

# Möglichkeiten und Grenzen der integrativen Simulation von kurz- und langglasfaserverstärkten Kunststoffen

P. Reithofer, A. Fertschej, B. Jilka  
4a engineering GmbH



## Herausforderungen und Methoden bei der Simulation von Faserverbundwerkstoffen

26. Februar 2015, Fellbach

4a engineering GmbH  
Industriepark 1  
A-8772 Traboch  
reithofer@4a.co.at  
++43 (0) 664 80106 601

- Einleitung – Integrative Simulation
- Prozesssimulation – Faserorientierung
- 4a fibermap – Mapping
- Fallbeispiel Sohlenhalter – Verzug
- Fallbeispiel Heckklappe - Steifigkeit / Eigenfrequenz
- Fallbeispiel Tankklappe - Steifigkeit / Festigkeit
- Fallbeispiel Crash – Nutini Box - Dynamisches Werkstoffverhalten

# 4a technology - group

4a technology-group: founded in 2002

Location: Traboch, Austria

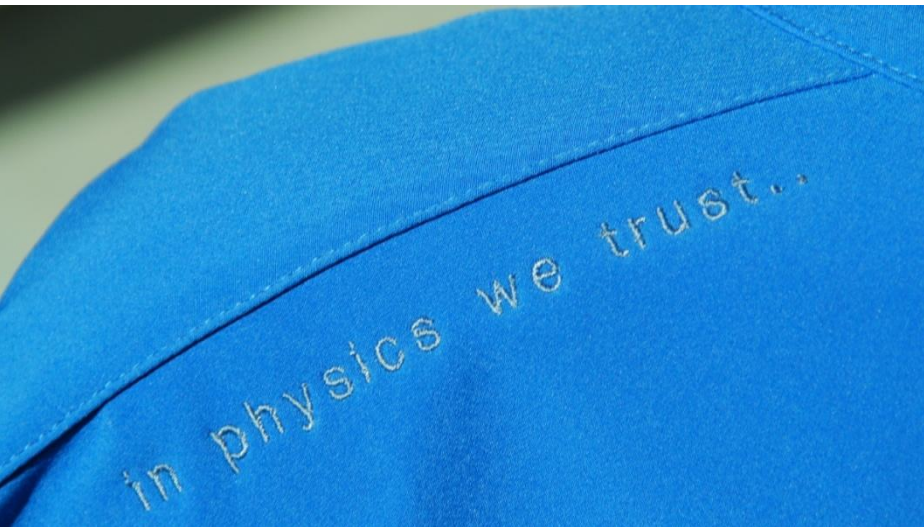
Number of employees > 70

Field of operation: global

Certificates: ISO 9001; ISO 13485

more than 1000 projects

more than 200 customers





## Group of Companies

4a Group  
Philosophy  
People  
Products  
Press  
Contact  
Directions

>>> **JOBS**

Company details  
Terms & Conditions

DE|EN



IN PHYSICS WE TRUST

## Business units



Engineering  
and simulation  
for plastic  
products  
and components

*to unit webpage*



Multi-layer  
composites and  
sandwich  
materials for  
cost-efficient

*to unit webpage*



Testing  
facilities  
generating  
material data  
suitable for  
the dynamic  
simulation of  
plastics

*to unit webpage*



Dummies and  
testing  
facilities for  
active vehicle  
safety

*to unit webpage*



Innovative  
plastic  
products and  
technologies  
for the  
analysis  
of blood

*to unit webpage*



- polymer and materials science
- numerical simulation methods
- fiber reinforced plastics and composites
- method and software development
- case studies product development:



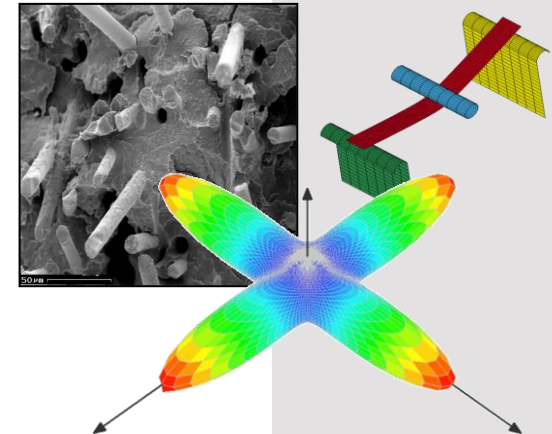
Alpine touring ski binding



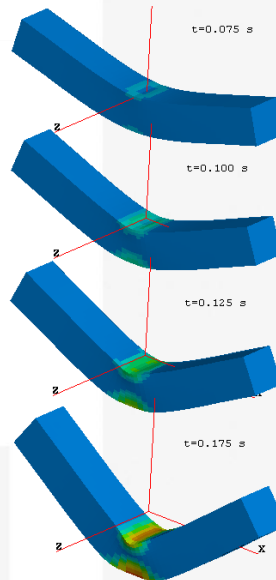
LH<sub>2</sub> – tank mounting



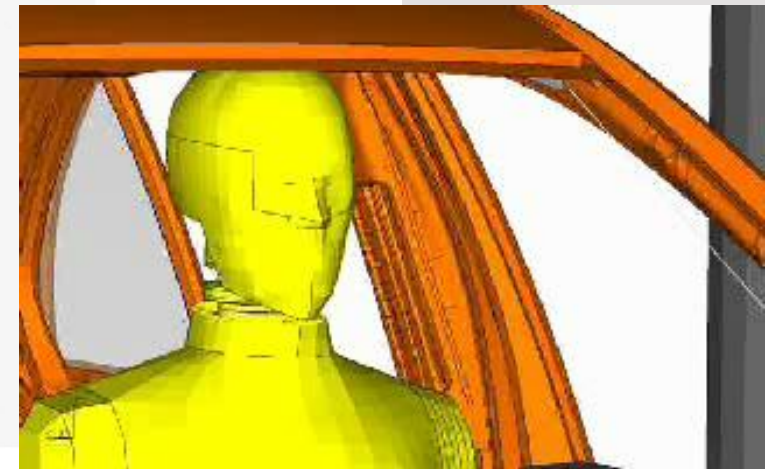
RTM – CFK – strut bar



- efficient high-dynamic testing
- crash-behaviour of plastics
- material data for simulation



source: <http://gm-volt.com/>



source: Dynamore

**4a impetus - intelligent testing systems  
powered by 4a engineering GmbH**

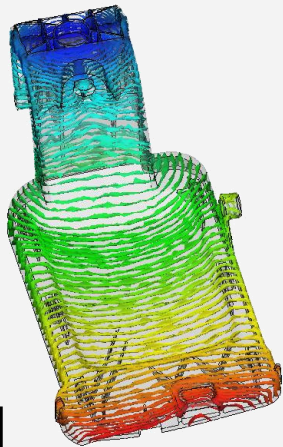


[2012Gramling]

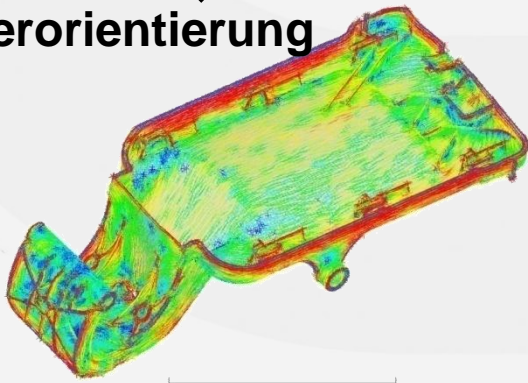
### Prozesssimulation

#### Füllung

Fill time  
= 1.736[s]



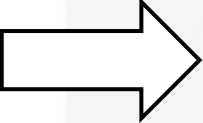
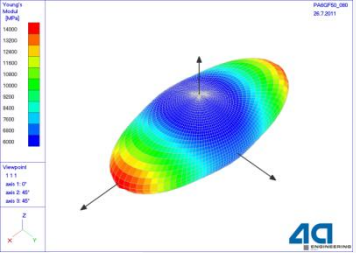
#### Faserorientierung



Autodesk

Scale (100 mm)

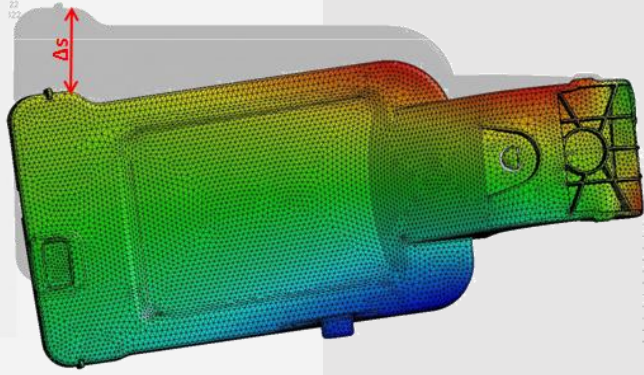
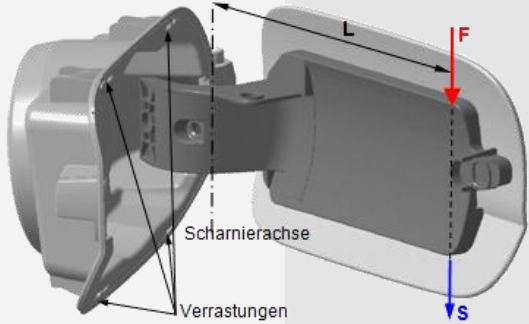
### Mapping



Übertragung der  
lokalen  
Anisotropien

### Struktursimulation

#### Biegung





### Prozesssimulation

#### Idealisierung

- 2 ½ D Mittelfläche
- 2 ½ D Oberfläche
- 3D Volumen

#### Strömung

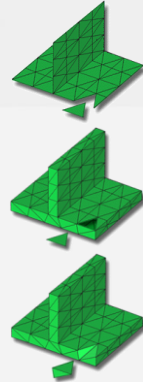
- Viskosität
- pvT

#### Faser

- Faserlänge
- Faserdurchmesser

#### Faserorientierungsmodell

- Closure Approximations  $OT^2 \rightarrow OT^4$
- Faserinteraktion (RSC, Ci, ARD, ..)
- Faserbruch



### Mapping

#### Mittelungsverfahren

- Unterschiedliche Idealisierung
- Anzahl der Stützstellen

#### Transformationen

- Koordinatensysteme
- Ergebnisse (Vektor, Tensor)

#### Schnittstellen

- Unterschiedlichste Softwarelösungen sowohl **prozess-** als auch **strukturseitig**

....

### Struktursimulation

#### Idealisierung

- Shell
- Solid
- Netzfeinheit, Integrationspunkte

#### Anwendung

- Verzug
- Bauteil (Steifigkeit, Festigkeit)
- Crash (Energie, Versagen)

#### Materialmodell

- SOLVER, USERMATERIALS
- Geschwindigkeit, Feuchte, Temp.

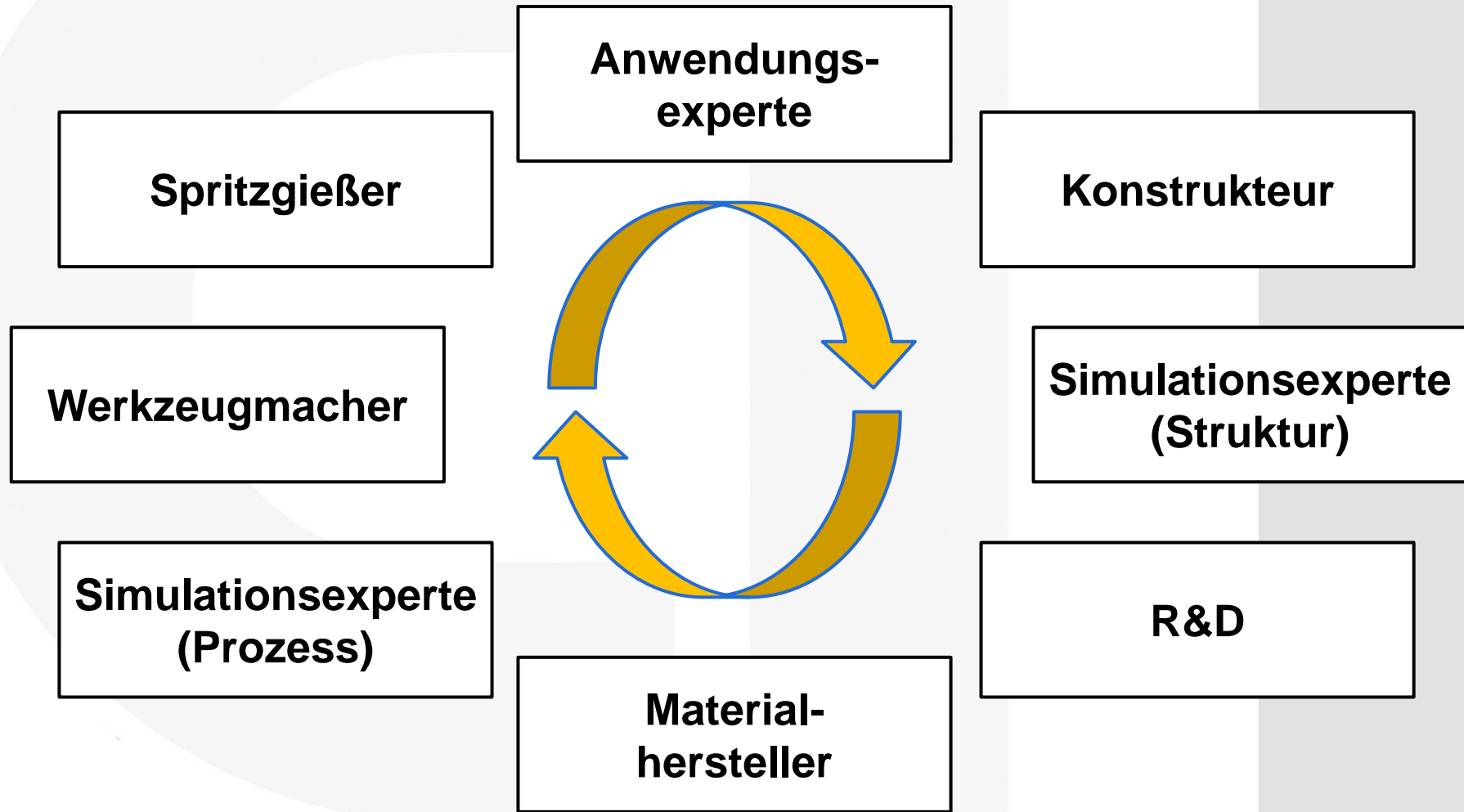
#### Orientierung

- Global
- Elementweise

**Vielzahl an Vorgehensweisen & Einstellmöglichkeiten**

**Validierung der gesamten Prozesskette erforderlich**

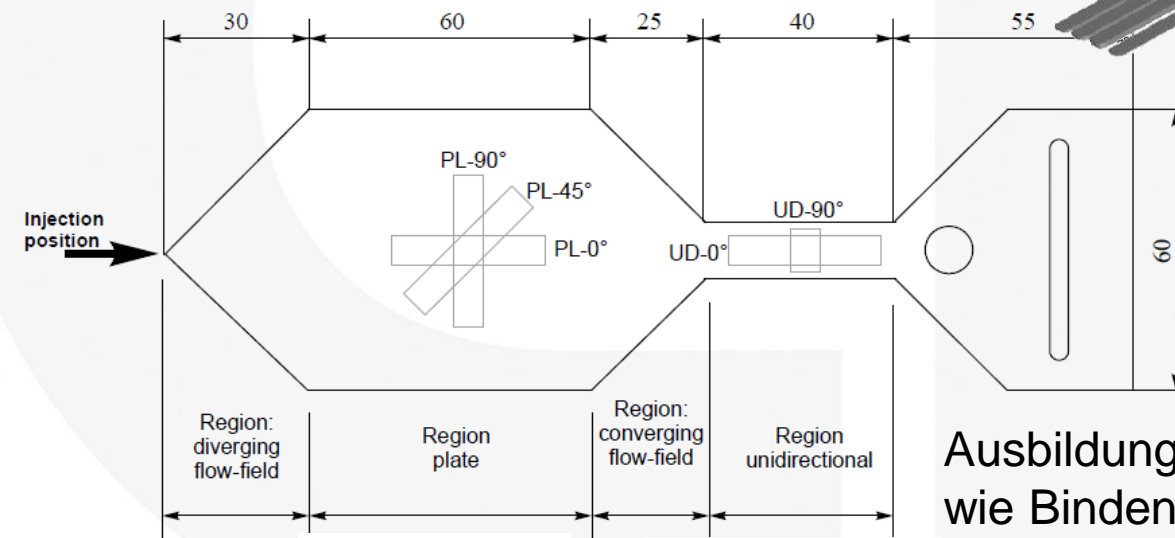




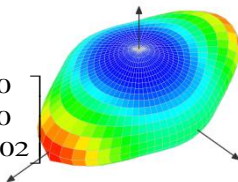
Spritzgusssimulationen bieten die Möglichkeit den Herstellprozess hinsichtlich

- Füll-, Druck- und Temperaturverhalten
- Schwindung und Verzug
- Kühlung
- Anisotropie (Bindenähte und Faserorientierung)

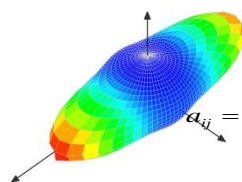
zu untersuchen.



$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,66 & 0 & 0 \\ 0 & 0,32 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix}$$

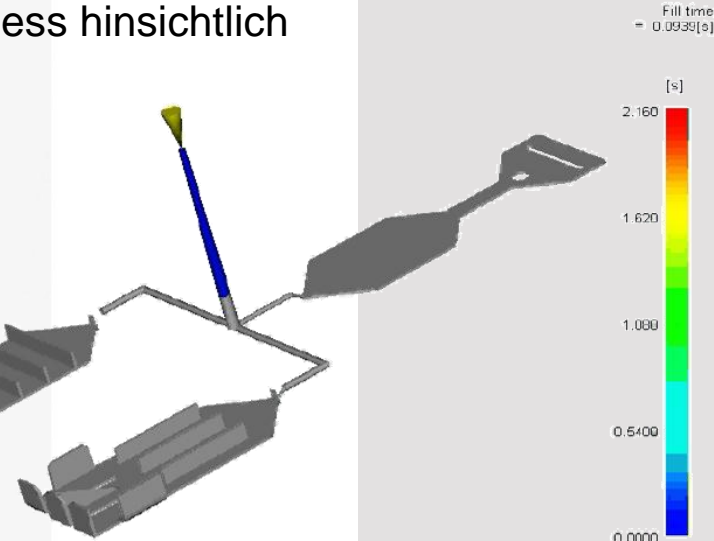


$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,87 & 0 & 0 \\ 0 & 0,11 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix}$$



Ausbildung unterschiedlicher Anisotropien wie Bindenähte oder Faserorientierung.

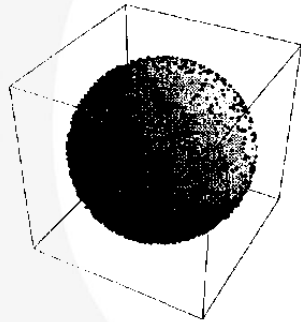
ck testing component



- Wahrscheinlichkeit eine Faser im Raum anzutreffen  
typische Beschreibungsformen

### Dichteanhäufung

$$a_{ij} = \oint \psi(p) p_i p_j dp$$



### Tensor Global

$$a_{xx} + a_{yy} + a_{zz} = 1$$

$$\vec{x} \times \vec{y} = \vec{z}$$

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xz} \\ & a_{yy} & a_{yz} \\ \text{symm.} & & a_{zz} \end{bmatrix}$$

### Eigenwerte/-vektoren

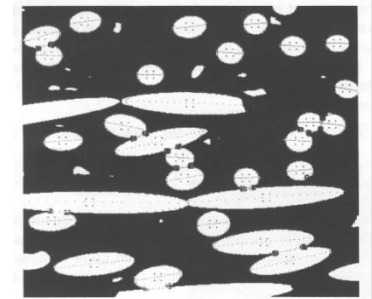
$$a_I + a_{II} + a_{III} = 1$$

$$\vec{v}_I \times \vec{v}_{II} = \vec{v}_{III}$$

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_I & 0 & 0 \\ & a_{II} & 0 \\ \text{symm.} & & a_{III} \end{bmatrix}$$

- Messung der Faserorientierung

- Schliffbilder (mehrere 1000 Fasern pro Messung)
- REM
- $\mu$ -CT



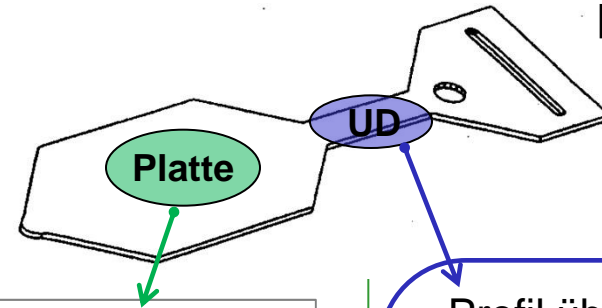
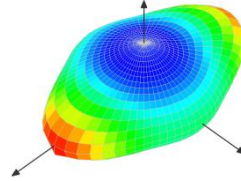


# Prozesssimulation

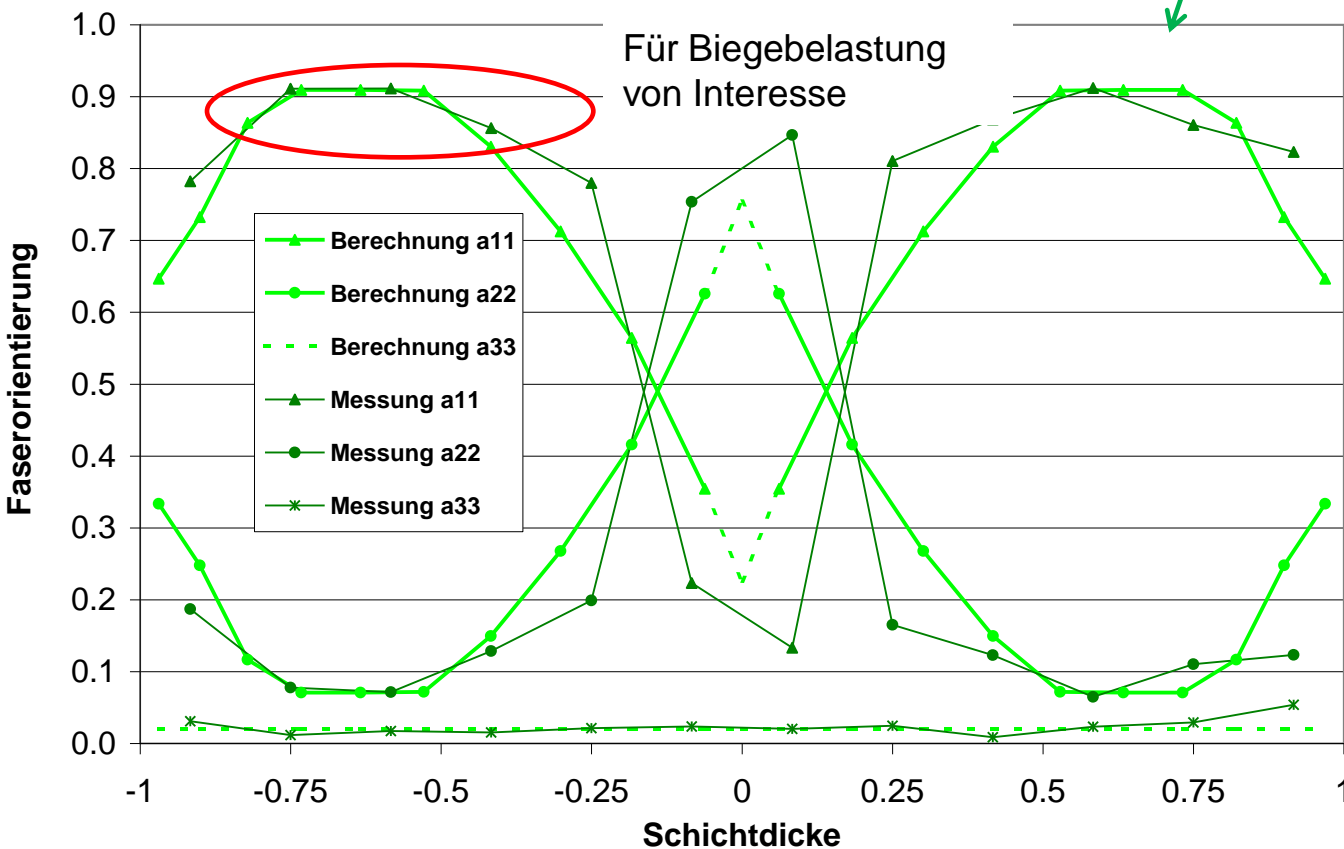
## Faserorientierung in typischen Bereichen

Mittlere FO in Tensorform

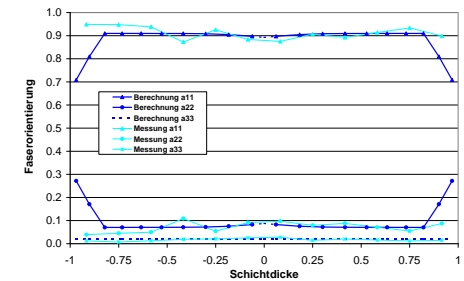
$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,66 & 0 & 0 \\ 0 & 0,32 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix}$$



[2004Reithofer]

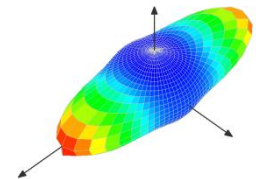


Profil über der Dicke

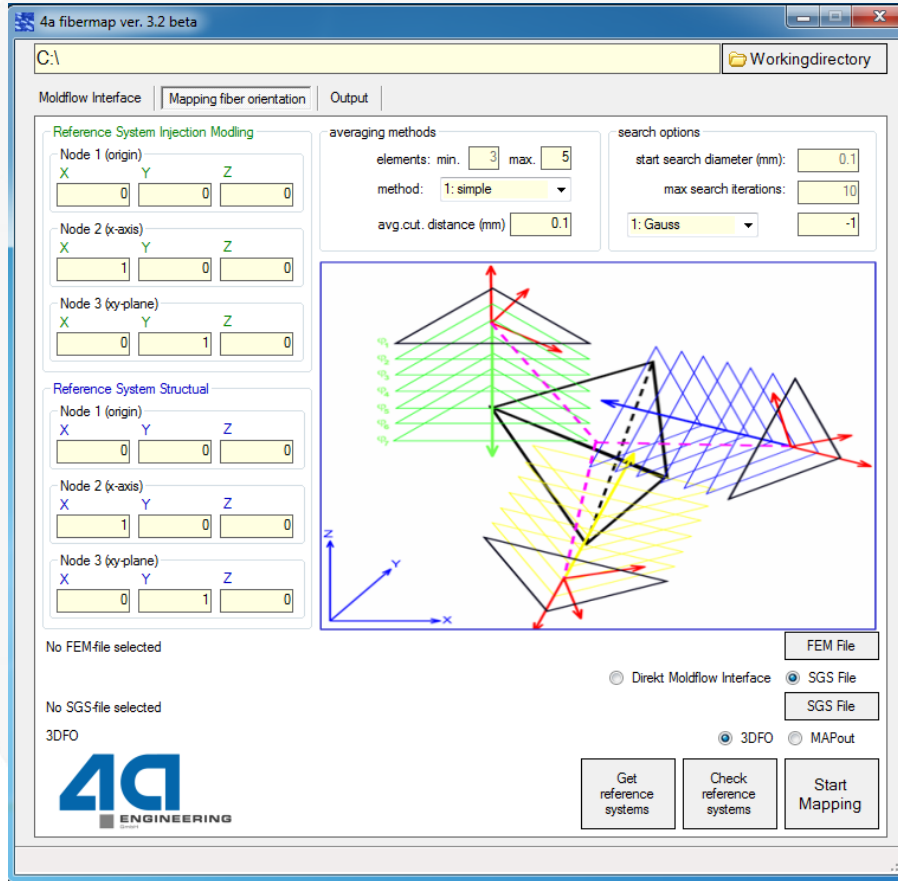


Mittlere FO in Tensorform

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,87 & 0 & 0 \\ 0 & 0,11 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix}$$



# Integrative Simulation – 4a fibermap Mapping



structural mesh element

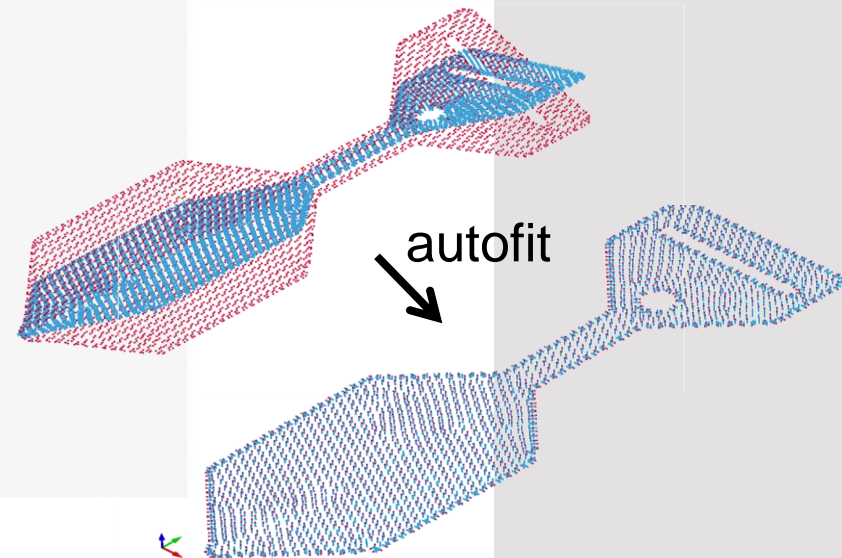
Search radius

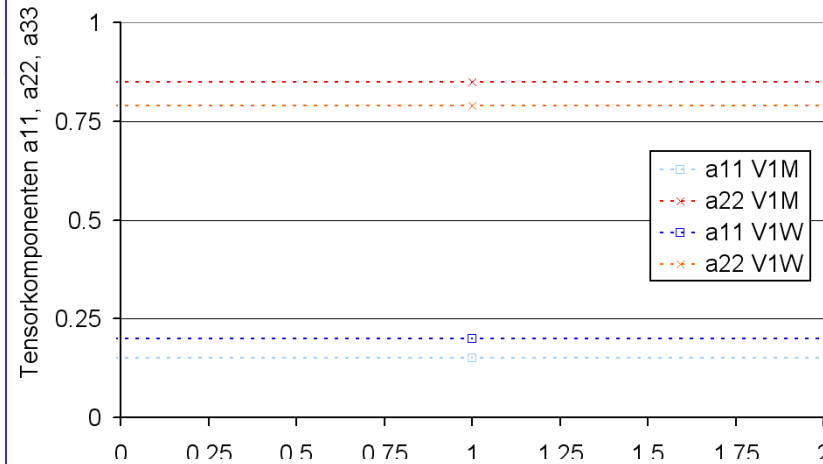
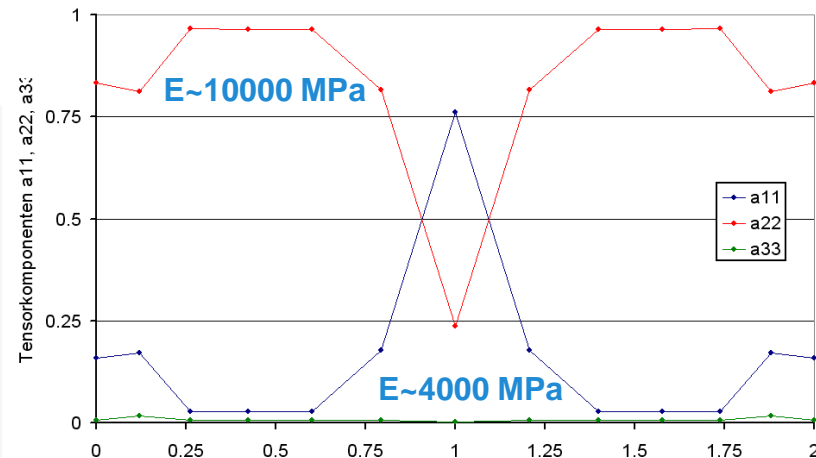
[2012Reithofer]

structural mesh  
Integration point

Moldflow Element

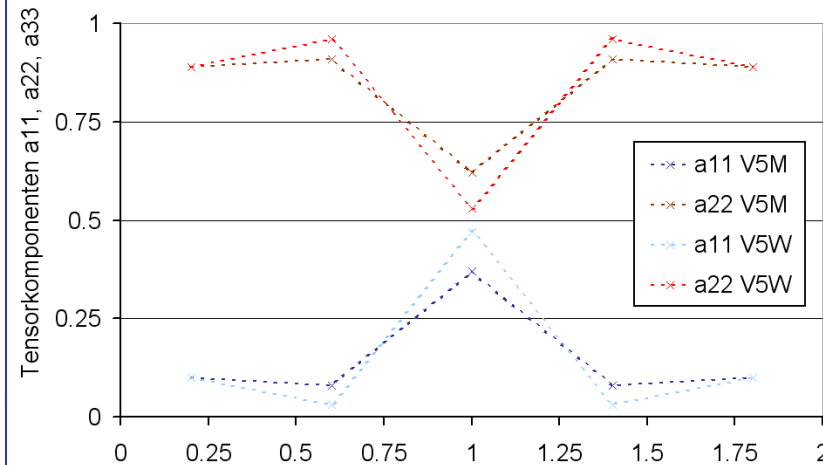
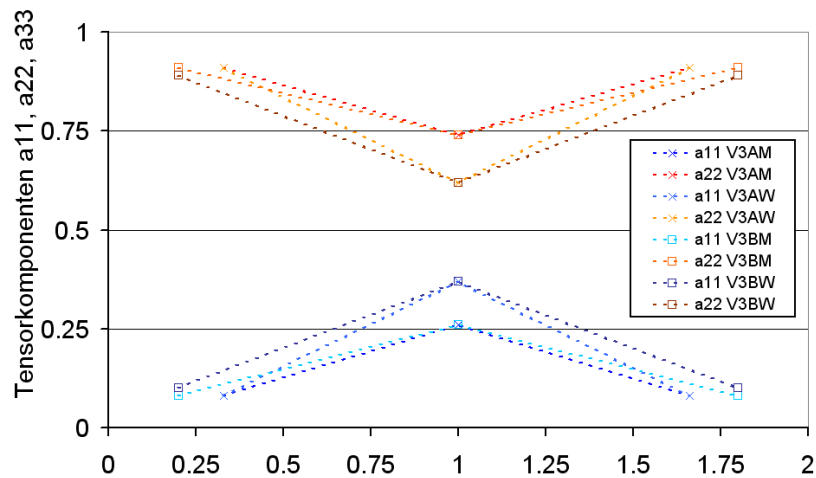
Moldflow Element  
point of inertia





### Ergebnis Spritzgusssimulation

### 1 Materialpunkt über der Wanddicke



### 3 Materialpunkte über der Wanddicke

### 5 Materialpunkte über der Wanddicke



### ➤ Schnittstellen zu Moldflow und Moldex

The image shows two software windows. The 'Moldflow Results' window on the left has a list of simulation results. The 'Export' window on the right shows a list of results being exported, with a callout box highlighting the export format settings.

**Moldflow Results**

- 0 - All
- 1610 Fill time / [ s ] / NDDT
- 1760 Pressure at V/P switchover / [ MPa ] / NDDT
- 1770 Temperature at flow front / [ C ] / NDDT
- 1600 Density / [ g/cm<sup>3</sup> ] / NDDT / Time
- 1900 Extension rate / [ 1/s ] / NDDT / Time
- 4021 Fiber orientation tensor / [ ] / NDDT
- 1630 Freeze time / [ s ] / NDDT
- 1180 Pressure / [ MPa ] / NDDT / Time
- 1584 Shear rate / [ 1/s ] / NDDT / Time
- 1597 Shear rate, maximum / [ 1/s ] / NDDT / Time
- 1540 Temperature / [ C ] / NDDT / Time
- 1750 Velocity / [ cm/s ] / NDDT / Time
- 1595 Viscosity / [ Pa-s ] / NDDT / Time
- 1611 Unfilled cavity / [ ] / NDDT
- 1620 Volumetric shrinkage / [ % ] / NDDT / Time
- 1622 Air traps / [ ] / NDDT / Time
- 1649 Polymer fill region / [ ] / NDDT / Time
- 3110 Tensile modulus in first principal direction (3D fiber) / [ MP.
- 3112 Tensile modulus in second principal direction (3D fiber) / [ MP.
- 3114 Tensile modulus in third principal direction (3D fiber) / [ MP.

**Export**

Clear List Load List Save List

[Präfix]  
\*ELEMENT\_SHELL\_BETA  
[Präfix]  
[Main]  
<<ID;0D8S>><<1;0D8S>><<Nd1;0D8S>><<Nd2;0D8S>><<Nd3;0D8S>><<Nd4;0D8S>>  
<<0.0;1D16S>><<0.0;1D16S>><<0.0;1D16S>><<0.0;1D16S>><<theta;5D16S>>  
[Main]

### ➤ Ausgabe individuell einstellbar

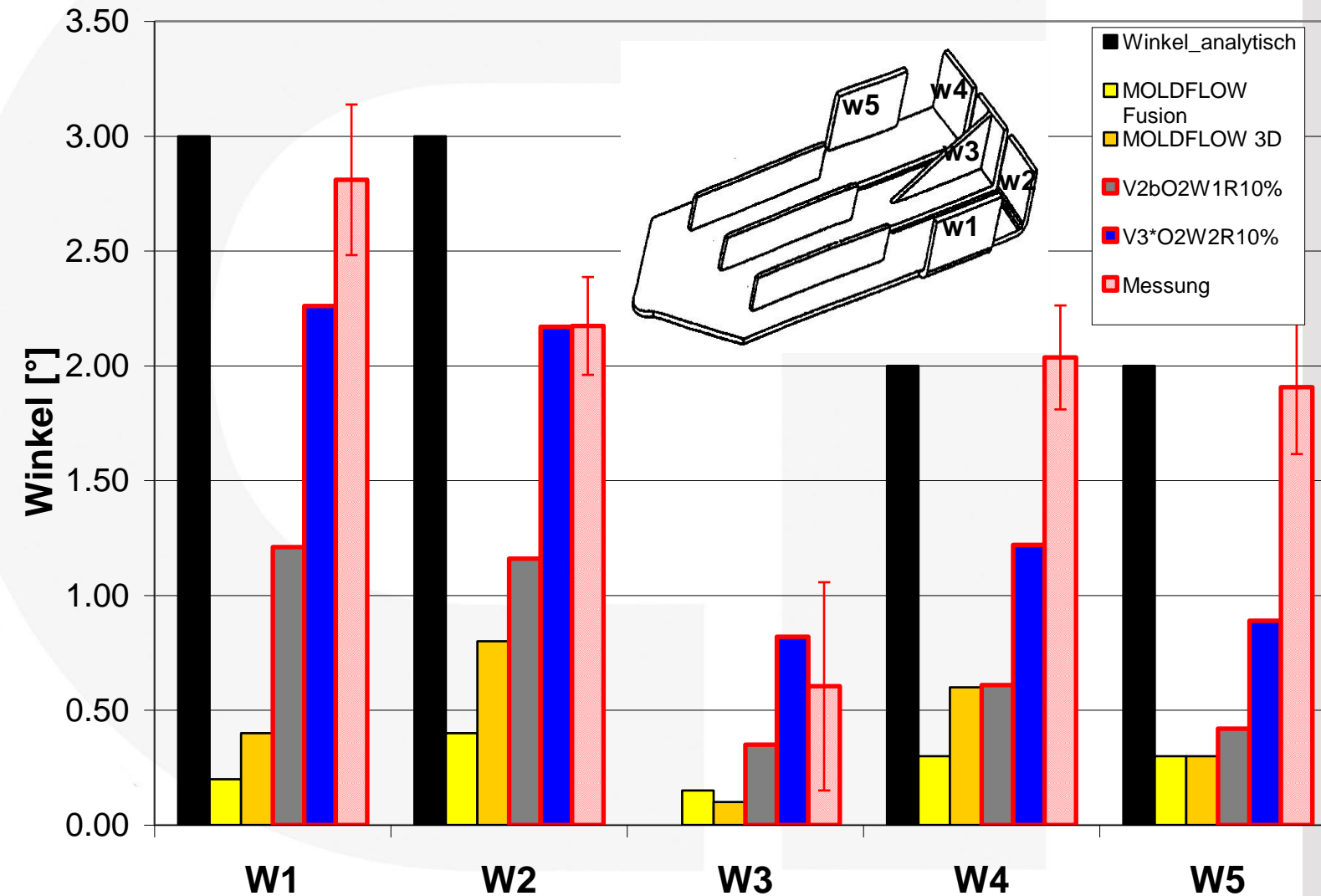
➤ Faserorientierung → Usermaterial

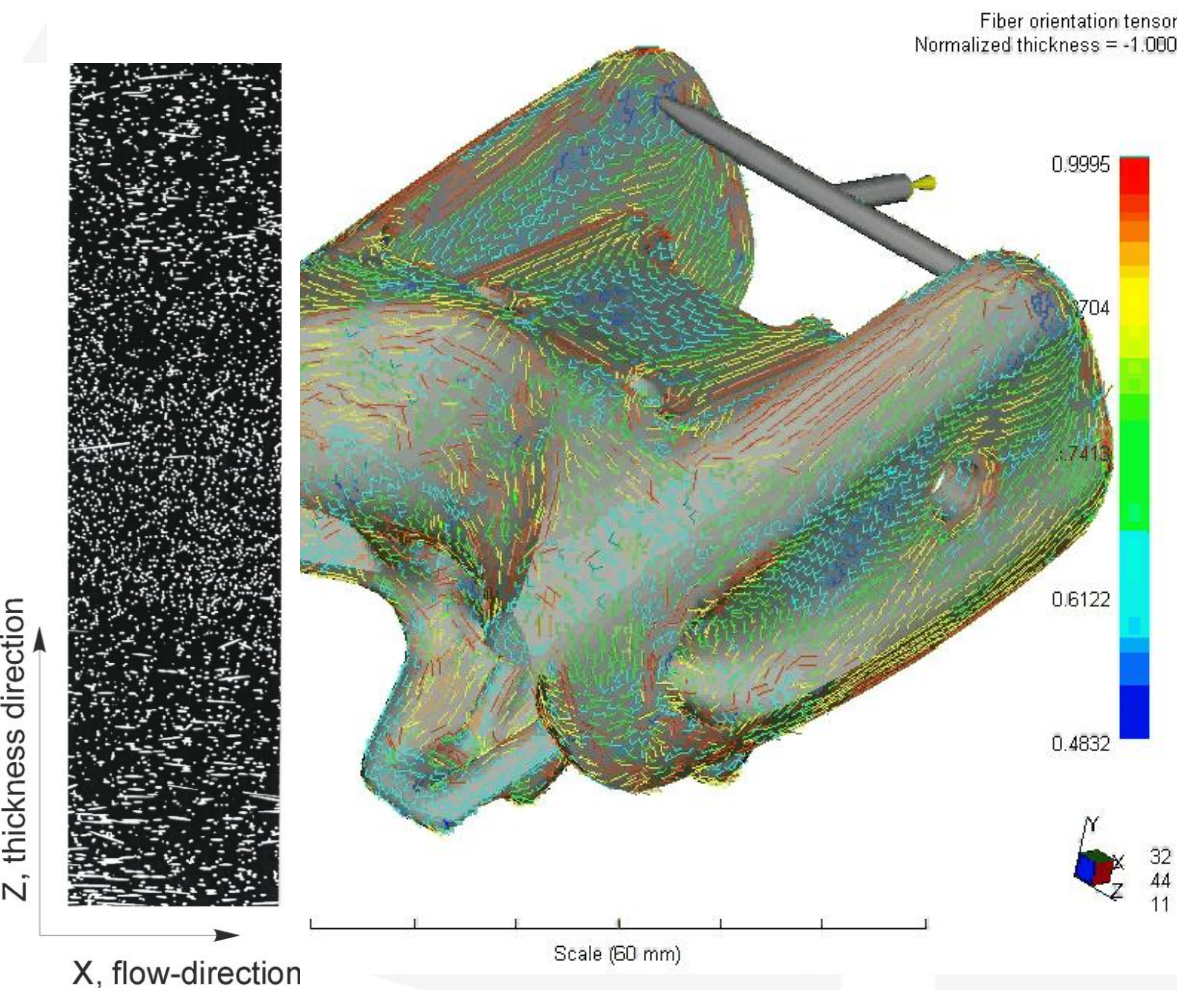
➤ Inputdecks z.B. Nastran, LSDYNA, Abaqus, ....

# Fallbeispiel Winkelverzug

## Forschungsform

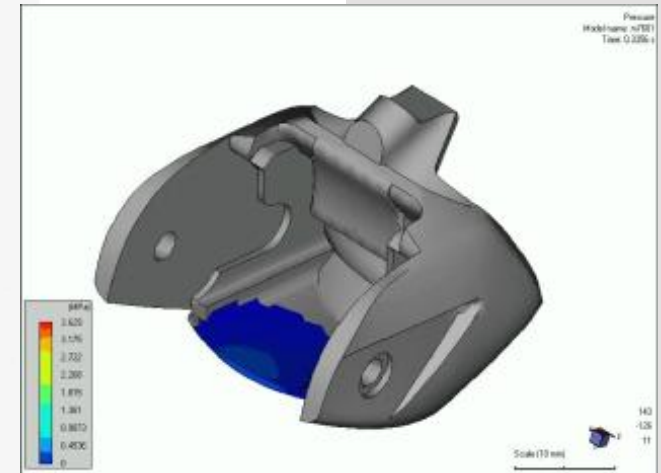
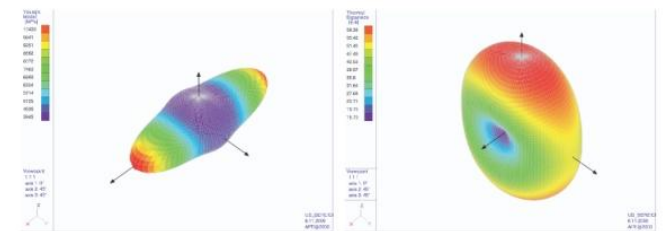
[2004Reithofer]



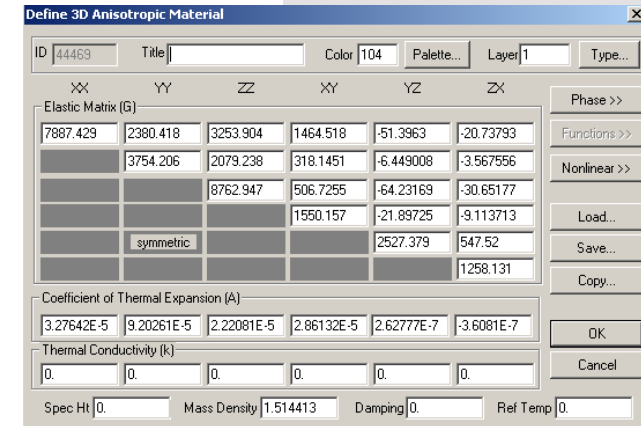
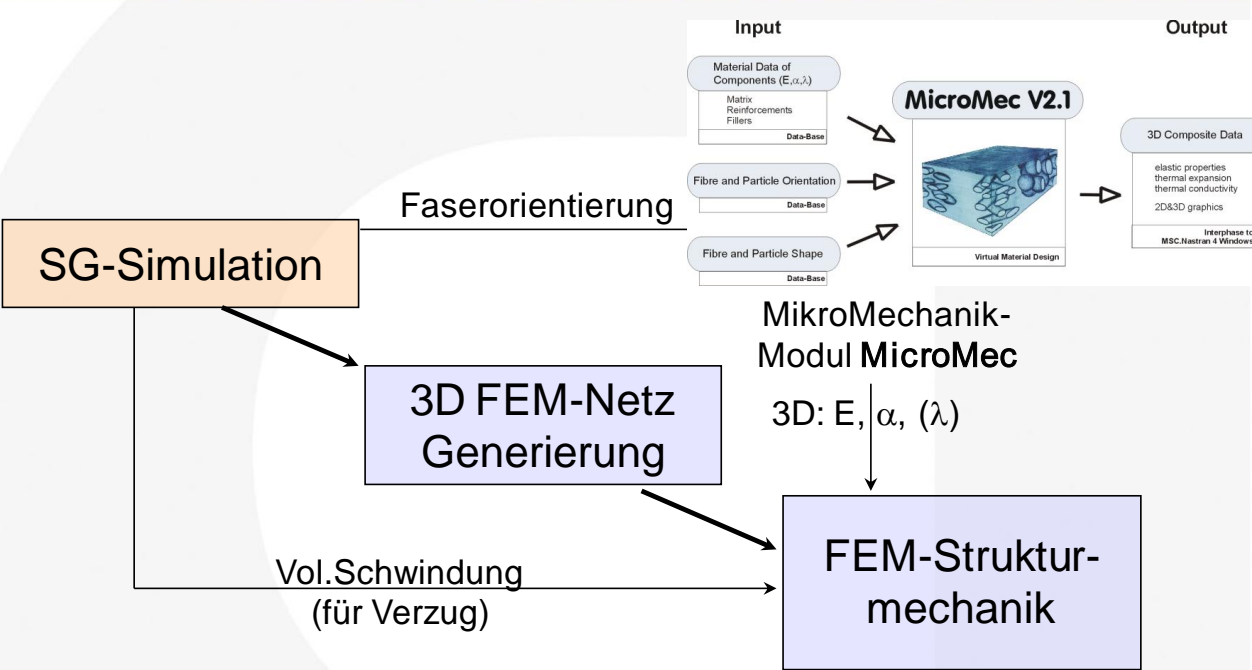


## Materialeigenschaften

(faserverstärkt → richtungsabhängig)

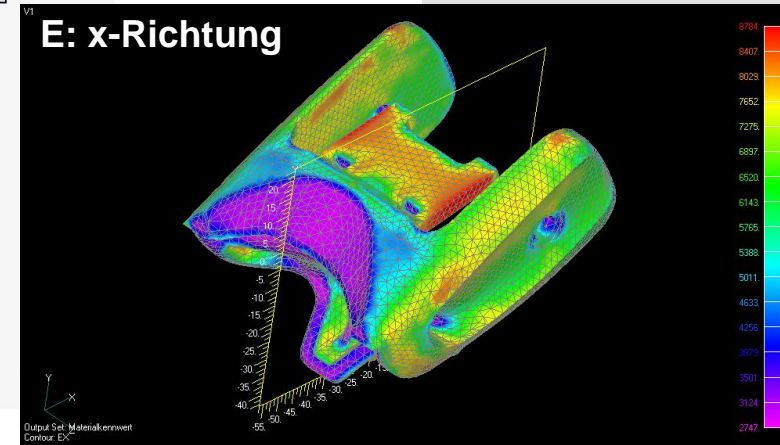






Für jedes 3D-Element:

- globale Faserorientierung
- anisotropes Material
- Property

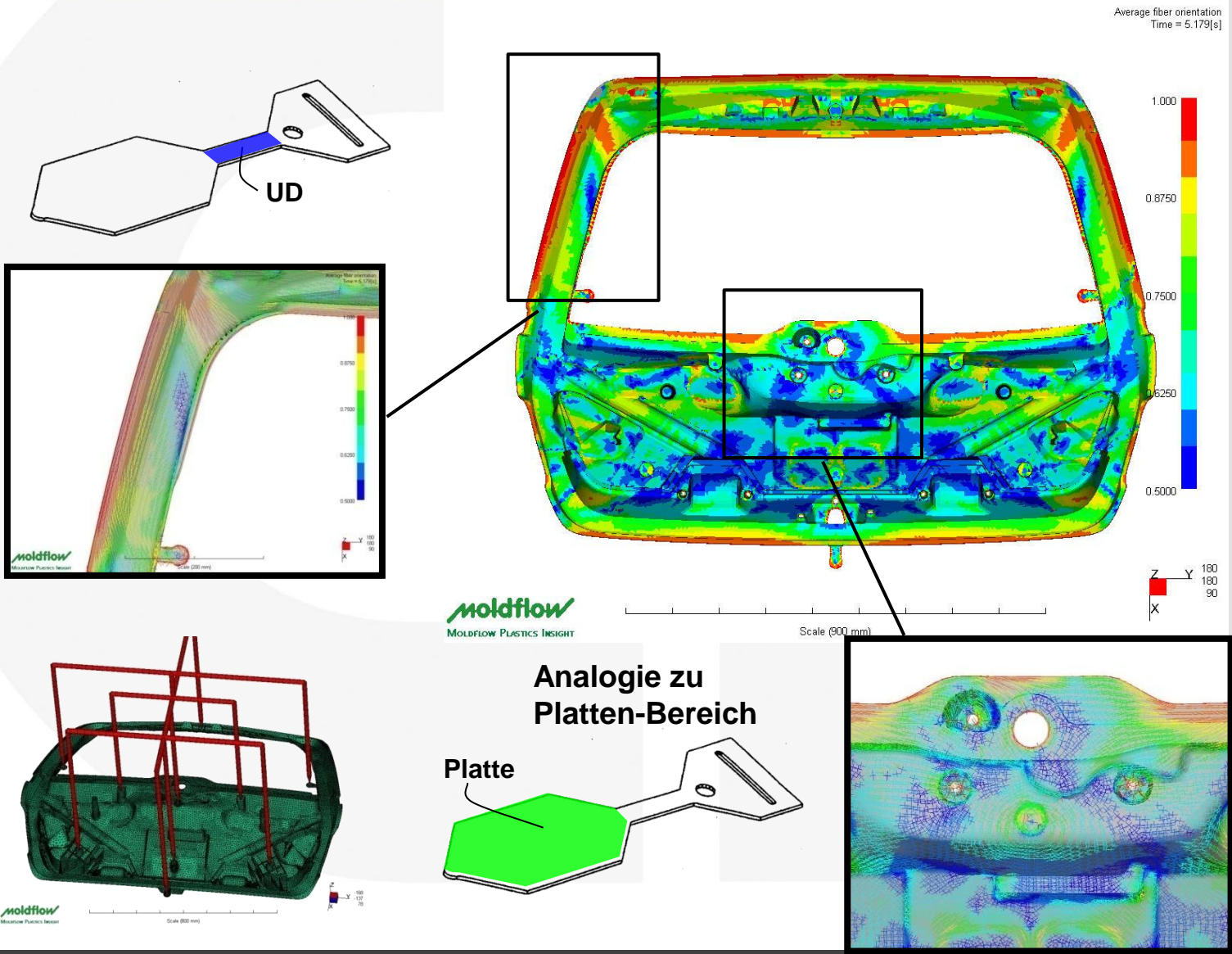


- Verzug besser abgebildet
- Mapping der globalen Faserorientierung
- pro Element – Property & anisotropes Material ( $E, \alpha$ )
- Geeignet für
  - Einfache Materialmodelle
  - Bauteile
- Probleme Solver, Pre- & Postprozessor bei großer Anzahl an Elementen

# Fallbeispiel Heckklappe

## Steifigkeit / Eigenfrequenz

[2011Reithofer]





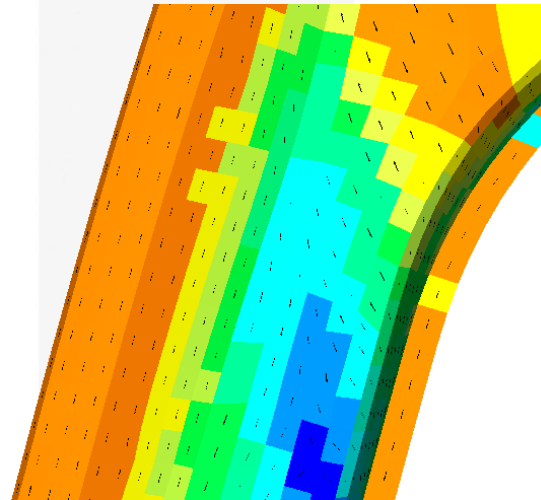
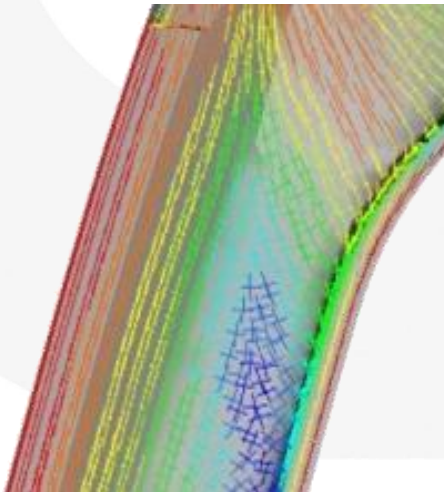
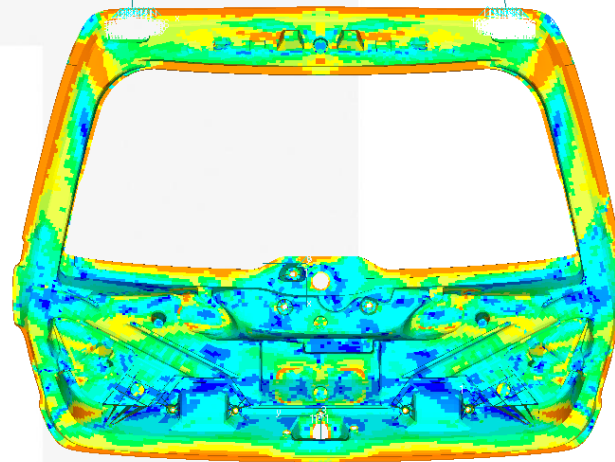
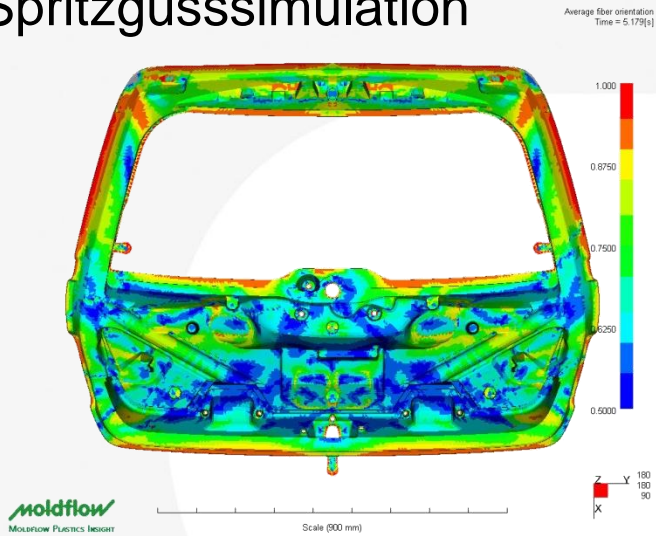
# Fallbeispiel Heckklappe

## Mapping Faserorientierung

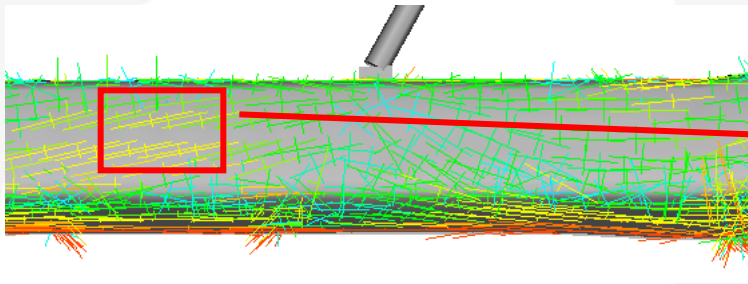
Spritzgusssimulation

gemappt in Struktursimulation

[2011Reithofer]



- Die mittlere Faserorientierung wird auf das Struktursimulationsnetz übertragen (Mapping).



$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{XX} & a_{XY} & a_{XZ} \\ & a_{YY} & a_{YZ} \\ \text{symm} & & a_{ZZ} \end{bmatrix}$$

- Aus der globalen FO wird der erste Eigenvektor bestimmt. Mit dem Eigenvektor wird der Richtungswinkel Theta für jedes Element bestimmt.

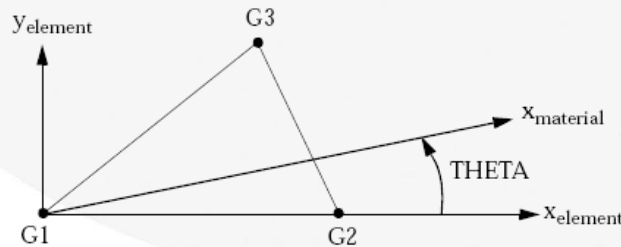


Figure 8-64 CTRIA3 Element Geometry and Coordinate Systems

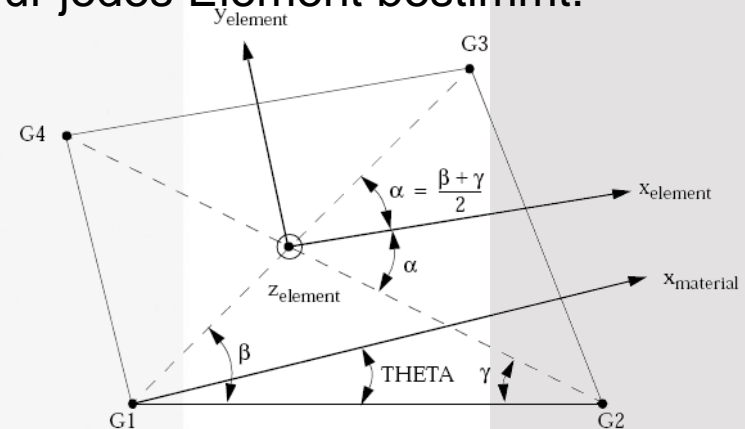


Figure 8-45 CQUAD4 Element Geometry and Coordinate Systems

# Fallbeispiel Heckklappe

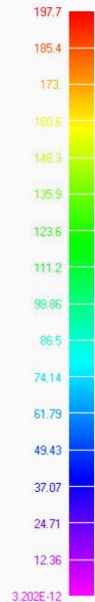
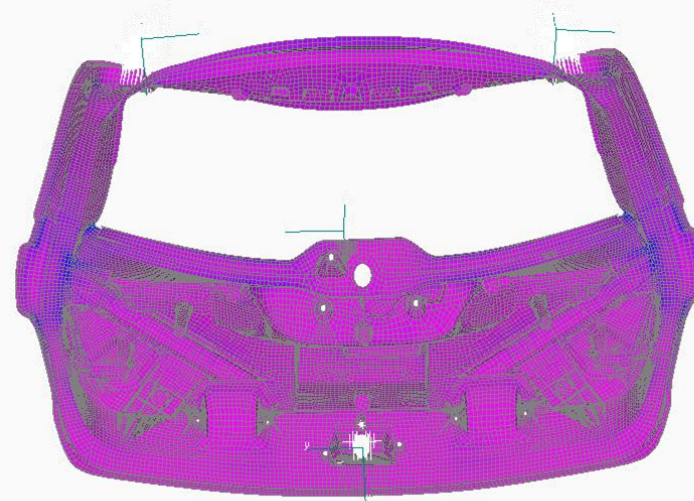
## Validierung Bauteilversuch

[2011Reithofer]

Die Messung ergab eine 2. Eigenfrequenz von  $16,7 \pm 0,4$  Hz.  
Unter Berücksichtigung der Faserorientierung  
wird eine Eigenfrequenz von 16,8 Hz erzielt.



$$c - \omega_0^2 m = 0 \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$$



Messung der Eigenfrequenz mit  
Hilfe eine Exzenter

- Einfache Vorgehensweise  
Mapping mittlere Faserorientierung oder Randschicht  
Unterscheidung Biegung vs. Zug nicht möglich
- Es findet sich kein „isotroper Vergleichsmodul“  
d.h. selbst die Steifigkeit (globales Verhalten) ist stark  
von der Faserorientierung beeinflusst

Eigenfreq.	ISO3000	ISO6000	ISO6800	ISO9000	KGF RAND	KGF_AVG
1	52%	105%	118%	157%	95%	100%
2	47%	94%	106%	141%	87%	100%
3	50%	99%	112%	149%	96%	100%
4	47%	94%	106%	141%	92%	100%

- Aufbau mit PCOMP ermöglicht den Einsatz auch in  
großen Baugruppen (Übersichtlichkeit)

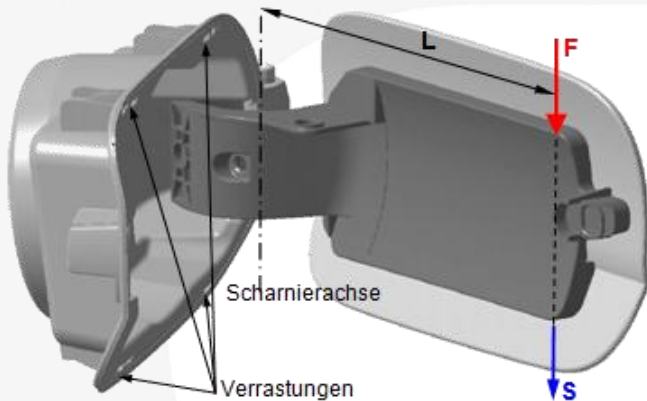


# Fallbeispiel Tankklappe

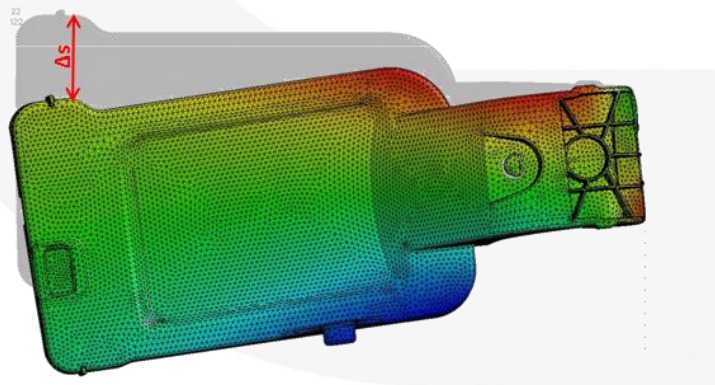
## Steifigkeit / Festigkeit

[2012Gramling]

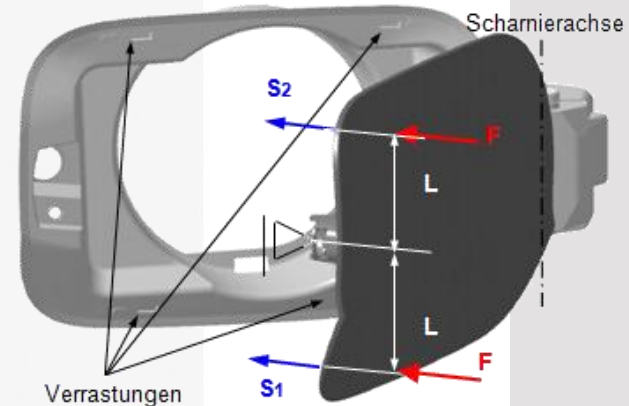
### Biegesteifigkeit



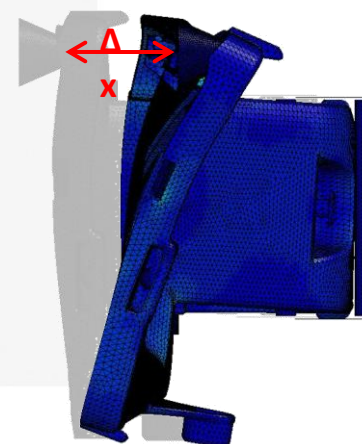
### Vergleichslastfall



### Torsionssteifigkeit



### Vergleichslastfall



# Fallbeispiel Tankklappe

## Ablaufschema Schnittstelle LS DYNA

[2012Gramling]

**Windows basierend**

SGS-Simulation  
MPI Fusion

LS DYNA Inputdeck  
Solidmesh

Fill time  
= 1.676[s]

Füllung berechnet

**Orientierung**

Einlesen der Netzinformationen

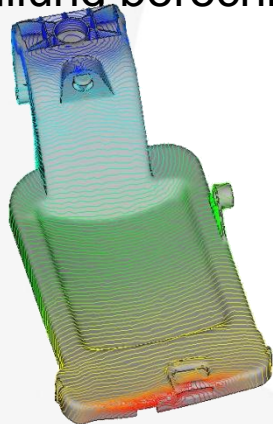
→ Schwerpunkt

Anpassung des Inputdecks  
auf Basis der Mapping  
Resultate (Property,  
Elementorientierung)

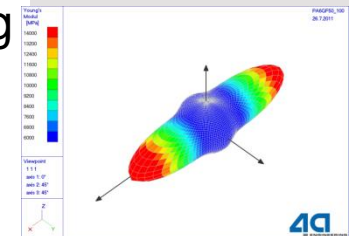
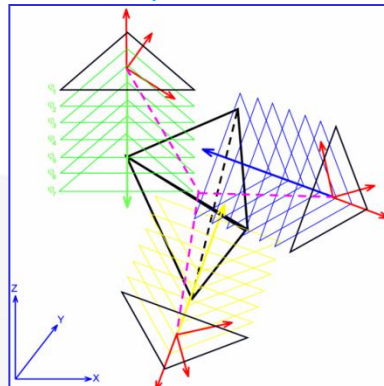
Berechnung

**Ergebnisse**

[s]  
1.676  
1.407  
0.9382  
0.4691  
0.0000



Scale (100 mm)



**Mapping**

Koordinatentransformation

Mapping der Orientierung

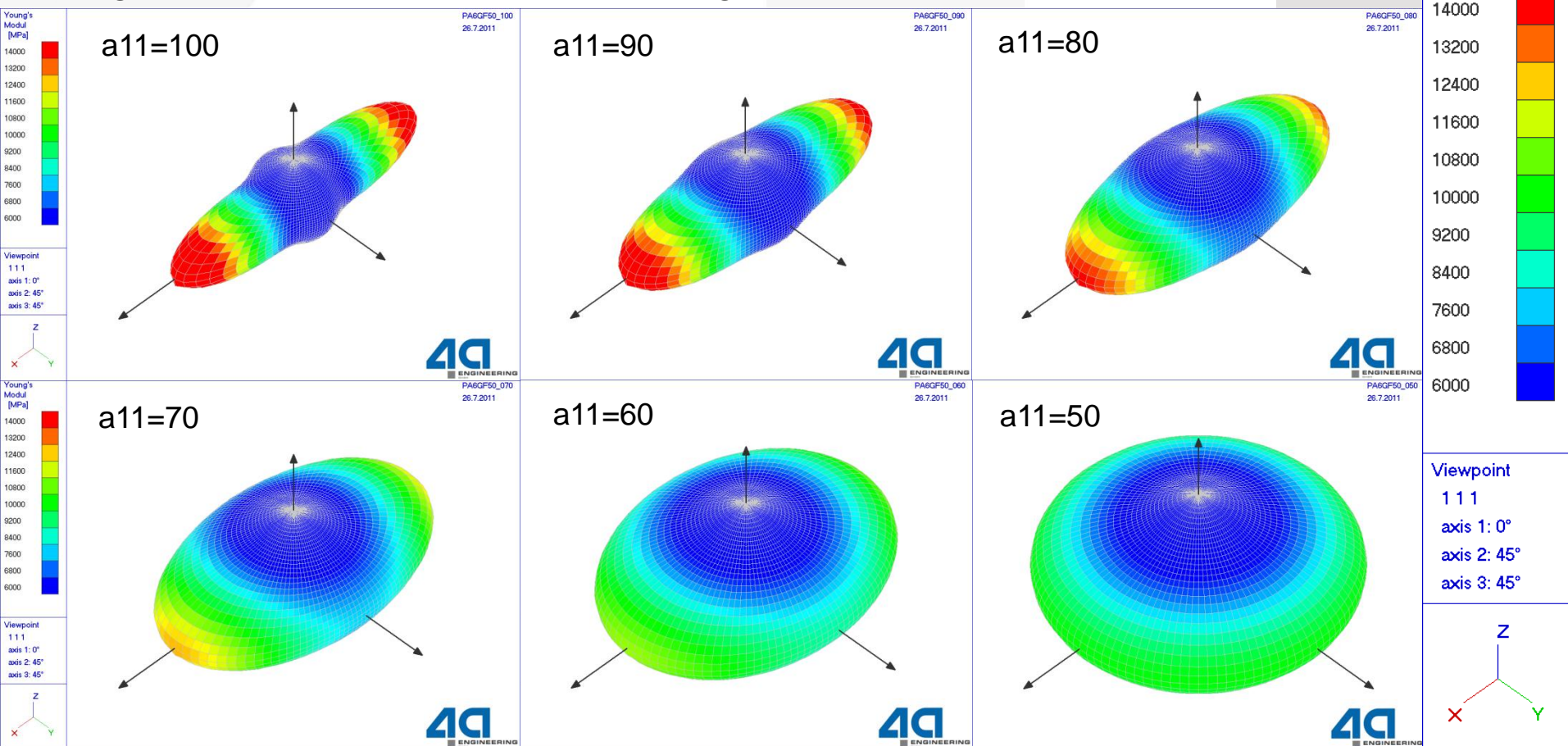
Erstellung der Properties

# Fallbeispiel Tankklappe

## orthotropes gemapptes Material

[2012Gramling]

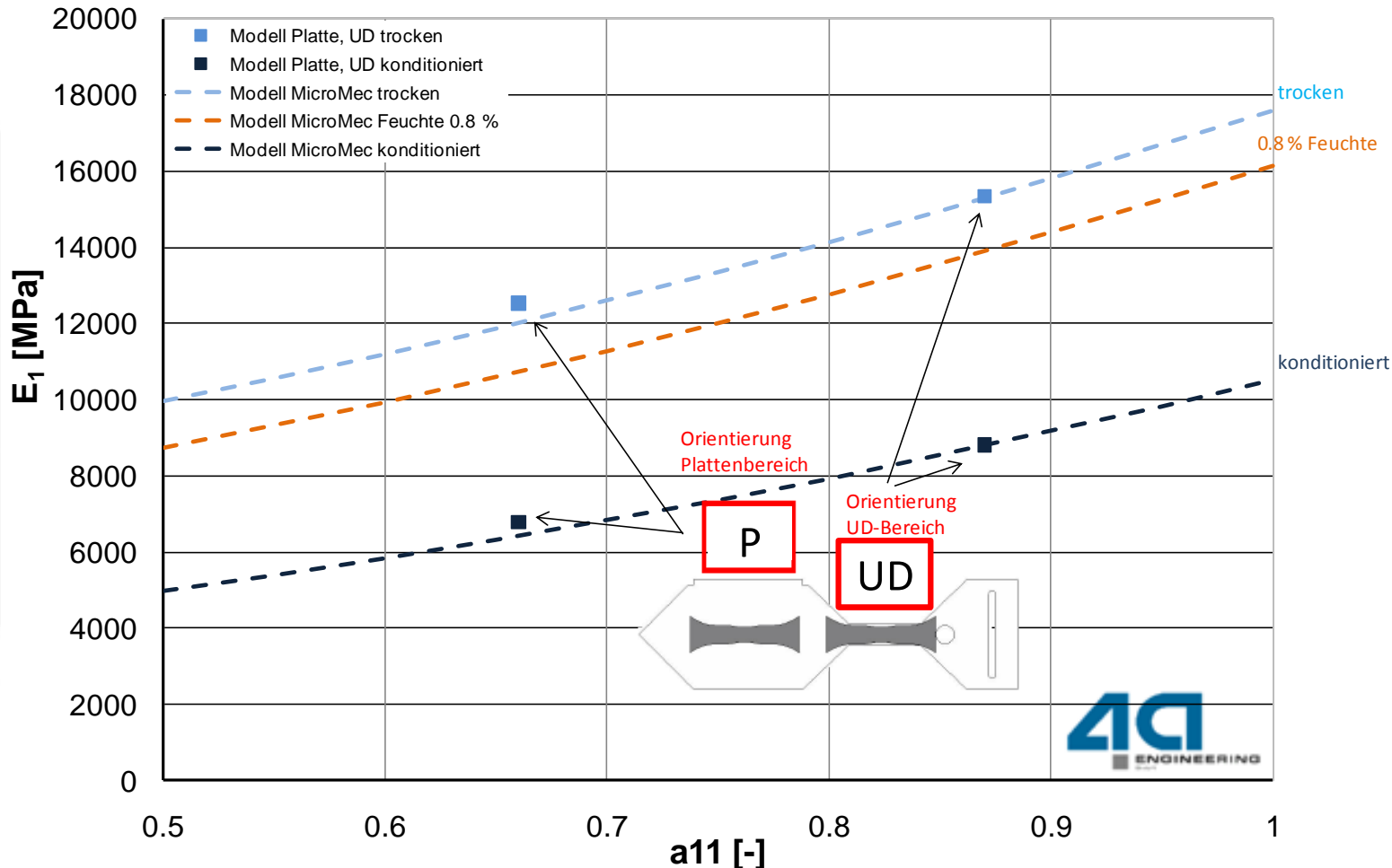
- Mittlere Faserorientierung wird analog gemappt. Neben dem 1. Eigenvektor wird der 1. Eigenwert berechnet. Mittels des 1. Eigenwertes  $a_{11}$  wird ein Material zugeordnet.



# Fallbeispiel Tankklappe

## Überprüfung Orientierungs- und Feuchteeinfluss

[2012Gramling]

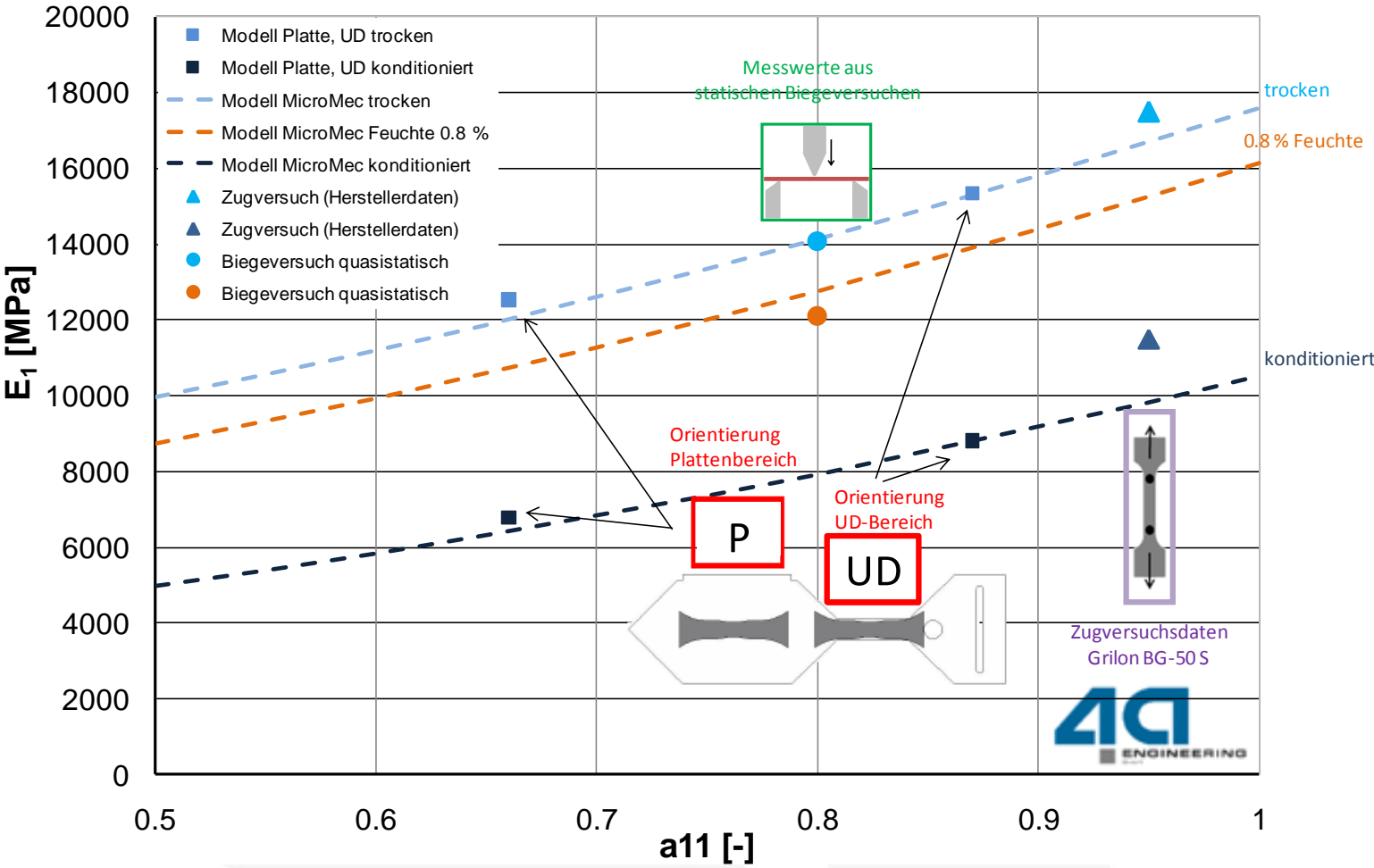




# Fallbeispiel Tankklappe

## Überprüfung Orientierungs- und Feuchteeinfluss

[2012Gramling]



# Fallbeispiel Tankklappe

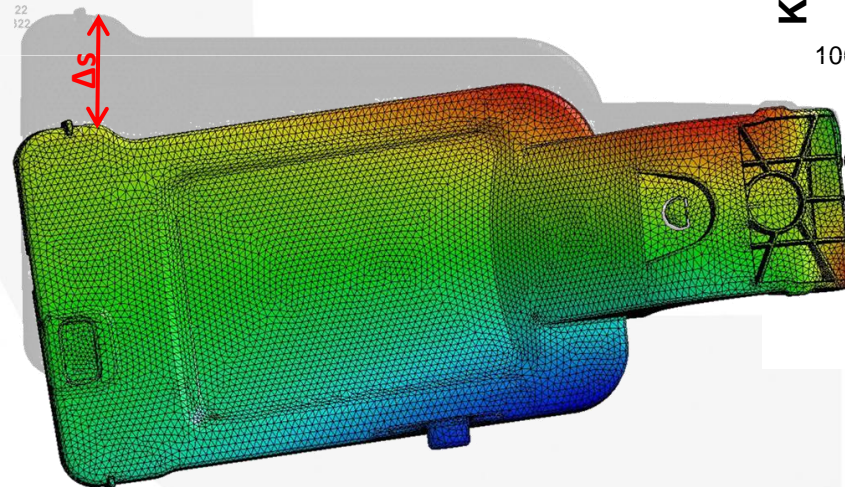
## Vergleich Bauteilprüfung – Ergebnisse aus Biegesimulation

[2012Gramling]

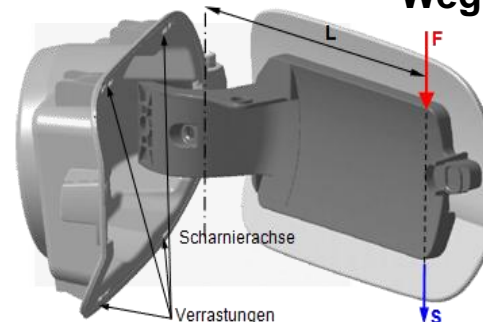
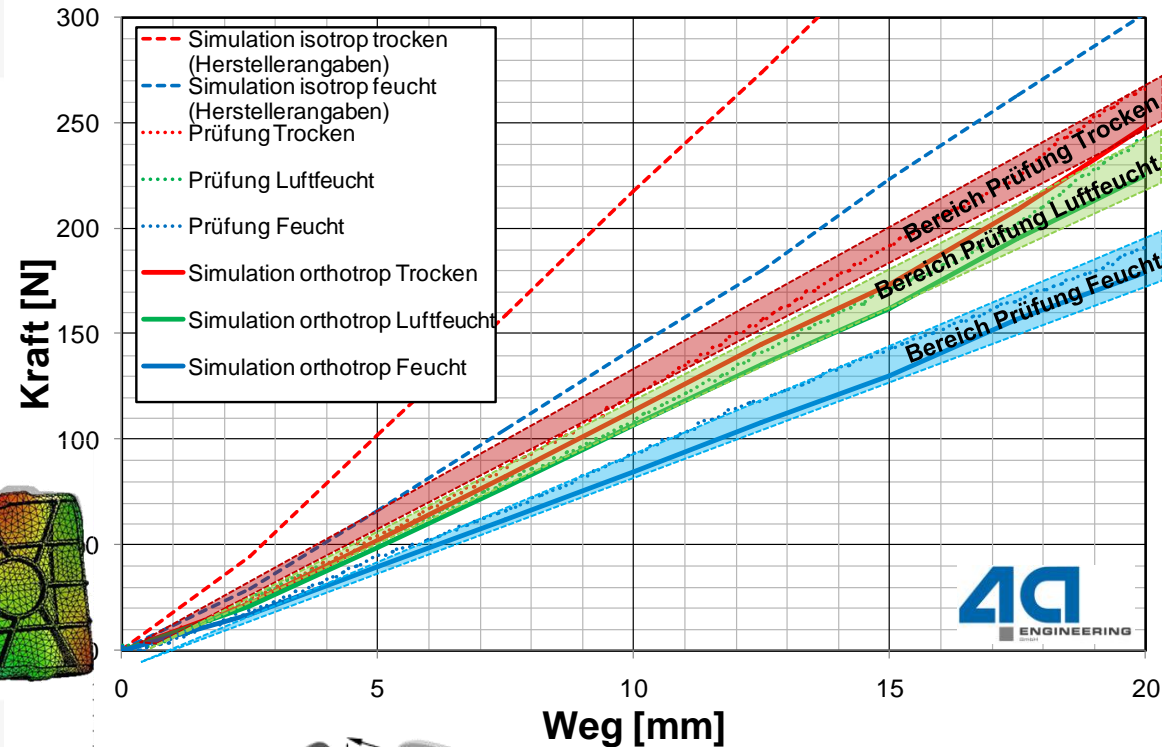
Version : Is971d R5.1.1

Revision: 65543

Elementanzahl: 206.142



Lastfall Biegung



# Fallbeispiel Tankklappe

## Möglichkeiten + Grenzen

- Materialabhängigkeit (Temperatur + Feuchte)
- Mapping
  - Eigenvektoren → Koordinatensystem
  - Eigenwerte → 10 Materialkarten für typische FO Bereiche
  - Einfache Materialmodelle
- Geeignet für große Simulationsmodelle
- Bauteilebene + Baugruppen

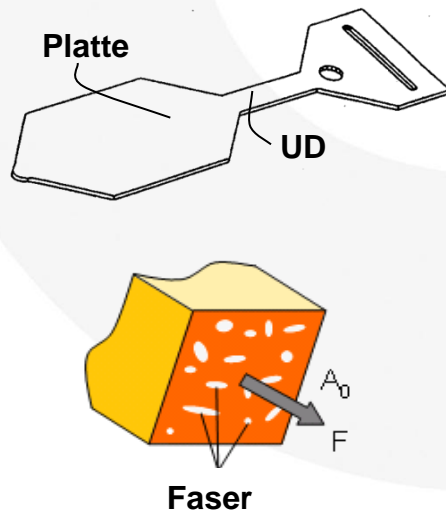
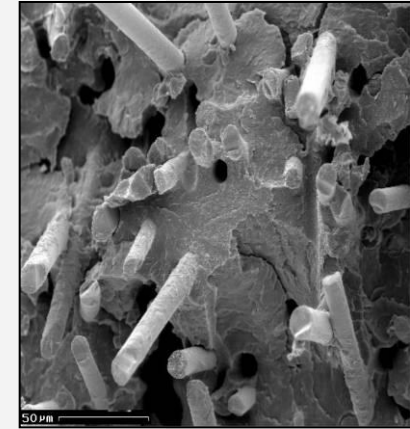
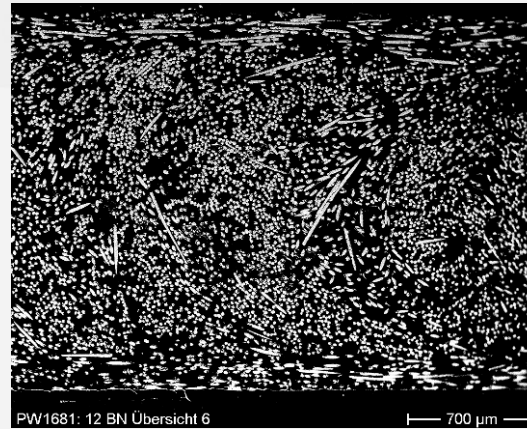
# Fallbeispiel Crash – Nutini Box

## Dynamisches Werkstoffverhalten

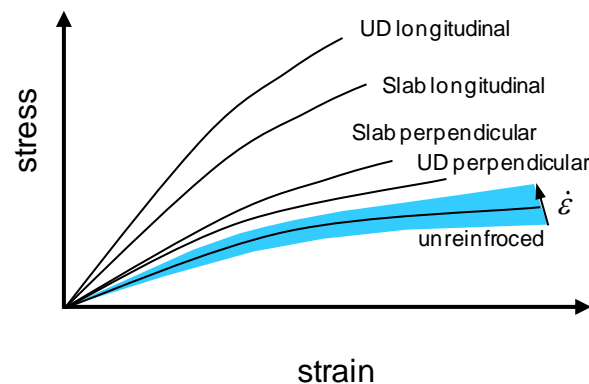
Wesentliche Einflussgrößen sind Fasergehalt und -form. Mit steigendem Fasergehalt steigt der Einfluss der Orthotropie und sinkt der anteilige matrixbedingte Einfluss der Dehnrage.

Werkstoffverhalten ist

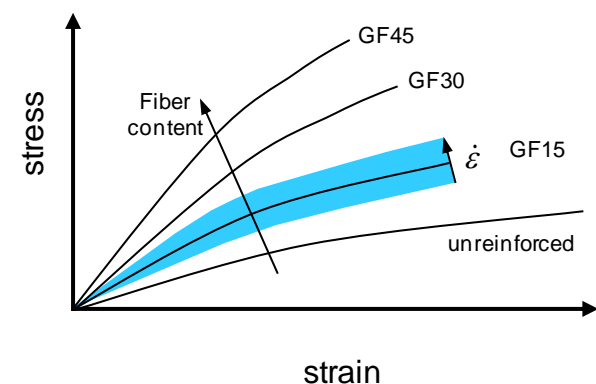
- orthotrop
- viskoelastisch
- viskoplastisch



dependence on fiber orientation



dependence on fiber content



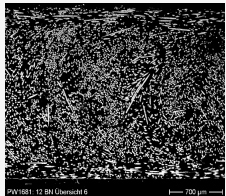


# Fallbeispiel Crash – Nutini Box

## Simulationskette für LS-DYNA

[2014Jilka]

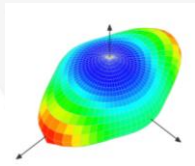
### Injection molding (Moldflow, Moldex, ...)



$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0,66 & 0 & 0 \\ 0 & 0,32 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix}$$

fiber orientation

### micromechanic modeling (4a micromec, ...)

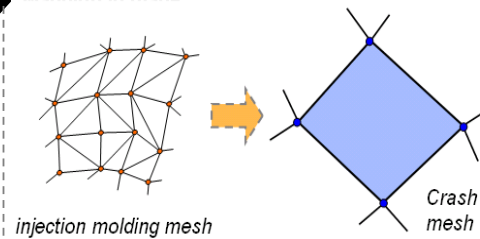


$$c = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ & & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix}$$

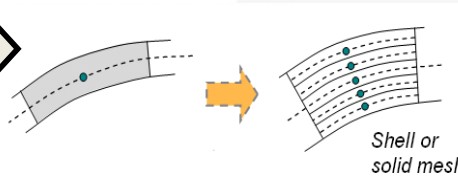
anisotropy

### Mapping (4a fibermap, ...)

In plane mapping



Mapping in thickness direction



### Crash Simulation (LS-DYNA)

orientations

\*ELEMENT\_SHELL\_BETA

\*ELEMENT\_SHELL\_COMPOSITE

\*INITIAL\_STRESS\_SHELL(SOLID)

\*ELEMENT\_SOLID\_ORTHO

standard material models

\*MAT\_(ANISO)TROPIC\_ELASTIC

\*MAT\_ANISOTROPIC\_ELASTIC\_PLASTIC

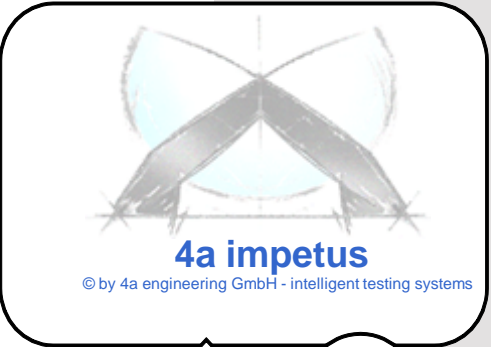
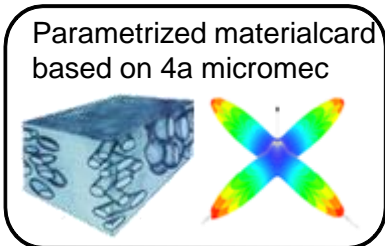
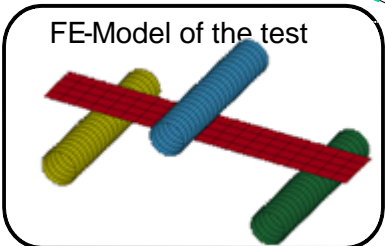
# Fallbeispiel Crash – Nutini Box

## Materialkartenerstellung – 4a impetus



Element orientation e.g.  
\*ELEMENT\_SHELL\_BETA

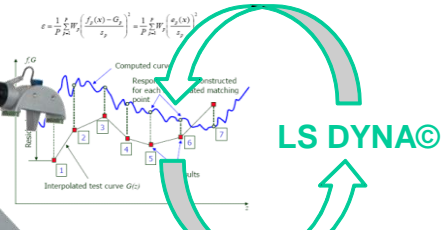
Material angle



LS PREPOST©

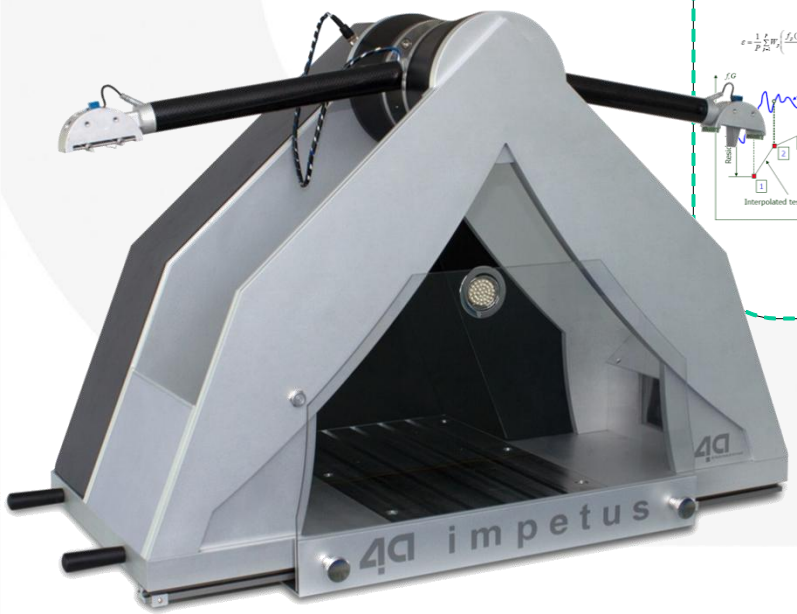
DATABASE  
measurement, models

ORIENTATION  
e.g. 0°, 45°, 90°



LS DYNA©

Reverse Engineering

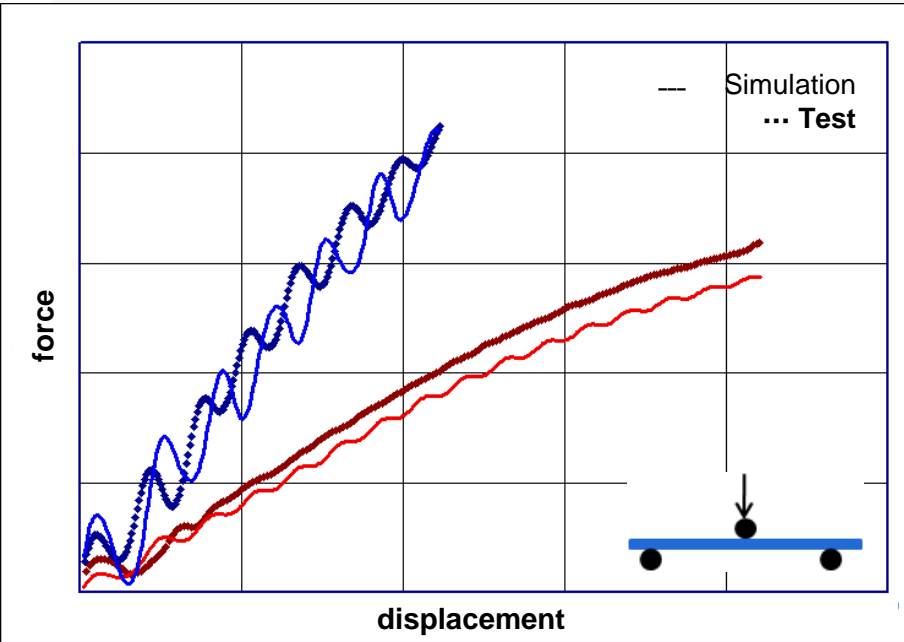


# Fallbeispiel Crash – Nutini Box

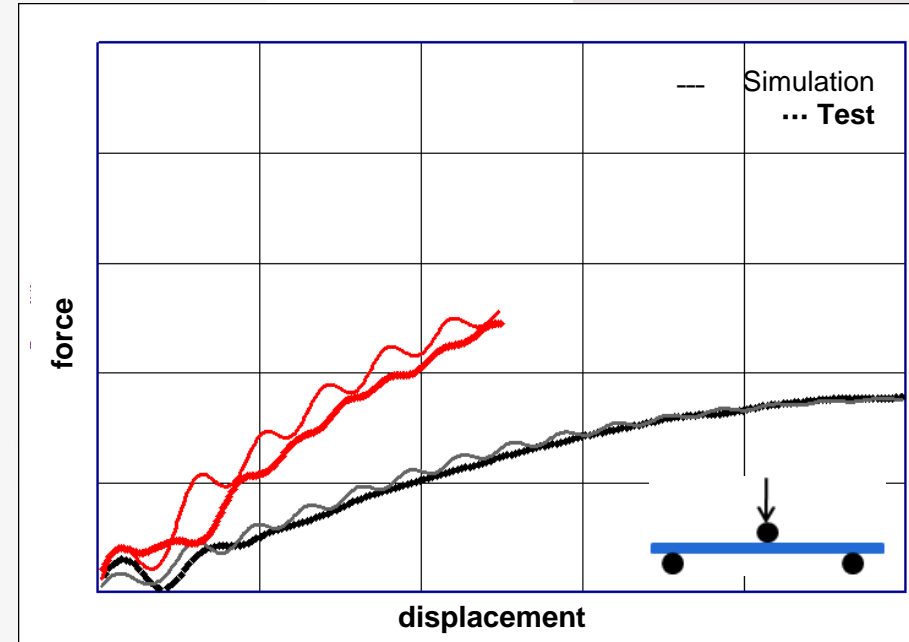
## Materialkartenerstellung – 4a impetus

[2014Jilka]

longitudinal



perpendicular

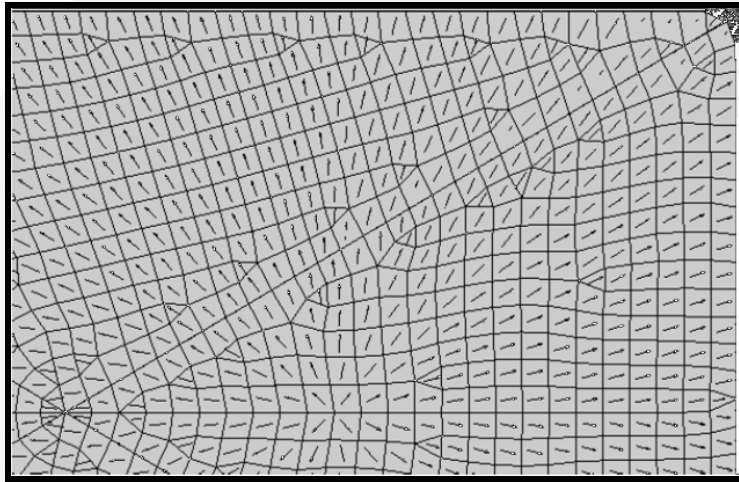


- Anpassung MAT\_157 in LSDYNA  
orthotrop elastisch + orthotrop viskoplastisches Materialmodell (Hill Plastizität)
- Versagen auf Basis von Hill Vergleichsdehnung
- Materialeigenschaften können am Integrationspunkt definiert werden.

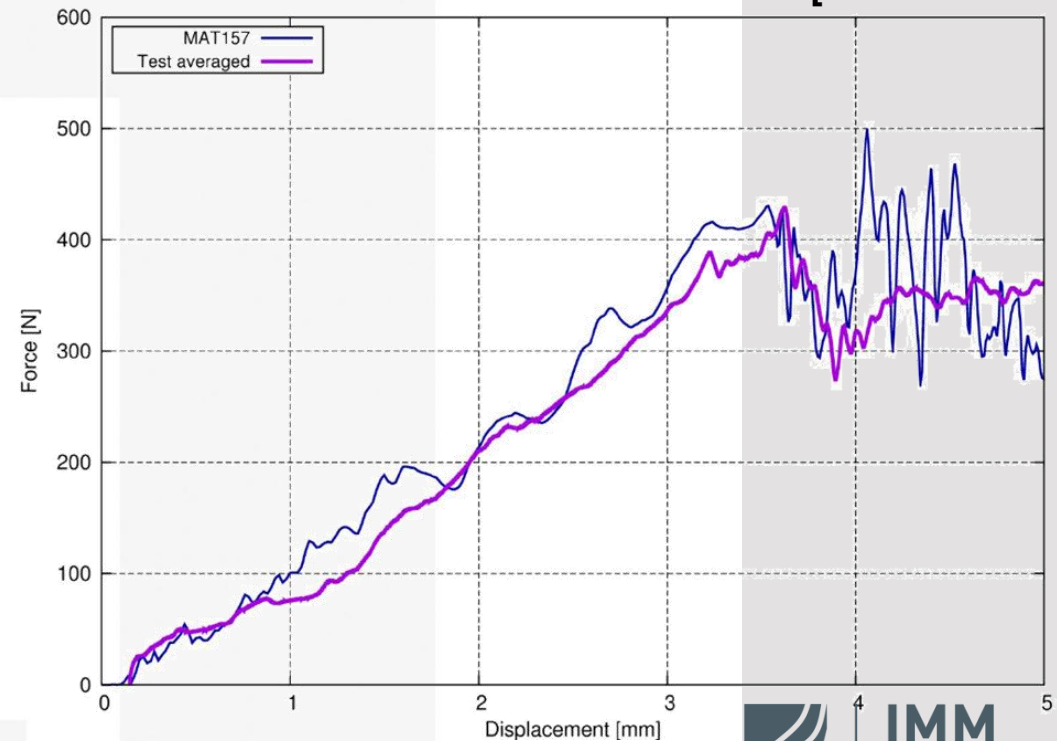
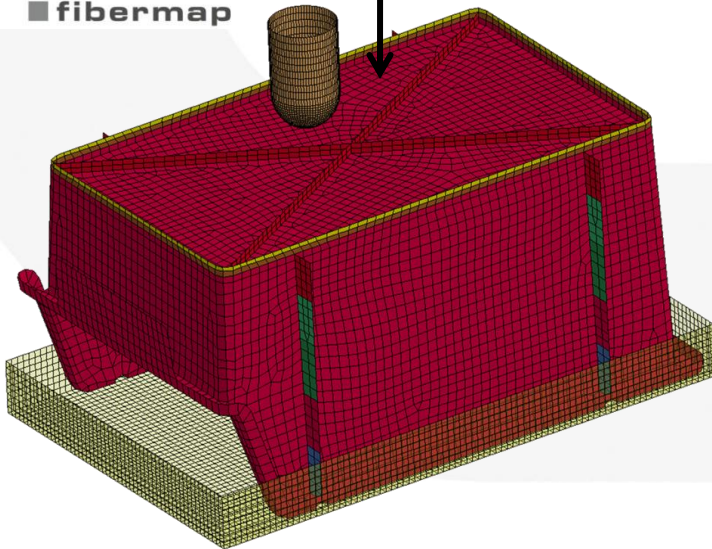
# Fallbeispiel Crash – Nutini Box

## Materialkartenerstellung – 4a impetus

[2014Jennrich]



**4a**  
fibermap



**IMM**

Institute of Mechanics  
and Materials



**Celanese**

The chemistry inside innovation™



**THM**

TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN



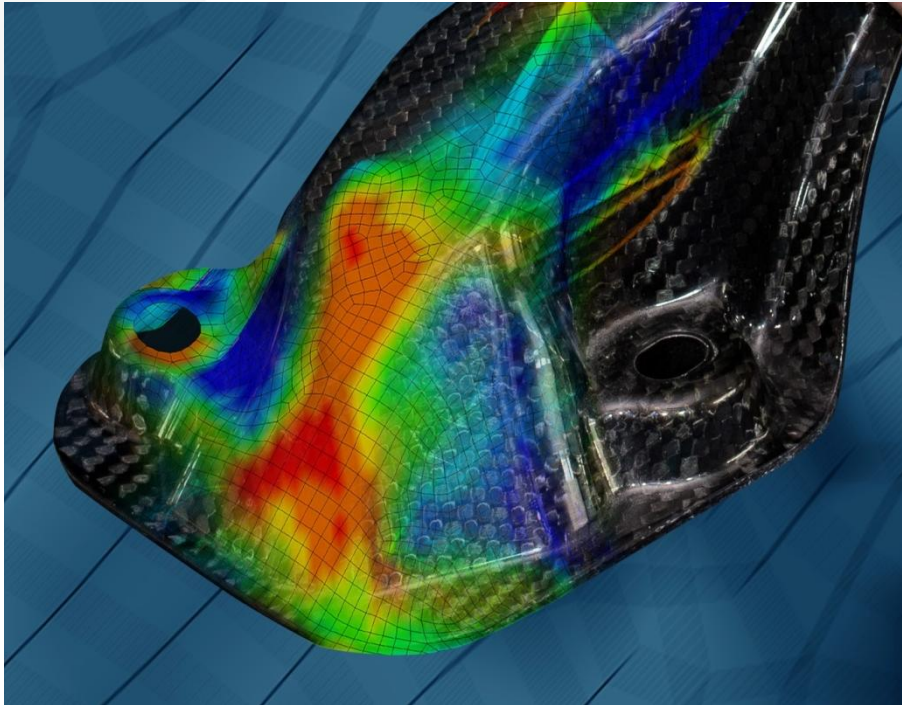
- Anhand von einigen Fallbeispielen wurde die Integrative Simulation, der Ablauf und Einflussgrößen auf sie sowie die Möglichkeiten und Grenzen erläutert.
- Mit 4a impetus, 4a micromec und 4a fibermap sowie das entsprechende Know-How dazu ist eine Komplettlösung für die Integrative Simulation im Haus vorhanden, um Bauteile möglichst realitätsnah bestmöglich mit der Simulation abzubilden.

# Veranstaltungshinweis

Der **4a TECHNOLOGIETAG** findet vom **5.- 6. März 2015** in Schladming zum insgesamt 12. Mal statt.

Das Thema heuer lautet „**Leichtbau und Composites**“.

Nähere Informationen sind auf der Homepage <http://technologietag.4a.co.at/> verfügbar.



# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



I N P H Y S I C S W E T R U S T



- [2004Reithofer]** P. Reithofer; R. Hafellner (4a engineering GmbH) – *Kurzfaserverstärkte Kunststoffbauteile - Einfluss der spritzgussprozessbedingten Faserorientierung auf die Strukturmechanik*, VIRTUAL PRODUCT DEVELOPMENT CONFERENCE & MSC.Software User Meeting 2004, München, Deutschland
- [2008Reithofer]** P. Reithofer, M. Fritz, T. Wimmer (4a engineering GmbH) – *Kurzfaserverstärkte Kunststoffbauteile - Einfluss der prozessbedingten Faserorientierung auf die Strukturmechanik*, 7. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 2008 [\(Link\)](#)
- [2011Reithofer]** P. Reithofer, T. Wimmer (4a engineering GmbH) – Integrative Simulation - Berücksichtigung der prozessbedingten Anisotropie, 8. 4a Technologietag - 2011 [\(Link\)](#)
- [2012Gramling]** M. Gramling (Audi AG), P. Reithofer (4a engineering GmbH) – *Integrative Simulation von kurzfaserverstärkten Thermoplasten am Beispiel einer Tankklappe*, 9. 4a Technologietag - 2012 [\(Link\)](#)
- [2012Reithofer]** P. Reithofer, B. Jilka, A. Fertschej (4a engineering GmbH) – *4a micromec für die integrative Simulation faserverstärkter Kunststoffe*, 11. LS-DYNA Anwenderforum, Ulm 2012 [\(Link\)](#)



- [2014Haufe]** A. Haufe (DYNAmore GmbH) – *Zum aktuellen Stand der Simulation von Kunststoffen mit LS-DYNA*, 11. 4a Technologietag - 2014 ([Link](#))
- [2014Jennrich]** R. Jennrich, M. Roth, Prof. S. Kolling (Technische Hochschule Mittelhessen) C. Liebold (DYNAmore GmbH), G. Weber (Celanese GmbH) – *Experimentelle und numerische Untersuchung eines kurzglasfaserverstärkten Kunststoffes*, 13. LS-DYNA Forum 2014, Bamberg ([Link](#))
- [2014Jilka]** P. Reithofer, B. Jilka (4a engineering GmbH), S. Hartmann, T. Erhart, A. Haufe (DYNAmore GmbH) – *Short and long fiber reinforced thermoplastics material models in LS-DYNA*, 13. LS-DYNA Forum 2014, Bamberg ([Link](#))