

# NAFEMS

## MAGAZIN

*Zeitschrift für numerische Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete*

**FEM – CFD – MKS – VR / VIS – PROZESS – PDM**

### Fachbeiträge:

#### Multidisziplinäre Analysen

**Ganzheitliche Simulation von mechatronischen Schwingungstilgern für automobile Anwendungen**

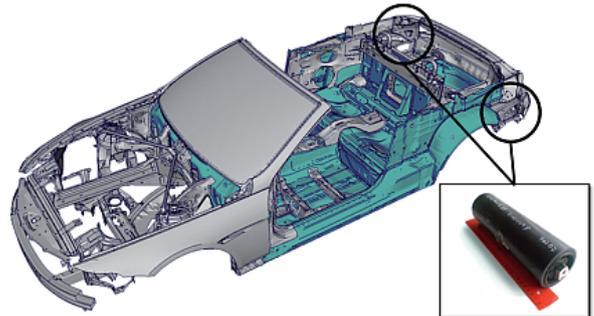
J. Forsen, S. Granzow (BMW AG); H. Baier (TU München)

**Entwicklung einer elektrisch-thermisch-mechanisch gekoppelten Simulationsmethode für Fügeprozesse**

B. Scholz, M. Brink (TWT GmbH); H. Steinmetz (Daimler AG)

**Multidisziplinäre Simulation pneumatischer Scheibenwischersysteme für Hochgeschwindigkeitszüge**

M. Schumacher, M. Barej, M. Hüsing, B. Corves (RWTH Aachen)



Rohrkarosserie BMW 6er Cabrio, inkl. passivem Serien-Schwingungstilger (Bild: BMW AG)

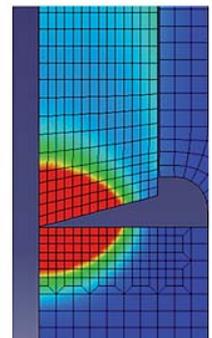
#### Computational Fluid Dynamics (CFD)

**Numerische Simulation der Bypassströmung im Abhitzedampferzeuger einer Gasturbine**

J. Hesse (CFX Berlin Software GmbH)

*Bestimmung der Schmelzzone basierend auf der im Material vorherrschenden Temperatur*

(Bild: TWT GmbH Science & Innovation / Daimler AG)



3-tägiger NAFEMS FEM Trainingskurs:  
**Einführung in die praktische Anwendung der FEM**

11. - 13. Oktober 2010, Wiesbaden

2-tägiger NAFEMS CFD Trainingskurs:

**Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications**

24. - 25. November 2010, Wiesbaden

Seminar:

**Simulationsbasierte Auslegung nach Betriebsfestigkeit und Lebensdauer**

10. - 11. November 2010, Wiesbaden

Europäische NAFEMS Konferenz:

**Simulation Data and Process Management (SDPM)**

24. - 25. November 2010, Frankfurt

**NEU**

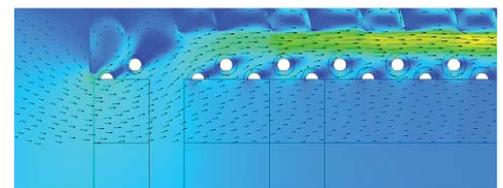


**NWC**  
NAFEMSWORLDCONGRESS 2011

23-26 MAY | BOSTON | USA



Hochgeschwindigkeitszug Siemens Velaro E (Bild: RWTH Aachen)



Geschwindigkeit im Bypass zwischen Rohrpaket und Leitbleche (Bild: CFX Berlin Software GmbH)

Alle bisherigen Ausgaben kostenlos downloaden unter: <http://www.nafems.org/magazin>



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

Sehr geehrte Leserin,  
sehr geehrter Leser,

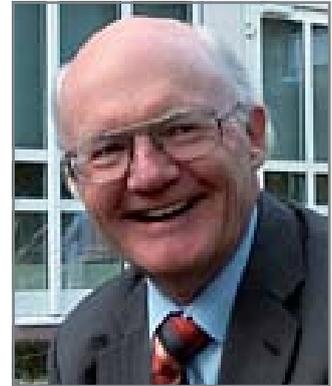
numerische Simulation ist ein Werkzeug, das für den Entwicklungsprozess immer mehr an Bedeutung gewinnt. Tatsächlich können viele Aspekte virtuell analysiert und damit zeit- und kostenaufwändige Fehlversuche vermieden werden. Allerdings erfordert der erfolgreiche Einsatz eines so mächtigen Werkzeugs angemessene Kenntnisse, Erfahrung und Geschick. Zunächst ist das zu analysierende Modell so zu wählen, dass es die gewünschten Erkenntnisse auch zuverlässig liefern kann. Dann müssen valide Eingabeparameter und Randbedingungen sorgfältig ausgesucht werden, sonst drohen unbrauchbare Ergebnisse nach dem Prinzip 'garbage in – garbage out'. Leider können derartige Fehler nur in seltenen Extremfällen durch die Software erkannt und eine entsprechende Warnung ausgegeben werden. Schließlich müssen die erzielten Ergebnisse auch mit Verstand interpretiert und intelligent umgesetzt werden. Es ist also ein Irrtum zu meinen, mit den vorhandenen hervorragenden Programmsystemen wären die Probleme der Produktentwicklung gelöst, aber sie können bei adäquatem Einsatz eine zuverlässige Hilfe sein.

Eine wesentliche Voraussetzung für die sinnvolle und zielgerichtete Anwendung der Simulation ist die genaue Kenntnis der vorhandenen Möglichkeiten und Grenzen. Hier bietet NAFEMS eine hervorragende, von Softwareanbietern unabhängige Plattform. In Kursen werden regelmäßig Einführungen in die Grundlagen und praktischen Anwendungen der CFD und der FEM angeboten. Die FEM-Kurse fanden bislang in zwei zeitlich getrennten zweitägigen Veranstaltungen statt. Zur Steigerung der Effektivität werden sie künftig zu einem dreitägigen Kurs zusammengelegt. Für Anwender und Entwickler gleichermaßen wichtig sind die NAFEMS Seminare. Jeweils zu einem bestimmten Themenkreis werden neue Erkenntnisse und Verfahren vorgestellt, geschickte Lösungswege aufgezeigt, aber auch auf noch fehlende Werkzeuge hingewiesen.

Im vorliegenden Heft 16 des NAFEMS Online-Magazins finden Sie exemplarisch drei Beiträge aus dem Seminar 'Multidisziplinäre Simulationen' vom November 2009, mit denen deutlich wird, in welchen unterschiedlichen Anwendungsbereichen die Simulation mit Erfolg eingesetzt werden kann. Zum Einen geht es darum, das 'Zittern' von Cabrio-Pkws zu tilgen. Im zweiten Beitrag wird eine Methode zur Simulation von gekoppelten Niet-Schweißverbindungen entwickelt. Schließlich wird das Verhalten pneumatischer Scheibenwischersysteme für Hochgeschwindigkeitszüge simuliert. Zudem wurde ein Beitrag zur Strömungsanalyse im Abhitzedampferzeuger einer Gasturbine aufgenommen. Ich hoffe, mit dieser Auswahl Ihr Interesse geweckt zu haben und wünsche Ihnen beim Lesen viele neue Erkenntnisse und Anregungen für eine sachgerechte Modellierung und einen erfolgreichen Einsatz der numerischen Simulation zur Lösung Ihrer Probleme.

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.ansys-germany.com](http://www.ansys-germany.com)



[www.simulia.com/de](http://www.simulia.com/de)



EuroMold - World Fair for Moldmaking and  
Tooling, Design and Application Development  
**1. - 4. Dezember 2010**

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



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



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



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



Leading MBS Technology  
for Technology Leaders

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

## Über NAFEMS

NAFEMS ist eine gemeinnützige 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.

### Mitglieder des internationalen NAFEMS Councils

C. Stavrinidis (Chairman), ESA, NL  
 M. Zehn (Vice Chairman), (TU Berlin / Femcos mbH), D  
 R. L. Dreisbach (The Boeing Company), USA  
 D. Ellis, Idac Ltd., UK  
 G. Miccoli, Imamoter, I  
 S. Morrison, Lusas Ltd., UK  
 P. Newton, GBE, UK  
 M.-C. Oghly, Flowmaster, F  
 A. Ptchelintsev, Nokia, FI  
 A. Puri, Selex Sensors & Airborne Systems, UK  
 J. Wood, Strathclyde University, UK

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

### Mitglieder des deutschen NAFEMS Steering Committees

Dr.-Ing. W. Dirschmid (Consultant), Chairman  
 Dr.-Ing. Y. Deger (Hochschule Rapperswil)  
 Dr.-Ing. A. Gill (Ansys Germany GmbH)  
 Dr.-Ing. R. Helfrich (Intes GmbH)  
 Dipl.-Ing. G. Müller (Siemens AG)  
 Dr.-Ing. G. Müller (CADFEM GmbH)  
 Dipl.-Ing. Felix A. Muggli (Sulzer Innotec)  
 Dipl.-Ing. F. J. H. Peeters (Abaqus Europe BV)  
 Dipl.-Ing. A. Pfaff (MSC.Software GmbH)  
 Prof. Dr.-Ing. K. Rohwer (DLR)  
 Dr. A. Svobodnik (Harman/Becker Automotive Systems)  
 Prof. Dr.-Ing. habil. M. Zehn (TU Berlin / Femcos mbH)

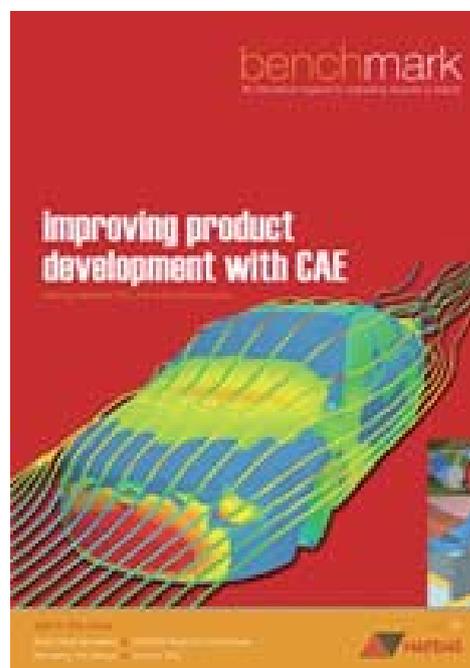
## Mitglied bei NAFEMS?

NAFEMS hat weltweit über **930 Mitgliedsunternehmen und -Institutionen**.

### NAFEMS Mitglieder erhalten unter anderem:

- Benchmark (Internationales FEM-Magazin)
- Literatur
- Freie Seminarplätze
- Ermäßigungen für Trainingskurse, Kongresse und Literatur
- Zugriff auf passwortgeschützten Webbereich mit Kontaktmöglichkeiten und Informationen
- Kontakt zu über 900 Organisationen weltweit

**Werden auch Sie Mitglied !**



### Die Zeitschrift „Benchmark“

Benchmark, das internationale NAFEMS Magazin, behandelte in der Januar-Ausgabe unter anderem folgende Themen:

- Discontinuous deformation analysis of concrete structures
- Numerical simulation in the process and manufacturing industries
- What a manager should know about Finite Element Analysis
- Icons of CFD

Die nächste Ausgabe erscheint im Juli 2010.

**Jetzt abonnieren – für Mitglieder natürlich frei!**

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

**Impressum**

**Editor-in-Chief**

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

**Redaktioneller Beirat**

Dr. Yasar Deger (HSR, CH)  
Dr. Alfred Svobodnik (Harman/Becker  
Automotive Systems, A)  
Prof. Dr. Manfred Zehn (TU Berlin /  
Femcos mbH, D)

**Redaktion**

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

**Gestaltung / Layout / Anzeigen**

Werbos GbR  
Osterham 23, D-83233 Bernau  
Tel. +49 (0) 80 51 - 96 74 - 3 22  
Fax +49 (0) 80 51 - 96 74 - 3 37  
Mobil +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 01.01.2010

**Verteilung / Bezug**

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

**Copyright © 2010, 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.

Vorwort des Editor-in-Chief..... 2

**Sponsoren**..... 3

Über NAFEMS / Mitgliedschaft..... 4

Impressum / Inhalt..... 5

Veranstaltungskalender ..... 6

NAFEMS DACH Aktuell: Seminare / Kurse / Literatur etc..... 7 - 12

NAFEMS: Europäische SDMP Konferenz / Invitation 2 Tender ..... 12 - 13

Neuigkeiten..... 14 - 21

**FACHBEITRÄGE**

**Fokus Multidisziplinäre Analysen**

**Ganzheitliche Simulation von mechatronischen**

**Schwingungstilgern für automobile Anwendungen ..... 22**

J. Forsen, S. Granzow (BMW AG); H. Baier (TU München)

**Entwicklung einer elektrisch-thermisch-mechanisch**

**gekoppelten Simulationsmethode für Fügeprozesse ..... 35**

B. Scholz, M. Brink (TWT GmbH); H. Steinmetz (Daimler AG)

**Multidisziplinäre Simulation pneumatischer Scheiben-**

**wischersysteme für Hochgeschwindigkeitszüge ..... 46**

M. Schumacher, M. Barej, M. Hüsing, B. Corves (RWTH Aachen)

**Fokus Computational Fluid Dynamics (CFD)**

**Numerische Simulation der Bypassströmung im**

**Abhitzedampferzeuger einer Gasturbine ..... 57**

J. Hesse (CFX Berlin Software GmbH)

**Rückmeldeformular ..... 64 - 65**

**Bitte beachten Sie die Schaltungen unserer Anzeigenkunden:**

**Werbeanzeigen**

TU Darmstadt ..... 14

IBM Deutschland GmbH..... 15

NAFEMS..... 16

<b>SIMPACK Academy FEM-MBS Interfacing</b>	05.-06.07.	Andechs, D	<a href="http://www.simpack.com/simpack_academy.html">www.simpack.com/simpack_academy.html</a>	SIMPACK AG
<b>NAFEMS e-Learning Kurs: Non-Linear Analysis</b>	20.07. (4 Wo)	Internet	<a href="http://www.nafems.org/e-learning">www.nafems.org/e-learning</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS Webinar: Strategies for Deploying Expert and Casual CAE Tools</b>	30.07.	Internet	<a href="http://www.nafems.org/events">http://www.nafems.org/events</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS e-Learning Kurs: Composite FE Analysis</b>	24.08. (4 Wo)	Internet	<a href="http://www.nafems.org/e-learning">www.nafems.org/e-learning</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS 2010 Virtual Conference: 2020 Vision</b> (hosted by NAFEMS NA)	08.-09.09	Internet	<a href="http://www.nafems.org/virtual">www.nafems.org/virtual</a>	NAFEMS
<b>SIMPACK Academy MBS Numerics</b>	14.-16.09.	Andechs, D	<a href="http://www.simpack.com/simpack_academy.html">www.simpack.com/simpack_academy.html</a>	SIMPACK AG
<b>Deutsche SIMULIA-Konferenz</b>	20.-21.09.	Heidelberg, D	<a href="http://www.simulia.com/de">www.simulia.com/de</a>	Dassault Systemes Simulia GmbH
<b>SIMPACK Academy Wind Turbine and Drivetrain</b>	05.-07.10.	Gross Schwansee, D	<a href="http://www.simpack.com/simpack_academy.html">www.simpack.com/simpack_academy.html</a>	SIMPACK AG
<b>NAFEMS France Regional Conference</b>	12.-13.10.	Paris, F	<a href="http://www.nafems.org/events">www.nafems.org/events</a>	NAFEMS
<b>LS-DYNA Anwenderforum</b>	12.-13.10.	Bamberg, D	<a href="http://www.dynamore.de">www.dynamore.de</a>	DYNAMore
<b>Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 7.0</b>	21.-22.10.	Weimar, D	<a href="http://www.dynardo.de/wost/">www.dynardo.de/wost/</a>	Dynardo
<b>NAFEMS NORDIC Conference 2010</b>	26.-27.10.*	Göteborg, S	<a href="http://www.nafems.org/events">www.nafems.org/events</a>	NAFEMS
<b>ANSYS Conference &amp; 28. CADFEM Users´ Meeting</b>	03.-05.11.	Aachen, D	<a href="http://www.usersmeeting.com">www.usersmeeting.com</a>	ANSYS / CADFEM
<b>SIMVEC - Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau</b>	16.-17.11.	Baden-Baden, D	<a href="http://www.simvec.de">www.simvec.de</a>	VDI
<b>European NAFEMS Conference on Simulation Data and Process Management (SDPM)</b>	24.-25.11.	Frankfurt, D	<a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS Trainingskurs FEM: Einführung in die praktische Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM)</b>	11.-13.10.	Wiesbaden, D	<a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a>	NAFEMS
<b>NAFEMS Trainingskurs CFD: Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications</b> (in Englisch)	24.-25.11.	Wiesbaden, D	<a href="http://www.nafems.org">www.nafems.org</a>	NAFEMS
<b>Euromold - Weltmesse für Werkzeug-/Formenbau, Design, Produktentwicklung</b>	01.-04.12.	Frankfurt, D	<a href="http://www.euromold.com">www.euromold.com</a>	Demat
<b>International Workshop, Multi-Scale Methods in Computational Engineering</b>	09.-10.12.	Darmstadt, D	<a href="http://www.graduate-school-ce.de/multiscale">www.graduate-school-ce.de/multiscale</a>	TU Darmstadt



**NWC**  
 NAFEMSWORLDCONGRESS 2011  
 23-26 MAY | BOSTON | USA

**NAFEMS World Congress 2011**  
 23.-26.05.2011  
 Boston, USA  
[www.nafems.org/congress](http://www.nafems.org/congress)

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

## Die nächsten NAFEMS Trainingskurse

**Einführung in die praktische Anwendung der FEM** (jetzt 3-tägig)  
Wiesbaden - Inhalte und Infos auf Seite 8

**NEU**

11. - 13. Okt. 2010 \*

**Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications**  
Wiesbaden - Inhalte und Infos auf Seite 9

24. - 25. Nov. 2010 \*

## Das nächsten NAFEMS Seminare

**Simulationsbasierte Auslegung nach Betriebsfestigkeit und Lebensdauer**  
Wiesbaden - Inhalte und Infos auf Seite 10

10. - 11. Nov. 2010 \*

**Fortschritte in der Simulation von Verbunden**  
Wiesbaden - Inhalte und Infos auf Seite 11

06. - 07. April 2011 \*

## Europäische NAFEMS Konferenz in Deutschland

**European Conference on Simulation Data and Process Management (SDPM)**  
Frankfurt - Inhalte und Infos auf Seite 12

24. - 25. Nov. 2010

## Schreiben Sie ein Buch - Invitation 2 Tender

- Obtaining Parameters for Common Geotechnical Constitutive Models
- How to Undertake Fluid Structure Interaction
- How to Model Composite Materials
- Why Do Validation
- Essential Fluid Dynamics for CFD - Training Course Proposal
- How to Analyse and Process CFD Output
- How to Perform Dynamic FE Analysis
- Determination and Use of Material Properties for FE

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

## Literatur

NAFEMS bietet mit über 200 Publikationen eine umfangreiche Auswahl an Fachliteratur im Berechnungsumfeld an. Die zur Zeit häufig bestellten Publikationen sind zum Beispiel:

- International Journal of CFD Case Studies Vol 8
- Why Do Electromagnetic Finite Element Analysis?
- What is V&V
- NAFEMS North American 2008 Regional Summit:  
NAFEMS 2020 Vision of Engineering Analysis and Simulation
- Quality Management in Engineering Simulation - A Primer for NAFEMS QSS
- BENCHmark Magazin
- 

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

## e-Library

NAFEMS bietet für Mitglieder Literatur - zunächst im Versuch - zum Download an. Folgende Publikationen sind zurzeit erhältlich:

- How To Understand CFD Jargon
- A Roadmap of NAFEMS documents
- State of the Art Review - Weld Simulation Using Finite Element Methods
- Procedural Benchmarks for Common Fabrication Details in Plate and Shell Structures
- Advanced Finite Element Contact Benchmarks
- An Introduction to Modelling Buckling and Collapse - Second Edition
- 

[www.nafems.org/publications/e-library](http://www.nafems.org/publications/e-library)

Neuer 3-tägiger NAFEMS Trainingskurs FEM

**NEU**

## Einführung in die praktische Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM)

11. - 13. Oktober 2010 in Wiesbaden

Der Kurs 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



Dr. sc. techn. ETH/SIA  
Yasar Deger

HSR, Abt. Maschinentechnik,  
Inst. für Anlagen- und Sicherheitstechnik – SITEC

Herr Deger hat langjährige, breitgefächerte Erfahrung in der Praxis der Methode der Finiten Elemente und in der Angewandten Mechanik. Zugleich ist er als Dozent für Technische Mechanik und Methode der Finiten Elemente an der HSR, Hochschule für Technik Rapperswil, in der Schweiz tätig und erteilt ausserdem seit 1992 Weiterbildungskurse / Workshops für Konstrukteure und Ingenieure in der Industrie. Sein Buch „Die Methode der Finiten Elemente“ erscheint beim Expert Verlag in der 5. Auflage und ist Teil der Kursunterlagen.

### Kursprache

Deutsch

### Inhouse-Kurs

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

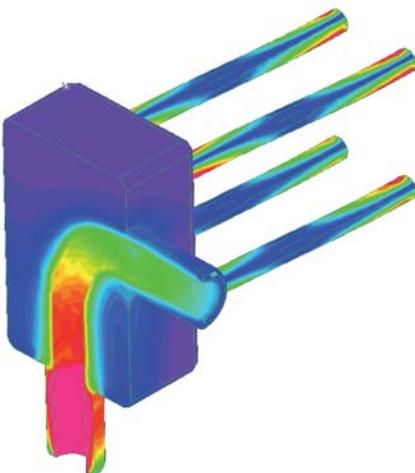
[www.nafems.org/events/](http://www.nafems.org/events/)

2-tägiger NAFEMS Trainingskurs CFD

## Introduction to CFD Analysis: Theory and Applications

24. - 25. November 2010 in Wiesbaden

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



### Inhalte

- Einleitung / Übersicht
- Welche Gleichungen werden in einem CFD-Programm gelöst?
- Beschreibung der Finite-Volumen Methode zur Lösung der Gleichungen anhand von Beispielen, Darstellung von Problemen / Fehlerquellen beim Lösungsprozess
- Tipps und Hinweise zur CFD-Vernetzung
- Praktische Umsetzung: Vom realen Bauteil zum Simulationsmodell
  - Überlegungen vor der Simulation
  - Annahmen und Voraussetzungen
  - Randbedingungen
  - Gittergenerierung
  - Erläuterung der Probleme an einem Praxisbeispiel
- Qualität von CFD-Berechnungen
  - Überprüfung von CFD-Ergebnissen / Kontrollmöglichkeiten
  - Bewertung der Ergebnisse von CFD-Berechnungen
- Ausblick auf weitere Entwicklungen / Tendenzen in der CFD-Welt (FSI, Optimierung,..)
- Fallbeispiele / Workshop / Diskussionen

### Referent



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.  
Uwe Janoske

Bergische Universität Wuppertal,  
Fachgebiet für Strömungsmechanik

Herr Janoske hat langjährige, breitgefächerte Erfahrung in der Praxis auf dem Gebiet der Strömungsberechnung. An der Bergischen Universität Wuppertal vertritt er das Fachgebiet für Strömungsmechanik und ist über zahlreiche Forschungsprojekte und Industriekooperationen in unterschiedlichsten Anwendungen der Strömungsberechnung aktiv.

### Kurssprache

Englisch

### Inhouse-Kurs

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

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

NAFEMS Seminar - Call for Papers

# Simulationsbasierte Auslegung nach Betriebsfestigkeit und Lebensdauer

Seminar-Sponsor



10. - 11. November 2010 in Wiesbaden

Betriebslasten wirken meist sehr unregelmäßig und vorwiegend dynamisch über die gesamte Lebensdauer einer technischen Struktur. Die Erkenntnis, dass ein schwingend belastetes Bauteil nach einer hinreichend großen Zahl von Lastwechseln versagt, obwohl die Belastung kleiner ist, als eine vergleichbare statische Belastung, geht schon auf August Wöhler (1819 – 1914) zurück. Denn eine Schädigung setzt bereits bei relativ niedrigen Spannungswerten ein und diese Schädigungen akkumulieren sich über die weiteren Lastwechsel.

Der „klassische“ Festigkeitsnachweis für Bauteile (linear elastisches Materialverhalten, statische Belastung) kann dies nicht berücksichtigen, dafür werden entsprechend große Sicherheitsbeiwerte eingeführt. Eine der Realität näher kommende Betrachtungsweise hat unter dem Begriff Betriebsfestigkeit (1939 E. Gassner und A. Teichmann) schon länger Eingang in die Denkweise des Ingenieurs gefunden. Gleichwohl setzt ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis stets auch den statischen Festigkeitsnachweis voraus.

Heute gehört die Auslegung nach der Betriebsfestigkeit auf der Grundlage von Simulationsverfahren (z. B. FEM, MKS, ...) in vielen Bereichen zur gängigen Praxis bzw. zwingenden Notwendigkeit. Die zum Einsatz kommenden Werkstoffe (spröde oder plastisch verformbare Materialien und solche mit zeitabhängigem Verhalten usw.) reagieren in unterschiedlicher Weise auf eine zyklische Belastung.

Zur Beurteilung des Festigkeitsverhaltens eines Werkstoffs bei zeitabhängiger Belastung muss bekannt sein, bei welchen Spannungen sich eine Schädigung des Materials ergibt, worin diese besteht und in welcher Weise sie sich akkumuliert. Hierzu sind sowohl theoretische (Schädigungsmechanik) als auch experimentelle Untersuchungen und statistische Verfahren erforderlich.

Die auf dieser Grundlage entwickelten Methoden haben in einschlägigen Normen, Vorschriften, Richtlinien, Empfehlungen und zahlreichen Softwareprodukten Verbreitung gefunden. Die deutsche FKM-Richtlinie (5. Ausgabe 2003) beschreibt beispielsweise den statischen und den Ermüdungsfestigkeitsnachweis (als Dauer-, Zeit- oder Betriebsfestigkeitsnachweis). Für die verschiedenen Werkstoffe sind aber die verfügbaren Schadensakkumulations- bzw. Schädigungsmodelle sehr unterschiedlich entwickelt und auch die notwendigen Testdaten liegen nicht immer in ausreichender Form vor. Damit ist die Betriebsfestigkeit nach wie vor ein Gegenstand permanenter Forschung und Entwicklung insbesondere für neuere Werkstoffe wie Komposite.

Konkurrenzfähige Produkte müssen leistungs- und gewichtsoptimiert sein ohne dabei wirtschaftliche und fertigungstechnische Gesichtspunkte zu vernachlässigen: dies ist mit einer konventionellen dauerfesten Auslegung oft nicht erreichbar. Die entscheidende Überlegung ist, dass jedes Bauteil, jede Maschine oder jede Anlage letztlich nur innerhalb eines bestimmten Zeitraums Verwendung findet. Einzelne Bauteile einer Maschine oder einer Anlage

müssen somit nicht ewig halten. Mit einer Betriebsfestigkeitsuntersuchung kann festgestellt werden, ob ein Bauteil so dimensioniert ist, dass es eine vorgeschriebene Lebensdauer erreicht.

Rund um die Simulationssoftware (FEM, MKS, ...) haben sich verschiedene, leistungsfähige Softwareprodukte etabliert, die Bewertungen nach Betriebsfestigkeit und Lebensdauer ermöglichen. Die verfügbare Software hat einen hohen Entwicklungsstand erreicht, der eine vorteilhafte Anwendung in verschiedenen Industriebereichen ermöglicht; allerdings ist der Ausbildungs- und Kenntnisstand bei potentiellen Anwendern häufig hinter diesen Möglichkeiten zurück. Die richtige Anwendung setzt neben einer geeigneten Modellierung der Strukturen und Erfassung der Betriebslasten auch Kenntnisse und Erfahrungen zu den einsetzbaren Methoden und deren Grundlagen und Annahmen voraus.

**Die Zielstellung des Seminars ist,** anhand verschiedener Anwendungsbereiche aufzuzeigen, was mit den gegenwärtigen Mitteln erreichbar ist und welchen Entwicklungsstand Theorie und Software für die praktische Anwendung erreicht haben (state-of-the-art),

- Kenntnisse und Erfahrungen zur Anwendung der simulationsbasierten Betriebsfestigkeits- und Lebensdauerberechnung zu vermitteln,
- interessante Fallbeispiele aufzuzeigen, die Grenzen und Möglichkeiten der Methoden verdeutlichen und auch Vergleiche mit realen Tests gegenüberstellen und

- Trends aus Forschung / Entwicklung und in der Weiterentwicklung von Normen, Richtlinien und Software darzustellen sowie durchaus auch Anforderungen aus der Anwendersicht zu formulieren.

In zwei Hauptvorträgen werden ausgewiesene Vertreter aus Industrie und Wissenschaft einen Einstieg und Überblick zum Thema geben. Kern der Veranstaltung werden aber Anwendervorträge sein, die interessante Erfahrungen und Einsatzgebiete, methodisches Vorgehen und eingesetzte Verfahren aufzeigen. Vertreter aus Forschung und Entwicklung sollen ebenso wie Vertreter von Softwareanbietern zu Wort kommen, um, in für NAFEMS-Veranstaltungen typischer Weise, ein Rundumbild zur simulationsbasierten Betriebsfestigkeit- und Lebensdauerberechnung zu vermitteln. Natürlich wird auch genügend Zeit für die Diskussion und den Austausch unter den Teilnehmern eingeplant: das ist uns nicht minder wichtig.

#### Technischer Koordinator

Prof.Dr.-Ing.habil. Manfred W. Zehn (TU Berlin)

Vice Chairman of NAFEMS und Mitglied des deutschen NAFEMS Steering Committees

#### Abstract

Wir freuen uns auf Ihren 1/2-seitigen, deutschsprachigen Titel/Abstract per e-mail an [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de) bis zum

**6. September 2010**

#### Begleitende Ausstellung

Interessierte Aussteller melden sich bitte baldmöglichst mit beigefügtem Rückantwortformular an – die Ausstellungsfläche ist begrenzt.

#### Informationen

Nähere Informationen sowie ein Call for Papers (pdf) finden Sie unter: [www.nafems.org/events/nafems/2010/FatigueLifetime/](http://www.nafems.org/events/nafems/2010/FatigueLifetime/)

## NAFEMS Seminar - Vorankündigung

# Fortschritte in der Simulation von Composites

06. - 07. April 2011 in Wiesbaden

Wenn unterschiedliche Werkstoffe geschickt kombiniert und sicher miteinander verbunden werden, können hervorragende Eigenschaften erreicht werden. Das gilt insbesondere für langfaserverstärkte Kunststoffe. Anerkannt und vielseitig genutzt werden die hohen gewichtsbezogenen Festigkeiten und Steifigkeiten von Strukturen aus Glas- oder Kohlenstofffasern, eingebettet in eine Kunstharzmatrix. Aber auch Naturfasern und Matrixmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen haben ein wachsendes Anwendungsspektrum. Zudem gibt es die Möglichkeit, die Matriceigenschaften durch Einbringung von Nanopartikeln wesentlich zu verbessern. Mit geeigneten Materialkombinationen lassen sich so die gewünschten Eigenschaften gezielt entwerfen und realisieren.

Numerische Simulation ist der Schlüssel für eine erfolgreiche Composite-Struktur; erst durch sie können aufwändige Testreihen und hohe Ausschussraten vermieden werden. Das beginnt bereits bei der Auswahl der beteiligten Materialien und der Konzeption für deren Zusammenwirken. Welche Fasern sind mit welchem Matrixmaterial zu kombinieren, und können vielleicht bestimmte Partikel zur Materialverbesserung beitragen? Die Vielzahl der Möglichkeiten erfordert eine rechnerische Vorhersage der Eigenschaften sowohl auf der mikroskopischen als auch auf der makroskopischen Ebene.

Auch die Herstellungsprozesse wie zum Beispiel die Drapierung trockenen Fasermaterials und die Harzinjektion können durch Simulation optimiert werden. Schrumpfung und Spannungen aus dem Aushärte-

prozess können zu unerwünschten Verformungen führen, die vorab berechnet und in der Formgebung kompensiert werden müssen. Schließlich zeigen fertige Strukturen aus Verbundwerkstoffen spezielle Eigenschaften, Verhaltensweisen und Schädigungsmechanismen, die besondere Modelle und Analysetechniken erfordern.

#### Ziel des Seminars

Im Herbst 2007 hat NAFEMS ein erfolgreiches Seminar zum Thema 'Simulation von Verbunden – Material und Strukturen' veranstaltet. Seitdem ist die Entwicklung stürmisch vorangeschritten. Das gilt nicht nur für die Verbundwerkstoffe selber, sondern auch für die Fertigung und die Werkzeuge zur Simulation.

Das Seminar soll einerseits deutlich machen, welche Probleme mit den bekannten Programmsystemen bereits gelöst werden können und wie dabei vorzugehen ist. Andererseits sollen auch spezielle Entwicklungen für die Simulation von Composites vorgestellt werden, die gezielt einzelne Aufgaben angehen.

Anwendern wird damit eine umfassende Übersicht über die vorhandenen Möglichkeiten gegeben, aber auch die Entwickler erhalten Anregungen, wo noch Lücken sind und wie diese vielleicht geschlossen werden können.

#### Beiträge

Beiträge werden erbeten zu den Themenkreisen Mikromechanik der Composites, Fertigungssimulation, Berechnung geschichteter Strukturen, Analyse von Schadensauswirkungen und Schadensfortschritt, der Auslegung und Optimierung von Verbundstrukturen sowie deren

Ermüdung und Betriebsfestigkeit. Damit soll die Basis gelegt werden für einen intensiven Meinungsaustausch über Fortschritt und Erfahrungen auf dem Gebiet der Simulation von Composites.

Auch die Darstellung von Schwierigkeiten und ungelösten Fällen aus der Praxis wird die Diskussion beleben und ist deshalb ausdrücklich erwünscht.

#### Technischer Koordinator

Prof. Dr.-Ing. Klaus Rohwer  
(DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.)  
Mitglied des deutschen NAFEMS Steering Committees

#### Abstract

Wir freuen uns auf Ihren 1/2-seitigen, deutschsprachigen Titel/Abstract per e-mail an [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de) bis zum **28. Januar 2011**

#### Begleitende Ausstellung

Interessierte Aussteller melden sich bitte baldmöglichst mit beigefügtem Rückantwortformular an – die Ausstellungsfläche ist begrenzt.

#### Informationen

Nähere Informationen sowie ein Call for Papers (pdf) finden Sie unter: [www.nafems.org/events/nafems/2011/Composites-DACH/](http://www.nafems.org/events/nafems/2011/Composites-DACH/)

## NAFEMS Konferenz - Vorankündigung

# NAFEMS European Conference on Simulation Data and Process Management (SDPM)

24. - 25. November 2010 in Frankfurt

Today, many manufacturers are facing tremendous challenges related to the storage and retrieval of simulation data. Product Data Management (PDM) systems are not capable of handling the terabytes of information which are generated as a result of performing these complex simulations. Simulation Data and Process Management (SDPM) provides a mechanism for the storage, management, and retrieval of this performance-related data.

The NAFEMS SDM Working group vision is that SDM is to be cost-effective, easy to use, and ubiquitous. SDPM is integrated with the business, engineering modeling and simulation processes, used for work-in-progress and completed data, collaboration, knowledge capture, reuse, and long-term archival.

Data management methods are integrated with simulation analysis methods, ranging from closed-form to highly complex multi-physics numerical models. Engineering simulation data encompasses the data, models, processes, documents and metadata intrinsic to performing modeling, simulation, and analysis. SDPM provides for the management of data objects and metadata at all levels of granularity and abstraction, including design and analysis parameters, requirements, and results. SDPM solutions are integrated with other systems and databases that manage engineering and product data. SDPM systems are available for managing and executing a wide range of modeling and simulation data and processes, across the breadth of engineering disciplines,

supporting a heterogeneous analysis environment. Integration of design, test, and manufacturing data with modeling, simulation and analysis is supported.

This European Conference addresses this breakthrough technology by helping participants better understand the benefits gained from implementing a Simulation Data and Process Management system and how to save time, reduce development costs, and improve time-to-market.

#### Expected presentations

- Examples and best practices in industry
- Requirements and use cases
- Solutions from software vendors
- Strategies, developments, trends and future of SDPM

#### Exhibition

Software and hardware vendors, solution providers, consultants

#### Panel discussion

Representatives from industry and software vendors

#### Conference Language

English

#### Abstracts & presentations

Abstracts shall be send by e-mail to [roger.oswald@nafems.org](mailto:roger.oswald@nafems.org) latest **September 6, 2010**.

#### Further information

Please contact Roger Oswald for further information ([roger.oswald@nafems.org](mailto:roger.oswald@nafems.org)).

# invitation<sup>2</sup>TENDER



## Determination and Use of Material Properties for FE Purpose

The Computational Structural Mechanics Working Group (CSMWG) wishes to commission a new document with the suggested title "Determination and use of material properties". The booklet will be a companion volume to the existing NAFEMS publications "An introduction to the use of material models in FE".

The purpose of the booklet is to explain to FE users where they can obtain the material properties necessary for the use of the material models described in the existing introductory guide.

### Intended Readership

The intended readership consists of FE users, engineers, scientists and their managers. The aim is to allow them to make an informed decision on how to obtain the parameter values they need. It is assumed that the readership are familiar with the material models that they are interested in and that they have access to "An introduction to the use of material models in FE" to assist them with their choice of material model.

### Booklet outline

For each of the material models mentioned in "An introduction to the use of material models in FE", the booklet should describe experimental methods used to determine the required material properties, including how to obtain the parameters from the experimental data with reference to any appropriate documents issued by ISO/BS/other standards organisations. The processing of the data should be illustrated with examples. The material properties should include, but need not be limited to, the following list:

- Elastic properties: Young's modulus, Poisson's ratio, bulk modulus, what to do in the anisotropic case
- Basic properties: density, thermal expansion coefficient
- Plastic properties: yield, including consideration of yield surface choice and hardening, and parameters for the Drucker-Prager and Mohr-Coulomb models
- Properties of composites: those not covered elsewhere, including details of anisotropic be-

haviour (moduli and strength properties), shear strength and inter-laminar shear strength, and moisture coefficients.

- Hyperelasticity and rubbers, including the most commonly-used models as listed in the introductory document (Mooney-Rivlin, Neo-Hookean, Yeoh, Ogden, Arruda-Boyce and Van der Waals)
- Soils, including cap hardening
- Creep properties, including power law and hyperbolic-sine law

Each property should include consideration of as wide a range of materials as possible since different methods will be required for different materials. Any other commonly-used materials can be included at the author's discretion, particularly those included in the booklet but not listed above. Possibilities include fracture and damage properties, damping characteristics, and moisture diffusion properties.

The guide should also include a list of suppliers of relevant experimental equipment, a list of suppliers of material parameter measurement services, and a list of existing sources of publicly available measurement data and parameter values. These lists should enable users of the booklet to identify a way to obtain the data that they need.

The booklet does not need to repeat the derivations and explanations of the material models presented in the introductory booklet. It can be assumed that readers already have access to this booklet.

It is anticipated that the length of this publication will be 60 – 100 pages in length and the associated cost of preparing the document is expected to be in the low thousands of pounds.

### Closing date

**June 15, 2010**

E-mail proposals to: [csmwg@nafems.org](mailto:csmwg@nafems.org).  
Further details are available from NAFEMS office or by contacting the Chairman of the CSM-WG [csmwg@nafems.org](mailto:csmwg@nafems.org).

**ALTAIR ENGINEERING****Ehemaliger Tata Technologies Entwicklungsleiter bei Altair**

Altair Engineering gab bekannt, dass Martin Jones nun für den Altair Geschäftsbereich ProductDesign tätig ist, um die Entwicklung eines neuen innovativen elektrischen Stadtfahrzeuges zu leiten. Vorher war Martin Jones bei Tata Technologies für die Leitung der Fahrzeugentwicklungsprogramme zuständig. Für seine neue Aufgabe bringt er die notwendige Erfahrung aus der Automobilindustrie mit, welche er bei seinen bisherigen Tätigkeiten im führenden Management gewinnen konnte. Darunter zählen Positionen, wie die des technischen Leiters bei JCB, bei der er für alle Produktentwicklungsaktivitäten des Unternehmens verantwortlich war, seine Rolle als Leiter der Entwicklung, weltweiten Vertrieb und Applikation von Product Lifecycle Management bei IBM UK sowie verschiedene Positionen bei Rover, von der Ausbildung bis hin zum Leiter der Produktion. Nach der Entscheidung des führenden Automobilherstellers, Altair PD mit der Entwicklung des luxuriösen elektrischen Stadtfahrzeuges zu

beauftragen, wurde Martin Jones direkt zum European Chief Engineer für Altairs Geschäftsbereich ProductDesign ernannt. Altair PD übernimmt bei diesem Projekt die Entwicklungsverantwortung, vom Konzept bis hin zur Produktion, für das Gesamtfahrzeug und wird bei diesem Projekt seinen bewährten simulationsgetriebenen Designprozess anwenden und seine weltweite Entwicklungserfahrung nutzen.

**OHB Technology AG entscheidet sich für HyperWorks**

Altair Engineering gab bekannt, dass die OHB Technology AG seine Nutzung von HyperWorks deutlich ausgeweitet hat, um die Pre- und Post-Processing Werkzeuge in allen Tochtergesellschaften der Gruppe auf eine Softwaresuite zu konsolidieren. Darunter fallen die Unternehmen OHB-System, MT Aerospace, Luxspace und Kayser-Threde.

**Sogeti High Tech GmbH verüfflicht HyperWorks**

Altair Engineering gab bekannt, dass sich die Sogeti High Tech GmbH, Deutschland, ein bekanntes Unternehmen für Ingenieursdienstleistungen und Beratung in den Bereichen

Luft- und Raumfahrt, Automobil, Energie, Rüstung und Transport, seine Nutzung von HyperWorks massiv ausgeweitet hat und die Suite nun als Standard Computer Aided Engineering (CAE) Plattform einsetzt.

**FTire und DIGIMAT zur HyperWorks Partner Alliance**

Altair Engineering gab bekannt, dass FTire von cosin scientific software, und DIGIMAT von e-Xstream engineering der HyperWorks Partner Alliance (HWP) hinzugefügt wurde. FTire, ein nichtlineares 3D Reifensimulationsmodell, wird von cosin scientific software entwickelt und kann nun mit MotionSolve, dem Solver für Mehrkörpersimulationen, zur realistischen Gesamtfahrzeugsimulation, zur Verbesserung von Betriebsfestigkeit und Fahrkomfort, gekoppelt werden. HyperWorks Anwender können ab sofort die neueste Version von FTire im Internet unter [www.hyperworksalliance.com](http://www.hyperworksalliance.com) herunterladen und ohne zusätzliche Kosten unter ihrem vorhandenen HyperWorks Lizenzsystem nutzen. HyperWorks Anwender können jetzt die neuesten Versionen von Digimat-MF, Digimat-MX, Map und Digimat-to-RADIOSS, welches die

Werbeanzeige



Graduate School of Computational Engineering  
International Workshop

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Multi-Scale Methods in Computational Engineering

December 9–10, 2010, Darmstadt

Registration deadline: August 31, 2010



Exzellenzinitiative  
des Bundes und der Länder

Contact: Dr.-Ing. Sascha Schnepf, +49 6151 16 70948, [schnepf@gsc.tu-darmstadt.de](mailto:schnepf@gsc.tu-darmstadt.de)

[www.graduate-school-ce.de/multiscale](http://www.graduate-school-ce.de/multiscale)

Verknüpfung zwischen RADIOSS und Spritzgussmodellen enthält, von der HVEC Website [www.hyperworkscommunity.com](http://www.hyperworkscommunity.com) heruntergeladen und durch die Nutzung Ihrer HyperWorks Lizenzen ohne zusätzliche Kosten auf die DIGIMAT Software zugreifen.

#### Neue Maßstäbe bei der Crashsimulation von Gesamtfahrzeugen

Altair Engineering gab bekannt, dass die Crashsimulation eines Gesamtfahrzeugs, ausgehend von den CAD-Daten des OEMs, inkl. Vernetzung, Modellaufbau und Simulation, in nur 24 Stunden durchgeführt werden konnte. Dieser Durchbruch in der Produktentwicklung ist gleichzustellen mit dem Effizienzgewinn, der vor Jahren mit dem Umstieg von Zeichentischen auf CAD-Workstations erzielt wurde. Der erreichte Meilenstein im Bereich Crashsimulation entspricht einer Verkürzung, der üblicherweise für eine solche Untersuchung benötigten Bearbeitungszeit, um zwei bis vier Wochen.

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

## AUTODESK

#### Autodesk Algor Simulation Produktfamilie

Autodesk erweiterte sein Digital Prototyping Portfolio um die besonders leistungsfähige FEM-Simulations- und Berechnungssoftware Algor. Mit Autodesk Algor können komplexe Konstruktionen unter mechanischen und thermischen Belastungen sowie unter realistischen Lasten und Randbedingungen berechnet werden. Dazu zählen leistungsfähige Simulationsfunktionen wie Mechanical-Event-Simulation (MES), Strömungssimulation und Multi-Physics. Konstrukteure und Ingenieure können mit Autodesk Algor wichtige Entscheidungen über die Konstruktion eines Produkts sehr früh im Entwicklungsprozess treffen. Auf diese Weise werden mögliche Probleme frühzeitig erkannt, was Kosten einspart und die Produktentwicklung beschleunigt. Umfangreiche Tools für die Finite-Element-Modellierung

und integrierte Materialbibliotheken unterstützen Ingenieure dabei, FEM-Modelle schnell und einfach aus CAD-Daten zu gewinnen. Somit können bereits in der Entwurfsphase erste Ideen analysiert und entsprechend optimiert werden. Die Lösung unterstützt den direkten, assoziativen Datenaustausch mit einer Vielzahl von CAD-Programmen. Die Autodesk Algor Simulation Produktfamilie ist skalierbar und bietet maßgeschneiderte Analyse- und Simulationsfunktionen für lineare und nichtlineare Berechnungen, statische und dynamische Analysen, Strömungssimulationen, elektrostatische sowie Multi-Physics-Simulationen. Die CAE-Software von Algor wurde Anfang 2009 von Autodesk übernommen. Weitere Informationen finden Sie unter [www.autodesk.com/algor](http://www.autodesk.com/algor).

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

## CD-ADAPCO

#### Ausblick über "Battery Simulation Tool" in Online-Video

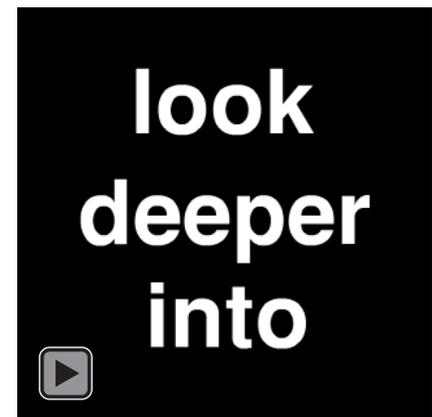
CD-adapco, hat die Veröffentlichung einer Online-Videodokumentation bekannt gegeben, welche einen Ausblick über die in Kürze erscheinende Version seiner „Battery Modeling Software“ gibt, die in Zusammenarbeit mit der Battery Design LLC entwickelt wurde. Das Video erläutert das Grundprinzip von Simulationen im Bereich Batterieentwicklung und gibt gleichzeitig einen Ausblick über die gekoppelte Simulationsfähigkeit, welche im Sommer-Release von CD-adapco's Simulationslösung STAR-CCM+ mit integriert sein wird.

#### Strategische Partnerschaft zwischen CD-adapco und Microsoft

CD-adapco gab mit der erweiterten Unterstützung der Betriebssysteme Windows 7 und Windows HPC Server 2008 und der Integration von STAR-View+ in die Office-2010-Produktreihe von Microsoft die weitere Festigung der Beziehung zu Microsoft bekannt.

[www.cd-adapco.com](http://www.cd-adapco.com)

Werbeanzeige



## COMSOL

#### COMSOL Multiphysics Version 4.0

Die neue Version 4.0 von COMSOL Multiphysics ist ab sofort verfügbar. COMSOL Multiphysics Version 4.0 kombiniert modernen Modellaufbau mit einem neuartig organisierten Modellüberblick und bringt damit Struktur und Übersichtlichkeit in Simulationen. Die völlig neu entwickelte Benutzeroberfläche zeichnet sich durch ihren logischen Aufbau und ihre Klarheit aus und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Produktivitätssteigerung. Höhepunkte sind u.a. der ‚Model Builder‘ - die graphische programmierbare Schnittstelle für Simulationen, der geometrische Parameter-Sweeps mit vollständiger Assoziativität und die Clusterrechnungen mit einer Netzwerklizenz. Die neu entwickelte LiveLink Produktfamilie eröffnet neuartige Zugänge und Möglichkeiten für Ihre Simulationen durch die direkte und vollständige Integration von COMSOL Multiphysics in führende CAD Programme und in MATLAB.

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



„NAFEMS Membership is a must for all those truly involved with numerical analysis, for continuous improvement and learning and sharing of experience.“

Instituto Technologico de Aragon

Creating Awareness | Delivering Education | Stimulating Standards



**NAFEMS** is the International Association for the Engineering Analysis Community: an independent, not-for-profit, international membership association, owned by its members. The scope of its activities encompasses all simulation technology, including Finite Element Analysis and Computational Fluid Dynamics. As new application areas and techniques constantly evolve, NAFEMS becomes involved to create awareness and deliver appropriate education and training.

**NAFEMS** publications and benchmarks are widely regarded within the engineering analysis community as the most authoritative source of information available. The areas covered by NAFEMS are expanding year by year with the growth in membership, and people increasingly view NAFEMS as a one-stop shop for all aspects of information on engineering analysis.

For engineering analysts, NAFEMS offers an excellent platform for continuous professional development.

**Get Involved.  
Join NAFEMS Today.**

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

**DYNAmore****Faurecia Group wählt LS-DYNA**

Die Faurecia Group wählt weltweit LS-DYNA als Standard-Solver zur Simulation von Crash und Insassensicherheit.

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

**ESI GROUP****Simulation von Brennstoffzellen**

Anlässlich der jährlichen Merit-Review- und Peer-Evaluation-Versammlung zum Wasserstoff- und Fahrzeugtechnologieprogramm des US-Energieministeriums (Department of Energy, DOE) wurden heute signifikante Fortschritte bei der Simulation der Leistung von Brennstoffzellen in Fahrzeugen vorgestellt. Mit diesem Programm soll die Fähigkeit von Simulationen verbessert werden, detaillierte Untersuchungen darüber durchzuführen, wie unterschiedliche Komponentenstrukturen und -eigenschaften den Gas- und Wassertransport in PEM-Brennstoffzellen (Proton Exchange Membrane) beeinflussen. Ingenieure von ESI North America waren während der letzten drei Jahren wesentlich an diesem Projekt beteiligt.

**PAM-DIEMAKER für CATIA V5 - Roadshow 2010**

Die Blechumformungssimulation hat sich zu einem bedeutenden Werkzeug für die Branche entwickelt, das dabei hilft, während der Fertigung auftretende Probleme zu verhindern oder zu lösen. Die Integration der Konstruktionsphase in PLM/CAD-Systeme und von dort die direkte Verbindung zur Simulation sind dabei ein neuer Trend, zu dem ESI mit PAM-DIEMAKER für CATIA V5 eine in die CATIA-V5-Umgebung integrierte schnelle Softwarelösung zur Konstruktion der Wirkflächen von Umformwerkzeugen beisteuert. ESI startet am 27. Mai 2010 in Zamudio, Spanien, seine weltweite Roadshow Rapid Die Face Design mit PAM-DIEMAKER für CATIA V5 (schnelle Erzeugung von Werkzeugwirkflächen mit PAM-DIEMAKER für CATIA V5). Bei dieser kostenlosen

Roadshow handelt es sich um eine Reihe von Seminaren zum Thema der in CATIA V5 eingebundenen Konstruktion von Umformwerkzeugen, die sich speziell an Methodenkonstrukteure, Fertigungsingenieure, sowie Fachleute für CAE und Blechumformungssimulation wendet. Die Teilnehmer können hier die Vorteile der nächsten Software-Generation zur Konstruktion von Wirkflächen kennenlernen. Das ganztägige Seminar bietet die Möglichkeit, Fachleute zu treffen und zu sehen, wie mit PAM-DIEMAKER für CATIA V5 Zeit und Kosten bei der Konstruktion von Wirkflächen gespart werden können, und zwar sowohl bei der Durchführung von Machbarkeitsstudien als auch in der Validierungsphase.

**Lösung zur Schweißsimulation**

Visual-WELD ist eine Workflowbasierte Benutzeroberfläche zur Modellierung von Schweißprozessen einschließlich aller für die Fertigung erforderlichen Informationen. Sie ergänzt und verstärkt ESI's Welding Simulation Suite, indem sie in jeder Konstruktions- und Herstellungsphase ein schnelles und präzises virtuelles Engineering des Verzugs und der Schweißqualität ermöglicht. Die Stärke dieser neuen Anwenderschnittstelle liegt in ihrer Einfachheit. Visual-WELD wurde konzipiert für Ingenieure, die sich mit der Planung und Herstellung von Schweißkonstruktionen befassen. Visual-WELD trägt dazu bei, mit minimalen Kosten spannungsminimierte Schweißkonstruktionen im Toleranzbereich zu entwickeln, die alle Kundenanforderungen erfüllen und eine sichere Produktion gewährleisten. Vor dem Hintergrund, dass schon ein Fehler bei der einfachsten Schweißstelle die gesamte Konstruktion gefährden kann, trägt Visual-WELD dazu bei, die Schweißqualität von Komponenten hinsichtlich Temperatur, Mikrostruktur und Restspannungen zu kontrollieren und zu steuern. Dadurch können Ingenieure Probleme wie rückseitige Temperaturen, Risse durch Spannungskorrosion sowie Rissbildung aufgrund von Zugspannungen am falschen Ort vermeiden. Ebenso können sie eine einheitliche

Spannungsverteilung erreichen und auf das Schweißverfahren zurückzuführende Strukturspannungen in der gesamten Konstruktion entdecken, die sonst einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer des Produkts hätten.

**Studentenversion für Virtual Performance Solution**

Mit der Veröffentlichung des Virtual Performance Educational Package stellt ESI Studierenden eine Spezialversion seiner Virtual Performance Solution zur Durchführung von Strukturanalysen und Aufprallsimulationen zur Verfügung. Das Virtual Performance Educational Package ist während der ersten 6 Monate für Studierende und Lehrkräfte kostenlos und kann über das Portal [www.esi-educational.com](http://www.esi-educational.com) heruntergeladen werden. Mit der einfach erlernbaren Einführung in die Grundlagen der Simulation ermöglicht das Virtual Performance Educational Package von ESI Statik- und Modalanalysen (impliziter Solver) sowie Crash-/Aufprallsimulationen (expliziter Solver PAM-CRASH). Die Benutzerumgebung besteht aus drei Modulen von Visual-Environment, einer offenen Arbeitsumgebung für kollaboratives Engineering: Visual-Mesh, Visual-Crash PAM und Visual-Viewer.

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

**FRAUNHOFER SCAI****High Performance Computing für wissenschaftliche und industrielle Anwendungen**

Das Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI entwickelt marktführende industrielle Anwendungen wie die Multiphysics-Software MpCCI, die Software SAMG zur Lösung linearer Gleichungssysteme mit Millionen Unbekannten, und die Software zur Verschnittoptimierung AutoNester. Selbst entwickelte Anwendungen, Inhouse-Codes industrieller Kunden als auch OpenSource-Anwendungen werden auf verschiedene Hardware-Architekturen portiert. Ein Schwerpunkt hierbei ist die Unterstützung von Grafikkarten. Zu den

weiteren Angeboten des Instituts gehört das Ausführen vergleichender Benchmarks führender industrieller Simulations-codes (zum Beispiel LSDYNA, FLUENT, Abaqus, Turbomole) auf seinen Hochleistungs-Rechenclustern mit Windows HPC und Linux. Das Institut unterstützt die Optimierung von Codes unter Einsatz einer Vielzahl von Parallelisierungs-Strategien in beiden Welten. Die neu entwickelte Software „elasticLM“ bietet mehr Flexibilität und reduzierte Kosten im Management von Software-Lizenzen auf Cluster-, Grid- und Cloud-Infrastrukturen. Die Nutzer, Software-Anbieter und Application Service Provider, profitieren dabei von maximaler Flexibilität. Ganz neue Geschäftsmodelle werden somit möglich. „elasticLM“ basiert auf offenen Standards und lässt sich leicht in bestehende Infrastrukturen einbinden. Neue und bestehende Lizenz-Modelle können so problemlos nebeneinander genutzt werden. Forscher am Fraunhofer SCAI haben die Lösung zum Lizenz-Management im Projekt „SmartLM“ entwickelt, das von der Europäischen Kommission gefördert wird. Pilotanwender sind Unternehmen wie LMS, Ansys und Intes, die Software auf dem Gebiet des Computer Aided Engineerings (CAE) anbieten.

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

## IBM

### System x und Storage für den Mittelstand

IBM bringt zwei neue Produkte im Bereich System x und Storage für den Mittelstand auf den Markt. Mit IBM System Storage DS3500 und IBM System x3620 M3 Express können Mittelständler das zunehmende Datenvolumen im Unternehmen besser verwalten und ihre Flexibilität erhöhen. Gleichzeitig lassen sich mit diesen neuen Angeboten die Kosten und die Komplexität der bestehenden IT-Infrastrukturen im Unternehmen reduzieren. Die neuen Systeme liefern mittelständischen Unternehmen eine verlässliche und

skalierbare IT-Basis zu erschwinglichen Preisen. Damit gewinnen mittelständische Firmen an Flexibilität für ihr Geschäft, erhalten Zugang zu neuen Ressourcen und können ihren Kunden besseren Service bieten.

### Mehr als 200 Kunden wechseln im ersten Quartal 2010 auf IBM Systeme

IBM gab bekannt, dass mehr als 200 Kunden im ersten Quartal 2010 kritische Geschäfts-Workloads weg von Oracle/Sun, HP und anderen Wettbewerbern auf IBM Server und Speicherlösungen migriert haben. Immer mehr Kunden entscheiden sich für IBM. Ein Grund hierfür sind die langfristigen Investitionen des Unternehmens in workload-optimierte Systeme und verlässliche, innovative Produkt-Roadmaps. Dieses Engagement der IBM bringt Systeme hervor, die die Kosten für Rechenzentren senken können und speziell für neue Workloads wie Business Analytics entwickelt wurden. Seit IBM vor vier Jahren ihr Migration-Factory-Programm eingeführt hat, um Kunden dabei zu unterstützen, auf IBM Systeme zu wechseln, haben sich fast 2.700 Kunden für IBM Server- und Speicherlösungen entschieden. Die Mehrheit dieser Migrationen betreffen Kunden, die von Oracle/Sun und HP zu IBM gewechselt sind. Allein in den letzten drei Monaten kamen bisher 117 Kunden von Oracle/Sun und 95 von HP zu IBM. Mit 574 Migrationen auf IBM Power Systems (im Durchschnitt 143 Migrationen pro Quartal) hat die IBM Migration Factory im Jahr 2009 – in einem schwachen Marktumfeld – ein Rekordergebnis erreicht. Am stärksten zu diesem Ergebnis beigetragen hat der Anstieg der Migrationen von Sun auf Power. Insgesamt 107 Kunden haben im ersten Quartal 2009 Power-Systeme den Oracle/Sun-Systemen vorgezogen, 41 entschieden sich für IBM statt HP. Kunden wechselten auch zu System x, System z und IBM Speicherangeboten. Im ersten Quartal konnte System x 21 Kunden von einer Migration weg von HP oder Oracle/

Sun überzeugen, System z 16 und Storage 27 Kunden. In der Migration Factory bündelt die IBM ihre erstklassigen Migrationsfähigkeiten, um Kunden dabei zu unterstützen, von Wettbewerbersystemen auf IBM Systeme umzusteigen. Das erfolgreiche Programm beinhaltet unter anderem Assessments zu Servern von Wettbewerbern und Migrations-Services. Weitere Informationen unter <http://www-03.ibm.com/systems/migratetoibm/factory>.

### Neue IBM Speicherprodukte

IBM hat neue Speicherprodukte angekündigt, die dafür entwickelt wurden, Kosten und Komplexität bei der Sicherung riesiger Datenmengen zu senken. Gleichzeitig erleichtern sie es Kunden, durch Analyse-Anwendungen Einblick in ihre Daten zu bekommen. Die neuen Speicherlösungen ergänzen das 2010 erweiterte Portfolio der IBM an workload-optimierten Systemen.

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

## INTES

### Neu: PERMAS Version 13 und VisPER Version 202.06.2010

Für die FEM-Berechnungssoftware und den zugehörigen Pre- und Postprozessor VisPER wurden von INTES nach zweijähriger Entwicklungsarbeit neue Programmversionen freigegeben und an die Kunden ausgeliefert. Unter den zahlreichen Erweiterungen und Verbesserungen sind vor allem zu nennen: Umfangreiche Performance-Verbesserungen unterstreichen den Anspruch von PERMAS, bei großen Modellen und kurzen Laufzeiten das Bestmögliche anzubieten. Hier ist vor allem eine neuartige Behandlung von Dichtungselementen bei der Motorberechnung hervorzuheben, welche die Rechenzeiten zum Teil um mehr als den Faktor 10 verkürzt. Damit lassen sich nun Motorberechnungen mit Schraubenvorspannung, Temperaturlasten und Zylinderdrucklasten so effizient durchführen, dass selbst Optimierungsfragestellungen ins Auge

gefasst werden können. Damit wurde ein Motormodell mit mehr als 25 Millionen Freiheitsgraden mit nichtlinearen Dichtungselementen in weniger als 3,5 Stunden auf einem Rechenknoten berechnet.

Auch dynamische Schwingungsrechnungen können nun wesentlich schneller durchgeführt werden, vor allem bei einer großen Anzahl von Moden (> 10000). So konnte die Rechenzeit für die Ermittlung von über 22000 Moden fast halbiert werden. Eine nachfolgende modale Frequenzganganalyse kann über ein neues Lösungsverfahren zusätzlich erheblich beschleunigt werden. Durch beide Maßnahmen zusammen konnte bei einem Beispiel die Gesamtlaufzeit um mehr als einen Faktor 3,5 verkürzt werden.

Viele Erweiterungen betreffen die integrierte Optimierung in PERMAS und das zugehörige Pre- und Postprocessing mit VisPER. VisPER unterstützt mit seiner modernen graphischen Oberfläche in einfacher Weise die Modellierung für die Topologie-Optimierung, die Dimensionsoptimierung (Sizing), die Formoptimierung und die Sickenoptimierung. Alle diese Optimierungsverfahren sind in PERMAS integriert und erlauben so eine effiziente Durchführung der Optimierung in einer Software. Mit der Version 13 wurden auch neue Optimierungsalgorithmen eingeführt, welche die Optimierung von nichtlinearen Aufgaben und die Lösung globaler Optimierungsaufgaben erlauben. So können nun z.B. Kontaktflächen optimiert werden, um eine reduzierte Flächenpressung herbeizuführen. Insgesamt haben fast alle Funktionalitäten in PERMAS, von der linearen und nichtlinearen Statik über NVH und Akustik bis hin zur Optimierung, von den Entwicklungen profitiert und bieten den Anwendern höhere Leistung bei erweiterter Funktionalität.

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

## MSC.SOFTWARE

### SimManager 2010

MSC.Software gab die Markteinführung der neuen Version SimManager 2010 bekannt. SimManager wird für Simulationsdaten- und Prozessmanagement (SDPM) eingesetzt. SimManager ist die weltweit meistgenutzte und bisher einzige Lösung für SDPM, die erfolgreich produktiv im Einsatz ist. Mit Hilfe von SimManager können Mitarbeiter der Produktentwicklung und Berechnungsingenieure die Anzahl von zeitraubenden und kostenintensiven physikalischen Prototypen und Prüfreiheiten durch virtuelle Modelle verringern. Diese virtuellen Modelle sind einfach zu modifizieren und schnell zu testen. Gleichzeitig liefern sie umfassende Erkenntnisse über Bauteile und Systeme. SimManager besitzt skalierbare Funktionen, um Simulationsinhalte zu verwalten und Standardprozesse zu automatisieren. So können Hersteller weltweit ihre Produktivität steigern, mehr Designvarianten simulieren und damit Innovationen vorantreiben und Wettbewerbsvorteile sichern. SimManager 2010 zeichnet sich durch wesentliche Verbesserungen der Benutzerfreundlichkeit bei deutlich verringertem Implementierungsaufwand aus und bietet sofort einsatzbereite Funktionen, um die Produktivität der Simulationsarbeit zu erhöhen. So können nicht nur globale Großkonzerne, sondern auch kleinere Unternehmen von konsistenten, verlässlichen und besser nachvollziehbaren CAE-Ergebnissen profitieren.

### MSC.Software und LifeModeler Technologiepartner

MSC.Software gab die vollständige Integration der Software MSC Adams in die LifeMOD-Lösungen von LifeModeler zur Modellierung des menschlichen Körpers bekannt. Die Integration ist ein bedeutender Meilenstein in der Partnerschaft von MSC.Software und LifeModeler, Inc. Adams wird für die Analyse von Mehrkörpersystemen genutzt und ist Standard für kinematische und dynamische Simulationen. Mit Adams

kann das Bewegungsverhalten von 3-dimensionalen mechanischen Systemen realitätsgetreu dargestellt werden. Nach dem von beiden Unternehmen unterzeichneten Vertrag wird die Software Adams direkt in das bestehende kommerzielle Produkt LifeMOD eingebettet. Dies erleichtert die Markteinführung neuer LifeMOD-Produkte für die akademische Forschung. Durch die Integration von MSC Adams in LifeMOD werden Ingenieure und Wissenschaftler aus dem Bereich der Biomechanik in der Lage sein, exakte virtuelle Modelle des menschlichen Körpers zu schaffen. Diese Integration ermöglicht schnelle Tests neuer medizinischer Geräteentwicklungen. So können die mit der Entwicklung neuer Produkte verbundenen Risiken sowie Zeit- und Kostenaufwand minimiert werden.

### Marc 2010

MSC.Software gab die Markteinführung von Marc 2010 bekannt. Die neue Version steht ab sofort zum Download bereit. Zu den wesentlichen Verbesserungen von Marc 2010 zählen neue Kontaktalgorithmen, Materialmodelle und parallelisierte Solver. Darüber hinaus gibt es Erweiterungen u.a. im Bereich der Analyse großer Deformationen, der Bruchmechanik sowie der Verschleißanalysen. In Marc 2010 sind neue parallelisierte Solver integriert, die eine beschleunigte Lösung von nichtlinearen Analysen ermöglichen. Anwender können nun sämtliche Vorzüge von Multi-Core-Rechnern für die Parallelisierung nutzen. Sowohl der Multi-Frontal- als auch der Pardiso-Solver schöpfen die Möglichkeiten von Multi-Threading auf Windows und Linux auf der Basis einer Shared-Memory-Architektur aus. Der MUMPS-Solver ist sogar für beide Anwendungen geeignet, d.h. sowohl für eine Shared- als auch Distributed-Memory-Architektur innerhalb einer Windows- und Linux-Umgebungen. Damit stehen kosteneffiziente Lösungen für große Simulationen zur Verfügung.

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

## PTC

**PTC ernannt James E. Heppelmann zum CEO**

PTC ernannt James E. Heppelmann mit Wirkung zum 1. Oktober 2010 zum neuen Chief Executive Officer, CEO. Heppelmann, derzeitiger President und Chief Operating Officer, COO, von PTC tritt damit die Nachfolge von C. Richard Harrison an. Heppelmann wird als CEO und President von PTC an das Board of Directors berichten. Damit wird die letzte Etappe einer mehrstufigen, gut abgestimmten internen Nachfolgeregelung abgeschlossen. Im Mai 2008 war Jim Heppelmann bereits Mitglied des Board of Directors von PTC geworden; im März 2009 war er zusätzlich zum President und COO ernannt worden.

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

## SIEMENS PLM SOFTWARE

**Neue Technologie HD-PLM: Siemens PLM Software verbessert Entscheidungsfindung beim Product Lifecycle Management**

Siemens PLM Software stellte die neue High Definition PLM (HD-PLM)-Technologie vor. Diese Technologie ermöglicht es Entscheidungsträgern, während des gesamten Produktlebenszyklus fundiertere und somit bessere Entscheidungen zu treffen. Sie profitieren zudem von einem Zuwachs an Effizienz und Vertrauen. In der heutigen, stark vernetzten und wettbewerbsbetonten Geschäftswelt verstärkt sich der Druck auf Unternehmen, immer innovativere und qualitativ hochwertige neue Produkte zu entwickeln und immer schneller auf den Markt zu bringen. Diese Entwicklung erfordert hunderte, sogar tausende wichtiger Entscheidungen, die während des gesamten Produktlebenszyklus von verschiedenen Personen diverser Bereiche und entlang der Wertschöpfungskette gefällt werden. Die Qualität und Schnelligkeit dieser Entscheidungen kann einen entscheidenden Einfluss auf den Markterfolg des jeweiligen Produkts besitzen. Gleichzeitig

kann jede dieser Entscheidungen auf einer riesigen und stetig größer werdenden Menge digitaler Daten basieren, die wiederum in den verschiedensten Formaten abgespeichert wurden und vielen unterschiedlichen Quellen entstammen. Diese gewaltige Herausforderung wird noch zusätzlich erschwert durch die Tatsache, dass oftmals viele produktbezogene Entscheidungen in Projektteams getroffen werden, die global verteilt sind. Die HD-PLM-Technologie wurde entwickelt, um diese riesige, weit verbreitete und heterogene Datenansammlung in Wissen zu überführen. Dies wird durch ein Angebot eng integrierter Lösungen geschehen, die in den Unternehmensanwendungen von Siemens PLM Software zum Einsatz kommen. Diese Lösungen werden den Entscheidungsfindungsprozess während des gesamten Product Lifecycles signifikant verbessern: Anwender haben es dadurch viel leichter, die Bedeutung der Daten zu erkennen, und die intuitive Präsentation wertvoller Informationen vereinfacht zugleich ihr Verständnis.

**Siemens PLM Software erhält PACE Award**

Siemens PLM Software gab bekannt, dass es den PACE Award des Branchenmagazins Automotive News erhalten hat. Das Unternehmen bekommt den Preis für seine Teamcenter-Software „In-Vehicle Software Management System“. PACE steht für „Premier Automotive Suppliers Contributions to Excellence“.

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

## SIMULIA

**Führender deutscher Automobilhersteller entscheidet sich für SIMULIA-Lösungen im Bereich passive Sicherheit**

Die BMW-Gruppe hat die kürzlich geschlossene 5-Jahres-Partnerschaft mit Dassault Systèmes (DS) erweitert. Der führende Automobilhersteller hat die Zusage für die Nutzung der Abaqus Unified FEA-Software (Finite-Elemente-Analyse)

für die Entwicklung passiver Sicherheit im virtuellen Design-Prozess erneuert.

Um bei BMW die Entwicklungsprozesse der Fahrzeuge hinsichtlich der passiven Sicherheit fortlaufend zu optimieren, sind kontinuierliche Fortschritte bezüglich der genauen Vorhersage des realen Verhaltens erforderlich. Der erneuerten Partnerschaft mit SIMULIA gehen umfangreiche, über mehrere Monate andauernde Auswertungen durch BMW voraus. Diese Tests reichten von Simulationen einzelner Komponenten bis hin zum kompletten Fahrzeug und umfassten Schlüsselanwendungen in der Karosserietechnologie genauso wie Insassen-Rückhaltesysteme. Die Ergebnisse zeigten, dass Abaqus FEA im Vergleich zu anderer getesteter Simulationssoftware, durchgängig ein höheres Maß an Prognosegüte und Wiederholgenauigkeit gegenüber physischen Tests aufwies. Diese Robustheit und Verlässlichkeit ist von entscheidender Bedeutung, da sich BMW in Richtung eines effizienteren und kostengünstigeren virtuellen Fahrzeugentwicklungsprozesses entwickelt, der immer weniger von technischen Prototypen und Tests abhängig ist.

„Diese Ankündigung bekräftigt unsere kontinuierlichen Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie unseren Fokus, die verlässlichste Finite-Elemente-Technologie anzubieten, die heute auf dem Markt zu finden ist“, sagt Ken Short, Vice President Strategy und Marketing, SIMULIA, Dassault Systèmes. „Die Automobilindustrie kommt aus einer herausfordernden wirtschaftlichen Lage und es werden die Unternehmen schneller und stärker zurückzukommen als zuvor, die über erhebliche Wettbewerbsvorteile verfügen. Wir sind davon überzeugt, dass Abaqus Unified FEA unseren Kunden dabei hilft, Zeit und Kosten zu sparen, die zunehmend strengeren Regeln für das Unfallverhalten und die Insassensicherheit einzuhalten.“ BMW hat im Jahre 2004 erstmals damit begonnen, Abaqus als exklusives System für Crash-Simulationen einzusetzen, als Fahrzeug-Ent-

wicklungsprojekte im Wesentlichen durch Hardware-Tests unterstützt wurden und der Fokus der Simulation auf dem allgemeinen Fahrzeugverhalten lag. In jüngerer Zeit hat BMW damit begonnen, eine strategische Veränderung in Richtung eines umfassenderen virtuellen Entwicklungsprozesses vorzunehmen. Diese Strategie beinhaltet mehr Vertrauen in die Genauigkeit der äußerst detaillierten Simulationen, einschließlich Materialrisse und dem Versagen von Schweißpunktverbindungen, aber eingebunden in große, komplexe Simulationen des gesamten Fahrzeugs. Aufgrund der hohen Übereinstimmung zwischen physischen Tests und durch Abaqus erzielte Simulationsergebnisse ist BMW in der Lage, seine Ziele hinsichtlich Prozessverbesserungen zu erreichen. Dies führt zu erheblichen Kosten- und Zeiteinsparungen in jedem Fahrzeugprojekt bei gleichzeitiger Einhaltung der strikten Sicherheitsanforderungen. Aktuelle Informationen über Dassault Systèmes finden Sie auch im DS-Twitter (<http://twitter.com/3DSGermany>).

[www.3ds.com](http://www.3ds.com)

## SIMPACK

### DYNA4 Simulationsumgebung ermöglicht virtuelle Testfahrten mit MKS-Modellen

TESIS DYNAware und SIMPACK AG haben im April 2010 eine Kooperationsvereinbarung geschlossen. Auf der Basis dieser Zusammenarbeit können in Zukunft SIMPACK-Mehrkörpersimulationsmodelle (MKS) nahtlos in das offene und modulare Simulationsframework DYNA4 der TESIS DYNAware integriert werden. In DYNA4 können SIMPACK-Modelle mit TESIS DYNAware Fahrzeugkomponenten zu einem virtuellen Testfahrzeug zusammengestellt werden. In Kombination mit Straßenmodellen, Manöversteuerung und Umgebungsverkehr entsteht so eine sehr flexible Modellumgebung für Steuergerätestests. Darüber hinaus bietet DYNA4 prozessunterstützende Tools, wie z. B. übersichtliche Modell- und

Projektverwaltung, Auswertungen, anschauliche Animationen sowie Anbindung an Testautomation. DYNA4 liefert dadurch den optimalen Rahmen für einen effizienten Einsatz von SIMPACK-Modellen in der Funktionsentwicklung für Steuergeräte vom PC bis zum HiL.

Vorhandene Simulationsmodelle vielfältig nutzen: Das Simulationsframework DYNA4 beinhaltet ein offenes „Model Repository“, in welchem Anwender ihre Simulationsmodelle GUI-basiert administrieren können. Darin lassen sich verschiedene Modell- und Bedatungsvarianten mit den zugehörigen Simulationsergebnissen transparent verwalten. SIMPACK bietet seinerseits für die MKS-Modelle Code-Export für Echtzeit-Anwendungen. Durch die Integration dieser Modelle in DYNA4 entsteht eine durchgängige Lösung für Steuergeräteentwickler auf Simulink-Basis. Darin kann sogar die Parametrierung der SIMPACK-Fahrzeugkomponenten über die DYNA4 Benutzeroberfläche erfolgen. DYNA4 bietet zudem flexible Straßenmodelle und Manöversteuerung, so dass virtuelle Testfahrten als Open-Loop/Closed-Loop-Manöver oder in Standard-Fahrzyklen (z. B. NEFZ, FTP-75) durchgeführt werden können. Ein verfügbares MKS-Modell lässt sich somit in DYNA4 effizient nutzen, um Steuergeräte für Fahrdynamik und Fahrerassistenzsysteme am PC oder HiL zu entwickeln oder zu testen.

MKS-DYNA4-Integration im Einsatz: Das Ergebnis der Zusammenarbeit von TESIS DYNAware und SIMPACK wird bereits erfolgreich eingesetzt. Bei Knorr-Bremse werden die aus der Konstruktion vorhandenen SIMPACK-Modelle in kompilierter Form für die ABS-Steuergeräteentwicklung weiterverwendet. Für

die virtuellen Testfahrten liefert DYNA4 die Umgebungsmodelle und anschauliche 3D-Animation sowie Echtzeit-Codeexport für alle gängigen HiL-Plattformen.

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

## TRANSTEC

### transtec bringt Cray Supercomputing-Workstations nach Deutschland

transtec besiegelte auf der International Supercomputing Conference ISC in Hamburg eine europäische Partnerschaft mit Cray. Der Tübinger High-Performance-Computing-Spezialist bringt damit als einziger großer deutscher Anbieter den globalen Markt- und Technikführer im Supercomputing auf den europäischen Markt. transtec nimmt die Supercomputing-Workstation CRAY CX1 ins Portfolio und wird seinen Kunden sofort einsatzbereite Lösungen liefern. High-Performance-Computing wird damit für typische Workstation-Arbeitsplätze zugänglich. Die CRAY CX1 Systeme sind ab sofort bei transtec erhältlich.

### Klein beim Platzbedarf, technisch groß in Form

transtec stellt kleine Desktopsysteme mit aktuellen Intel Prozessoren vor. Die Small-Form-Factor-PCs der transtec SENYO 500-Serie sind voll ausgestattet und kaum größer als ein Aktenordner. Mit ihrem ansprechenden Design eignen sie sich besonders für den Einsatz in Büros mit Kundenkontakt oder wenig Stauraum. Die neuen transtec SENYO PCs sind individuell konfigurierbar und ab 380 Euro (exklusive Mehrwertsteuer) ab sofort lieferbar.

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

Bitte senden Sie uns Ihre Press Releases: [magazin@nafems.de](mailto:magazin@nafems.de).

Die hier veröffentlichten Texte wurden nicht redaktionell redigiert und weitgehend unverändert von den jeweiligen Firmen übernommen.

# Ganzheitliche Simulation von mechatronischen Schwingungstilgern für automobiler Anwendungen

Dr.-Ing. J. Forsen, Dipl.-Ing. S. Granzow (BMW AG)  
Prof. Dr.-Ing. H. Baier (Technische Universität München)

Im Bereich des Maschinenbaus wird die Bedeutung der Mechatronik weiter steigen und zukünftig eine wesentliche Schlüsseltechnologie darstellen. Damit einhergehend eröffnet sich ein gänzlich neues Feld für Innovationen. Diese Ausweitung der Mechatronik wird die heutigen Entwicklungs- und Berechnungsprozesse deutlich beeinflussen.

Ein anderer Entwicklungsschwerpunkt in der Automobil-Industrie liegt zurzeit auf der ambitionierten Herausforderung die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich zu senken. Die Fahrzeugmasse stellt dabei einen Ansatzpunkt dar. Weiter wachsende Anforderungen, wie z.B. gesetzliche Sicherheitsvorschriften stehen dem Ziel der Massereduktion dabei entgegen; neue innovative Ansätze für den Leichtbau sind gefordert.

Betrachtet man beide Aspekte zusammen, so führt dies zu folgender Fragestellung:  
*„Sind mechatronische Systeme in der Lage Leichtbaubestrebungen zu unterstützen?“*

Der vorliegende Beitrag stellt erste Forschungsergebnisse im Zusammenhang mit aktiven Schwingungstilgern und Massereduzierung vor. Indispensabel hierfür ist eine multidisziplinäre Simulationsumgebung. Unter Nutzung von MATLAB ist eine entsprechende multidisziplinäre Simulationsumgebung entwickelt worden. Die ersten Berechnungsergebnisse weisen den Ansatz als vielversprechend aus, so dass eine weitere Intensivierung der Forschungsaktivitäten in Zukunft angestrebt wird.

## 1 Einleitung und Motivation

Ein verstärktes Zusammenwachsen der Entwicklungs- und Forschungsgebiete Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik zum Fachgebiet Mechatronik ist seit einigen Jahren zu verzeichnen. Im Bereich des Maschinenbaus wird die Mechatronik bereits in naher Zukunft eine wesentliche Schlüsseltechnologie darstellen [1]. Auch in der Automobilentwicklung finden Mechatroniksysteme zunehmend Anwendungen. Gleichzeitig folgt daraus, dass die Anzahl der Mechatronik Bauteile und Systeme innerhalb einer Maschine stark steigen wird. Ein neues, weites Feld für Innovationen wird somit eröffnet. Dieser Trend wird darüber hinaus einen tiefgreifenden Effekt auf die heutigen Entwicklungsprozesse haben. Die Mechatronik muss als integraler, grundlegender Bestandteil in den Entwicklungsprozess aufgenommen werden. Damit einhergehend werden neue Entwicklungsmethoden, -werkzeuge und -prozesse benötigt. Die inhärente multidisziplinäre Eigenschaft der Mechatronik muss dabei gleichermaßen ihre Repräsentation in den Simulationsumgebungen finden. Die multidisziplinäre Mechatronik-Simulation stellt folglich einen wesentlichen Entwicklungsschwerpunkt dar.

Ein anderer Betrachtungsfokus aus Sicht der Automobilentwicklung resultiert aus der globalen CO<sub>2</sub>-Diskussion in Addition zu steigenden Ölpreisen, weltweiten Sicherheitsbestimmungen und CO<sub>2</sub>-Steuern. Die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen stellt eine der essentiellen Herausforderungen der aktuellen Automobilentwicklung dar. Das Fahrzeuggewicht tritt dabei zunehmend in den Betrachtungsfokus. Alleine aufgrund steigender Sicherheits-, Recycling-, Komfortanforderungen werden Leichtbaumaßnahmen zur Kompensation bzw. bis zur Reduktion benötigt. Neue Ansätze und Wege für den Leichtbau bilden daher ebenfalls einen Forschungsschwerpunkt.

Beide Aspekte gemeinsam betrachtet führen zur Fragestellung:  
*„Können mechatronische Systeme einen wesentlichen Beitrag zum Leichtbau bzw. zur Senkung des Primärenergiebedarfs des Fahrzeuges leisten?“*

## 2 Fahrkomfort und Mechatronik

Neben stetig steigenden weltweiten Sicherheitsanforderungen und den Verbrauchsreduzierungsvorgaben steigen die Kundenanforderungen bezüglich des Fahr- und Akustikkomfort gleichermaßen stetig an. Um die Akustik- und Schwingungskomfortziele zu erreichen werden heute meist Maßnahmen ergriffen die mit einer Erhöhung der Systemmasse einher gehen [2]. Zum Beispiel ist ein aktueller BMW 3er mit bis zu ~40kg sekundär Akustikmaßnahmen (Antidröhnbeläge, Dämmmatten etc.) ausgestattet. Auf der Seite der primären Maßnahmen wachsen zusätzlich die globalen Karosseriesteifigkeiten von Modell zu Modell. In den meisten Fällen geht damit eine Erhöhung der Karosseriemasse einher. Glücklicherweise helfen die aufwendigen, modernen FE-Simulationen dem Masseanstieg entsprechend entgegen zu wirken. Können und dürfen wir jedoch diesen Weg der Erhöhung von Karosseriesteifigkeiten zur Erfüllung der steigenden Schwingungskomfortziele beharrlich weiter gehen und dabei mehr und mehr Masse aufwenden? Oder brauchen wir einen Paradigmenwechsel? (Abbildung 1)

Können mechatronische Schwingungstilger einen Beitrag zu einem Paradigmenwechsel leisten, so dass der Schwingungskomfort in Zukunft noch verbessert werden kann, es aber gleichzeitig gelingt die Fahrzeugmasse dabei zu reduzieren?

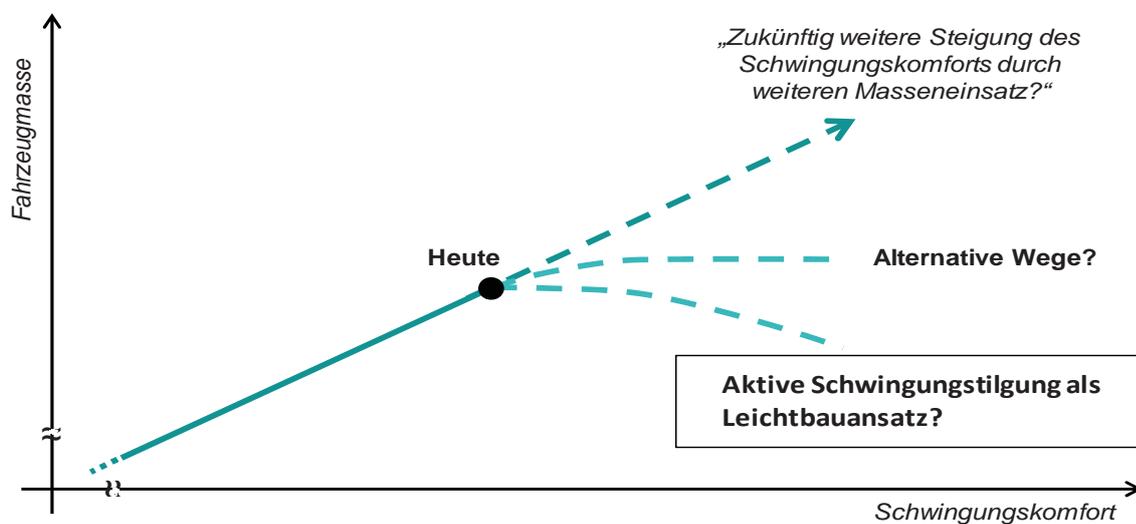


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Schwingungskomfort und Fahrzeugmasse

### 2.1 Grundsätzliche Ansatzpunkte der Schwingungsreduktion

Allgemein betrachtet lassen sich drei Arten der Schwingungsbeeinflussung definieren. Wie in *Abbildung 2* dargestellt lässt sich zum Einen eine Schwingungsreduktion durch Isolationsmaßnahmen im Übertragungspfad z.B. durch Stoßdämpfer erreichen. Weiter kann die Struktursteifigkeit bzw. auch die Strukturdämpfung (z.B. durch AD-Beläge) zur Schwingungsreduktion erhöht werden. Drittes können durch ein gegenphasig schwingendes System Schwingungen getilgt werden. Besonders bei Cabrio-Fahrzeugen kommen auf Grund der geringen Karosseriesteifigkeit, bedingt durch das fehlende Dach, Schwingungstilger oftmals zum Einsatz.

Alle drei Ansätze können als passive Maßnahmen oder als aktive Mechatronikmaßnahmen ausgeführt werden. Auf der Seite der Schwingungsisolierung sind zum Beispiel aktive Stoßdämpfersysteme bereits heute etabliert [3].

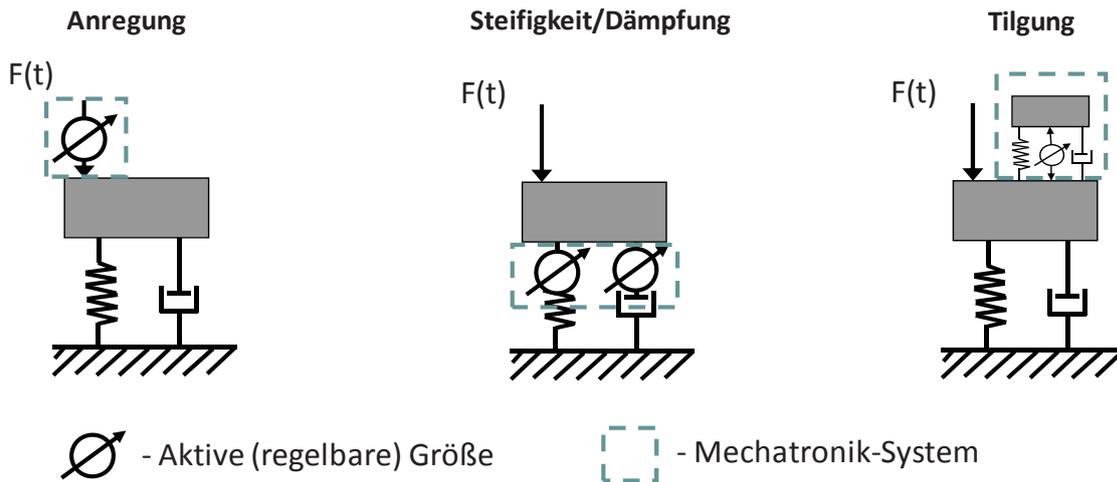


Abbildung 2: Drei grundsätzliche Ansatzpunkte zur Schwingungsreduktion

## 2.2 Mechatronische Systeme im Kontext Simulation

Nach VDI-Richtlinie 2206 [4] sind mechatronische Systeme durch vier Elemente charakterisiert. Ein mechanisches Basissystem ist dabei mit einer Sensoreinheit verbunden. Die Sensorinformationen werden durch ein Informationsverarbeitungselement aufbereitet und zur Ansteuerung eines Aktor-Elementes, welches auf das mechanische Basissystem wirkt, genutzt. So entsteht ein closed-loop System wie in *Abbildung 3* dargestellt.

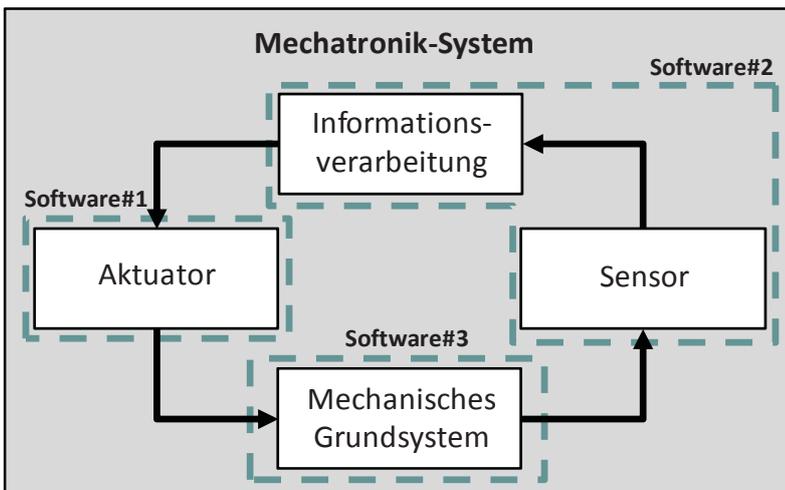


Abbildung 3: Subsysteme des Mechatronik-Systems in Anlehnung an Vdi 2206 [4]

Beispielhaft illustriert *Abbildung 3*, dass typischerweise heute die einzelnen Elemente eines mechatronischen Systems mit unterschiedlichen, hoch spezialisierten Softwarelösungen entwickelt und simuliert werden. Beispielsweise wird die Entwicklung des mechanischen Basissystems mit Hilfe von CAD- und FE-Werkzeugen unterstützt. Die Entwicklung der benötigten Regel- und Informationsverarbeitungssysteme kann zum Beispiel mit Hilfe von MATLAB erfolgen. Weiter findet man im Bereich der Aktor-Einheit, je nach Typ (hydraulisch, pneumatisch, elektrisch) eine Vielzahl von hoch spezialisierten Softwarelösungen. Der Kommunikations- und Datenaustausch zwischen den einzelnen Lösungen innerhalb eines(!) mechatronischen Systems erfolgt heute in den meisten Fällen manuell, im besten Fall mit Unterstützung entsprechender Software-Schnittstellen. Es ist ersichtlich, dass im Grunde jedes mechatronische System einer multidisziplinären Auslegung bedarf.

Zurück zur initialen Fragestellung: „Können mechatronische Systeme einen Beitrag zum Leichtbau leisten?“. Die Übertragung dieser Fragestellung auf das Feld der Schwingungsreduktion führt unweigerlich zu der Frage: „Können aktive Schwingungsreduktionssysteme einen Beitrag zum Leichtbau leisten?“

Grundsätzlich bedeute dieser Ansatz, dass eine Massereduktion des mechanischen Basissystems nur Hand in Hand mit einer Anpassung des aktiven Schwingungsreduktionssystems erfolgen kann. In *Abbildung 3* ist ersichtlich, dass hierzu ein „ganzheitlicher mechatronischer Leichtbau-Entwicklungsprozess“, im Sinne einer multidisziplinären Auslegung benötigt wird.

Für die Realisierung eines derartigen Prozesses ergeben sich zwei grundlegenden Ansatzmöglichkeiten, wie in *Abbildung 4* dargestellt: ein Prozess mit Hilfe von Schnittstellen oder ein Integrationsansatz. In Ergänzung dazu muss zusätzlich noch zwischen einer abschnittsweise manuellen oder einer automatisierten Prozesskette unterschieden werden.

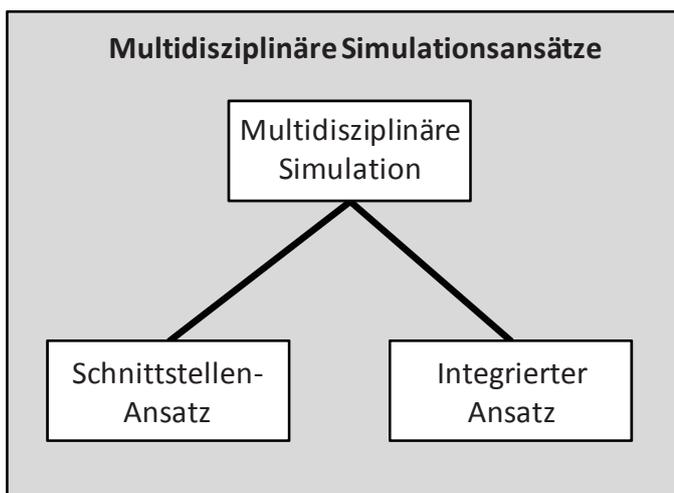


Abbildung 4: Grundsätzliche Ansatzpunkte zur Realisierung einer multidisziplinären Simulation

### 3 Simulation aktiver Schwingungstilger als Leichtbaumaßnahme

#### 3.1 Erster Ansatzpunkt: „Cabriozittern“

Die Entfernung der Dachstruktur eines Fahrzeuges geht einher mit einem hohen Verlust an Karosseriesteifigkeit, was gleichzeitig einen Frequenzabfall der Eigenmode zur Folge hat [2]. Zur Kompensation des Steifigkeitsabfalls werden entsprechende, Cabrio spezifische Maßnahmen ergriffen. Diese Maßnahmen führen zu einer zusätzlichem Massemehrerung von bis zu ~120kg gegenüber einer vergleichbaren Limousine [2]. In den meisten praktischen Anwendungen wird jedoch trotz dieser Zusatzmaßnahmen das Steifigkeitsniveau einer Limousine nicht erreicht. Der erste Gesamtfahrzeugtorsionsmode liegt i.d.R. bei 4-sitzigen Cabrios bei ~19-22Hz (>30Hz bei Limousinen).

Der erste Eigenmode eines Fahrwerks liegt dem gegenüber beispielsweise bei ~15-17Hz. Wie in *Abbildung 5* illustriert, resultieren die Fahrkomfort relevanten Fahrzeugschwingungen bei einem Cabrio aus der Superposition der beiden Eigenfrequenzen von Fahrwerk und Karosserie bei einer entsprechenden Fahrbahnanregung im Bereich von ~10-30Hz. Dieses Phänomen wird häufig mit dem Begriff „Cabrio zittern“ umschrieben. Daher werden heute in diesem Frequenzband Schwingungstilger besonders bei Cabrio-Fahrzeugen, ergänzend zu Karosseriemaßnahmen, eingesetzt [2].

Gegenstand eines Forschungsprojektes ist im ersten Schritt die Betrachtung eben dieses Schwingungsphänomens bei Cabrio-Fahrzeugen, in Verbindung mit dem Einsatz aktiver Schwingungstilger. Eine der wesentlichen Herausforderungen hierbei ist die Schaffung einer entsprechenden Simulationsumgebung, die eine virtuelle Evaluierung von aktiven Schwingungstilgern ermöglicht. Entscheidend ist die Betrachtung der aktiven Schwingungstilger als integraler Bestandteil eines Gesamtfahrzeuges / Gesamtfahrzeugmodells.

Frequency-Response Analysen von Gesamtfahrzeugmodellen werden heute meist mittels eines multidisziplinären Ansatzes mit Hilfe einer Kombination aus FE- und Mks-Modellen durchgeführt. Die Integration eines mechatronischen Schwingungstilgers in die Frequency-Response Analyse bedeutet eine multidisziplinäre Erweiterung um eine entsprechende Regelungs- und Aktorikkomponente („1D-Modell“); siehe *Abbildung 5*, Rechts. Auf diese Weise entsteht eine multidisziplinäre closed-loop Simulation.

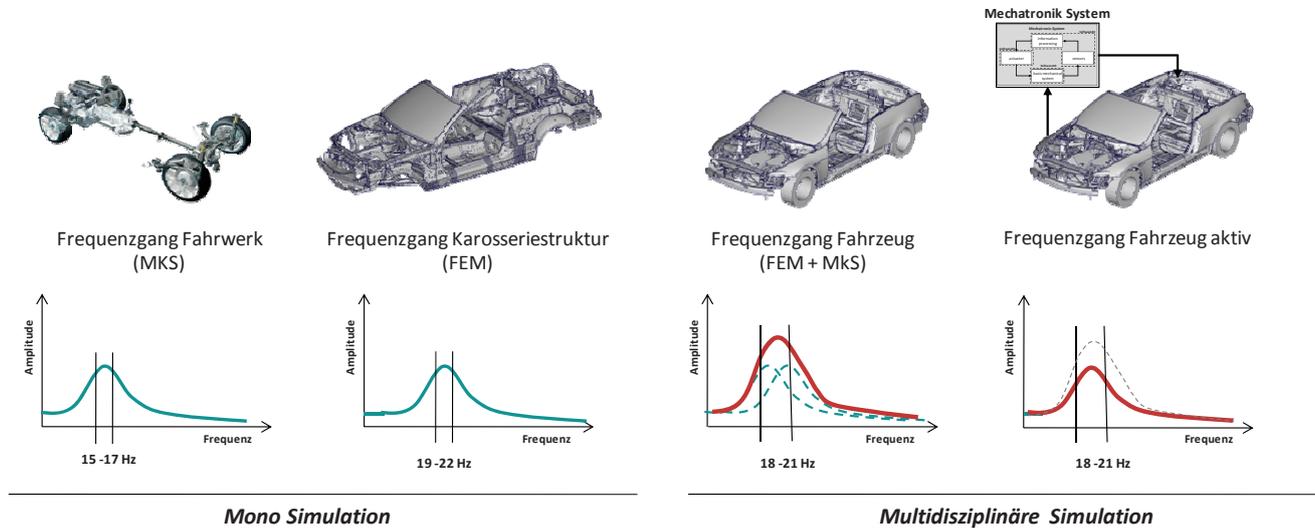


Abbildung 5: Entstehung des Phänomens “Cabriozittern”

### 3.2 Submodelle der entwickelten Simulationsumgebung

Eine ganzheitliche Simulation und Evaluierung mechatronischer Schwingungstilger in einer Gesamtfahrzeugbetrachtung erfordert die Abbildung folgender Submodelle innerhalb einer zu bildenden Simulationsumgebung (Vgl. *Abbildung 5*):

- Flexible Karosserie.
- Nicht-lineares Fahrwerk, inkl. Reifenmodell (stehend/rollend).
- Straßen- und Prüfstandsanregung.
- Mechatronischer Schwingungstilger, inkl. Steuerungs- und Regelungstechnik.
- Kumulative Gesamtenergiebilanz.

Die kumulative Energiebilanz ist ein entscheidender Faktor, angesichts der Motivation der Energiebedarfsreduzierung des Fahrzeugs. Dies bedeutet, dass in der Simulation die elektrischen Eigenschaften zur Berücksichtigung des Leistungsverbrauchs der aktiven Systeme mit bewertet werden müssen.

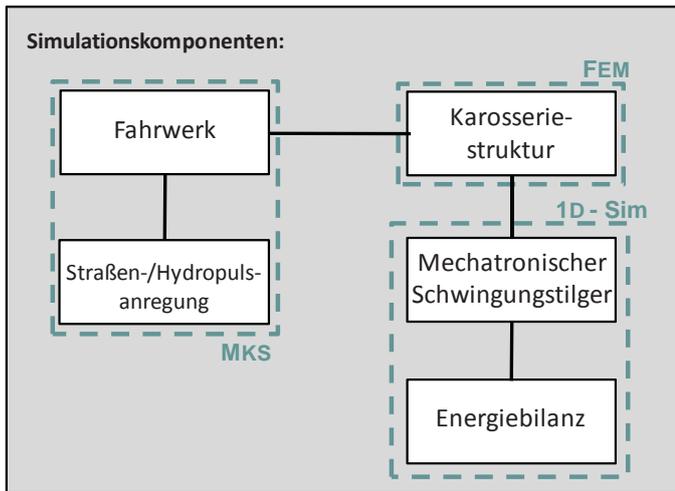


Abbildung 6: Simulationskomponenten und zugehörige Submodelle

Abbildung 6 ordnet den benötigten Submodellen beispielhaft die jeweilig dafür standardmäßig verwendeten Simulationsdisziplinen zu. Bei BMW kommen für die einzelnen Simulationsdisziplinen exemplarisch nachfolgende Softwarelösungen zum Einsatz. Für die Schwingungssimulation der Karosserie MSC NASTRAN als FE-Umgebung. Die Auslegung des Fahrwerks und der Fahrdynamik erfolgt u.a. mit Hilfe des MKS-System MSC ADAMS. Für die Simulation der mechatronischen Tilger, als neues Element, inklusive Regelungstechnik und Elektronik, wurde MATLAB/SIMULINK gewählt.

Bei der Erstellung der benötigten ganzheitlichen, multidisziplinären Simulationsumgebung sind zwei wesentliche Punkte zu beachten:

1. Es werden kurze Rechenzeiten benötigt, um Sensitivitätsanalysen und Optimierungsrechnungen effektiv durchführen zu können.
2. Es werden kurze Interaktionszeiten zwischen Leichtbaumaßnahmen an der Karosseriestruktur und den daraus resultierenden Veränderungen an den Schwingungstilgern benötigt.

### 3.3 Multidisziplinäre Simulation von aktiven Schwingungstilgern

#### 3.3.1 Schnittstellenansatz

Der zuerst untersuchte Ansatz beruht auf der Nutzung bereits existierender Schnittstellen zwischen Msc NASTRAN und ADAMS. Bei der Berechnung einer Modalanalyse in NASTRAN (SOL 103) ist es möglich ein spezielles Ausgabeformat (MNF-file, NASTRAN PARAM ADAMSMNF FLEXBODY = YES) der Berechnungsergebnisse zu wählen, welches in ADAMS eingelesen werden kann. Ein MNF-file (Modal Neutral File) ist ein spezielles Msc Dateiformat, das die dynamischen Eigenschaften über die Eigenfrequenzen der Struktur beschreibt. Für die Erzeugung des MNF-files wird die bekannte CRAIG-BAMPTON Methode als Reduktionsalgorithmus verwandt [5].

Das MNF-file wird verwendet, um die flexiblen Eigenschaften der Karosseriestruktur in eine ADAMS MKS-Berechnung zu integrieren. Im vorliegenden Fall wird die Karosserie in ein MKS-Modell des Fahrwerks inklusive Antriebsstrang integriert. Als Folge des hohen Detaillierungsgrades (Standardmodell für Karosserieberechnungen) des FE-Modells mit ~1Mio. Elementen und einer hohen Anzahl von Koppelstellen zwischen Fahrwerk/Antriebsstrang und Karosserie ist die Exportierung des MNF-files sehr rechenintensiv. Auf einem BMW Hochleistungsrechencluster benötigt die MNF-Exportierung eines Trimmed-Mass-Body Modells bis zu ~24h.

Als weiterer Punkt muss beachtet werden, dass die Integration eines flexible Körpers in ADAMS eine erhebliche Steigerung der Rechenzeiten zur Folge hat (von ~10min auf bis zu ~5h). Zusätzlich kommen häufig Konvergenzprobleme des Solvers erschwerend hinzu.

Die Betrachtung des multidisziplinären Ansatzes erfordert über ein Zusammenführen von FE-Karosseriestruktur und Mks-Fahrwerk die Berücksichtigung des mechatronischen Schwingungstilgers, inklusive der elektrischen Ansteuerung wie in *Abbildung 7* veranschaulicht.

Für die Kopplung von ADAMS mit MATLAB/SIMULINK bietet ADAMS einen eigenen SIMULINK Block an. Dieser Block kann mit dem SIMULINK-Modell des mechatronischen Schwingungstilgers verbunden werden. Durch den ADAMS Block im SIMULINK wird es MATLAB ermöglicht den ADAMS Solver als Slave im Hintergrund anzusteuern, wobei kontinuierlich Daten zwischen den beiden Solvoren ausgetauscht werden. Dieses Verfahren wird im Allgemeinen als Co-Simulation (co-operative simulation) [6] bezeichnet.

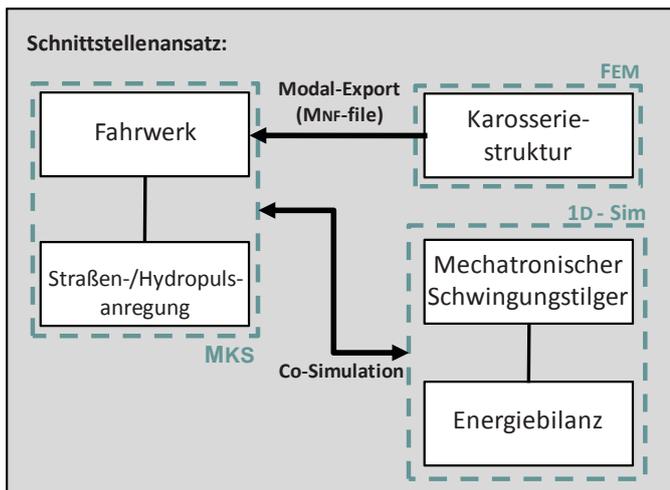


Abbildung 7: Simulation aktiver Schwingungstilger als Schnittstellenansatz

Zurück zur Idee des Leichtbaus mit Hilfe von Mechatronik. In Anbetracht von *Abbildung 7* stellt sich nun in diesem Zusammenhang die Frage, wie sich eine (schnelle) Interaktion zwischen Leichtbauänderungen an der Karosseriestruktur und den daraus resultierenden notwendigen Anpassungen an den Schwingungstilgern realisieren lässt?

Wie aus dem in *Abbildung 7* skizzierten Ansatz erkenntlich ist, fehlt bei diesem eine direkte Verbindung zwischen der Karosseriestruktur-Modellierung in der FE-Umgebung und der Abbildung der aktiven Schwingungstilger in MATLAB. Es liegt ein open-loop Prozess vor. Dies bedeutet letztendlich, dass eine Verknüpfung von Karosseriemodifikation und Schwingungstilgerauslegung nur manuell erfolgen kann. Dies zieht gleichzeitig bei jeder Karosseriemodifikation eine erneute, notwendige NASTAN MNF-File Exportierungsrechnung (bis zu ~24h) nach sich.

In Anbetracht der zu erwartenden benötigten Vielzahl von Variantenberechnungen der Karosseriestruktur und den deutlich erhöhten ADAMS Rechenzeiten scheint eine derartige Vorgehensweise als nicht praxistauglich. Zusätzlich wird eine Integration automatischer Optimierungsalgorithmen durch die gegebenen Randbedingungen erschwert.

### 3.3.2 Integrationsansatz

Als zweiten Ansatz wird ein integrativer Ansatz untersucht. Betrachtet man zunächst *Abbildung 3* unter dem besonderen Fokus der aktiven Schwingungstilgung, so ist ersichtlich, dass in einer(!) Simulationsumgebung die flexible Karosseriestruktur inklusive der Fahrwerkskomponenten – als mechanisches Grundsystem –, die Regelungstechnik sowie der aktive Schwingungstilger als Akteur implementiert werden müssen. Darüber hinaus wird zusätzlich ein Submodell für die kumulative Energiebilanz benötigt. Im vorliegenden Fall wurde MATLAB als Simulationsumgebung gewählt.

In MATLAB ist die Abbildung des aktiven Schwingungstilgers als 1-Massen-Schwinger, inklusive der benötigten Regelungstechnik, leicht möglich. Weiter ist allgemein bekannt, dass die benötigten Fahrwerkskomponenten ebenfalls als Massen-Schwinger, ähnlich einem Mks-Modell, in MATLAB abgebildet werden können [7]. Für

Fahrdynamiksimulationen existiert bei BMW bereits ein umfangreiches 2-Spur Fahrzeugmodell in MATLAB, welches als Submodell genutzt wird. In diesem Fahrdynamik-Modell werden alle Radbewegungen auf Basis von nicht-linearen Fahrwerkskennlinien berechnet, einschließlich eines MF-TIRE-Modells (Magic Formula Tire [3]) für die Reifen. Die Karosseriestruktur ist in diesem Modell jedoch nur als Starrkörper-Massepunkt abgebildet. Die Integration der flexiblen Karosseriestruktur als Submodell muss demnach als Erweiterung erfolgen.

Bekanntermaßen kann man ähnlich wie in ADAMS auch in MATLAB flexible Strukturen über eine modale Beschreibung abbilden. Das Ergebnis einer FE-Modalanalyse kann über modale Reduktionsverfahren mit Hilfe einer STATE-SPACE Formulierung in MATLAB eingebunden werden [8]. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist eine deutlich geringere Rechenintensivität. Damit können prinzipiell alle benötigten Submodelle in MATLAB abgebildet werden, wie in *Abbildung 8* skizziert.

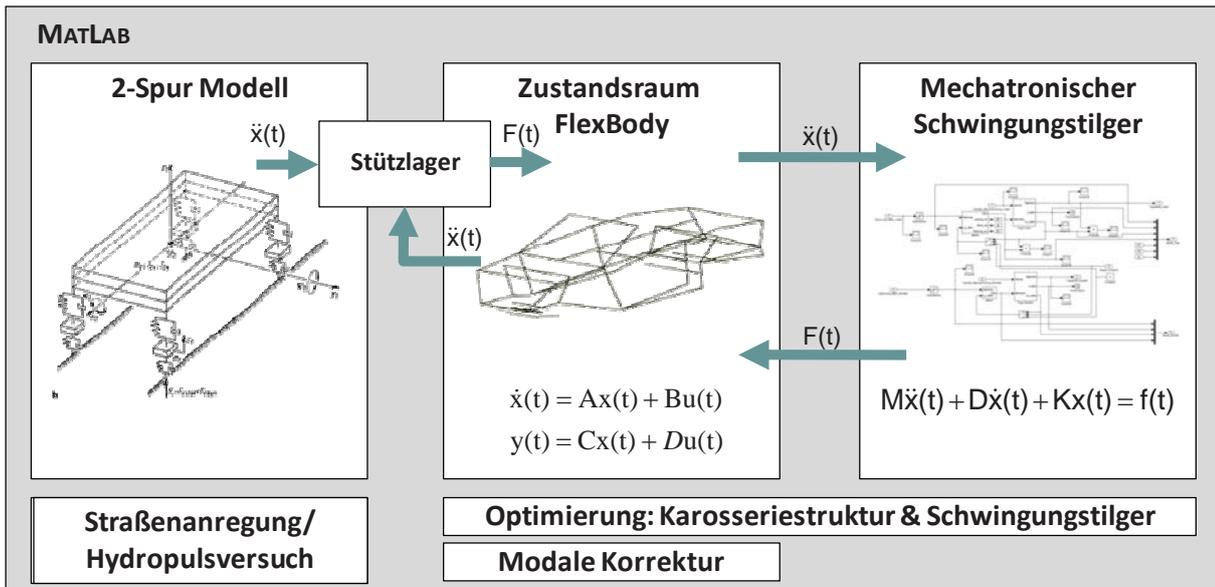


Abbildung 8: Submodelle des Integrationsansatzes unter Verwendung von MATLAB

Da die Integration der flexiblen Eigenschaften der Karosserie als STATE-SPACE-Modell mittels Modalreduktion erfolgt, bedingt dies folglich vorab eine FE-Modalanalyse der Karosseriestruktur. Das Ergebnis der FE-Modalanalyse muss in einem zweiten Schritt in die STATE-SPACE Formulierung transformiert werden. An dieser Stelle ist somit ein entsprechendes Interface notwendig.

In einem ersten Schritt wird ein MATLAB-Skript genutzt um die Eigenmoden, die generalisierte Steifigkeitsmatrix ( $\Omega = \Phi^T \cdot K \cdot \Phi = \text{diag}(\omega_i^2)$ ) und die generalisierte Massenmatrix ( $I = \Phi^T \cdot M \cdot \Phi$ ) aus dem F06-file eines NASTRAN SOL103 Rechenlaufes auszulesen. In Ergänzung dazu werden die Eigenvektoren in ein NASTRAN PUNCH-file zusätzlich mit ausgegeben. Die Eigenvektoren werden innerhalb des MATLAB-Skriptes dazu genutzt, die Modal-Matrix ( $\Phi$ ) zu erstellen. Aufbauend auf dem NASTRAN Ergebnis werden die modale Dämpfungsmatrix ( $\Delta$ ) und die benötigten STATE-SPACE-Matrizen A (state matrix), B (input matrix) und C (output matrix) wie folgt berechnet:

$$\dot{z}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega & -\Delta \end{bmatrix}}_A \cdot z(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T E \end{bmatrix}}_B \cdot f(t) \tag{3.1}$$

$$y(t) = \underbrace{[C_1 \Phi \quad C_2 \Phi]}_C \cdot z(t) \tag{3.2}$$

Die binäre Matrix  $E$  hat die gleiche Dimension wie  $\Phi^T$  und wird dazu genutzt um die im FE-Modell definierten Koppelpunkte zum Fahrwerk, Sensor und Aktor je nach Bedarf „an- oder auszuschalten“.  $z$  ist der modale State-Vektor.

Wie in *Abbildung 8* dargestellt ist das STATE-SPACE-Modell der Karosserie als zusätzliches Submodell implementiert. Der Eingangsvektor  $f(t)$  des STATE-SPACE-Modells der Karosserie wird über die Kräfte an den Fahrwerksanbindungspunkten definiert. Dabei werden die Feder- und Dämpferkräfte innerhalb des 2-Spur-Modells berechnet. Aufgrund des hohen Anteils der Fahrwerkskräfte, die über die Aufbaufeder und die Dämpfer in die Karosserie eingeleitet werden, müssen die elastischen Stützlager in den Domen unbedingt mit abgebildet werden. Die heute verwendeten Stützlager besitzen ein stark nicht-lineares und frequenzabhängiges Verhalten. Weiter werden die aus der Verformung der Karosserie entstehenden Bewegungen an den Dom-Anbindungspunkten als Feedback-Vektor  $x''(t)$  des STATE-SPACE-Modells additiv auf die Aufbaufeder- und Dämpferbewegung zurück geführt (*Abbildung 8*). Das Submodell der Stützlager fungiert hierbei als „Schnittstellenmodell“ zwischen dem 2-Spur-Modell und dem STATE-SPACE-Modell der flexiblen Karosserie.

Der Einfluß auf die flexible Karosserie über die Anbindung der Fahrwerkslenker bzw. der Achsträger ist bisher nicht mit abgebildet.

Ein wesentlicher Punkt bleibt jedoch bisher noch ungelöst. Für die Bedatung des STATE-SPACE-Modells der Karosserie auf Basis einer NASTRAN SOL103 Rechnung wird ein „one-way“ Schnittstellen-Skript genutzt. Das bedeutet gleichzeitig, dass durch die modale Reduktion keine weiteren physikalischen Informationen, wie zum Beispiel Blechdicken, in MATLAB verfügbar sind. Daraus folgt, dass bei jeder Leichtbau-Strukturmodifikation der Karosserie ebenfalls zuerst das FE-Modell angepaßt werden muss, gefolgt von einem (erneuten) NASTRAN SOL103 Rechenlauf. Dies kann letztendlich nur manuell erfolgen, somit liegt weiterhin ein open-loop Prozess vor. Die Grundidee zur Schließung dieser Lücke beruht auf der Nutzung von modalen Korrekturfunktionen als ein zusätzliches Submodell in MATLAB.

Modale Korrekturfunktionen „korrigieren“ die modale Beschreibung bei Veränderungen z.B. der Steifigkeit oder der Masse auf Basis einer einmalig, initial berechneten „modalen Basis“ [9], [10]. Zur Berechnung dieser „modalen Basis“ und der zugehörigen Korrekturfunktionen wird zuerst ein NASTRAN SOL111 Rechenlauf durchgeführt. Dieses Ergebnis dient nachfolgend als Input für CDH VAO (Vibro acoustic optimization). Mit CDH VAO ist es möglich einzelne Blechfelder/Komponenten der Karosserie auf Basis des FE-Modells als „VAO-Submodelle“ zu definieren. Auf diese „VAO-Submodelle“ können anschließend die modalen Korrekturfunktionen angewendet werden, bzw. diese „VAO-Submodelle“ können nachträglich z.B. hinsichtlich der Blechstärke – trotz modaler Beschreibung – modifiziert werden. Zur Berechnung der „modalen Basis“ und der zugehörigen modalen Korrekturfunktionen werden für jedes definierte „VAO-Submodell“ aus CDH VAO heraus zwei NASTRAN SOL111 Rechenläufe gestartet. Die benötigte VAO-Rechenzeit ist abhängig von der Anzahl der VAO-Submodelle, so wird z.B. ~1h für 40 „VAO-Submodelle“ einer Karosserie benötigt. Durch die freundliche Unterstützung des Forschungsprojektes durch CDH (Dank!) ist es unter Zuhilfenahme von VAO Funktionalitäten möglich die modale Basis sowie die zugehörigen Korrekturfunktionen in die neue MATLAB-Umgebung zu integrieren. Damit sind Leichtbaumodifikationen in der MATLAB-Umgebung an den zuvor definierten „VAO-Submodellen“ durchführbar. Jede VAO-Submodell-Änderung benötigt nachfolgend eine Neuberechnung der STATE-SPACE-Formulierung der Karosserie. Dies erfolgt automatisch und sehr schnell (~<1min) mit Hilfe der implementierten modalen Korrekturfunktionen.

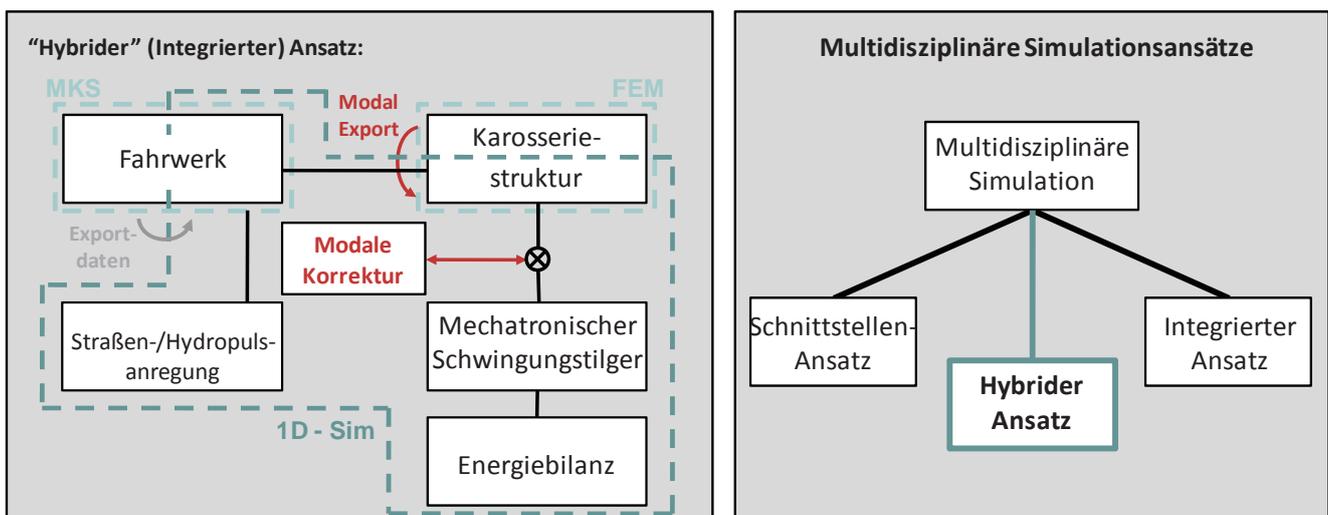
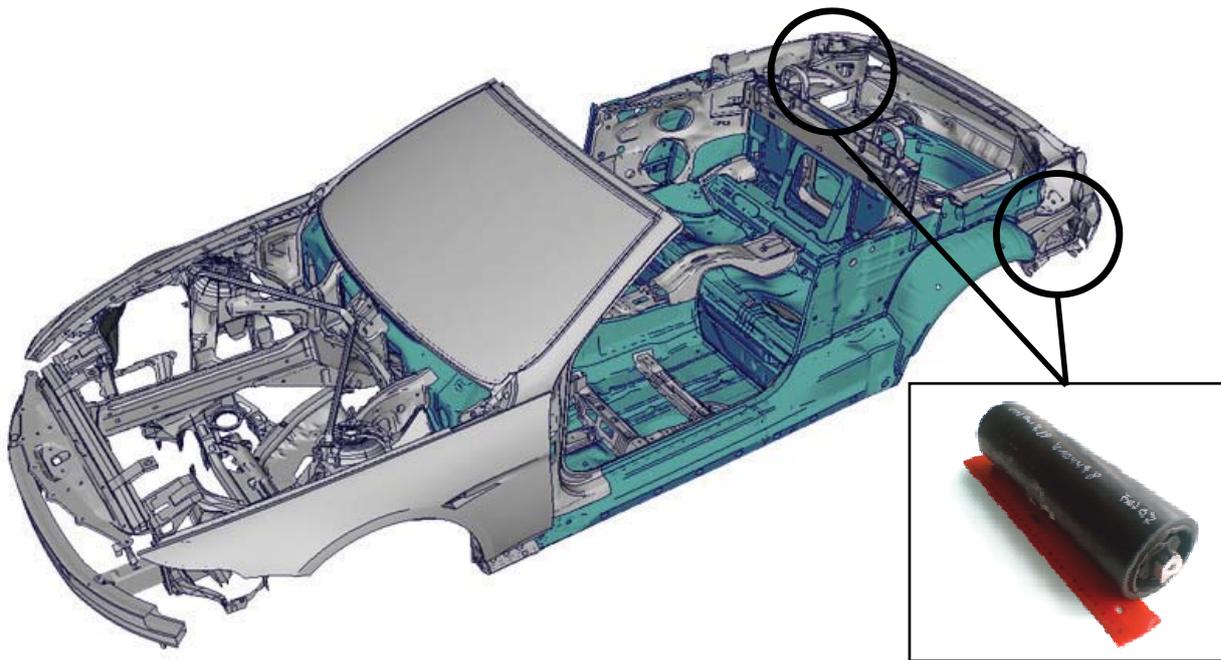


Abbildung 9: „Multidisziplinärer Hybridansatz“ für die ganzheitliche Simulation von aktiven Schwingungstilgern

Zusammenfassend ist somit eine integrierte, closed-loop Simulationslösung zur Evaluierung aktiver Schwingungstilger im Gesamtfahrzeugverbund entstanden (*Abbildung 9*, Links). Neben dem Umstand, dass alle benötigten Submodelle in MATLAB integriert sind, muss hervorgehoben werden, dass weiterhin NASTRAN/VAO und u.U. ADAMS Rechnungen zur Parametrierung der MATLAB-Submodelle benötigt werden. Damit handelt es sich streng genommen nicht um einen „100% integrierten“ multidisziplinären Ansatz. Da weiterhin spezielle Schnittstellen genutzt werden, kann die entstandene Lösung in Erweiterung zu *Abbildung 4* als „Hybridansatz“ einer multidisziplinären Simulation angesehen werden (*Abbildung 9*, Rechts).

#### 4 Erstes Anwendungsbeispiel

Als erstes Anwendungsbeispiel wurden die Effekte einer Integration von aktiven Schwingungstilgern in einen BMW 6er Cabrio analysiert. Das aktuelle 6er Cabrio besitzt derzeit zwei passive Schwingungstilger, die im Heck links und rechts hinter den Radhäusern verbaut sind (Vgl. *Abbildung 10*).



*Abbildung 10: Rohkarosserie eines BMW 6er Cabrios, incl. passivem Serien Schwingungstilger*

In *Abbildung 10* ist die Karosseriestruktur eines BMW 6er Cabrios dargestellt. Die farblich hervorgehobenen Karosserieteile repräsentieren 40 „VAO-Submodelle“, welche für mögliche Leichtbaumodifikationen im Zusammenspiel mit den aktiven Schwingungstilgern definiert wurden.

Simuliert wird im ersten Ansatz die gleiche Frequenzband-Anregung wie sie auch auf einem realem Hydropuls Prüfstand während der Entwicklung verwendet wird. Als Beurteilungsgröße wird die maximale Beschleunigung im Frequenzbereich [5; 30]Hz am Anschraubpunkt des Rückspiegels herangezogen und ist nachfolgend in *Abbildung 11* und *Abbildung 12* dargestellt.

Die Referenzkurve ist durch den Serienstand des 6er Cabrios mit zwei passiven Schwingungstilgern (je ~9kg) und einer maximalen Beschleunigung von ~6000mm/s<sup>2</sup> @20Hz (schwarze, gestrichelte Kurve, *Abbildung 11*) definiert. Die Simulation zeigt, dass dabei jeder passive Schwingungstilger eine Gegenkraft von ~190N @17Hz in die Karosseriestruktur einleitet.

In *Abbildung 11* ist darüber hinaus der Beschleunigungsverlauf des Referenzpunktes ohne passive Schwingungstilger dargestellt (schwarze, durchgezogene Kurve). Dieser weist eine maximale Beschleunigung von >10.000mm/s<sup>2</sup> @18Hz auf. Die erste Eigenfrequenz des passiven Schwingungstilgers liegt bei 17Hz. Deutlich erkennbar ist in *Abbildung 11* auch, dass aufgrund der schmalbandigen Wirkung des passiven Schwingungstilgers dieser es nicht schafft den gesamten Peak des Resonanzfalls gleichmäßig zu tilgen.

Für einen ersten(!) „Leichtbautest“ wurde die Wandstärke aller 40 ausgewählten Blechteile der Karosseriestruktur auf 70% reduziert. Dies führt zu einer Massereduktion von ~45kg. Durch die Wandstärkenreduktion sinkt naturgemäß die Karosseriesteifigkeit deutlich. Folglich steigt ohne Schwingungstilger auch die maximale Beschleunigung am Referenzpunkt stark auf ~15.000mm/s<sup>2</sup> @17Hz an (Abbildung 11, farbige, durchgezogene Kurve). Durch die Applizierung der zwei passiven Schwingungstilgern mit einer angepassten ersten Eigenfrequenz bei 16Hz kann der Maximalwert im Resonanzfall auf ~8000mm/s<sup>2</sup> @17.5Hz reduziert werden (Abbildung 11, farbige, gestrichelte Kurve), was jedoch noch deutlich über dem Zielwert von 6000mm/s<sup>2</sup> liegt.

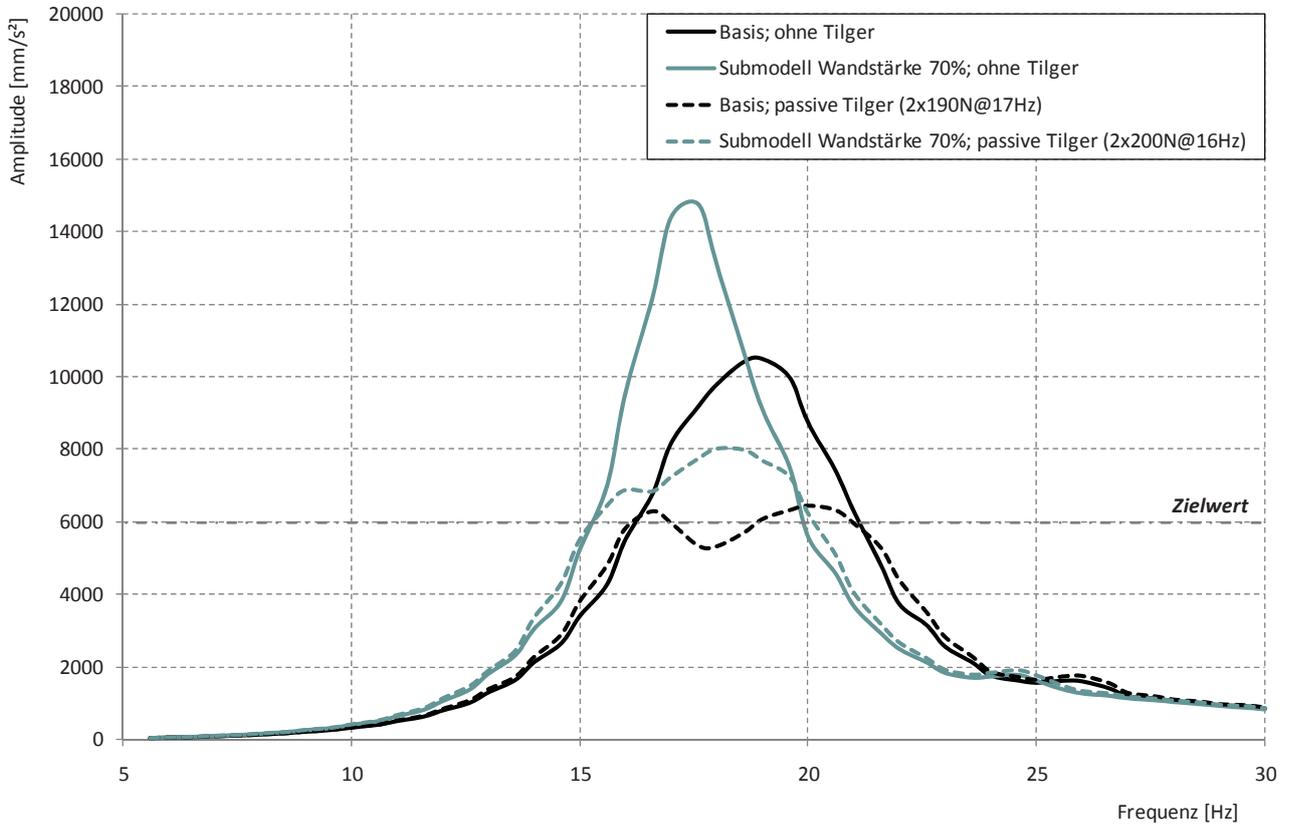


Abbildung 11: Erste Ergebnisse der multidisziplinären Simulation mit passiven Schwingungstilgern

Von Abbildung 11 zu Abbildung 12 werden die passiven Schwingungstilger gegen aktive mechatronische Schwingungstilger ausgetauscht. Zuerst werden die aktiven Schwingungstilger auf das Fahrzeug mit dem Serienstand der Karosserie appliziert. Es ist ersichtlich, dass erwartungsgemäß die aktiven Schwingungstilger den maximalen Beschleunigungswert des Referenzpunktes über den gesamten Frequenzbereich unterhalb des eingestellten Zielwertes halten können (Abbildung 12, schwarze, gestrichelte Kurve). Durch die (aktive) Regelungstechnik zeigt sich auch, dass der aktive Schwingungstilger seine Gegenkraft besser gegenphasig einleiten kann und daher lediglich jeweils ~140N erzeugen muß. Der erste Eigenmode des passiven Feder-Masse-Systems des aktiven Schwingungstilgers liegt bei 16Hz, bei einer Schwingmasse von 4kg.

Im nächsten Schritt wird erneut die Wandstärke der 40 „VAO-Submodelle“ auf 70% reduziert. Abbildung 12 zeigt deutlich, dass auch jetzt noch der aktive Schwingungstilger in der Lage ist den Zielwert über den gesamten Frequenzbereich zu wahren. Im Resonanzfall müssen die aktiven Schwingungstilger jetzt eine Gegenkraft von 2x230N in die Karosseriestruktur einleiten. Dies führt zu einem durchschnittlichen elektrischen Energiebedarf von ~11W.

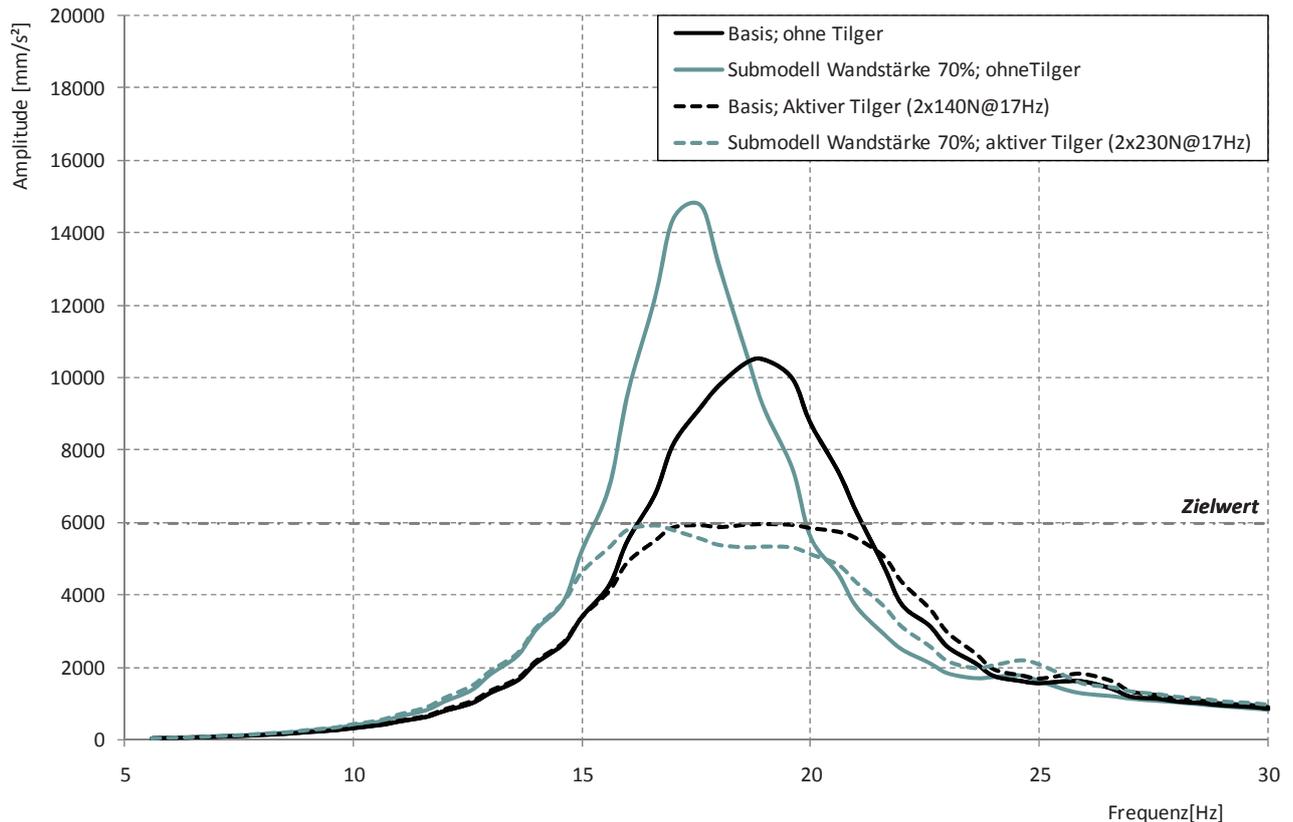


Abbildung 12: Erste Ergebnisse der multidisziplinären Simulation mit aktiven Schwingungstilgern

Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass jeder multidisziplinäre Simulationslauf des Gesamtfahrzeugmodells in der neu entwickelten MATLAB-Umgebung ~4min. Rechenzeit für die in Echtzeit 15sec. dauernde Frequenzanregung auf einem typische Office-Laptop benötigt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Grundidee ist, aktive Schwingungstilger mit einem Leichtbaugedanken zu verknüpfen. Hierzu ist eine virtuelle Evaluierung unabdingbar. Die Entwicklung einer geeigneten multidisziplinären Simulationsumgebung stellt jedoch eine entscheidende Hürde dar.

Auf Basis von MATLAB als Simulationsumgebung ist eine multidisziplinäre, ganzheitliche Gesamtfahrzeugsimulation, wie dargestellt, entwickelt worden. Einen essentiellen Bestandteil der Entwicklung stellt die Integration der modalen Korrekturfunktionen dar. Erst mit Hilfe dieser modalen Korrekturfunktionen ist es möglich einen closed-loop Prozess zu entwickeln. Die Verwendung der modalen Korrekturfunktionen ermöglicht es dabei – innerhalb von MATLAB – Leichtbaumodifikationen an der Karosseriestruktur, in Verbindung mit der STATE-SPACE-Formulierung, durch zu führen.

Auf Grund des Umstandes, dass zur Parametrierung der MATLAB-Modelle initial weiterhin NASTRAN/CDH VAO und u.U. ADAMS Rechnungen notwendig sind, kann der gewählte Ansatz als „hybrider Ansatz“ für eine multidisziplinäre Simulationsumgebung angesehen werden.

Weiter haben die ersten durchgeführten Funktionstests anhand von wandstärkenreduzierten Karosserien in Verbindung mit aktiven Schwingungstilgern deutlich das Potential dieses Ansatzes aufgezeigt. Die aktiven Schwingungstilger sind in der Lage, die auftretenden Komfortschwingungen über ein breites Frequenzband wirkungsvoll zu tilgen. Die breitbandige Wirkweise der aktiven Schwingungstilger ist gerade im Zusammenhang mit dem Leichtbaugedanken von besonderer Wichtigkeit. In der Theorie wäre auch ein „normaler“, passiver

Schwingungstilger in Lage die Beschleunigung des Referenzpunktes im Resonanzfall bis zum Zielwert zu tilgen. Jedoch ist das Risiko in der Praxis, aufgrund der bestehenden (hohen) Toleranzen (Schwingungstilger und Fahrzeug(masse)), viel zu groß, dass ein passiver Schwingungstilger nicht optimal arbeiten könnte. In diesem Fall würde eine erhebliche, nicht tolerierbare Einbuße von Schwingungs- und Fahrkomfort eintreten.

Als nächste Schritte erfolgen die Integration von Optimierungsalgorithmen sowie eine reale Fahrbahnanregung. Darüber hinaus werden gleichermaßen die Forschungsaktivitäten im Bereich der aktiven Schwingungstilgung, insbesondere in Verbindung mit dem Leichtbaugedanken, weitergeführt und intensiviert.

## 6 Referenzen

- [1] HIRZINGER, G.: „Wir müssen Mauern einreißen“ In: *Magazin für Mechatronik und Engineering*, 06/2009, S. 16-17
- [2] BRAESS, H.-H.; SEIFFERT, U. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2005, S. 358ff.
- [3] ISAERMANN, R.: *Fahrdynamik-Regelung*. Wiesbaden: Vieweg Verlag 2006
- [4] VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2004.
- [5] MA XINGGUO: *Multi-body Dynamics Simulation on Flexible Crankshaft System*. 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18-21, 2007.
- [6] ELLIOTT, A.: *A Highly Efficient, General-Purpose Approach for Co-Simulation with ADAMS*.
- [7] MITSCHKE, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer Verlag, 2004
- [8] PREUMONT, A.: *Vibration Control of Active Structures*. DORDRECHT: KLUWER Academic Publishers, 2002.
- [9] WITTA, L.: *Entwurf und Realisierung interaktiver modaler Berechnungs- und Optimierungsverfahren für gekoppelte Struktur-Fluid-Systeme*. Zugl.: München, Techn. Universität, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Diss., 2001.
- [10] MASS, D.: *Schnelle rechnerische Komfortoptimierung von Kraftfahrzeugen mittels modaler Korrektur*. Zugl.: München, Techn. Universität, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Diss., 2000.

# Entwicklung einer elektrisch-thermisch-mechanisch gekoppelten Simulationsmethode für Fügeprozesse

Dr. Bernd Scholz, Dr. Maarten Brink (TWT GmbH Science & Innovation)

Heiko Steinmetz (Daimler AG)

Um den komplexen Herausforderungen bei der Verbindung von Werkstücken aus unterschiedlichen Materialien begegnen zu können, wurde von der Daimler AG eine neue Methode entwickelt und patentiert. In diesem Zusammenhang wird ein Niet zunächst mit dem Grundmaterial durch einen hohen elektrischen Impuls verschweißt. In einem zweiten Schritt wird das Material erneut durch einen zweiten, geringeren Stromimpuls gleichmäßig erhitzt. Hierdurch kann der Niet plastisch verformt werden wodurch die Werkstücke verbunden werden. Als Folge der anschließend einsetzenden Abkühlung der vernieteten Materialien treten Vorspannungen auf.

Die Simulation des gesamten Prozesses – sowohl des Schweißens als auch des Nietens – war Aufgabe der TWT GmbH Science & Innovation. Die dadurch notwendige Berücksichtigung elektrischer, thermischer und mechanischer Variablen in der Simulation führt zu einem gekoppelten Mehrfeldproblem. Die größten Herausforderungen lagen dabei zum einen in der Modellierung des gesamten Prozesses und dabei insbesondere in der Berücksichtigung von drei verschiedenen Feldern sowie der Kopplungseffekte. Zum anderen sollte eine robuste numerische Berechnung bereit gestellt werden.

Ziele der Simulation sind zum einen die Optimierung der durch die Fertigung beeinflussbaren Parameter, wie etwa der Intensität und der Dauer der Stromimpulse, und zum anderen die Optimierung der Nietgeometrie. Die Simulation ermöglicht weiterhin die Berechnung der im Niet auftretenden Vorspannungen, die messtechnisch schwer zu erfassen sind. Mithilfe der so ermittelten Werte kann auch die Belastung des Niets ermittelt werden. In einem weiteren Schritt können die unter Betriebsbedingungen zusätzlich auftretenden Spannungen ermittelt werden bzw. Betriebsfestigkeitsuntersuchungen unter Berücksichtigung der Vorspannungen durchgeführt werden.

Im Rahmen des Artikels wird zunächst die Struktur des betrachteten Mehrfeldproblems erläutert und anschließend mit einem speziellen Fokus auf die Kopplungsbedingungen zwischen den einzelnen Feldern diskutiert. Weiterhin wird die Lösung eines konkreten Problems illustriert. In einem abschließenden Schritt wird die Validierung der neuentwickelten Methode präsentiert.

## 1 Einleitung

Ein neues Fügeverfahren für verschiedene, nicht verschweißbare Materialien wurde von der Daimler AG entwickelt und patentiert [5]. Auf der Suche nach einem angemessenen numerischen Verfahren zur Simulation dieses Fügeverfahrens und damit zur Berechnung und Optimierung des Prozesses wurde die TWT GmbH Science & Innovation mit der Entwicklung eines Simulationsmodells beauftragt. Ziel war es, in einem Zeitraum von wenigen Wochen verwertbare Simulationsergebnisse für den kompletten Fügeprozess zu erhalten.

### 1.1 Problemspezifikation

Das neu entwickelte Fertigungsverfahren setzt sich aus zwei Arbeitsschritten zusammen. In einem ersten Schritt wird der Niet mit dem darunterliegenden Material durch einen kurzen, hohen elektrischen Stromstoß verschweißt (vgl. Abb. 1 und Abb. 2). Nach dem Verschweißen wird das Werkstück so lange abgekühlt, bis seine Temperatur unter dem Schmelzpunkt liegt. Anschließend wird der Niet in einem zweiten Schritt gleichmäßig durch einen längeren und weniger intensiven Stromstoß erhitzt. Durch die Erwärmung verringert sich die Fließspannung des Nietmaterials, so dass sich der Niet aufgrund der vertikalen Last plastisch verformt

(vgl. Abb. 2 und Abb. 3). Im Anschluss kühlt der Niet langsam bis auf Umgebungstemperatur ab. In Folge der Wärmeausdehnung schrumpft der Niet dabei, wodurch eine Vorspannung zwischen beiden Materialien entsteht.

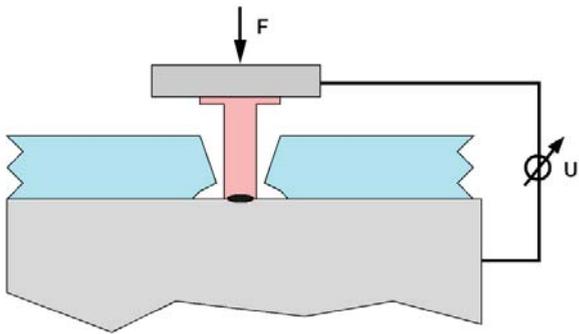


Abb. 1: Schweißprozess

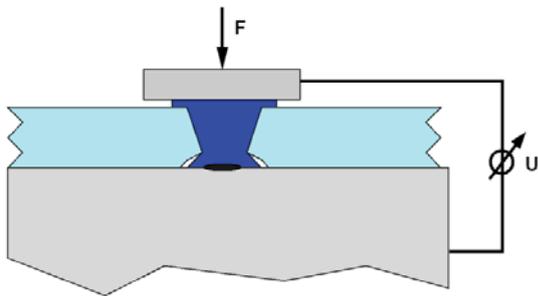


Abb. 2: Plastische Deformation des Niets

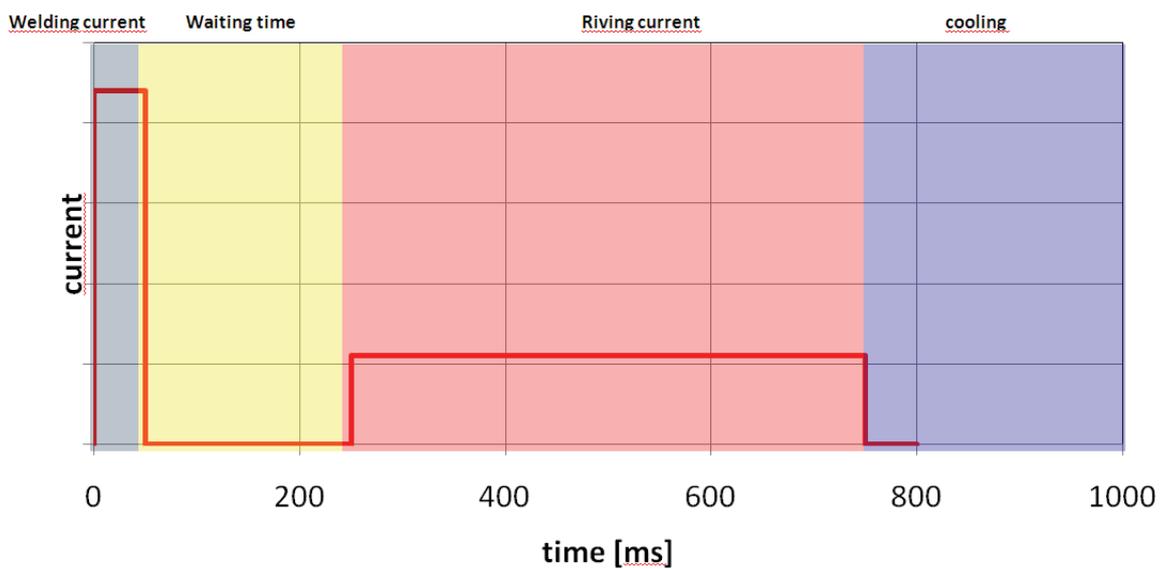


Abb. 3: Prozessverlauf

## 1.2 Kopplungseffekte

Aufgrund der Erwärmung des Materials durch elektrischen Strom und der daraus resultierenden mechanischen Deformation, besteht ein gekoppeltes Mehrfeldproblem, d.h. eine Kopplung zwischen elektrischen, thermischen und mechanischen Feldern. Solche Problemstellungen sind im Rahmen der Finiten Elemente Simulation bekannt (vgl. [1] und [2]). Die starke Kopplung erfolgt durch die Einbeziehung von Koppeltermen in den relevanten Bilanzgleichungen. Im vorliegenden Fall werden folgende Bilanzgleichungen berücksichtigt:

- Impulsbilanz
- Energiebilanz
- Maxwell-Gleichungen

Die starke Kopplung kommt dabei über die so genannten Produktionsterme in der Energiebilanz zu Stande, d.h. die Erwärmung durch den Energieeintrag infolge des elektrischen Stromes sowie der Dissipation infolge des plastischen Fließens. Eine weitere schwache Kopplung zwischen den mechanischen und thermischen Feldern ergibt sich durch die Temperaturabhängigkeit der elastischen Steifigkeit und der Fließspannung des Materials sowie infolge der thermischen Verformung in Abhängigkeit von dem Temperaturexpansionskoeffizienten.

## 1.3 Ziele der Simulation

Die Hauptziele der Simulation können wie folgt beschrieben werden:

- Optimierung der Prozessparameter, z.B. Intensität und Dauer des elektrischen Stroms und der Auskühlzeit zwischen dem Schweiß und dem Nietvorgang.
- Berechnung und Einstellung der verbleibenden Vorspannung im Material.
- Durchführung von numerischen Tests verschiedener Geometrievarianten des Niets zur Einsparung realer Tests und dadurch zur Einsparung von Zeit und Kosten.
- Optimierung der Niet- und Werkstückgeometrie.
- Ermittlung der überlagernden Spannungen aus der Vorspannung und den Gebrauchslasten sowie Absicherung des Bauteils durch eine Betriebsfestigkeitsanalyse.

## 1.4 Lösungsansatz

Da mittels des verwendeten FE-Programms Abaqus [4] keine gekoppelte elektrisch-thermisch-mechanische Simulation möglich ist, wurde die gesamte Simulation in drei Teilschritte aufgegliedert:

1. Simulation des Schweißprozesses. Dieser Schritt beinhaltet die elektrisch-thermische Simulation des Aufheizens des Niets bis zum Erreichen des Schmelzpunktes an der Spitze des Niets.
2. Elektrisch-thermische Simulation der Erhitzung des Niets bedingt durch den Nietstrom.
3. Thermisch-mechanische Simulation der plastischen Deformation des Niets.

In der Realität laufen die Schritte 2 und 3 gleichzeitig ab. Aufgrund der Tatsache, dass in der Simulation eine gekoppelte Simulation aller drei Felder nicht möglich ist, wird der Schweißprozess zunächst in einem elektrisch-thermischen Schritt, anschließend in einem thermisch-mechanischen Schritt simuliert. Dieser Ansatz ist im Rahmen der untersuchten Problemstellung zulässig, da infolge der kurzen Schweißzeit die mechanische Deformation einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Fließen des elektrischen Stroms hat. Dies gilt jedoch nur bis zu dem Zeitpunkt, zu dem das Material des Niets den Zylinder berührt. In diesem Moment fällt die elektrische Spannung infolge von Nebenschlüssen ab und damit ist der Nietprozess beendet.

## 2 Simulation des Schweißvorgangs

Die Simulation des Schweißvorgangs wird hauptsächlich durch die Berechnung der Transformation der elektrischen Energie in Wärme bestimmt. Dieser Schritt wird nur in elektrisch-thermischer Hinsicht simuliert, obwohl das Material auch plastisch verformt wird. Die Verflüssigung des Materials wird jedoch in diesem Schritt der Simulation aus Gründen der Vereinfachung nicht berücksichtigt.

Ziele der Simulation des Schweißvorgangs sind zum einen die Bestimmung der Temperaturverteilung im Material nach dem Schweißen, zum anderen die Ermittlung des verschweißten Bereiches, d.h. der Durchmesser der so genannten Schweißlinse.

## 2.1 Schweißmodell

Grundlage für den gesamten Simulationsprozess ist ein rotations-symmetrisches Modell (vgl. Abb. 4). Sowohl der Niet, als auch die Bodenplatte sind aus Stahl gefertigt (St. 37), wohingegen der Zylinder aus Aluminium besteht. Die Belastung des Modells erfolgt durch einen vorgegebenen Strom an der Oberseite des Niets und an der Bodenplatte (vgl. Abb. 4).

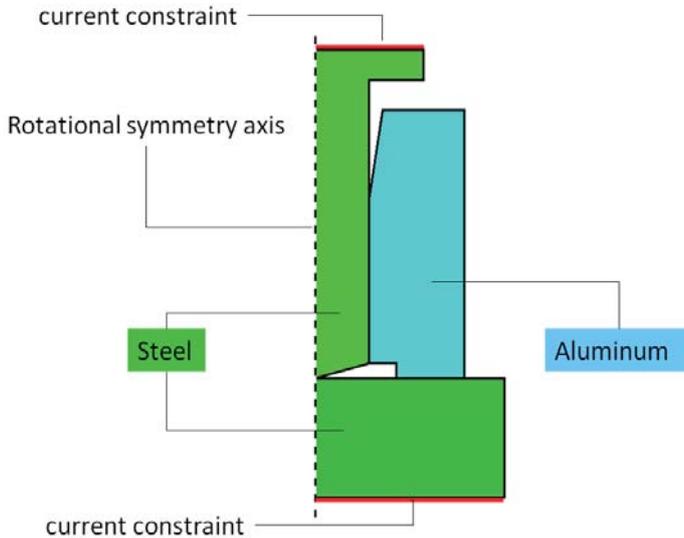


Abb. 4: Skizze des verwendeten Modells für die Schweißsimulation

## 2.2 Elektrisch-thermische Simulation

Aufgrund der Tatsache, dass keine Verformungen während der Schweißsimulation betrachtet wurden, wurde auch die mechanische Verflüssigung des Materials nicht berücksichtigt. Für die korrekte Berechnung der Erwärmung infolge der über den elektrischen Strom eingebrachten Energie ist die Berücksichtigung der zur Verflüssigung benötigten Energie dennoch essentiell. Daher wurde in der temperaturabhängigen Wärmekapazität die Schmelzenthalpie berücksichtigt (vgl. Abb. 5). Auf diese Weise entsteht ein vereinfachtes Modell, mit welchem eine relativ einfache Simulation der Aufwärmung des Niets als Folge des zugeleiteten Stroms möglich ist.

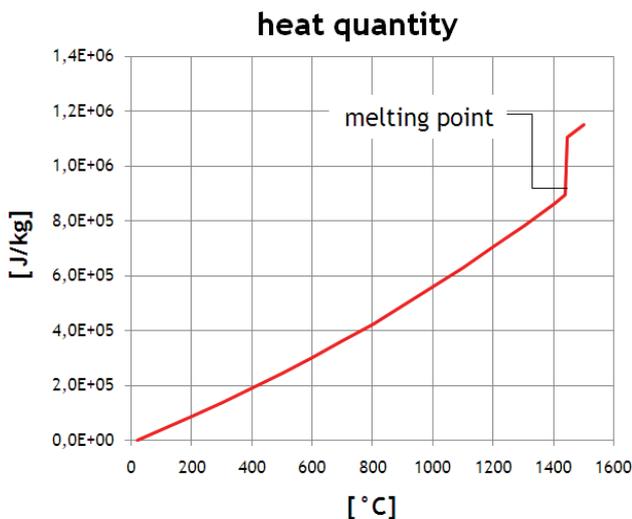


Abb. 5: Betrachtung der Schmelzenthalpie

### 2.3 Ergebnisse der Simulation des Schweißprozesses

Die Ergebnisse der Simulation des Schweißprozesses sind in Abbildung 6 dargestellt. Sie zeigt die Stärke des Stroms, die Spannung und die Temperatur. Es kann beobachtet werden, dass sich die Spannung beinahe konstant von der Spitze bis zum Fuß des Niets verringert, wohingegen die Stromstärke stark am Kontaktpunkt des Niets mit der Bodenplatte konzentriert ist. Infolgedessen kommt es zu einer lokalen Erwärmung an der Nietspitze und damit zum Überschreiten der Schmelztemperatur (in Abbildung 6 durch die rote Farbe dargestellt).

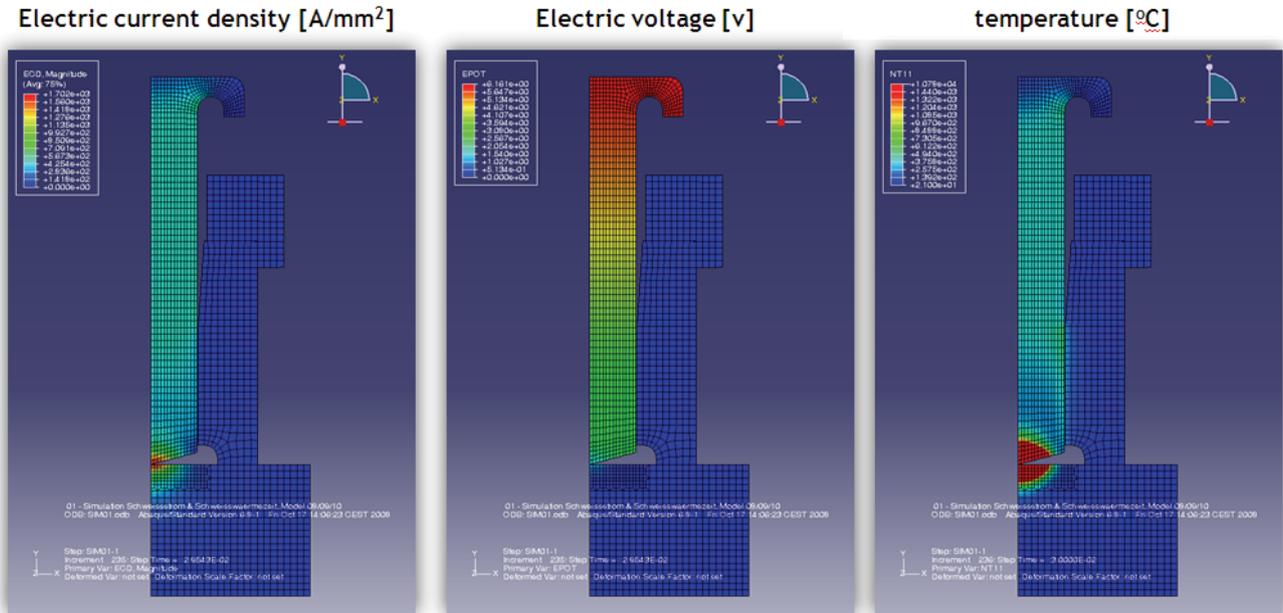


Abb. 6: Ergebnisse der Simulation des Schweißprozesses

### 2.4 Ermittlung des verschweißten Bereichs

Zur Bestimmung des Bereichs des Niets, der mit der Bodenplatte fest verschweißst, wird die Verteilung der Temperatur um diese Kontaktfläche betrachtet. Der rote Bereich in Abbildung 7 entspricht auch hier derjenigen Zone, in welcher geschmolzenes Material vorliegt. Es wird nun davon ausgegangen, dass innerhalb dieses Bereichs das Material verschweißst wurde. Somit lässt sich direkt der Durchmesser des verschweißten Bereichs bestimmen.

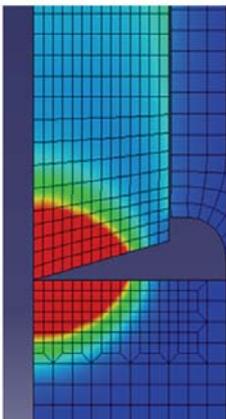


Abb. 7: Bestimmung der Schmelzzone basierend auf der im Material vorherrschenden Temperatur

### 3 Nietsimulation

Nach Beendigung der Schweißsimulation wird das Modell angepasst, d.h. die Knoten innerhalb des verschweißten Bereichs werden verbunden. Des Weiteren wird die aus der Schweißsimulation ermittelte Temperaturverteilung als Ausgangssituation in das Nietmodell übertragen. Die Nietsimulation besteht dann aus einer weiteren thermisch-elektrischen Simulation zur Ermittlung der Niettemperatur sowie einer thermisch-mechanisch Simulation zur Ermittlung der Nietverformung.

#### 3.1 Übertragung des Schweißmodells in das Nietmodell

Zunächst werden die Knotenpunkte des Niets und der Grundplatte innerhalb der geschweißten Zone direkt verbunden (vgl. Abb. 8). Anschließend wird die Abkühlung des Materials innerhalb der Wartezeit (vgl. Abb. 3) berechnet.

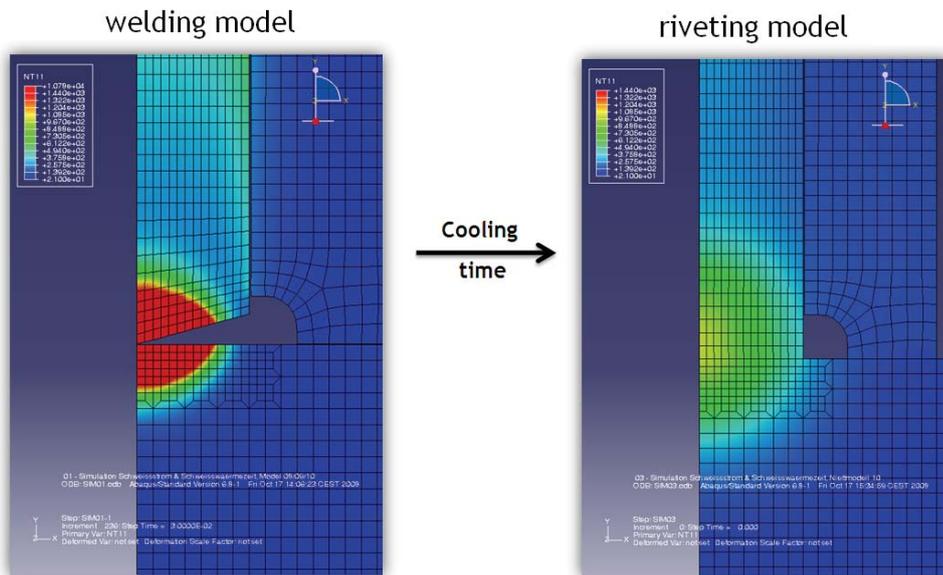
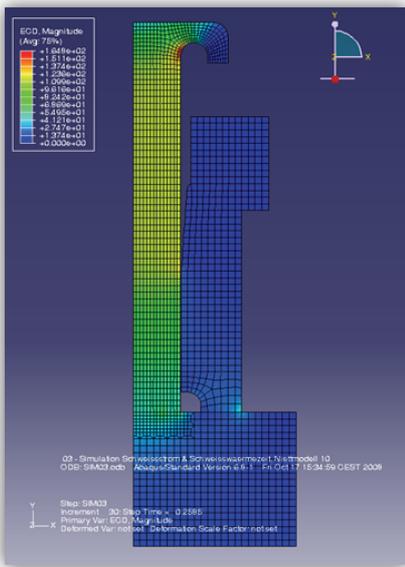


Abb. 8: Übertragung des Schweißmodells in das Nietmodell (Farbe repräsentiert Temperatur)

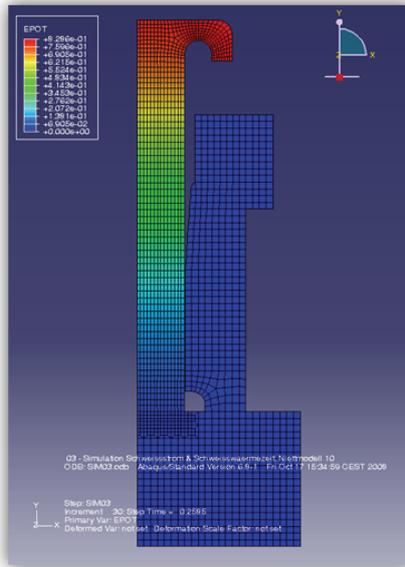
#### 3.2 Elektrisch-thermische Simulation des Nietvorgangs

Ähnlich zur elektrisch-thermischen Simulation während des Schweißprozesses wird an der ober und Unterseite des Modells der Strom als Randbedingung vorgegeben. Aufgrund des Modelltransfers ist die Kontaktoberfläche zwischen Niet und Bodenplatte vergrößert, was zu einem geringen elektrischen Widerstand um diesen Bereich führt. Die Stromstärke sollte konstant über den gesamten Schaft des Niets verteilt sein. Jedoch resultiert aus der engen Anbindung zwischen dem Niet und der Aluminiumkomponente auf der rechten Seite des Niets ein Nebenschluss für den elektrischen Strom. Dies hat zur Folge, dass die Stromstärke am oberen Ende des Niets am höchsten ist und damit auch dort die meiste Wärme entwickelt wird. (vgl. Abb. 9).

Electric current density [A/mm<sup>2</sup>]



Electric voltage [v]



temperature [°C]

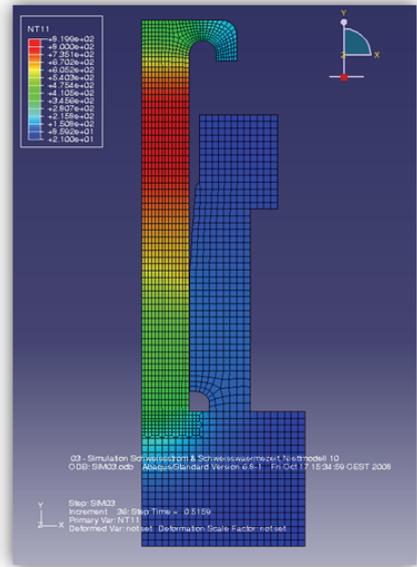
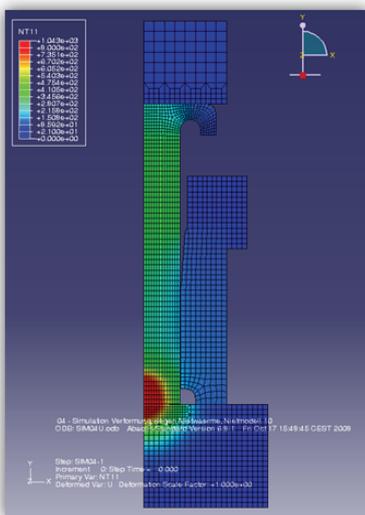


Abb. 9: Ergebnisse der elektrisch-thermischen Nietsimulation

### 3.3 Thermisch-mechanische Simulation

Die Temperaturverteilung der vorhergehenden elektrisch-thermischen Nietsimulation wird als Input für die Simulation der Verformung verwendet. Beide Prozesse laufen in der Realität gleichzeitig ab, in diesem Fall werden sie jedoch in zwei unterschiedliche gekoppelte Simulationen aufgeteilt. Während der thermisch-mechanischen Nietsimulation wird die Temperaturverteilung fortlaufend aktualisiert; gleichzeitig wird der Nietkopf durch einen Stempel vertikal nach unten gedrückt. Sobald durch die Aufwärmung des Materials die unter der konstanten Spannung liegt kommt es zur plastischen Verformung des Niets, die beendet ist, wenn der Nietkopf die obere Seite des Aluminium-Zylinders berührt (vgl. Abb. 10). Abhängig von der Temperaturverteilung innerhalb des Nietschafts und seinen Materialeigenschaften verformt sich der Niet und füllt das konische Bohrloch aus. Nach dieser Verformung wird der Stempel für etwa eine Sekunde während der Abkühlungszeit in dieser Position gehalten, bevor er nach oben hin wegbewegt wird. Anschließend kühlt die Anordnung weiter bis zur Umgebungstemperatur ab.

Situation after the welding process



Situation after the riving process

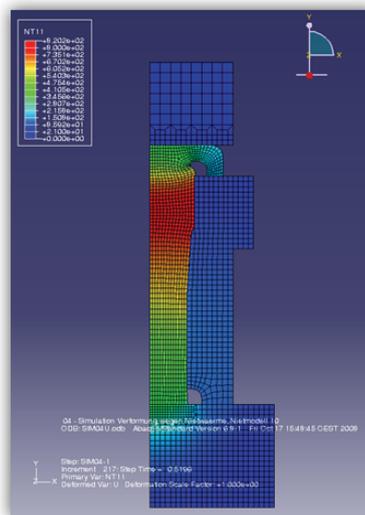


Abb. 10: Ergebnisse der thermisch-mechanischen Nietsimulation

## 4 Abkühlungsprozess

Ausgehend von einem heißen und verformten Modell wird im nächsten Schritt der Abkühlungsprozess mit einem besonderen Fokus auf die thermische Kontraktion des Niets betrachtet. Die im System vorhandene Wärmeenergie wird durch Wärmeleitung und Abstrahlung der Oberfläche abgegeben bis das gesamte Modell die Umgebungstemperatur erreicht hat (vgl. Abb. 11).

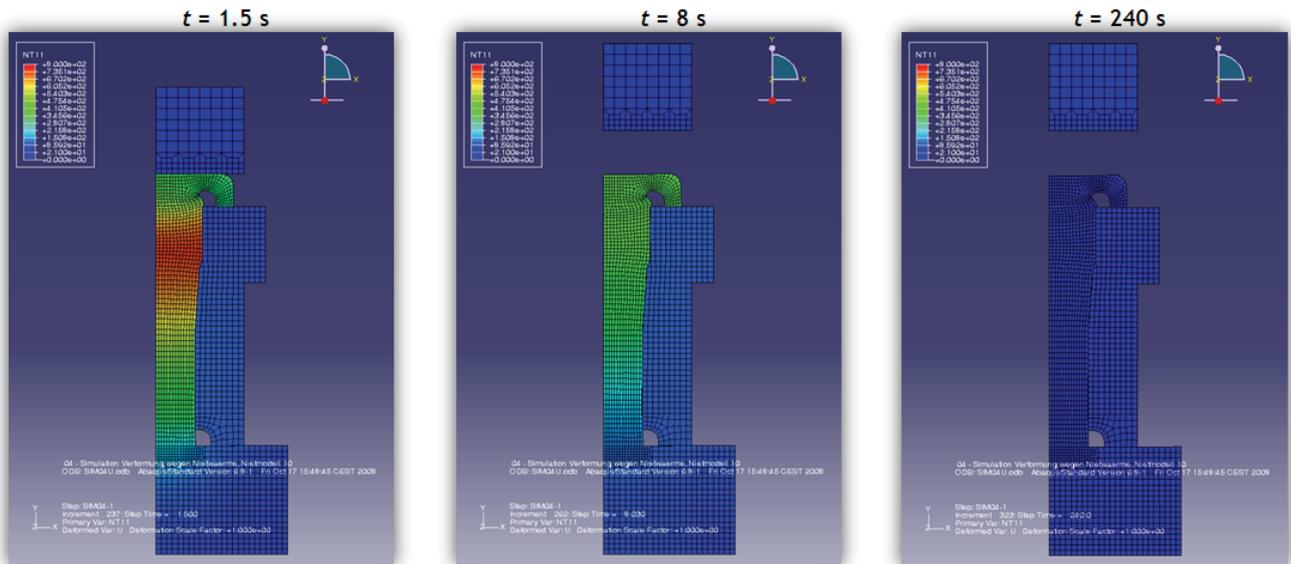


Abb. 11: Abkühlungsprozess: Ergebnisse der Temperatur

### 4.1 Spannungsaufbau aufgrund der Abkühlung

Der Niet hat nach dem Anlegen des Stroms zur Vernichtung von allen Komponenten die höchste Temperatur. Infolge der hohen Temperaturdifferenz wird er sich somit in Abhängigkeit des Temperaturexpansionskoeffizienten auch am stärksten zusammenziehen. Das Zusammenziehen des Materials findet im Allgemeinen in alle Richtungen gleichmäßig statt. Im vorliegenden Fall dominiert aufgrund der Geometrie jedoch die vertikale Kontraktion des Niets. Da der Niet in dieser Richtung durch den Aluminium-Zylinder blockiert wird, kann sich der Niet nicht zusammenziehen wodurch eine vertikale Vorspannung zwischen Bodenplatte und den Aluminium-Zylinder entsteht (vgl. Abb. 12).

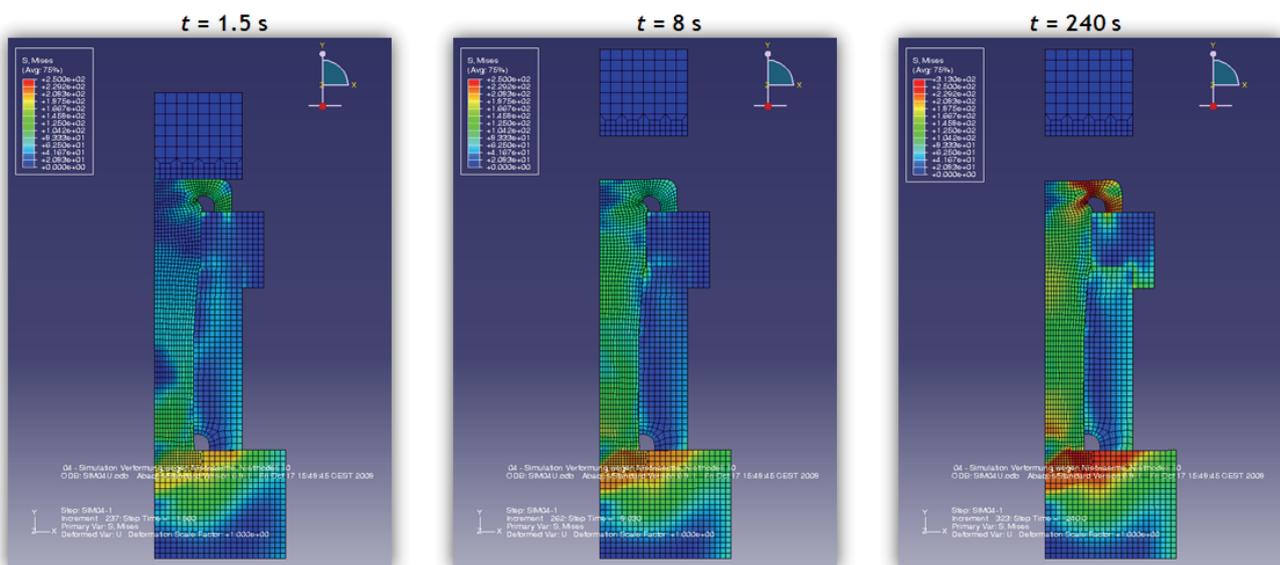


Abb. 12: Abkühlungsprozess: Aufbau der Vorspannung (von-Mises-Spannung)

Die Spannungsverteilung nach der Abkühlung (Abb. 12 rechts) zeigt deutlich, wo sich die schwächsten Gebiete der Komponenten befinden und demnach auch, wo die höchste Wahrscheinlichkeit für Ausfälle besteht. Diese Information kann als Ausgangspunkt für weitere, detailliertere Lebensdaueruntersuchungen verwendet werden.

#### 4.2 Anpresskräfte während des Abkühlungsprozesses

Basierend auf der ermittelten Spannungsverteilung zu bestimmten Zeitpunkten können mittels der bereits definierten Kontaktoberflächen innerhalb des Modells die Anpresskräfte zwischen den verschiedenen Komponenten beobachtet werden (vgl. Abb. 13). Die Abbildung zeigt die Anpresskräfte zwischen Stempel und Nietkopf (blau), zwischen Nietkopf und Aluminium-Zylinder (rot) sowie zwischen Aluminium-Zylinder und Bodenplatte (grün) während der Verformungsphase (0 bis 0.5 Sekunden) und der Abkühlungsphase (0.5 bis 240 Sekunden). Für eine bessere Darstellung wurde die Zeitachse logarithmisch unterteilt.

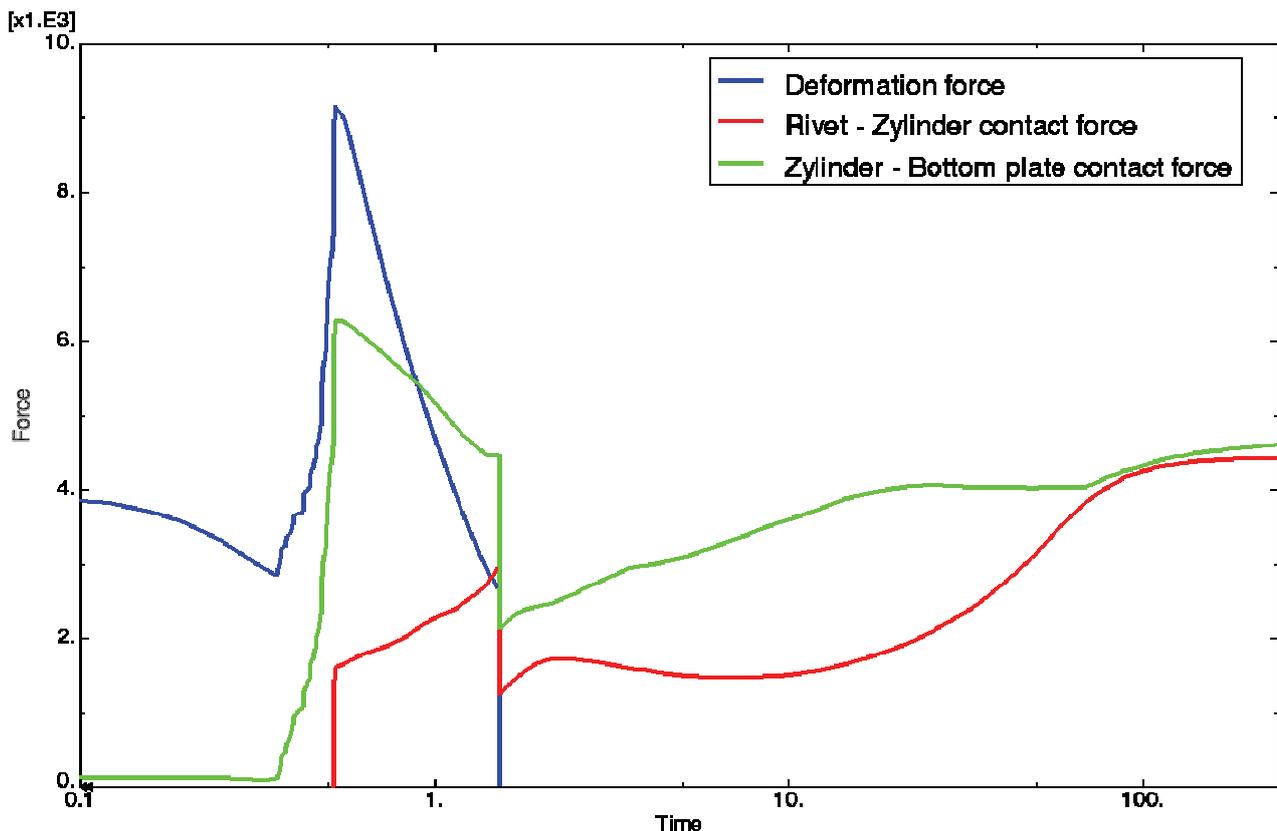


Abb. 13: Entwicklung von Anpresskräften während der Verformungs- (0 bis 0.5 s) und Abkühlungsphase (0.5 bis 240 s)

Die Linien zeigen unter anderem, dass die Kräfte zwischen Nietkopf und Zylinder (rot) nach der Abkühlung beinahe den Kräften zwischen Zylinder und Bodenplatte (grün) entsprechen. Dies bedeutet, dass der Kontakt zwischen der stark verformten Seite des Nietschafts und der inneren Seite des Zylinders – entsprechend der Differenz zwischen der grünen und roten Linie – während der Abkühlung verschwindet.

Die blaue Linie, welche den Kontakt zwischen dem Stempel und dem Nietkopf darstellt, zeigt, dass der letzte Teil der Verformung die größte Kraft aufweist. Am Höchstwert der Kraft zwischen Stempel und Nietkopf (blaue Linie) wird der Nietkopf gegen die obere Seite des Zylinders gepresst, was gleichzeitig auch am Ansteigen der Kraft zwischen Nietkopf und Aluminium-Zylinder (rote Linie) abgelesen werden kann. Zu diesem Zeitpunkt wird der Stempel für circa 0.7 Sekunden in seiner Position gehalten; der Niet beginnt in dieser Zeit bereits abzukühlen. Aufgrund der thermischen Kontraktion des Niets verringert sich die Anpresskraft zwischen Stempel und Niet, bis der Stempel zum Zeitpunkt  $t=1.2$  s schließlich nach oben hin wegbewegt wird. Die Anpresskraft reduziert sich daraufhin schnell auf einen Wert von null. Dies baut zwar die Anpresskraft zwischen Nietkopf und Zylinder zunächst ab, führt aber aufgrund der andauernden Abkühlung und der Kontraktion zu einem erneuten Anstieg der Anpresskraft bis der Abkühlungsprozess abgeschlossen ist.

## 5 Vergleich der Verformungen

Eines der Ziele der Simulation des Nietprozesses ist die Vorhersage der verbleibenden Verformungen des Niets nach der Abkühlung. Durch die Berechnung der Verformung im Vorfeld kann die Geometrie des Niets (z.B. Länge) optimiert werden. Abbildung 14 zeigt sowohl den im Experiment verformten Niet, als auch das Simulationsergebnis. Sowohl das praktische Ergebnis als auch das Resultat der Simulation zeigen, dass der Niet, der vor Beginn des Schweißniet-Vorgangs eine zylindrische Form hatte, den Hohlraum im Zylinder bis über den oberen Rand hinaus ausgefüllt hat. Ein Unterschied zwischen dem realen Niet und dem vorgestellten Simulationsmodell besteht in der Ausfüllung im Bereich unter dem Nietkopf, in dem die Simulation eine etwas geringere Materialbefüllung vorhergesagt hat, als sie der reale Prototyp aufweist. Dies resultiert aus dem Eindringen von flüssigem Material infolge der Verschweißung, welches in der Simulation nicht erfasst wurde.

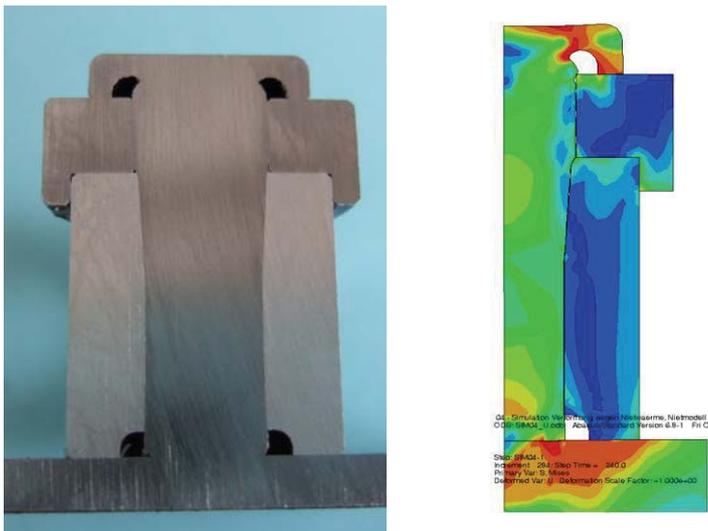


Abb. 14: Vergleich zwischen dem verformten Niet und dem Simulationsmodell

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde ein Prozess zur Simulation eines neuen Fügeverfahrens vorgestellt, welches auf elektrischem Schweißen und Nieten basiert. Das kombinierte Schweißnietverfahren erlaubt das schnelle Verbinden von nicht verschweißbaren Materialien, ähnlich zu verwendeten Nietmethoden, jedoch ohne die Notwendigkeit einer Bohrung durch die zu verbindenden Materialien und anschließender Verschraubung. Die Abkühlung und daraus resultierende Kontraktion des Niets nach der Verformung führt zu einer Vorspannung wodurch die Komponenten zusammengedrückt werden. Damit sind die so verbundenen Komponenten in der Lage, Belastungen im Betrieb Stand zu halten.

Um sowohl die Niet- und Bohrungsgeometrie als auch Intensität und Dauer des elektrischen Impulses zu optimieren, wurde eine Simulationemethodik für den Schweißniet-Prozess entwickelt. Die wichtigsten Ergebnisse der Simulation sind dabei die plastische Verformung des Niets, die ermittelten Anpresskräfte und die Spannungen im Material. Weiterhin werden durch die Ergebnisse der Simulation Lebensdaueranalysen zur Auslegung dieser Verbindungsart ermöglicht.

Der reale Schweißnietprozess ist ein gekoppeltes Mehrfeldproblem mit elektrischen, thermischen und mechanischen Aspekten. Zum Zweck der Simulation wurde dieser Prozess in elektrisch-thermische und thermisch-mechanische Schritte aufgeteilt. Dies erlaubt eine robuste und ausreichend genaue numerische Simulation.

Mit dem Wissen aus der Simulation soll der Konstrukteur zukünftig bereits in einem frühen Stadium des Entwicklungsprozesses entscheiden können, ob die Nietgeometrie den Lastfällen in ihrem Betrieb standhalten wird, oder ob Veränderungen notwendig sind.

## 7 Referenzen

- [1] Goldak, J.A. / Akhlagi, M.: "Computational welding mechanics", Springer Science & Business Media, Inc, 2005
- [2] Long, X. / Khanna, S.K.: "Residual stresses in spot welded new generation aluminium alloys", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10-1, 2005
- [3] Nodeh, R. / Serajzadeh, S. / Kokabi, A.H.: "Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding, FE modelling and X-ray verification." Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, Vol. 205, 2008
- [4] Simulia: Abaqus version 6.8. Documentation, 2008
  
- [5] Patent # DE102005006253B4. <http://www.patent-de.com/20070308/DE102005006253B4.html>

## 8 Autoren

Dr. Bernd Scholz  
TWT GmbH Science & Innovation, Neuhausen

Dr. Maarten Brink  
TWT GmbH Science & Innovation, Neuhausen

Heiko Steinmetz  
Daimler AG, Stuttgart

# Multidisziplinäre Simulation pneumatischer Scheibenwischersysteme für Hochgeschwindigkeitszüge

Dipl.-Ing. Mathias Schumacher, Dipl.-Ing. Martin Barej,  
Dr.-Ing. Mathias Hüsing, Prof. Dr.-Ing. Burkhard Corves  
Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik der RWTH Aachen

Am Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik (IGM) der RWTH Aachen werden an einem Prüfstand Scheibenwischeranlagen untersucht. Im Fokus stehen dabei aktuell Wischersysteme mit pneumatischem Antrieb, wie sie bei Hochgeschwindigkeitszügen eingesetzt werden. Ziel der Untersuchungen ist es, durch Dauertests neue Erkenntnisse hinsichtlich der Festigkeit und des Verschleißverhaltens aber auch des Optimierungspotentials zu erhalten.

Ergänzend zu den praktischen Untersuchungen am Prüfstand ist auch ein Simulationsmodell entwickelt worden. Damit wurden zwei Ziele verfolgt. Zum einen ermöglicht es die Simulation bereits im Vorfeld der Dauerfestigkeitsprüfung Schwachstellen des Wischersystems zu erkennen. Zum anderen können nur mit dem Simulationsmodell während und nach dem Dauertest Parametervariationen hinsichtlich der Optimierung nicht zuletzt des pneumatischen Systems vorgenommen werden.

Der Beitrag stellt die Simulationsstrategie vor. Diese gliedert das Gesamtmodell in die Module: pneumatischer Antrieb inklusive Steuerung, dynamisches Modell des Wischermechanismus und aufgeprägte Lasten (Reibung, Aerodynamik und Widerstand des verdängtes Wasser). Das pneumatische System wird durch Abbildung der thermodynamischen und strömungstechnischen Grundgleichungen in MatLab/Simulink modelliert. Die Abbildung des Wischermechanismus erfolgt als Mehrkörpermodell in MatLab/SimMechanics. Die aufgeprägten Lasten können wiederum mit MatLab/Simulink beschrieben und in das Gesamtmodell integriert werden. Damit steht ein Werkzeug für die ganzheitliche Betrachtung eines Wischersystems zur Verfügung.

## 1 Einleitung

Im Schienenverkehr ist das Scheibenwischersystem ein sicherheitsrelevantes Modul. Fällt dieses aus, so muss der Zug seine Fahrt in Schrittgeschwindigkeit fortsetzen [1]. Dies ist vor allem für Hochgeschwindigkeitszüge, die im Fernverkehr eingesetzt werden (Abb. 1), ein Problem, da ein schneller Austausch solcher Züge ohne weiteres nicht möglich ist. Deshalb ist die Dauerhaltbarkeit dieser Systeme von großer Bedeutung.



Abb. 1: Hochgeschwindigkeitszug Siemens Velaro E [2]

Im Schienenverkehr werden zwei unterschiedliche Prinzipien für Wischersysteme eingesetzt. Zum einen gibt es elektrisch angetriebene Systeme und zum anderen pneumatische Systeme. Vorteil der elektrisch betriebenen Wischersysteme ist die relativ einfache Steuerung und die geringen Systemkosten. Im Unterschied dazu haben pneumatische Systeme den Vorteil einer großen Betriebssicherheit. Impulsartige Belastungen des Systems können durch die Kompressibilität der Luft abgefedert werden. Zudem ist bei pneumatischen Systemen eine kompakte Bauweise möglich. Das zum Antrieb benötigte Druckluftsystem ist bei vielen Zügen bereits vorhanden [3]. Das in diesem Artikel betrachtete Wischersystem ist in Abb. 2 dargestellt. Der Kolben des pneumatischen Aktuators überträgt seine translatorische Bewegung auf ein Parallelkurbelgetriebe, welches das Wischerblatt trägt.

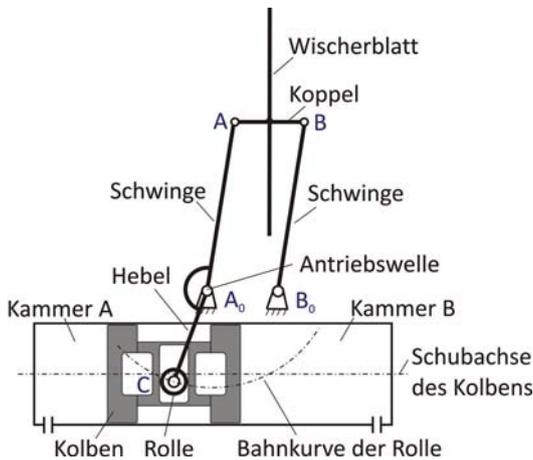


Abb. 2: Schematische Darstellung des pneumatischen Wischersystems

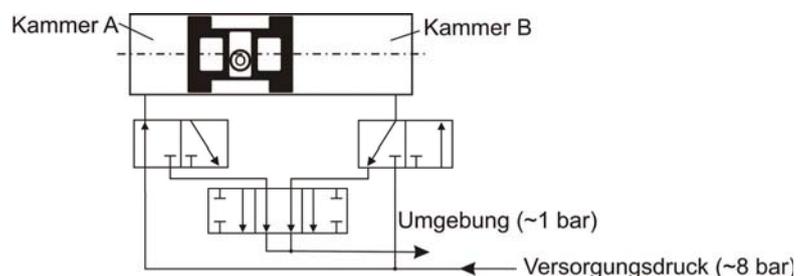


Abb. 3: Pneumatisches System

## 2 Simulationsmodell

Das Simulationsmodell besteht aus mehreren miteinander gekoppelten Modulen, für die Kenntnisse aus unterschiedlichen Disziplinen der Ingenieurwissenschaften nötig sind. Diese sind im speziellen die Pneumatik, die Kinematik und Dynamik von Mehrkörpersystemen sowie die Aerodynamik. MatLab bietet mit den Toolboxes Simulink und SimMechanics die Möglichkeit diese unterschiedlichen Effekte mit nur einem Softwarepaket zu simulieren.

MatLab/Simulink ist eine interaktive grafische Entwicklungsumgebung für Multidomain Simulation und das Model-Based Design dynamischer Systeme [4]. MatLab/SimMechanics ist eine in Simulink integrierte Mehrkörpersimulationsumgebung. Diese bietet die Möglichkeit ein aus Körpern, Gelenken, Randbedingungen und Kräftelementen aufgebautes Modell zu erzeugen und damit Simulationen durchzuführen. In automatisch erzeugten 3D-Animationen kann die Dynamik solcher Systeme anschaulich visualisiert werden. Außerdem verfügt SimMechanics über Funktionen zum Import von CAD-Modellen mit ihren Massen, Trägheiten, Randbedingungen und 3D-Geometrien [5]. Die sich ergebenden Bewegungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen sowie die Kräfte und Momente können ausgelesen, gespeichert oder weiterverarbeitet werden.

### 2.1 Pneumatik

Das betrachtete Wischersystem wird durch einen pneumatischen Doppelkolben angetrieben. Durch die Steuerung mit drei Schaltventilen können die beiden Druckkammern unabhängig voneinander entweder mit dem Hochdrucksystem (~ 8 bar) oder mit der Umgebung (~ 1 bar) verbunden werden. Zudem können die Druckkammern geschlossen werden, sodass kein Luftaustausch stattfindet. Das beschriebene pneumatische System ist in Abb. 3 dargestellt.

Um das Verhalten der pneumatischen Komponenten des Systems simulieren zu können, werden die Grundgleichungen der Thermodynamik und Strömungslehre in MatLab/Simulink implementiert. Dabei dienen der Kolbenweg sowie die Schaltsignale der Ventile als Eingangsgrößen dieses Simulationsmoduls. Als Ausgangsgrößen erhält man die Drücke in den beiden Kammern (Abb. 4).

2.1.1 Doppelkolben

Der im Wischersystem eingesetzte Doppelkolben ist in *Abb. 2* dargestellt. Er verfügt über keine Kolbenstange. Die Aufnahme der Bewegung erfolgt unmittelbar am Kolben durch eine in einer Kulissee mitbewegten Rolle. Diese Rolle überträgt die Bewegung auf einen drehbar gelagerten Hebel, welcher wiederum mit der Antriebswelle des Wischergetriebes verbunden ist.

Zur Simulation wird die Kolbenkammer als offenes, reversibles System betrachtet. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik gilt für ein solches System die Gleichung [6]:

$$dU = dW + dQ + (dm_{out} h_{out} - dm_{in} h_{in}). \tag{1}$$

Dabei steht  $U$  für die innere Energie,  $W$  für die Volumenänderungsarbeit,  $Q$  für den Wärmestrom,  $m$  für die Luftmasse und  $h$  für die spezifische Enthalpie. Mit den Beziehungen

$$dU = m \cdot c_v \cdot dT \tag{2}$$

für die innere Energie,

$$dW = -p \cdot dV \tag{3}$$

für die reversible Volumenarbeit,

$$\dot{Q} = A_{surface} \cdot \alpha \cdot (T - T_{environment}) \tag{4}$$

für den Wärmestrom und

$$h = c_p \cdot T \tag{5}$$

für die spezifische Enthalpie folgt für die Druckänderung im Kolben für einen Zeitschritt [7]:

$$dp = \frac{\kappa}{V} \left[ -p \cdot dV + R(dm_{in} \cdot T_{in} - dm_{out} \cdot T_{out}) - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \alpha \cdot A_{surface} \cdot (T - T_{environment}) \cdot dt \right] \tag{6}$$

Volumenänderungsarbeit      Änderung der Masse      Wärmeübergang

mit:	$\kappa$	Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten
	$V$	eingeschlossenes Volumen
	$p$	Druck in der Zylinderkammer
	$R$	spezifische Gaskonstante des Mediums Luft
	$m_{in}$	Masse der einströmenden Luft
	$m_{out}$	Masse der ausströmenden Luft
	$T_{in}$	Temperatur der einströmenden Luft
	$T_{out}$	Temperatur der ausströmenden Luft
	$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
	$A_{surface}$	Oberfläche des Kolbens die am Wärmeübergang beteiligt ist
	$T$	Temperatur im Kolben
	$T_{environment}$	Umgebungstemperatur
	$dt$	Zeitschritt

Die Umsetzung dieser Zusammenhänge in MatLab/Simulink ist in *Abb. 4* ersichtlich.

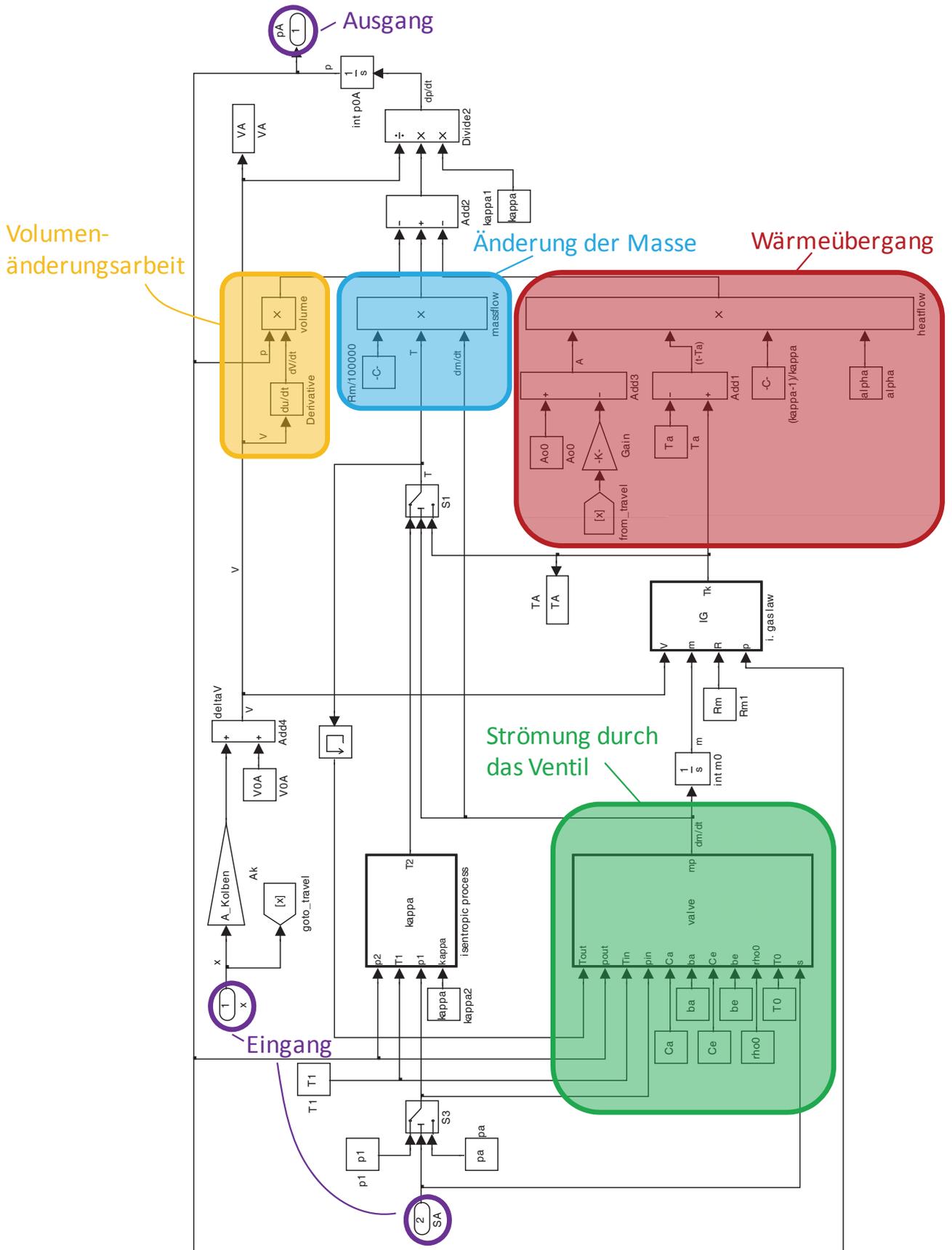


Abb. 4: MatLab/Simulink Modell zur Berechnung des Druckes in Kammer A

2.1.2 Ventile

Der Doppelkolben ist an das pneumatische System des Hochgeschwindigkeitszuges angeschlossen. Bevor die Versorgungsluft in den Zylinder strömt, durchströmt sie zunächst ein Schaltventil. Die ausströmende Luft durchströmt hingegen zwei Schaltventile. Diese Ventile müssen ebenfalls modelliert werden. Der Massenstrom durch einen pneumatischen Widerstand lässt sich über den ersten Hauptsatz der Thermodynamik berechnen. Unter der Annahme einer isentropen Zustandsänderung (kein Wärme- und Arbeitsaustausch mit der Umgebung) und einer idealen Düse ergibt sich für die Änderung der Enthalpie:

$$dh = \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2} = c_p \cdot (T_2 - T_1). \tag{7}$$

Dabei bezeichnet der Index 1 den Zustand vor dem Widerstand (Drucklufttank) und der Index 2 den Zustand im engsten Querschnitt des Widerstands. Die Geschwindigkeit  $v_1$  im Drucktank soll gleich null sein. Mit der idealen Gasgleichung, dem Zusammenhang zwischen den spezifischen Wärmekapazitäten und der isentropen Zustandsänderung folgt für die Geschwindigkeit  $v_2$ :

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}. \tag{8}$$

Damit lässt sich der Massestrom durch einen pneumatischen Widerstand berechnen. Ist die Querschnittfläche des Ventils bekannt, so berechnet sich der Massenstrom  $\dot{m}$  zu:

$$\dot{m} = \alpha_D \cdot v_2 \cdot A \cdot \rho_2 = \alpha_D \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]} = \alpha_D \cdot A \cdot \psi \cdot \sqrt{2 \cdot p_1 \cdot \rho_1}. \tag{9}$$

Dabei wird  $\psi$  als Ausflussfunktion bezeichnet und  $\alpha_D$  steht für einen Faktor, der die Abweichung eines technischen Widerstands zur idealen Düse berücksichtigt. Die Ausflussfunktion kann nach Murrenhoff [8] in zwei Bereiche aufgeteilt werden. Dafür wird zunächst das kritische Druckverhältnis  $b$  definiert. Für eine ideale Düse und das Medium Luft gilt:

$$b = \frac{p_2}{p_1} = 0.528. \tag{10}$$

Bei Druckverhältnissen zwischen  $b < p_2/p_1 < 1$  kann die Ausflussfunktion durch eine Hyperbel angenähert werden [8], [7]:

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]} \approx \psi_{max} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{p_2 - b}{1 - b} \right)^2}. \tag{11}$$

Wird das kritische Druckverhältnis unterschritten, nimmt die Ausflussfunktion einen konstanten Wert an. In Abb. 5 ist die Ausflussfunktion für eine ideale Düse grafisch dargestellt. Die Berechnung erfolgt in dem in Abb. 4 grün gekennzeichneten Block in Form einer S-Funktion.

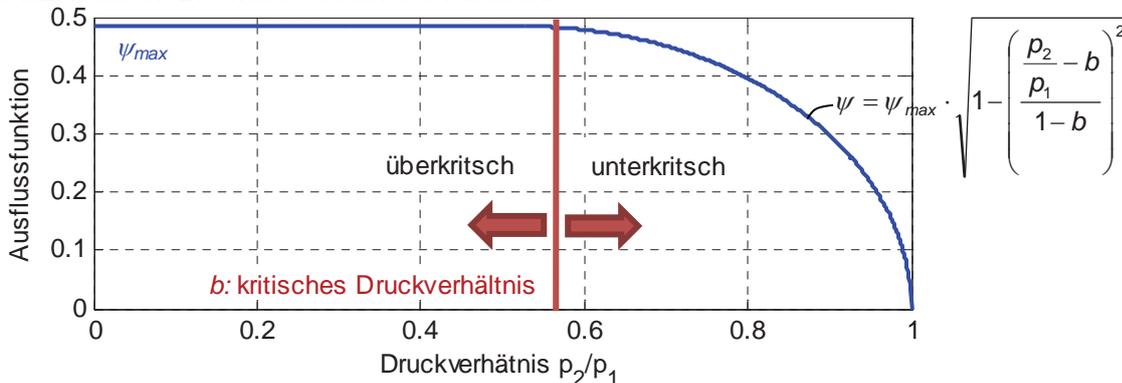


Abb. 5: Ausflussfunktion einer idealen Düse mit Ellipsennäherung nach [8]

### 2.1.3 Steuerung

Die Steuerung des Wischersystems erfolgt durch die drei Schaltventile aus Abb. 3 und einen induktiven Sensor, der zwei spezifische Positionen des Kolbens pro Zylinderseite registriert. Erreicht der Kolben die erste Position wird die Kolbenkammer, die mit dem Niederdruck verbunden ist, geschlossen und die andere zur Umgebung geöffnet. Dadurch wirkt der Zylinder wie eine Luftfeder. Wird die zweite Position überfahren, wird die geschlossene Kammer mit der Versorgungsluft beaufschlagt und der Kolben in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt. Befindet sich der Kolben in der Parkposition, so ist Kammer A mit dem Versorgungsdruck und Kammer B mit der Umgebung verbunden, sodass sich der Kolben am Endanschlag von Kammer B befindet. Jeder Steuerungszyklus besteht aus den in Tab. 1 beschriebenen fünf Phasen. In der fünften Phase wird der Kolben in der Parkposition gehalten bis der nächste Zyklus beginnt. Die unterschiedlichen Wischstufen werden durch Variation dieser Pause realisiert.

Phase	Beschreibung	Kammer A	Kammer B
1	Beschleunigung und Bewegung von B nach A	Niederdruck	Hochdruck
2	Bremsen	geschlossen	Niederdruck
3	Beschleunigung und Bewegung von A nach B	Hochdruck	Niederdruck
4	Bremsen	Niederdruck	geschlossen
5	Halten	Niederdruck	Niederdruck

Tab. 1: Die fünf Phasen eines Steuerungszyklus

Bei der Simulation müssen auch die strömungsbedingten Öffnungs- und Schließzeiten der Ventile beachtet werden. Wobei das Öffnen der Ventile schneller vorstättengeht als das Schließen. Die beschriebenen Zusammenhänge sind in eine S-Funktion implementiert. In Abb. 9 sind die Simulationsergebnisse eines Steuerungszyklus dargestellt.

## 2.2 Mehrkörpermodell des Mechanismus

Zur Simulation des dynamischen Verhaltens des Wischergetriebes wird die MatLab Toolbox SimMechanics verwendet. Als Eingangsgrößen dieses Moduls dienen die Drücke in den beiden Zylinderkammern aus dem oben beschriebenen pneumatischen Modul. Durch Multiplikation mit der Kolbenfläche wird die aus dem Druckunterschied resultierende Kraft auf den Kolben berechnet. Zudem müssen die äußeren Lasten bekannt sein (siehe Kapitel 2.3). Als Ausgangsgrößen liefert die Mehrkörpersimulation den Weg und die Geschwindigkeit des Kolbens.

### 2.2.1 Kinematik

Der untersuchte Wischermechanismus ist als Parallelkurbelgetriebe ausgeführt, was bedeutet, dass die Gliedlängen paarweise gleich lang sind. Das Wischerblatt wird durch die Koppel geführt. Durch die parallele Anordnung des Mechanismus vollzieht das Wischerblatt eine Kreisschiebung und wird damit rein translatorisch bewegt. Eine der beiden Schwingen wird durch den pneumatischen Zylinder über eine Antriebswelle und einen Hebel angetrieben (siehe Abb. 2). Um die translatorische, alternierende Bewegung des pneumatischen Antriebs in eine schwingende Drehbewegung zu wandeln, befindet sich im Kolben eine senkrecht zur Kolbenachse stehende Kulisse. In dieser läuft eine Rolle, die am unteren Ende eines Hebels angebracht ist. Dieser Hebel ist mit der Antriebswelle des Wischmechanismus verbunden.

### 2.2.2 Kolbenreibung

In dem Simulationsmodell des Wischers wird zudem der Gelenkreibungseinfluss berücksichtigt. Hier ist insbesondere der Einfluss der Reibung im pneumatischen Zylinder zu beachten. Die Reibkraft zwischen der Dichtlippe des Kolbens und der Zylinderwand ist laut Eschmann [9] abhängig von der Geschwindigkeit des Kolbens und der Druckdifferenz, die an der Dichtlippe anliegt. Dabei handelt es sich, zumindest was die Geschwindigkeit betrifft, um einen stark nichtlinearen Zusammenhang. In [9] wird ein Verfahren hergeleitet, das es ermöglicht, aus wenigen einfach durchzuführenden Messungen den Verlauf der Kolbenreibung eines pneumatischen Zylinders anzugeben. Dabei wird zwischen Haft- und Gleitreibung unterschieden und die sogenannte Stribeck-Kurve abgebildet. Demnach gilt für  $v \leq v_{\text{grenz}}$  (Haftreibung):

$$F_r(\Delta p, v) = F_0 + \frac{\Delta p}{\Delta p_{\text{mess}}} \cdot \left[ F_{\text{gleit}} - F_0 + \left( \frac{v}{v_{\text{grenz}}} - 1 \right)^2 \cdot (F_{\text{los}} - F_{\text{gleit}}) \right] \quad (12)$$

und für  $v \geq v_{grenz}$  (Gleitreibung):

$$F_r(\Delta p, v) = F_0 + \frac{\Delta p}{\Delta p_{mess}} \cdot \left[ F_{gleit} - F_0 + \left( \frac{\sqrt{v} - \sqrt{v_{grenz}}}{\sqrt{v_{mess}} - \sqrt{v_{grenz}}} \right) \cdot (F_{mess} - F_{gleit}) \right] \quad (13)$$

In Gleichung (12) fällt die Reibkraft parabol förmig beginnend von der Kraft  $F_{los}$  bei Stillstand ( $v = 0$ ) auf eine Kraft von  $F_{gleit} < F_{los}$  bei einer (geringen) Geschwindigkeit  $v_{grenz}$  ab. Ab dieser Geschwindigkeit steigt die Reibkraft gemäß einer Wurzelfunktion an (Gleichung (13)). Dabei ist der Übergang der beiden Gleichungen stetig und beliebig oft differenzierbar (vgl. Abb. 6). Zur Herleitung dieser Beziehung wird auf die entsprechende Literatur verwiesen [9]. Die nötigen Parameter können mit vier Messungen bestimmt werden.

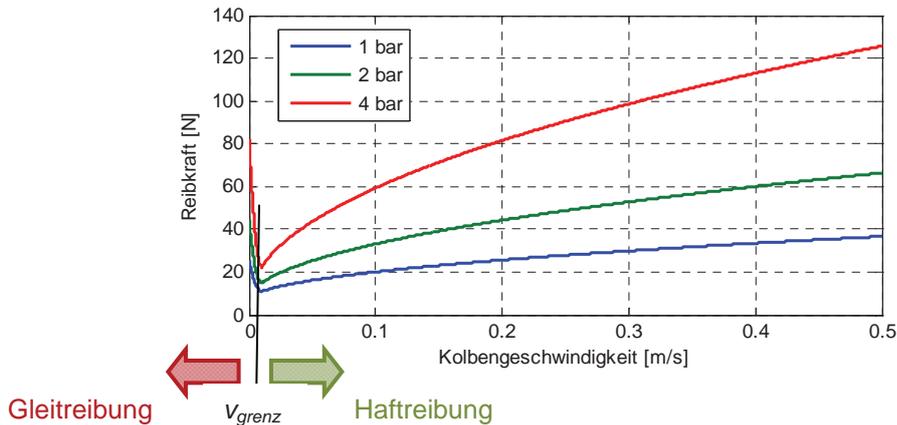


Abb. 6: Reibkraftverlauf in Abhängigkeit der Kolbengeschwindigkeit und der Druckdifferenz

Um die Reibkraft in SimMechanics implementieren zu können, wird zunächst die Geschwindigkeit des Kolbens  $v$  mittels eines sogenannten Joint Sensors ausgelesen. Zudem werden die beiden Drücke  $p_A$  und  $p_B$  aus dem pneumatischen Modellteil verwendet. In einem Simulink-Subsystem wird dann der Betrag der Reibkraft bestimmt (Abb. 7).

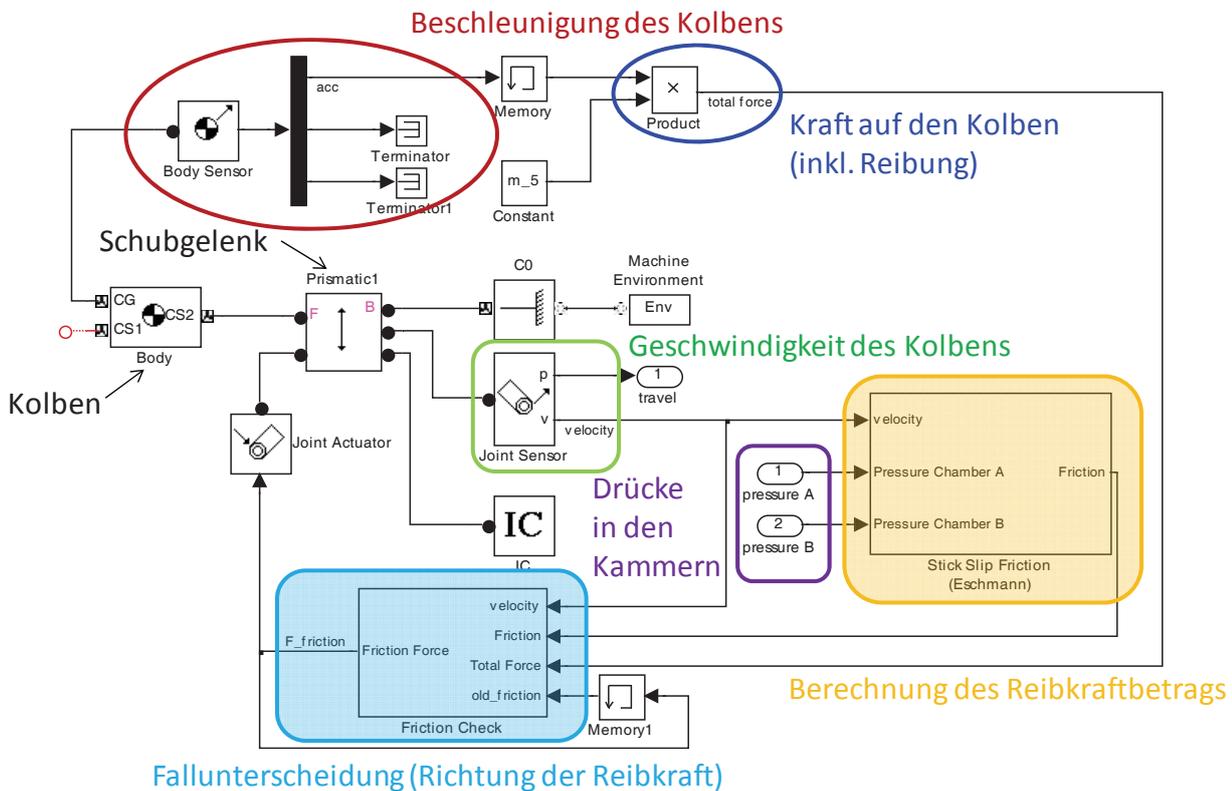


Abb. 7: Umsetzung der Bestimmung der Kolbenreibung in MatLab/Simulink bzw. SimMechanics

Für die Simulation muss neben dem Betrag auch die Richtung der Reibkraft bestimmt werden. Es ist bekannt, dass die Reibkraft  $F_r$  immer der Bewegung entgegen wirkt. Im Stillstand ist sie den restlichen angreifenden Kräften  $F_{res}$  entgegengesetzt und darf zudem nicht größer als die Summe dieser Kräfte sein. Aus diesen Bedingungen folgen fünf unterschiedliche Fälle für die Betrachtung der Richtung der Reibkraft (Tab. 2).

Nr.	Fall	Reibkraft
1	$v > 0$	$F_r < 0$
2	$v < 0$	$F_r > 0$
3	$v = 0$ und $F_{res} > F_r$	$F_r < 0$
4	$v = 0$ und $F_{res} < -F_r$	$F_r > 0$
5	$v = 0$ und $ F_{res}  \leq F_r$	$F_r = -F_{res}$

Tab. 2: Fallunterscheidung für die Richtung der Reibkraft

Um die in Tab. 2 dargestellten Fallunterscheidungen realisieren zu können, sind drei Variablen nötig. Dies sind die Geschwindigkeit des Kolbens  $v$ , die Reibkraft  $F_r$  und die Summe der angreifenden Kräfte  $F_{res}$ . Die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Kolbens können über einen Joint Sensor ausgelesen werden. Mit Hilfe der Beschleunigung kann dann die resultierende Kraft auf den Kolben berechnet werden. Es gilt:

$$\ddot{x} = \frac{F_{res} + F_r}{m_{piston}} \Rightarrow F_{res} = m_{piston} \cdot \ddot{x} - F_r \quad (14)$$

Um ein „algebraic loop“ in dem Simulationsmodell zu verhindern, werden sowohl bei der Beschleunigung als auch bei der Reibkraft die jeweiligen Werte aus dem Rechenschritt zuvor verwendet. Bei hinreichend kleinen Zeitschritten entsteht hierdurch kein wesentlicher Fehler.

Die so ermittelte Reibkraft wird über einen Joint Actuator auf das Schubgelenk des Kolbens gegeben.

## 2.3 Äußere Lasten

Um Aussagen über die Lebensdauer des Wischersystems machen zu können aber auch zur Dimensionierung des pneumatischen Antriebs müssen die äußeren Lasten, die auf den Wischermechanismus wirken, berücksichtigt werden. Dabei sind drei wesentliche Einflüsse zu beachten: die Reibung zwischen Wischerblatt und Scheibe, der Widerstand des verdrängten Wassers sowie die aerodynamischen Einflüsse. Die Gewichtskräfte sind wie die Trägheiten bereits in der Mehrkörpersimulation berücksichtigt.

Für eine erste Näherung wurden zur Bestimmung der äußeren Lasten Messungen verwendet, die an einem fahrenden Zug durchgeführt wurden. Diese Werte können jedoch nicht für Neuentwicklungen verwendet werden, da insbesondere die aerodynamischen Einflüsse stark von der Gestaltung des Wischermechanismus abhängig sind. Deshalb soll für die äußeren Lasten ein separates, in das Gesamtmodell integriertes Modul entwickelt werden. An diesem wird zurzeit am IGM gearbeitet.

Die Reibkraft zwischen Wischerblatt und Frontscheibe ist in erster Linie abhängig von der Anpresskraft des Blatts an die Scheibe. Zudem ist sie, wie die Kolbenreibung, abhängig von der Relativgeschwindigkeit der beiden Reibpartner. Auch hier kann zwischen Gleit- und Haftreibung unterschieden werden.

2.4 Interaktion der einzelnen Simulationsmodule

Das Gesamtmodell des Wischersystems besteht aus den drei oben beschriebenen Modulen. Die einzelnen Module berücksichtigen dabei jeweils unterschiedliche physikalische Zusammenhänge die miteinander gekoppelt sind. Dadurch, dass die Mehrkörpersimulationsumgebung SimMechanics auf Simulink basiert, ist eine Integration von weiteren Einflüssen problemlos umsetzbar. So ist eine ganzheitliche Betrachtung des Systems mit nur einer Simulationsumgebung möglich [10].

Das Gesamtmodell ist in Abb. 8 dargestellt. Die drei Module tauschen nach jedem Zeitschritt verschiedene Werte untereinander aus. Als Eingangsgrößen des Gesamtsystems dienen die Schaltsignale der Ventile. In Anhängigkeit dieser und der momentanen Kolbenstellung können die Drücke in den beiden Kammern berechnet werden. Diese Drücke sowie die äußeren Kräfte erzeugen eine Bewegung des Wischermechanismus. Diese wird mit Hilfe der MKS-Umgebung SimMechanics berechnet. Die so bestimmte Position und Geschwindigkeit des Kolbens wird wiederum für die Berechnung der Drücke im Zylinder und der Bestimmung der äußeren Kräfte verwendet.

Da das pneumatische Modell zum Teil mit anderen Einheiten rechnet als die MKS, müssen einige der unter den Modulen ausgetauschten Werte zuvor noch umgerechnet werden.

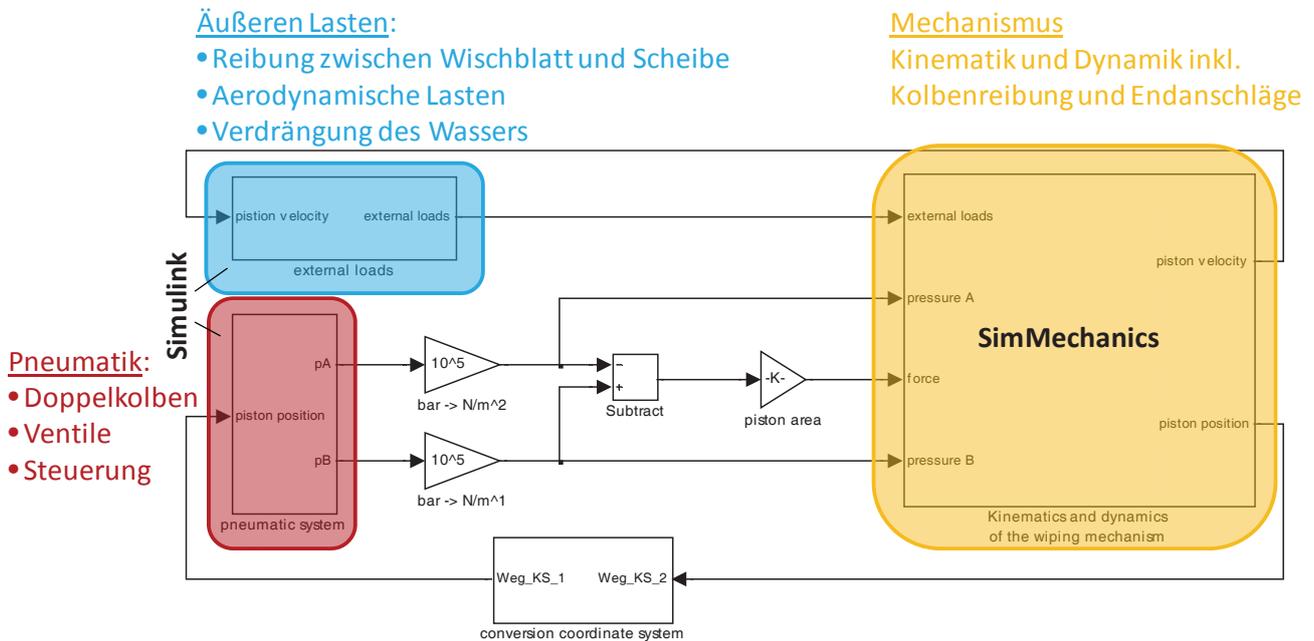


Abb. 8: Gesamtmodell der Wischanlage mit den drei Modulen

### 3 Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel sollen kurz einige Simulationsergebnisse präsentiert werden. Mit dem oben beschriebenen Modell lassen sich eine Vielzahl von Größen bestimmen. So können sowohl thermodynamische Zustandsgrößen des pneumatischen Systems bestimmt werden als auch dynamische Größen des Wischermechanismus. Mit Hilfe dieser Größen lässt sich das Gesamtsystem u.a. hinsichtlich der Dauerhaltbarkeit optimieren. Abb. 9 zeigt exemplarisch den Verlauf des Drucks und der Temperatur in den beiden Kammern sowie die Bewegung des Kolbens und die zugehörigen Schaltsignale der Ventile für einen Zyklus.

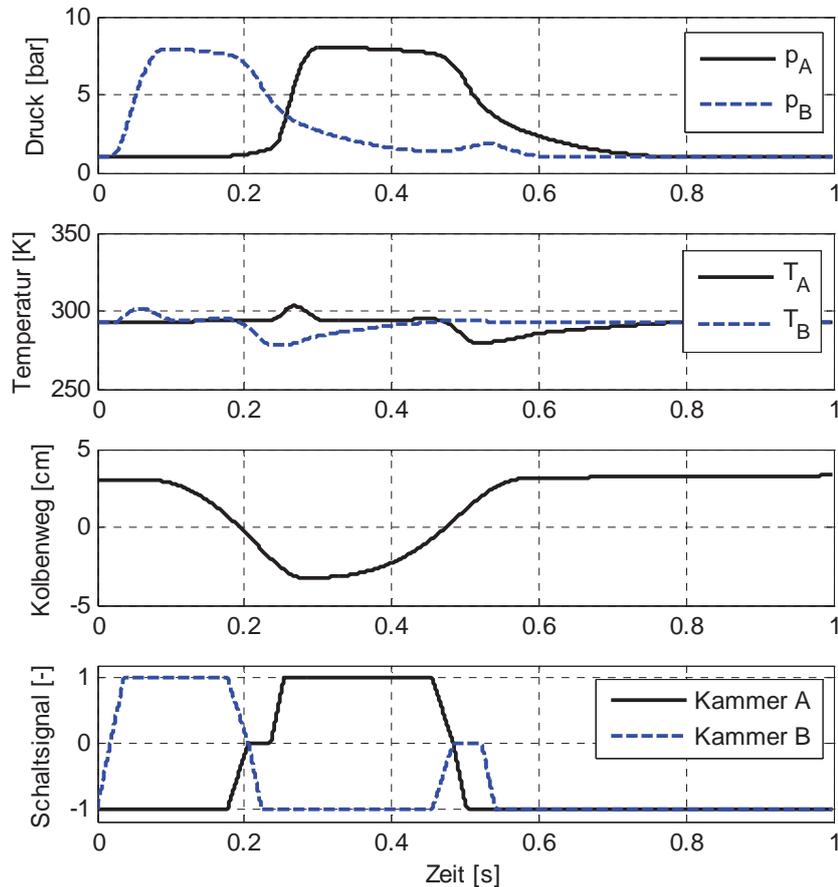


Abb. 9: Ergebnisse der Simulation für einen Steuerungszyklus

In dem nächsten Diagramm ist die Gestellkraft im Gelenk  $A_0$  in x-Richtung dargestellt (Abb. 10).  $A_0$  ist das Drehgelenk der angetriebenen Schwinge. Diese Kraft wird in dem SimMechanics Modul bestimmt. Auch alle weiteren Lagerkräfte können auf diese Art dargestellt werden.

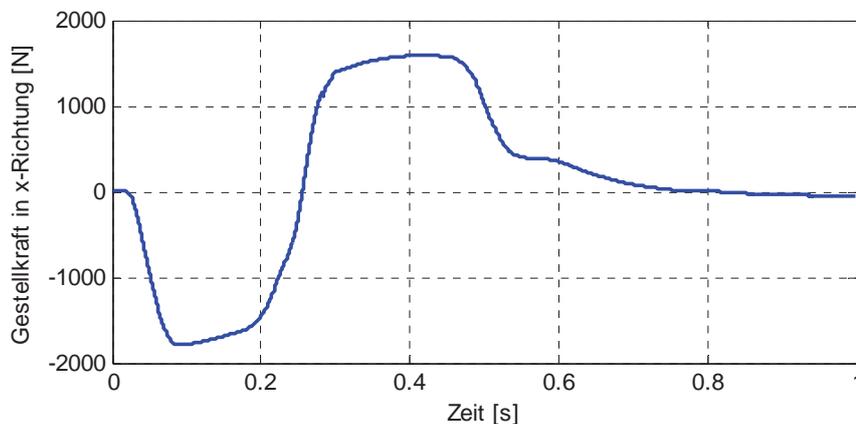


Abb. 10: Darstellung der x-Komponente der Gestellkraft im Gelenk  $A_0$

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem präsentierten Simulationsmodell ist eine ganzheitliche Betrachtung des pneumatischen Wischersystems möglich. Es können sowohl Aussagen über die Lebensdauer wie auch über das Optimierungspotential gemacht werden. Dabei wurde für alle Simulationsmodule (pneumatisches System mit Steuerung, Kinematik und Dynamik des Wischermechanismus und externe Kräfte) das gleiche Softwarepaket verwendet. Zudem ist es möglich mit derselben Software sowohl die Simulationsergebnisse als auch die Messdaten weiter zu verarbeiten. Dadurch ist die vorgestellte Vorgehensweise besonders für kleine und mittlere Unternehmen geeignet, da diese häufig nicht über mehrere teurere Expertensoftwareprodukte für die unterschiedlichen Bereiche der Ingenieurwissenschaften verfügen. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Individualität des erzeugten Modells. Grundvoraussetzung für eine solche Vorgehensweise ist jedoch ein umfangreiches technisches Wissen in den verschiedenen Bereichen des Maschinenbaus.

Einige der für das vorgestellte Simulationsmodell nötigen Parameter müssen noch durch entsprechende Messungen bestimmt werden. Im Moment werden für diese Parameter noch Abschätzungen verwendet. Das vollständig parametrisierte Modell soll dann mit Prüfstandversuchen validiert werden.

Zudem wird zurzeit am IGM an einem Modul zur Simulation der äußeren Lasten, insbesondere der aerodynamischer Einflüsse, gearbeitet.

#### 5 Referenzen

- [1] Meyer, G.: "Hochschulkooperation im Rahmen des Kompetenzmanagements im Engineering bei Siemens Mobility Public Transport", Tagungsband des 8. Kolloquium Getriebetechnik, Aachen, 2009
- [2] Siemens Homepage:  
[http://w1.siemens.com/press/de/pressebilder/?press=/de/pp\\_ts/2007/sots200705\\_07\\_\(velaro\)\\_1451513.htm](http://w1.siemens.com/press/de/pressebilder/?press=/de/pp_ts/2007/sots200705_07_(velaro)_1451513.htm), besucht Di. 08.12.2009 15:49 MEZ
- [3] Kradepohl, U.: "Simulation of Windscreen Wiper-Systems with Pneumatic Actuation for High-Speed Trains", unveröffentlichte Studienarbeit, RWTH Aachen, 2009
- [4] N.N.: "Simulink® 7 Getting Started Guide", Matlab/Simulink Dokumentation, Natick, 2009
- [5] N.N.: "SimMechanics™ Getting Started Guide", Matlab/Simulink Dokumentation, Natick, 2009
- [6] Lucas, K.: "Thermodynamik", Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2004
- [7] Ohligschläger, O.: "Pneumatische Zylindertriebe – thermodynamische Grundlagen und digitale Simulation", Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 1990
- [8] Murrenhoff, H.: "Grundlagen der Fluidtechnik", Teil 2: Pneumatik, Shaker Verlag, Aachen, 2006
- [9] Eschmann, R.: "Modellbildung und Simulation pneumatischer Zylinderantriebe", Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 1994
- [10] Corves, B.: "Dynamisches Verhalten von ungleichmäßig übersetzenden Getrieben mit pneumatischen Antrieb: Messung und Simulation", Aachener Fluidtechnisches Kolloquium, Aachen, 1996

# Numerische Simulation der Bypassströmung im Abhitzedampferzeuger einer Gasturbine

Jan Hesse (CFX Berlin Software GmbH)

Im Abhitzedampferzeuger wird die thermische Energie des Turbinenabgases eines Kraftwerks über Wärmetauscherrohre an eine Wasserströmung abgegeben. Der durch die Erwärmung entstehende Wasserdampf wird in einer nachgelagerten Dampfturbine in elektrische Energie umgewandelt. Ausgangspunkt sind die Abgase aus der Gasturbine, die über einen Diffusor in ein mehrere Meter hohes Gebäude gelangen, in dem die Wärmetauscherrohre vertikal durch das Gebäude verlaufen. Mehrere nebeneinander liegende Rohre bilden ein Wärmetauscherpaket (oder Rohrpaket). Aus bautechnischen Gründen gibt es zwischen den seitlichen Wänden und dem Wärmetauscherpaket einen Spalt, durch den ein Teil des Abgases ungenutzt vorbeiströmen kann. Um dies zu verhindern, gibt es im Spalt Leitbleche, die die Bypassströmung verringern sollen. Da die Strömungseigenschaften im Bypass nur schwer zu messen sind, wurde eine numerische Strömungssimulation mit ANSYS CFX durchgeführt.

Die wesentliche Herausforderung lag in der Modellierung des Wärmetauschers, dessen komplexer geometrischer Aufbau eine Vereinfachung mittels poröser Medien notwendig macht. Durch diese Methode wird der Aufwand für die Vernetzung und die Berechnung minimiert. Trotz dieser Vereinfachungen werden die wesentlichen Effekte der Strömung berücksichtigt. Anhand der gewonnenen Ergebnisse können Modifikationen vorgenommen werden, um den Wirkungsgrad der Anlage zu erhöhen.

## 1 Geometrie des Abhitzedampferzeugers

Der Abhitzedampferzeuger besitzt im Wesentlichen zwei Strömungswege. Den ersten Strömungsweg stellt die Abgasströmung dar, deren Energie zurück gewonnen werden soll. Der zweite Strömungsweg ist die Wasserströmung, die die Energie aus dem Abgas aufnimmt. In der hier durchgeführten Simulation wird nur die Abgasströmung betrachtet und der Einfluss der Wasserströmung vereinfacht berücksichtigt.

In Abb. 1 ist die Geometrie des Gebäudes inklusive den Wärmetauscherrohren dargestellt. Das heiße Abgas aus der Turbine strömt über die Eintrittsebene in das dargestellte Volumen (Gebäude des Abhitzedampferzeugers) ein. Das Abgas wird über zwei Diffusoren verzögert und umgelenkt, damit es gleichmäßig in das erste Wärmetauschermodul eintritt. Dieses Wärmetauschermodul dient zusätzlich der weiteren Vergleichmäßigung der Strömung, um in den folgenden Modulen eine noch homogenere Anströmung zu erreichen. Nach Durchströmen aller Wärmetauschermodule gelangt das jetzt kalte Abgas in einen Kamin, durchströmt einen Schalldämpfer und wird an die Umgebungsluft abgegeben.

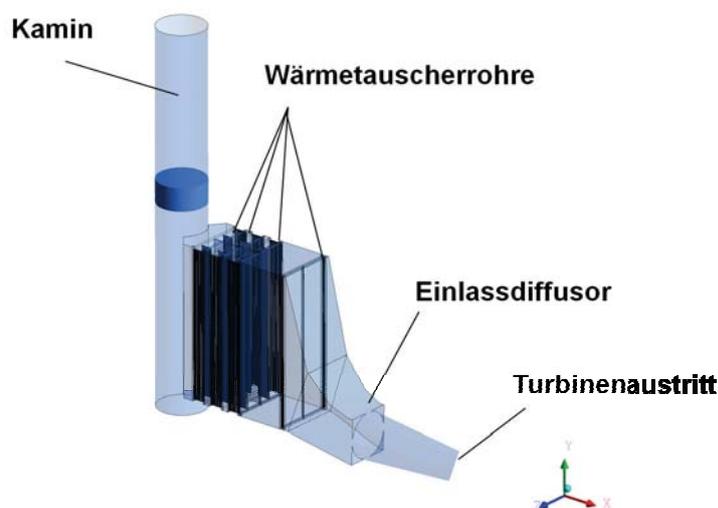


Abb. 1: Gebäude des Abhitzedampferzeugers vom Eintritt der heißen Abgase am Turbinenausstritt bis zum Auslass der abgekühlten Abgase durch den Kamin.

Jedes der verwendeten Wärmetauschermodule besteht aus vielen hundert einzelnen Rohren, die von oben nach unten oder umgekehrt von Wasser durchströmt werden. An den Wärmetauscherrohren sind abgasseitig Rippen befestigt, um den Wärmeübergang vom Abgas an das Wasser zu vergrößern. Über die Gesamthöhe des Gebäudes ergeben sich dabei mehrere tausend Rippen pro Rohr. Damit wird die Komplexität des Strömungsraumes innerhalb der Wärmetauschermodule deutlich. Aus diesem Grund muss der Bereich der Wärmetauschermodule geometrisch vereinfacht verwendet werden.

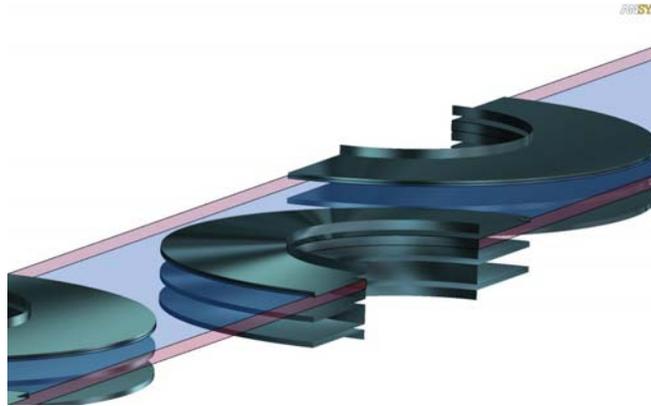


Abb. 2: Ausschnitt der Geometrie der Wärmetauscherrohre mit einigen Wärmetauscherrippen

Aus bautechnischen Gründen gibt es zwischen den Wärmetauschermodulen und den seitlichen Wänden ein Spalt. Hier kann das warme Abgas ungehindert an den Modulen vorbeiströmen. Um dies zu minimieren werden Leitbleche angebracht, die die Strömung in das Modul zurücklenken sollen. Durch diese Methode wird der Wirkungsgrad des Abhitzedampferzeugers verbessert. Der Großteil der Energie des Abgases wird damit an das Wasser abgegeben.

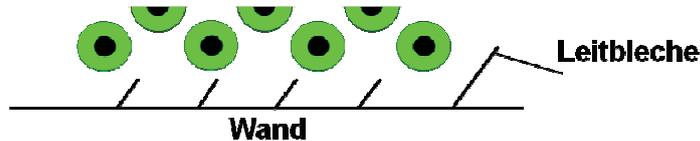


Abb. 3: Prinzipskizze der Leitbleche und Wärmetauscherrohre an der Wand; die Leitbleche sollen den Bypass verringern.

## 2 Modellierung des Wärmetauschers über poröse Medien

Zur vereinfachten Berücksichtigung der komplexen Geometrie in der Simulation werden poröse Medien verwendet. Ein poröses Medium umfasst ein kontinuierliches Strömungsvolumen, in dem Quellen- oder Senkenterme für die jeweiligen Gleichungen des Strömungslösers definiert werden können (z.B. für den Impuls, die Energie oder die Turbulenz).

Da in der Simulation die seitliche Umströmung der Module untersucht werden soll, wird das Strömungsvolumen insbesondere im Seitenwandbereich gesondert aufgeteilt. Durch die Porosität 1 (siehe Abb. 4) wird der überwiegende Teil eines Wärmetauschermoduls beschrieben. Die Rohre werden in diesem Bereich geometrisch vollständig vernachlässigt (homogener Quader für jedes Wärmetauschermodul). Die Porosität 2 beschreibt das Volumen der Wärmetauscherrippen (1,5 Rohrreihen), ohne die Rippen geometrisch zu berücksichtigen. Durch diese Aufteilung kann die Umströmung der Rohre unter Einfluss der seitlich angebrachten Leitbleche genauer berücksichtigt werden. Das Rohrinne ist kein Teil des Strömungsvolumens.

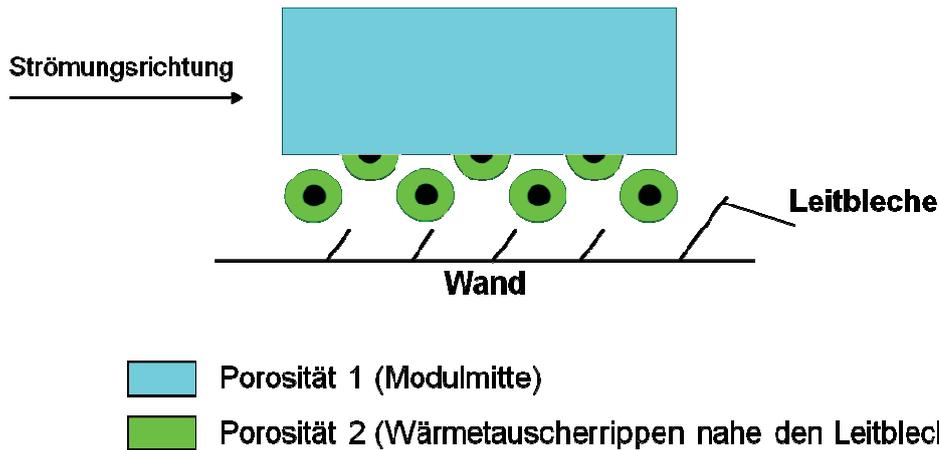


Abb. 4: Prinzipskizze der Modellierung des Wärmetauschermoduls als poröses Medium: Im inneren Bereich werden die Rohre durch eine Porosität 1 komplett modelliert, im äußeren Bereich werden die Kühlrippen von 1,5 Rohren durch eine Porosität 2 modelliert.

Zur Definition der Quell- und Senkenterme im porösen Medium müssen Koeffizienten festgelegt werden, die das reale Verhalten der Anlage abbilden. Die Wärmetauscher erzeugen einen Druckverlust in der Abgasströmung, der die Verteilung der Strömung über die Module quer zur Strömungsrichtung beeinflusst. Der Druckverlust über ein Modul ist aus Messungen oder Auslegetools bekannt. Damit lässt sich der Koeffizient für die Porosität 1 leicht bestimmen. Unter Annahme eines überwiegend quadratischen Zusammenhangs zwischen der Abgaseintrittsgeschwindigkeit in das Modul und dem Druckverlust kann folgende Formel verwendet werden.

$$K_{Loss} = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} u^2 \cdot l}$$

$\Delta p$  = Druckverlust über Modulsegment

$\rho$  = lokale Dichte

$u$  = Lufteintrittsgeschwindigkeit in das Modul

$l$  = Länge des Modulsegmentes in Strömungsrichtung

$K_{Loss}$  = Verlustkoeffizient in ANSYS CFX

Abb. 5: Bestimmung des Verlustbeiwerts im porösen Medium

Schwieriger ist die Bestimmung der Koeffizienten für die Porosität 2. Hierfür ist für jedes Modul jeweils eine Vor-simulation notwendig. Es wird eine 2D-Simulation durchgeführt, in der die Anordnung und die geometrischen Eigenschaften der Rohre und die Symmetrie berücksichtigt werden. Der Koeffizient der Porosität 2 wird so lange angepasst, bis der Gesamtdruckverlust über ein komplettes Modul (mehrere Rohre) den Vorgaben entspricht. Mit dieser Vorgehensweise erhält man einen zur Porosität 1 äquivalenten Verlustkoeffizienten.

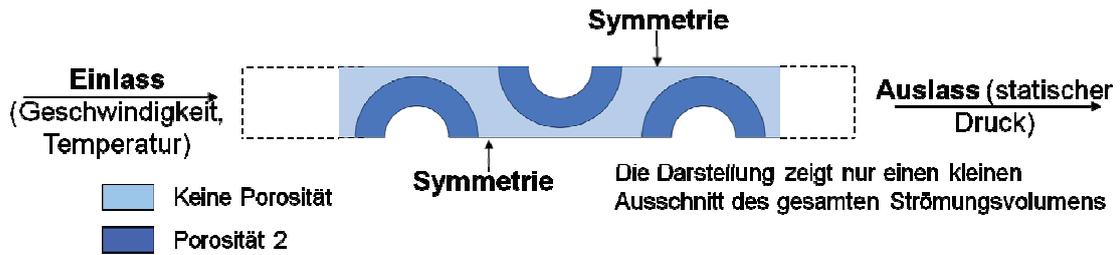


Abb. 6: Prinzipialskizze der Vorsimulation zur Bestimmung der Porosität 2

Die Randbedingungen (Geschwindigkeit, Temperatur) werden entsprechend der lokalen Strömungszustände in der Anlage verwendet.

Der Wärmetauscher entzieht dem Abgas Energie und gibt diese an das Wasser ab. Aus der bestehenden Anlage sind die Energiemengen für jedes Modul bekannt und werden dementsprechend als homogene Energiesenke in den porösen Medien vorgegeben. Da der Wärmeübergang entlang der Rohre in der Realität aufgrund des Anstiegs der Wassertemperatur abnimmt, werden die Module über die Höhe in drei Segmente aufgeteilt (Vereinfachung) und die Energiesenke dementsprechend gestaffelt.

### 3 Vernetzung des Strömungsvolumens

Das Strömungsvolumen wird mit ANSYS ICEM CFD vernetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Größenordnung zwischen dem Anlagengebäude und den einzelnen Rohren in den Wärmetauschern wird das Strömungsvolumen in Bereiche unterschiedlicher Netzfeinheit aufgeteilt. Dadurch wird der Berechnungsaufwand minimiert. Für die Vernetzung werden überwiegend Hexaeder als auch Tetraeder und Prismen verwendet. Aufgrund der hohen Anzahl von Rohren, die im Seitenbereich berücksichtigt werden, besitzt das Netz neben den anderen Elementtypen etwa 19 Mio. Hexaederelemente.

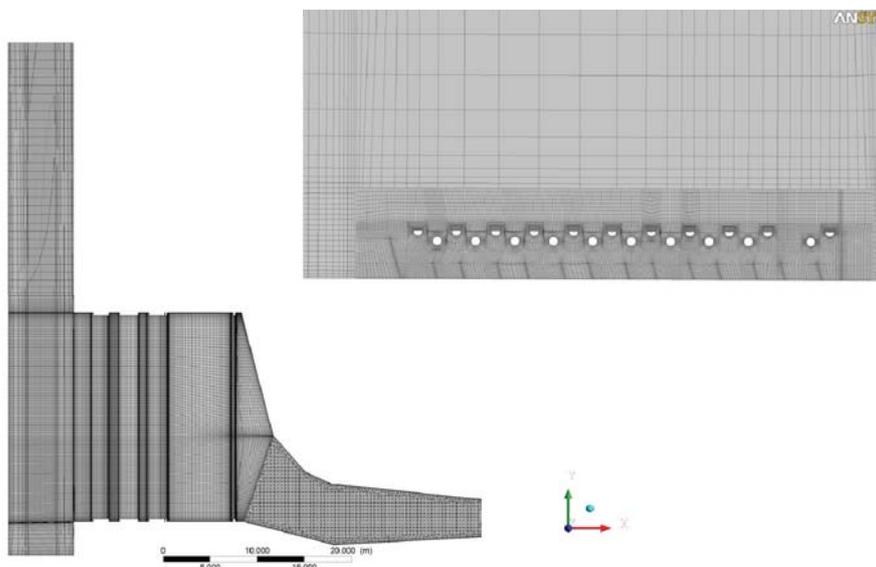


Abb. 7: Verwendetes Netz im Vertikalschnitt (links) und im Horizontalschnitt im Randbereich (rechts); der Einlassbereich wurde mit Tetraedern und Prismen vernetzt, der übrige Bereich mit etwa 19 Millionen Hexaedern.

#### 4 Durchführung der Simulation

Am Einlassquerschnitt des Strömungsvolumens werden die Geschwindigkeitsverteilung (drallbehaftet) und die Temperaturverteilung vorgegeben. Am Auslass wird der statische Absolutdruck von 1 bar festgelegt. Die Wände werden adiabatisch angenommen. Als Fluid wird ein Mehrkomponentenfluid verschiedener idealer Gase ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ , etc.) definiert, deren Massenanteile konstant sind.

Zur Berücksichtigung der Turbulenz wird ein Zweigleichungs-Turbulenzmodell verwendet ( $k-\varepsilon$ ). Der Energietransport wird über das Total Energy-Modell beschrieben. Aufgrund der hohen Temperaturunterschiede in der Anlage wird der Auftrieb mit berücksichtigt, wobei der Einfluss im Wesentlichen in Totwassergebieten an Bedeutung gewinnt.

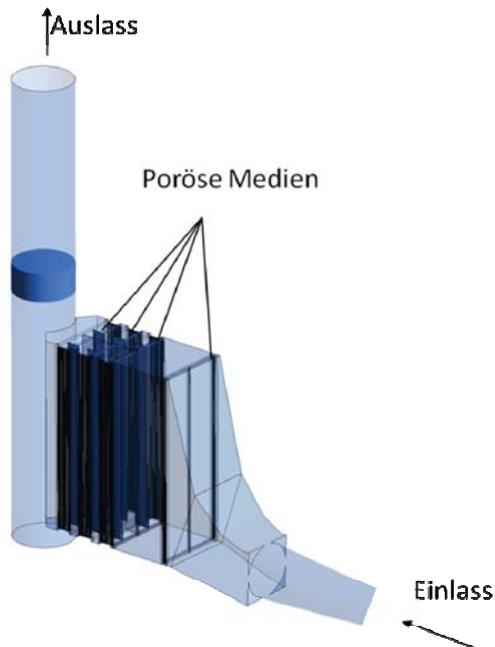


Abb. 8: Randbedingungen der Strömungssimulation: Am Einlass werden Geschwindigkeit und Temperatur, am Auslass der Druck vorgegeben, alle übrigen Ränder sind adiabatische Wände. Die porösen Medien modellieren Impuls- und Wärmeabgabe an die Wärmetauscherrohre.

#### 5 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde der Schwerpunkt auf die Bypassströmung gelegt. Die Bypassströmung ist der wesentliche Faktor für den Wirkungsgrad der Anlage. In Abb. 9 ist die Änderung der Abgastemperatur über die verschiedenen Wärmetauschermodule dargestellt. Das heiße Abgas (rot) strömt von links in das erste Wärmetauschermodul ein und gibt Energie ab. Das leicht kältere Abgas (orange) trifft dann auf das nächste Modul. Die Bypassströmung ist hier sehr gut zu erkennen. Das Abgas strömt seitlich an den Modulen vorbei ohne Energie abzugeben. Hinter dem zweiten Modul erfolgt ein leichtes Wiedereinmischen in die Hauptströmung, das durch die verwendeten Leitbleche erreicht wird.

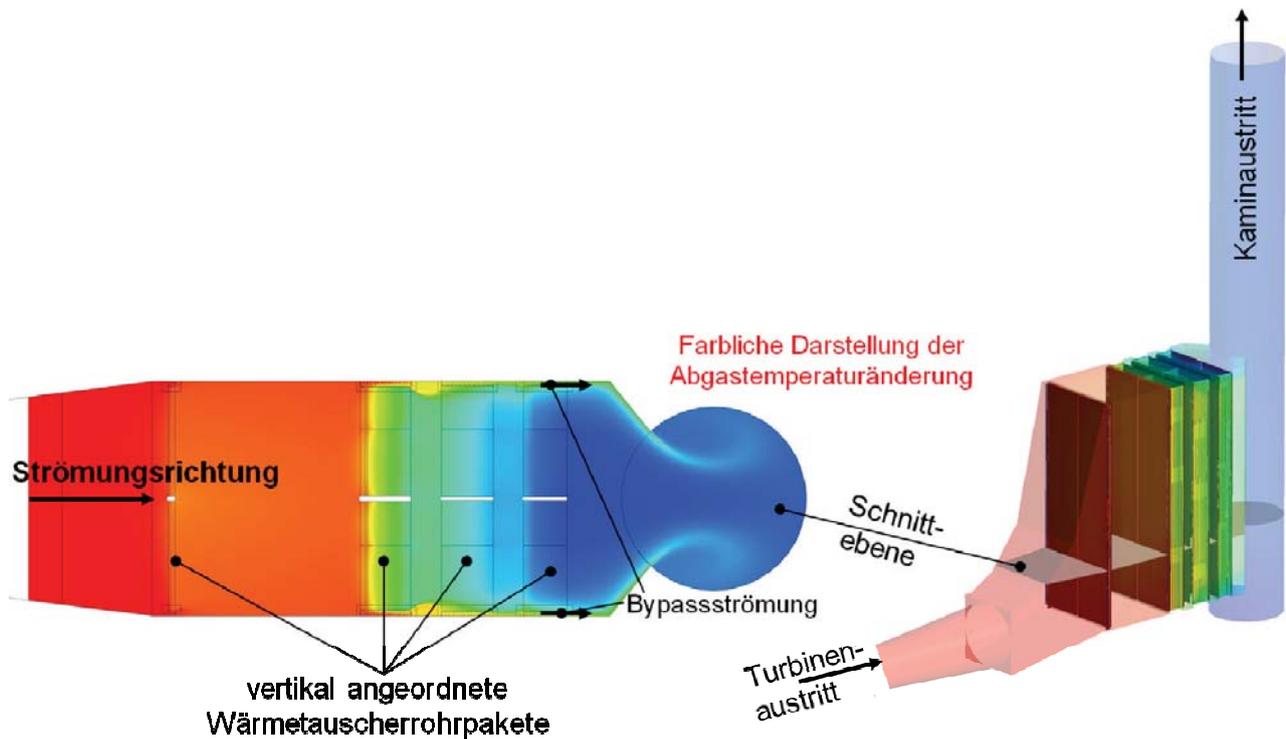


Abb. 9: Temperaturverteilung im Abhitzedampferzeuger; durch die Wärmeabgabe an die Wärmetauscherrohre sinkt die Geschwindigkeit in Strömungsrichtung ab, wobei deutlich die geringere Wärmeabgabe im Wandbereich durch die Bypassströmung zu erkennen ist.

In Abb. 10 ist die Geschwindigkeit der Strömung im Bypass dargestellt. Aufgrund des geringen Strömungswiderstandes im Bypass strömt das Abgas mit einer höheren Geschwindigkeit am Modul vorbei. Die Strömungsgeschwindigkeit im Bypass nimmt durch das Einmischen des Abgases aus dem Rohrpaket über die Länge des Bypasses zu. Anhand des Bypassmassenstroms und der Temperatur lässt sich der Wirkungsgrad der Anlage bestimmen.

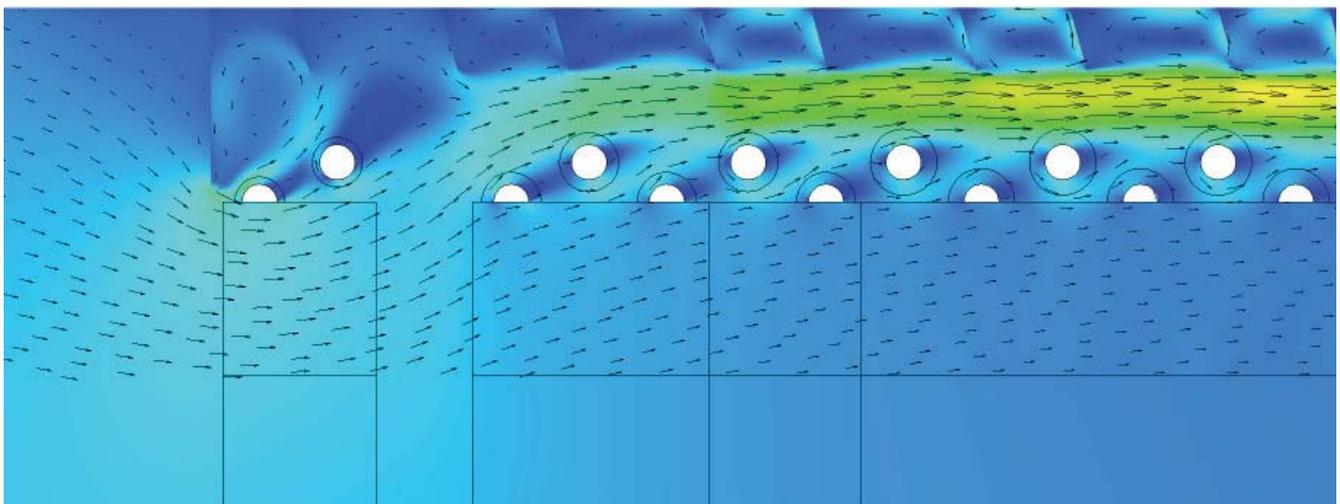


Abb. 10: Geschwindigkeit im Bypass zwischen Rohrpaket und Leitbleche

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projekts wurde die Strömung in einem Abhitzedampferzeuger numerisch untersucht. Im Wesentlichen ging es um die resultierende Strömung im Bypass zwischen den Wärmetauschermodulen und der Seitenwand des Gebäudes. Die Bypassströmung ist ein wichtiger Faktor für den Wirkungsgrad des Abhitzedampferzeugers. Aufgrund der geometrischen Komplexität der Wärmetauschermodule wurden Vereinfachungen unter Verwendung von porösen Medien vorgenommen. Auf Basis vorhandener Wärmetauschereigenschaften aus Messungen oder Auslegetools wurden Vorsimulationen durchgeführt, um die im porösen Medium notwendigen Koeffizienten zu bestimmen. Die Hauptsimulation berücksichtigt die Gebäudegeometrie des Abhitzedampferzeugers inklusive des Einlassdiffusors und des Kamins.

Die Simulation hat gezeigt, welchen Einfluss die Leitbleche auf die Bypassströmung haben und welche Energieverluste aufgrund der Bypassströmung entstehen. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Bypass liegen im Vergleich zu vorhandenen Messwerten in einer realistischen Größenordnung. Der Einfluss der verwendeten porösen Medien auf die Strömung führt zu einem realistischen Strömungsbild. In nachfolgenden Berechnungen sollten ggf. zusätzliche Rohrreihen verwendet werden, um die Wechselwirkung zwischen den Rohrpaketen und der Bypassströmung genauer berücksichtigen zu können.

Basierend auf dieser Simulation können Modifikationen an den Leitblechen vorgenommen werden, um die Bypassströmung zu minimieren und damit den Wirkungsgrad der Anlage zu erhöhen. Zur weiteren Optimierung des Anlagenwirkungsgrades sollte die Abgaszuführung aus dem Kernstrom (zwischen den Wärmetauscherrohren) verhindert oder der Abstand zwischen den Leitblechen und den Rohren minimiert werden.

Bitte per Post oder Fax senden:

Tel.: +49 (0) 80 51 - 96 59 3 49

Fax: +49 (0) 80 51 - 96 74 3 37

e-mail: [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de)

Adresse für Fensterkuvert



**NAFEMS GmbH**  
**Osterham 23**

**D-83233 Bernau am Chiemsee**  
**Germany**

## Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (2/2010)

Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft      | <input type="checkbox"/> NAFEMS World Congress 2011        |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“ | <input type="checkbox"/> Registered Analyst Zertifizierung |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare            | <input type="checkbox"/> EU-Projekte                       |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse      | <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: \_\_\_\_\_

Bitte per Post oder Fax senden:

Tel.: +49 (0) 80 51 - 96 59 3 49

Fax: +49 (0) 80 51 - 96 74 3 37

e-mail: [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de)

Adresse für Fensterkuvert



**NAFEMS GmbH**  
**Osterham 23**

**D-83233 Bernau am Chiemsee**  
**Germany**

## Rückantwort: NAFEMS Magazin, Ausgabe (2/2010)

Bitte senden Sie mir nähere Informationen zu folgenden Themen:

- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Mitgliedschaft      | <input type="checkbox"/> NAFEMS World Congress 2011        |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Magazin „Benchmark“ | <input type="checkbox"/> Registered Analyst Zertifizierung |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Seminare            | <input type="checkbox"/> EU-Projekte                       |
| <input type="checkbox"/> NAFEMS Trainingskurse      | <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: \_\_\_\_\_

# NAFEMS

---

# MAGAZIN

NAFEMS Deutschland, Österreich, Schweiz GmbH  
Osterham 23  
D-83233 Bernau am Chiemsee, Germany

Tel. +49 (0) 80 51 – 96 59 3 49  
Fax +49 (0) 80 51 – 96 74 3 37  
e-mail: [info@nafems.de](mailto:info@nafems.de)

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