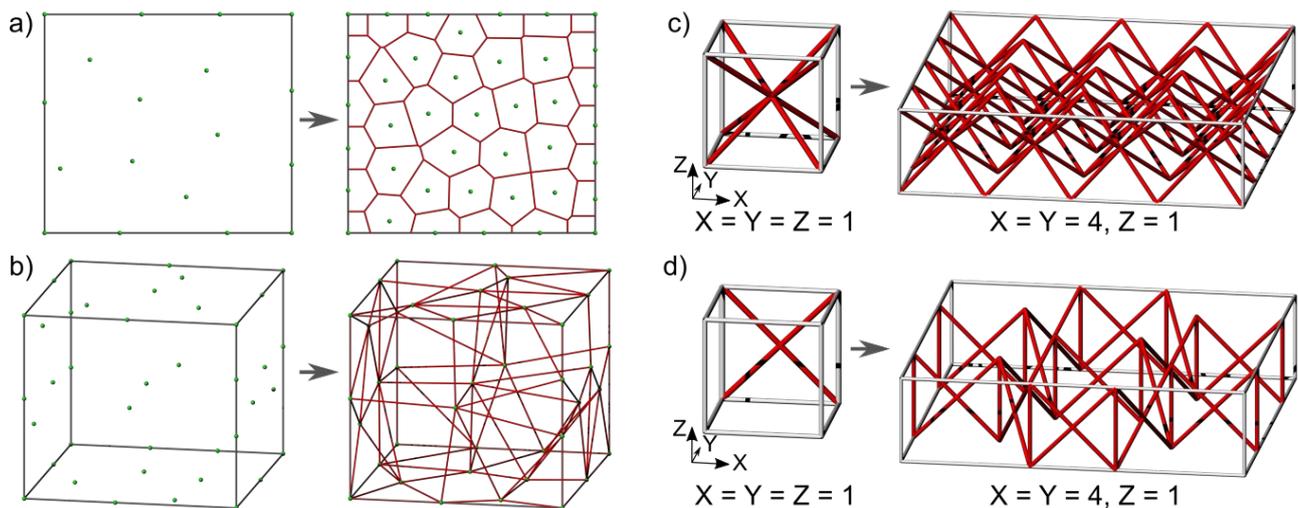


Abb. 3: Darstellung der Gitterstrukturen: Das Voronoi-gitter (a) und die Verbindung benachbarter Punkte (b) sind unregelmäßige Gitterstrukturen, während die rechteckigen (c) und hexagonalen (d) Zellen regelmäßige Gitter bilden.

Die unregelmäßigen Gitterstrukturen beruhen auf Konstruktionsalgorithmen, die Strukturen in Anlehnung an die biologischen Strukturen generierten. Basierend auf einer Punkteverteilung entstanden durch Parameterveränderung verschiedenste Varianten der Gitterstrukturen. Hierbei wurden die Auflagerpunkte und Magnetanbindungsstellen als Attraktoren herangezogen, in dessen unmittelbarer Umgebung die Punkteverteilung lokal variiert werden konnte (Abb. 4). Während im ersten unregelmäßigen Gitter jeder Punkt der Punkteverteilung Mittelpunkt einer Voronoiwabe (konvexe Polyeder, die in vielen Diatomeenstrukturen zu finden sind) war, wurde das zweite durch die Verbindung der Punkte mit einer variierenden Anzahl an Nachbarpunkten gebildet.

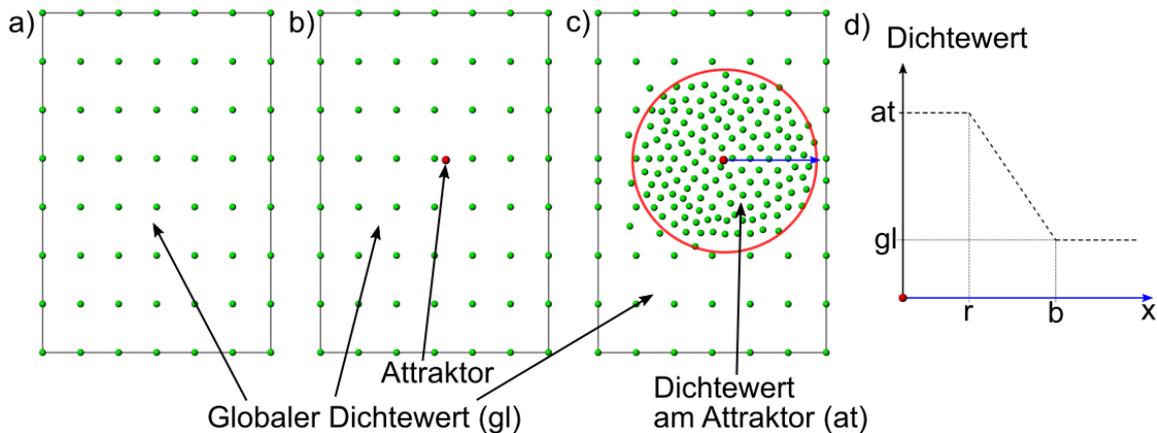


Abb. 4: Beeinflussung einer in a) dargestellten, konstanten Punkteverteilung basierend auf einem globalen Dichtewert durch Attraktoren. Der in b) erkennbare Attraktor (roter Punkt) ermöglicht die lokale Veränderung der Punkteverteilungsdichte in einem Abstand  $r$  zum Attraktor (c). Ein Abklingfaktor definiert den linearen Übergang von der Dichte in Attraktornähe zur globalen Punkteverteilungsdichte.

Die Gitterkonstruktionen erfolgten in Anlehnung an den Referenzträger in einen Designraum der Maße  $4,2 \times 0,65 \times 0,525$  m, wobei die Randbedingungen und Materialkennwerte dem Referenzmodell entsprachen. Die Darstellung der Gitterstreben erfolgte als Timoshenko-Balken. Die Füße wurden zur Erhöhung der Steifigkeit mit jeweils zwei Diagonalrippen versehen und mit Schalenelementen einer Kantenlänge von  $0,05$  m vernetzt, die sich aus einer Gitterstudie ergab.

Zum Auffinden bestmöglicher Parameterkombinationen der in Tab. 2 aufgeführten Parameter wurden multikriterielle Optimierungsrechnungen unter Verwendung der Evolutionsstrategie (Rechenberg [9]) eingesetzt. Die hierfür definierte Zielfunktion (Fitness) setzte sich zu gleichen Teilen aus einer hohen ersten Eigenfrequenz, einer hohen Steifigkeit und einer geringen Masse zusammen. Nach der zufälligen Bildung einer Startpopulation (Menge an Gitterstrukturen unterschiedlicher Parameterkombinationen) und die Berechnung der Fitness für jede Struktur, wurden nur die besten Strukturen mit der höchsten Fitness in die nächste Generation weitergegeben. Gleichzeitig sorgten zufällige Ereignisse wie der Austausch von Parameterwerten zwischen Strukturen (Rekombination) und die Veränderung von Parameterwerten (Mutation) für eine hohe Variabilität in den Gitterstrukturen. Durch den definierten Elitismus von  $50\%$  wird eine lokale Optimierung verhindert, indem in jede Generation zufällig generierte Gitterstrukturen aufgenommen werden. Abb. 5 stellt den Ablauf der Evolutionsstrategie dar. Mit zunehmender Generation entwickelten sich Strukturen hoher Fitness. Die Strukturen der letzten,  $50.$  Generation, die folglich die höchste Fitness besaßen, wurden für die anschließende Auswertung herangezogen. Alle Gitterstrukturen inklusive der Magnete, die mehr als  $7,5$  t wogen, wurden vernachlässigt. Von den restlichen Strukturen galt die Struktur mit der höchsten ersten Eigenfrequenz als bestes Gitter.

Tab. 2: Auflistung der Konstruktionsparameter der Gitter

Unregelmäßige Gitter	Regelmäßige Gitter
- Dichte der Punkteverteilung (globaler Dichtewert sowie Einstellungsparameter für den Attraktor, Abb. 4)	- Anzahl an Zellen in alle drei Raumrichtungen
- Gitterstrebendurchmesser	- Gitterstrebendurchmesser
- Wanddicke der Füße	- Wanddicke der Füße
- Anzahl benachbarter Punkte (für das Gitter basierend auf der Verbindung benachbarter Punkte)	

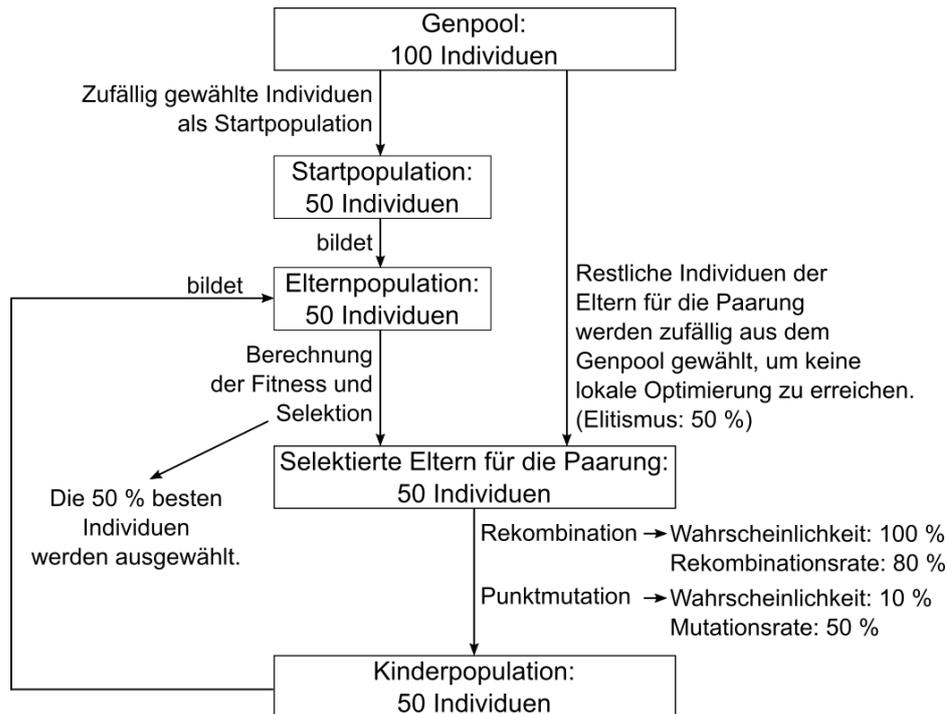


Abb. 5: Definiertes Ablauf der Evolutionsstrategie.

### 3 Ergebnisse

Abb. 6a zeigt für die Gitterstrukturen der jeweils letzten Generation und die Referenzstruktur den Kehrwert der maximalen Verschiebung in Abhängigkeit von dem Quadrat der ersten Eigenfrequenz. Beide Werte wurden mit der jeweiligen Strukturmasse normiert. Insgesamt war ein tendenziell linearer Zusammenhang zwischen beiden Strukturwerten zu erkennen. Die Mehrheit der regelmäßigen Strukturen sowie der unregelmäßigen Voronoi-Gitterstrukturen wiesen in beiden Eigenschaften geringere Werte als die Referenz auf. Dahingegen besaßen die meisten unregelmäßigen Gitterstrukturen basierend auf der Verbindung benachbarter Punkte in beiden Eigenschaften bessere Werte als die Referenz.

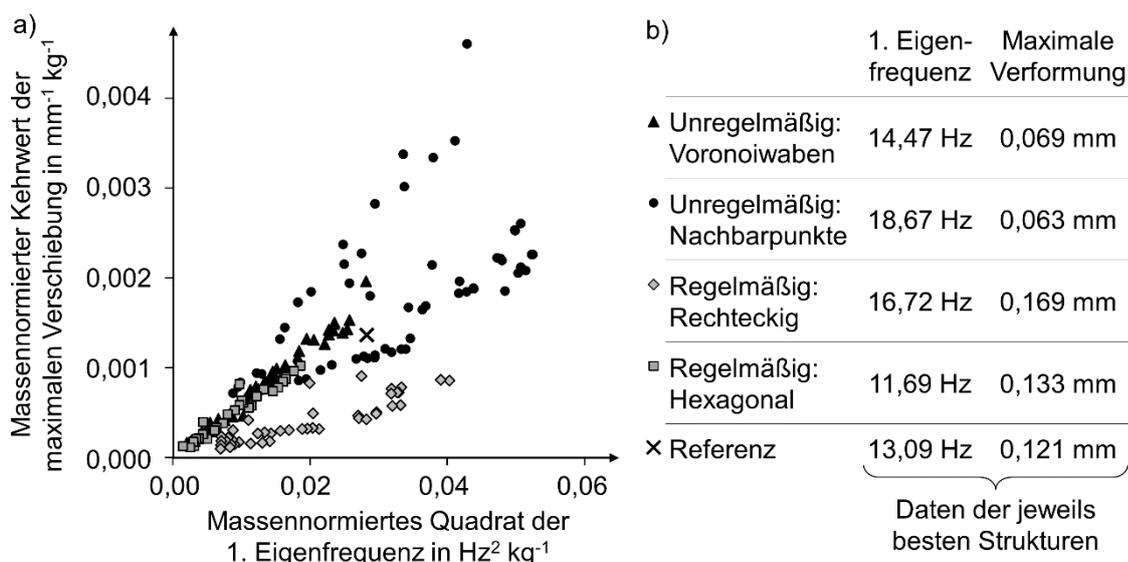


Abb. 6: a) Darstellung der Strukturen der letzten Generation für die vier Gitter und die Referenzstruktur. In b) sind die Eigenschaften der jeweils besten Gitterstrukturen und der Referenz aufgelistet.

In Abb. 6b sind ergänzend die Eigenschaften der jeweils besten Struktur der vier Gitter und der Referenz aufgeführt. Die besten unregelmäßigen Gitter zeigten sowohl eine höhere erste Eigenfrequenz, als auch eine geringere maximale Verformung als die Referenzstruktur. Sie sind in Abb. 7 abgebildet.

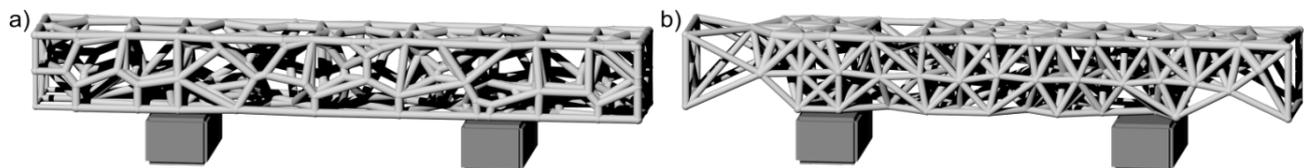


Abb. 7: Schalen-Balken-Modelle der zwei besten unregelmäßigen Gitterstrukturen auf Grundlage von Voronoiwaben (a) und Verbindung benachbarter Punkte (b).

#### 4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen ein hohes Potenzial der biologisch inspirierten Gitter- und Wabenstrukturen zur Beeinflussung des Schwingungsverhaltens von Strukturen. Hierbei führen unregelmäßige Strukturen zu deutlich höheren ersten Eigenfrequenzen und Steifigkeiten als regelmäßige. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die strukturelle Unregelmäßigkeit eine lokal niedrigere oder höhere Dichte an Gitterstreben erlaubt, was sich positiv auf die Eigenschaften auswirkt.

Der tendenziell lineare Zusammenhang ist auf die für einen Einmassenschwinger gültige Proportionalität des Quadrats der ersten Eigenfrequenz zur Steifigkeit zurückzuführen. Die Streuung der Daten verdeutlicht die Möglichkeit, durch Veränderung der Struktur eine erhebliche Erhöhung der ersten Eigenfrequenz zu erreichen, während Steifigkeit und Masse konstant bleiben. Gleichmaßen lässt sich durch die Wahl einer geeigneten Gitterstruktur die Steifigkeit bei gleichbleibender erster Eigenfrequenz erhöhen.

Im Hinblick auf die Trägerstruktur erlauben die unregelmäßigen Gitter basierend auf der Verbindung von Nachbarpunkten eine gleichzeitige Erhöhung der ersten Eigenfrequenz um den Faktor 1.4 und der Steifigkeit um den Faktor 1.9. Dennoch liegen die maximal erreichten ersten Eigenfrequenzen von 18,67 Hz weiterhin in dem kritischen Frequenzbereich von 1-50 Hz (Bialowons [10]), innerhalb dessen eine Anregung der Struktur zu hohen Schwingungsamplituden führen kann. Für weiterführende Untersuchungen sollte eine Anpassung der Randbedingungen vorgenommen werden, um die Steifigkeit der Gesamtstruktur und somit auch die erste Eigenfrequenz weiter zu erhöhen. Des Weiteren ist eine Validierung der numerischen Rechnungen durch Messergebnissen geplant.

#### 5 Fazit

Die Ergebnisse der durchgeführten Studie zeigen, dass sich die biologisch inspirierten Gitter- und Wabenstrukturen nicht nur zur Leichtbauoptimierung einsetzen lassen, sondern auch ein hohes Potenzial zur Schwingungsoptimierung bieten. Durch die Anwendung der Strukturen auf die Trägerstruktur eines Teilchenbeschleunigers ließen sich sowohl die erste Eigenfrequenz, als auch die Steifigkeit erhöhen.

#### 6 Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt der Arbeitsgruppe „Bionischer Leichtbau“ des Alfred-Wegener-Instituts Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung für die Bereitstellung der Algorithmen zur Generierung der bionischen Gitterstrukturen sowie der Abteilung MEA (Maschinen- und Experimentenaufbau) des DESY für die Unterstützung im Rahmen der Studie.

## 7 Literatur

- [1] Round, F.E., Crawford, R.M. & Mann, D.G. (1990): "Diatoms: Biology and Morphology of the Genera", Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [2] Hamm, C.E., Merkel, R., Springer, O., Jurkojx, P., Maier, C., Prechtel, K. & Smetacek, V. (2003): "Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection", *Nature* 421, 841-843.
- [3] Maier, M., Siegel, D., Thoben, K.-D., Niebuhr, N. & Hamm, C. (2013): "Transfer of Natural Micro Structures to Bionic Lightweight Design Proposals", *Journal of Bionic Engineering* 10, 469-478.
- [4] Heinrichs, A., Frank, P., Siegel, D. & Frank, M. (2017): "Bionische Entwicklung einer additiv gefertigten A-Säulen-Verstärkung", *Karosseriebautage Hamburg*, Springer, 43-56.
- [5] Schmidt, A. (1902): „Vorläufige Erläuterungen zu A. Schmidt's Atlas Der Diatomaceenkunde“, *Atlas der Diatomaceenkunde*, O.R. Reiland.
- [6] Zhu, H.X., Hobdell, J.R. & Windle, A.H. (2000): "Effects of cell irregularity on the elastic properties of open-cell foams", *Acta Materialia* 48(20), 4893-4900.
- [7] Li, K., Gao, X.-L. & Subhash, G. (2005): "Effects of cell shape and cell wall thickness variations on the elastic properties of two-dimensional cellular solids", *International Journal of Solids and Structures* 42 (5), 1777-1795.
- [8] Tekoğlu, C., Gibson, L.J., Pardoën, T. & Onck, P.R. (2011): "Size effects in foams: Experiments and modeling", *Progress in Materials Science* 56 (2), 109-138.
- [9] Rechenberg, I. (1973): "Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution", *Frommann-Holzboog*, Stuttgart.
- [10] Bialowons, W. (2013): "Quadrupolaufstellung", *Konstruktionsbesprechung am 02.10.2013*, DESY, Hamburg (aufrufbar unter <http://vibration.desy.de/documents/notes/>).

# Last-spezifische Strukturentwicklung basierend auf evolutionärer Programmierung

Dieter Meiners, Leif Steuernagel, Gaurab Sundar Dutta  
Technische Universität Clausthal

Im konventionellen Engineering wird die additive Fertigung meist für das Prototyping eingesetzt. Doch in den letzten Jahren wird die additive Fertigung durch die Entwicklung der zugehörigen Technologien flexibler und hat sich als wesentlicher Fertigungsprozess für den Leichtbau etabliert. Durch die Verbesserung der Materialverarbeitungsparameter ist es nun möglich, eine Struktur im Raum zu drucken und auszurichten. Unter Berücksichtigung dieser Innovationen kann der Bauprozess verbessert werden, um minimale Strukturen mit maximaler Effizienz in Bezug auf den Lastfall zu schaffen. Diese Arbeit ist ein Versuch, diese neuen Fertigungstechniken zu unterstützen, indem sie einen neuen Weg findet, diese Art von last-spezifischen selbstorganisierten Leichtbaustrukturen zu entwickeln. Zu diesem Zweck wird die evolutionäre Programmierung (EP) verwendet, ein mathematischer Algorithmus, der sich an biologischen Auswahlverfahren orientiert. Für das Scripting wird die objektorientierte Programmiersprache Python™ verwendet.

Ein Volumen wird mit bekannten Rand- und Lastbedingungen konzeptualisiert. Bei der ersten Algorithmen-Entwicklung werden homogene isotrope Materialeigenschaften berücksichtigt. Diese Informationen dienen als Input für den Algorithmus, während dieser innerhalb der vorgegebenen Grenzen nach der optimalen Lösung sucht. Lageänderungen und Dehnungsenergie sind Kriterien der Evolution. Um die Funktionsfähigkeit des Programms sicherzustellen, wurde eine Reihe von Testfällen formuliert.

Der probabilistische Algorithmus gewährleistet die Einzigartigkeit der erzeugten Strukturen, deren Geometrien mit der Rhinoceros 3D™ Software in ein Volumenmodell umgewandelt werden. Die Finite-Elemente-Analyse wird mit ABAQUS™ unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt. Konsistenz und Konvergenz der Ergebnisse werden getestet, indem physikalische Prototypen für verschiedene Testfälle erstellt werden. Der Vergleich der entwickelten Strukturen mit dem kommerziellen Topologieoptimierer (ATOM™ Optimizer Toolbox in ABAQUS™) zeigt eine gute Übereinstimmung innerhalb der Designgrenzen.

## 1 Einführung

*“...there is no better structure than the trunk of a tree or a human skeleton.”*  
*[“...es gibt keine bessere Struktur als der Stamm eines Baumes oder ein menschliches Skelett.”]*  
*-Antoni Gaudí, Architect (1852-1926)*

Dieses Projekt ist Teil einer größeren wissenschaftlichen Kooperation mit dem Titel "Campus Funktionswerkstoffe und -strukturen" (Campus for Functional Materials and Functional Structures). In Kooperation zwischen der Technischen Universität Clausthal, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) werden Forschungsmethoden zur Herstellung leichter Funktionsmaterialien entwickelt. Unter diesem Dach wurden 18 Forschungsthemen zusammengefasst, zu denen Themen wie additiver Produktionsprozess, faserverstärkter Kunststoff, Biomaterialien, Nanokomposit, selbstheilende und selbstorganisierte Formen etc. gehören. Die Bandbreite der möglichen Anwendungsgebiete reicht von der Luft- und Raumfahrt über die Automobilindustrie, die Medizintechnik bis hin zur Architektur und Sportindustrie.

Die vorliegende Studie untersucht die Idee selbstorganisierter Strukturen aus der Perspektive des natürlichen Selektionsprozesses und des Wachstums. Die Inspiration entstammt dem Wachstum von Bäumen und menschlichen Knochen. Während Bäume in erster Linie in Richtung des Lichtes wachsen, orientieren sich die Knochenfasern nach der Belastungsrichtung (Abb. 1). Die Idee ist es, einen Rahmen zu schaffen, der den Prozess der lastspezifischen Entwicklung von Strukturen automatisieren kann.

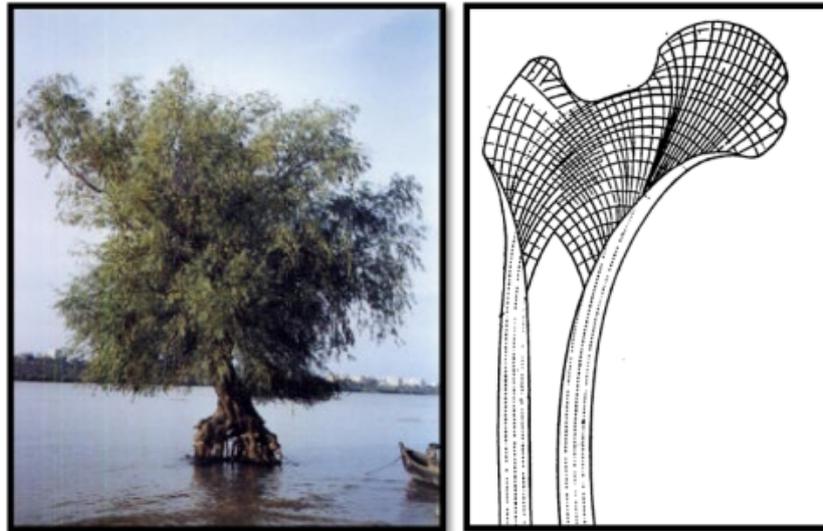


Abb. 1: (links) "Baum und Wurzeln"[1], (rechts) "Culmanns Kran"[2].

Die Rolle von Materialeinsatz und struktureller Effizienz ist dabei eine der wichtigsten Herausforderungen für die Ingenieur- und Architekturplanung. Mit dem konstruktiven Bottom-up-Charakter des additiven Produktionsprozesses ist es nun möglich, solche Probleme zu lösen und Prototypen in verschiedenen Varianten herzustellen.

Im Gegensatz zum traditionellen Designprozess versucht diese Arbeit, die eingeschränkte Umgebung mit Systeminformationen wie Energie- und Materialverbrauch zu korrelieren, um eine Kostenfunktion zu erzeugen, die die Bildung der Geometrie selbst beeinflusst. Die parametrische Korrelation zwischen verschiedenen Faktoren, die die Lösungsgeometrie beeinflussen, wird durch die Evolutionäre Programmierung (EP) gesteuert, ein mathematisches Werkzeug, das sich an dem natürlichen Auswahlprozess orientiert.

Wiederholte Bewertung der Zielfunktion durch verschiedene Simulationsprozesse der Lösungsstruktur, ruft den Bedarf an zusätzlichen Parametern hervor, die die Qualität der Funktion und schließlich den Standard der Lösungsgeometrie verbessern.

Eine solche parametrische Verbesserung ist die Integration von 'Plant growth algorithm', der den Strukturen einen Richtungssinn verleiht und von einem festen Knoten zu einem geladenen Knoten mit minimalem Aufwand wächst. Dies sichert ein stabiles Wachstum der Strukturgeometrie, das für die Konvergenz bei probabilistischen Optimierungswerkzeugen wie EP unerlässlich ist.

## 2 Algorithmenentwicklung

### 2.1 Evolutionäre Programmierung (EP)

EP als Optimierungswerkzeug funktioniert ähnlich wie Genetische Algorithmen (GA) und repräsentiert eine Bandbreite von probabilistischen Algorithmen, die parallel in der Natur ablaufen und vom natürlichen Selektionsprozess inspiriert sind. Während deterministische Algorithmen wie konjugierter Gradient oder Gradientenabstieg in eine bestimmte Richtung arbeiten, suchen diese Algorithmen gleichzeitig nach Optima in allen verfügbaren Richtungen. Daher sind diese Algorithmen weniger anfällig dafür, in lokalen Minima gefangen zu werden und je nach Testfall besser zu funktionieren als einige deterministische Standardwerkzeuge, um Konvergenzen zu finden.

Sie arbeiten mit einfachen Eingaben als Gründungseinheiten und bauen darauf auf. Basierend auf den Input-Informationen wird ein Genpool mit potenziellen Lösungen für den Test erstellt. Diese Lösungsansätze werden als "Generation" und jede mögliche Lösung als Individuum bezeichnet. Der grundlegende Unterschied zwischen

EP und GA liegt in der Repräsentation des Individuums. Während GA nur im binären Bereich arbeitet, kann ein Individuum im EP ohne diese Einschränkung beliebig gewählt werden.

Der nächste Schritt ist die Prüfung des jeweiligen Individuums. Jeder der in Abb. 2 dargestellten Individuen wird durch einen Filter geleitet, der als Fitnessfunktion / Zielfunktion bezeichnet wird, und erhält einen Rang nach der Güte. Die Konstruktion einer geeigneten Zielfunktion ist der wichtigste Teil des Algorithmus, da er die Form und Struktur der Endlösung bestimmt. Die Rechenzeit hängt auch von der Komplexität der Zielfunktion und dem Rauschverhältnis im Datensatz ab.

Basierend auf den Rängen werden die besten Lösungen getrennt und ähnlich dem natürlichen Evolutionsprozess vertauscht (Crossover-Operator) und verändert (Mutationsoperator), um eine neue Reihe von möglichen Lösungen zu schaffen. Der Prozess geht weiter, bis eine Konvergenz zwischen den Individuen erreicht ist.

Der Vorteil dieser Art von Methoden ist ihre Flexibilität bei der Bereitstellung von Lösungen. Zu jedem Zeitpunkt steht eine Lösung zur Verfügung, die innerhalb der vorgegebenen Grenzen existiert. Daher muss, um die Qualität der Lösung zu verbessern, die Definition von Einschränkungen und Zielfunktionen entsprechend verbessert werden.

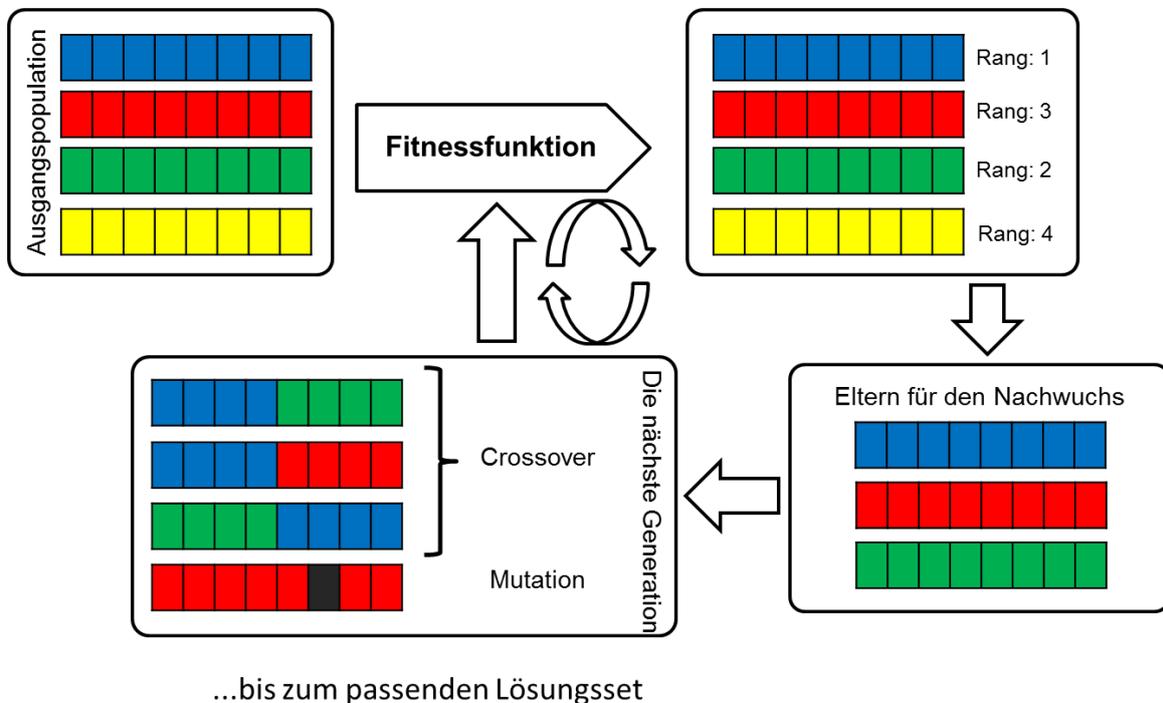


Abb. 2: Prozessdiagramm der evolutionären Programmierung

## 2.2 Entwicklungen der Zielfunktion

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, ist die Bildung einer geeigneten Ziel- oder Fitnessfunktion für die evolutionäre Programmierung sehr wichtig. In dieser Arbeit wurde die globale Steifigkeit (oder Verschiebung) der Struktur bei Belastung als Kriterium für die Bewertung herangezogen. Um die notwendige Fitnessfunktion vorzubereiten, werden weitere Einschränkungen festgelegt. Ein typischer 2D- und 3D-Konstruktionsraum mit wahrscheinlichen Einschränkungen ist in Abb. 3 dargestellt. Während der Berechnung würde der Algorithmus versuchen, potenzielle Punkte im engen Raum zu finden, was bei der Verbindung zu Elementen führen würde, die vom festen Knoten zu belasteten Punkten über einen minimalen Verschiebungsweg weisen.

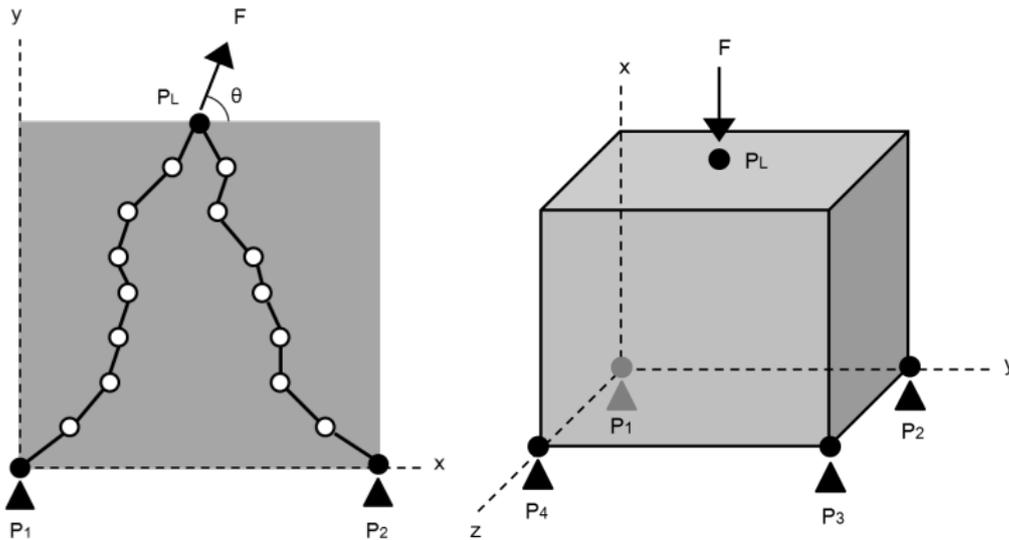


Abb. 3: 2D- und 3D-Designraum

### 2.2.1 Implementierung von Richtungsoperatoren

Um den jeweiligen Elementen einen Orientierungssinn zu geben, wird die Inspiration vom Photosynthese-Operator (Abb. 4) für die Lichtintensität an jedem Punkt des Pflanzenwachstumsalgorithmus bezogen. [3]

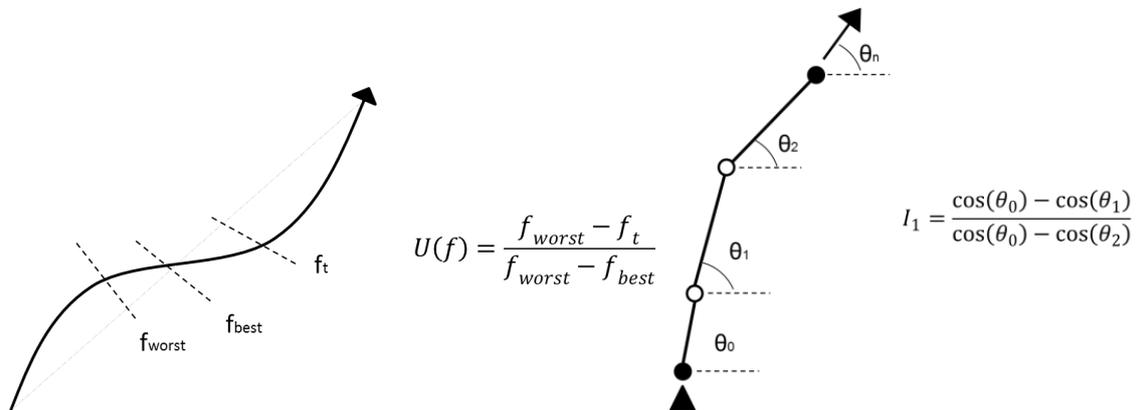


Abb. 4: (links) Photosynthese-Operator für die Lichtintensität [3], (rechts) Intensitäts-Operator für den Strukturwachstumsalgorithmus

Die Lichtintensität in aktuellen Lastproblemen wird durch die Richtung der aufgebrachtten Lasten auf Cosinusbasis ersetzt. So wird die Intensität an jedem Zwischenpunkt zwischen zwei Knoten berechnet. Die Integration des Wertes über die Gesamtlänge des Segmentes würde das gesamte Wachstumspotenzial jedes Segmentes ergeben. Somit ist die Länge jedes Elements auch als eingeschränkt realisiert, da das Element ein Wachstum auf minimalem Weg von der Grenze zum Lastpunkt ermöglicht. Abb. 5 zeigt eine Auswahl an Problemlösungen, die basierend auf gerichteten Eingaben erzeugt wurden.

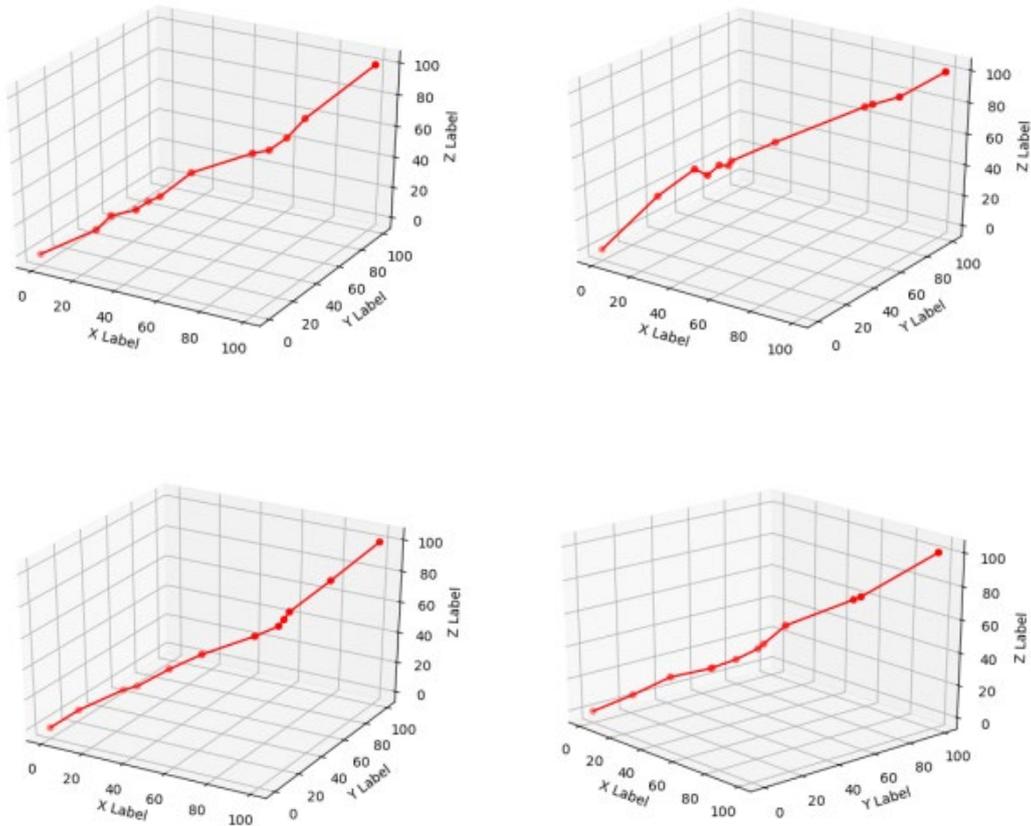


Abb. 5: (oben links) Belastung in positiver X-Richtung, (oben rechts) Belastung in positiver Y-Richtung, (unten links) Belastung in positiver Z-Richtung, (unten rechts) gleichmäßige positive Belastung in alle drei Richtungen

### 2.2.2 Annahmen für die 3D-Strukturplanung

Eine konzeptionelle Gestaltung eines Konstruktionselements hängt von seiner Tragfähigkeit ebenso ab wie von seiner Form. Die Kontur kann aufgrund der Wechselwirkung zwischen Form und aufgebrachtener Kraft nicht beliebig gewählt werden. In einem komplexen System von tragenden Elementen kann davon ausgegangen werden, dass die Kraft wie folgt verteilt ist:

A. Die aufgebrachte Kraft  $F$  im einzelnen Element ist direkt proportional zur Länge des Elements. Das bedeutet, dass ein größeres Element des Systems einen großen Teil der Last trägt und ein kleineres Element daher von einem kleineren Anteil betroffen ist (Abb. 6). Dies führt vermutlich zu einem System, bei dem jedes Element eine konstante Perpendikular Kraftdichte [4] über die Länge aufweist.

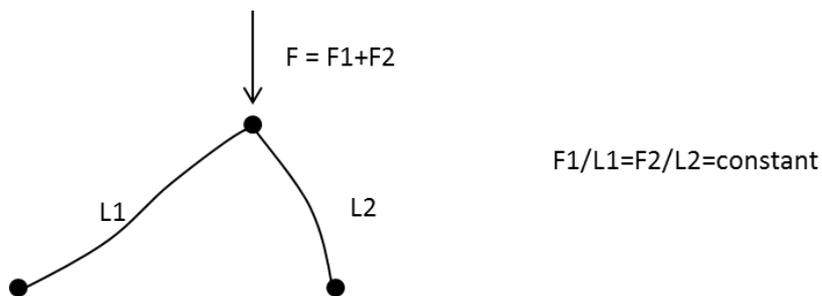


Abb. 6: Vereinfachte Darstellung der konstanten Kraftdichte

B. Die aufgebrauchte Kraft  $F$  wird entsprechend der Querschnittsfläche des individuellen Elements verteilt. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass ein dickeres Element eine größere Last aufnehmen kann als ein dünneres Gegenstück (Abb. 7). Somit wird die Querschnittsspannung während des gesamten Evolutionsprozesses konstant gehalten.

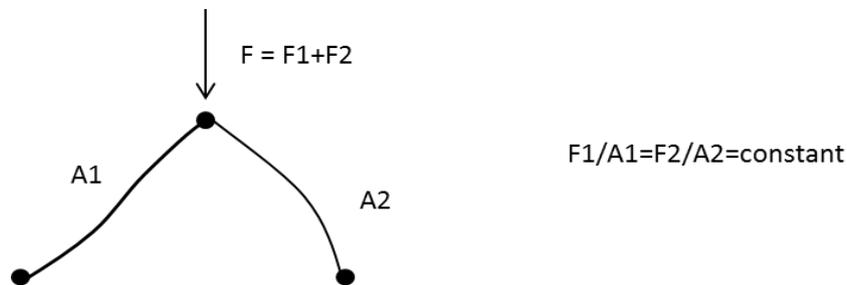


Abb. 7: System mit konstanter Spannung

C. Die aufgebrauchte Kraft  $F$  und die verursachte Verformung sind direkt proportional zu den Materialparametern der Elemente. Ein stärkeres Material kann als Reaktion auf ähnliche Belastungen eine flexible Form erreichen, während ein schwächeres Material tendenziell zu einer schlechten strukturellen Reaktion bei flexibler geometrischer Form führt.

Bei einer gegebenen Materialeigenschaft hängt die geometrische Form von der Länge und Querschnittsdefinition des Bauteils ab. In Bezug auf die Differentialgeometrie kann das Problem neu definiert werden als eine Polynomgleichung der Längendefinition.

Unter Berücksichtigung all dieser Eingaben und unter Verwendung der Formel zur Strahlablenkung  $\delta = \sum Fl/EA$ , können die Verschreibungskriterien für einzelne Elemente erstellt werden. Die Integration dieser Werte über alle Mitglieder hinweg führt zu einer globalen Fitness-(Ziel-)Funktion, die wie folgt aussieht

$$f(n, P_n, P_L, N, l, F, \theta, A, E) = \frac{1}{\delta}$$

wobei

$\delta$	Gesamtverschiebung	$n$	Anzahl der Bauteile
$P_n$	Grenzkordinaten	$P_L$	Ladekoordinaten
$N$	Anzahl der gewünschten Zwischenpunkte	$l$	Länge der einzelnen Elemente
$F$	Einwirkende Kraft	$\theta$	Richtung Cosinus
$A$	Querschnittsinformationen	$E$	Elastizitätsmodul

entspricht.

Die Abhängigkeit des globalen Fitnesswertes von jeder Eingabe wird durch Gewichte im Bereich von 0 bis 1 geregelt, die zufällig zugeordnet werden. Abhängig von der Ordnung des Polynoms hat diese Gleichung mehrere Minima. Basierend auf den anfangs gegebenen Beschränkungen besteht das Ziel des evolutionären Programms darin, das leistungsfähigste Individuum herauszufinden.

### 3 Anwendung bei Designaufgaben

#### 3.1 Umsetzungen in NURB-Kurven für die Konstruktion

„Non-Uniform Rational Basis Splines (NURBS)“ sind eine Familie von starken Werkzeugen bei der Beschreibung solcher Polynomgleichungen, die zu 3D-Strukturen führen. NURBS sind parametrische Darstellungen von Kurven und Flächen, die aufgrund ihrer Präzision und Flexibilität bei der Herstellung beliebiger dreidimensionaler Formen nützlich sind [5]. In der üblichen Strukturdarstellung werden die Punkte entweder direkt über Geraden oder als Spline-Kurven verbunden. Die NURB-Darstellung nimmt die

Eingabepunkte als Kontrollpunkte, und jedes Segment der Kurve wird so festgelegt, dass die über Kontrollpunkte gezogenen Linien als Tangenten zum Abschnitt der Krümmung dargestellt werden (Abb. 8).

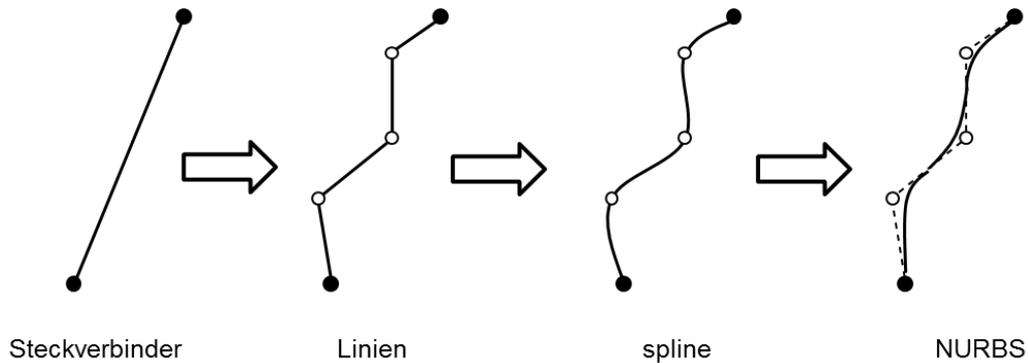


Abb. 8: Schematische Beschreibung der NURBS-Anpassung

Diese Kontrollpunkte können gewichtet werden, wodurch eine Kurvendarstellung resultiert. Meistens sind alle Freiformkurven mit ähnlichen Gewichten (meist 1) verbunden, weshalb die Kurve als nicht-rationell bezeichnet wird. Ein anderer wichtiger Aspekt der NURB-Kurve ist die Ordnung oder der Grad, der durch die Anzahl der benachbarten Punkte definiert ist, die die Kurve beeinflussen. Die meisten der freigeformten NURB-Kurven sind von der Ordnung 3 oder 5. Allerdings ist es auch möglich, den Grad einer NURB-Kurve zu erhöhen, ohne ihre Form zu verändern, während die Verringerung des Grades eine Formänderung zur Folge hat.

### 3.2 Implementierung von Kettenlinien und Selbstgewichtsverformungen

Als Kettenlinie wird die minimale Kurve (Zustand der minimalen potentiellen Energie) bezeichnet, die ein Bauelement aufgrund von Selbstgewicht oder Schwerkraft erreicht. Diese Kettenlinie kann in der Natur häufig beobachtet werden (Abb. 9) und bildet einen parabolischen Bogen, aber keine exakte Parabel.



Abb. 9: Unterschiedliche Beispiele für Kettenlinien in der Natur und von der Natur inspirierte Architekturen [6, 7, 8]

Zum Grundverständnis kann eine Kettenlinie als die Formation betrachtet werden, die eine Kette erreicht, wenn sie zwischen zwei Punkten aufgehängt wird (Abb. 10). Obgleich mit NURB-Kurven eine genaue Darstellung der Kurve unmöglich ist, kann sie aber mit der Grasshopper-Toolbox im Rhino™-Modellierer genau genug auf die jeweiligen Anforderungen zurückgeführt werden [9]. Wenige mögliche Kettenlinien zwischen den beiden Punkten A (0, 0, 0, 0, 0) und B (50, 25, 25) sind im Folgenden als Beispiele dargestellt.

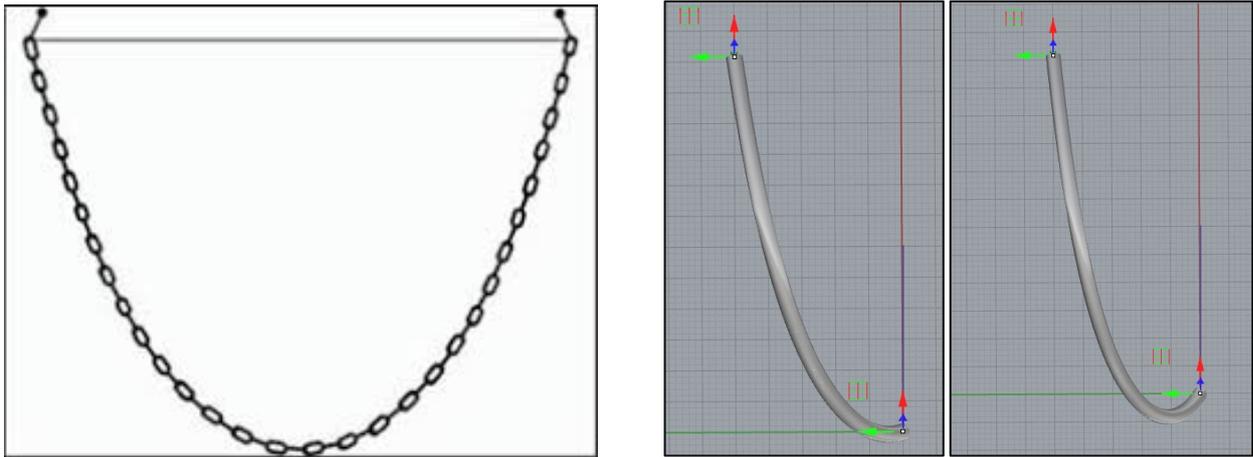


Abb. 10: (links) hängende Kette, die die Kettenlinie bildet [10], (rechts) Beispiele für Kettenlinien, die in Rhino™ modelliert wurden

Eine solche Kettenform von minimaler Länge wird im Folgenden mit den mit EP mit ähnlichem Zustand erzeugten Strukturen verglichen. Beide Strukturen werden als Belastungszustand für die Finite-Elemente-Simulation dem Einfluss der Schwerkraft ausgesetzt. Die Formen sind in Abb. 11 dargestellt.

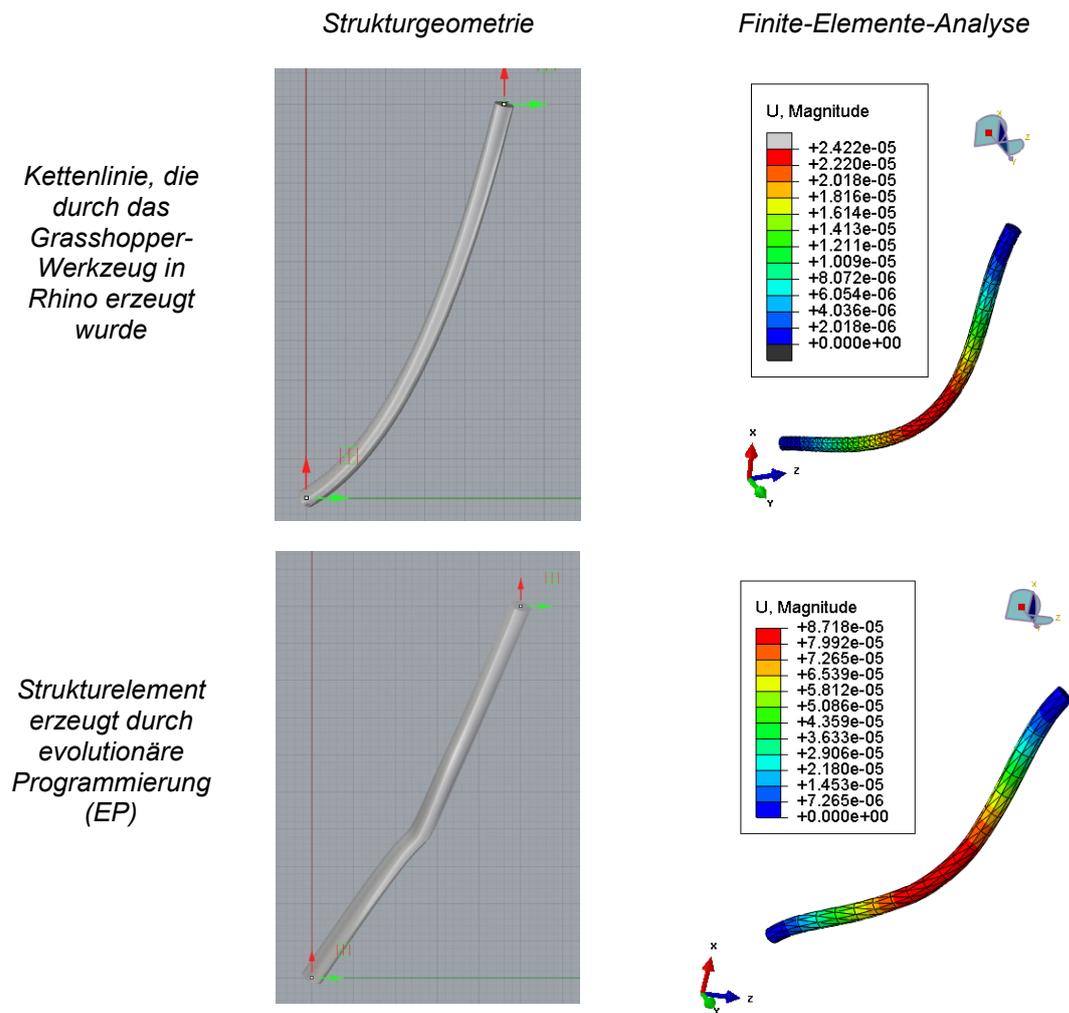


Abb. 11: Kettenlinie und zufällig erzeugte Single-Element NURB-Kurve unter Selbstgewicht & entsprechende FEM-Ergebnisse

Es lässt sich leicht feststellen, dass beide Strukturen unter Selbstgewicht eine vergleichbare Verformung aufweisen. Dies ist ein positives Ergebnis, da eine genaue Konstruktion der Kettenlinie einen präzisen und komplexen mathematischen Rahmen erfordert, da die evolutionäre Programmierung das Selbstgewicht als einen weiteren Lastfall (ohne externe Last) betrachtet und eine ebenso geeignete Lösung generiert. Dadurch bietet sie Flexibilität für das System und ist besonders nützlich, wenn ohne externe Überprüfung allein rechnergestützt konstruiert wird.

#### 4 Proben und Ergebnisse

Um die Zuverlässigkeit des Algorithmus zu testen, wurden einige vorläufige 2D-Prototypen mit Richtungsoperator und Querschnittsinformationen mittels 3D-Druck erstellt. Die Proben wurden für 500 N Zugbelastung ausgelegt und das "tough" - Harz von Formlabs™ verwendet. Die Dicke der Proben wurde auf 5 mm festgelegt, während die Belastungs- und Randbedingungen als gleichmäßig über die gesamte Dicke der Proben angenommen werden. Die Materialeigenschaften werden entsprechend [11] für die Finite-Elemente-Simulation gewählt. Ein Vergleich mit dem kommerziellen, eingebauten Topologieoptimierer von ABAQUS™ galt als Vergleichs-Maßstab. Die Minimierung der Dehnungsenergie bei 20% Volumenbeschränkung wird als Kriterium für die Topologieoptimierung (Abb. 12) festgelegt. Physikalische Tests wurden mit einer hauseigenen Zugprüfmaschine durchgeführt, um die einzelnen Leistungen unter realistischen Lastbedingungen zu untersuchen. Von jedem Muster wurden zwei Sätze zur Prüfung gedruckt, jeweils mit offenem Rahmen und geschlossenem Rahmen (Abb. 13).

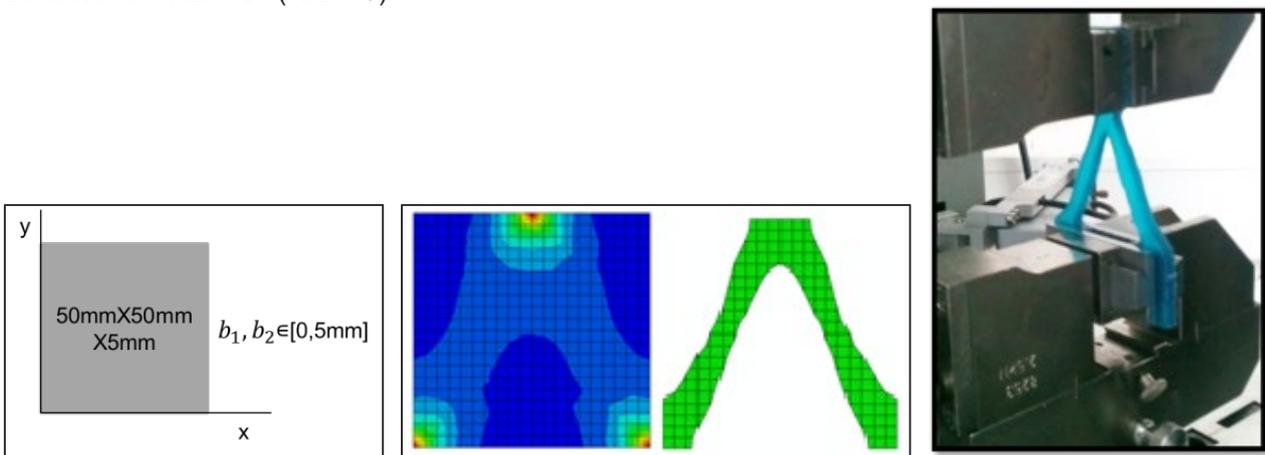


Abb. 12: (links) Beschreibung des Probenraums, (mittlerer) Topologieoptimierungsprozess, (rechts) physikalische Prüfung der Proben

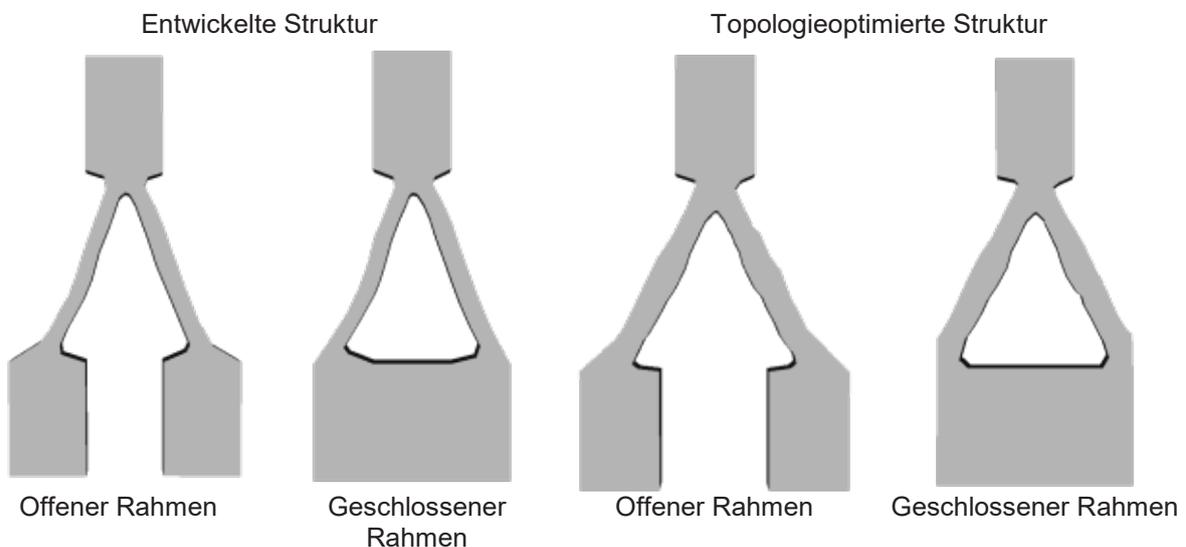


Abb. 13: Offene und geschlossene Rahmenkonstruktionen der einzelnen, zur Prüfung hergestellten Proben

Aus der Simulation geht hervor, dass die entwickelte Struktur geringfügig leichter ist als das topologische Gegenstück. Die Ergebnisse der Zugversuche (Abb. 14) zeigen eine gute Übereinstimmung der Kraft-Weg-Kurven für alle Proben innerhalb der vorgesehenen Beschränkungen. Allerdings erzeugt die Erhöhung der Belastung über die 500N-Grenze hinaus Risse in Geschlossener-Rahmen entwickelten-Struktur senkrecht zur Wachstumsrichtung.

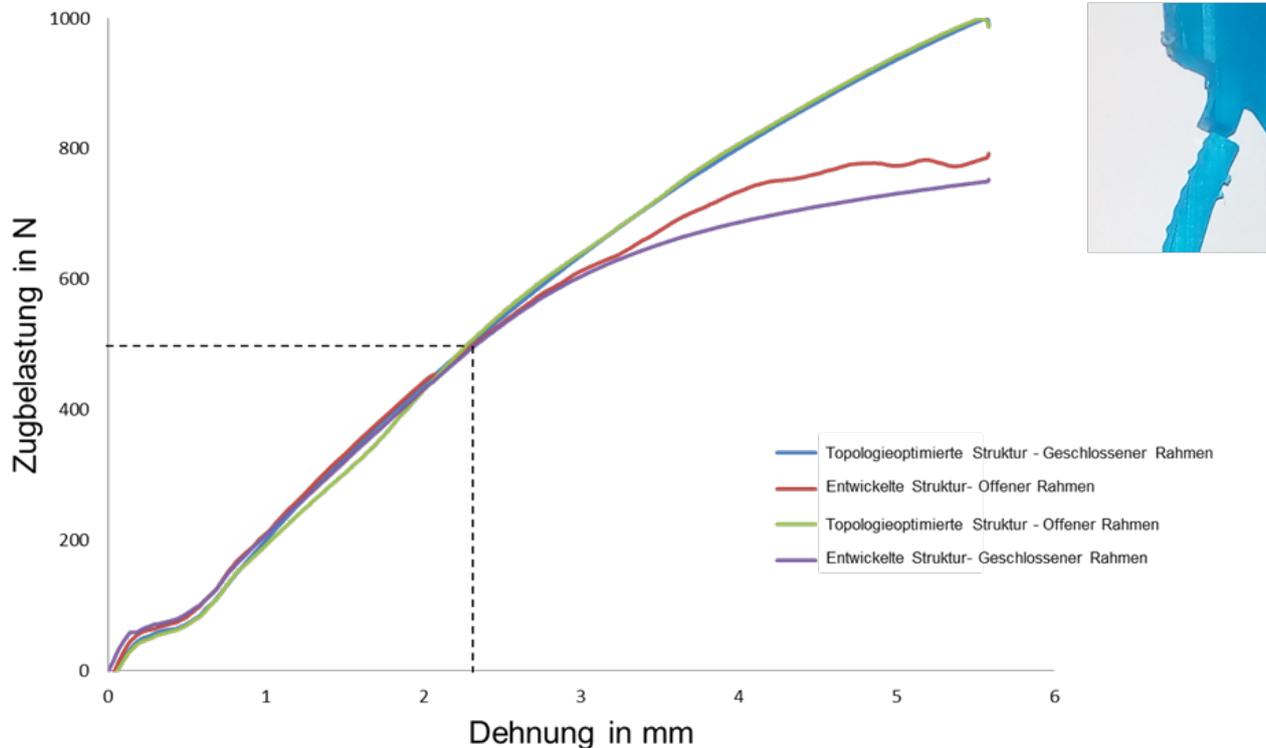


Abb. 14: Zugversuchsergebnisse aller vier Proben, (eingefügt) Rissbeschreibung in einer entwickelten Struktur

Eine Erweiterung des Konstruktionsprozesses in die 3D-Domäne erfolgt in ähnlicher Weise mit einer Druckbelastung von 50N. Aufgrund der flexiblen Natur des Algorithmus ist es möglich, Strukturen mit einer Spannweite von nur 4% des ursprünglichen Bauraums bei unterschiedlichem Durchmesser im Bereich (0,5 m) zu realisieren. Während der Topologieoptimierer bei 20% Volumenbeschränkungen zufriedenstellende Ergebnisse lieferte, kann er bei kritisch niedrigen Beschränkungen keine erkennbare Struktur erzeugen. Die Finite-Elemente-Analyse der entwickelten Struktur zeigt auch einen minimalen Gesamtverschiebungswert aufgrund der aufgetragenen Last von 0,2 mm.

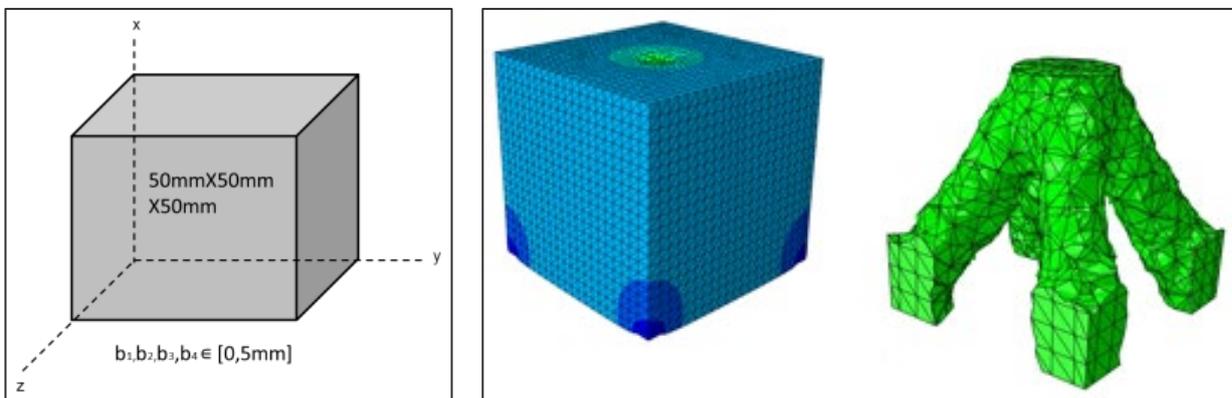


Abb. 15: (links) 3D-Probenraumbeschreibung, (rechts) Topologieoptimierungsprozess mit 20% Volumenbeschränkung

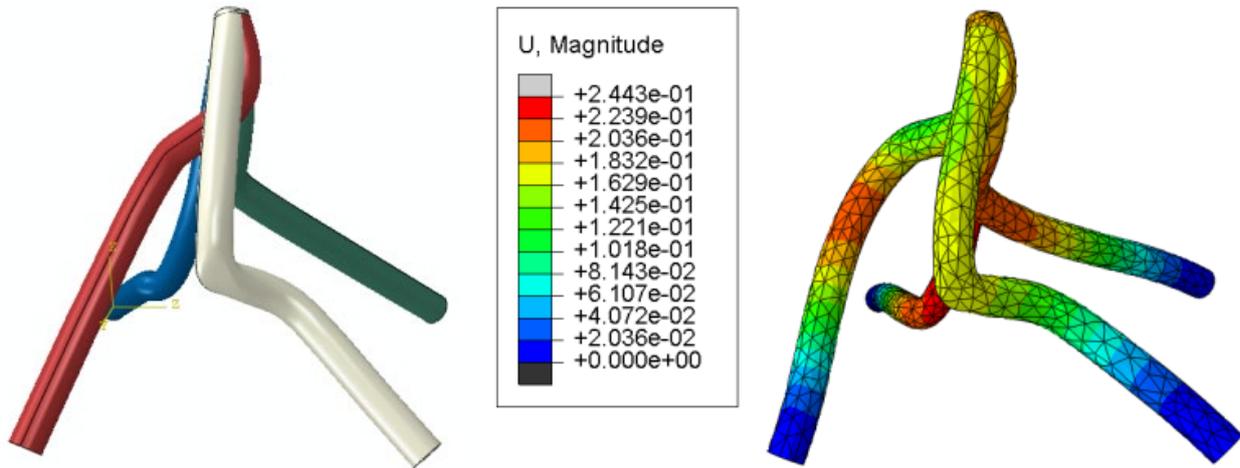


Abb. 16: (links) entwickelte Struktur,  
(rechts) Finite-Elemente-Simulation der Struktur unter ähnlichen Randbedingungen

## 5 Zusammenfassung

- i) Es wurde ein stochastisches Suchverfahren auf der Grundlage der evolutionären Programmierung entwickelt, das in der Lage ist, eine optimierte Struktur basierend auf gegebenen Einschränkungen vorherzusagen.
- ii) Der beschriebene Algorithmus ist mit einem Pflanzenwachstumsoperator gekoppelt, der das Wachstum in Richtung Lastrichtung betont. Eine präzise Beschreibung des Lastweges innerhalb einer Struktur ist die Beschreibung der Anisotropie. Daher bestehen zukünftige Möglichkeiten zur Erweiterung auf anisotropen Materialeigenschaften.
- iii) Die Ergebnisse sind in guter Korrelation mit Topologie-Optimierungstools, sowohl in der Simulation als auch im realen Belastungszustand. In wenigen Testfällen wurden Strukturen entwickelt, die nicht von kommerziellen Optimierern realisiert wurden.

## 6 Literatur

- [1] Shape and Structure, From Engineering To Nature; A. Bejan; Cambridge University Press; 2000
- [2] On Growth and Form; D'Arcy Thompson; Cambridge University Press; 2014
- [3] Artificial Plant Optimization Algorithm for Constrained Optimization Problems; Z. Zhao, Z. Cui, J. Zeng; Innovations in Bio-inspired Computing and Applications (IBICA); 2011
- [4] Shell structures for architecture: Form finding and optimization; S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal C. Williams; Routledge Ltd.; 2014
- [5] Python for Rhinoceros 5
- [6] [http://www.thegardenacademy.com/micro-homesteading/frameless\\_comb/](http://www.thegardenacademy.com/micro-homesteading/frameless_comb/)
- [7] <http://enacademic.com/dic.nsf/enwiki/4058>
- [8] [http://mathstat.slu.edu/escher/index.php/The\\_Geometry\\_of\\_Antoni\\_Gaudi](http://mathstat.slu.edu/escher/index.php/The_Geometry_of_Antoni_Gaudi)
- [9] <https://docs.mcneel.com/rhino/6/help/en-us/commands/catenary.htm>
- [10] [http://www.earth-auroville.com/stability\\_calculations\\_en.php](http://www.earth-auroville.com/stability_calculations_en.php)
- [11] Tough resin data sheet, Formlabs™
- [12] An Introduction to Genetic Algorithms; M. Mitchell; MIT Press; 1999
- [13] Genetic Algorithms with Python; C. Sheppard; CreateSpace Independent Publishing Platform; 2016

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

Adresse für Fensterkuvert



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

## Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (4/2018)

- Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:**
- |   |   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft                | <input type="checkbox"/> CFD Seminar im November                      |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“           | <input type="checkbox"/> MBSE Seminar im November                     |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare                      | <input type="checkbox"/> Europäische SPDM Conference im November      |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse                | <input type="checkbox"/> Additive Manufacturing Konferenz im Dezember |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS e-learning                    | <input type="checkbox"/> Werkstoffeigenschaften im März 2019          |
| <input type="checkbox"/> Professional Simulation Engineer PSE | <input type="checkbox"/> NAFEMS World Congress 2019, Quebec, CAN      |
| <input type="checkbox"/> Internationale Arbeitsgruppen        |   |
- Bitte nehmen Sie mich in Ihren Verteiler auf.**
- Senden Sie das NAFEMS Magazin bitte auch an meine/n Kollegen/in (Adresse unten).**
- Ich möchte folgendes zum NAFEMS Magazin anregen:**
- 
- Ich interessiere mich für Werbe-/Stellenanzeigen - bitte senden Sie uns die Mediadaten zu.**

**Absender**

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

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

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

Straße: \_\_\_\_\_

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

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

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

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

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

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

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

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

Straße: \_\_\_\_\_

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

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

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

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

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

# We are NAFEMS



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

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