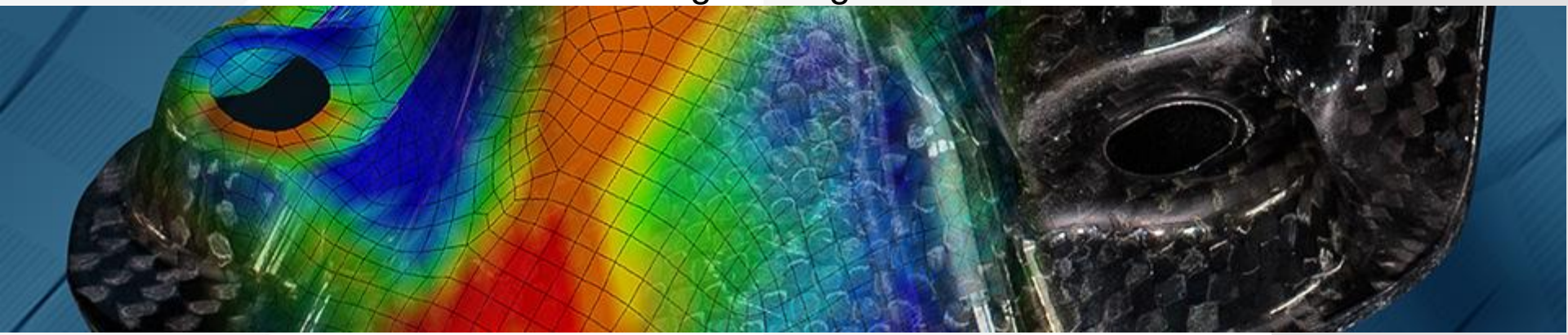
Möglichkeiten und Grenzen der integrativen Simulation von kurz- und langglasfaserverstärkten Kunststoffen

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



4a Technologietag 2015

Leichtbau und Composites

5. - 6. März 2015

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

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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Inhalt

- 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

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

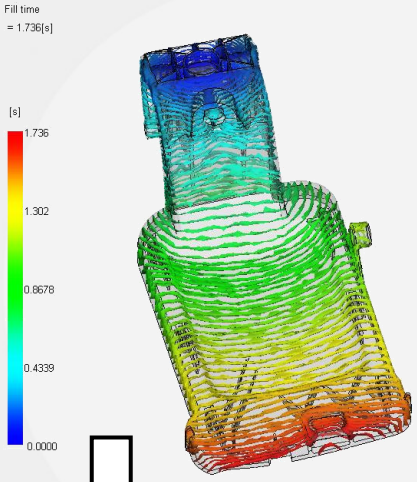
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Einleitung
Integrative Simulation

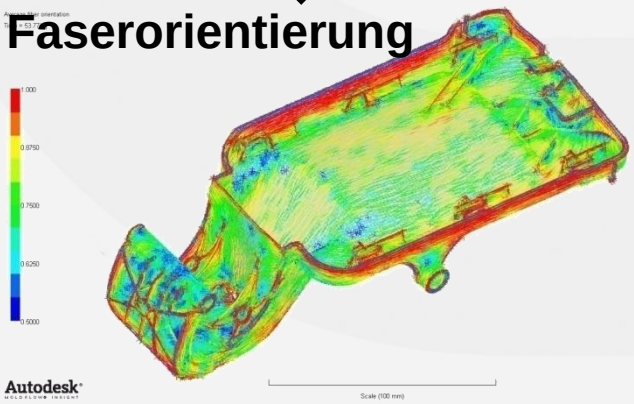
[2012Gramling]

Prozesssimulation

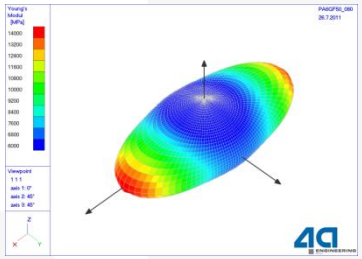
Füllung



Faserorientierung



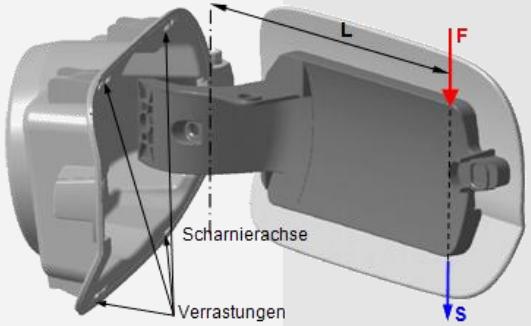
Mapping

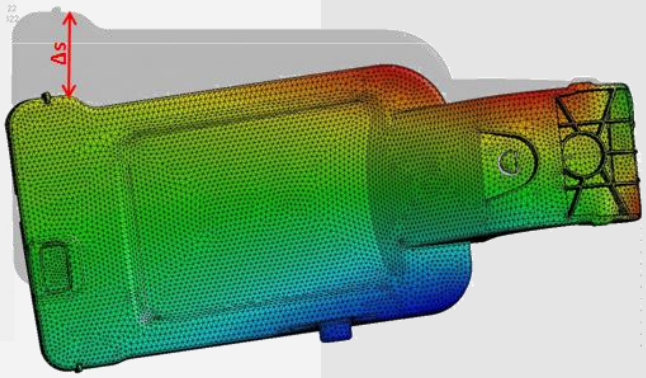


Übertragung der lokalen Anisotropien

Struktursimulation

Biegung



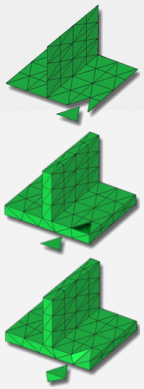


I N P H Y S I C S W E T R U S T

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Einleitung
Integrative Simulation

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

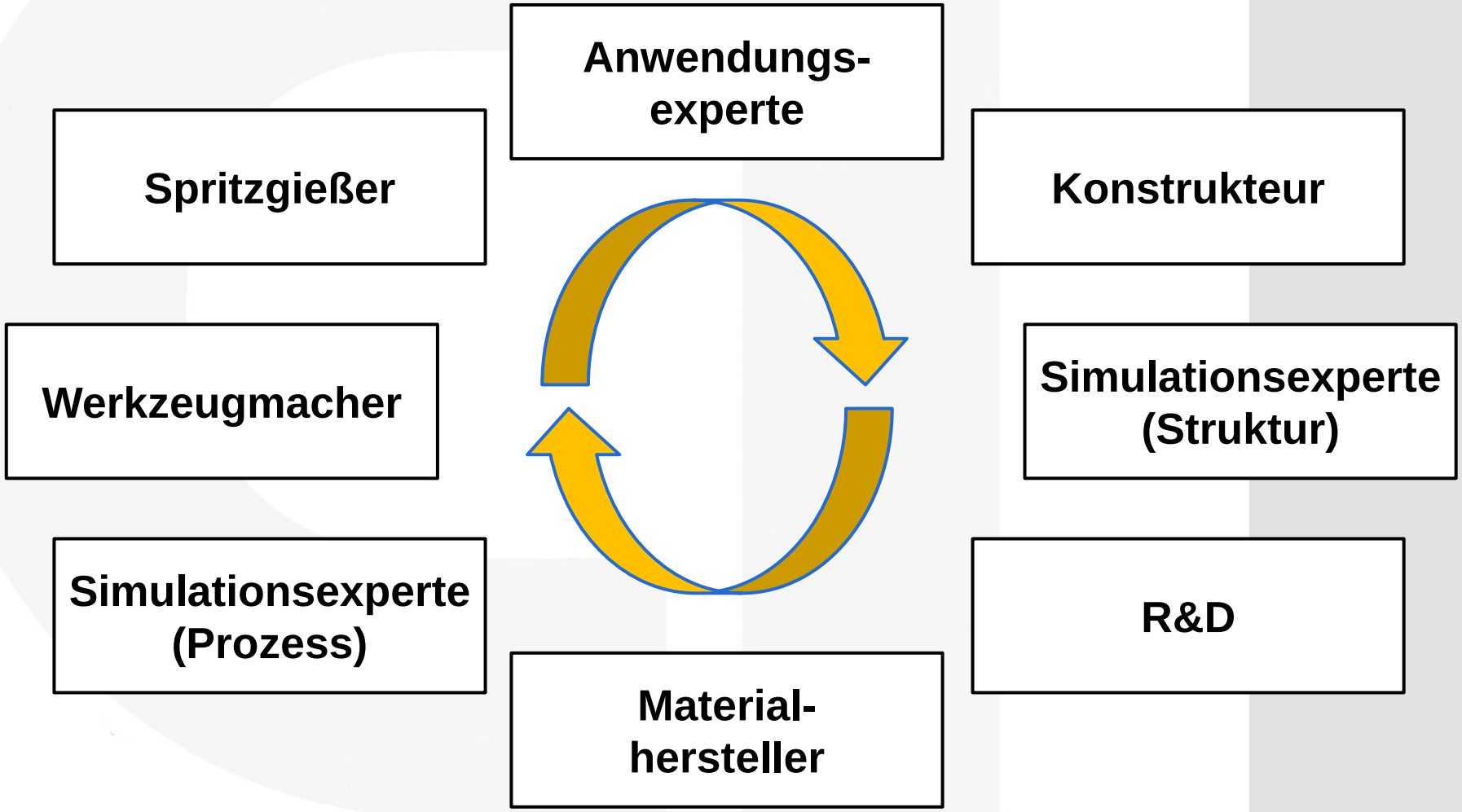
Vielzahl an Vorgehensweisen & Einstellmöglichkeiten

Validierung der gesamten Prozesskette erforderlich

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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Einleitung
Integrative Simulation



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

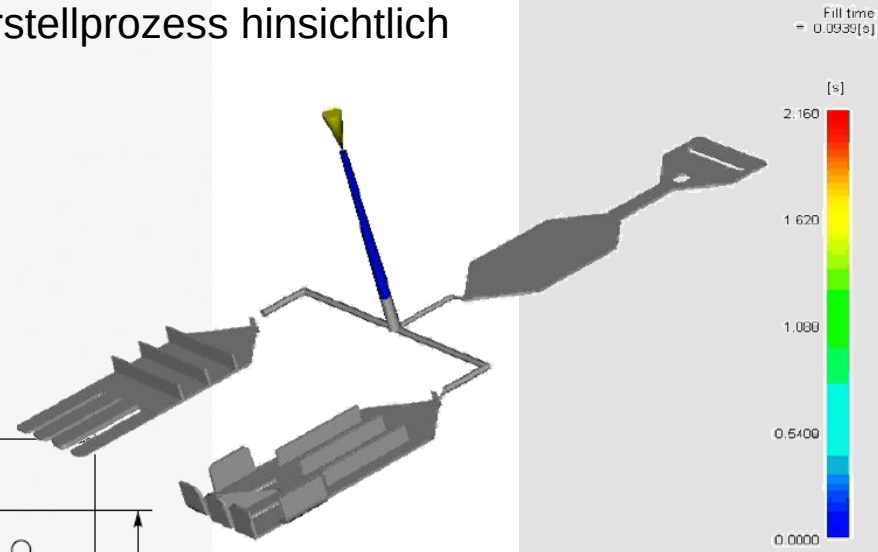
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

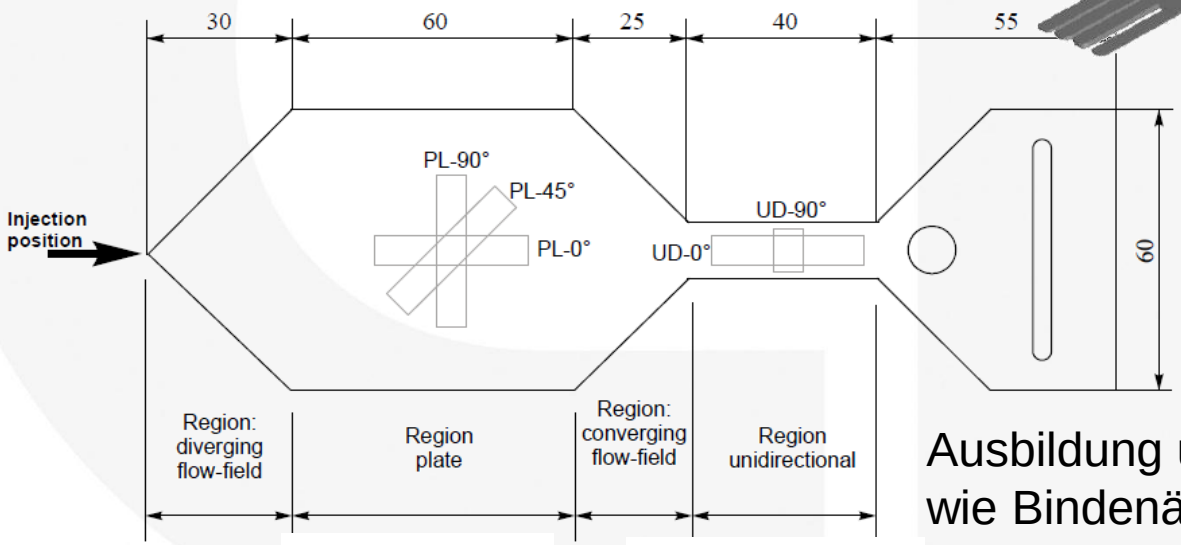
Prozesssimulation
Forschungsform

Spritzgusssimulationen bieten die Möglichkeit den Herstellprozess hinsichtlich

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

zu untersuchen.

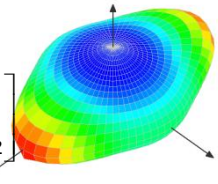


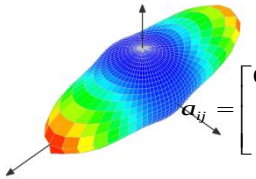


ck testing component

Ausbildung unterschiedlicher Anisotropien wie Bindenähte oder Faserorientierung.

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





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

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

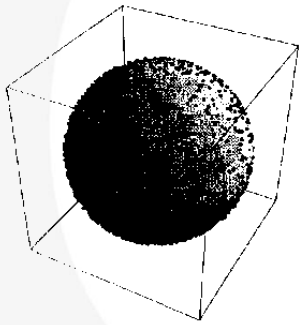
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Prozesssimulation
Faserorientierung

- Wahrscheinlichkeit eine Faser im Raum anzutreffen
  typische Beschreibungsformen

Dichteanhäufung

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



Tensor Global

$$a_{XX} + a_{YY} + a_{ZZ} = 1$$

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

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

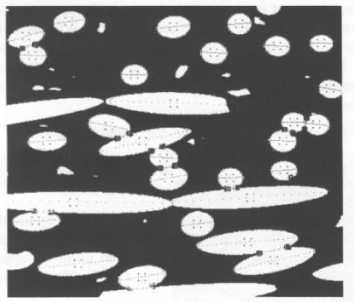
Eigenwerte/-vektoren

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

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

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

- Messung der Faserorientierung
  - Schliffbilder (mehrere 1000 Fasern pro Messung)
  - REM
  - µ-CT



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

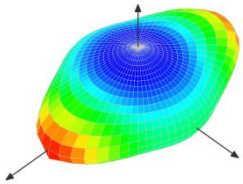
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

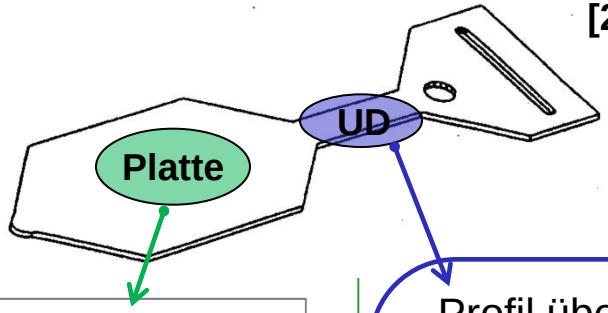
Prozesssimulation
Faserorientierung in typischen Bereichen

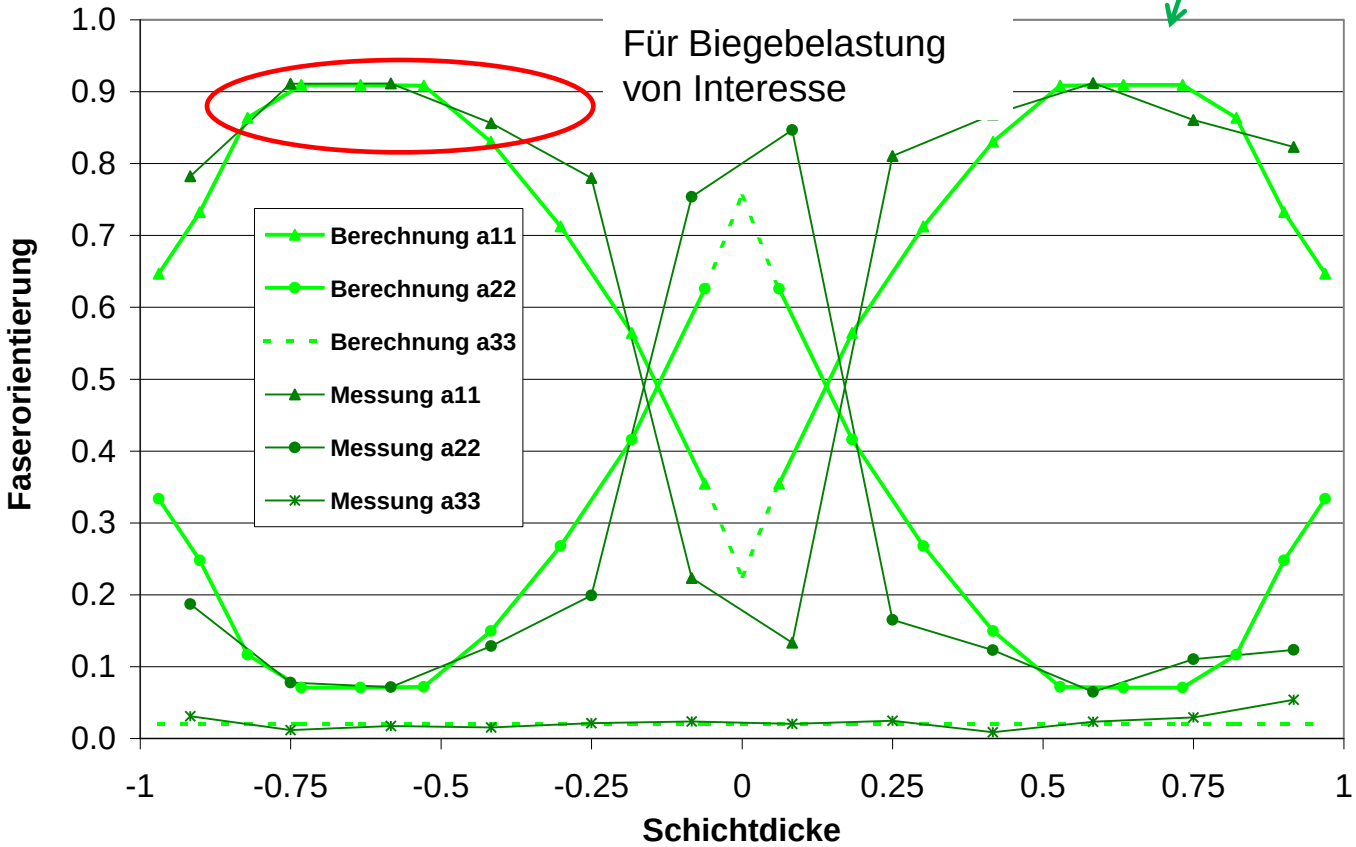
[2004Reithofer]

Mittlere FO in Tensorform

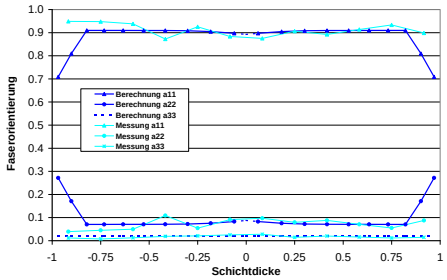
$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 0{,}66 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}32 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}02 \end{bmatrix}$$





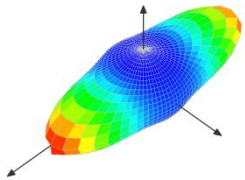


Profil über der Dicke



Mittlere FO in Tensorform

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

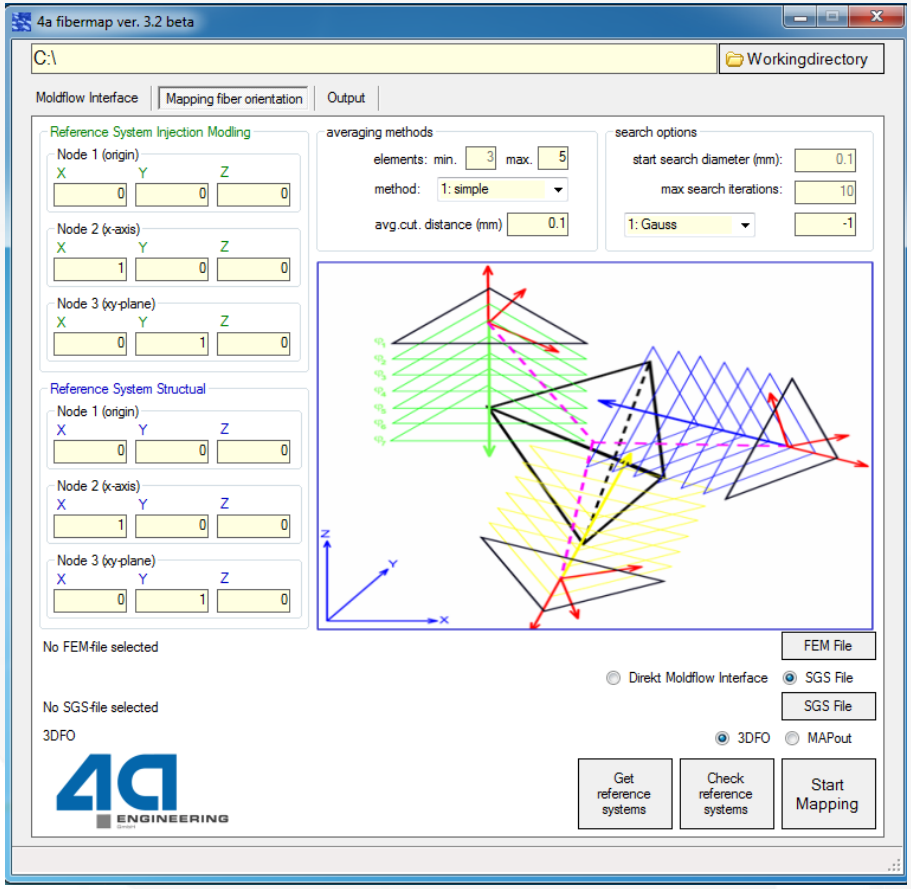


I N P H Y S I C S W E T R U S T

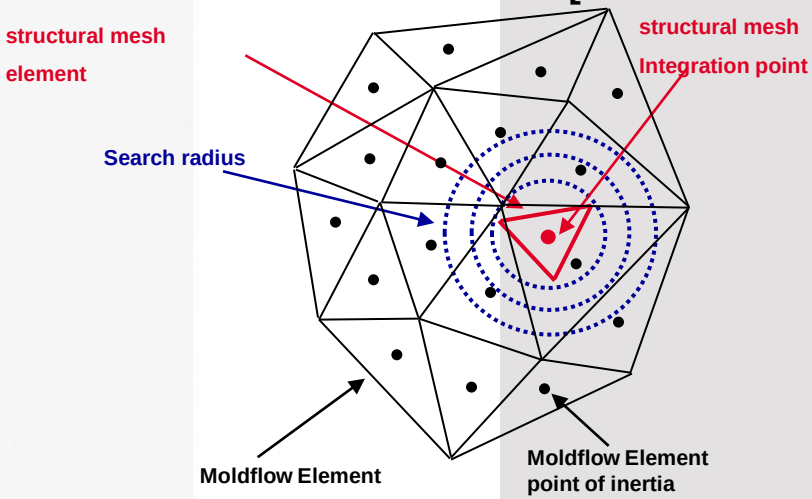
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

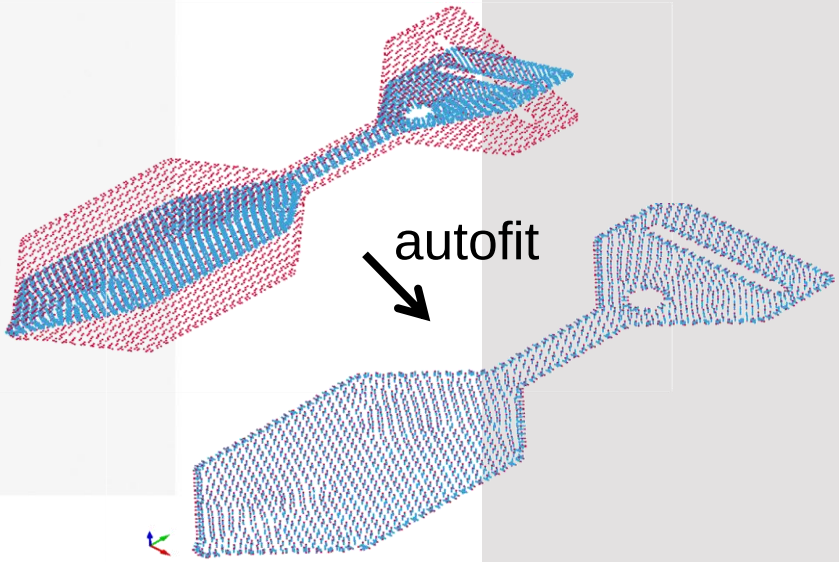
Integrative Simulation – 4a fibermap

Mapping



[2012Reithofer]





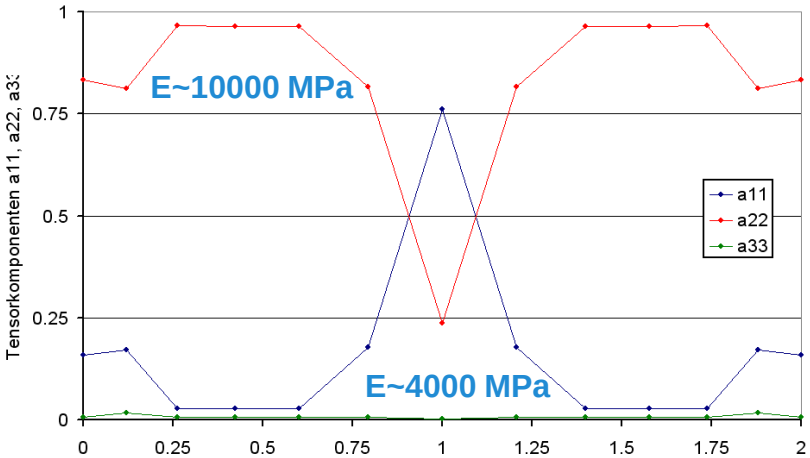
I N P H Y S I C S W E T R U S T

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

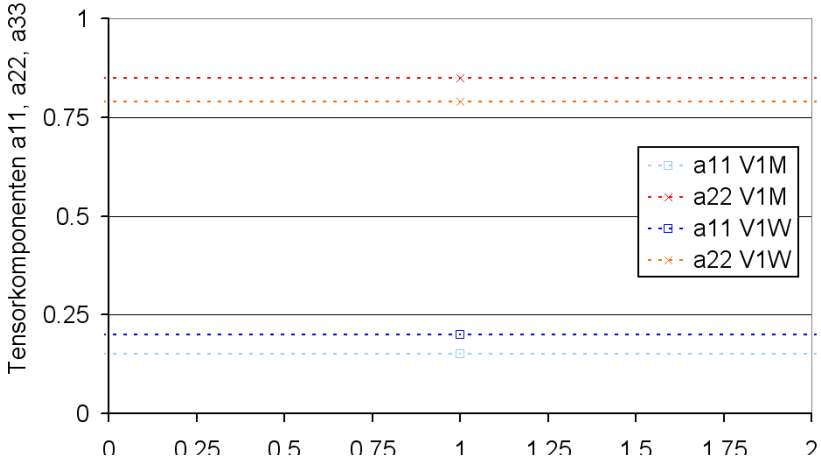
Integrative Simulation – 4a fibermap

Mapping

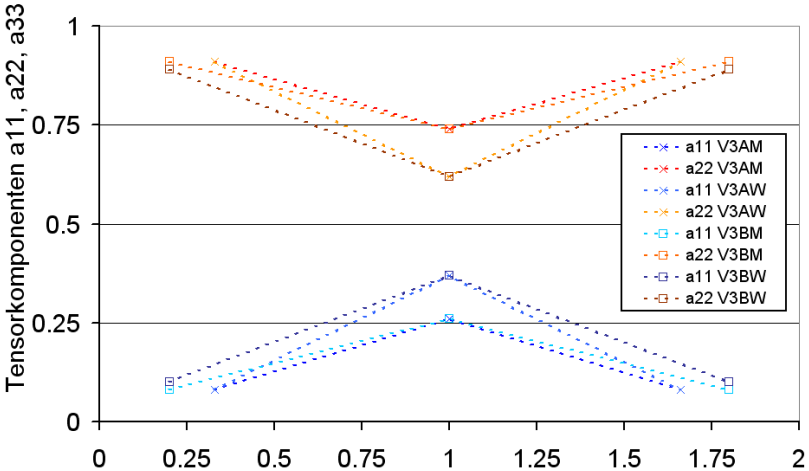
[2012Reithofer]



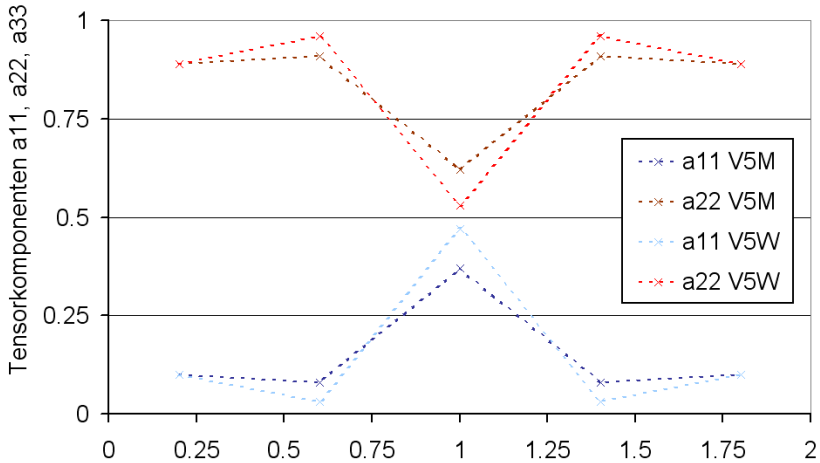
Ergebnis Spritzgusssimulation



1 Materialpunkt über der Wanddicke



3 Materialpunkte über der Wanddicke

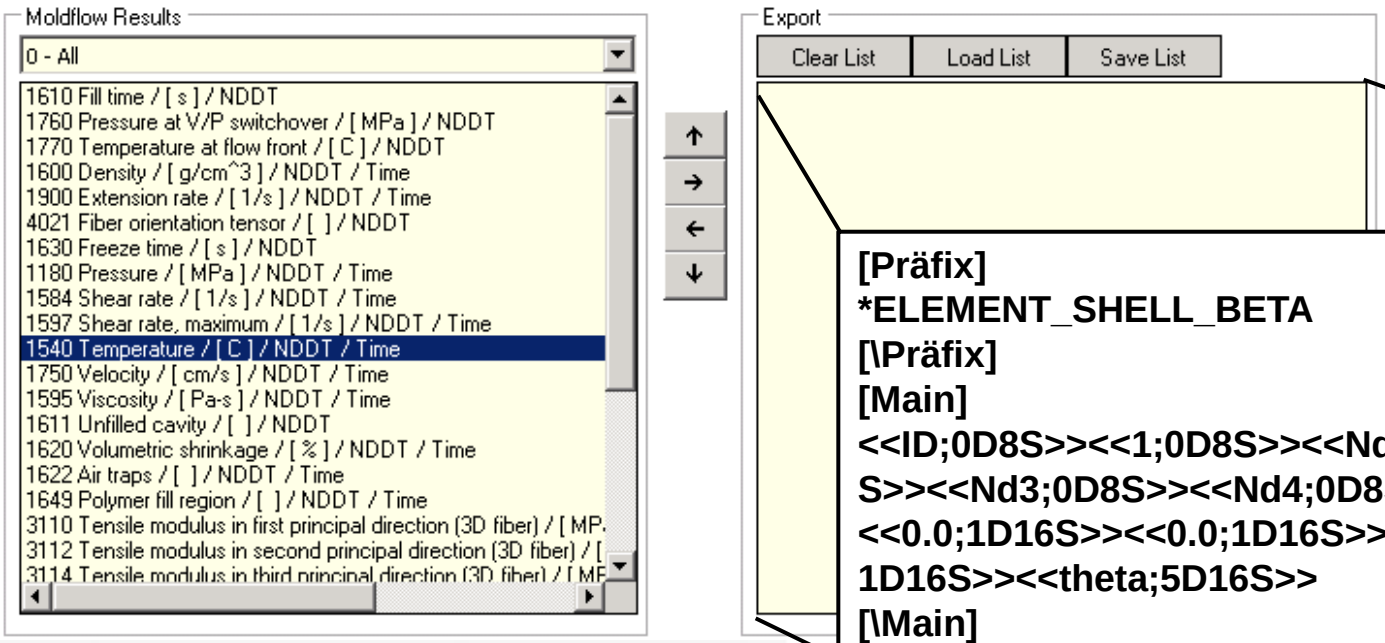


5 Materialpunkte über der Wanddicke

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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

- Schnittstellen zu Moldflow und Moldex



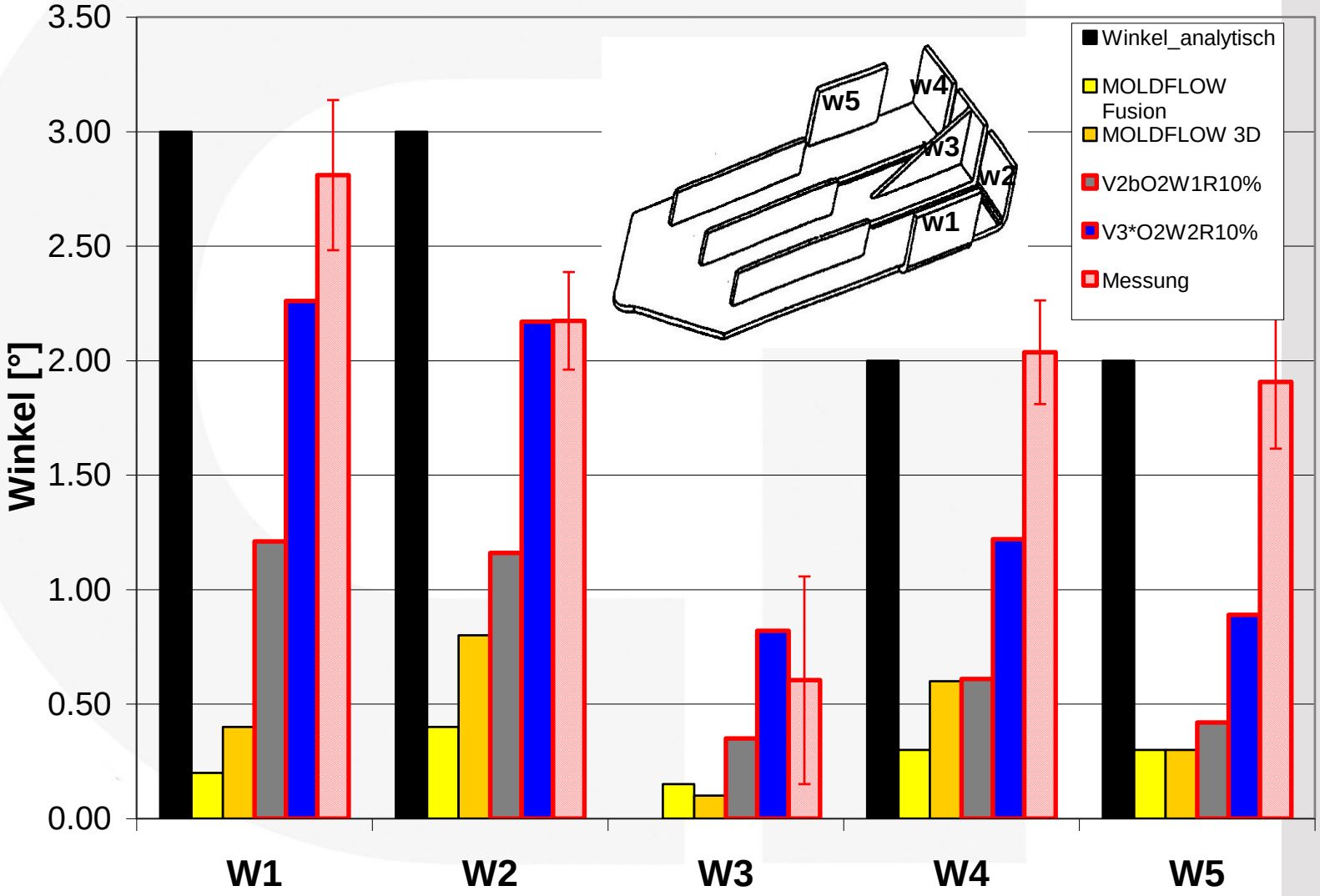
[Präfix]
***ELEMENT_SHELL_BETA**
[\Präfix]
[Main]
<<ID;0D8S>><<1;0D8S>><<Nd1;0D8S>><<Nd2;0D8S>><<Nd3;0D8S>><<Nd4;0D8S>>
<<0.0;1D16S>><<0.0;1D16S>><<0.0;1D16S>><<0.0;1D16S>><<theta;5D16S>>
[\Main]

- Ausgabe individuell einstellbar
  - Faserorientierung → Usermaterial
  - Inputdecks z.B. Nastran, LSDYNA, Abaqus, ….

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Winkelverzug
Forschungsform

[2004Reithofer]

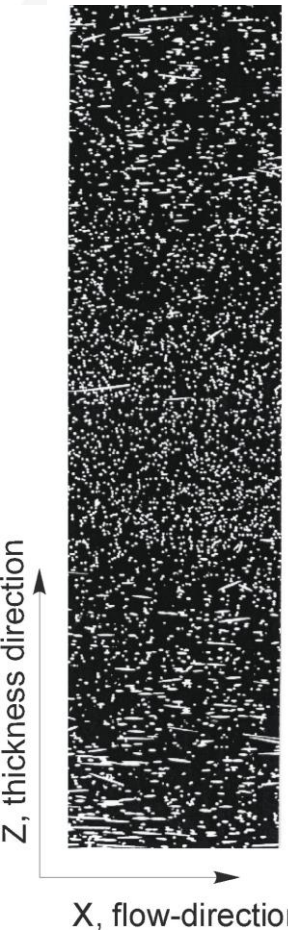


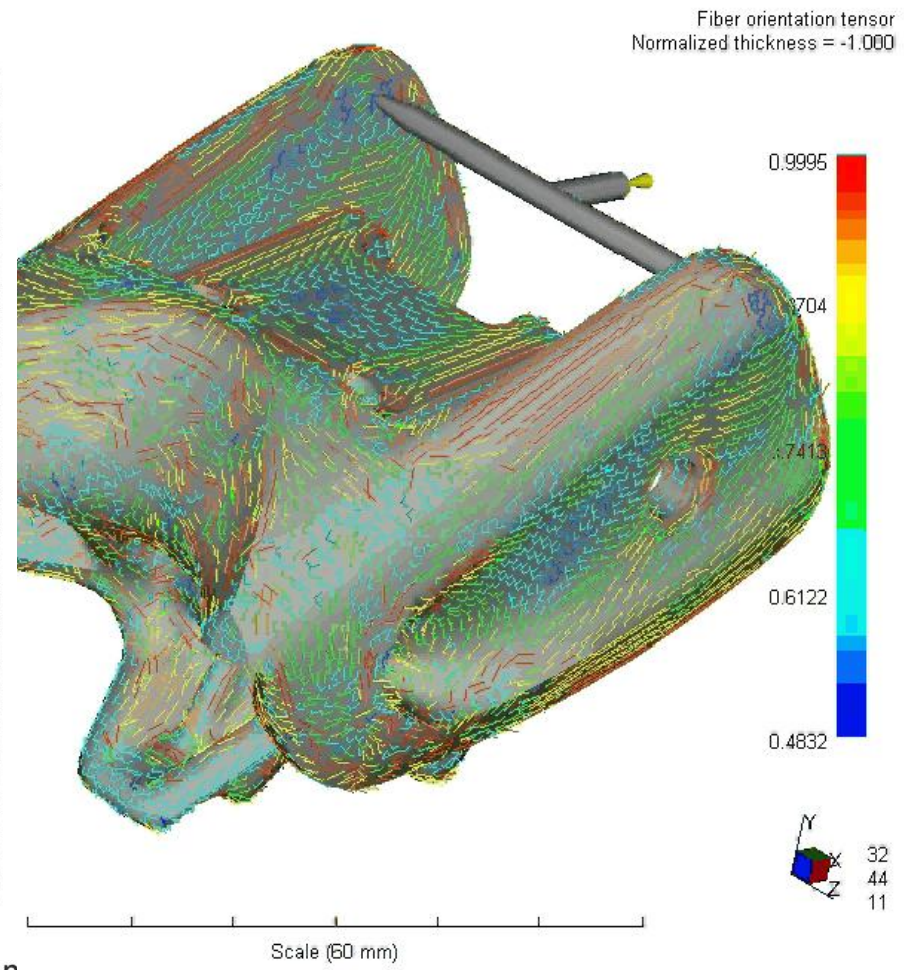
I N P H Y S I C S W E T R U S T

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Sohlenhalter
Verzug

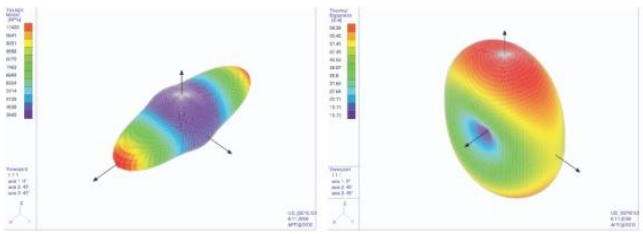
[2004Reithofer]

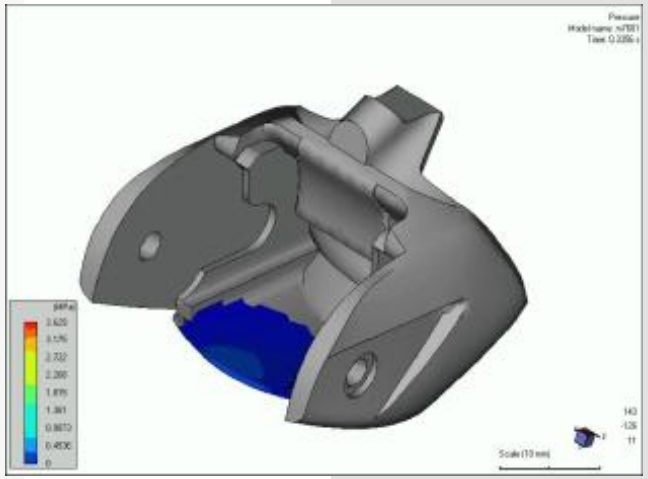




Materialeigenschaften

(faserverstärkt → richtungsabhängig)



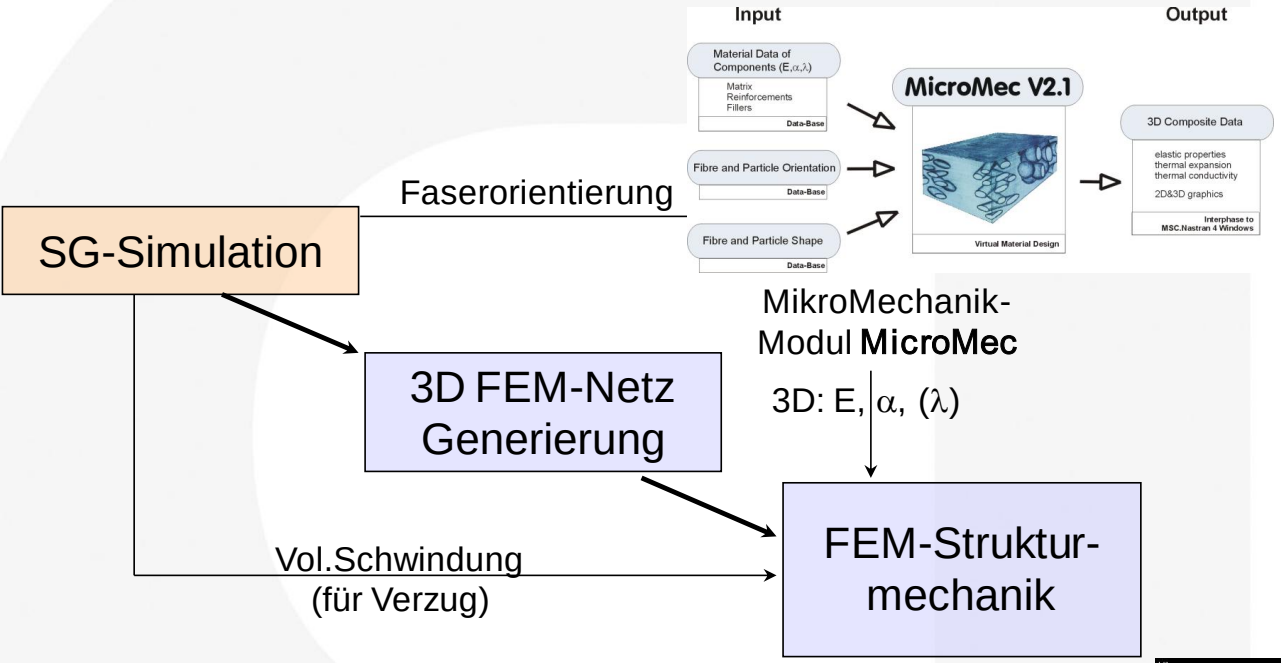


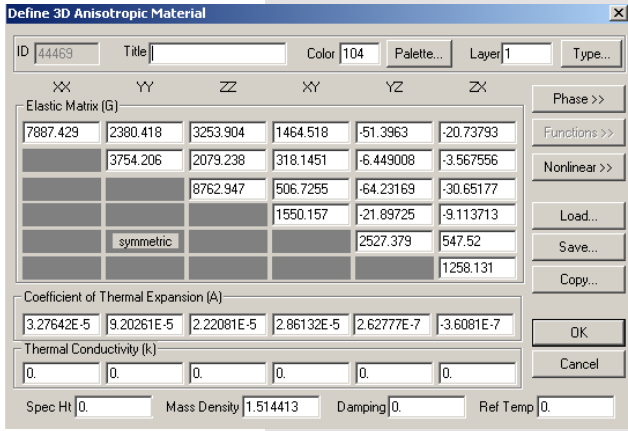
I N P H Y S I C S W E T R U S T

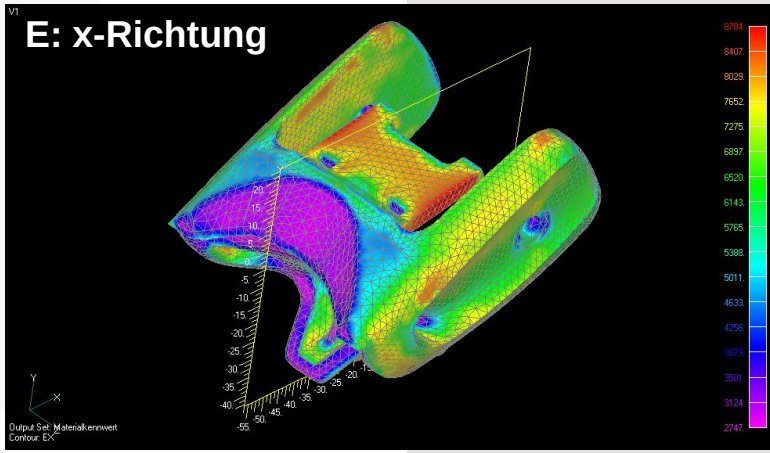
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Sohlenhalter
Verzug

[2004Reithofer]







Für jedes 3D-Element:

- globale Faserorientierung
- anisotropes Material
- Property

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Sohlenhalter
Möglichkeiten + Grenzen

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

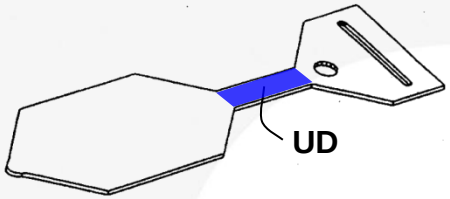
I N P H Y S I C S W E T R U S T

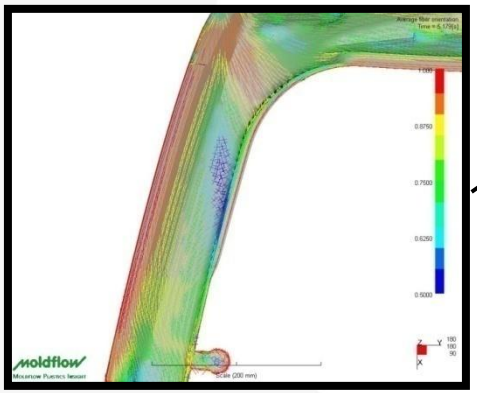
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

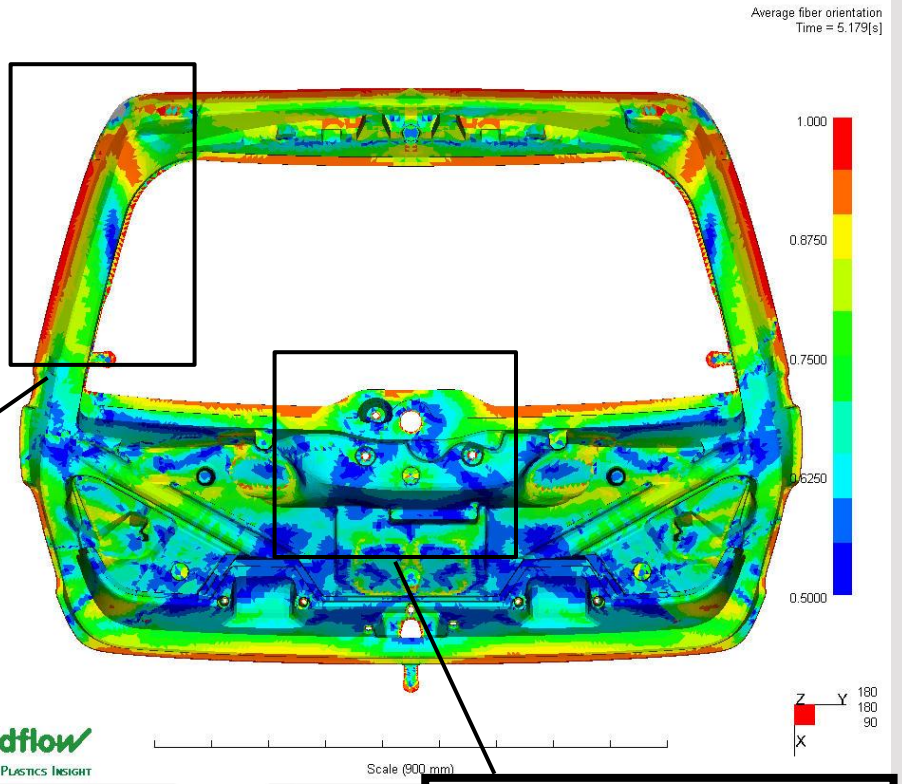
Fallbeispiel Heckklappe

Steifigkeit / Eigenfrequenz

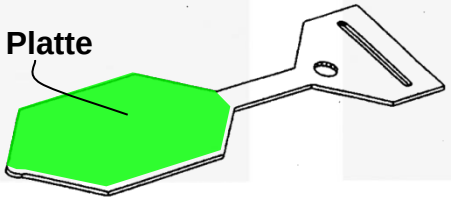
[2011Reithofer]

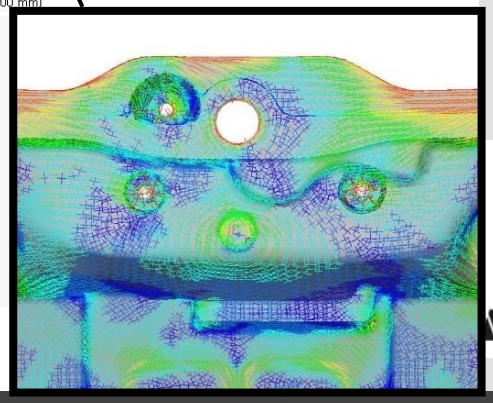






Analogie zu Platten-Bereich





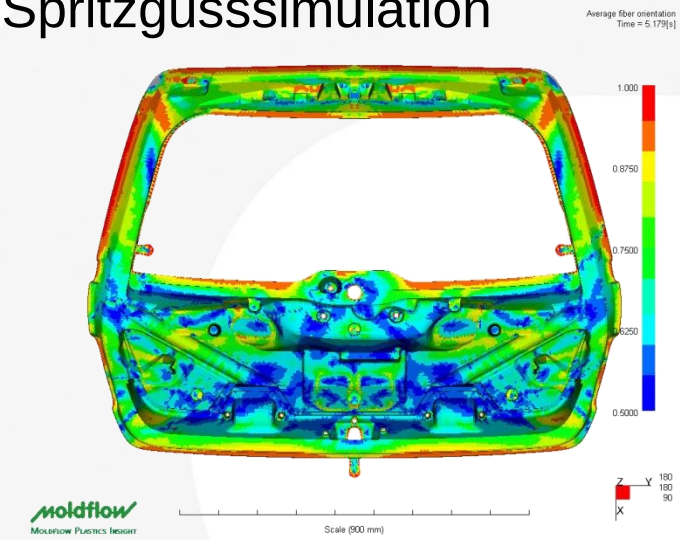
I N P H Y S I C S W E T R U S T

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

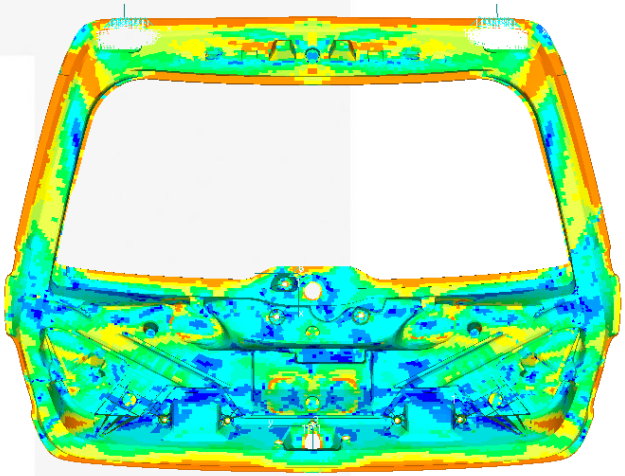
Fallbeispiel Heckklappe
Mapping Faserorientierung

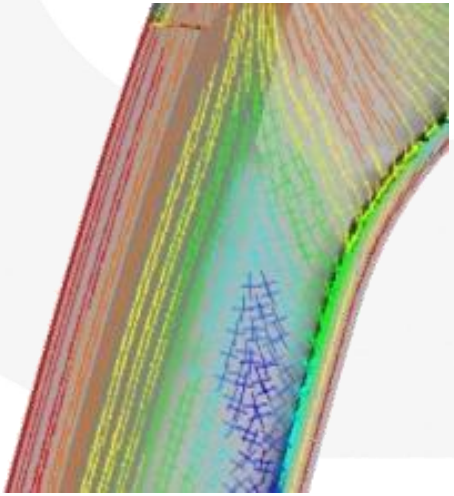
[2011Reithofer]

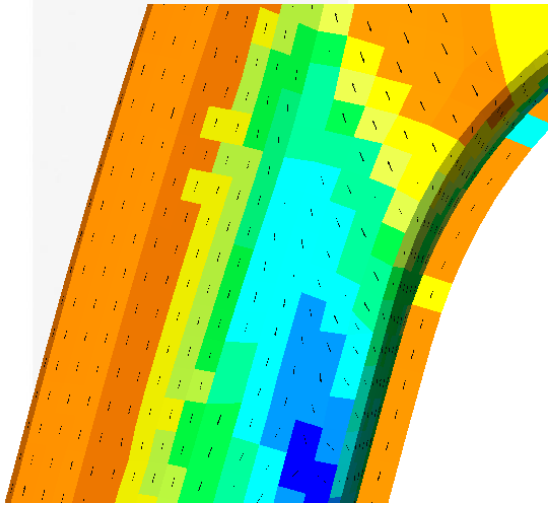
Spritzgusssimulation



gemappt in Struktursimulation







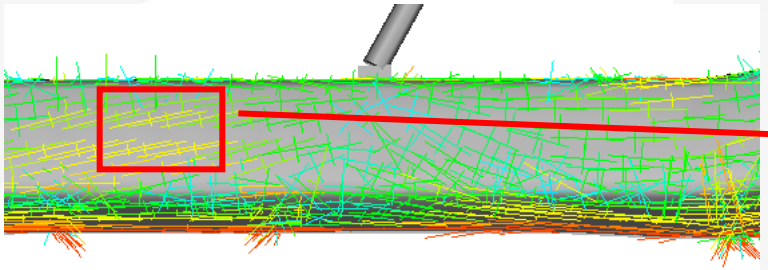
I N P H Y S I C S W E T R U S T

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Heckklappe
Mapping Orientierung

[2011Reithofer]

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



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

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

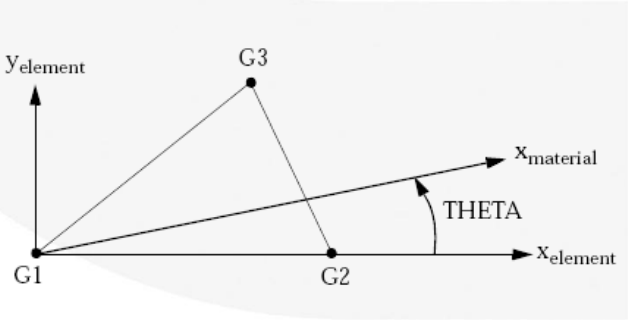


Figure 8-64 CTRIA3 Element Geometry and Coordinate Systems

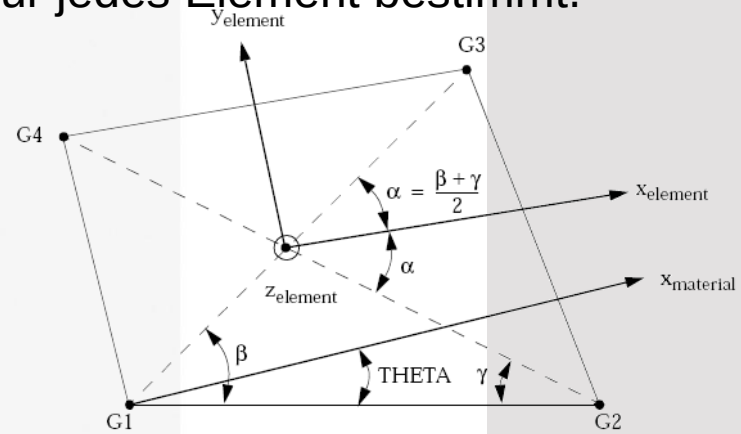


Figure 8-45 CQUAD4 Element Geometry and Coordinate Systems

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

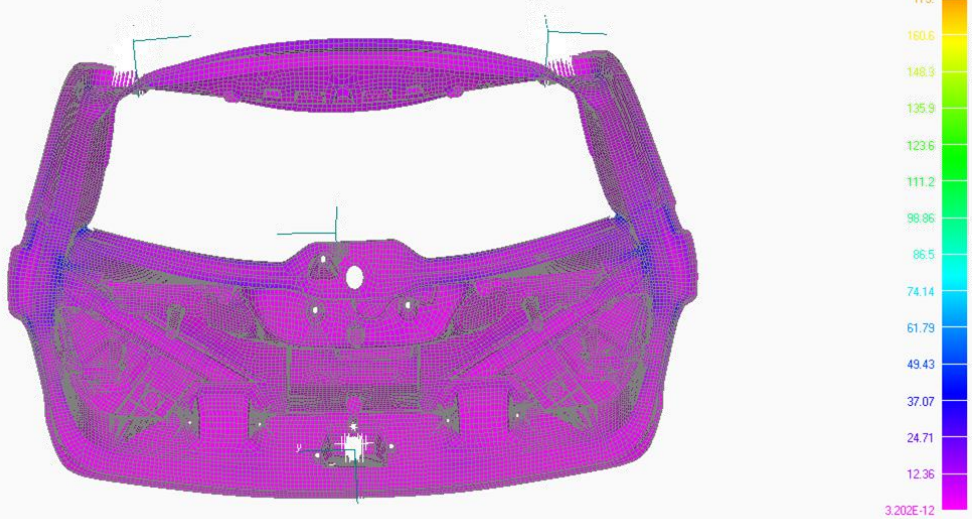
Fallbeispiel Heckklappe
Validierung Bauteilversuch

[2011Reithofer]

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

Messung der Eigenfrequenz mit
Hilfe eine Exzenters

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



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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Heckklappe
Möglichkeiten & Grenzen

[2011Reithofer]

- 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)

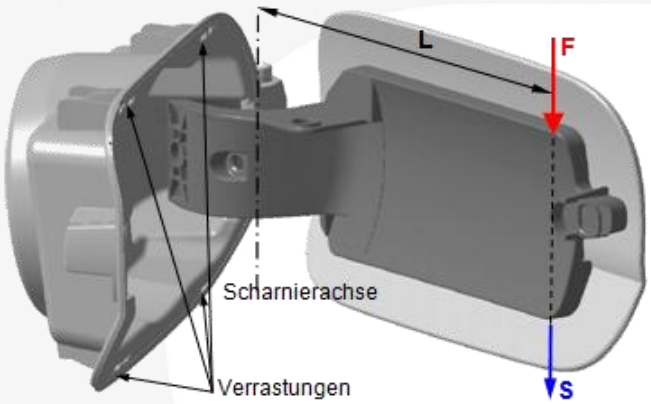
I N P H Y S I C S W E T R U S T

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

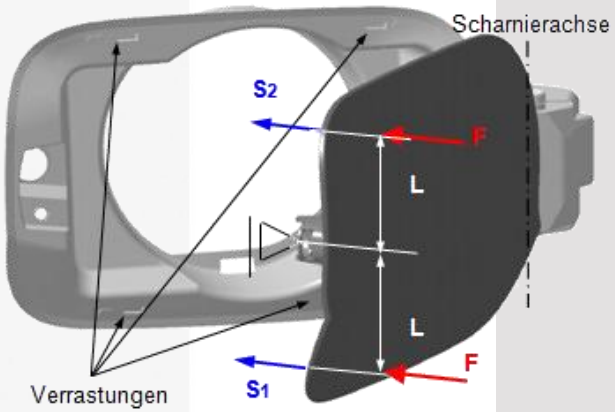
Fallbeispiel Tankklappe
Steifigkeit / Festigkeit

[2012Gramling]

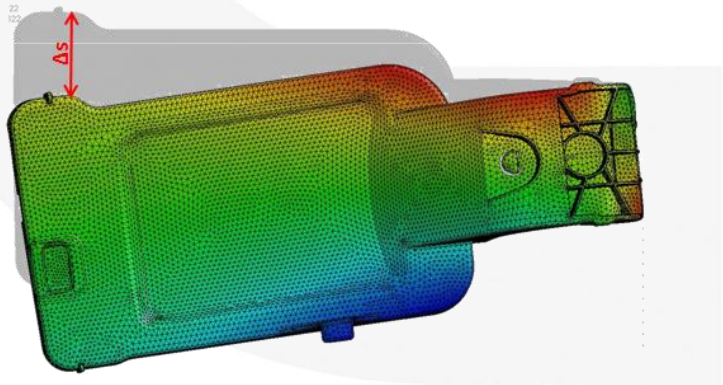
Biegesteifigkeit



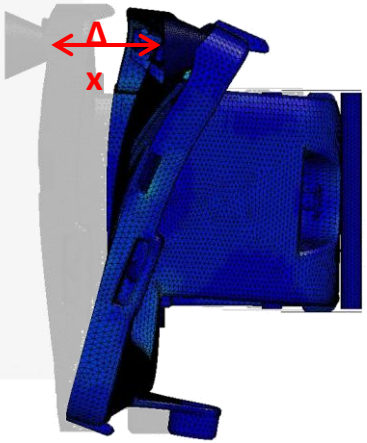
Torsionssteifigkeit



Vergleichslastfall



Vergleichslastfall



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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

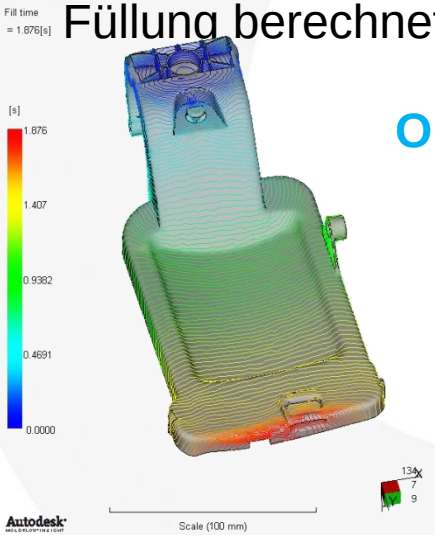
Fallbeispiel Tankklappe
Ablaufschema Schnittstelle LS DYNA

[2012Gramling]

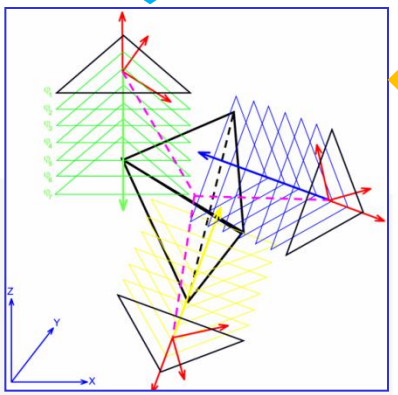
Windows basierend

SGS-Simulation
MPI Fusion

Füllung berechnet



Orientierung



Mapping

Koordinatentransformation

Mapping der Orientierung

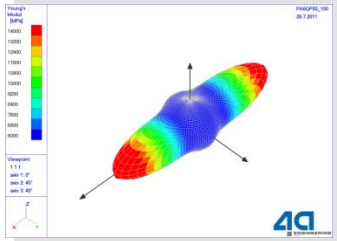
Erstellung der Properties

LS DYNA Inputdeck
Solidmesh

Einlesen der Netzinformationen

→ Schwerpunkt

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



Berechnung

Ergebnisse

Autor: Peter Reithofer, Bernhard Jilka, Artur Fertschej
Datum: 150303
Titel: rep_15030301_pr_bj1a_afer_gga_IntegrativeSimulation.ppt

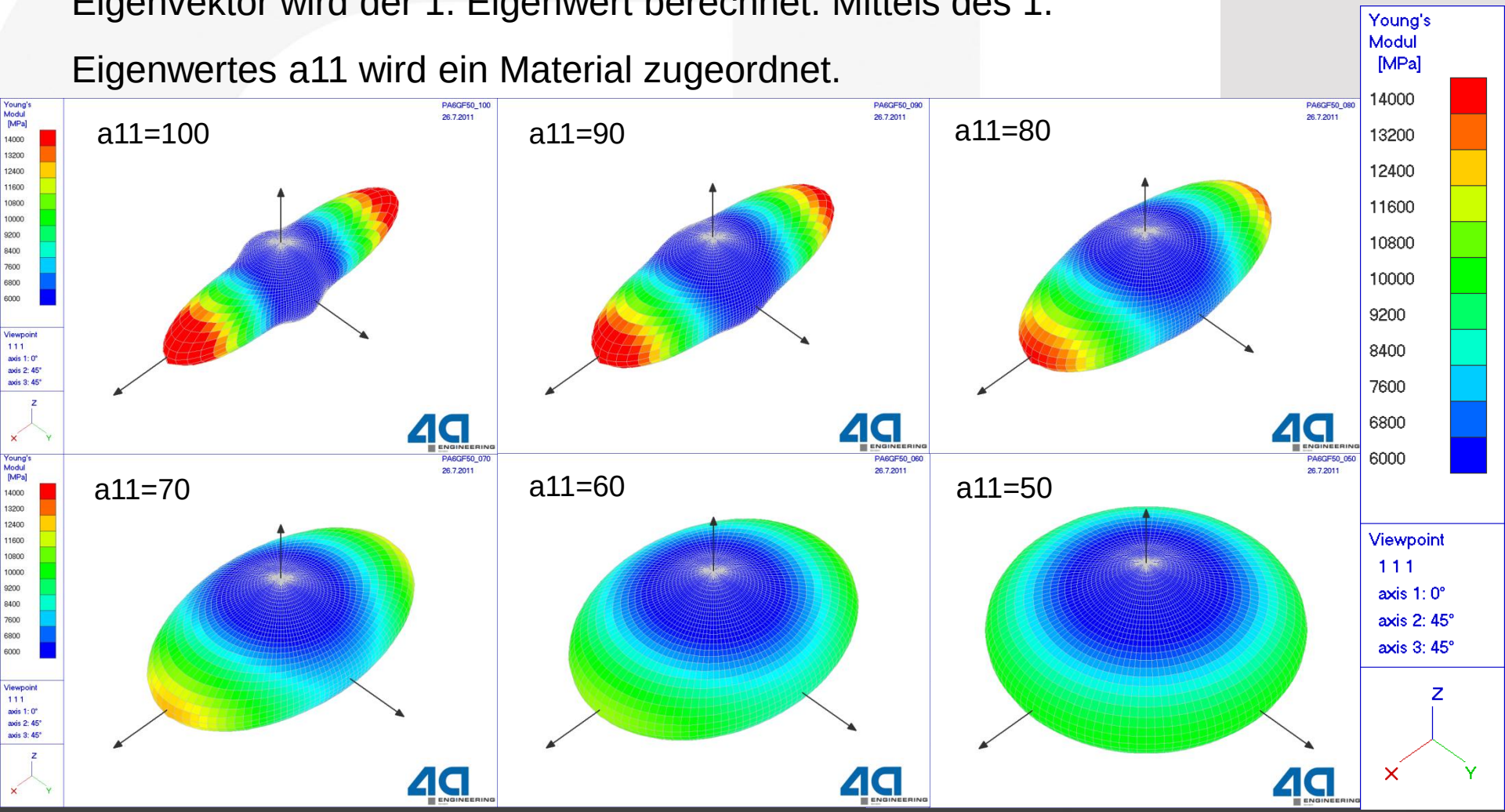
I N P H Y S I C S W E T R U S T

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Tankklappe
orthotropes gemapptes Material

[2012Gramling]

- Mittlere Faserorientierung wird analog gemappt. Neben dem 1. Eigenvektor wird der 1. Eigenwert berechnet. Mittels des 1. Eigenwertes a11 wird ein Material zugeordnet.



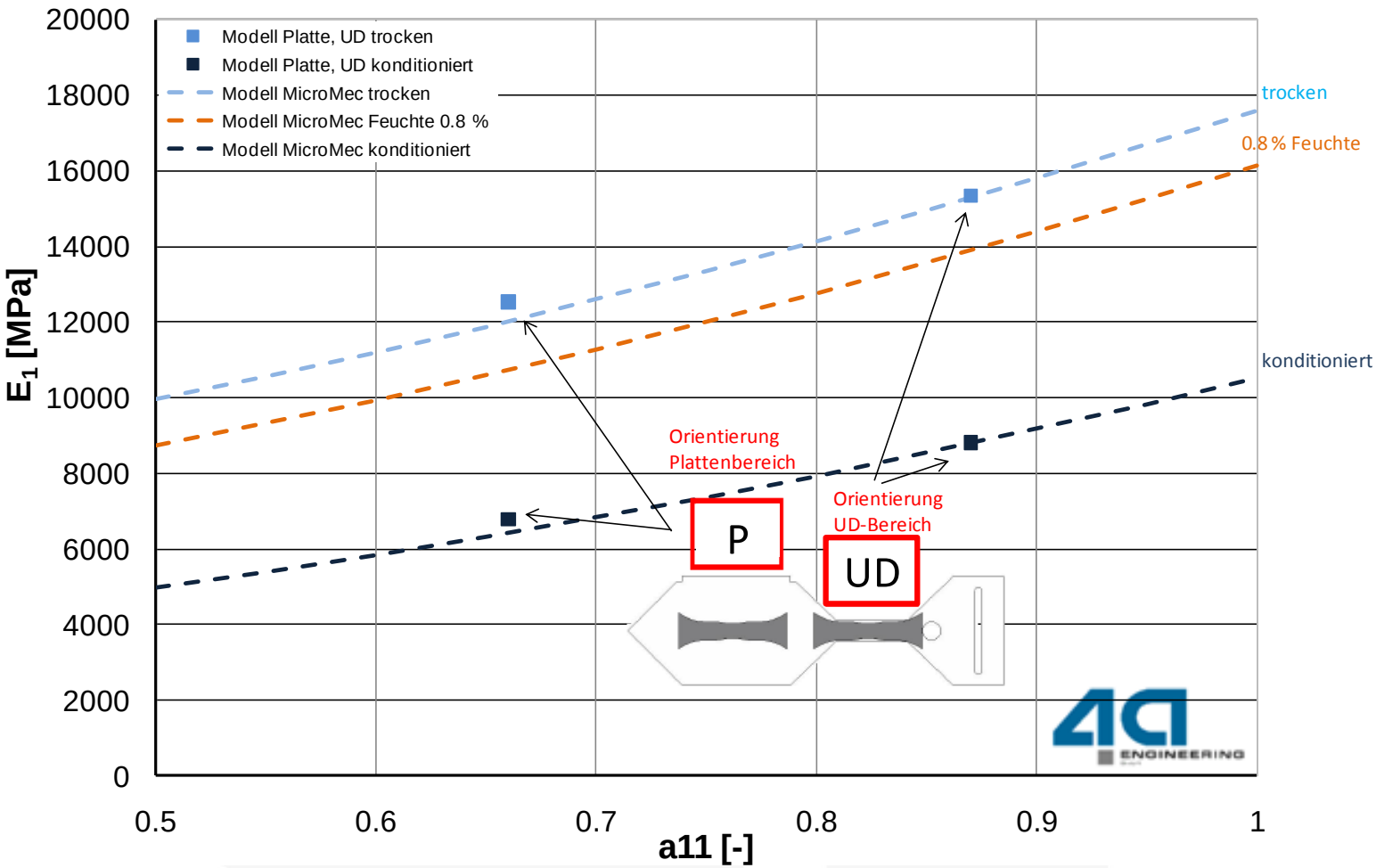
I N P H Y S I C S W E T R U S T

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Tankklappe

Überprüfung Orientierungs- und Feuchteeinfluss

[2012Gramling]



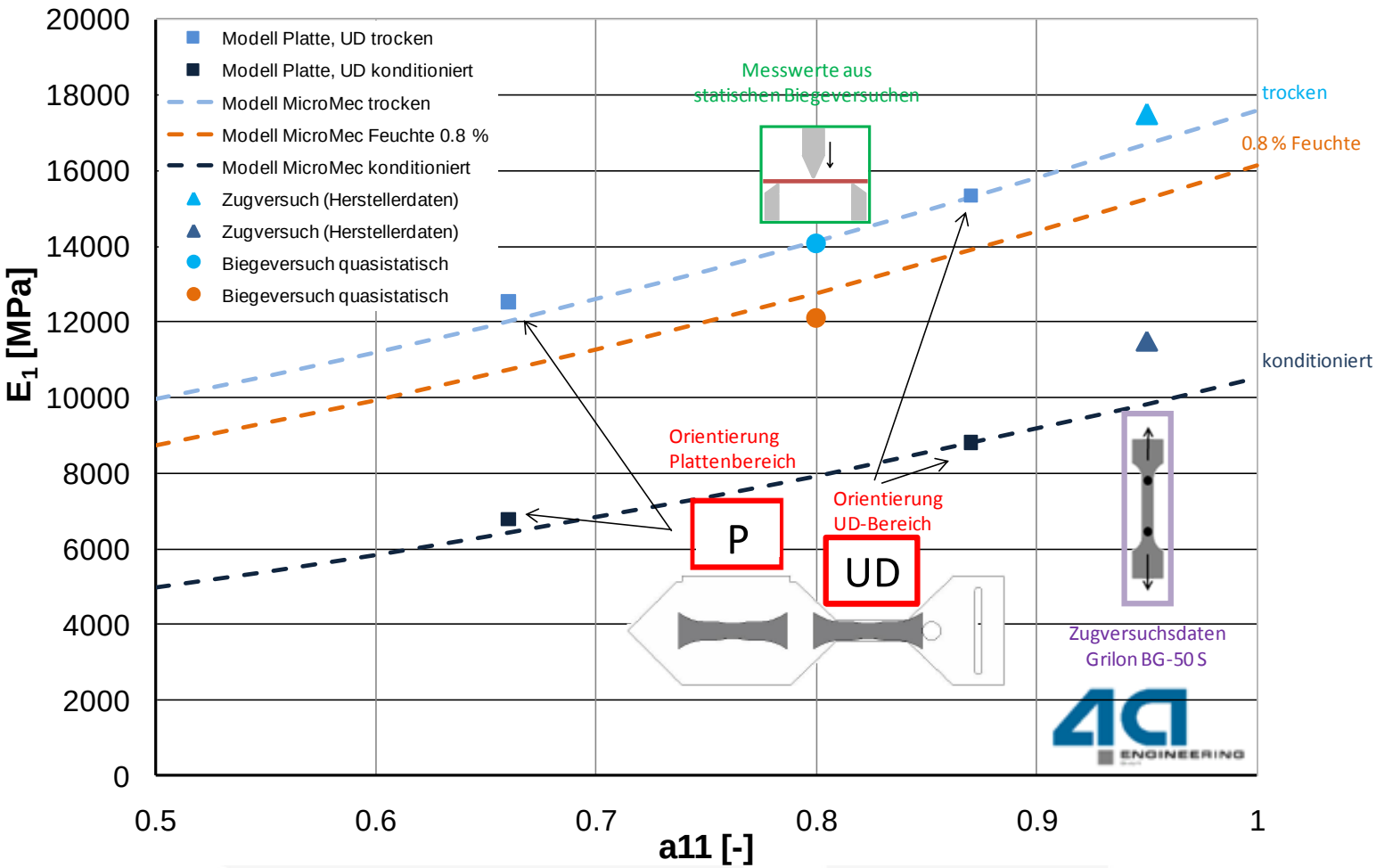
I N P H Y S I C S W E T R U S T

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Tankklappe

Überprüfung Orientierungs- und Feuchteeinfluss

[2012Gramling]



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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Tankklappe

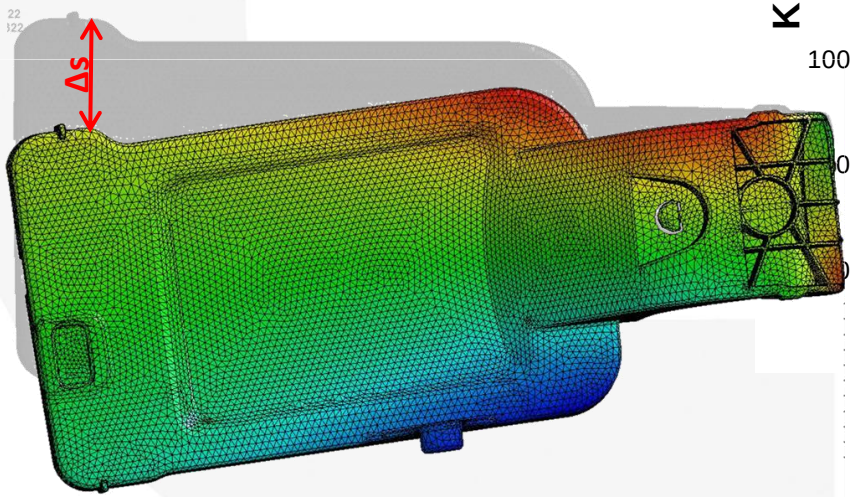
Vergleich Bauteilprüfung – Ergebnisse aus Biegesimulation

[2012Gramling]

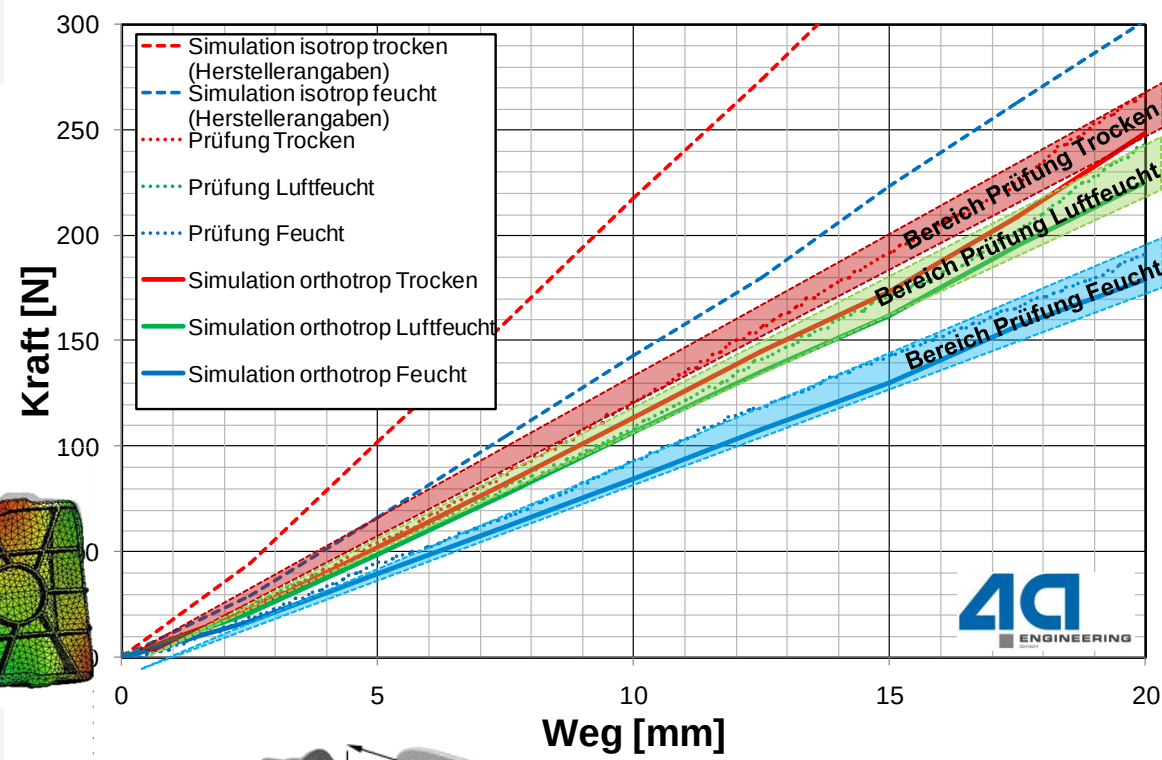
Version : ls971d R5.1.1

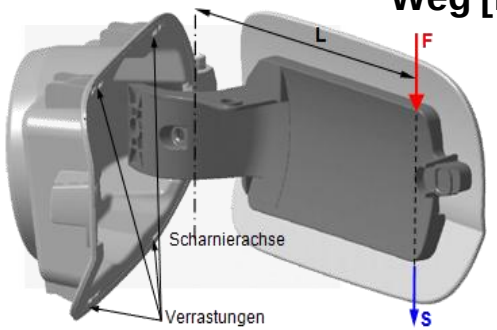
Revision: 65543

Elementanzahl: 206.142



Lastfall Biegung





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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

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

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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Crash – Nutini Box

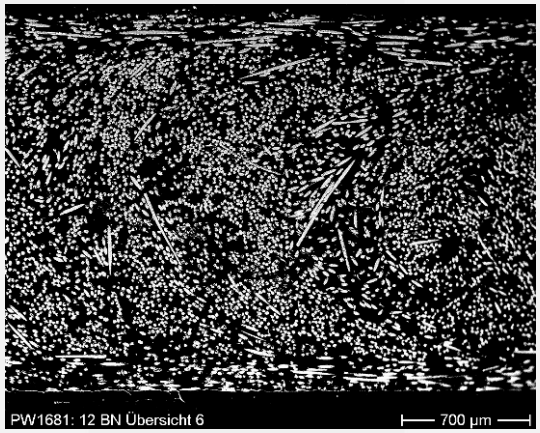
Dynamisches Werkstoffverhalten

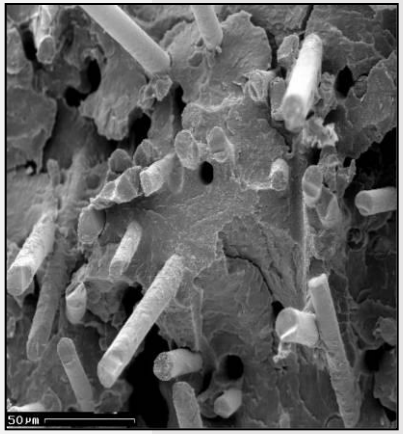
[2014Haufe]

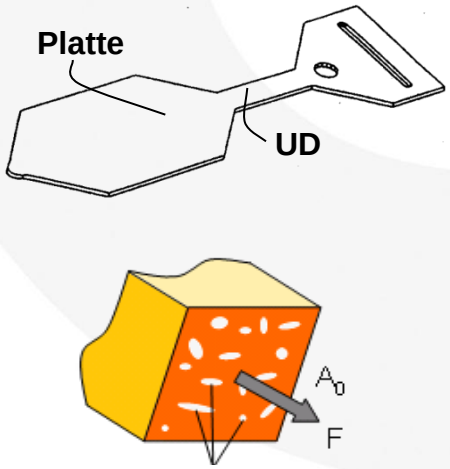
Wesentliche Einflussgrößen sind Fasergehalt und -form. Mit steigendem Fasergehalt steigt der Einfluss der Orthotropie und sinkt der anteilige matrixbedingte Einfluss der Dehnrate.

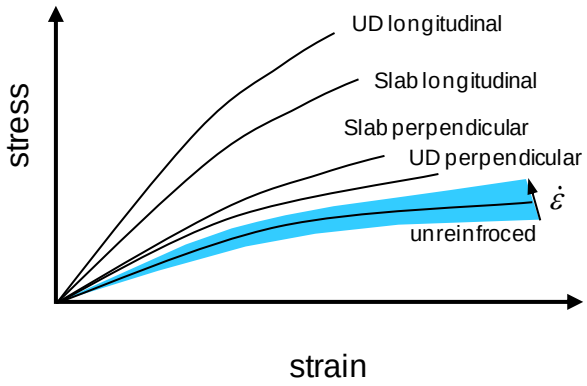
Werkstoffverhalten ist

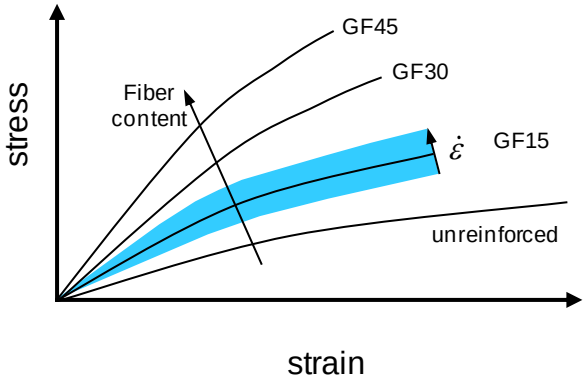
- orthotrop
- viskoelastisch
- viskoplastisch











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

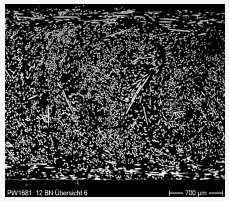
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Crash – Nutini Box

Simulationskette für LS-DYNA

[2014Jilka]

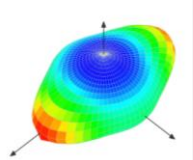
Injection molding (Moldflow, Moldex, …)



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

fiber orientation

micromechanic modeling (4a micromec, …)

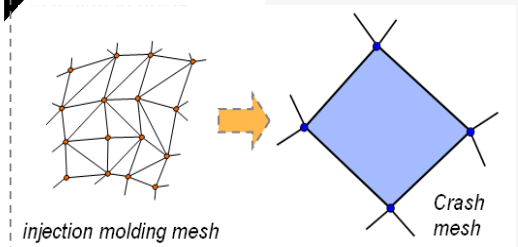


$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$$

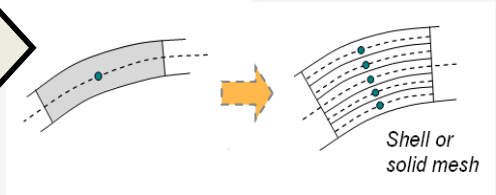
anisotropy

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

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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Crash – Nutini Box

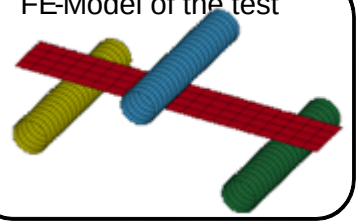
Materialkartenerstellung – 4a impetus

Element orientation e.g.

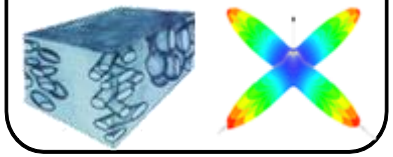
***ELEMENT_SHELL_BETA**

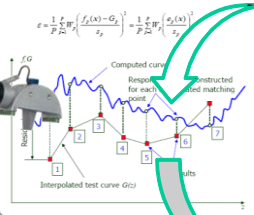
Material angle

FE-Model of the test



Parametrized materialcard based on 4a micromec





LS DYNA©

Reverse Engineering

4a impetus

© by 4a engineering GmbH - intelligent testing systems

LS PREPOST©

DATABASE
measurement, models

ORIENTATION
e.g. 0°, 45°, 90°

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

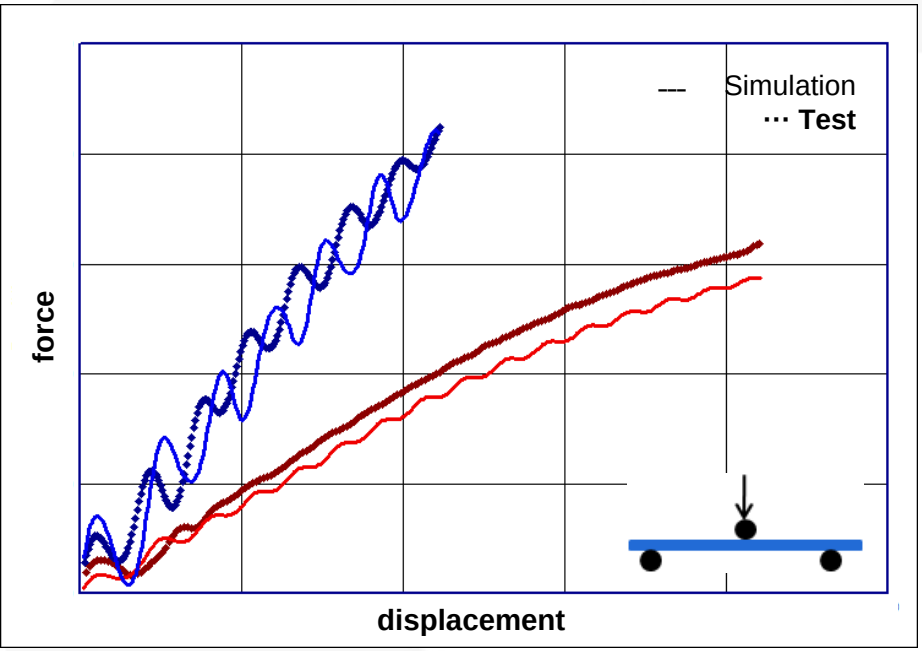
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel Crash – Nutini Box

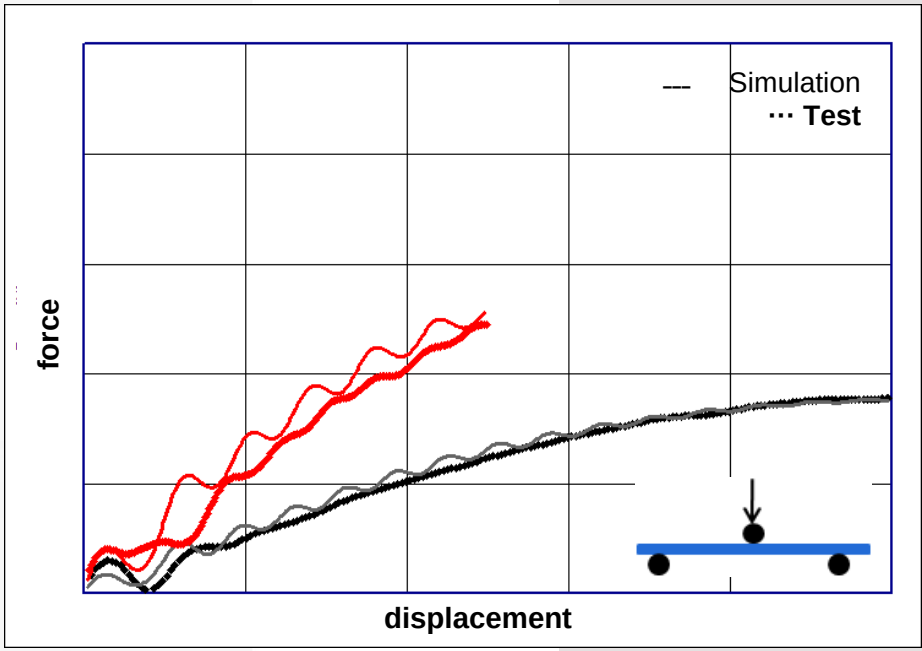
Materialkartenerstellung – 4a impetus

[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.

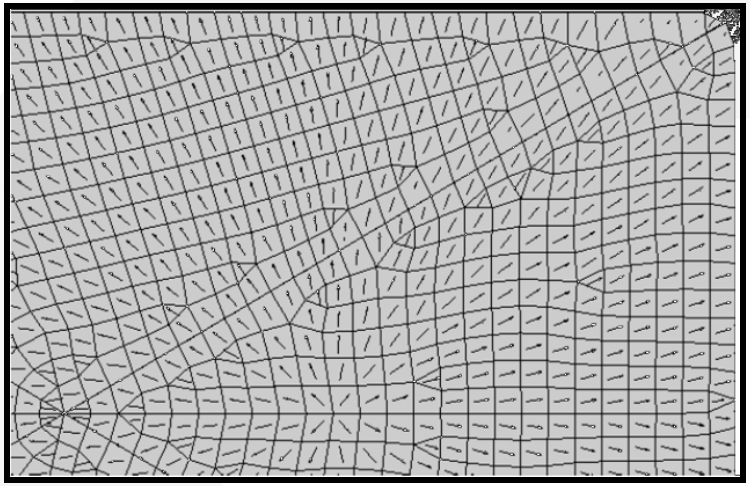
I N P H Y S I C S W E T R U S T

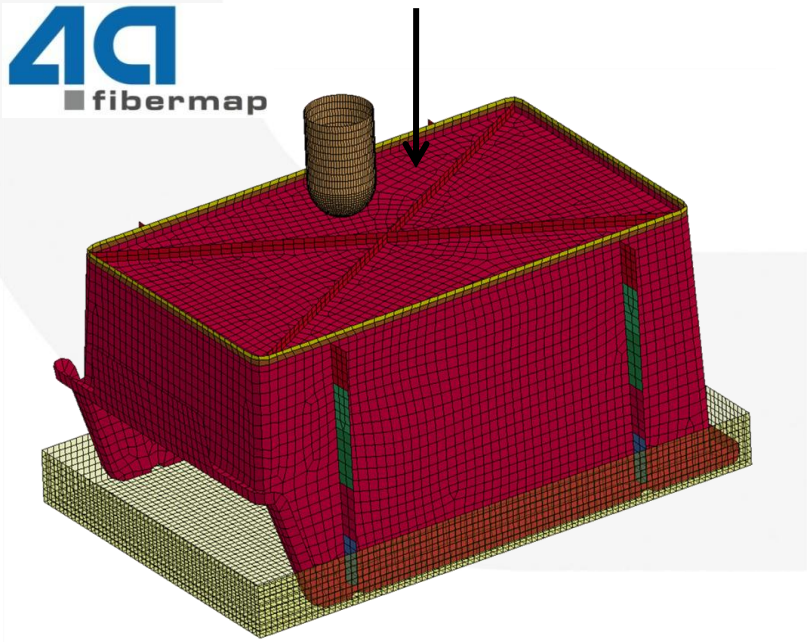
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

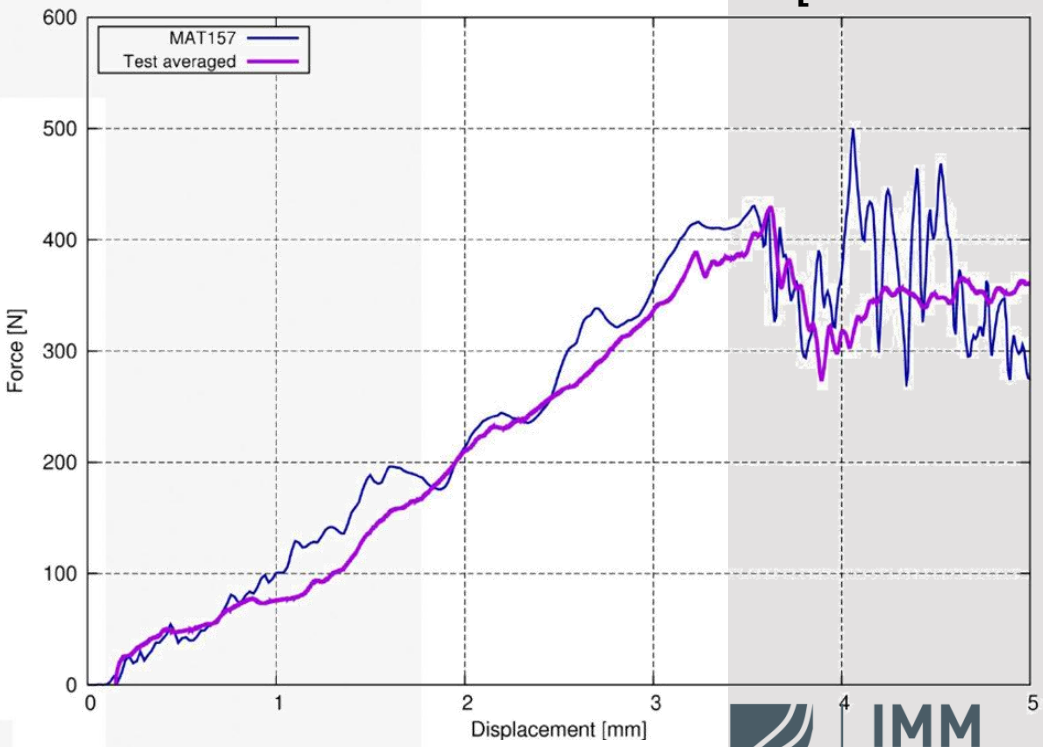
Fallbeispiel Crash – Nutini Box

Materialkartenerstellung – 4a impetus

[2014Jennrich]







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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

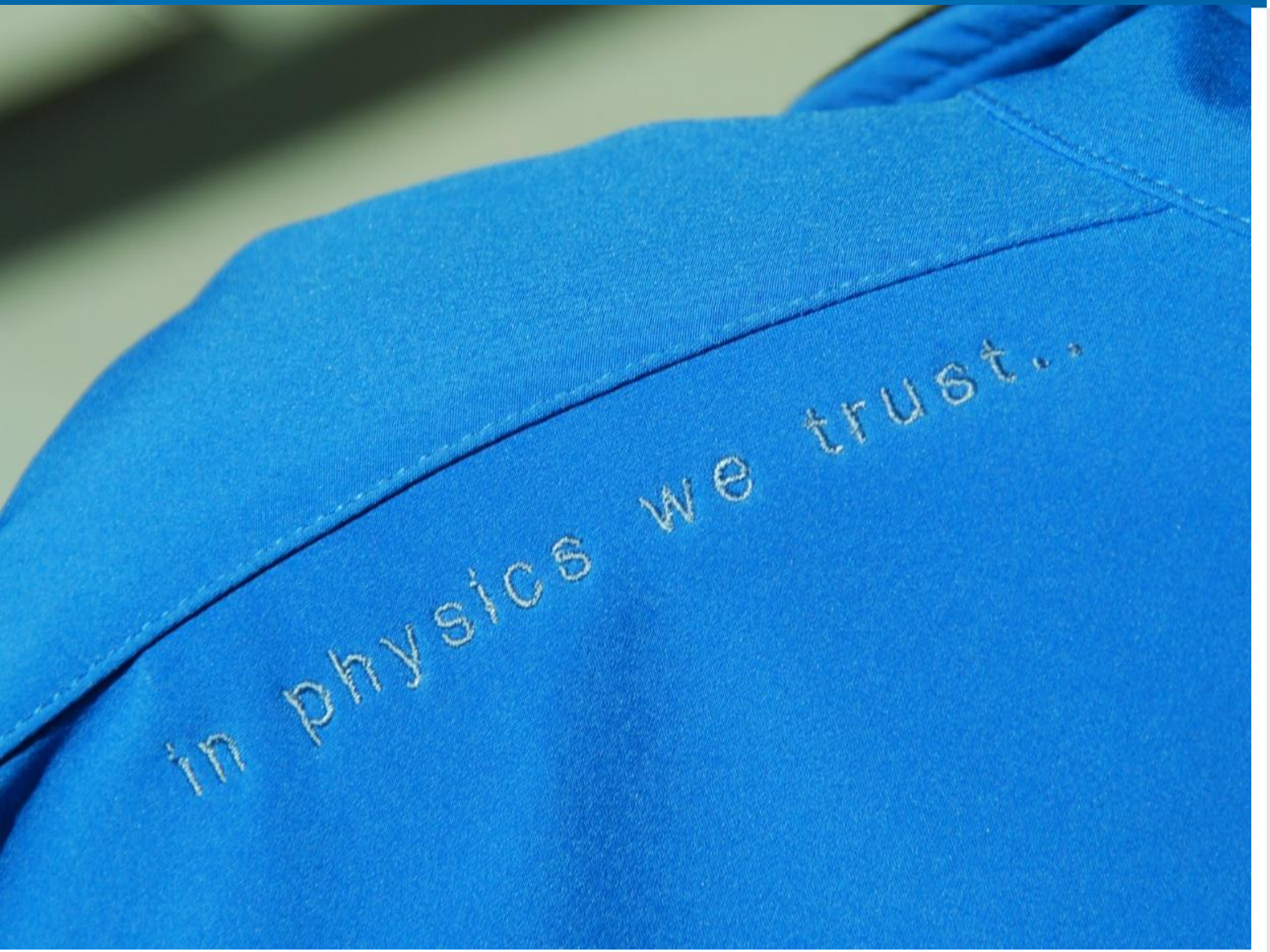
Zusammenfassung

- 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.

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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Literatur

[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)

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Literatur

[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)

© 4a engineering GmbH, all rights reserved