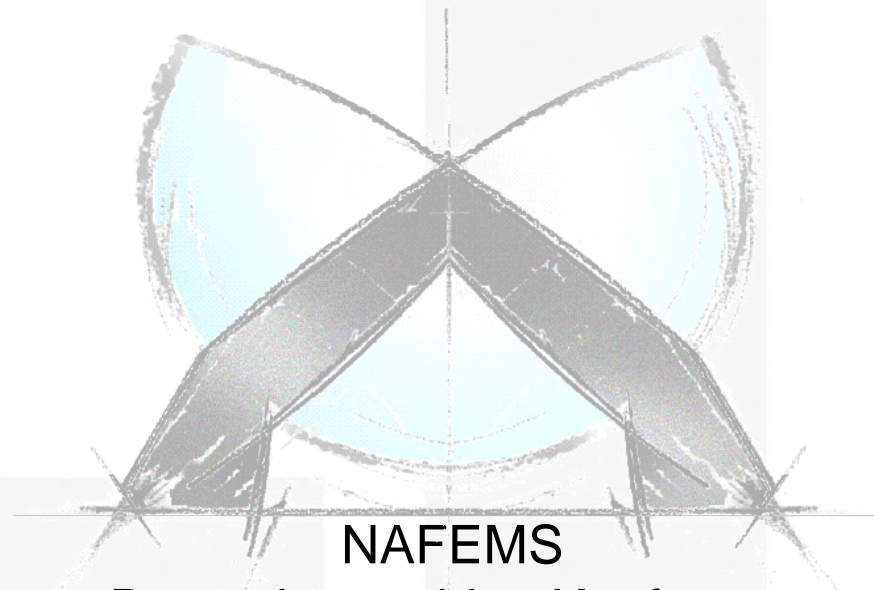


# Dynamische Kunststoffcharakterisierung (Thermoplaste, Schäume, Composites)

A. Fertschej, P. Reithofer, M. Rollant (4a engineering GmbH)



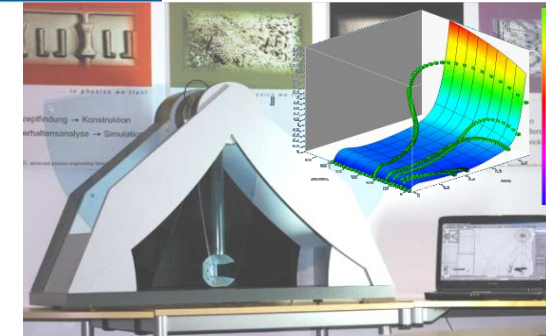
NAFEMS  
Deutschsprachige Konferenz  
Bamberg 2014

NAFEMS  
DEUTSCHSPRACHIGE  
KONFERENZ 2014

Bamberg, Germany  
20-21 May

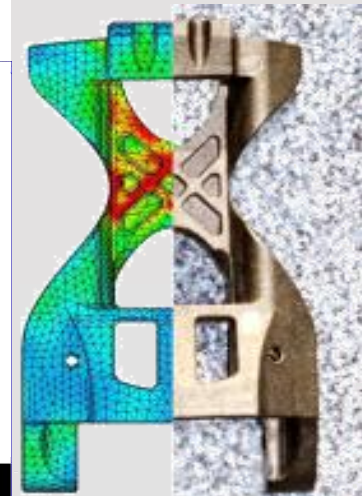
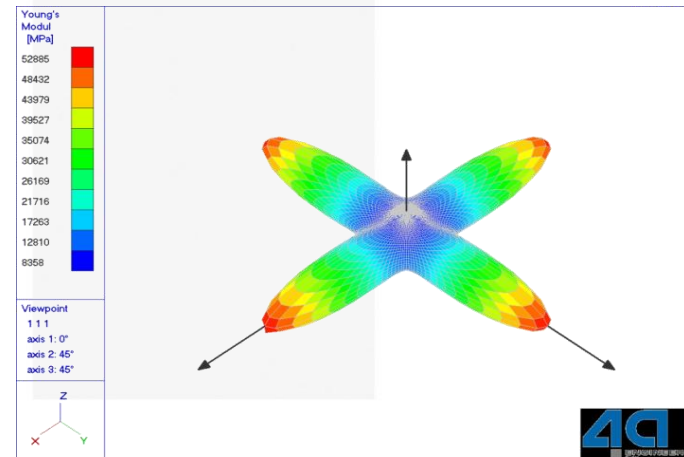
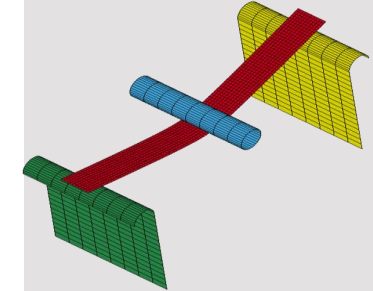
4a engineering GmbH  
Industriepark 1  
A-8772 Traboch  
reithofer@4a.co.at  
++43 (0) 664 8010 6601

© 4a engineering GmbH, all rights reserved



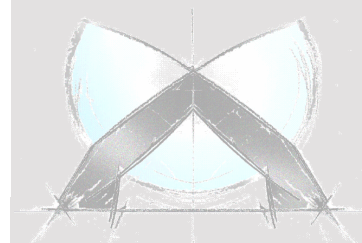
## .. in physics we trust

- Gründungsjahr 2002
- F&E - Dienstleistung
- 15 bis 20 Kernkunden
- bisher mehr als 500 Projekte
  - 45% Automotive
  - 15% Luft- und Raumfahrt
  - 15% Maschinenbau
  - 10% Medizintechnik
  - 15% Consumer goods
- Kernkompetenzen
  - Kunststoff- und Werkstoffwissenschaften
  - Numerische Simulationsmethoden
  - Leichtbau und Faserverbundwerkstoffe
  - Methodenentwicklungskompetenz

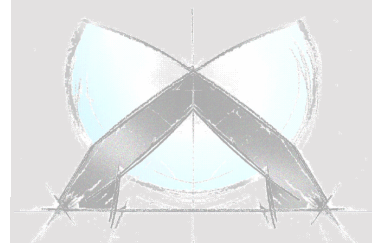


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

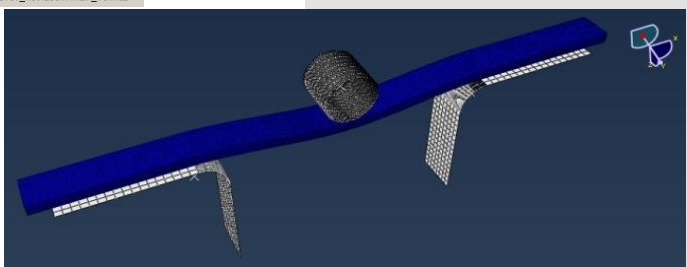
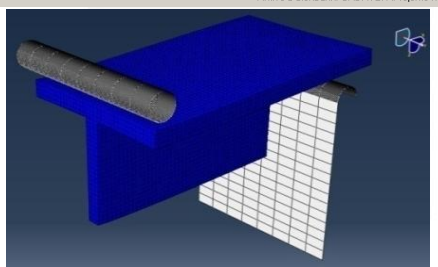
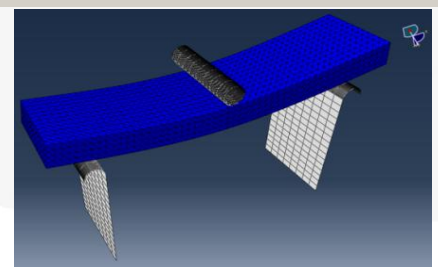
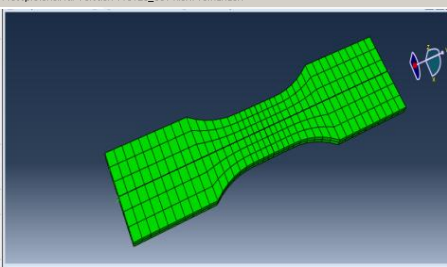
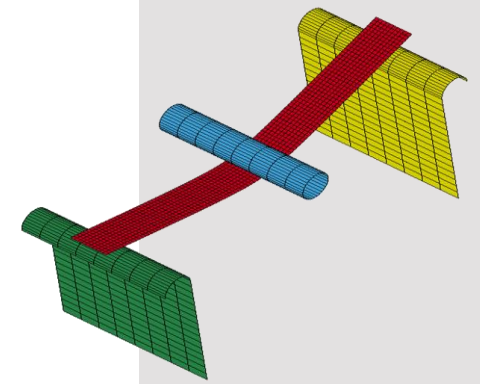
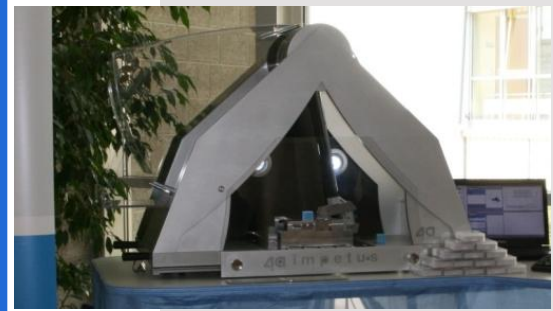
- Einleitung
- 4a impetus
- Prüfung und Materialkartenerstellung für Schaumwerkstoffe
  - Vorgehensweise Materialkartenerstellung (Neuronales Netz)
  - Mögliche Probleme/Einflussgrößen
- Prüfung und Materialkartenerstellung für Thermoplaste
  - Vorgehensweise Materialkartenerstellung
  - Zug-/Druckverhalten - von Mises vs. allgemeine Fließfläche
  - Dehnratenabhängigkeit
  - Einflussgrößen (Solver, Elementgröße, -typ...)
- Prüfung und Materialkartenerstellung für Composites
  - Kopplung Mikromechanik
  - Reverse engineering - Organoblech
- Ausblick
- Zusammenfassung



- Forderungen der Industrie
  - Materialkarten für eine Vielzahl an Materialien (verstärkte und unverstärkte Thermoplaste, Schäume, Composites, Metalle, Holz, ...) und Solver
  - Abbildung einer realitätsnahen Belastung
  - schnelle und günstige Erstellung
  - Validierung
- Entwicklung von 4a impetus – **Komplettsystem** vom Test zur validierten Materialkarte



**Geschlossenes System vom Versuch bis zur validierten Materialkarte**



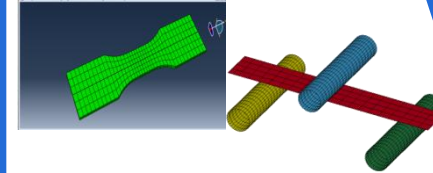
Mehr Information:  
**LS-Dyna Infotage 2013 – Dynamische Kunststoffcharakterisierung**  
<http://www.dynamore.de/de/download/presentation/dokumente/2013-Polymers>

**validierte  
Material-  
karte**

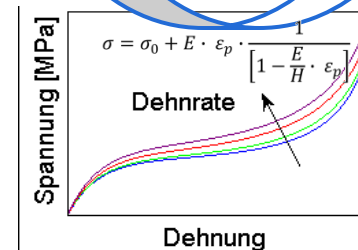
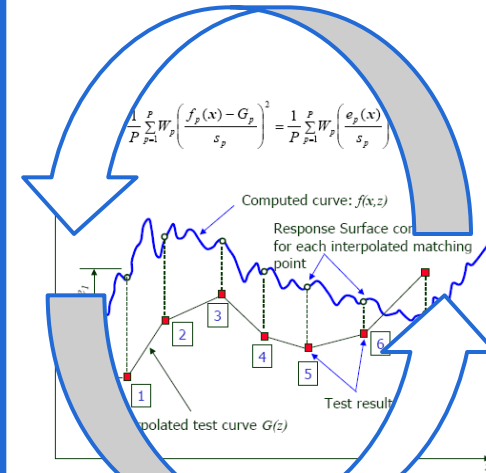


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

FE-Modell vom Versuch



Reverse Engineering



parametrisierte  
Materialkarte

**Direkt gekoppelt  
mit  
Modellerstellung**

**Auswertung  
Filterung  
Mittelwertbildung**

**Automatisches  
LS-OPT Input-Deck**

**Direkt gekoppelt mit  
Solver run scripts**

**Optimierte Modelle  
mit parametrisierter  
Materialkarte**

**Automatische  
Netzerzeugung**

**Versuchsdatenbank**

- Geometrie
- Belastung
- Randbedingungen
- Orientierung
- Prüfergebnisse  
Kraft/Weg  
Spannung/Dehnung
- ...

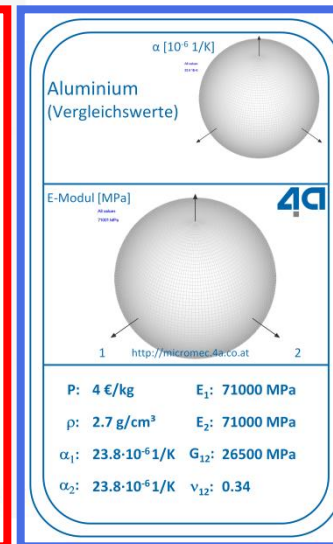
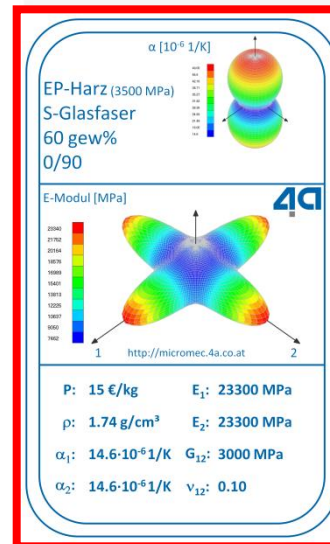
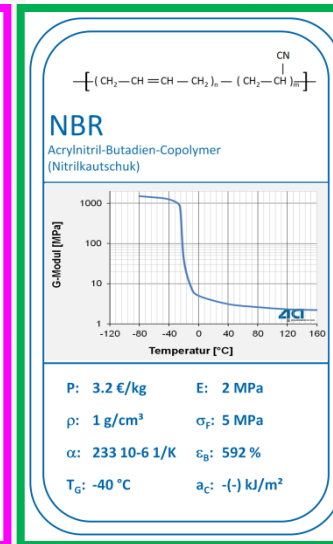
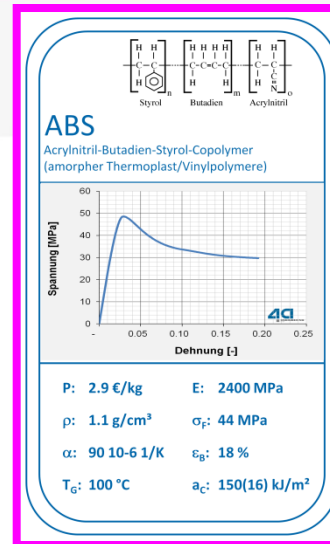
**Modelldatenbank**

- Optimierung/Validierung
- Solver  
LS Dyna, Abaqus, ...
- Materialmodell  
von Mises  
allg. Fließfläche  
Dehnratenabhängigkeit
- Idealisierung  
Shell/Solid  
Netzgröße

# 4a impetus

## Geprüfte Materialien mit Materialkarten

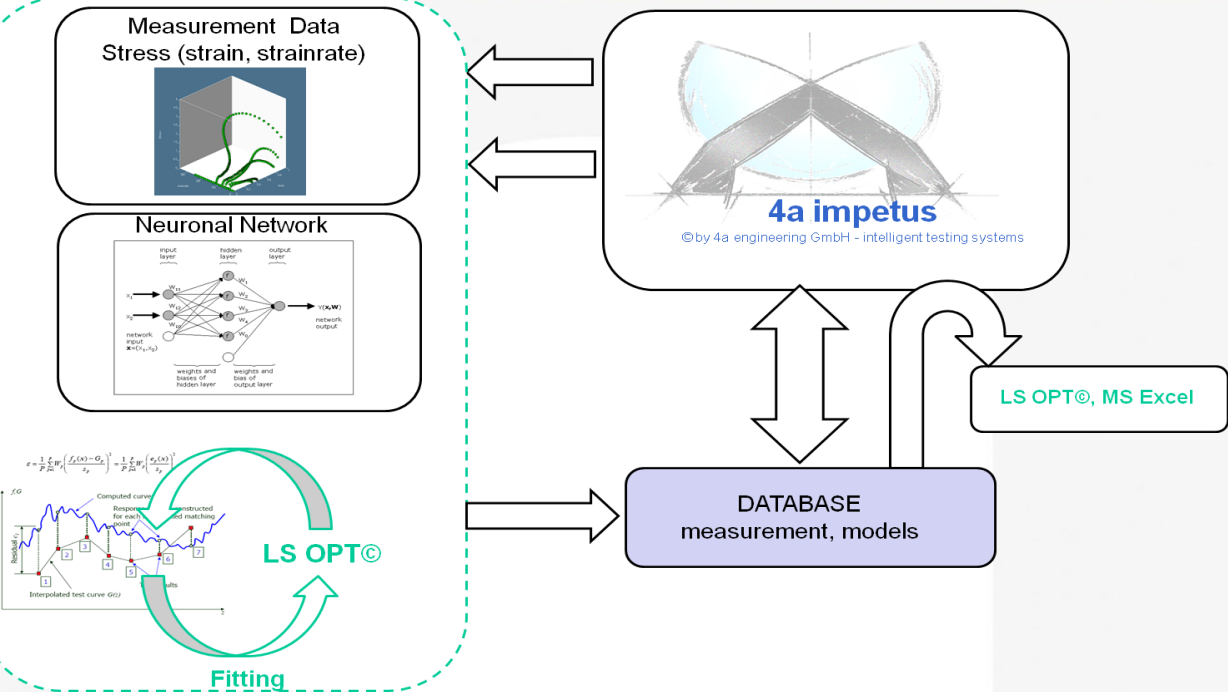
- **Thermoplaste** (ASA, ABS+PA; ABS+PC; PA6; PA6(6) GF30..50; PA66+P6; PBT GF30; PC; PE; PP; PP+Lack; PP/EPDM; PP GF20..40; PP Impakt modifiziert; PP MX10; PP MX20; PP MX40; PP CF; PP+EPDM; MuCell-Materialien, ...)
- **Schäume** (EPP30..80; PU RG 55, PU RG 65)
- **Elastomere** (EPDM, SILIKON)
- **Duroplaste** (CFK, GFK mit Epoxyharz)
- **Metalle** (Aluminium, DC04, hochfeste Stähle (aktuelle Tests))
- **Holz** (Buche, Fichte, Multiplex, Spanplatte, MDF)



aus:  
4a Quartett  
Kartenspiel  
"Kunststoffe"

aus:  
4a Quartett  
Kartenspiel  
"Composites"



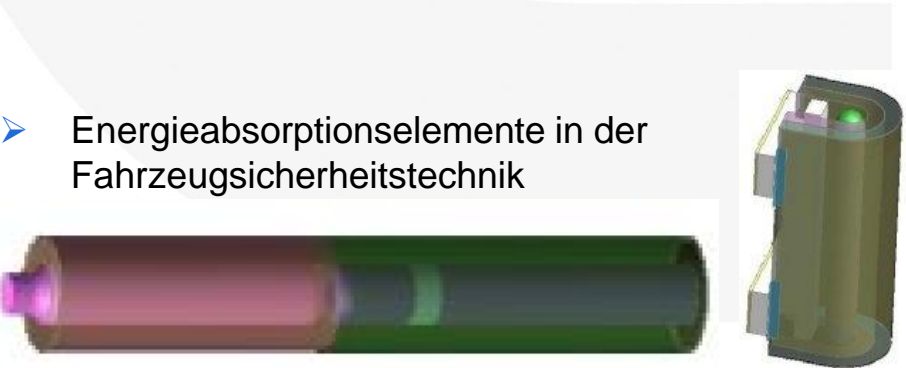


**Schäume (EPP, PUR, ...)**

- \*MAT\_FU\_CHANG\_FOAM (83)
- \*MAT\_SIMPLIFIED\_RUBBER\_FOAM (181)

Confor Blue Foam, offenzelliger PU-Schaum

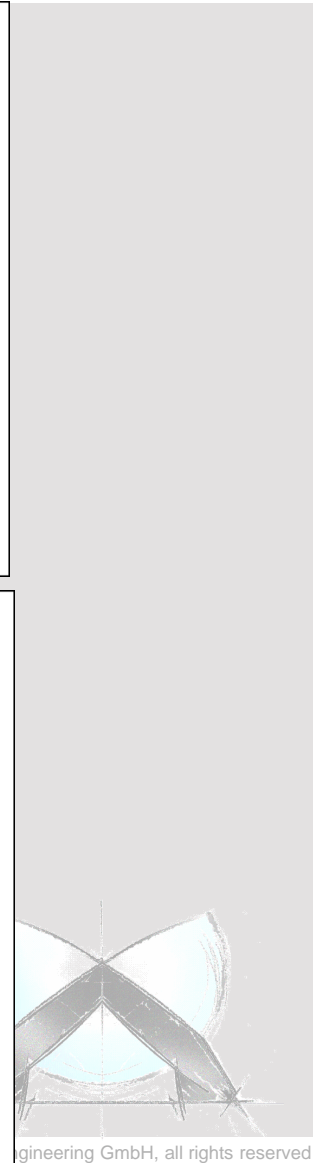
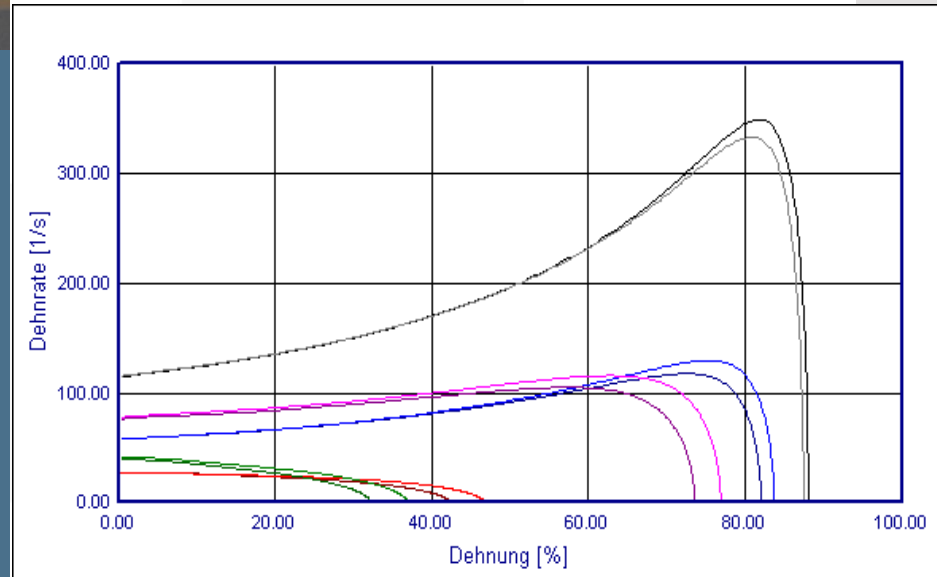
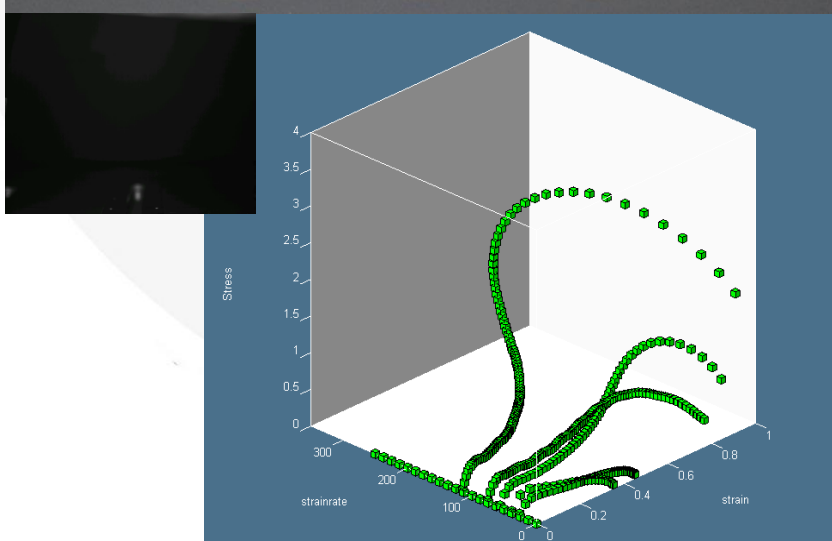
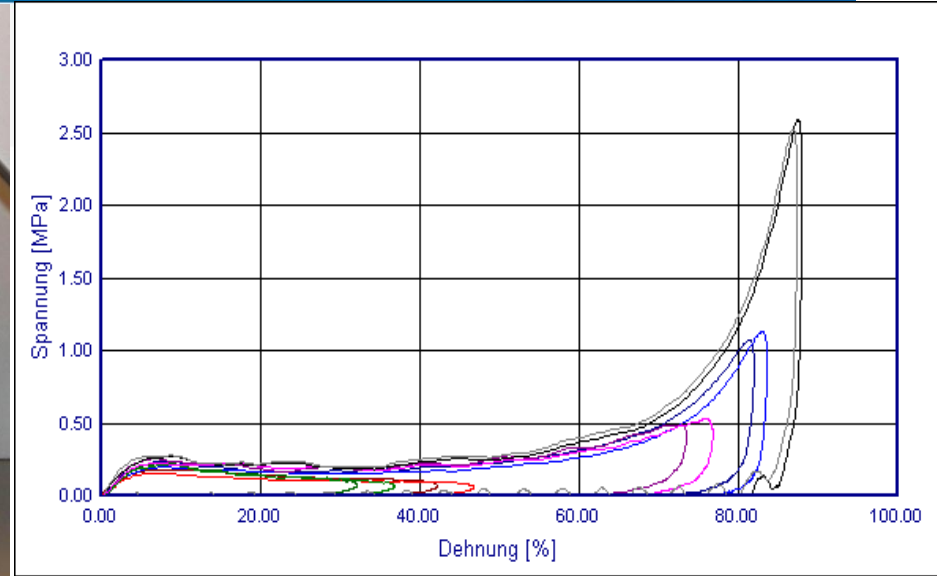
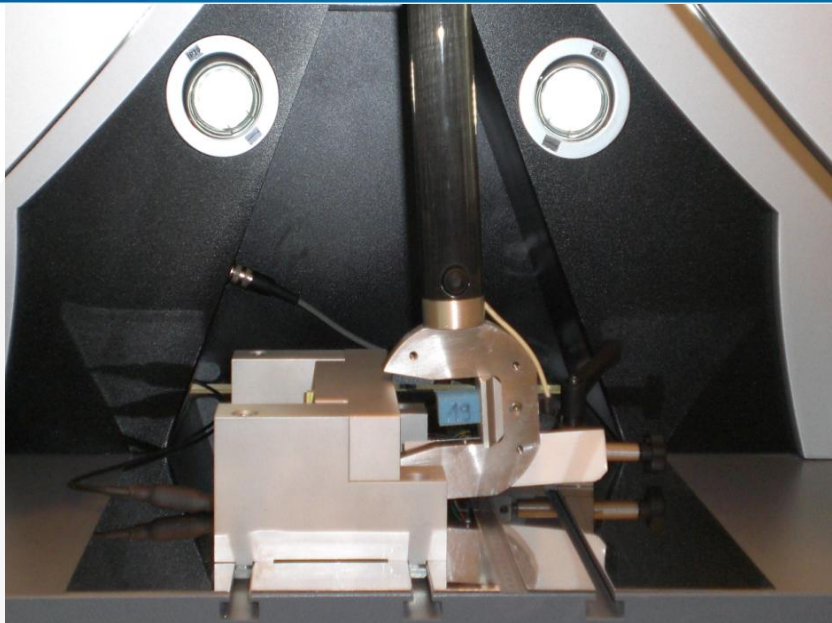
➤ Energieabsorptionselemente in der Fahrzeugsicherheitstechnik





# Schäume

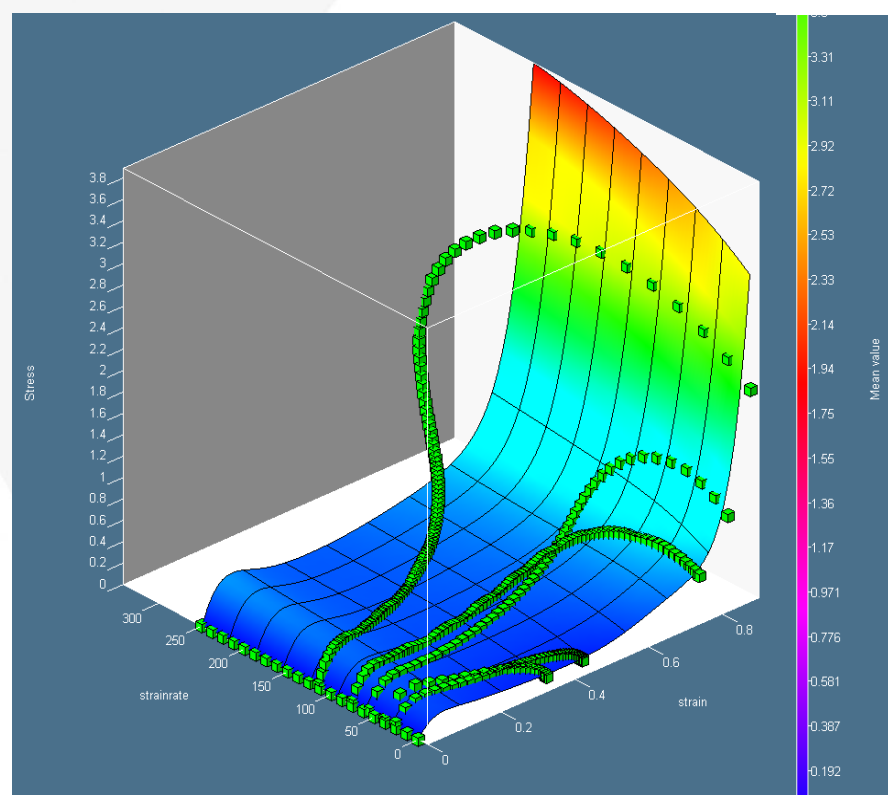
## Beispiel Confor Blue Foam



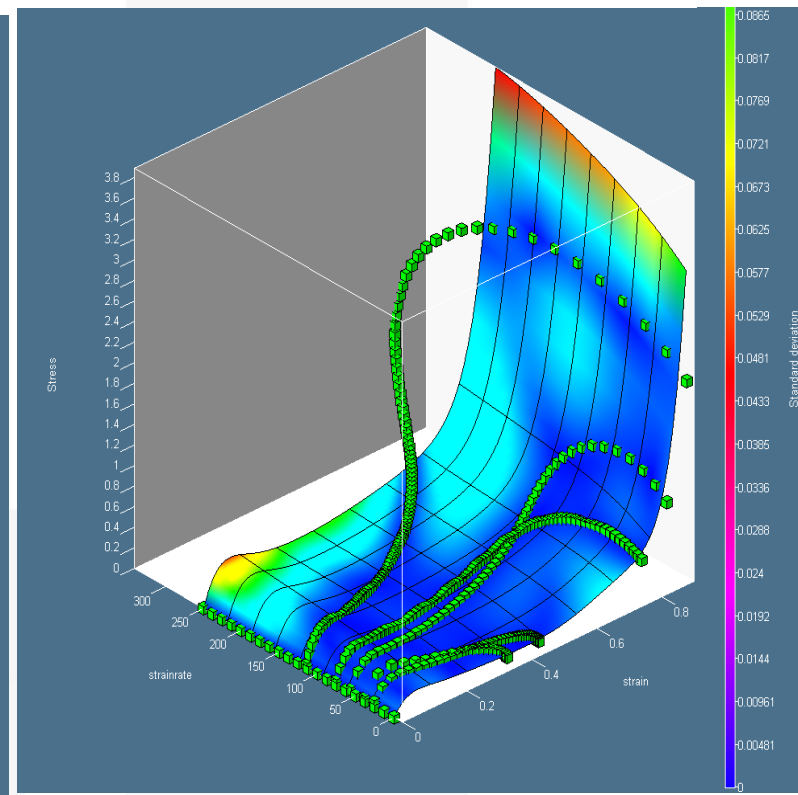
gineering GmbH, all rights reserved

Ergebnis:

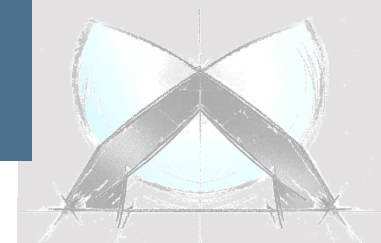
- Meta Modell erstellt mit Hilfe des Neuronalen Netzwerks
- Schnitte des Meta Modells bei konstanten Dehnraten → Fertige Materialkarte



Fertiges Meta Modell



Standardabweichung des  
Meta Modells

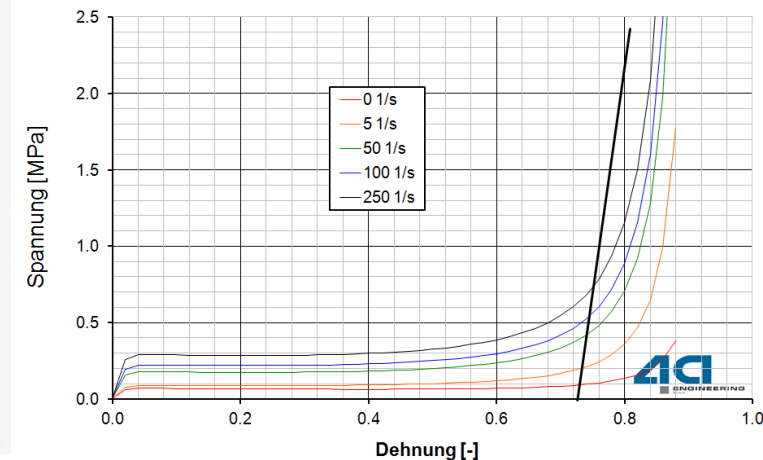
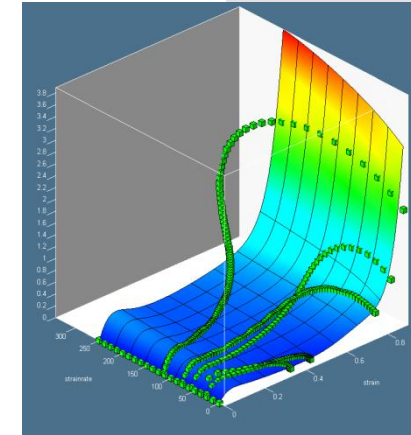


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

**Quick&Dirty** Ansatz → keine Suche nach geeignetem Modellansatz;  
funktioniert für unterschiedlichste Materialien: z.B. EPP, Confor Blue...

### Mögliche Probleme:

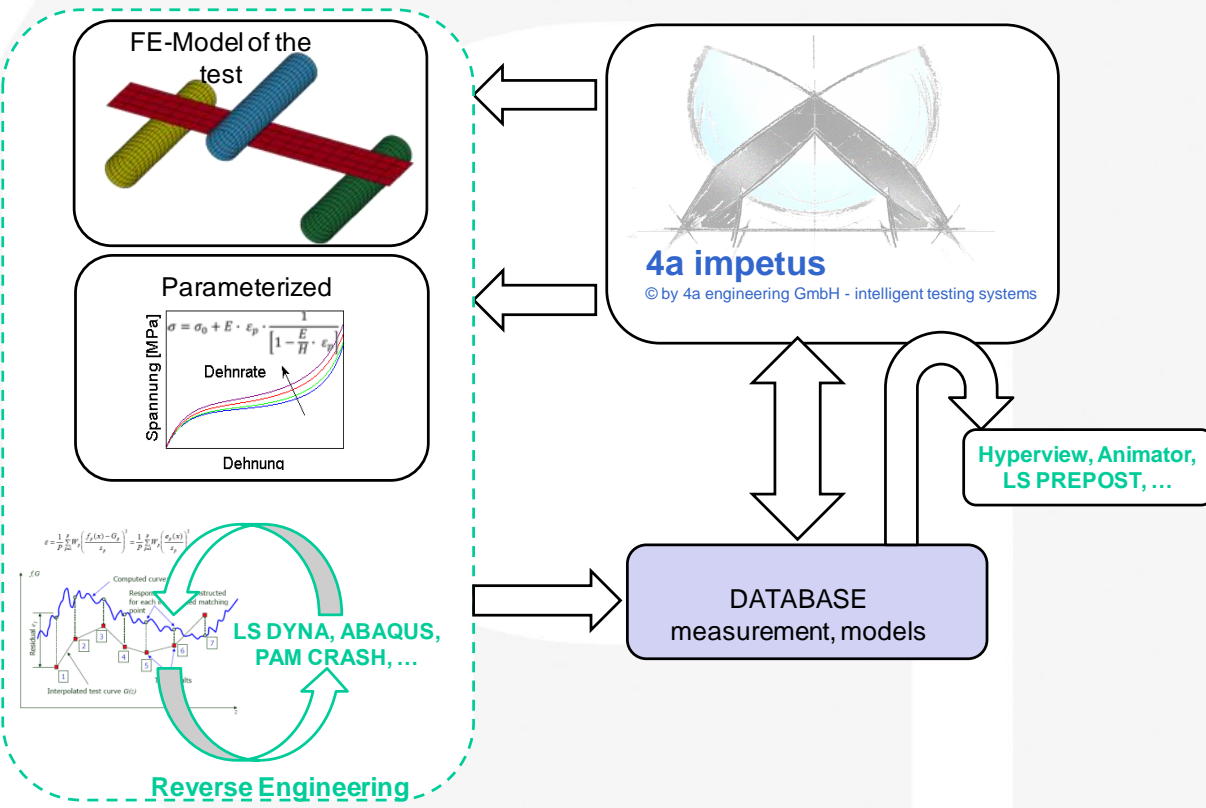
- Neuronales Netz muss nicht zwangsweise durch 0 gehen
  - Overfitting → Anzahl an Neuronen
  - Überschneiden → genügend Messdaten
  - Nachbearbeitung / Glätten der Daten erforderlich
- 
- Auf **Kontakt-Einstellungen in der Simulation** muss ein Augenmerk gelegt werden (z.B. Einfluss auf die Konvergenz und auch auf Materialverhalten)



# Prüfung und Materialkartenerstellung für Thermoplaste

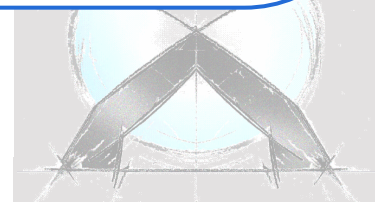


### Materialcharakterisierung / Reverse Engineering



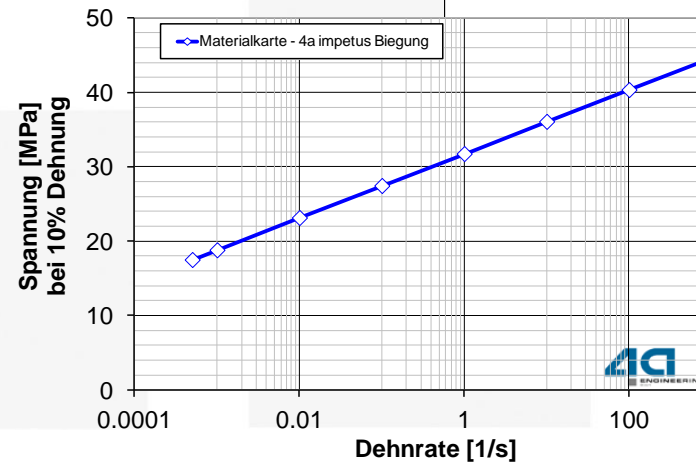
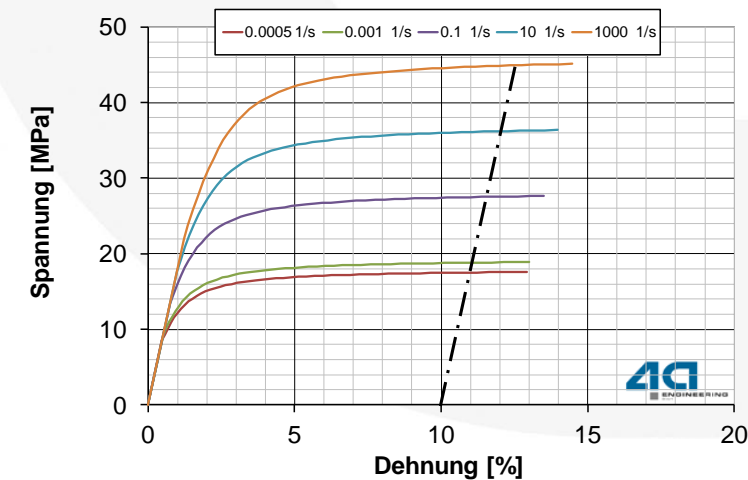
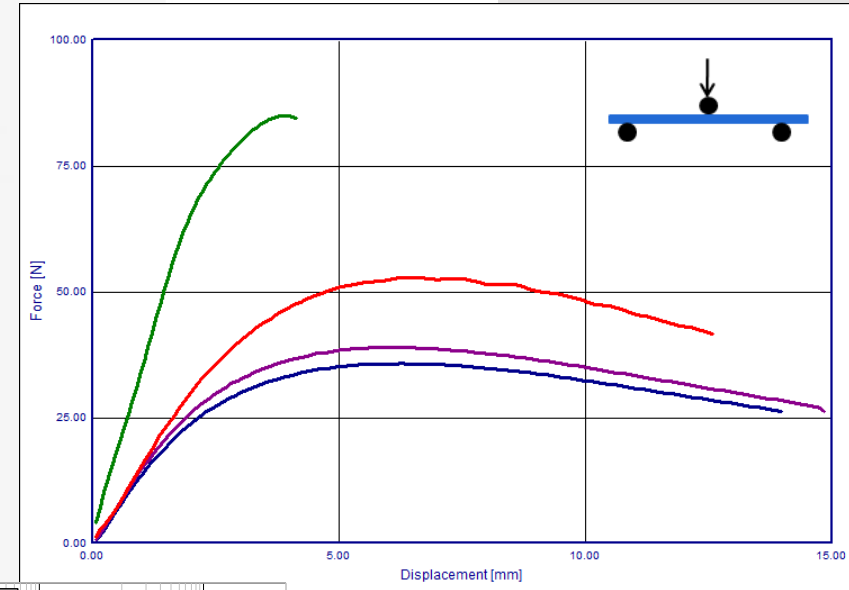
$$\sigma = \sigma_0 + E \cdot \epsilon_p \cdot \frac{1}{1 - \frac{E}{H} \cdot \epsilon_p}$$

**unv. Thermoplaste**  
(PA6, PBT, PE, PP, PC, ABS ...)  
\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY

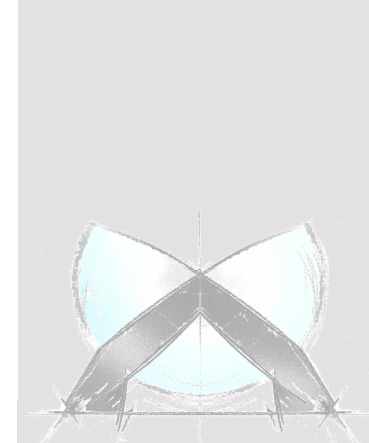


- Erfassen unterschiedlicher Dehnraten und der Dehnratenabhängigkeit
  - durch unterschiedliche Prüfgeschwindigkeiten
  - durch Ändern des Auflagerabstands

Geschw. [mm/s]	Auflagerabstand [mm]	Dehnrates [1/s]
0.1	40	0.002
1	40	0.02
1000	40	11
4000	30	80



[1]

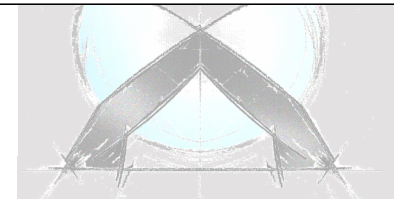
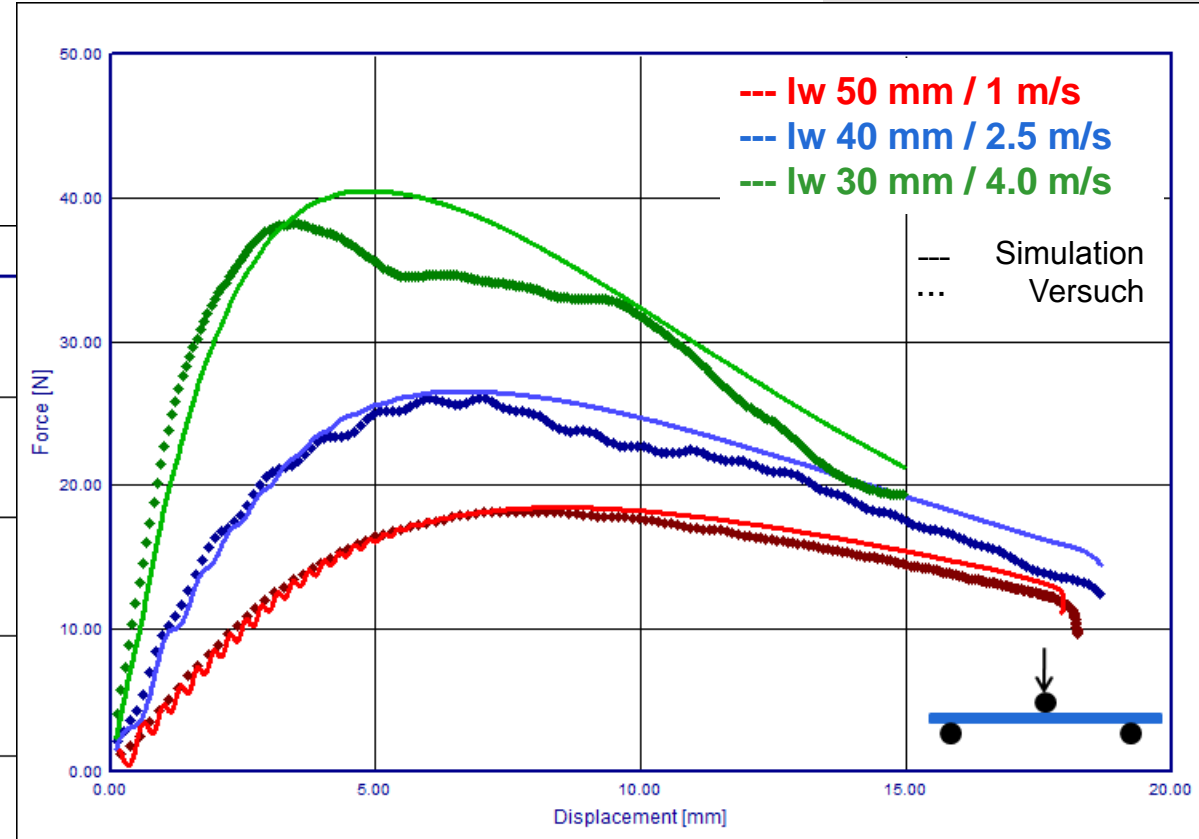
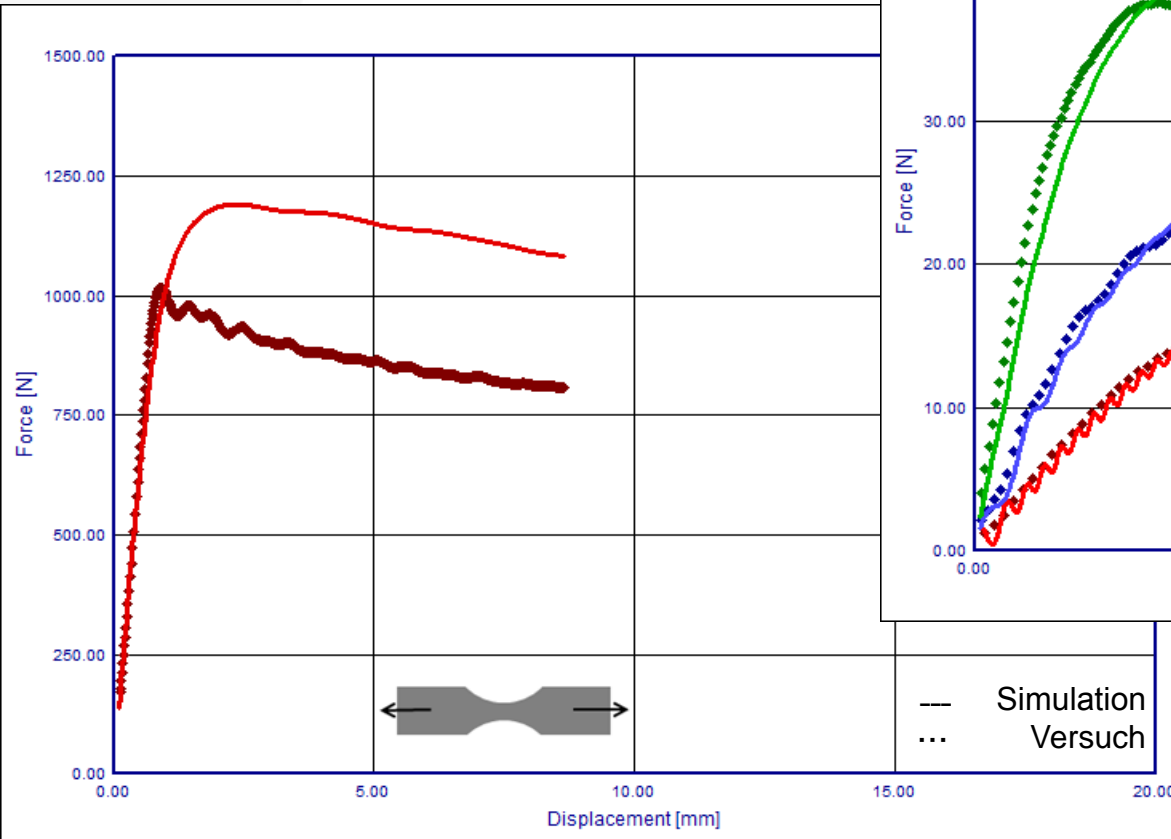




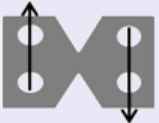



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

➤ LS-Dyna: \*MAT24 (von Mises), keine Zug-/Druck-Abhängigkeit

→ Gute Übereinstimmung für Biegung

→ Schlechte Übereinstimmung für Zug



Fließfläche:	klassische Vorgehensweise		4a impetus		
	vonMises	allg. Fließfl.	vonMises	Drucker Pr.	allg. Fließfl.
Zugversuch 	<b>statische und dynamische Versuche</b>	<b>statische und dynamische Versuche</b>		<b>statische Versuche</b>	<b>statische Versuche</b>
Druck 		<b>statische Versuche</b>			
Schub 		<b>statische Versuche</b>			
Biax-Zug Durchstoß		statische Versuche			
3-Punkt-Biegung 			<b>statische und dynamische Versuche</b>	<b>statische und dynamische Versuche</b>	<b>statische und dynamische Versuche</b>
gespannte Biegung 				<b>statische Versuche</b>	statische Versuche
T-Proben Biegung 	<b>Auch möglich mit der 4a impetus Software</b>				



© 4a engineering GmbH, all rights reserved



- Aktuell für LS-DYNA implementiert
  - MAT\_19: *\*MAT\_STRAIN\_RATE\_DEPENDENT\_PLASTICITY* von Mises
  - MAT\_24: *\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY* von Mises
  - MAT\_124: *\*MAT\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION* Drucker Prager
  - MAT\_187: *\*MAT\_SAMP-1* Allg. Fließfläche

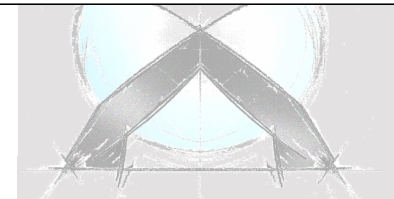
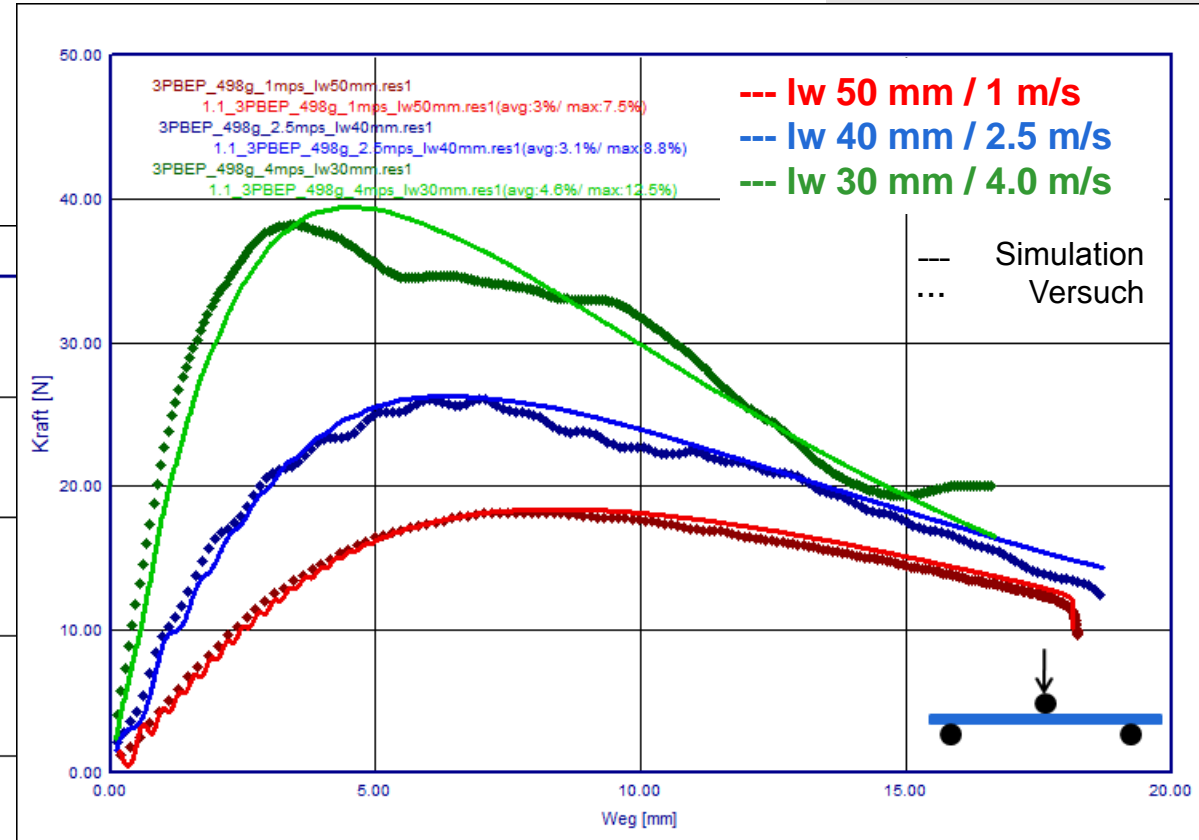
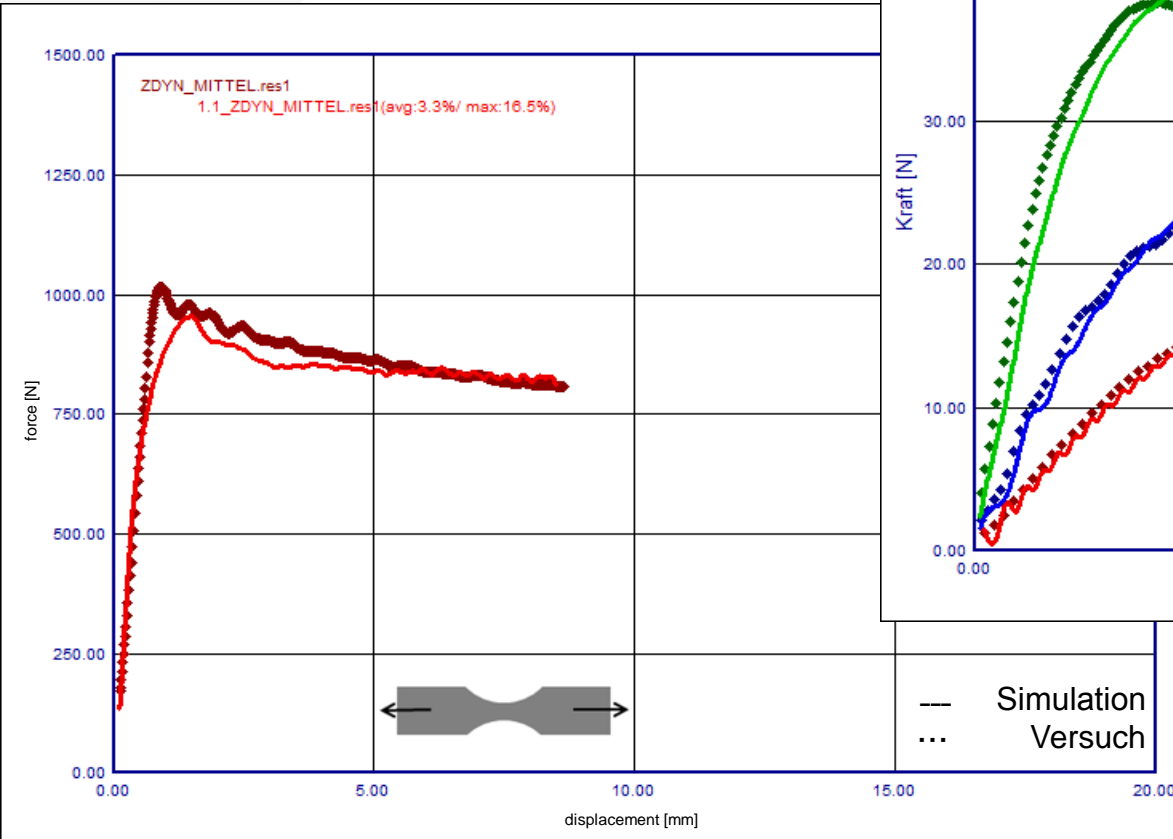
Materialverhalten	
Materialquelle	implementiert
Dichte	-1020.83399793837
Querkontraktion	0.3
Bruchdehnung	0
Elastizität	linear elastisch
Plastizität	vonMises
Kurve 1	4a Modell A
Dehnratenabhängigkeit	Tabelle
Dehnungsbereich bis	0.12
Stützstellen	50
Biasfaktor	10
Materialkarte	7011_MAT24_Plasticity Table Rate log. Table

Materialverhalten	
Materialquelle	implementiert
Dichte	-1020.83399793837
Querkontraktion	0.3
Bruchdehnung	0
Elastizität	linear elastisch
Plastizität	Drucker-Prager
Kurve 1	4a Modell A
Kurve 2	Kurve 1 skaliert
Dehnratenabhängigkeit	Tabelle
Dehnungsbereich bis	0.12
Stützstellen	50
Biasfaktor	10
Materialkarte	7021_MAT124

Materialverhalten	
Materialquelle	implementiert
Dichte	-1020.83399793837
Querkontraktion	0.3
Bruchdehnung	0
Elastizität	linear elastisch
Plastizität	allg. Fließfläche (3 Kurven)
Kurve 1	4a Modell A
Kurve 2	Kurve 1 skaliert
Kurve 3	Kurve 1 skaliert
Dehnratenabhängigkeit	Tabelle
Dehnungsbereich bis	0.12
Stützstellen	50
Biasfaktor	10
Materialkarte	7031_MAT187

- Alle LS-DYNA Materialkarten über benutzerdefinierte Schnittstellen verfügbar

- LS-Dyna: \*MAT187 (allgemeine Fließfläche), Zug-/Druck-Abhängigkeit berücksichtigt
- Gute Übereinstimmung für alle Lastfälle



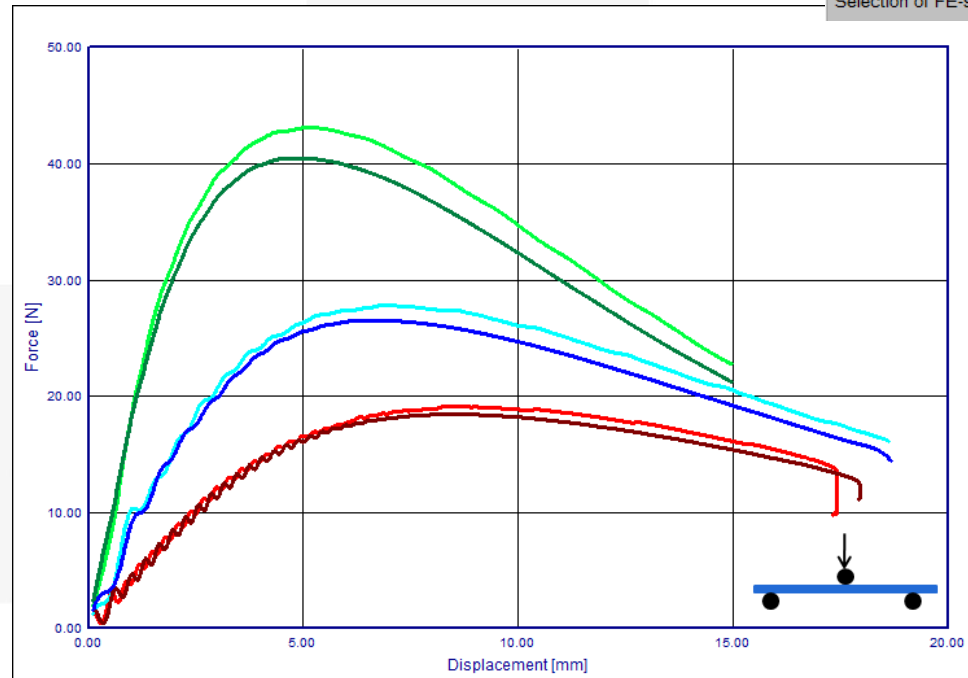
# Thermoplaste

## Einflussgrößen: Solver

- Materialkartentransfer von einem Solver zum anderen
- Beispiel: 3-Punkt-Biegung; von Mises  
Solver LS-Dyna \*MAT24 → Solver Abaqus \*ELASTIC \*PLASTIC;
- 4a impetus: Ein Maus-Klick → Unterschiede können veranschaulicht werden: ähnliche Ergebnisse, Unterschiede für die Geschwindigkeit 4 m/s (grüne Kurven).

Material	
Idealization	
System of units	t-mm-sec-MPa
Solver	LS DYNA
Inputdeck	Impetus (n.a.)
Symmetry of model	NNet(LS-OPT v4.1) (a)
Idealization type	LS DYNA
Element size	PAM CRASH
Additional settings	
Friction coefficient	RADIOSS
Contactthickness	1
Young's Modulus of support / f	210000
Density of support / fin	7800
Time scaling	0

**Solver**  
Selection of FE-solver



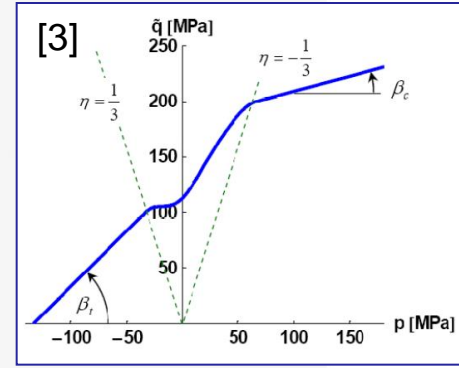
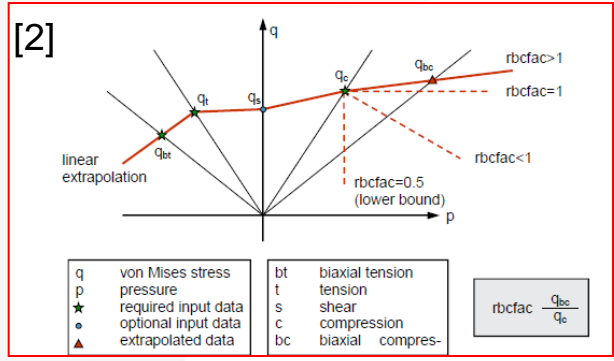
**Hostacom**  
Dunkle Farbe: LS-Dyna, Shelltyp 16  
Helle Farbe: Abaqus, Shell S4  
1 m/s, lw=50 mm  
2.5 m/s, lw=40 mm  
4 m/s, lw=30 mm



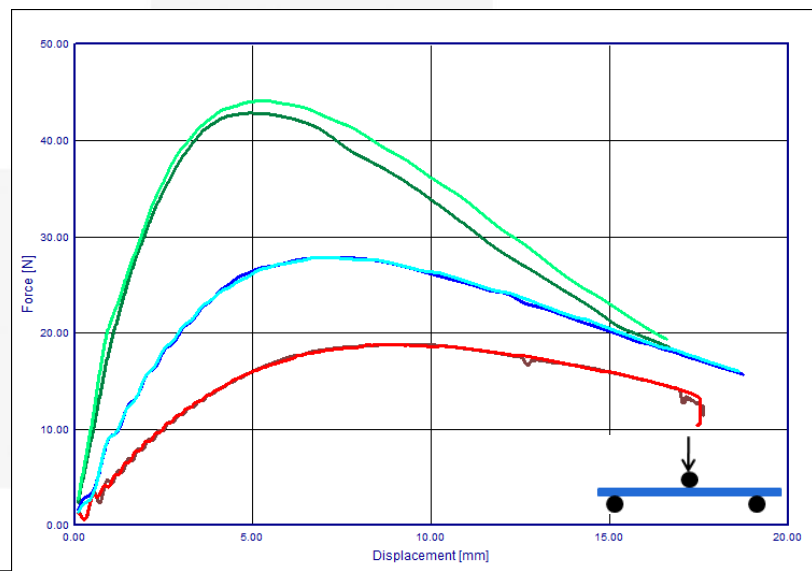
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

➤ Beispiel: 3-Punkt-Biegung; allgemeine Fließfläche

Solver LS-Dyna \*MAT\_SAMP-1 → Solver Abaqus ABQ\_MOLDED\_PLASTIC;



➤ Ähnliche Ergebnisse, Unterschiede für die Geschwindigkeit 4 m/s (grüne Kurven).



### Hostacom

Dunkle Farbe: LS-Dyna, Shelltyp 16

Helle Farbe: Abaqus, Shell S4

1 m/s, lw=50 mm

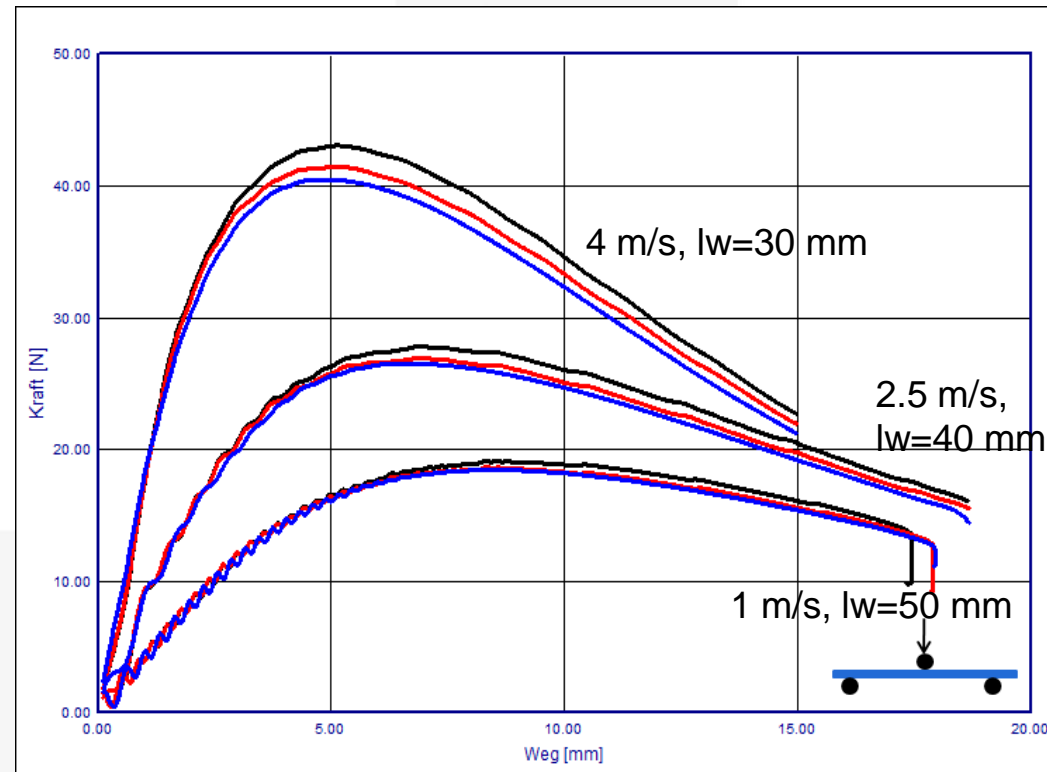
2.5 m/s, lw=40 mm

4 m/s, lw=30 mm



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

- Unterschiedliche Einstellungen → unterschiedliche Ergebnisse
- Beispiel: 3-Punkt-Biegung; von Mises; Abaqus Shell S4 Simpson (Standard) vs. Gauss Integration über Querschnitt



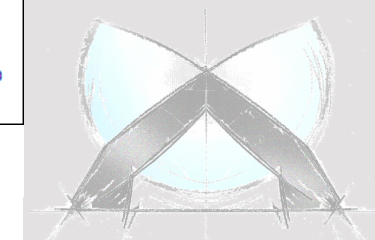
**Hostacom**

Elementlänge 2 mm, 5 IP

LS-Dyna, Shelltyp 16

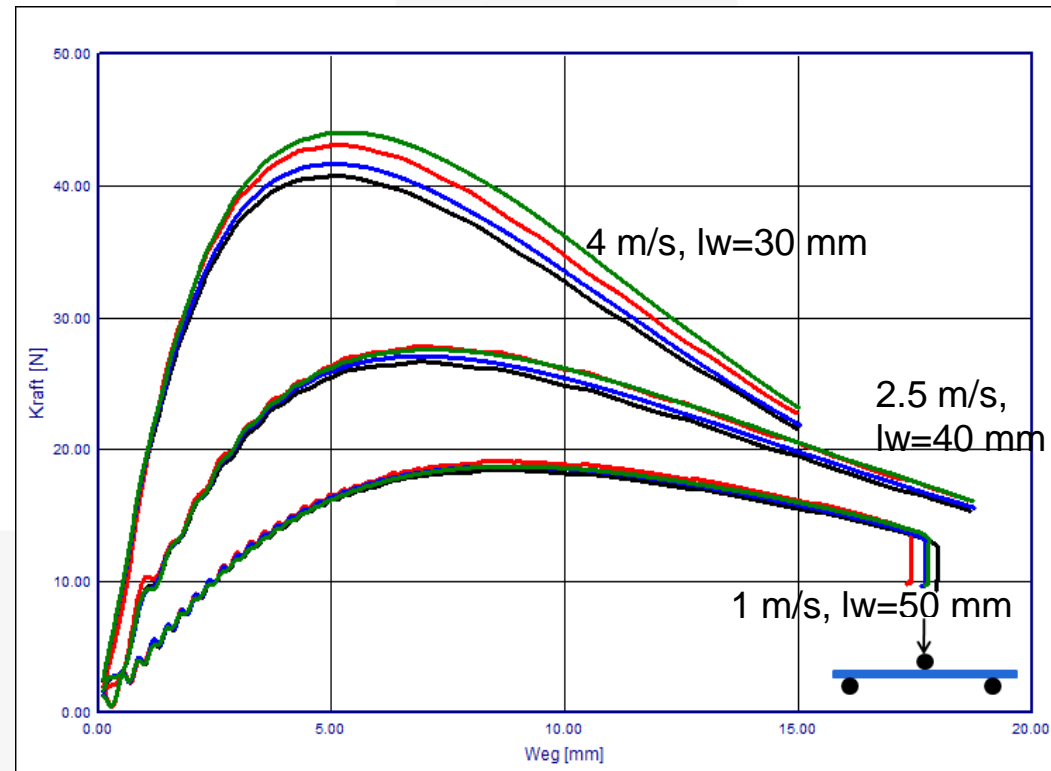
Abaqus, Shell S4, Simpson

Abaqus, Shell S4, Gauss



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

- Unterschiedliche **Idealisierung** → unterschiedliche Ergebnisse
- Beispiel: 3-Punkt-Biegung; von Mises; Abaqus Shell vs. Abaqus Solid



### Hostacom

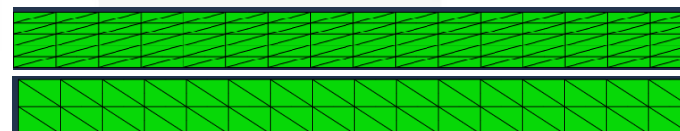
Elementlänge 2 mm

Abaqus, Shell S4, 5 IP

Abaqus, Solid C3D8R, 5 Elemente über Höhe

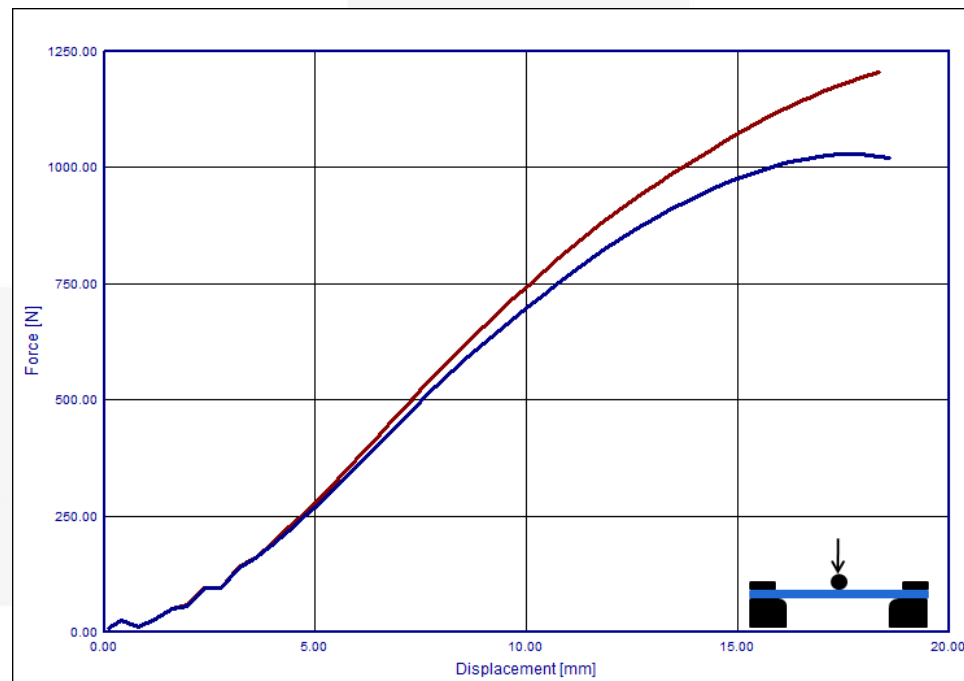
Abaqus, Solid C3D10M, 5 Elemente über Höhe

Abaqus, Solid C3D10M, 2 Elemente über Höhe

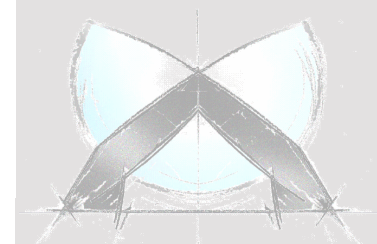


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

- Unterschiedliche Einstellungen → unterschiedliche Ergebnisse
- Beispiel: Gespannte 3-Punkt-Biegung; von Mises; LS-Dyna; Einstellung **ISTUPD** in der Control card \*CONTROL\_SHELL
- Im zugdominanten Bereich ändert sich die Schalendicke (isochores Verhalten). Dies ist nur möglich, wenn der Schalter ISTUPD=1 aktiviert ist (blaue Kurve). Im Vergleich zu ISTUPD=0 (rote Kurve) ergibt dies eine geringere Kraft.

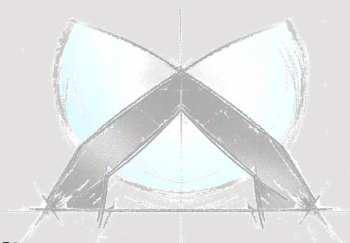


**Hostacom**  
Elementlänge 2 mm, 5 IP  
**ISTUPD=0**  
**ISTUPD=1**



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

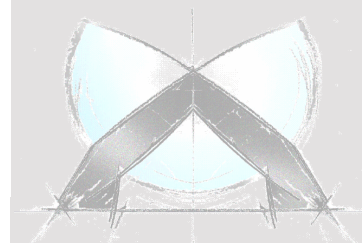
- Zusammenfassung einiger wesentlicher Erkenntnisse:
  - Erstellte Materialkarte spiegelt wider, was für das Materialmodell berücksichtigt wurde und welche Einstellungen im Simulationsmodell getätigt wurden
  - Materialmodell:
    - Dehnratenabhängigkeit
    - Zug-/Druck-Asymmetrie
  - Simulationsmodell:
    - Solver
    - Idealisierung
    - Elementgröße und -typ
    - ...
- Mittels Biegeversuche können einfach und schnell Materialkarten erstellt werden, für komplexe Materialmodelle sind zusätzliche Versuche notwendig.



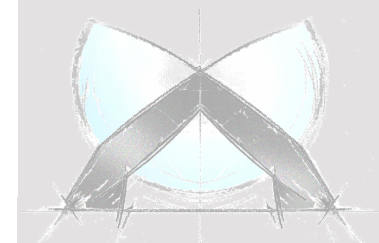
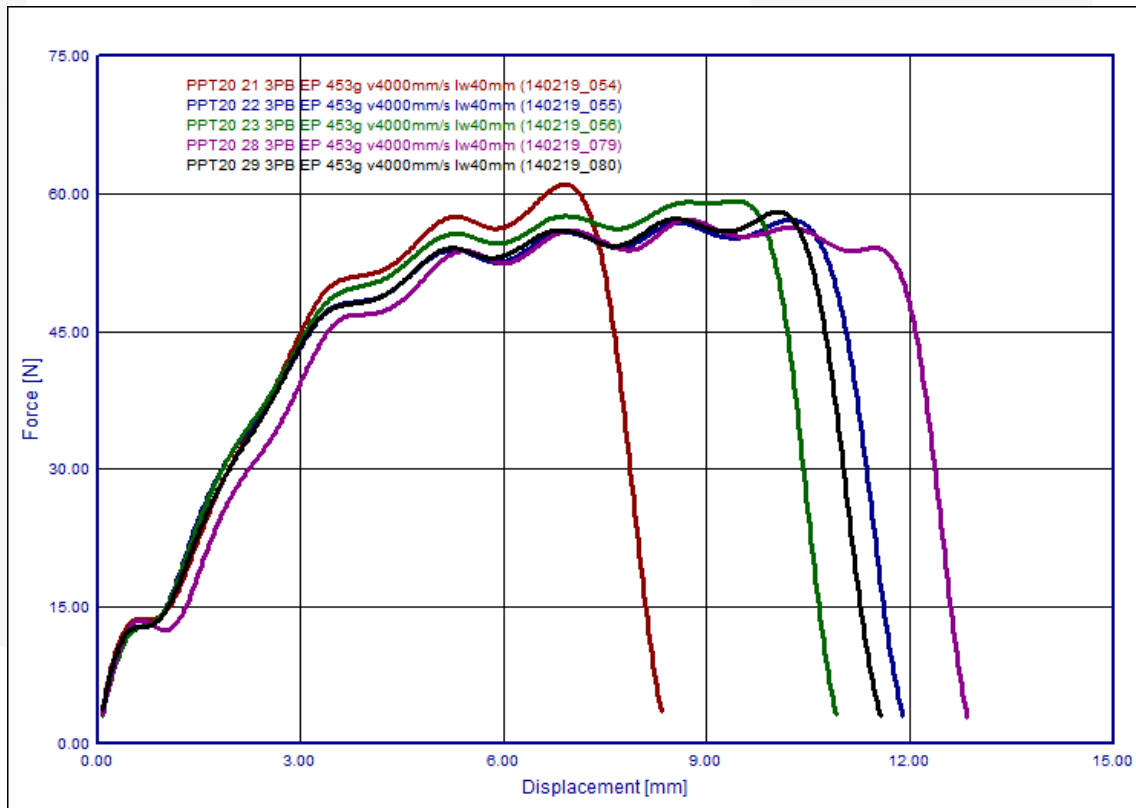
© 4a engineering GmbH, all rights reserved



# Ausblick



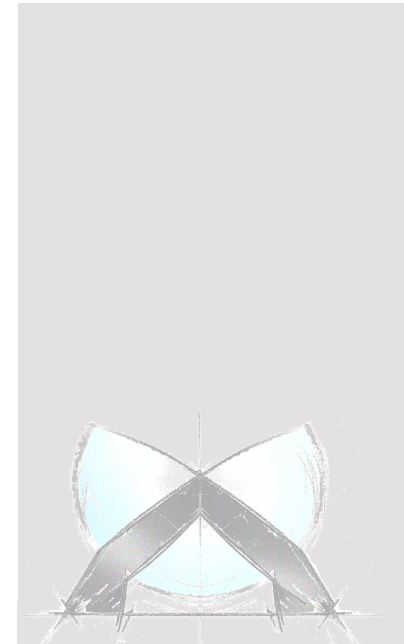
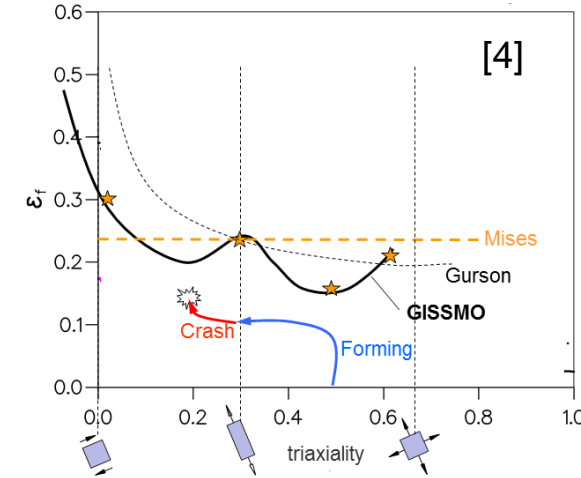
- Das zukünftige Thema: Modellierung von Schädigung/Versagen
- Das Versagen ist prinzipiell abhängig von der
  - Mehrachsigkeit und der Dehnrage.
- Zusätzlich spielen im Probekörper enthaltene Imperfektionen eine Rolle (→ Streubreite, Bild: 3-Punkt-Biegung 4 m/s, PP T20).



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

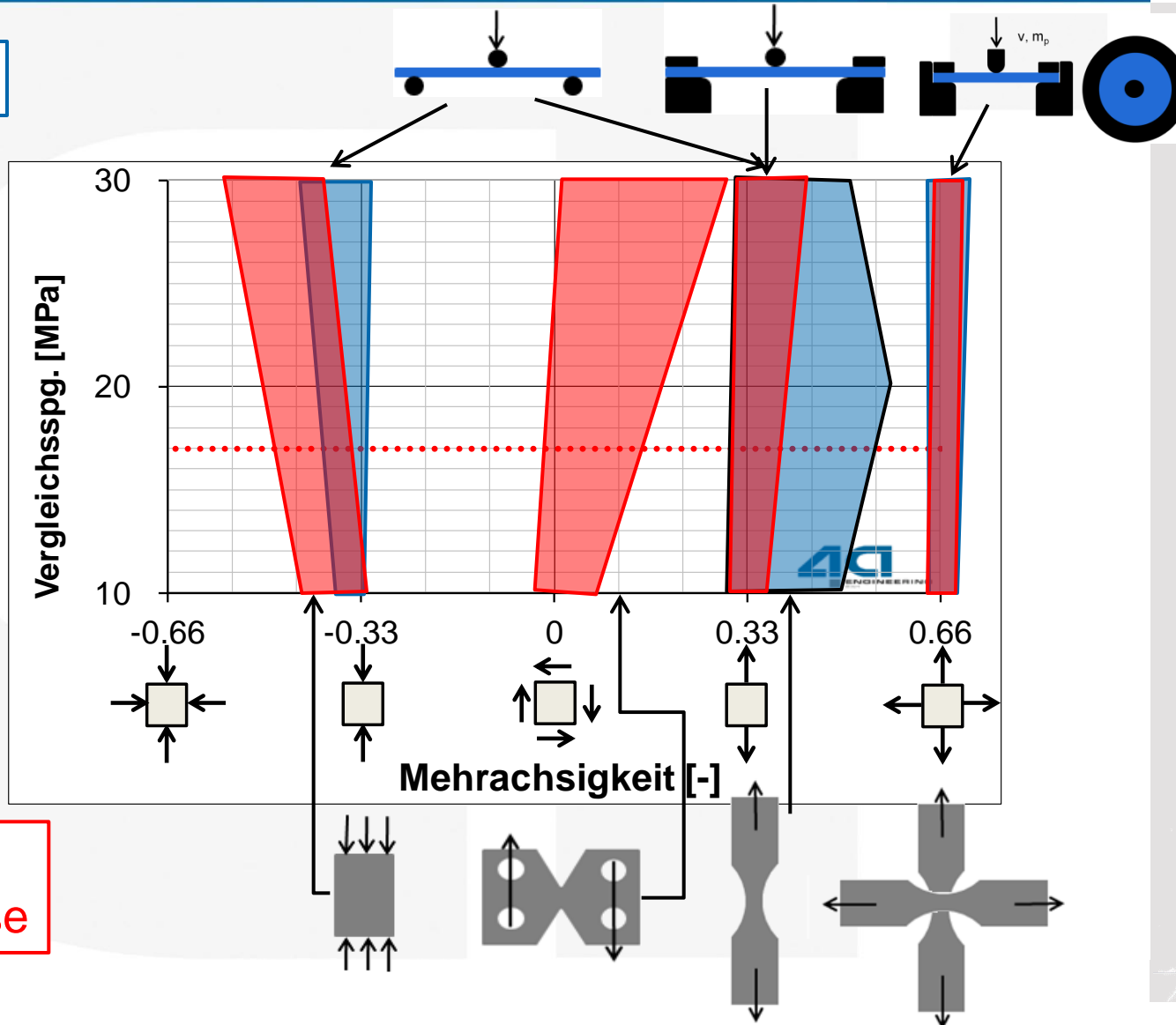
- Verfügbare Versagens- bzw. Schädigungsmodelle in LS-DYNA
- Plastische Vergleichsdehnung  
z.B. **MAT\_24: \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY**
- Plastische Vergleichsdehnung mit Schädigung  
z.B. **MAT\_81: \*MAT\_PLASTICITY\_WITH\_DAMAGE**
- Dehnratenabhängiges Vergleichskriterium  
z.B. **MAT\_19: \*MAT\_STRAIN\_RATE\_DEPENDENT\_PLASTICITY**  
oder **MAT\_124: \*MAT\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION**
- Vergleichskriterium in Abhängigkeit der Mehrachsigkeit, ...  
z.B. **MAT\_187: \*MAT\_SAMP-1**

Alternativ bietet die zusätzliche Option **\*MAT\_ADD\_EROSION** in Kombination mit einer Materialkarte eine Vielzahl an möglichen Schädigungs- und Versagensmodellierungen.

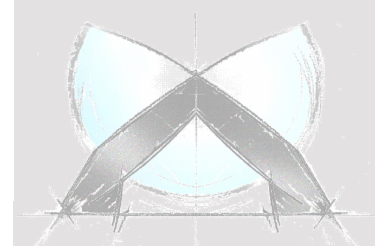


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a impetus

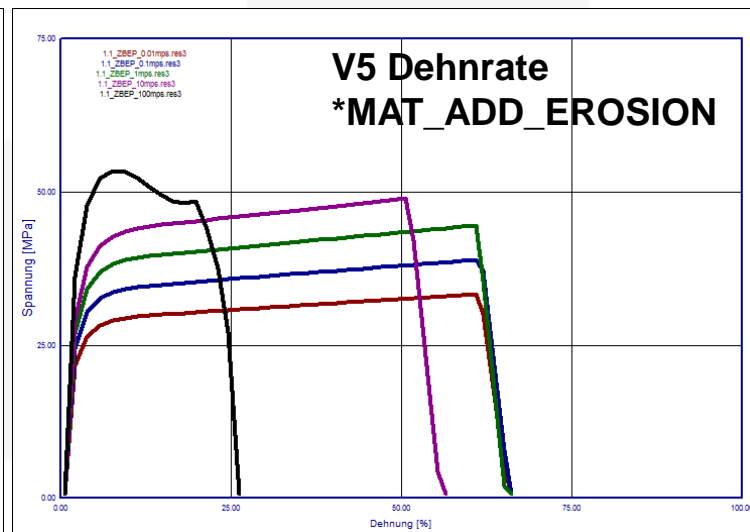
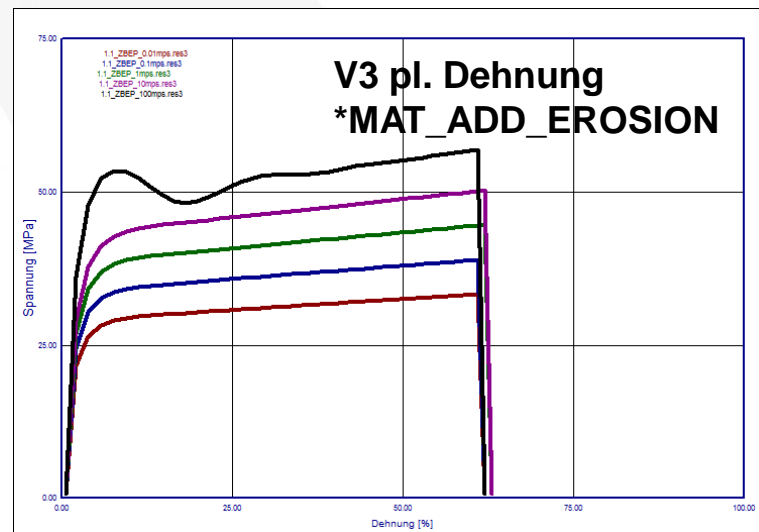
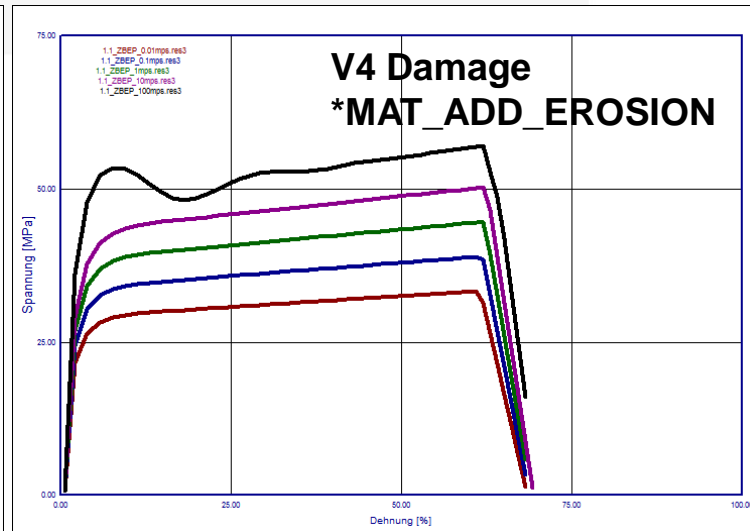
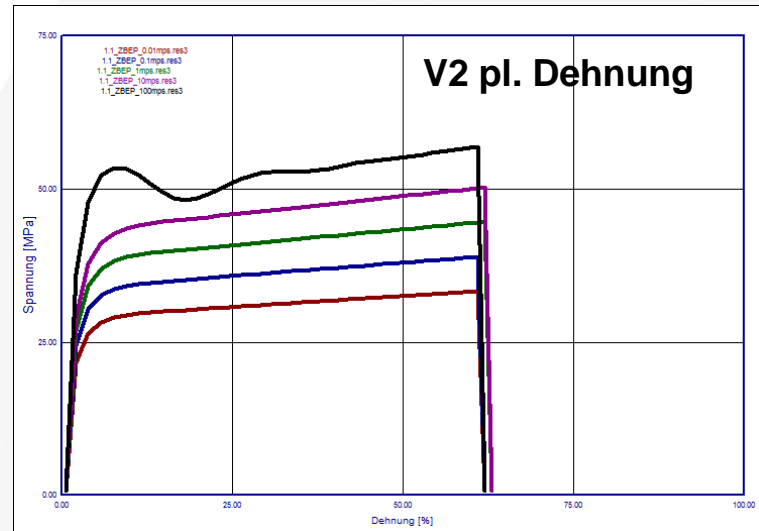


Klassische Vorgehensweise

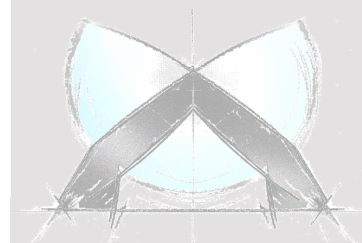


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

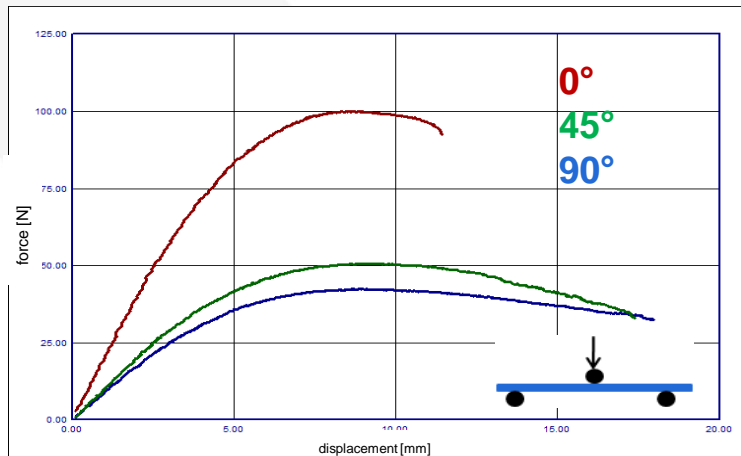
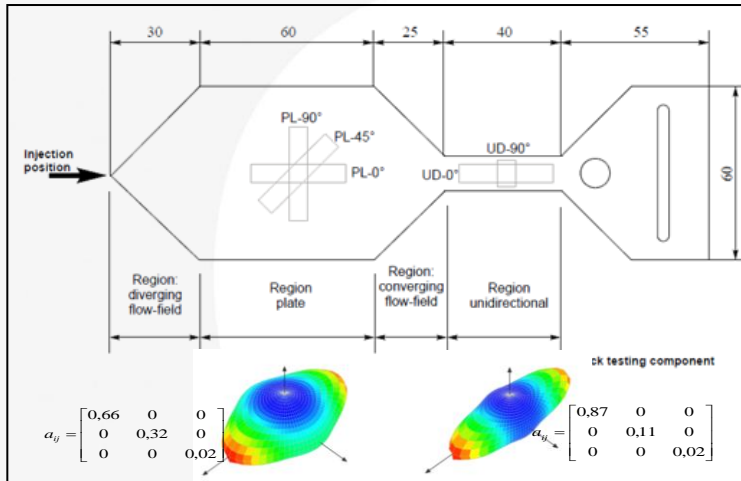
### ➤ Versagensabbildung im 1-Element-Test



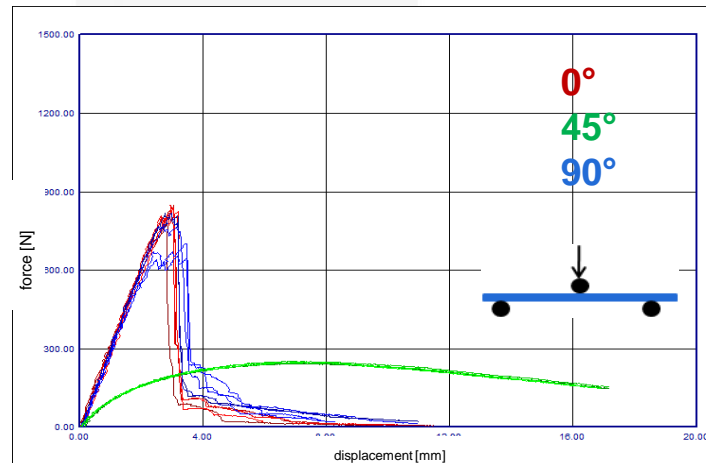
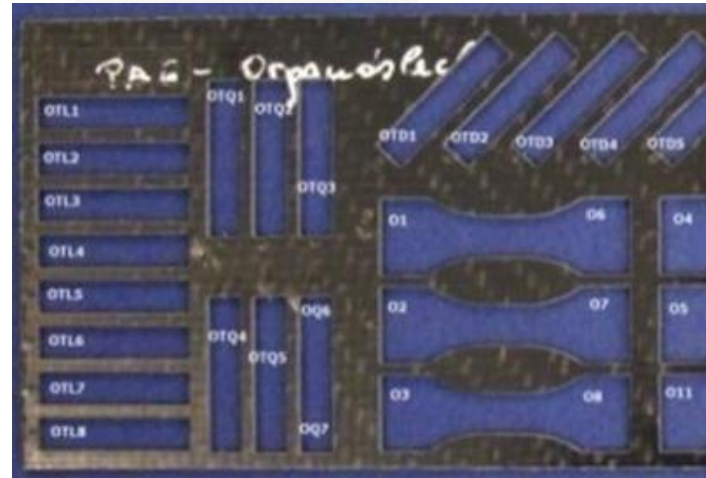
# Prüfung und Materialkartenerstellung für Composites



### Kurzglasfaserverstärkte Thermoplaste [5]



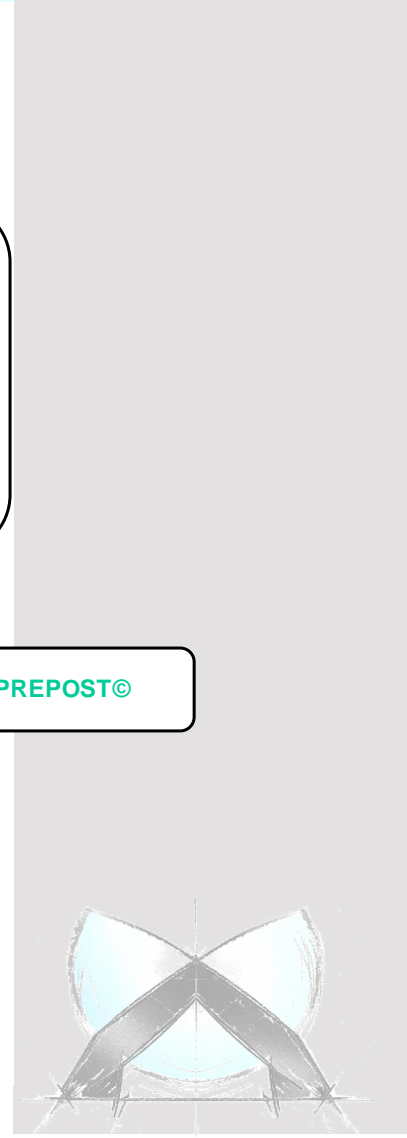
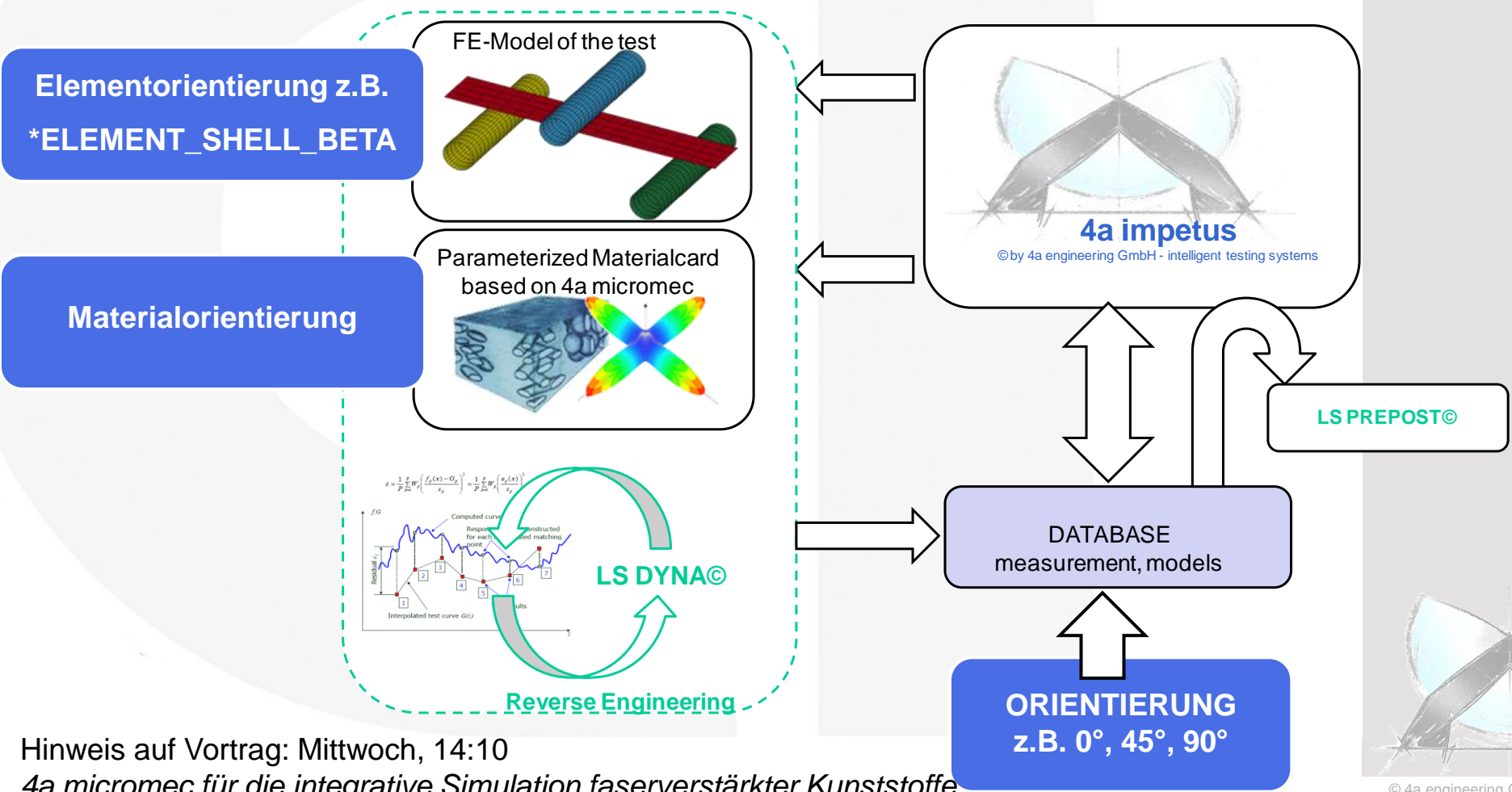
### Composite – “Organoblech” [6]



# Composites

## Kopplung Mikromechanik

➤ Für die Materialkartenerstellung muss die Mikromechanik eingebunden werden (Einfluss des Herstellungsprozesses → **Faserorientierung**)



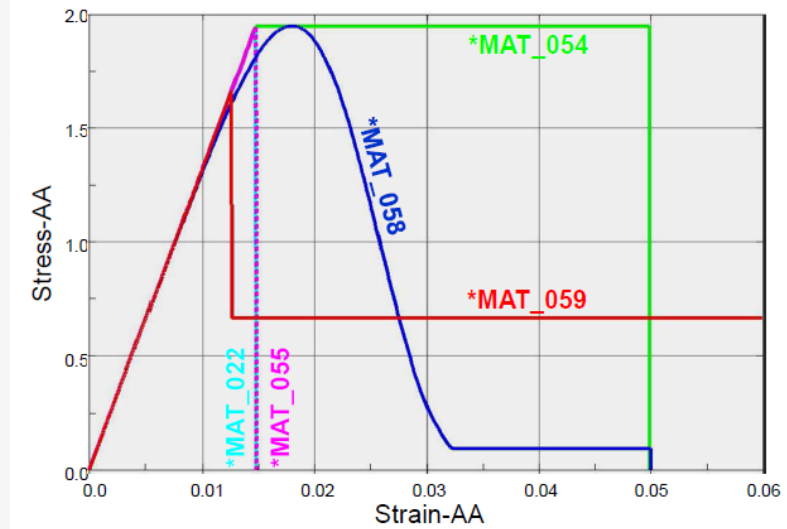
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Hinweis auf Vortrag: Mittwoch, 14:10  
 4a micromec für die integrative Simulation faserverstärkter Kunststoffe



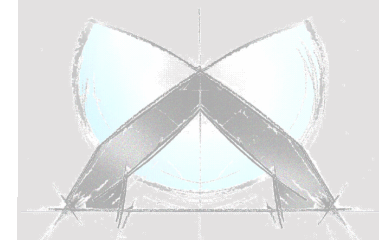
### Auszug aus LS-DYNA Manual

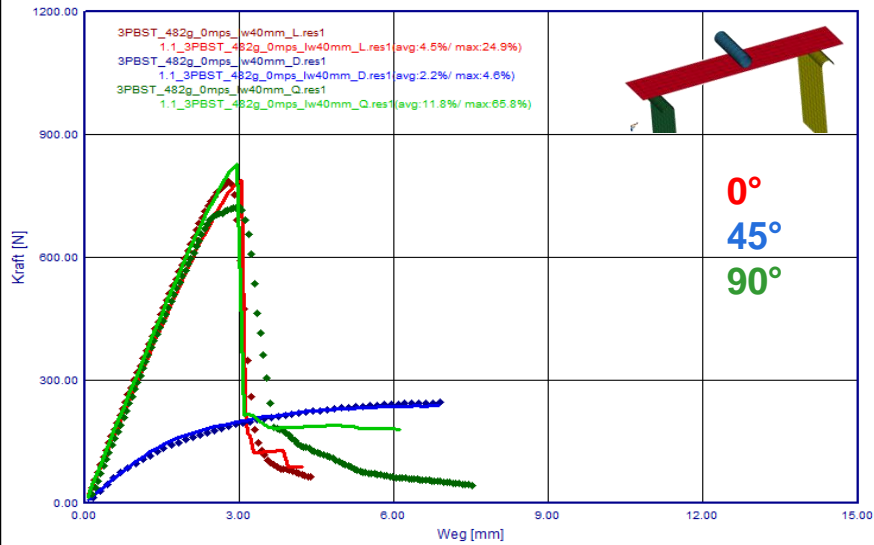
- \*MAT\_ORTHOTROPIC\_ELASTIC (Type 2)
- \*MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE (Type 22)
- \*MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE (Type 54/55)
- \*MAT\_LAMINATED\_COMPOSITE\_FABRIC (Type 58)
- \*MAT\_COMPOSITE\_FAILURE (Type 59)
- \*MAT\_RATE\_SENSITIVE\_COMPOSITE\_FABRIC (Type 158)
- ...



### Dehnratenabhängigkeit kaum verfügbar

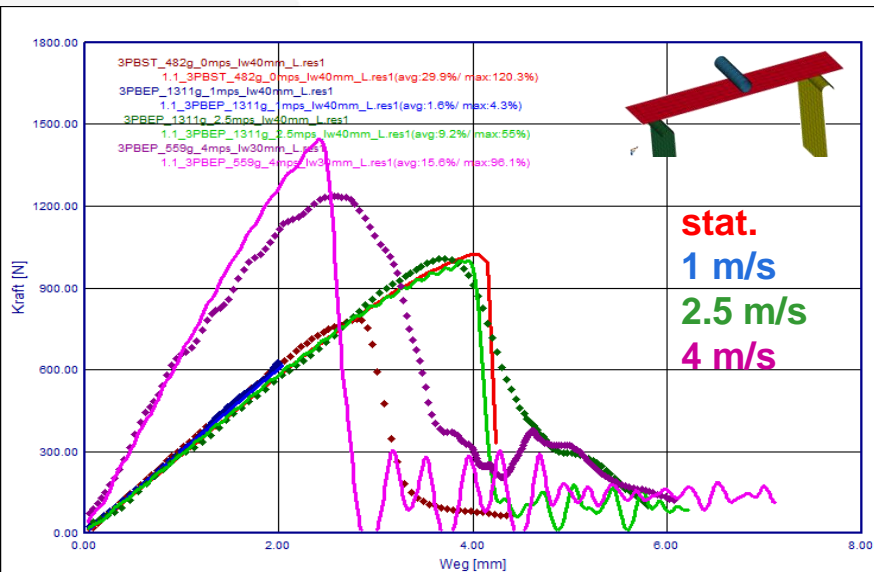
- \*MAT\_158 über eine Prony series
- \*MAT\_54 → Festigkeiten können abhängig von der Dehnrade angegeben werden





.... Mittelwertkurve Versuch  
 — Ergebnis Simulation

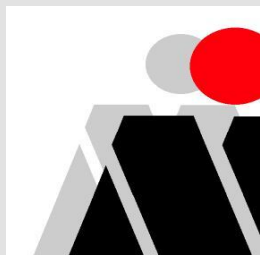
Versagen wurde auf die quasistatischen Messergebnisse angepasst

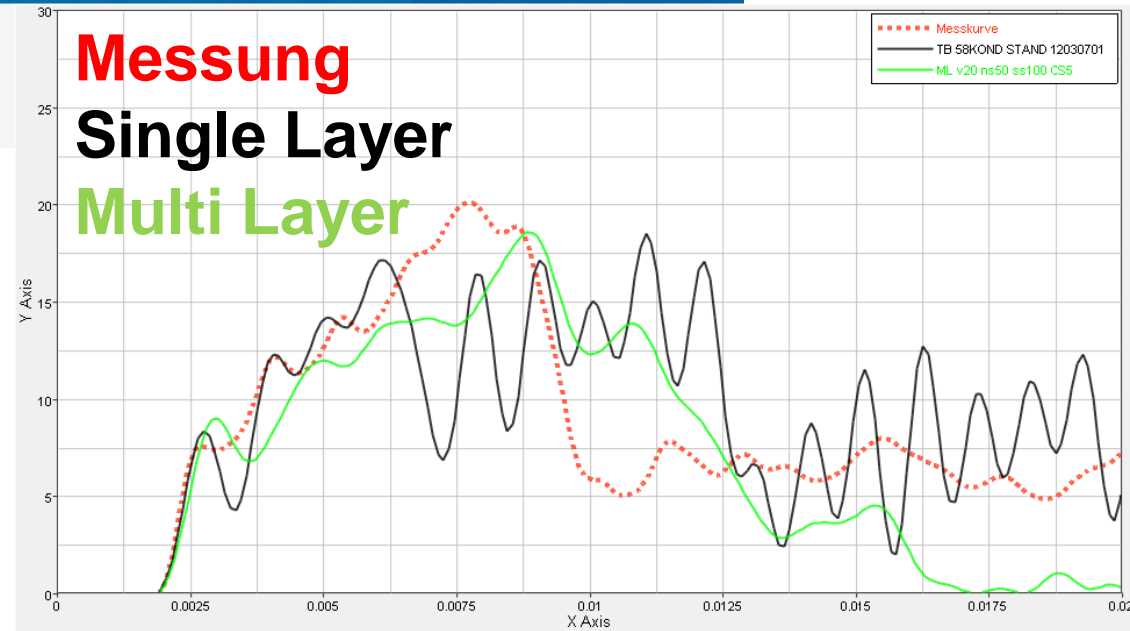
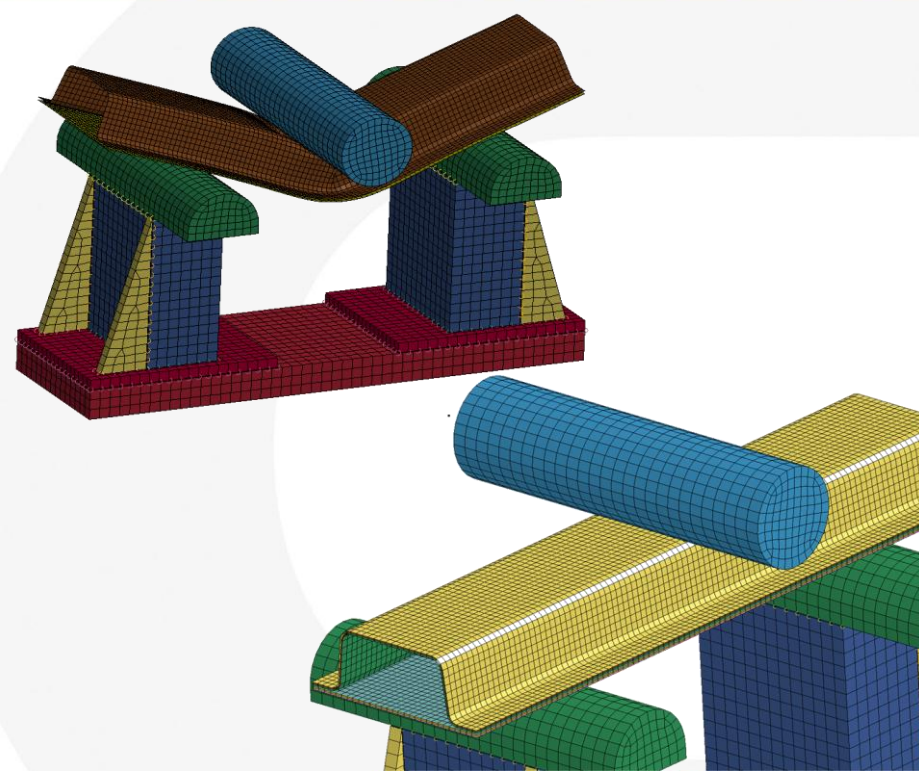


.... Mittelwertkurve Versuch 0°  
 — Ergebnis Simulation 0°

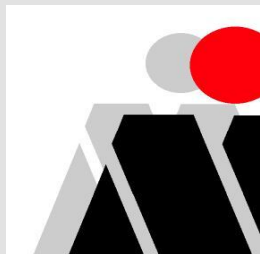
Versagen wurde auf dynamischen Lastfall angepasst

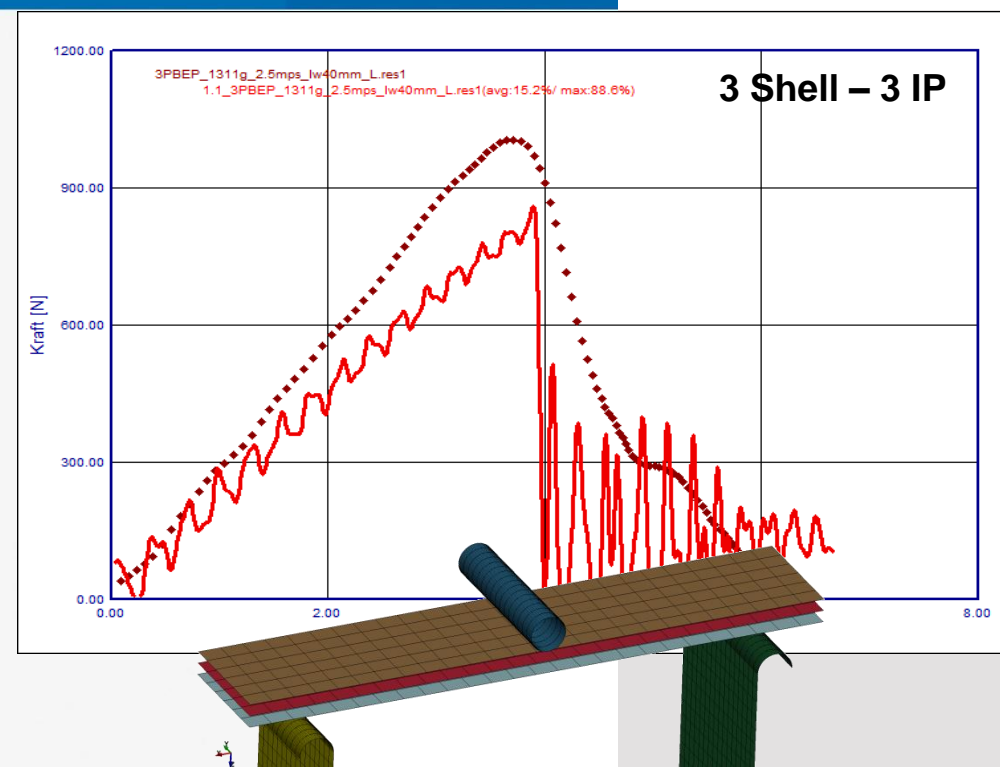
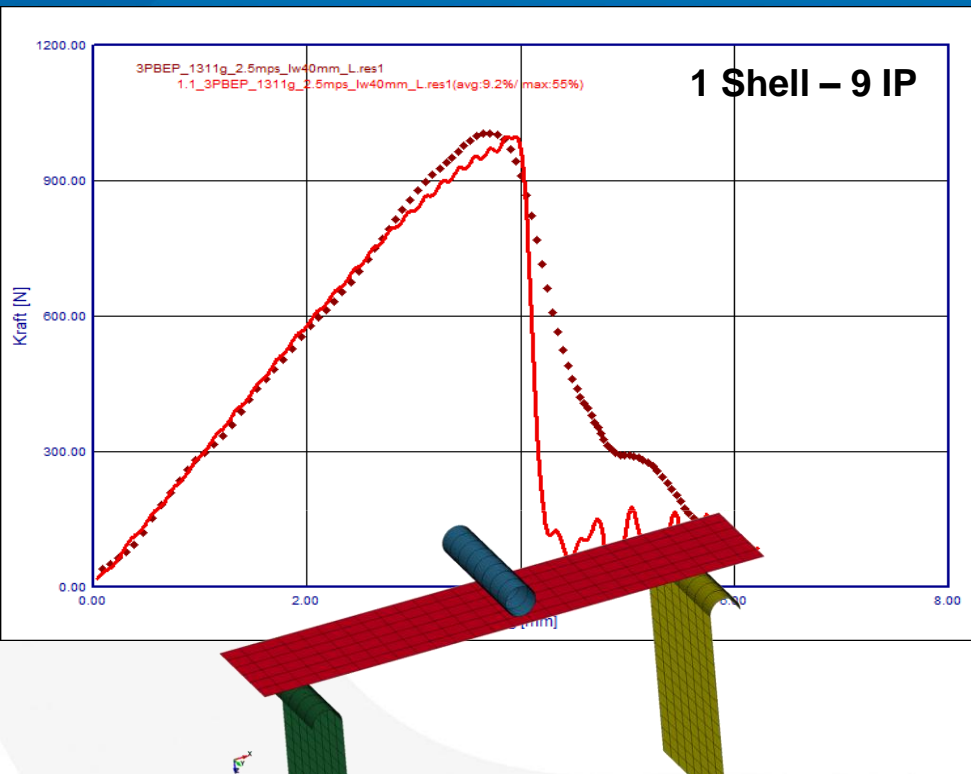
Ergebnisse mit freundlicher Genehmigung der  
 MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG [6]



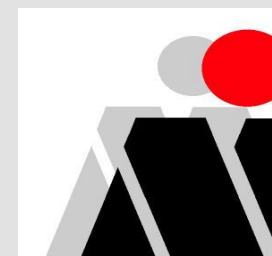


- Die Anfangssteifigkeit wie auch das 2. Plateau der Messkurve kann sehr gut abgebildet werden.
- Die maximale Last ist jedoch etwas niedriger.
- Das initiale Versagen befindet sich analog zum Versuch im Bereich der Finne, jedoch zeitlich später.





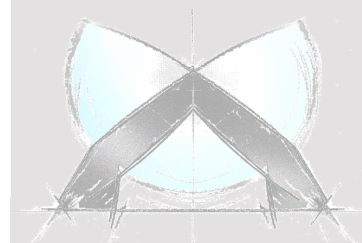
- Ermittelte Materialkarte kann den Versuch bei einer Idealisierung \*PART\_COMPOSITE mit 9 Integrationspunkten gut abbilden.
- Ein Multi-Layer-Aufbau ohne Modifikation führt zu einer geringen Steifigkeit, der Bruchzeitpunkt stimmt recht gut mit den Messdaten überein.



- **4a impetus** : ein Komplettsystem vom Test zur validierten Materialkarte
  - ABAQUS, LS DYNA, PAM Crash
  - Biegung, gesp. Biegung, Zug, Schub, Druck, Durchstoß, T-Probe – statisch und dynamisch
- Weiters wurde auf die Prüfung und Materialkartenerstellung für **Schaumwerkstoffe**, **Thermoplaste** und **Composites** eingegangen sowie Einflussfaktoren erläutert.
- Materialkarte und Modellierung sind ein zusammenhängendes System
  - **gemeinsam validiert**
- Als Ausblick wurden Möglichkeiten der **Versagensabbildung** aufgezeigt, die teilweise schon **in 4a impetus implementiert** sind. Erweiterungen, insbesondere bessere Integration von **Versagens- und Schädigungsmodellen**, sind **geplant**.



.. in physics we trust



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

- [1] **Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden der Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation**  
*DKI Deutsches Kunststoff-Institut, Fraunhofer IWM,  
KIT Karlsruhe Institute of Technology  
Abschlussbericht 15826 N, 2011*
- [2] **LS-Dyna Manual – Volume II – Material Models, Version R7.0, Livermore Software**
- [3] **Abaqus Manual – VUMAT for Molded Plastics, Simulia - Dassault Systèmes**
- [4] **GISSMO – Material Modeling with a sophisticated Failure Criteria**  
*A. Haufe, P. DuBois, F. Neukamm, M. Feucht*  
LS-DYNA Developer Forum 2011, Stuttgart  
<http://www.dynamore.de/de/download/papers/forum11/entwicklerforum-2011/haufe-gissmo.pdf>



**[5] 4a micromec für die integrative Simulation faserverstärkter Kunststoffe**

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

11. LS-DYNA Forum 2012, Ulm

<http://www.dynamore.de/de/download/papers/ls-dyna-forum-2012/documents/materials-3-4>

**[6] Dynamische Materialcharakterisierung von Composites mit 4a impetus**

*A. Dietrich, M. Fritz, B. Jilka, P. Reithofer (4a engineering GmbH)*

*B. Hofer, B. Fellner (MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG)*

10. 4a Technologietag 2013, Schladming

[http://technologietag.4a.co.at/images/tt2013/s5bv2\\_Reithofer.pdf](http://technologietag.4a.co.at/images/tt2013/s5bv2_Reithofer.pdf)



© 4a engineering GmbH, all rights reserved