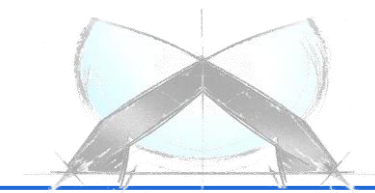
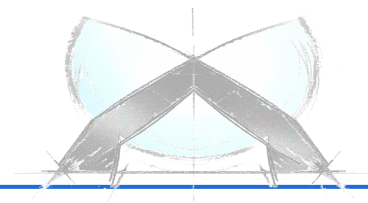


Workshop „Plastics“, Bamberg 6.10.2014

DYNAmore GmbH
Industriestraße 2
70565 Stuttgart
<http://www.dynamore.de>

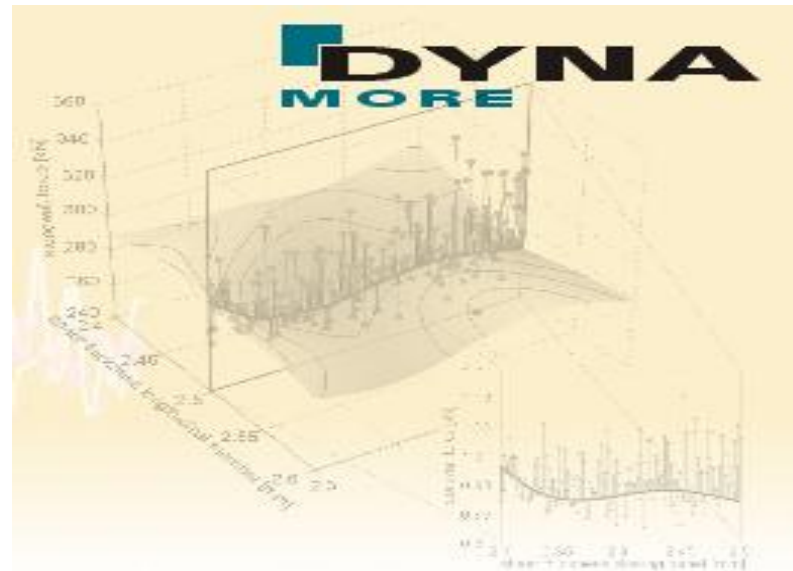


- Materialverhalten von Kunststoffe (A. Förderer)
- Kurzvorstellung des Prüfsystems 4a impetus (M. Rollant)
- Materialmodelle für Kunststoffe (V. Effinger)
- Anpassung komplexe Fließkurve (P. Reithofer)
- Möglichkeiten der Versagensabbildung (A. Fertschej)
- Einfluss Idealisierung (A. Fertschej)
- Zusammenfassung



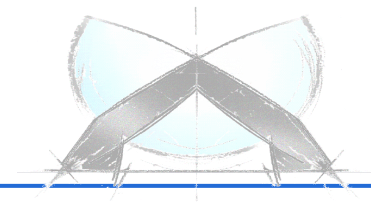
Eigenschaften von Kunststoffen

A. Förderer, V. Effinger (DYNAmore GmbH)
P. Reithofer (4a engineering GmbH)

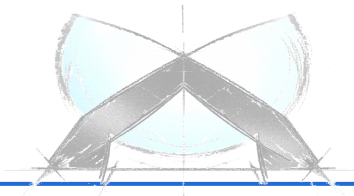
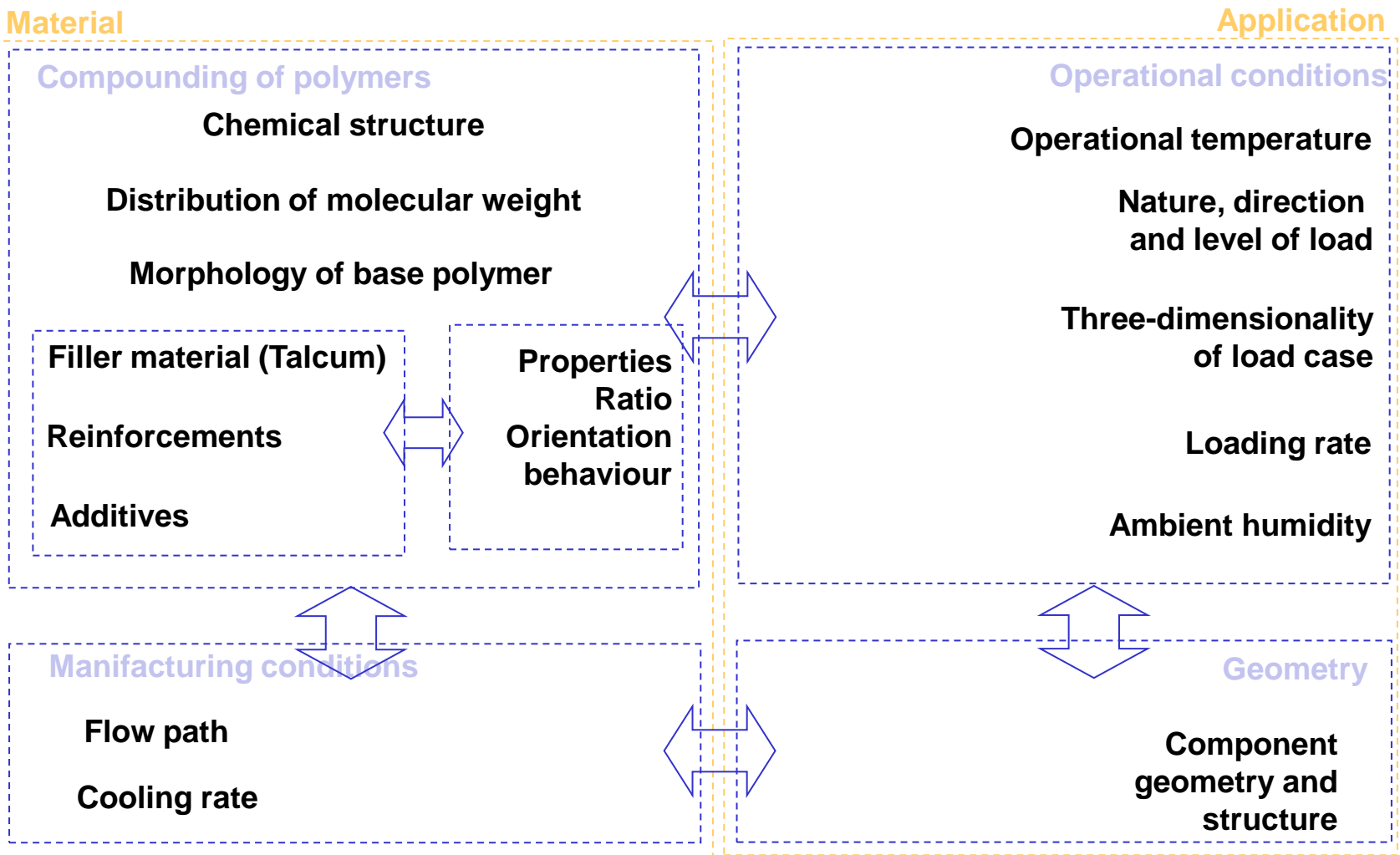


Modellierung von Kunststoffen, Bamberg
6. Oktober 2014

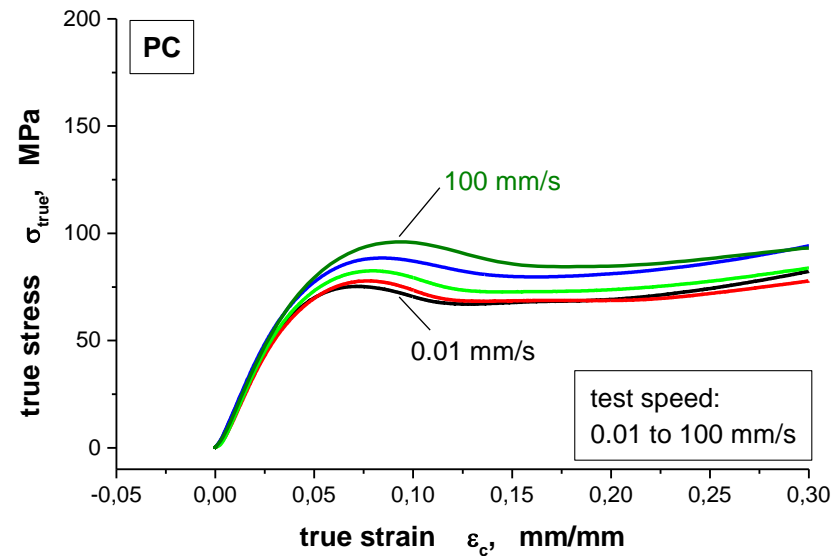
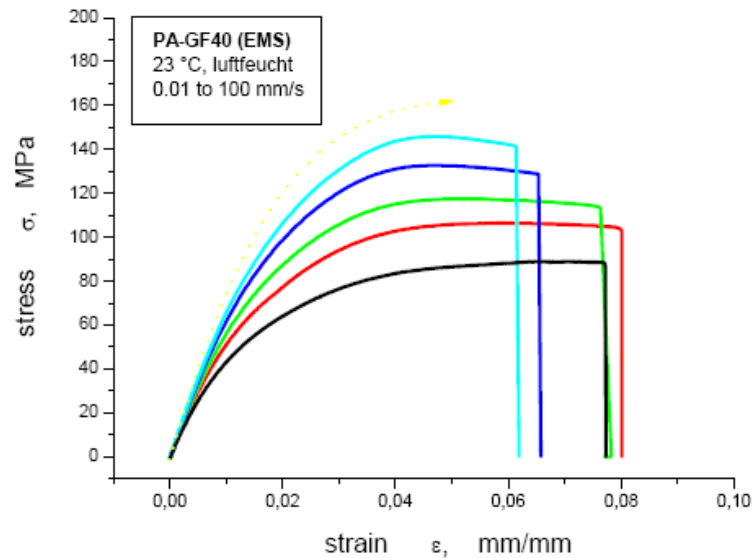
DYNAmore GmbH
Industriestraße 2
70565 Stuttgart
<http://www.dynamore.de>



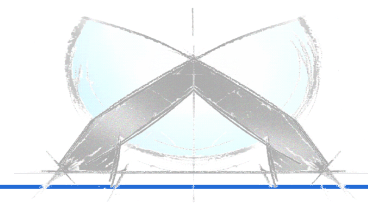
Influence parameters for material behaviour of plastics:



➤ Rate dependency (test speed)

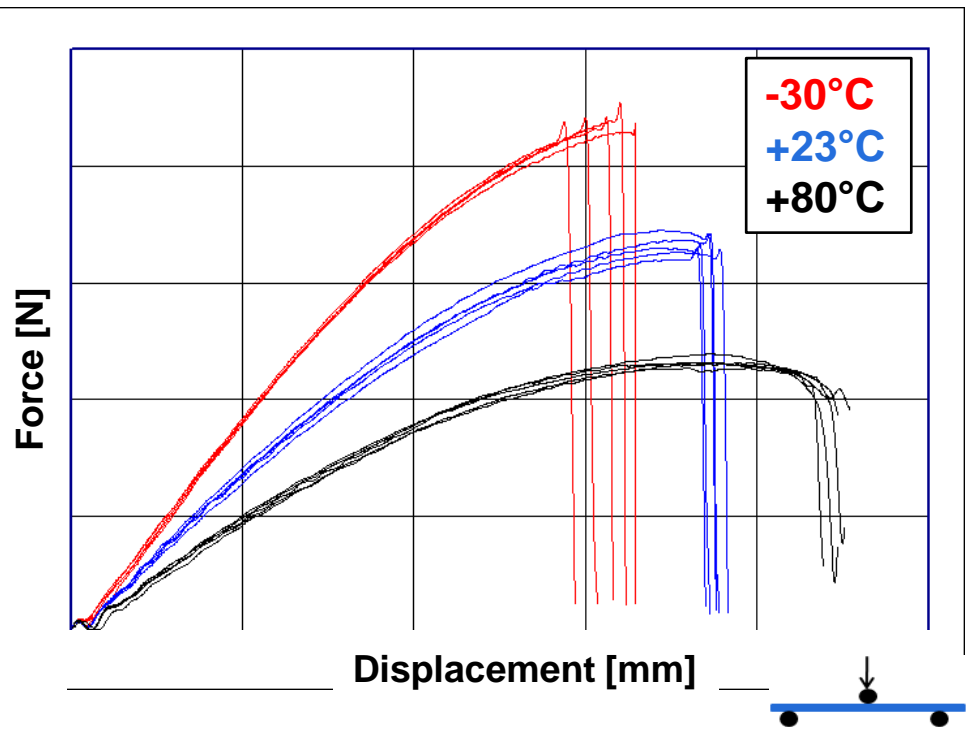


- Rate dependency differs from material to material
- Examples for different materials [1], [2], [3]

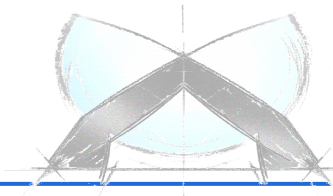
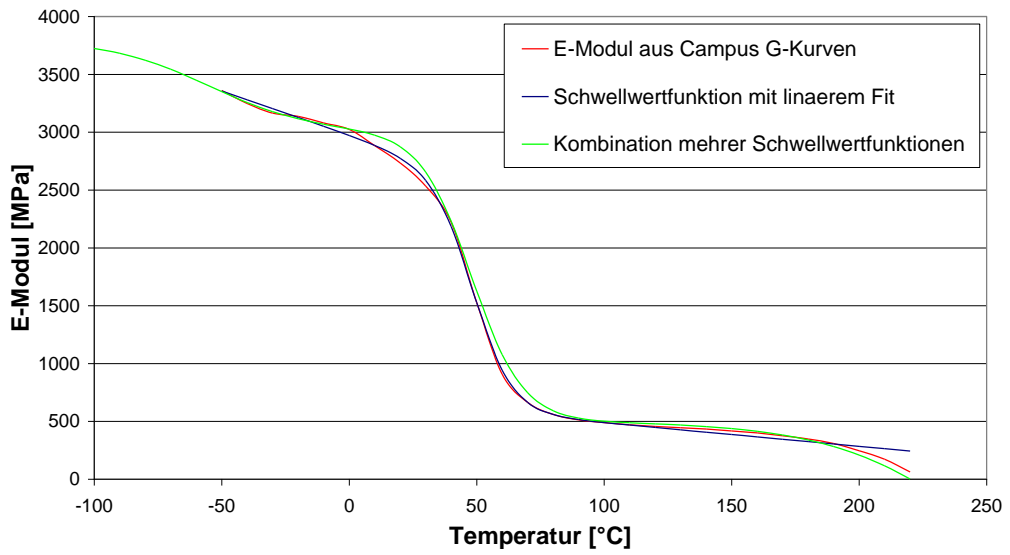


➤ Temperature effects

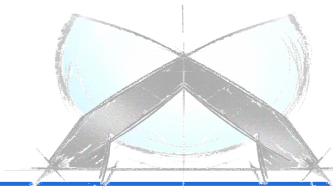
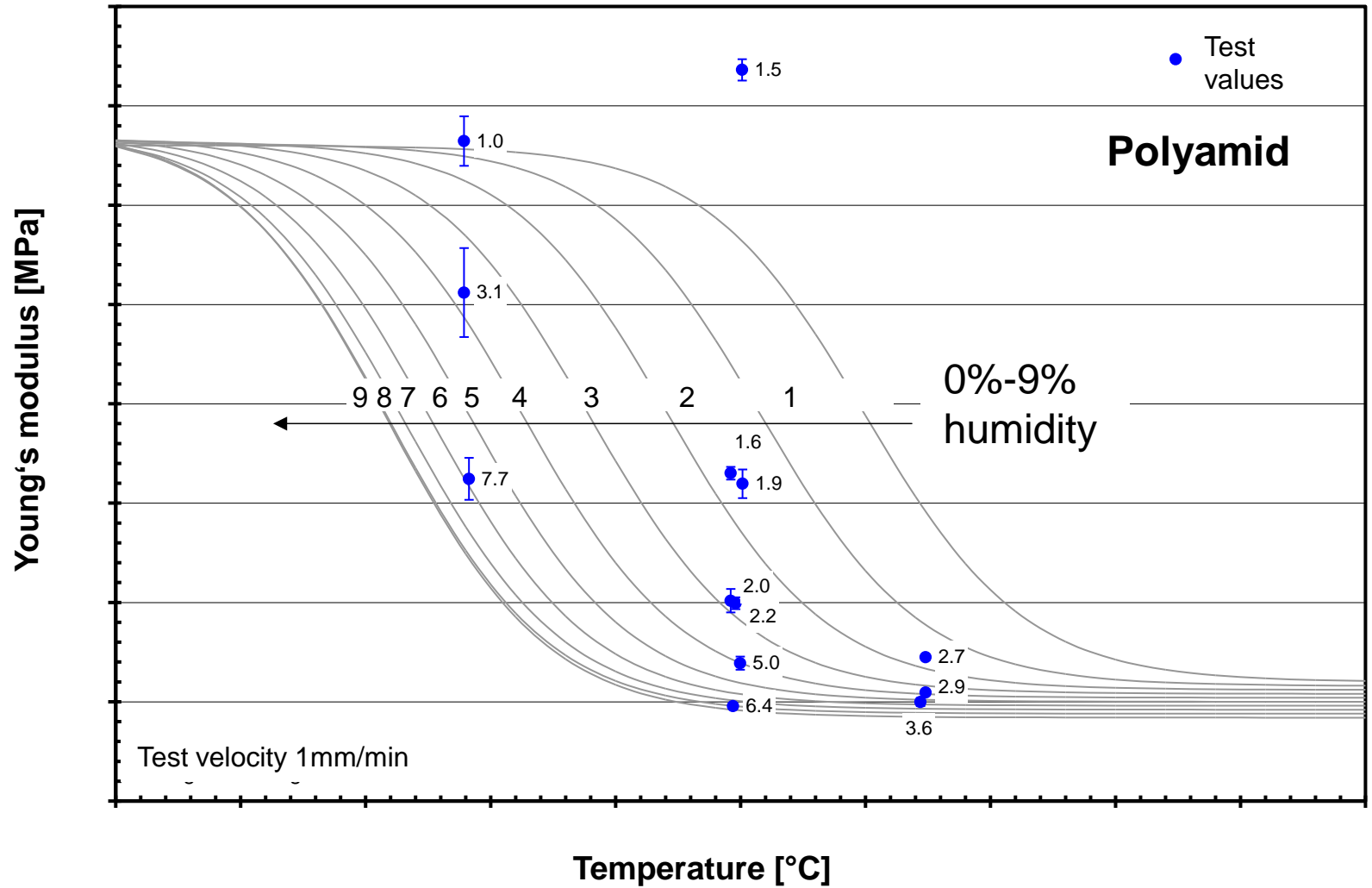
PP GF40



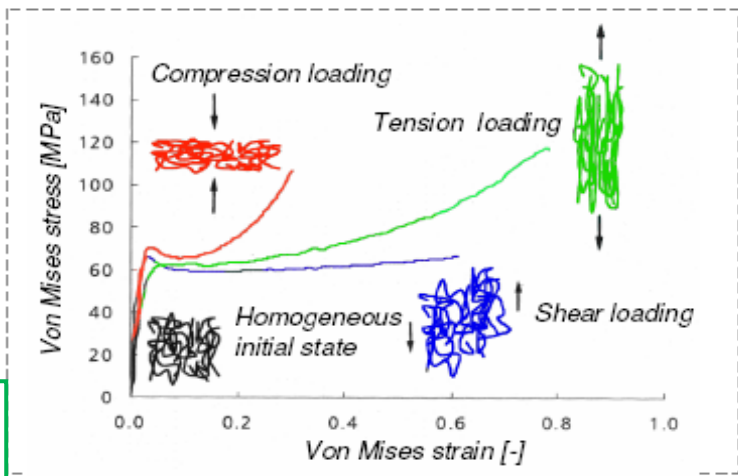
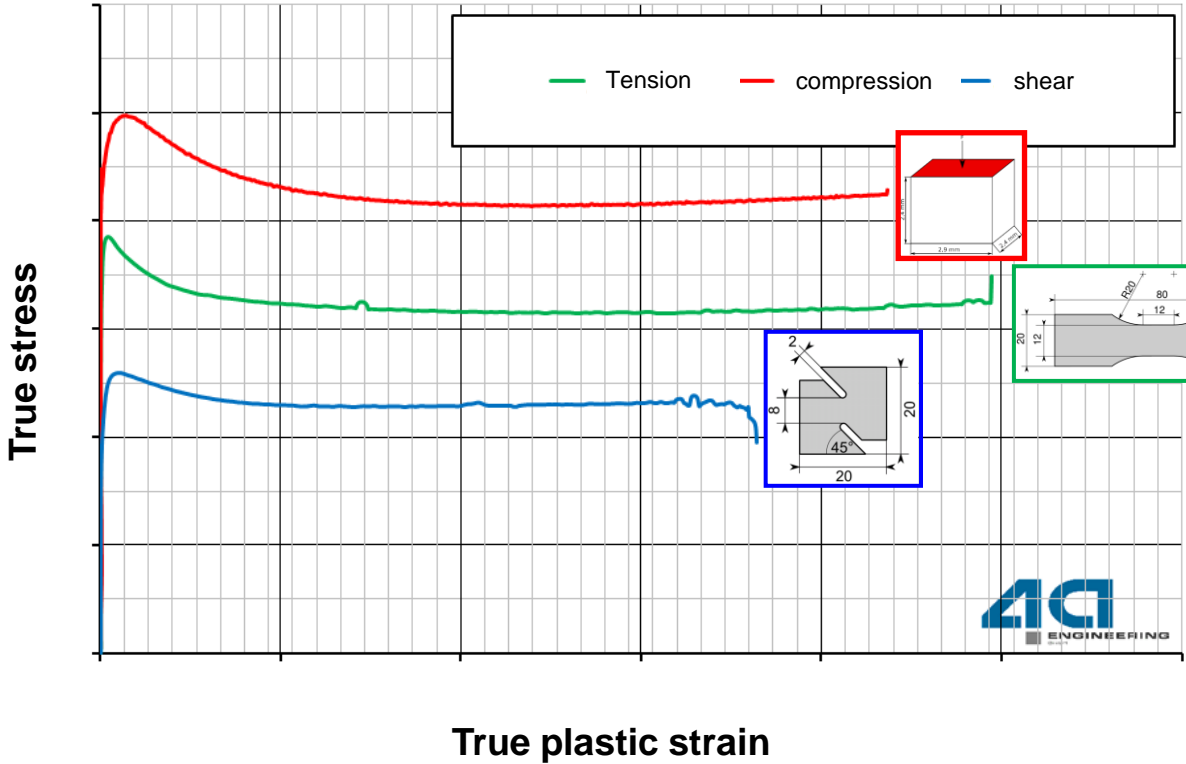
Young's modulus of PA



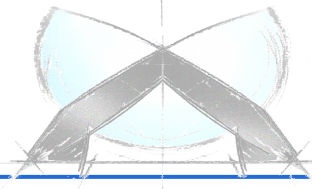
➤ Humidity effects



➤ Load type dependency

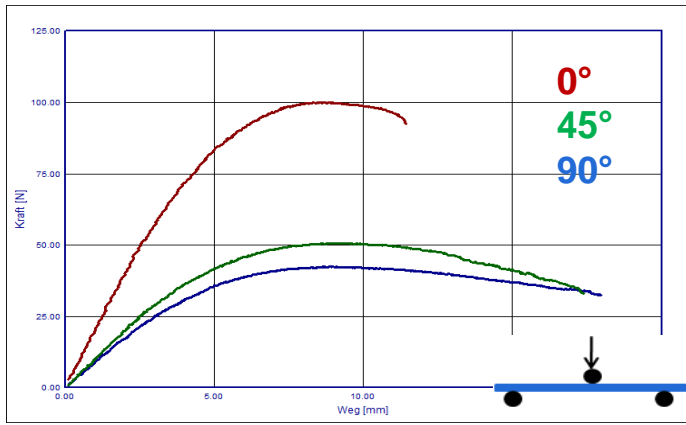
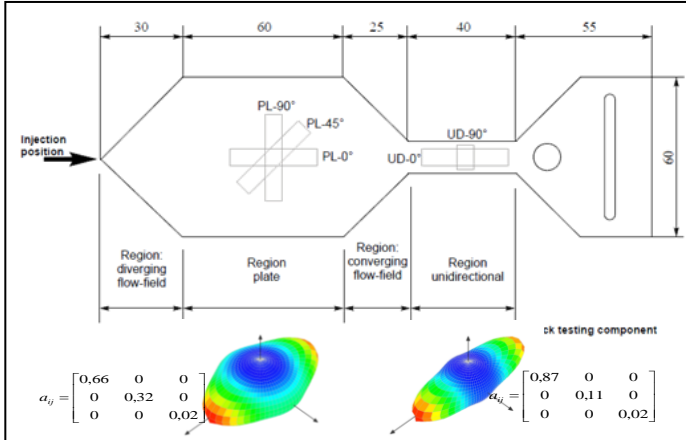


Many plastics show a strong load type dependency (tension / compression / shear). [4] [5] [6]

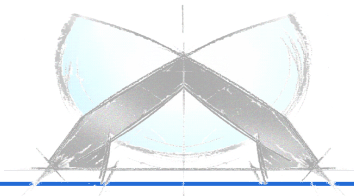
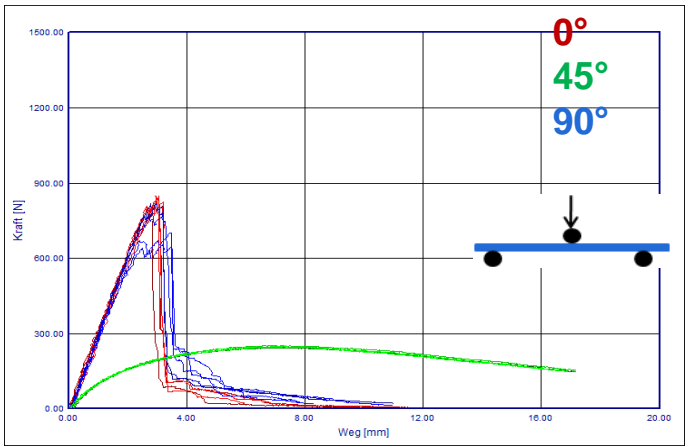
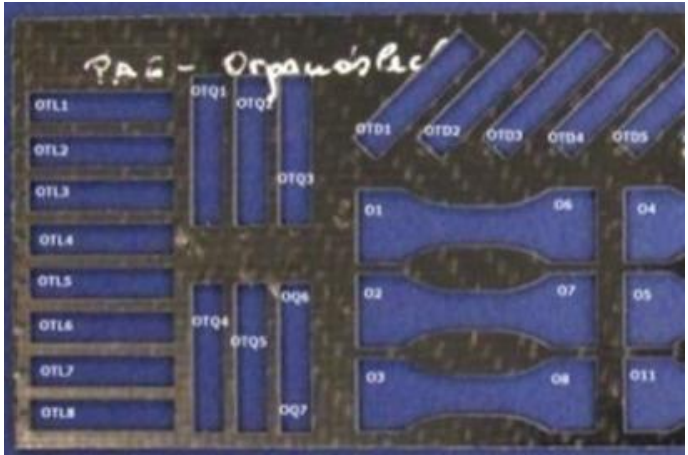


- Anisotropy due to fibre reinforcement
- Process chain (injection moulding, joint lines)

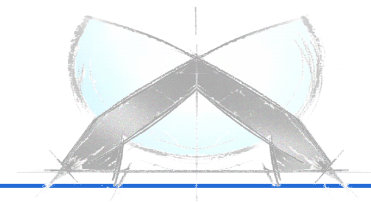
Short fibre thermoplastics [7]



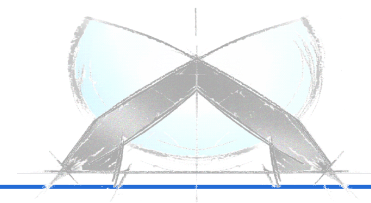
Composite – “Organoblech” [8]



- Influence parameters
 - rate dependency (test speed)
 - temperature effects
 - humidity effects
 - load type dependency
 - anisotropy due to fibre reinforcement
 - process chain (injection moulding, joint lines)
- Further influence parameters
 - aging
 - radiation (UV) effects

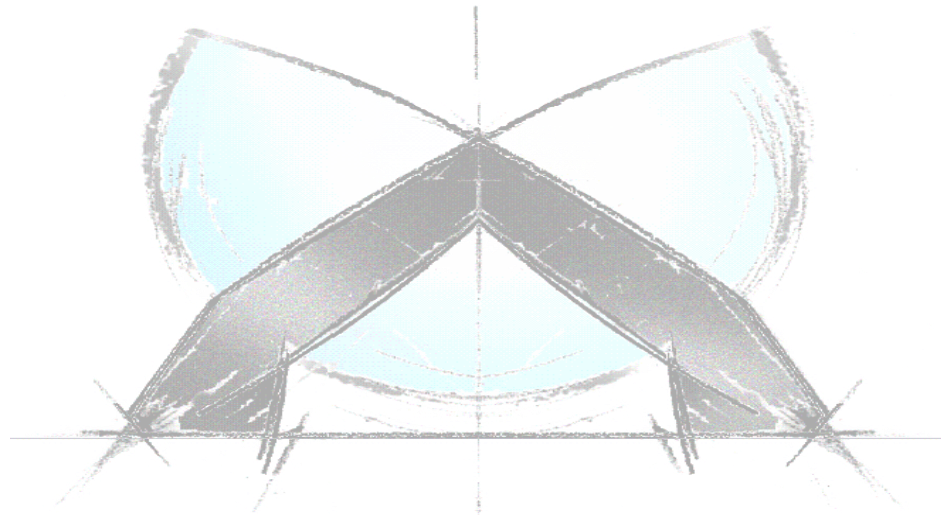


- Due to influences
 - Specimen conditioning before testing
 - Micromechanical modeling
- State of the art: Influence parameters are neglected for crash simulation but not during testing



Kurzvorstellung des Prüfsystems 4a impetus

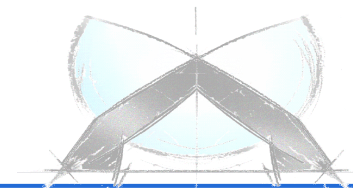
P. Reithofer, M. Rollant, A. Fertschej (4a engineering GmbH)

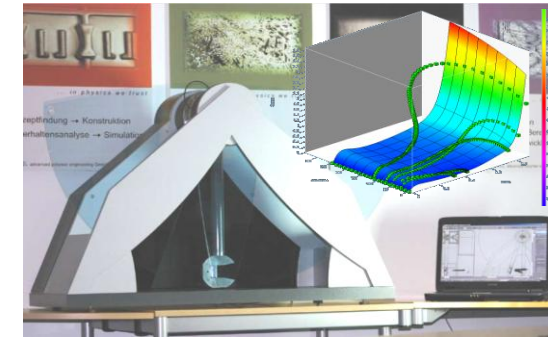


Modellierung von Kunststoffen, Bamberg

6. Oktober 2014

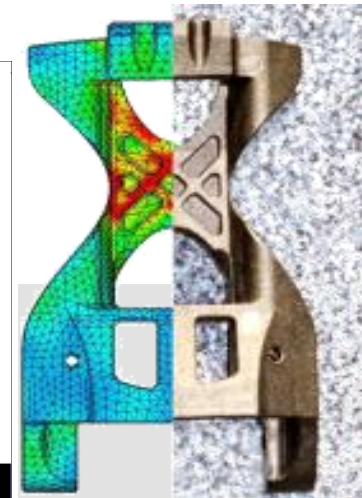
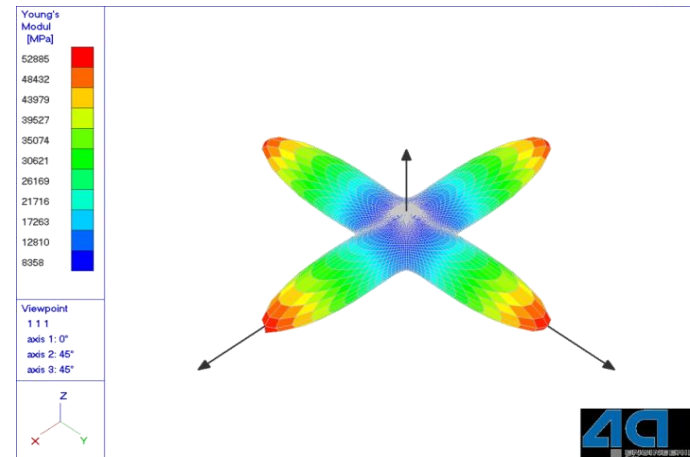
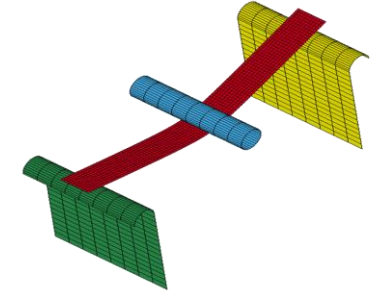
4a engineering GmbH
Industriepark 1
A-8772 Traboch
reithofer@4a.co.at
++43 (0) 664 80106 601



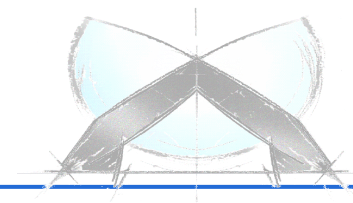


.. in physics we trust

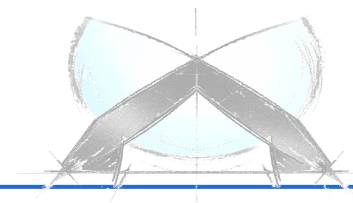
- Gründungsjahr 2002
- F&E - Dienstleistung
- 15 bis 20 Kernkunden
- bisher mehr als 500 Projekte
 - 45% Automotive
 - 15% Luft- und Raumfahrt
 - 15% Maschinenbau
 - 10% Medizintechnik
 - 15% Consumer goods
- Kernkompetenzen
 - Kunststoff- und Werkstoffwissenschaften
 - Numerische Simulationsmethoden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



- Einleitung
- Prüfmöglichkeiten
- Beispielmessergebnisse
- Vorführung dynamischer Biegeversuche
(unverstärkter, kurzfaserverstärkter Kunststoff, Alu,
Stahl, Holz, Composite, ...)



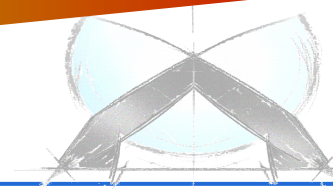
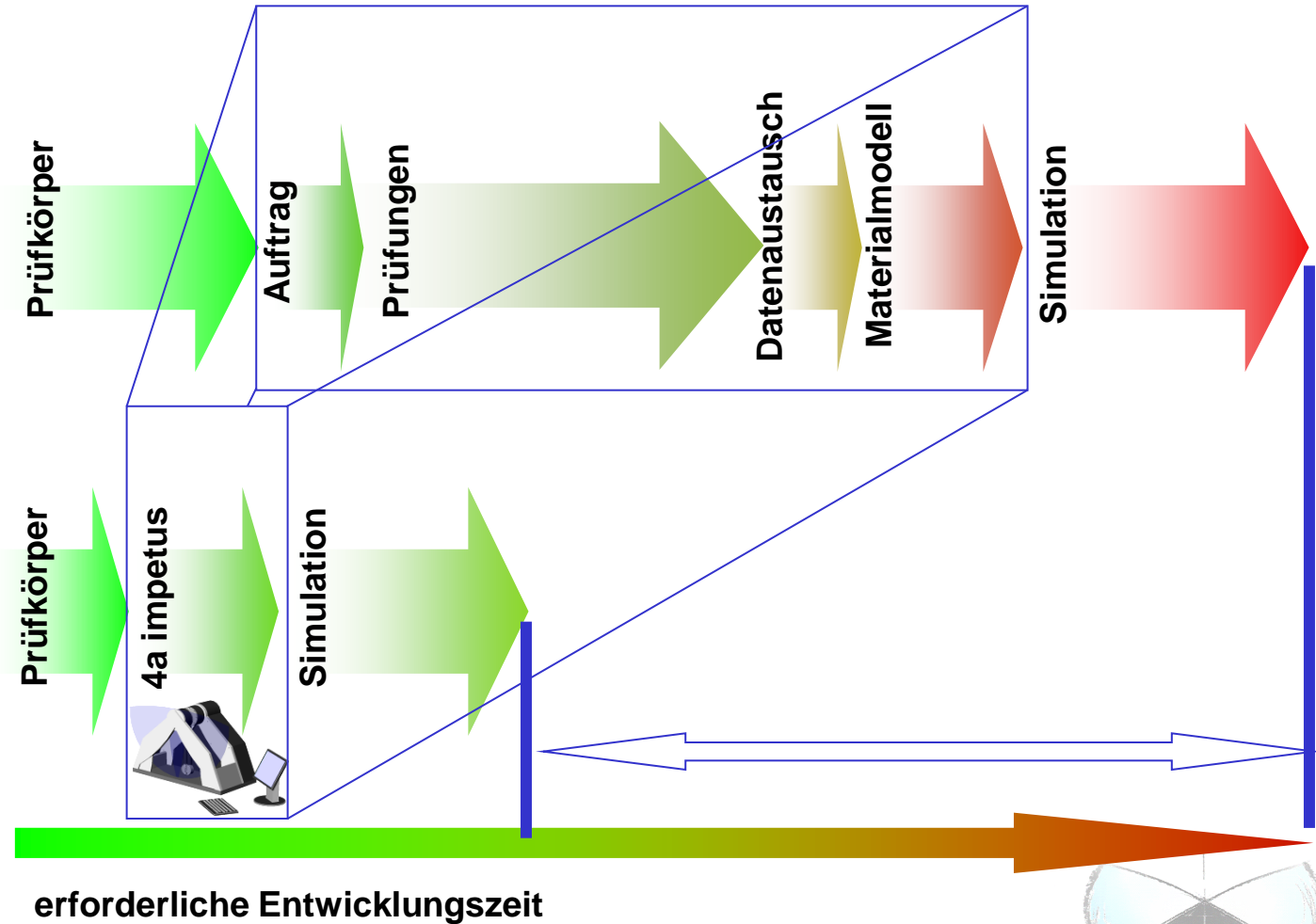
Einleitung



Einleitung

Motivation

- Entwicklungszeiten und –kosten senken
- Zeitlicher Vorsprung
- Probekörper aus dem Bauteil
 - Realistisches Versagen an der Oberfläche
 - Belastung und Entlastung
 - Spannungsverlauf über den Querschnitt
- Datenbankstruktur
- Auswertung und Validierung in einem System



➤ Prüfungsarten

Druckversuch

Biegeversuch

Durchstoßversuch

Komponenten

➤ Einfachpendelausführung

Geschwindigkeitsbereich 500 - 4500 mm/s

Maximale Energie 20J

Maximal zulässige Beschleunigung 2000 g

➤ Optionale Doppelpendelausführung

Geschwindigkeitsbereich 500 - 9000 mm/s

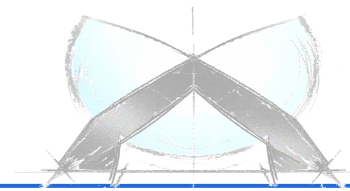
➤ Sensoren

Temperatur- und Feuchtesensor

Tauschbare Beschleunigungssensoren

Winkelsensoren

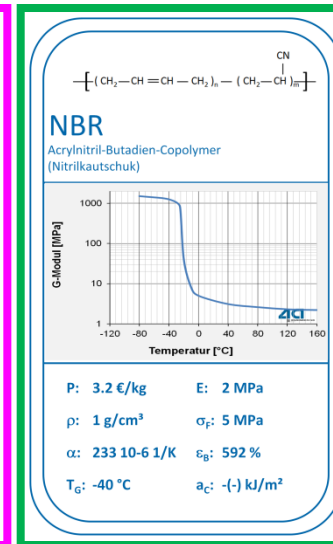
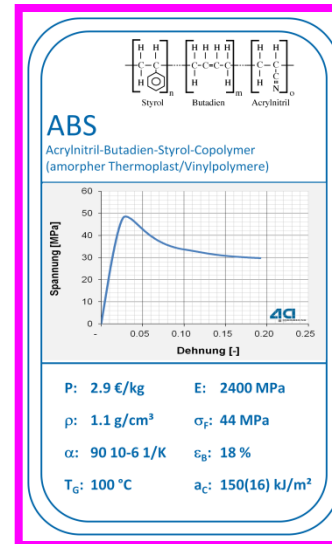
zur Bestimmung von Anfangsgeschwindigkeit und Nullpunkt



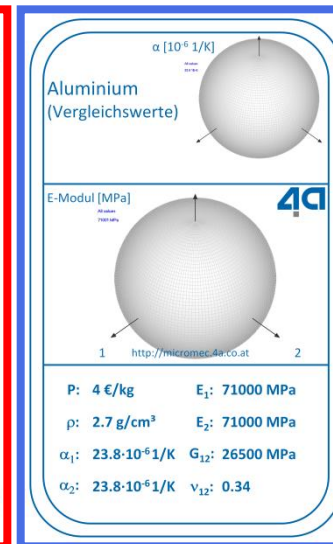
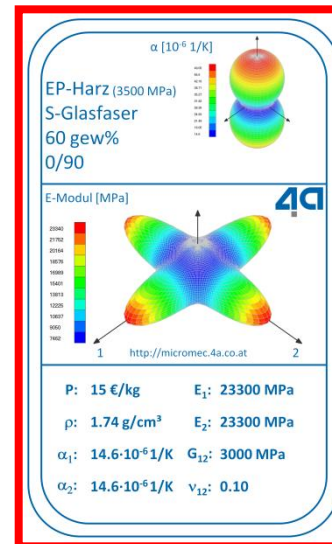
Einleitung

Geprüfte Materialien

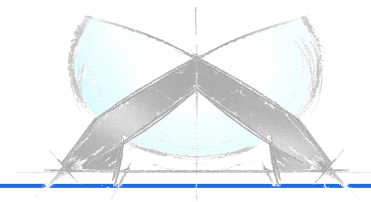
- **Thermoplaste** (ASA, ABS+PA; ABS+PC; PA6; PA6(6) GF30..50; PA66+P6; PBT GF30; PC; PE; PP; PP+Lack; PP/EPDM; PP GF20..40; PP Impakt modifiziert; PP MX10; PP MX20; PP MX40; PP CF; PP+EPDM; MuCell-Materialien, ...)
- **Schäume** (EPP30..80; PU RG 55, PU RG 65)
- **Elastomere** (EPDM, SILIKON)
- **Duroplaste**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



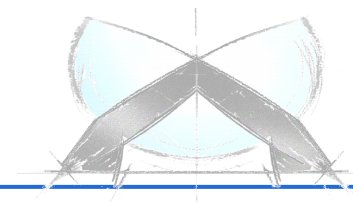
aus:
4a Quartett
Kartenspiel
"Kunststoffe"



aus:
4a Quartett
Kartenspiel
"Composites"



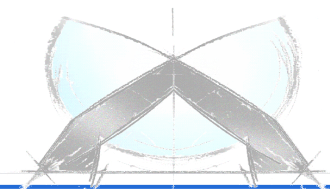
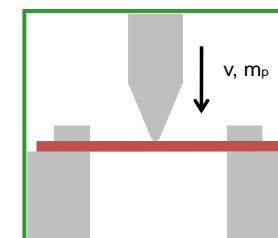
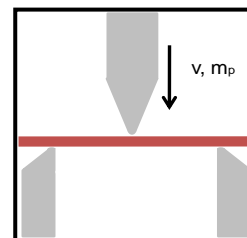
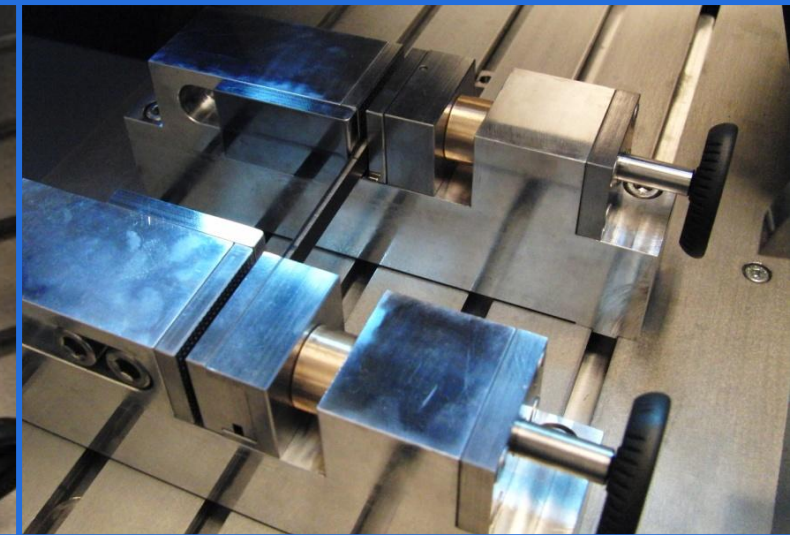
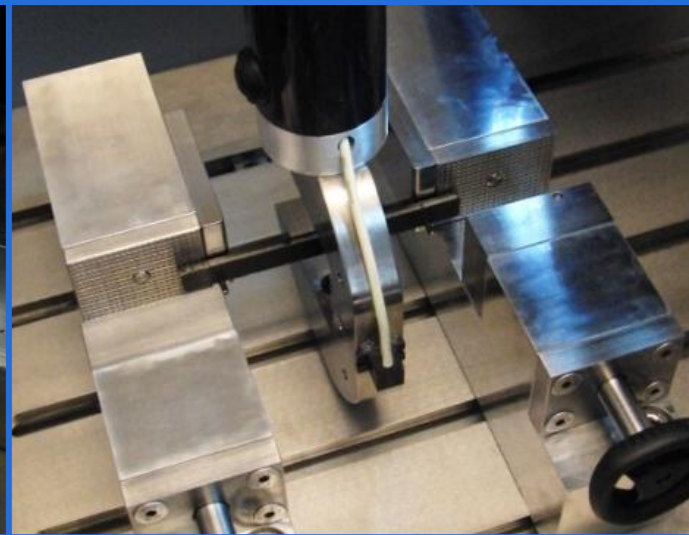
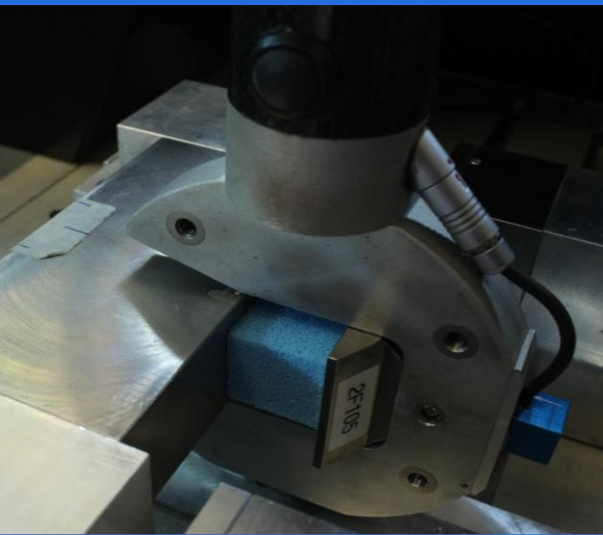
Prüfmöglichkeiten

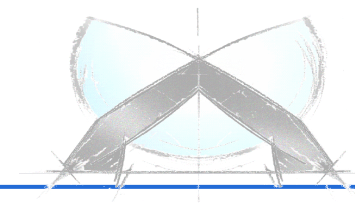


Prüfmöglichkeiten

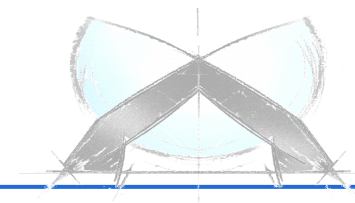
Testmöglichkeiten - Materialcharakterisierung

- Druckversuch (Schaumwerkstoffe)
- Biegeversuch (kompakte Werkstoffe)
- Gespannter Biegeversuch (dominierender Zuganteil)
- Quasistatische Tests werden standardmäßig als Ergänzung durchgeführt





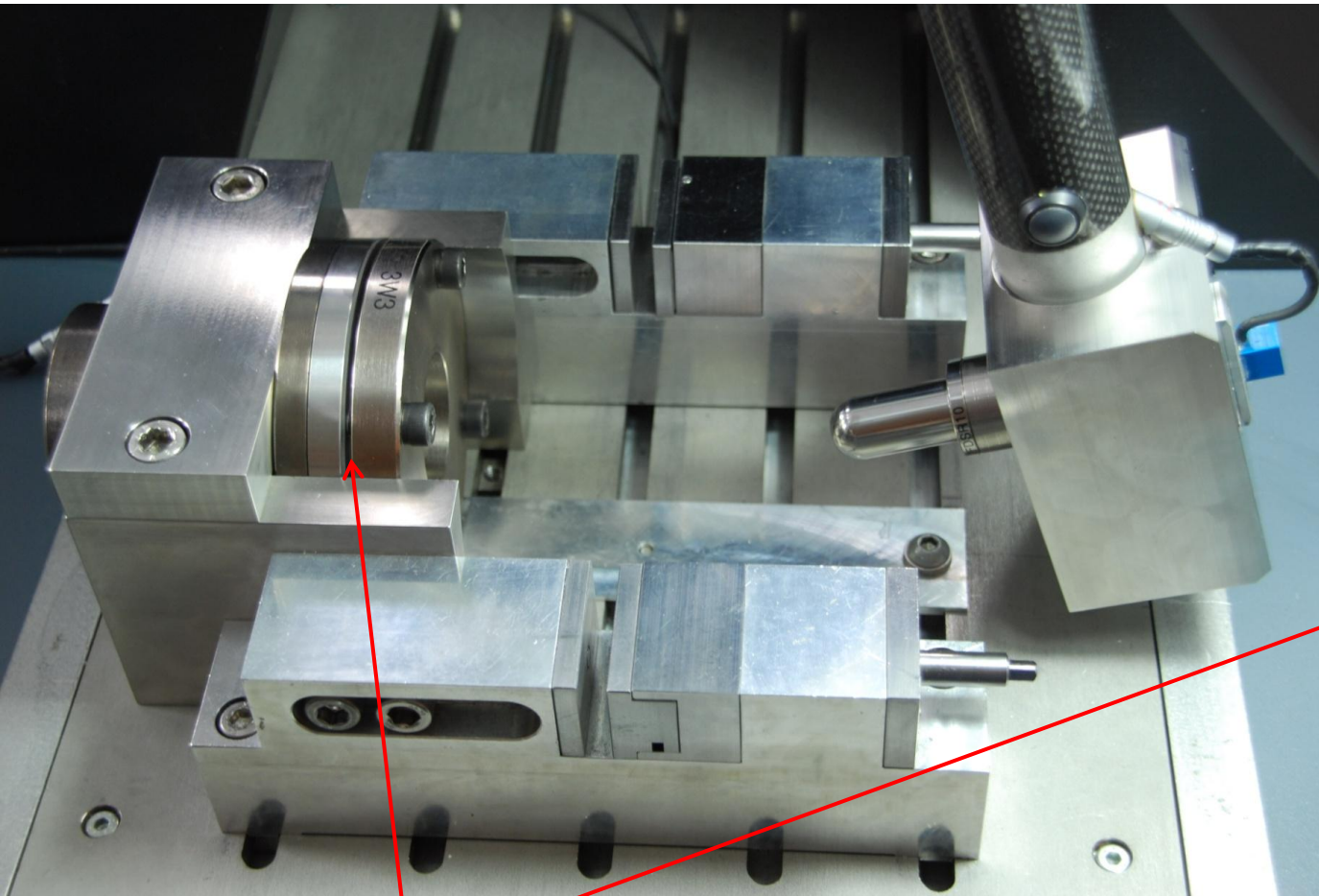
Stage 0



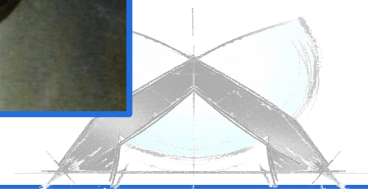
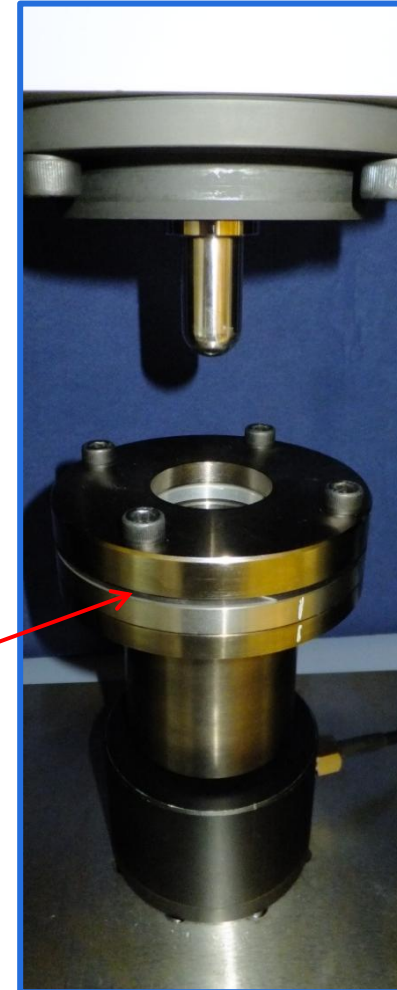
Prüfmöglichkeiten

neue Prüfmöglichkeit dynamischer Durchstoßversuch

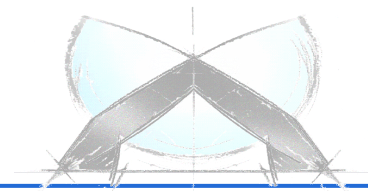
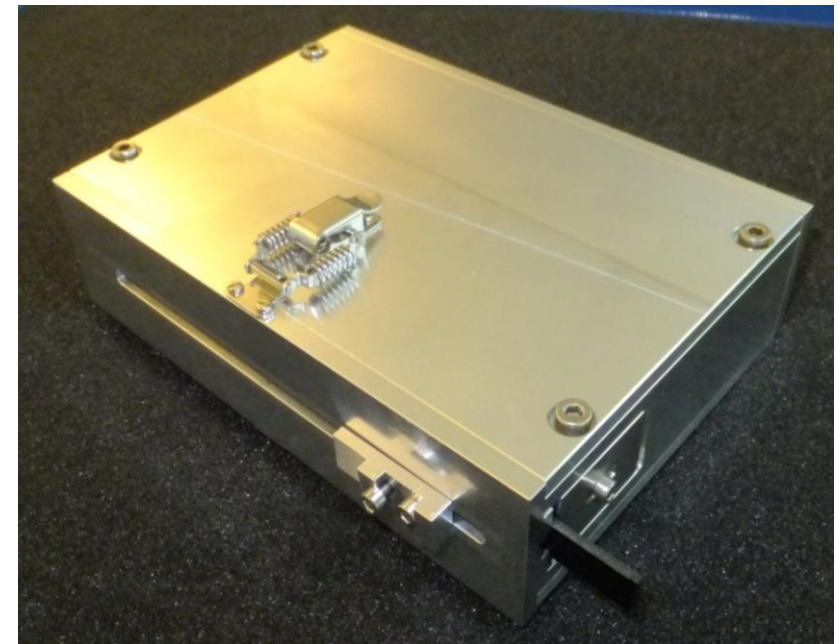
- Durchstoßversuch für mehrachsige Belastung / mehrachsige Versagensabbildung



Einspannung Platte



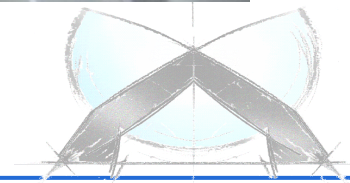
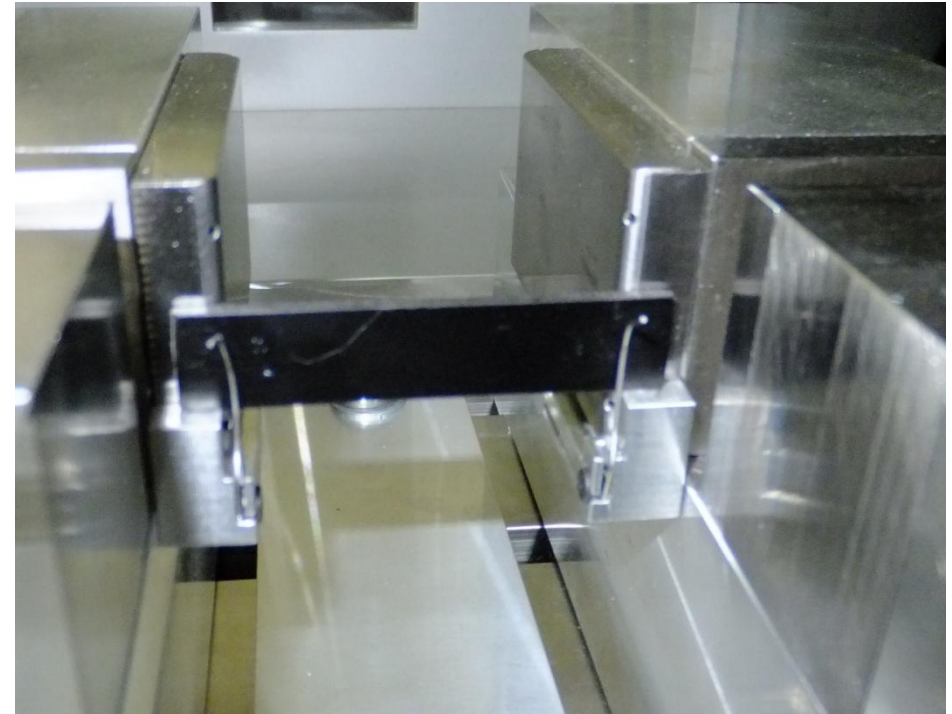
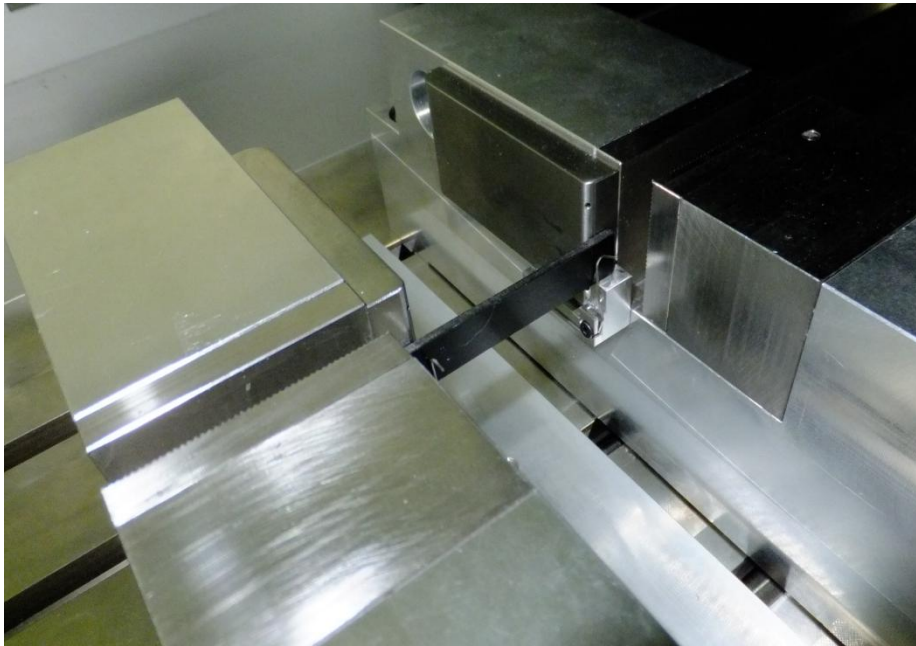
- Ein komplettes Versuchs-Setup kann innerhalb von weniger als 2 Minuten durchgeführt werden, was einem Temperaturunterschied von ca. 0.6°C zwischen erster und letzter Probe im Versuchs-Setup entspricht.



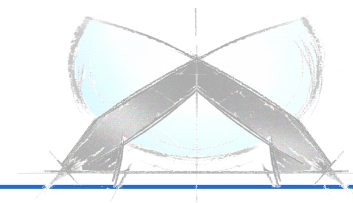
Prüfmöglichkeiten

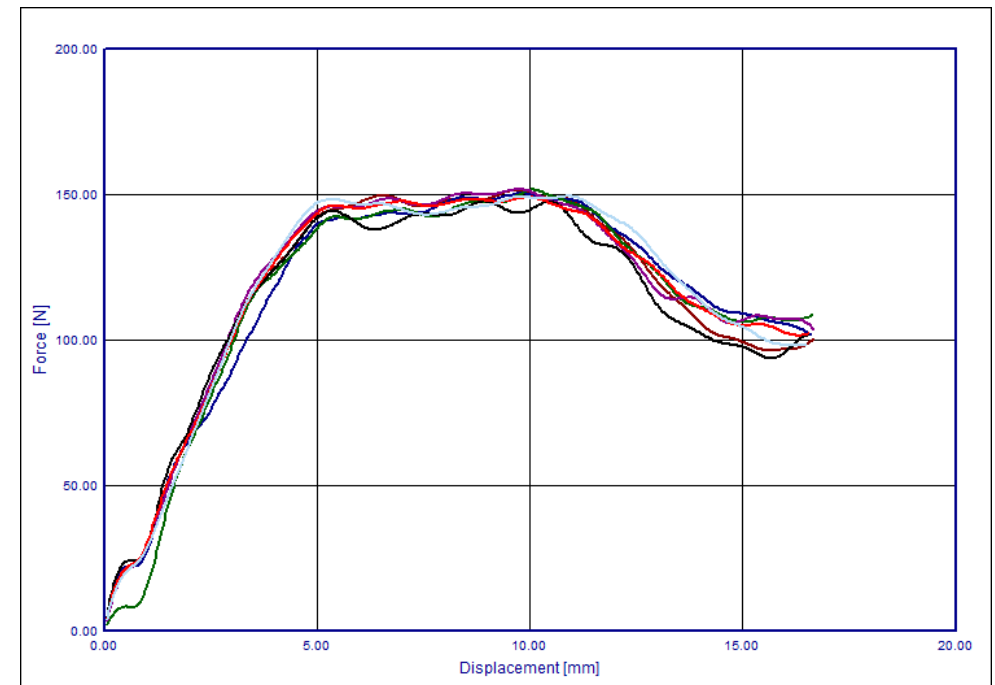
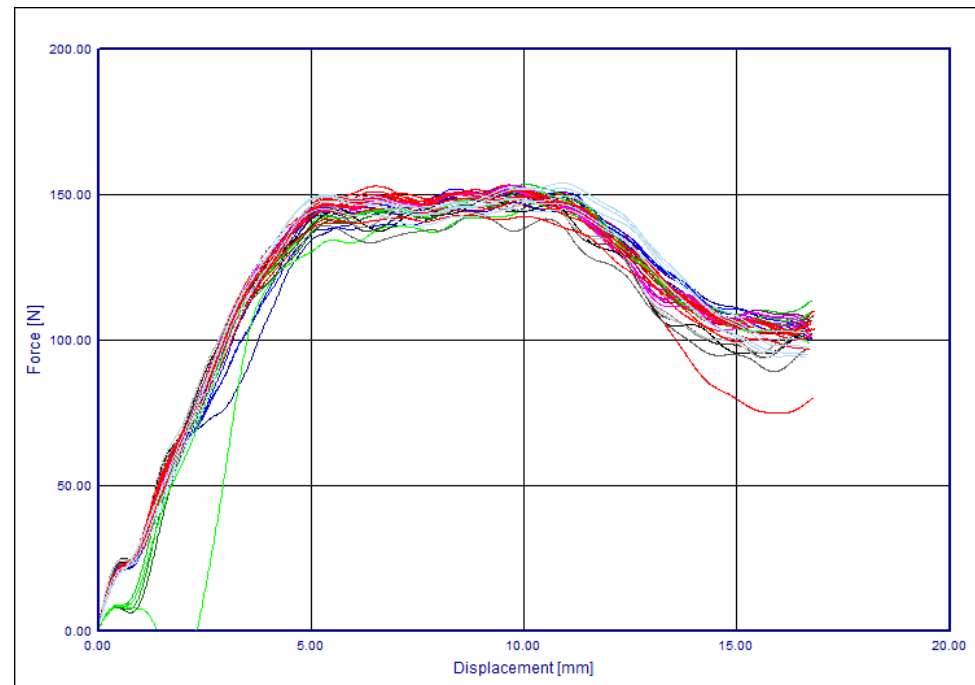
Probenfixierungshilfe für dynamische Biegeprüfung

- Magnetische Positionierhilfe mit Federn zur Probenjustierung an die Auflager ermöglicht rasches Einlegen der Proben
- Durch die Feder wird die Probe definiert gegen das Widerlager gedrückt.

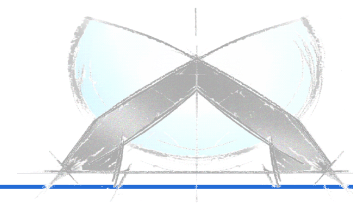


Beispielsergebnisse



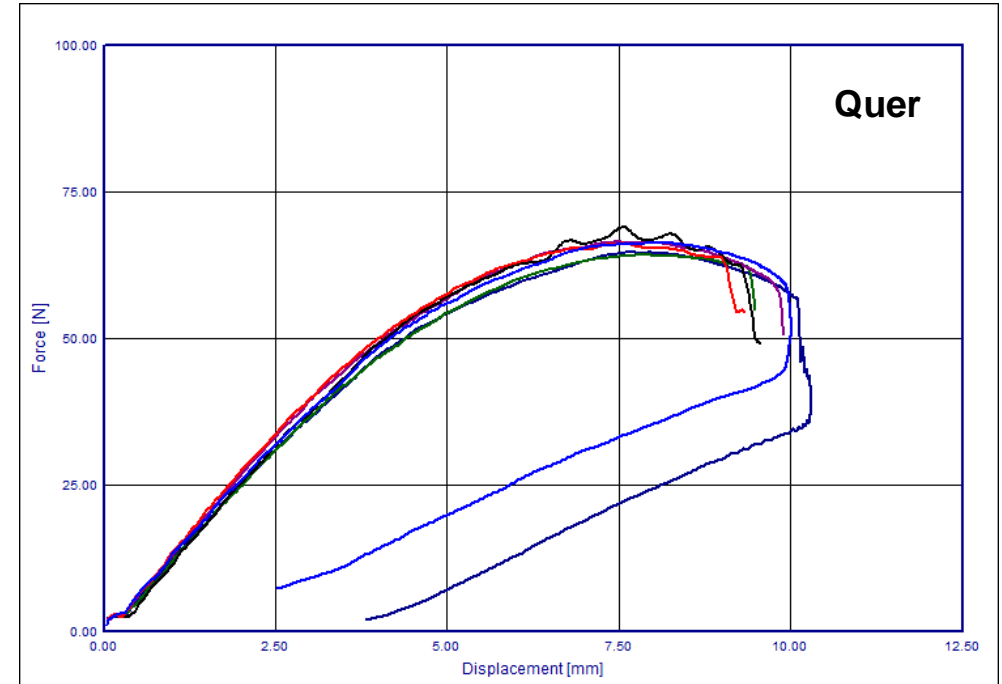
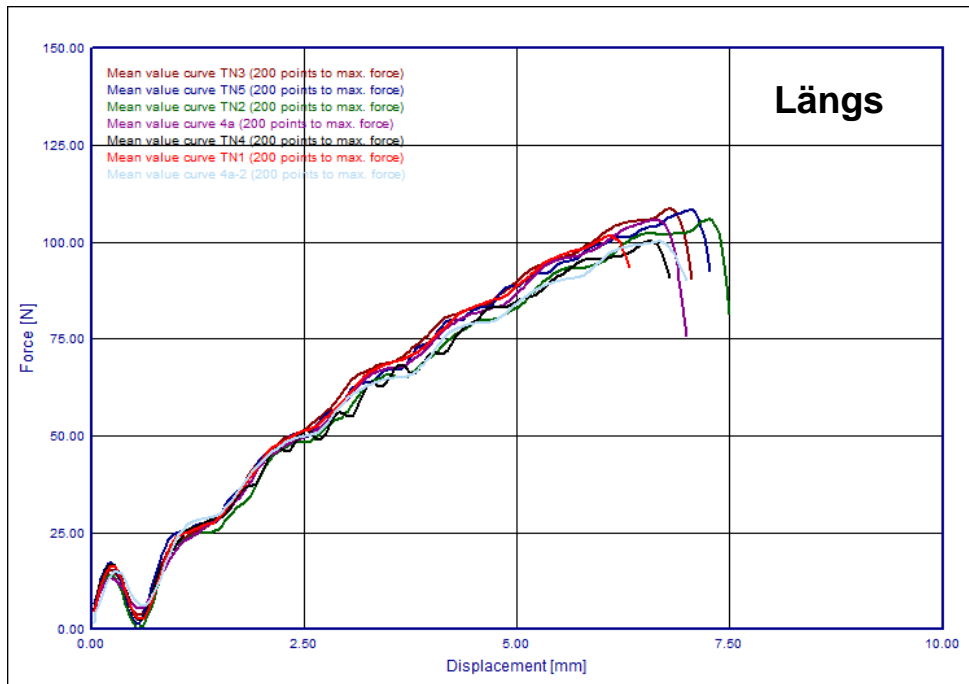


- Im Rahmen eines Ringversuches wurden einige Materialien auf mehreren 4a impetus Prüfsystemen getestet.
- Die Biegeprüfungen des Materials PCABS (Dicke 3 mm) zeigen auf allen Prüfsystemen eine gute Übereinstimmung.

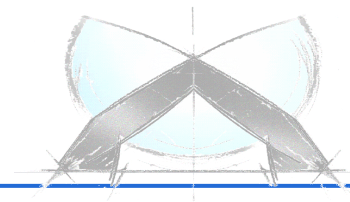


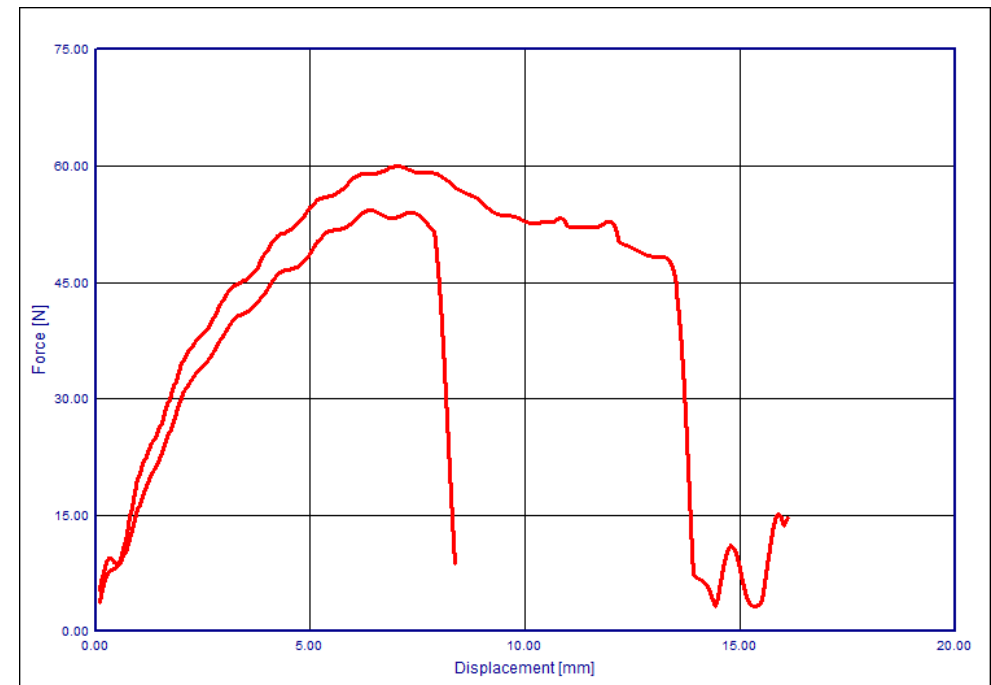
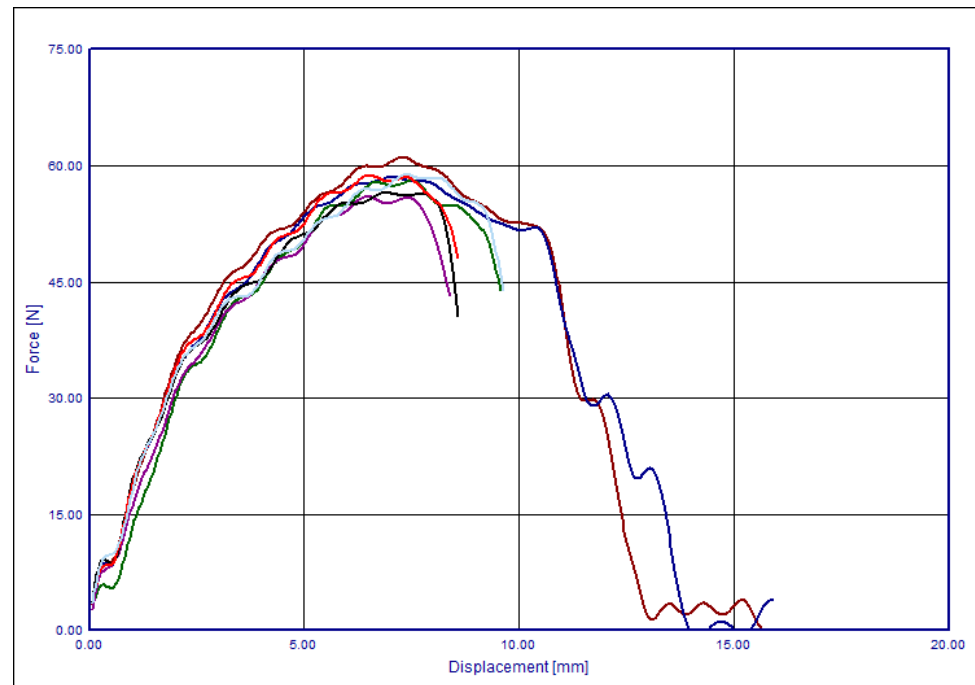
Beispielsergebnisse

PPGF30 längs/quer

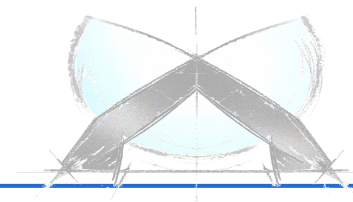


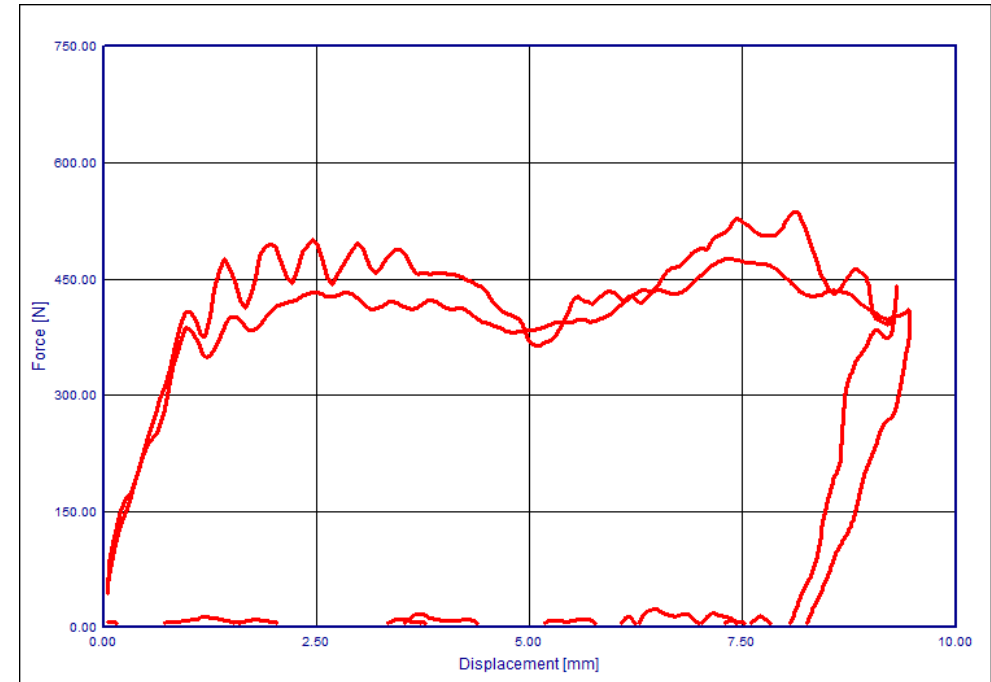
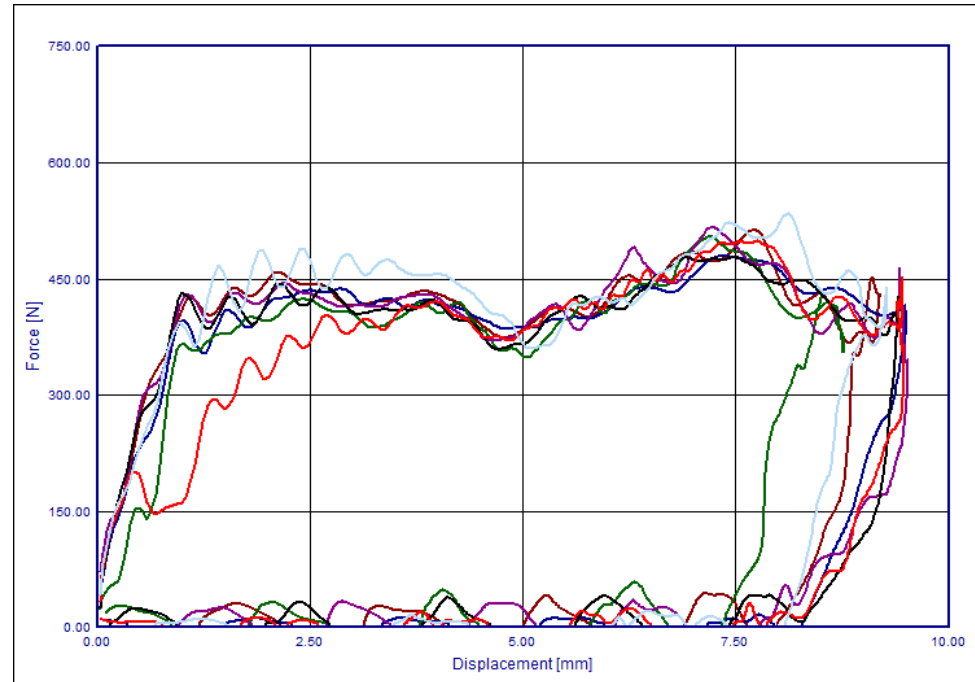
- Die Mittelwertkurven des Materials PPGF30 in Längs- und Querrichtung zeigen ebenfalls auf allen Prüfsystemen eine gute Reproduzier- und Vergleichbarkeit.



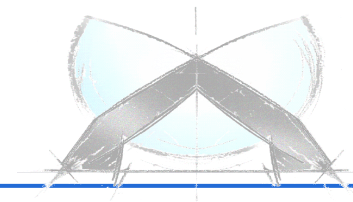


- In Hinblick auf das Versagen wurde ein verstärktes Material auf allen Prüfsystemen geprüft und zeigte wiederum eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Versuche.
- Die Streubreite des Versagens ist im rechten Diagramm mit den beiden Extrema visualisiert.

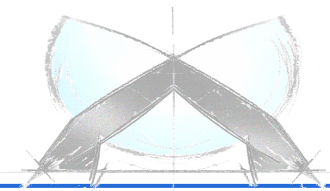




- Für eine Aluminiumlegierung sind hohe Kräfte und Beschleunigungen zu erwarten. Es konnte auf allen Systemen ein vergleichbares Ergebnis erzielt werden.
- Die Streubreite der Versuche ist wieder im rechten Diagramm mit den beiden Extrema visualisiert.

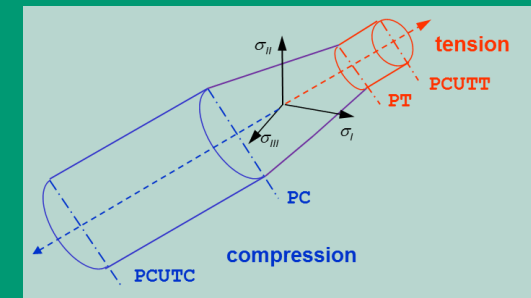
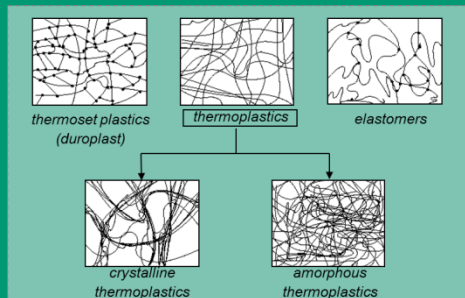


Vorführung



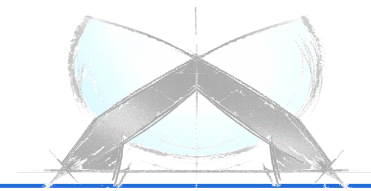
Material models for plastics

V. Effinger (DYNAmore GmbH)



Workshop „Plastics“, Bamberg
6.10.2014

DYNAmore GmbH
Industriestraße 2
70565 Stuttgart
<http://www.dynamore.de>

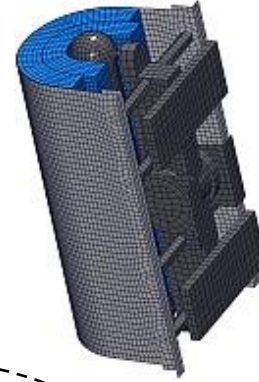


Overview

Rubbers

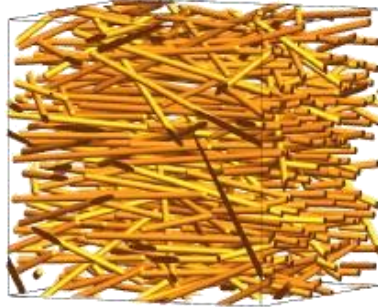


Foams



Polymers

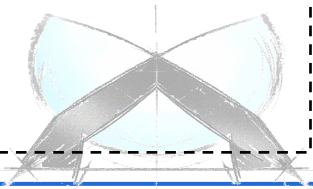
Reinforced Plastics



(Thermo)Plastics



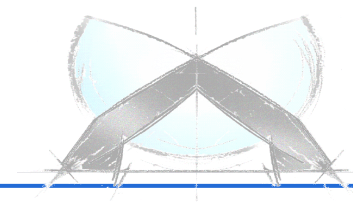
DAIMLER



Some material laws for visco-plasticity in LS-DYNA

No.	keyword	formulation	input
24,123	MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY	isotropic, el-pl, von Mises strain rate	LC table
81, 82	MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE	isotropic, el-pl damage strain rate	LC LC table
89	MAT_PLASTICITY_POLYMER	isotropic, el-pl strain rate	LC parameter
124	MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION	isotropic, el-pl strain rate	LC parameter
141	MAT_STRAIN_RATE_SENSITIVE_POLYMER	<i>isotropic, el-pl strain rate</i>	<i>parameter parameter</i>
193	MAT_DRUCKER_PRAGER	<i>isotropic, el-pl strain-rate plastic compressibility</i>	<i>LC parameter parameter</i>
187	MAT_SAMP-1	isotropic, el-pl strain rate damage plastic compressibility	LC table LC LC

- Linear Elasticity
- Pressure dependent Plasticity
- Rate dependent Plasticity
- Rate dependent Failure
- Viscoelasticity



*MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION (#124)

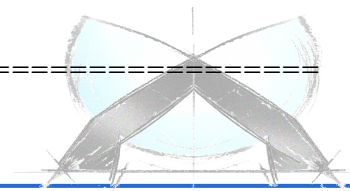
➤ Pressure dependent Plasticity

- **LCIDC** Load curve ID defining yield stress versus effective plastic strain in compression
- **LCIDT** Load curve ID defining yield stress versus effective plastic strain in tension
- **PC** Mean stress (pressure) at which yield stress follows the curve **LCIDC**.
If the pressure falls between **PC** and **PT**, an interpolation of the curves **LCIDC** and **LCIDT** is used.
- **PT** Mean stress (pressure) at which yield stress follows the curve **LCIDT**.
- **PCUTC** Pressure cut-off in compression
- **PCUTT** Pressure cut-off in tension
- **PCUTF** Pressure cut-off flag: EQ 0.0: off, EQ 1.0: on

```

=====
$
*MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION
$   MID      RO      E      PR      C      P      FAIL      TDEL
$   1      7.85E-6      210      0.3
$  LCIDC      LCIDT      LCSRC      LCSRT      SRFLAG      LCFAIL
$   10      20
$   PC      PT      PCUTC      PCUTT      PCUTF
$   10.0      5.0      50.0      0.0
$   K
=====

```

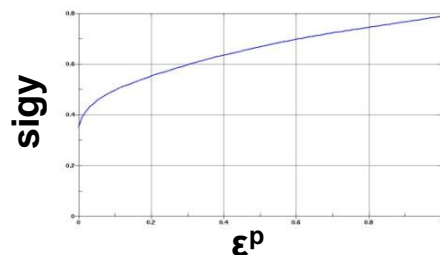


*MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION (#124)

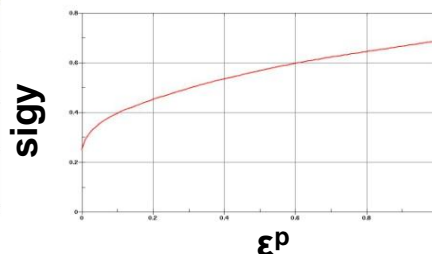
➤ Pressure dependent Plasticity

- Hardening curves

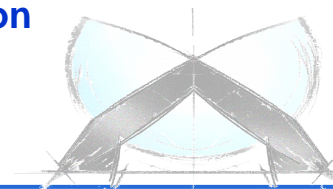
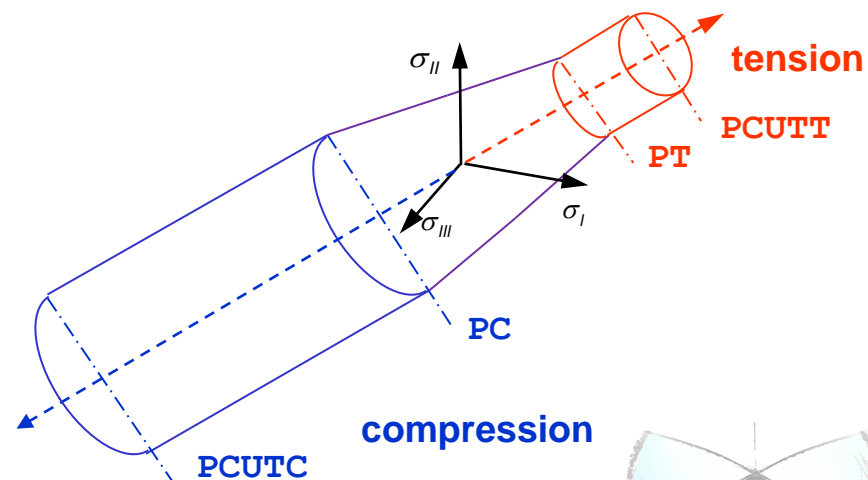
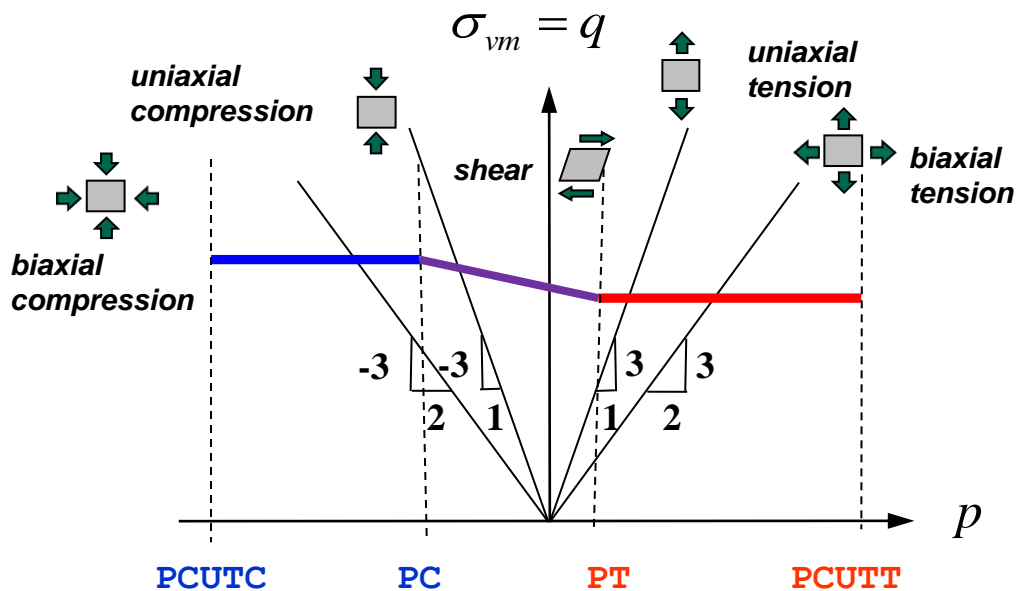
compression LCIDC



tension LCIDT

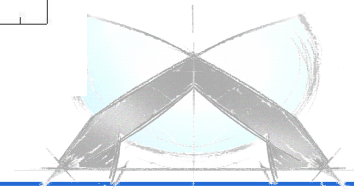
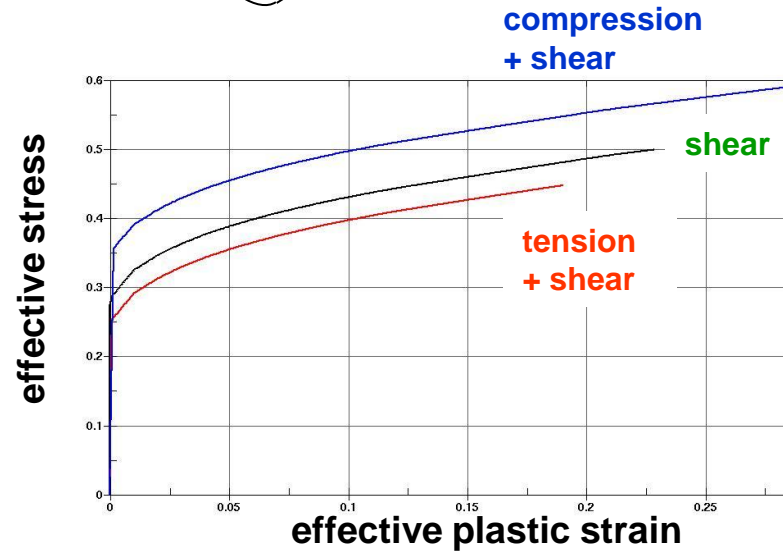
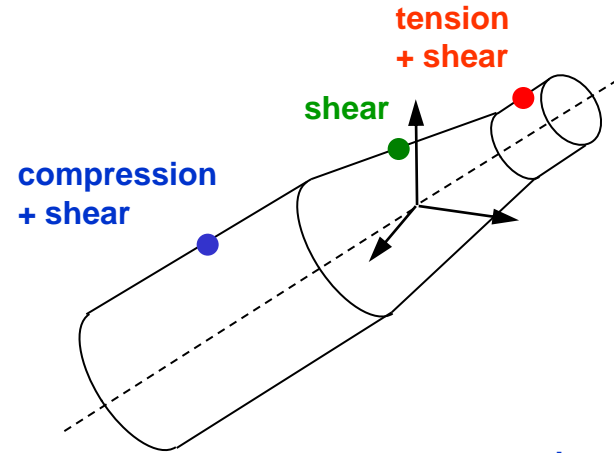
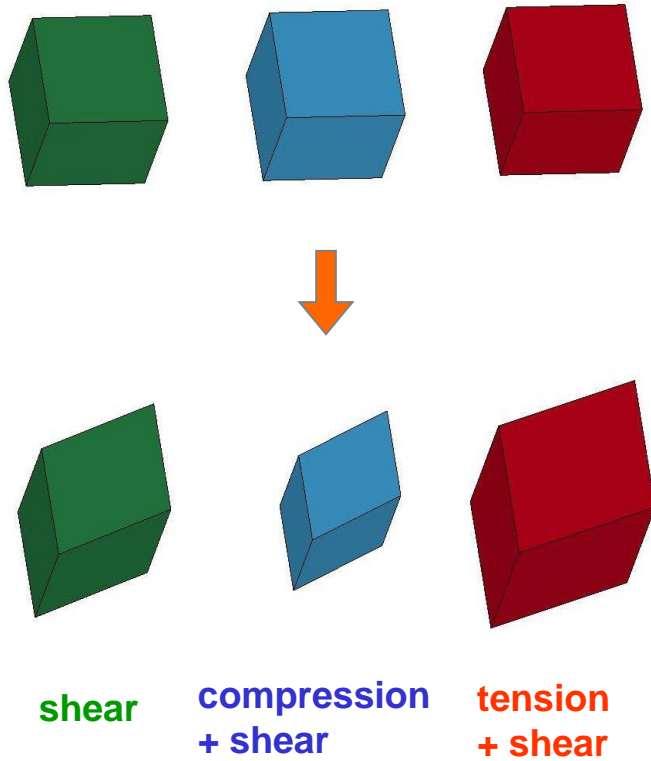


- Yield surface



➤ Pressure dependent Plasticity

▪ Example



➤ Rate dependent Plasticity

Input variables for rate effects:

1st possibility:

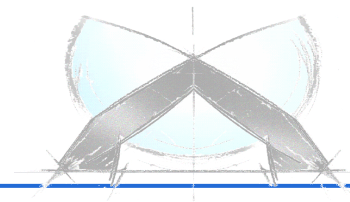
- **C, P:** Cowper & Symonds: Scaling of yield function

$$\sigma_y(\varepsilon_{eff}^p, \dot{\varepsilon}_{eff}^p) = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{C} \right)^{1/p} \right] \sigma_y^s(\varepsilon_{eff}^p)$$

Load curve

2nd possibility:

- **LCSRC:** Scaling of yield stress by load curve in compression
- **LCSRT:** Scaling of yield stress by load curve in tension
- **SRFLAG:** EQ 0.0: Total strain rate formulation;
EQ 1.0: Deviatoric strain rate formulation
EQ 2.0: Plastic strain rate (viscoplastic)



➤ Additional Remarks

■ Failure

- **FAIL** GT.0.0: Plastic strain to failure
- **LCFAIL** Load curve ID defining failure strain versus strain rate

■ Pressure cut-off for solid elements

■ Optional Young's Modulus for compression

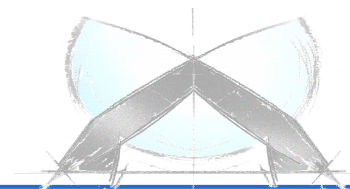
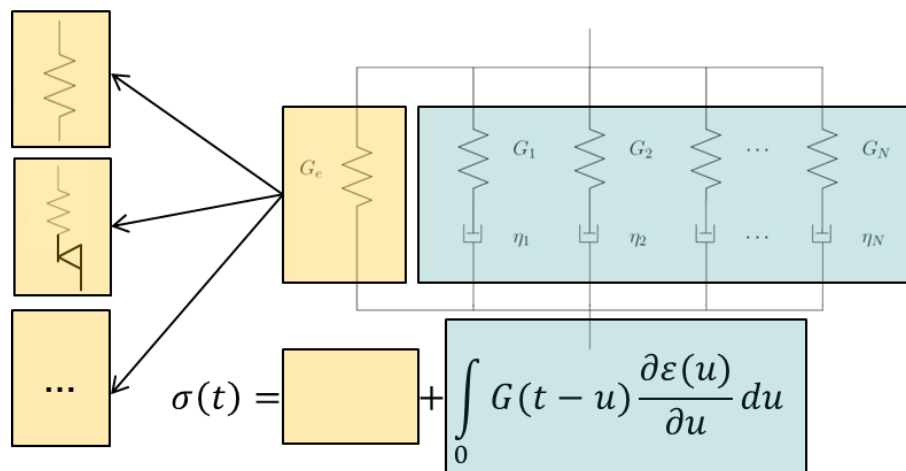
■ Linear Viscoelasticity

- Generalized Maxwell Element for deviatoric stress
- Viscoelastic stress superimposed on stress tensor generated by plasticity

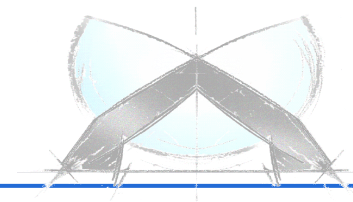
Nonlinear spring
e. g. hyperelasticity

Friction element
e. g. Elasto-Plasticity

Viscoplasticity,
Damage, Failure,...



- Linear Elasticity
- Pressure dependent Plasticity
- Rate dependent Plasticity
- Non-associated Plasticity
- Damage formulation
- Rate and pressure dependent Failure



➤ Input

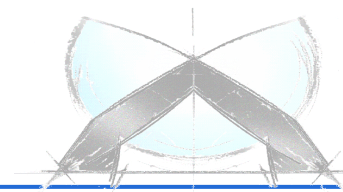
- Linear Elasticity
- Pressure dependent Plasticity
- Rate dependent Plasticity
- Non-associated Plasticity
- Damage formulation
- Rate and pressure dependent Failure

```

=====
$
*MAT_187
$      MID      RO      BULK      SHEAR      EMOD      NUE      RBCFAC
      1      1.05E-06
$  LCID_T      LCID_C      LCID-S      LCID-B      RNUEP      LCID-P      INCNAM
      99      200      300      400      0.30
$  LCID_D      EPFAIL      DEPRPT      LCID_TRI      LCID_LC
      -500      -600      -700      800
$  MAXITER      MIPS      INCFAIL      ICONV      ASAF      IPRINT      NHISV
      20      0      40
=====

```

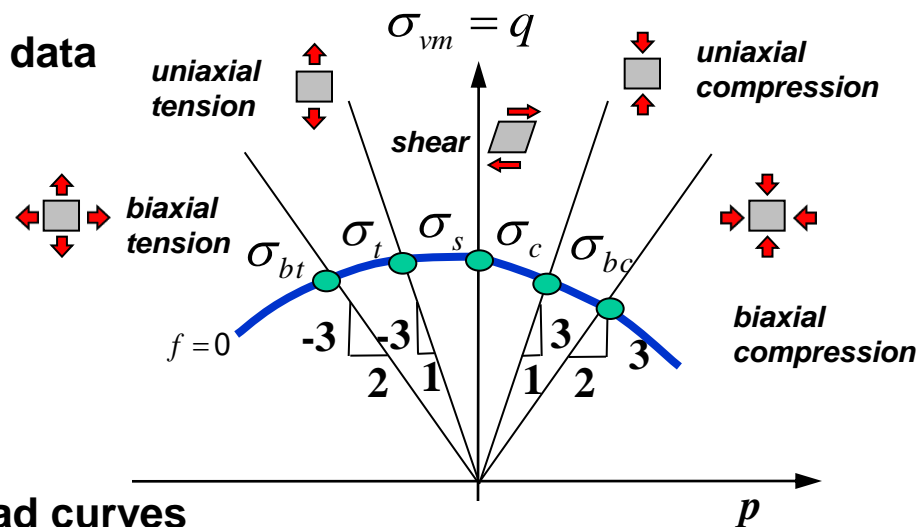
- Numeric and output parameters



➤ Pressure dependent Plasticity: Flexible yield surface

■ Yield criterion defined through tabulated data

- Biaxial tension
- Uniaxial tension
- Shear
- Uniaxial compression



■ Shape depending on number of given load curves

n ≤ 2

• Linear yield surface

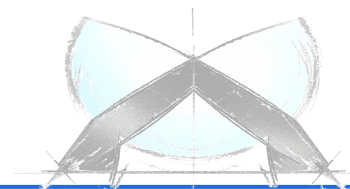
n = 3

• Quadratic yield surface

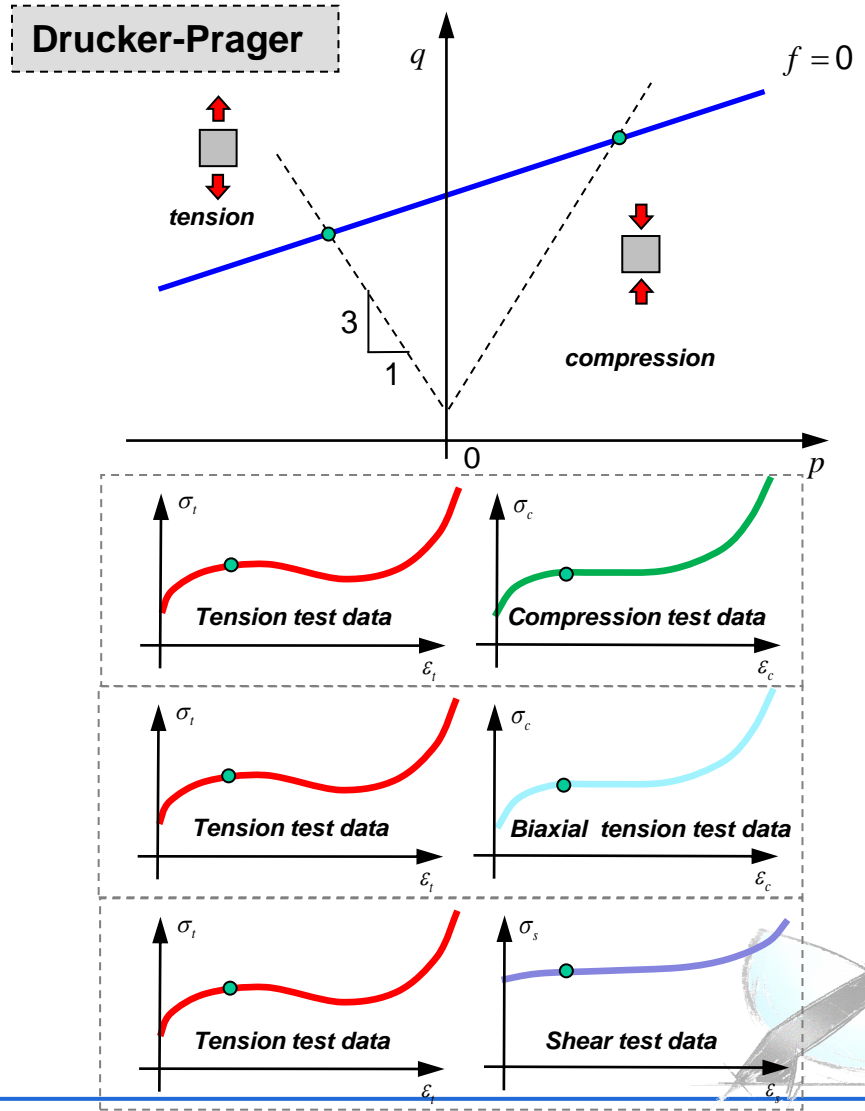
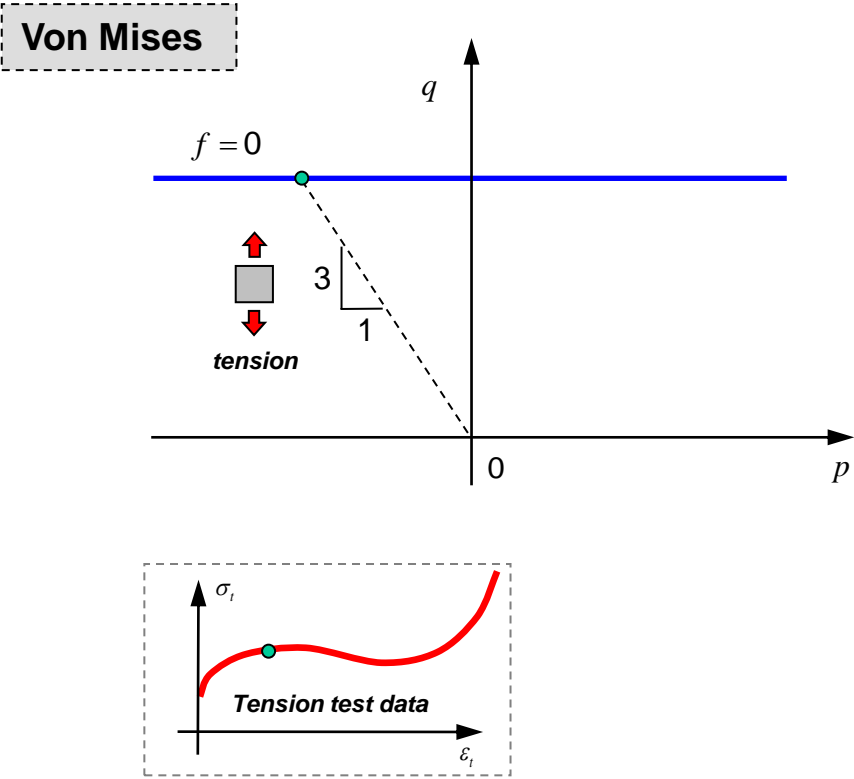
$$f = \sigma_{vm}^2 - A_0 - A_1 p - A_2 p^2$$

n = 4

- Least squares fit for quadratic yield surface
- Multilinear yield surface if rbcfac > 0



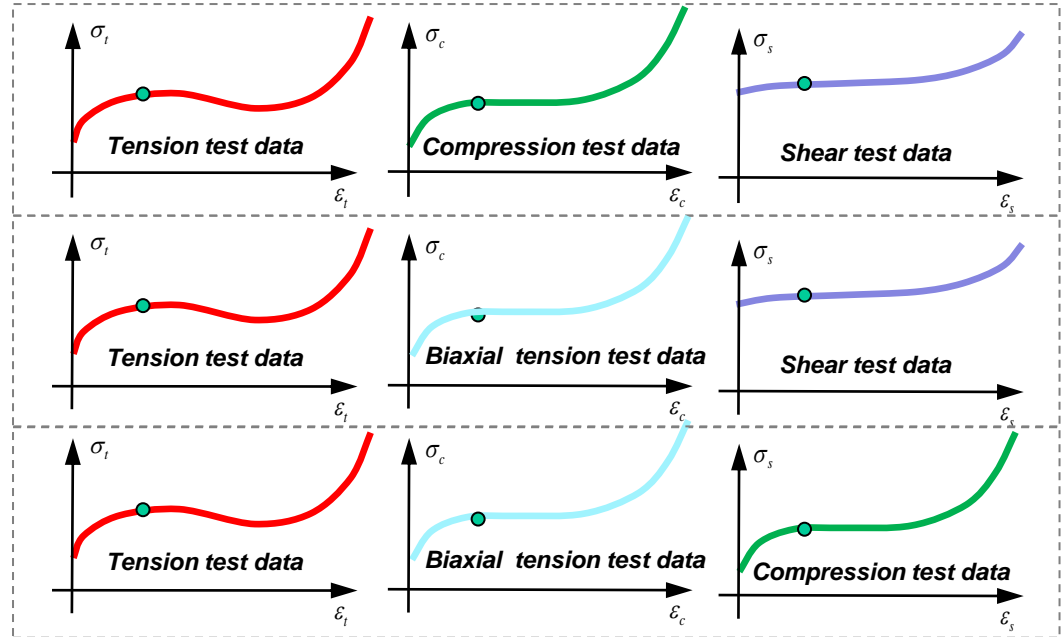
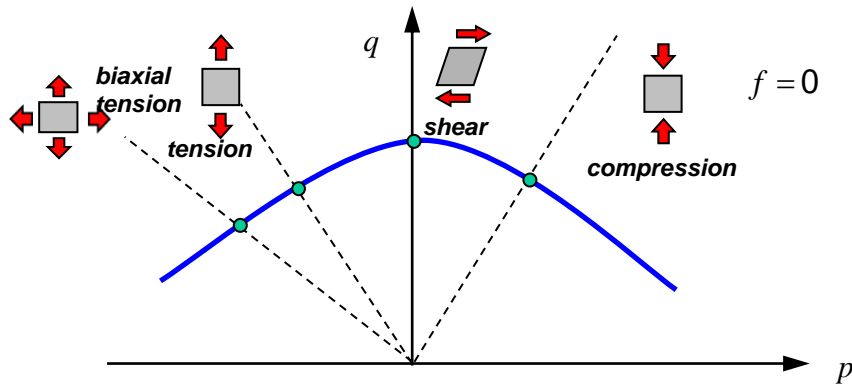
➤ Pressure dependent Plasticity: Linear yield surface



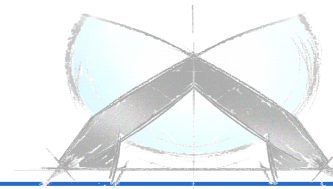
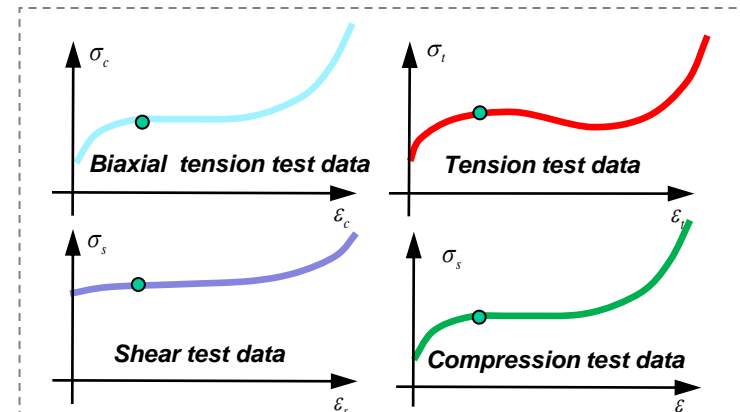
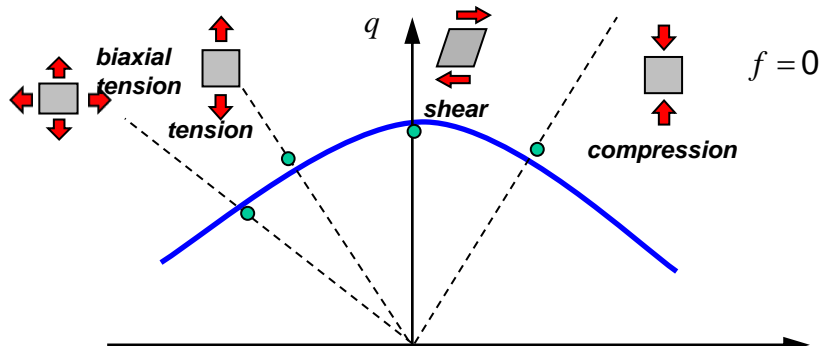
➤ **Pressure dependent Plasticity: Quadratic yield surface**

3 load curves

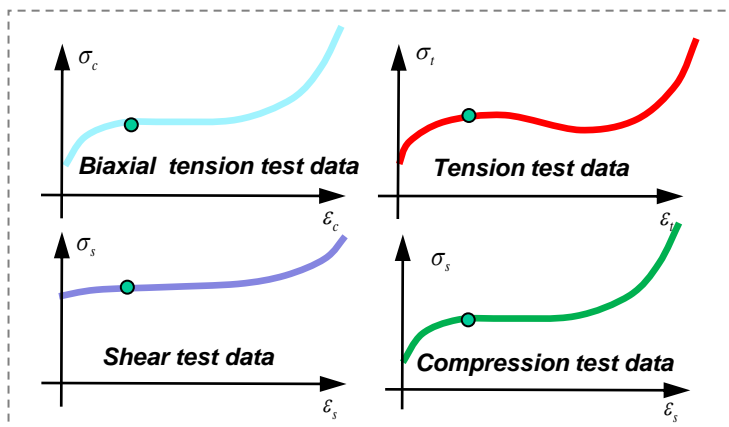
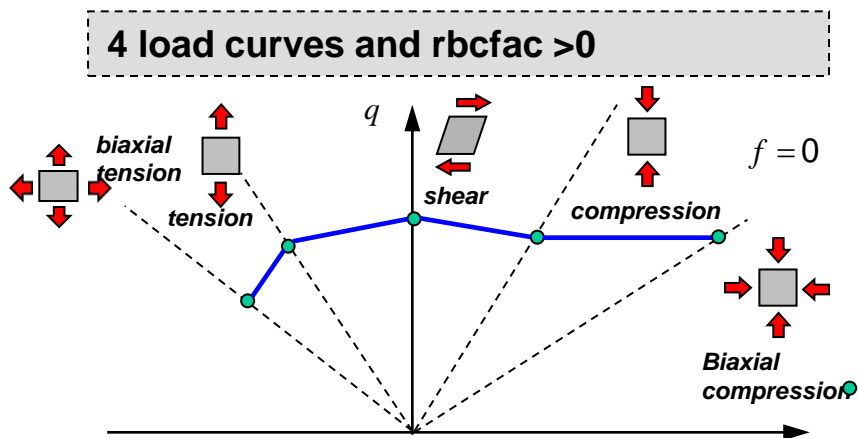
$$f(p, \sigma_{vm}, \bar{\epsilon}^{pl}) = \sigma_{vm}^2 - A_0 - A_1 p - A_2 p^2 \leq 0$$



4 load curves – Least squares fit

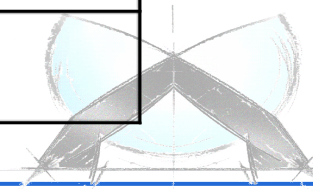


➤ Pressure dependent Plasticity: Multilinear yield surface



- Load curves must NOT be given in equivalent stress or equivalent plastic strain
- Input based on test data: true stress, true plastic strain

	Pressure	Equivalent stress	Equivalent plastic strain	Volumetric strain
Biaxial test	$-\frac{2}{3}\sigma_{bi}$	$ \sigma_{bi} $	$\frac{2}{3} \frac{1+\nu_p}{1-\nu_p} \epsilon_{bi}^p $	$2 \frac{1-2\nu_p}{1-\nu_p} \epsilon_{bi}^p$
Uniaxial test	$-\frac{1}{3}\sigma_{uni}$	$ \sigma_{uni} $	$\frac{2}{3} (1+\nu_p) \epsilon_{uni}^p $	$(1-2\nu_p)\epsilon_{uni}^p$
Shear	0	$\sqrt{3} \sigma_s $	$\frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon_s^p $	0



➤ Pressure dependent Plasticity: Yield curves

- Test data: conversion / reverse engineering => true stress, true plastic strain

- Uniaxial test – tension or compression yield curve $(\epsilon_{uni}^p / |\sigma_{uni}|)$

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{uni} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad d\epsilon^p = \begin{pmatrix} d\epsilon_{uni}^p & 0 & 0 \\ 0 & -\nu_p d\epsilon_{uni}^p & 0 \\ 0 & 0 & -\nu_p d\epsilon_{uni}^p \end{pmatrix}$$

$\epsilon_{uni}^p = |\epsilon_{uni}| - \frac{|\sigma_{uni}|}{E}, \quad \epsilon_{uni} = \left| \ln \frac{l}{l_0} \right|$

- Biaxial test – biaxial tension yield curve $(\epsilon_{bi}^p / |\sigma_{bi}|)$

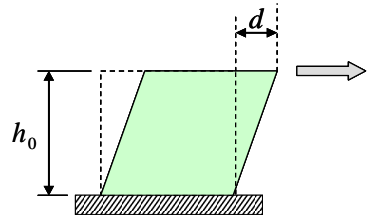
$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{bi} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{bi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad d\epsilon^p = \begin{pmatrix} d\epsilon_{bi}^p & 0 & 0 \\ 0 & d\epsilon_{bi}^p & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2\nu_p}{1-\nu_p} d\epsilon_{bi}^p \end{pmatrix}$$

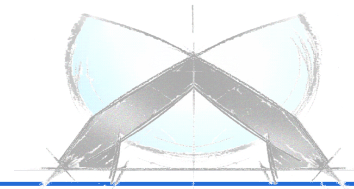
$\epsilon_{bi}^p = |\epsilon_{bi}| - \frac{|\sigma_{bi}|}{E}, \quad \epsilon_{bi} = \left| \ln \frac{l}{l_0} \right|$

- Shear test – shear yield curve $(\epsilon_s^p / \sigma_s)$

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_s & 0 \\ \sigma_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad d\epsilon^p = \begin{pmatrix} 0 & d\epsilon_s^p & 0 \\ d\epsilon_s^p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

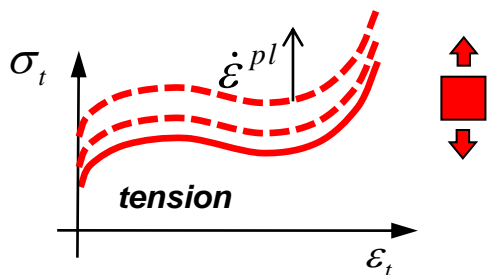
$\epsilon_s^p = \epsilon_s - \frac{\sigma_s}{2G}, \quad \epsilon_s = \frac{1}{2} \int \frac{\partial \dot{x}}{\partial y} dt = \frac{1}{2} \frac{d}{h_0}$





➤ Rate dependent Plasticity: Table definition

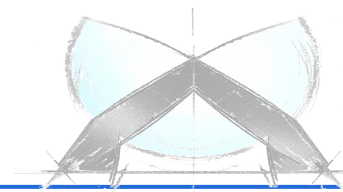
- LCID-T references strain rate dependent table



All other yield curves are scaled according to strain rate dependency in uniaxial tension

```

*MAT_187
$      MID      RO      BULK      SHEAR      EMOD      NUE      RBCFAC
      1  1.05E-06
$  LCID_T  LCID_C  LCID-S  LCID-B  RNUEP  LCID-P  INCDAM
   99    200    300    400    0.50
$  LCID_D  EPFAIL  DEPRPT  LCID_TRI  LCID_LC
   -500   -600   -700    800
$  MAXITER  MIPS      INCFAIL  ICONV  ASAF  IPRINT  NHISV
                20                      0      40
    
```

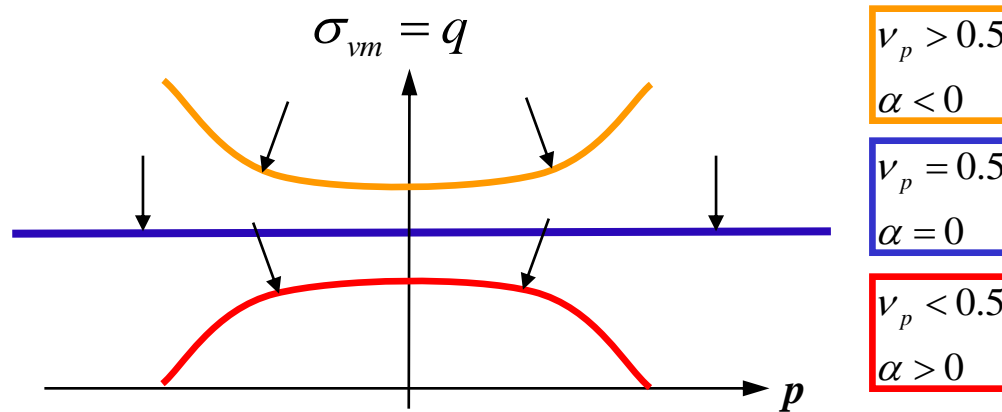


➤ **Non-associated Plasticity**

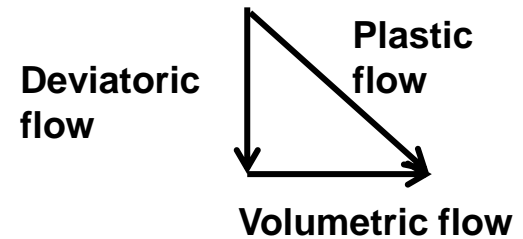
- Plastic flow rule and plastic potential

$$d\varepsilon_{ij}^{pl} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = d\lambda r_{ij} \quad g = \sqrt{q^2 + \alpha p^2}$$

- „Plastic“ Poisson’s ratio determines plastic flow

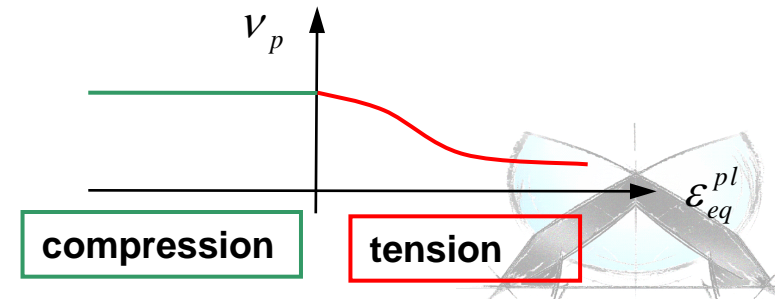


$$\alpha = \frac{9}{2} \frac{1 - 2\nu_p}{1 + \nu_p}$$



- „Plastic“ Poisson’s ratio

- RNUEP constant value
- LCID-P variable poisson’s ratio



➤ Damage

```

*MAT_187
$      MID          RO          BULK          SHEAR          EMOD          NUE          RBCFAC
      1      1.05E-06
$      LCID_T      LCID_C      LCID-S      LCID-B      RNUEP      LCID-P      INCDAM
      99          200          300          400          0.50
$      LCID_D      EPFAIL      DEPRPT      LCID_TRI      LCID_LC
      -500        -600        -700          800
$      MAXITER      MIPS          INCFAIL      ICONV          ASAF          IPRINT          NHISV
          20
  
```

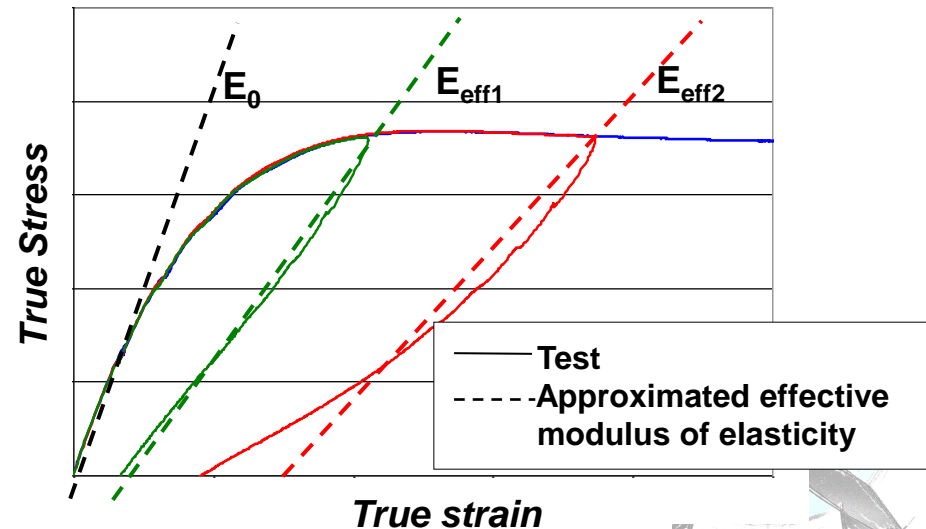
Damaging of the stresses by scalar curve definition $d(\bar{\epsilon}^{pl}) = [0,1[$

■ **LCID-D > 0**: plastic damage

➔ $\sigma_{eff} = \sigma_{pl} \cdot (1 - d(\bar{\epsilon}^{pl}))$

■ **LCID-D < 0**: elastic damage

➔ $E_d = E(1 - d)$



➤ **Damage and Failure**

- Failure onset defined by the parameter ε_{fail}^p
- Further fading of the element defined by $\Delta \bar{\varepsilon}_{rupt}^p$
- Strain rate dependent failure by an optional input curve

$$\varepsilon_{fail}^p = \varepsilon_{fail}^p(\dot{\varepsilon}^p)$$

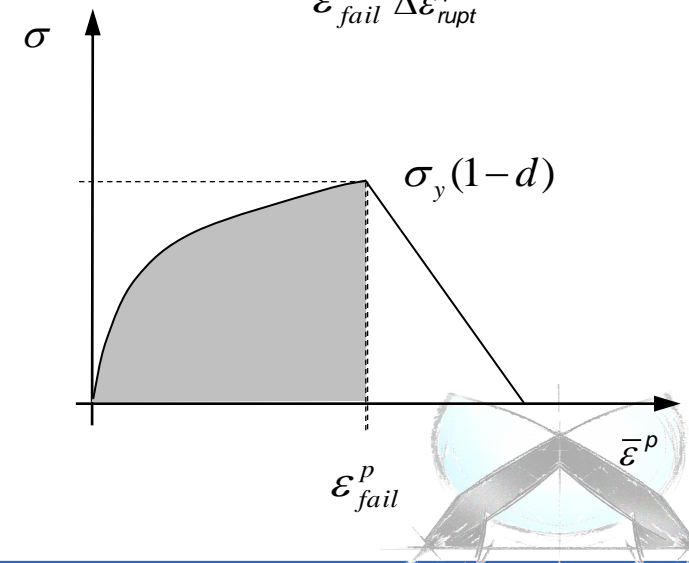
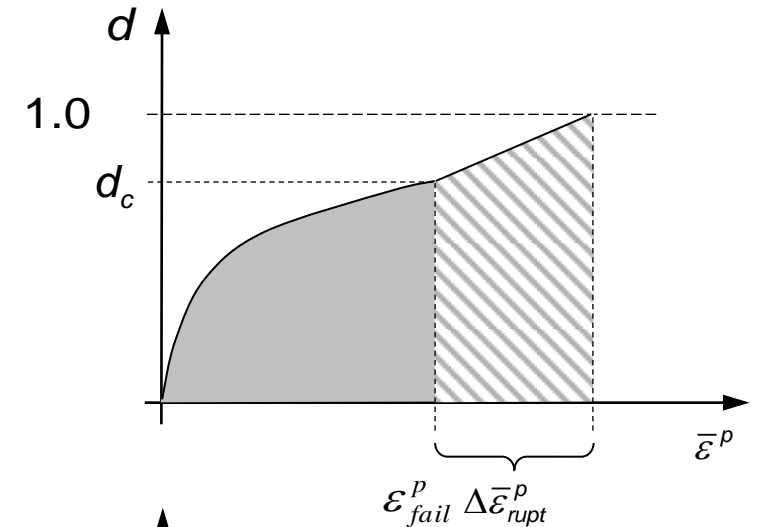
- Regularization by an input optional curve

$$\zeta = \zeta(l_c)$$

- Triaxiality dependent failure by an optional input curve

$$\xi = \xi\left(\frac{p}{\sigma_{vm}}\right)$$

- **Finally:** $\varepsilon_{fail}^p = \varepsilon_{fail}^p(\dot{\varepsilon}_p) \cdot \xi\left(\frac{p}{\sigma_{vm}}\right) \cdot \zeta(l_c)$



➤ **Damage and Failure**

- Failure onset defined by the parameter ε_{fail}^p
- Further fading of the element defined by $\Delta \bar{\varepsilon}_{rupt}^p$
- Strain rate dependent failure by an optional input curve

$$\varepsilon_{fail}^p = \varepsilon_{fail}^p(\dot{\varepsilon}^p)$$

- Regularization by an input optional curve

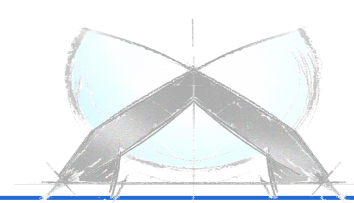
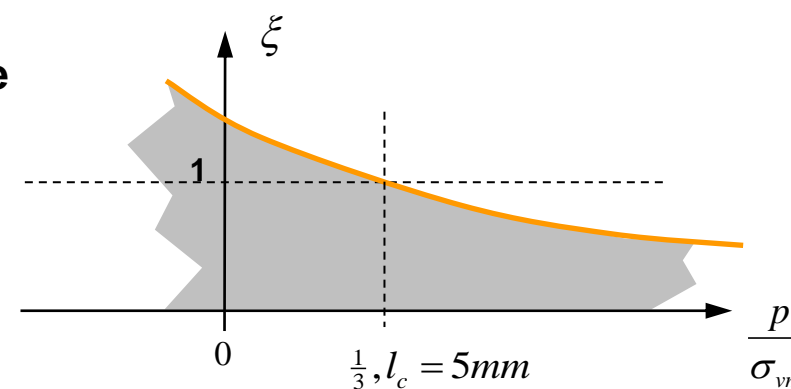
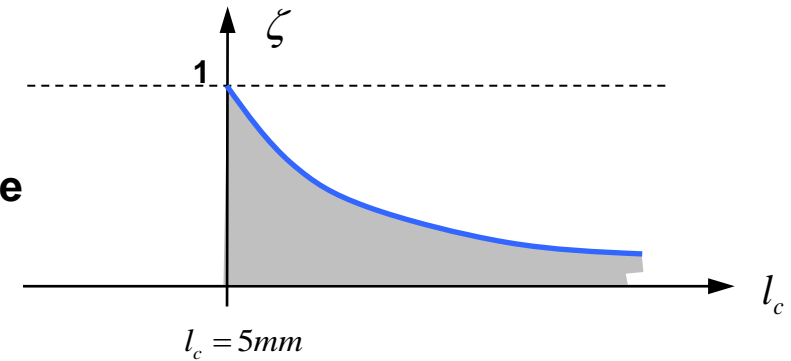
$$\zeta = \zeta(l_c)$$

- Triaxiality dependent failure by an optional input curve

$$\xi = \xi\left(\frac{p}{\sigma_{vm}}\right)$$

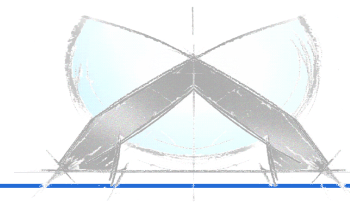
- Finally: $\varepsilon_{fail}^p = \varepsilon_{fail}^p(\dot{\varepsilon}^p) \cdot \underbrace{\xi\left(\frac{p}{\sigma_{vm}}\right)}_{\frac{p}{\sigma_{vm}} = \frac{1}{3}, l_c = 5mm} \cdot \zeta(l_c)$

$$\frac{p}{\sigma_{vm}} = \frac{1}{3}, l_c = 5mm$$



➤ **Summary**

- Describe isotropic ductile thermoplastic materials
- Implementation for solid and shell (plane stress) elements
- Fully tabulated input-data
- Most general quadratic isotropic yield surface formulation, allows to fit 3 experiments exactly and 4 approximately (least squares)
- Plastic compressibility
- Elastic damage model to simulate unloading response
- Failure model



➤ **New options: Combining GISSMO with any history variable**

➤ **The new option allows the definition of any history variable to be the driving force of GISSMO**



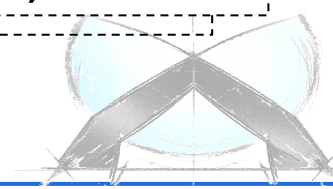
```

*MAT_187
$   MID          RO          BULK          SHEAR          EMOD          NUE          RBCFAC
    1  1.05E-06
$   LCID_T       LCID_C       LCID-S       LCID-B       RNUEP       LCID-P       INCDAM
    99          200          300          400          0.3
$   LCID_D       EPFAIL       DEPRPT       LCID_TRI       LCID_LC
   -500
$   MAXITER          MIPS          INCFAIL          ICONV          ASAF          IPRINT          NHISV
                                20                                0                                40
    
```

```

*MAT_ADD_EROSION
    1
    0
$   IDAM       DMGTYP       LCSDG       ECRIT
    1          0061       1000010    -1000009
$   SIZFLG     REFSZ       NAHSV       LCSRS
    0          0          14
$
    
```

- **SAMP my deliver volumetric plastic strain on hisv(6) and this may be used to drive damage in GISSMO (used for crazing!).**
- **Usage: DMGTYP=YYYYX with X=1 and YYY=hisv(YYY)**



***MAT_SAMP-1 (#187)**

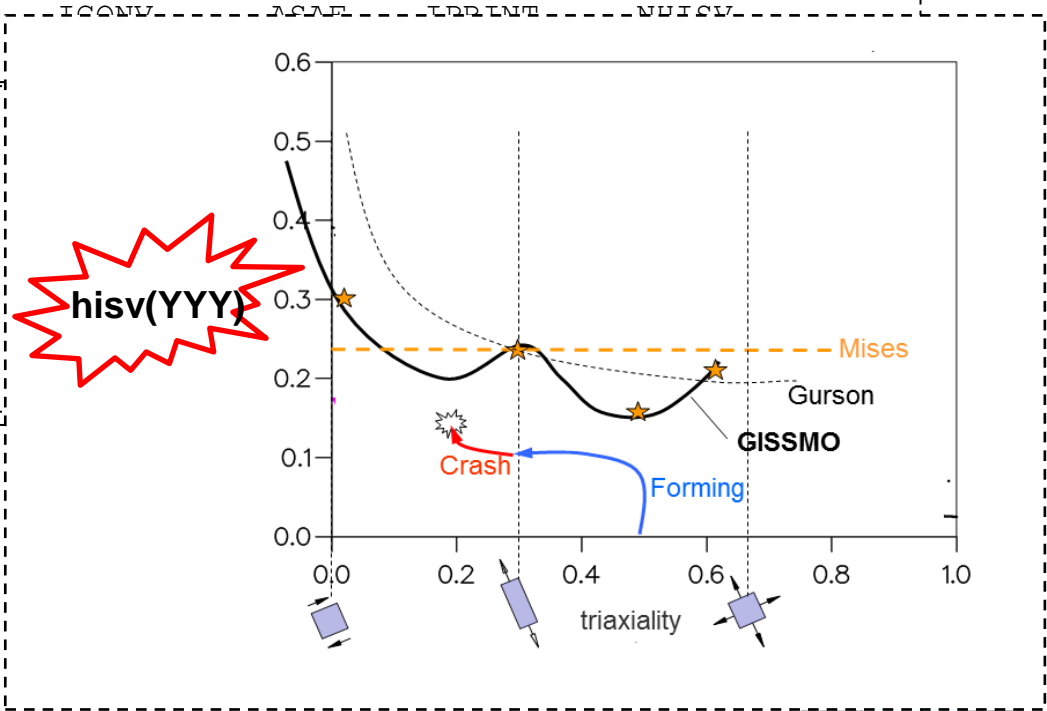
➤ **New options: Combining multiple GISSMO cards with reference to one material model**



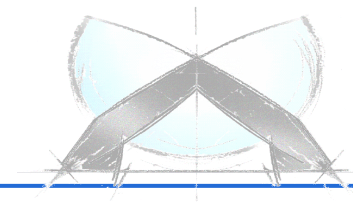
```
*MAT_187
$ MID RO BULK SHEAR EMOD NUE RBCFAC
1 1.05E-06 1.5 0.32 1.0
$ LCID_T LCID_C LCID-S LCID-B RNUEP LCID-P INCDAM
99 200 300 400 0.3
$ LCID_D EPFAIL DEPRPT LCID_TRI LCID_LC
-500
$ MAXITER MIPS INCFAIL
20
```

```
*MAT_ADD_EROSION
1
0
$ IDAM DMGTYP LCSDG ECRIT
1 0061 1000010 -1000009
$ SIZFLG REFSZ NAHSV LCSRS
0 0 14
```

```
*MAT_ADD_EROSION
1
0
$ IDAM DMGTYP LCSDG ECRIT
1 0021 1100010 -1100009
$ SIZFLG REFSZ NAHSV LCSRS
0 0 14
```

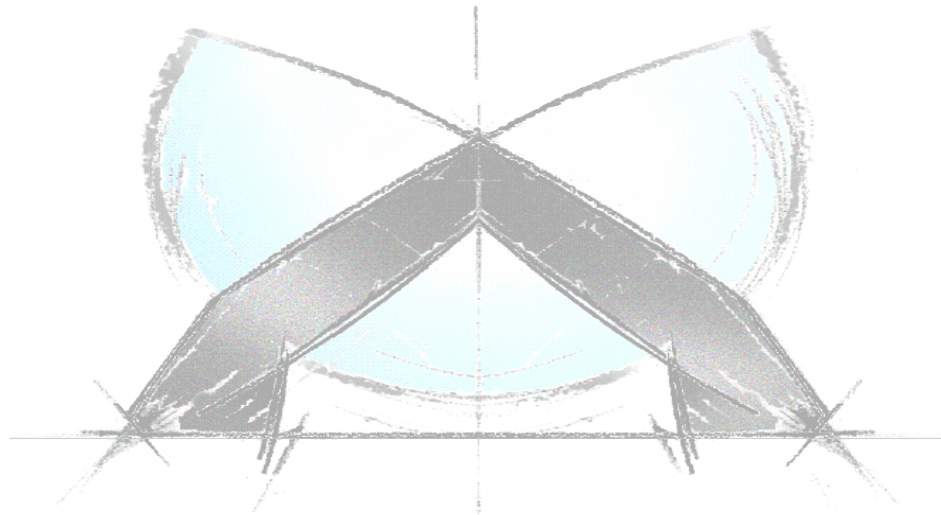


- <http://www.dynamore.de>
- <http://www.dynalook.com>
- <http://www.dynasupport.com>
 - History variables:
<http://www.dynasupport.com/howtos/material/history-variables>
 - Material models for implicit solver:
<http://www.dynasupport.com/howtos/implicit/elements-and-material-models-available-for-implicit>
- <http://www.lsoptsupport.com>



Anpassung komplexe Fließkurve mit 4a impetus

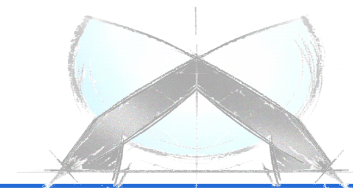
P. Reithofer, M. Rollant, A. Fertschej (4a engineering GmbH)



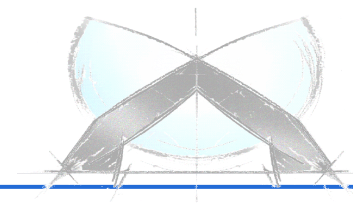
Modellierung von Kunststoffen, Bamberg

6. Oktober 2014

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



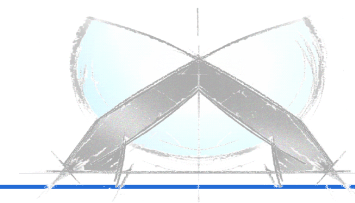
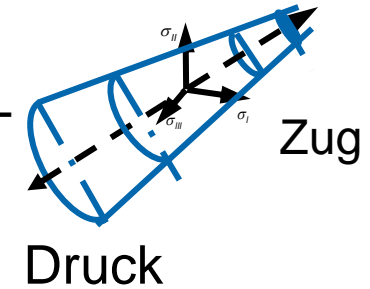
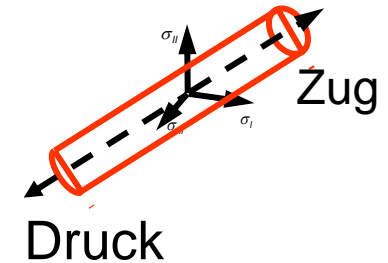
- Komplexe Fließfläche
 - Einleitung
 - Materialverhalten
 - Verfügbare Materialmodelle
 - Anpassung Zug/Druck Asymmetrie
- Ausblick zur Versagensabbildung



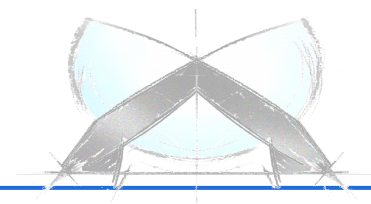
Einleitung

Motivation

- Materialmodellierung – Stand der Technik
 - von Mises – Materialmodell mit Dehnratenabhängigkeit, ermittelt über Zug- und/oder Biegeversuche
- Komplexere Materialmodelle sind gefordert
 - steigende Rechnerkapazitäten
 - erlauben genauere Abbildung der Realität (z.B. Zug-/Druck-Asymmetrie; Einfluss der Mehrachsigkeit)
- Zukünftiges Thema: Versagensmodellierung
 - bestmögliche Abbildung der Realität
 - Versagen in Abhängigkeit der Dehnrates und der Belastungsart/Mehrachsigkeit
- Diesen Ansprüchen wird in der Weiterentwicklung von 4a impetus Rechnung getragen.

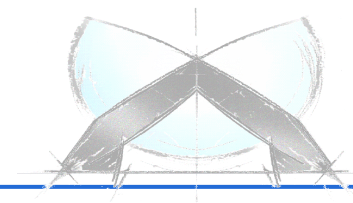
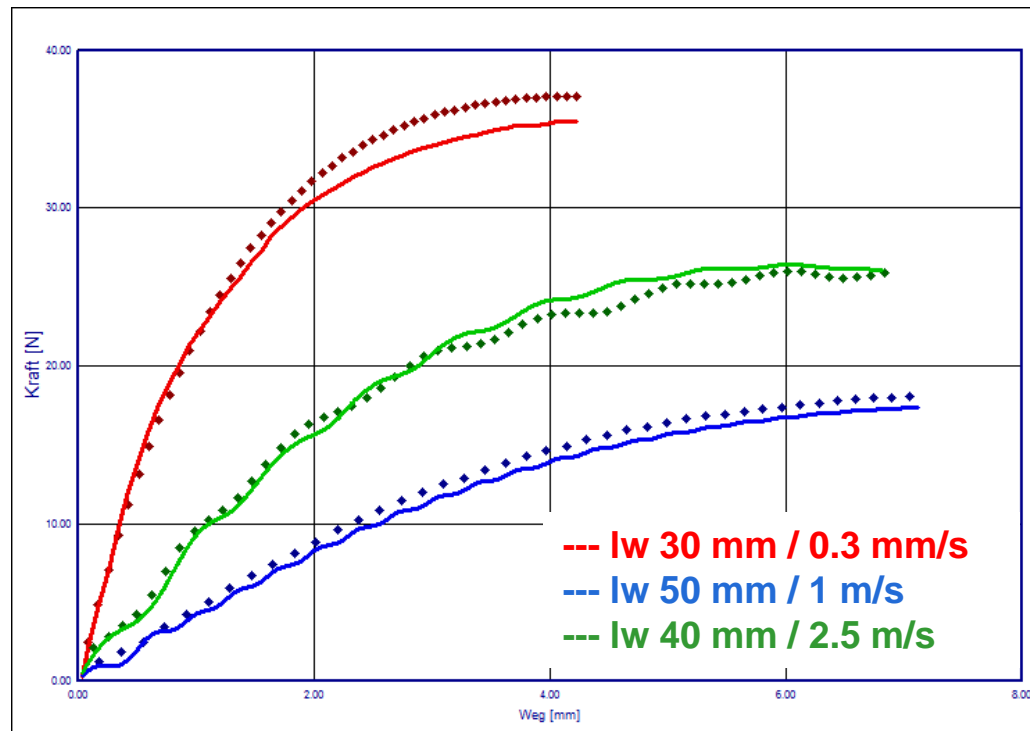


- FAT Arbeitskreis (Institute DKI, IWM, KIT)
„Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden der Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation“
- Im Arbeitskreis wurde unter anderem ein **Hostacom XBR169G** (Polypropylen gefüllt mit Talkum und EPDM) untersucht [9] [10] [11]
 - statische und dynamische Zugversuche
 - statische Schubversuche und Druckversuche
 - statische Biegeversuche
- Von der THM wurden dynamische Biegeversuche mit 4a impetus durchgeführt.
- Nach Ende des Arbeitskreises wurden an bereitgestellten Platten im Hause 4a weitere Untersuchungen durchgeführt.
- Danksagung dem Fraunhofer LBF (ehemals DKI) und der Technischen Hochschule Mittelhessen für die Bereitstellung der Versuchsdaten und Materialien.



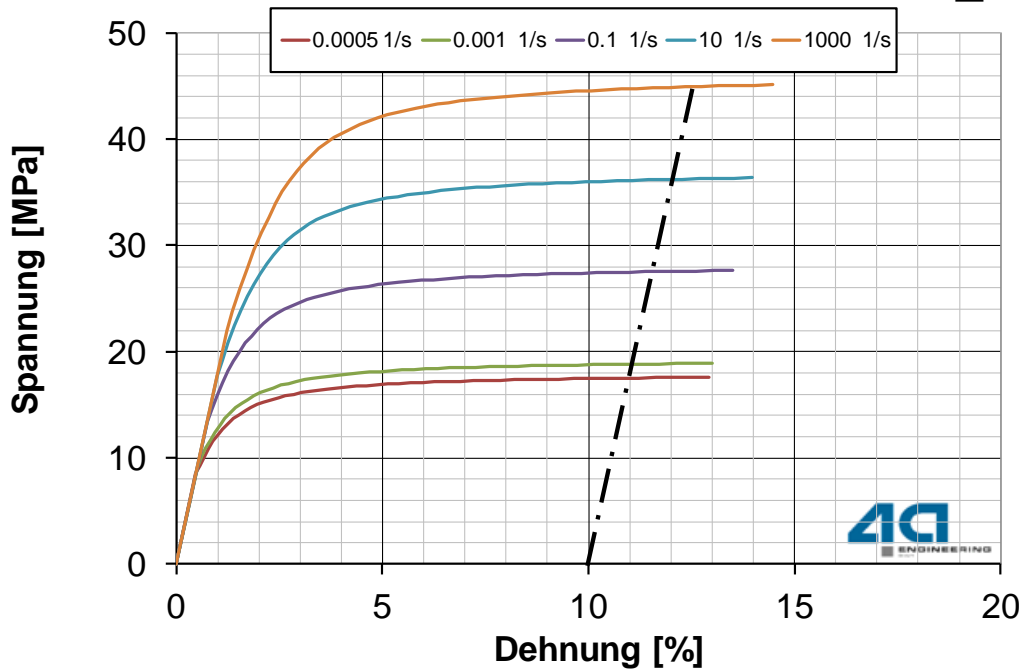
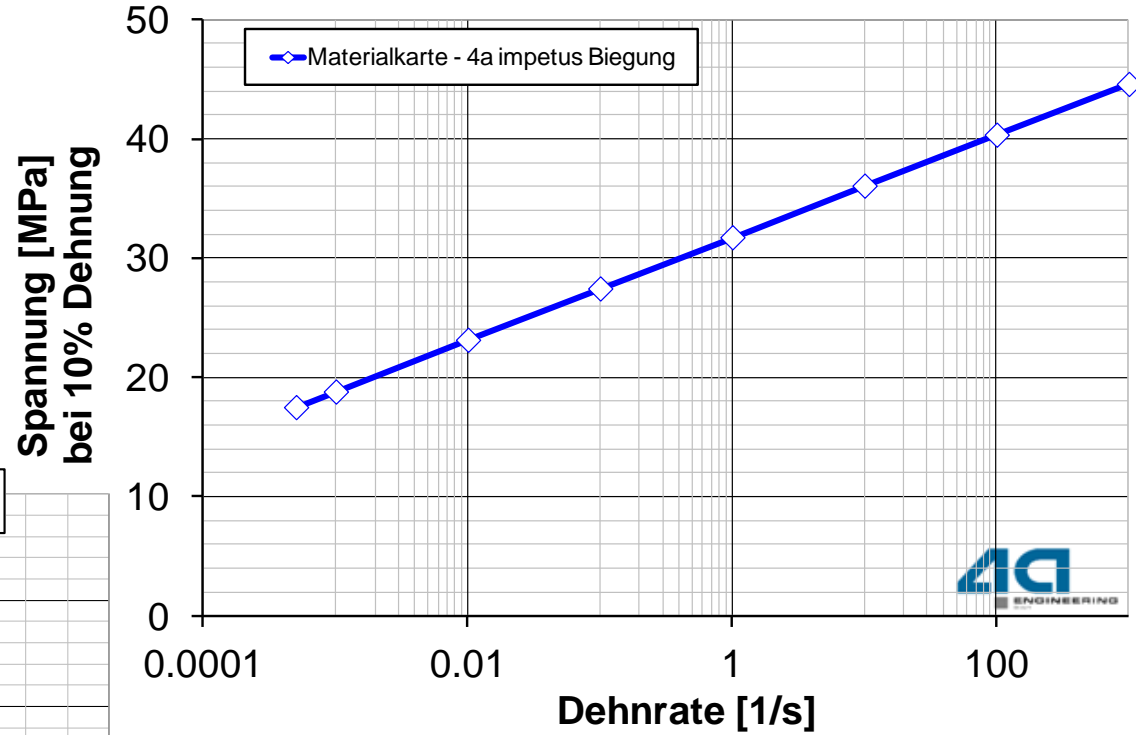
- 1. Schritt: Durchführung statischer und dynamischer Biegeversuche
- 2. Schritt: Datenauswertung
- 3. Schritt: Materialcharakterisierung - Parameteridentifikation mit LS-OPT

E-Modul → plastischen Kenndaten → Dehnratenabhängigkeit → Validierung

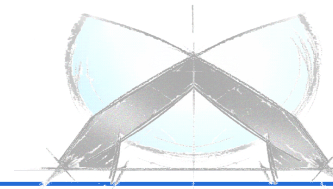


Einleitung

Vorgehensweise 4a impetus Biegeversuche



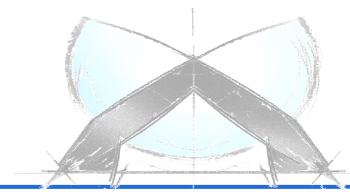
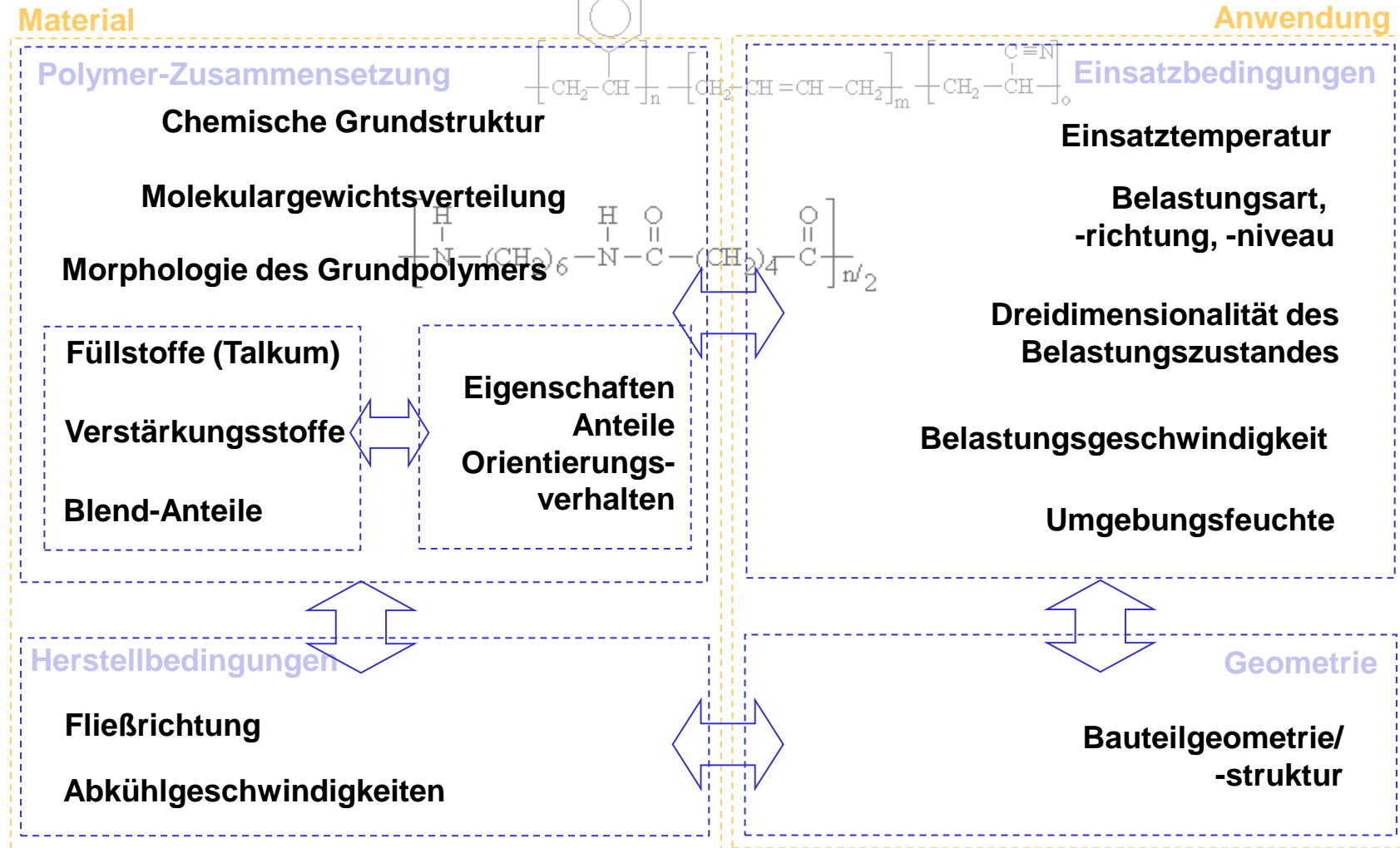
[9]-[11]



Materialverhalten von Kunststoffen

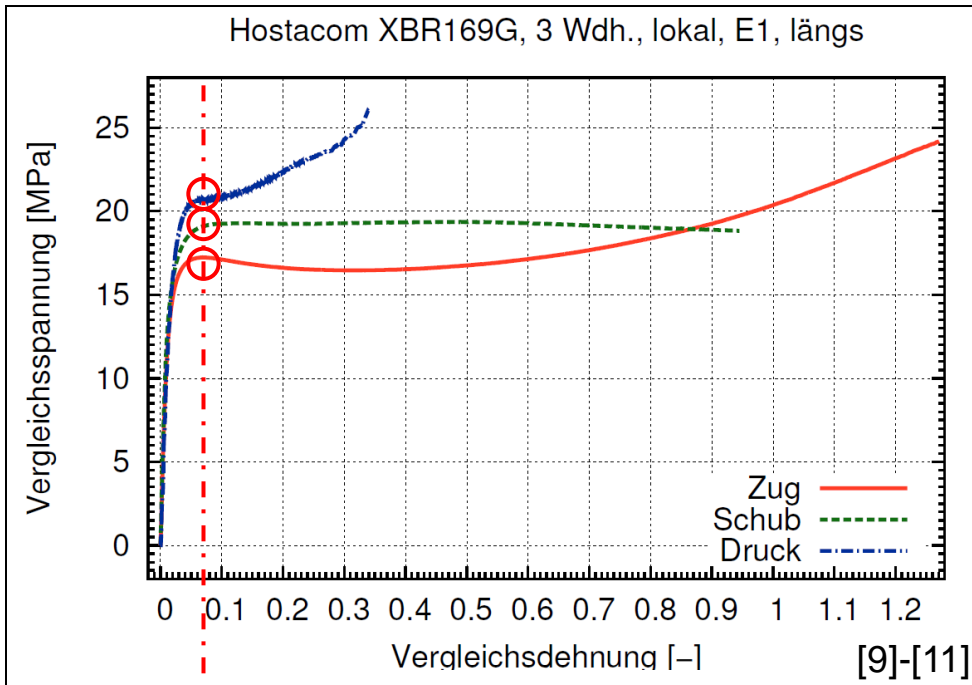
Einflüsse

Einflüsse auf das Materialverhalten von Kunststoffen:

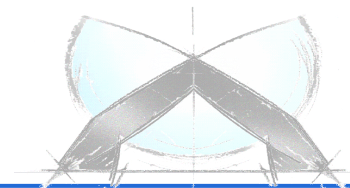
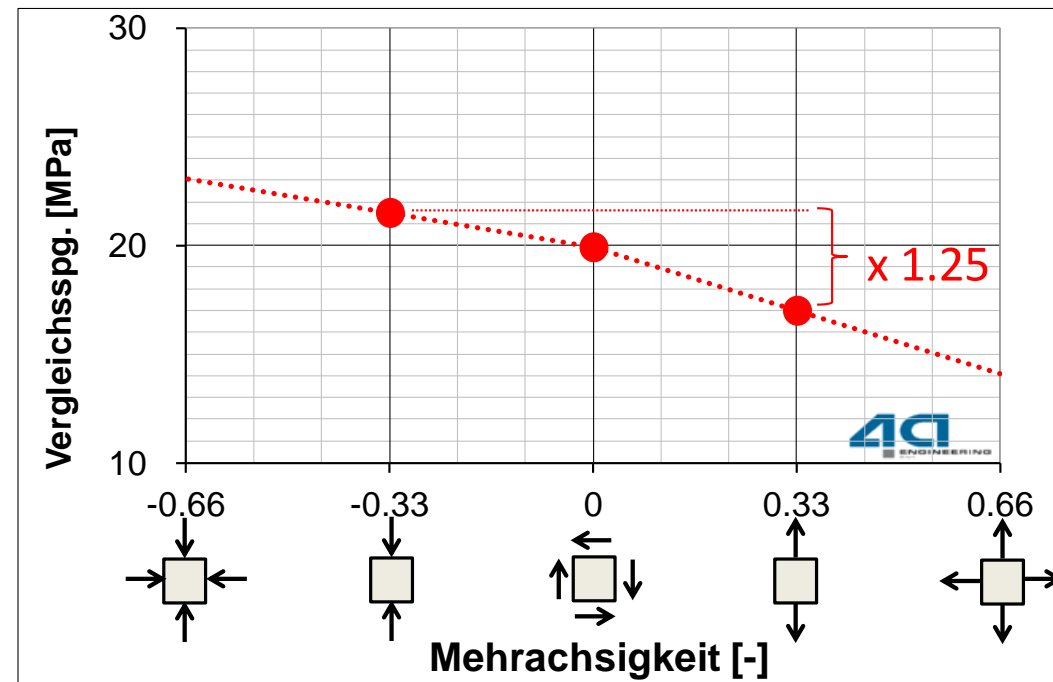


Belastungsart

- statische Zugversuche
- statische Schub- und Druckversuche



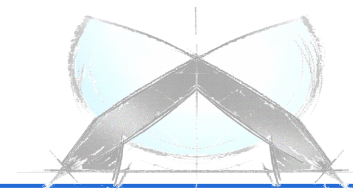
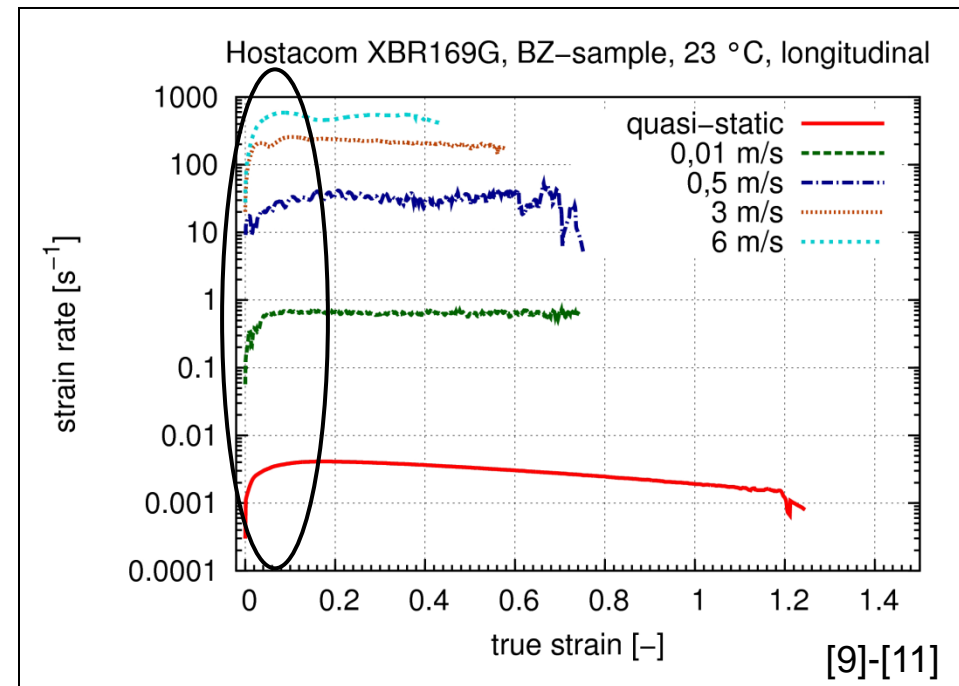
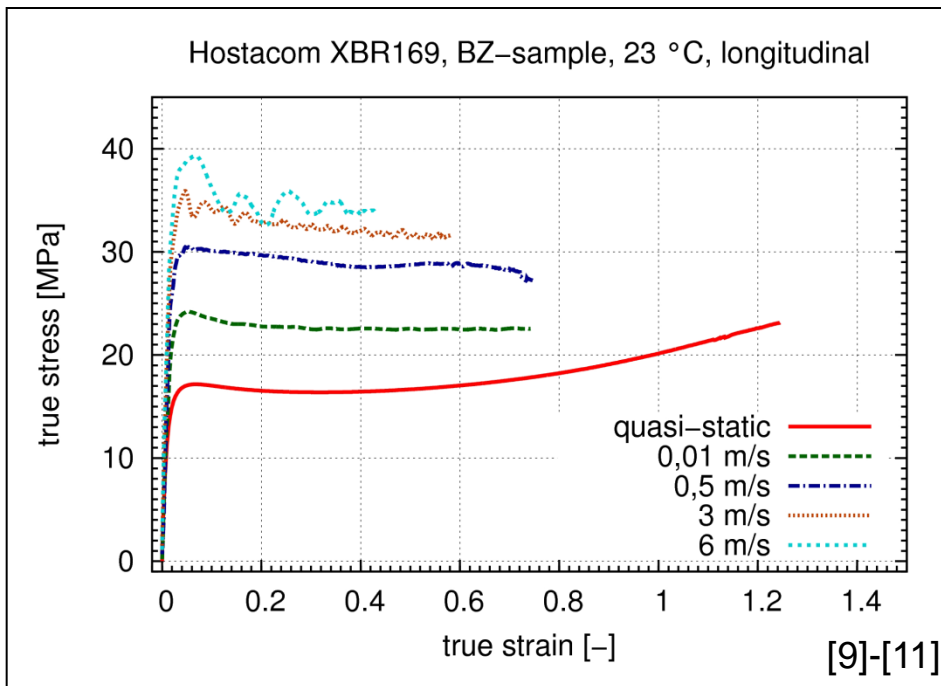
Zug/Druck Asymmetrie



Belastungsgeschwindigkeit

- statische und dynamische Zugversuche

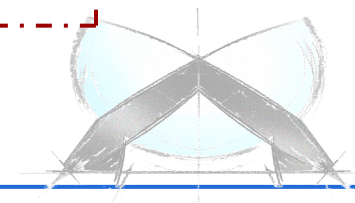
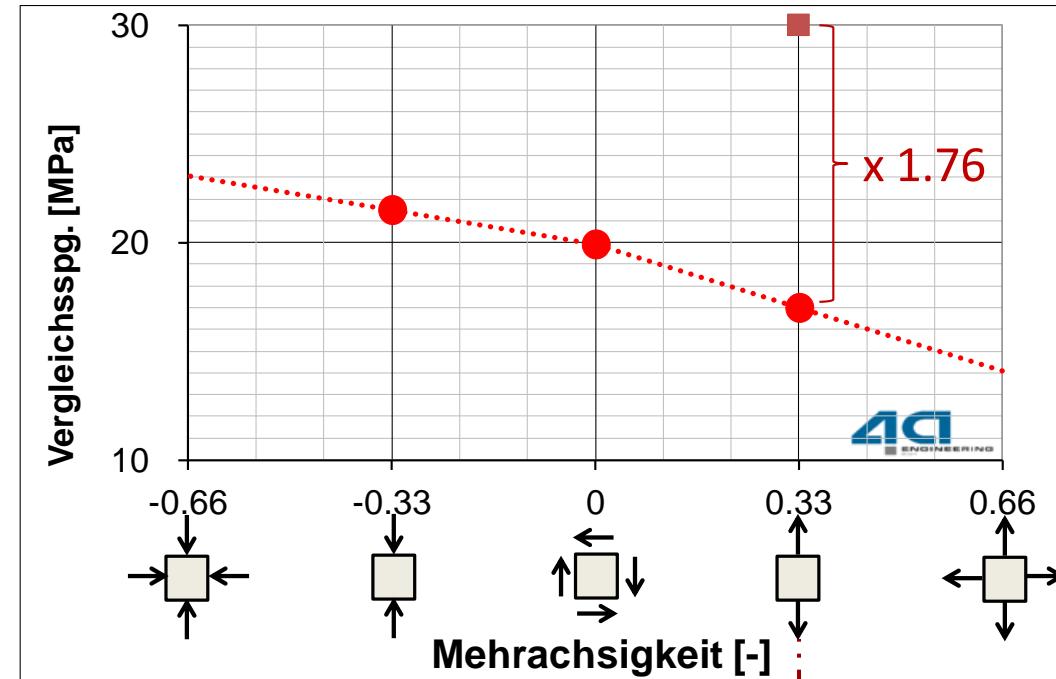
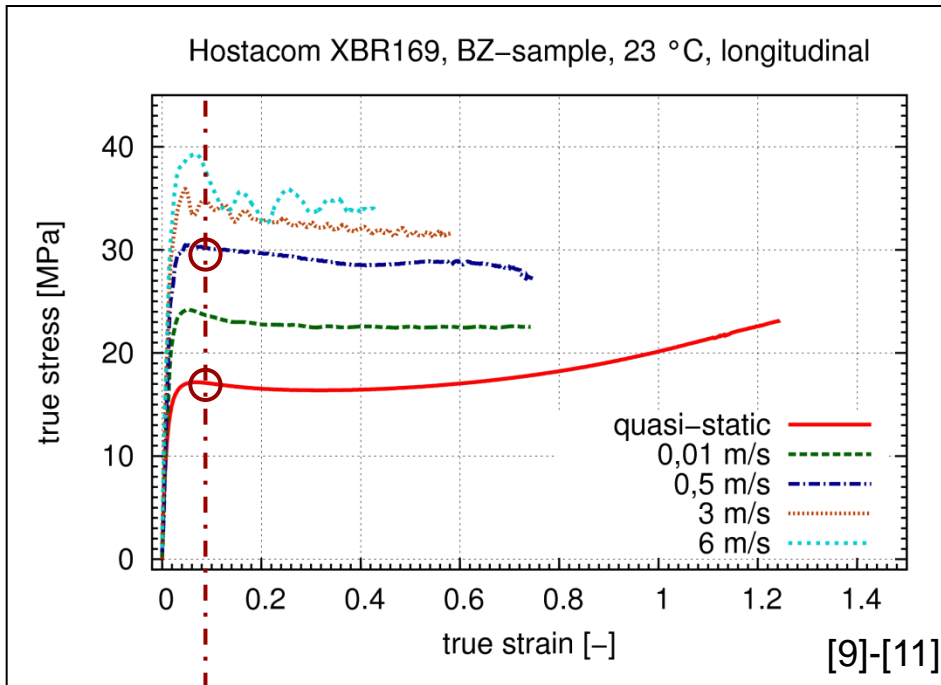
Dehnrage variiert vor allem im Bereich des Fließbeginns



Belastungsgeschwindigkeit

- statische und dynamische Zugversuche

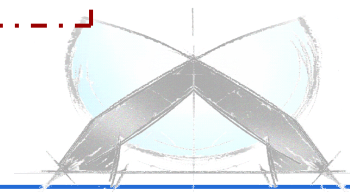
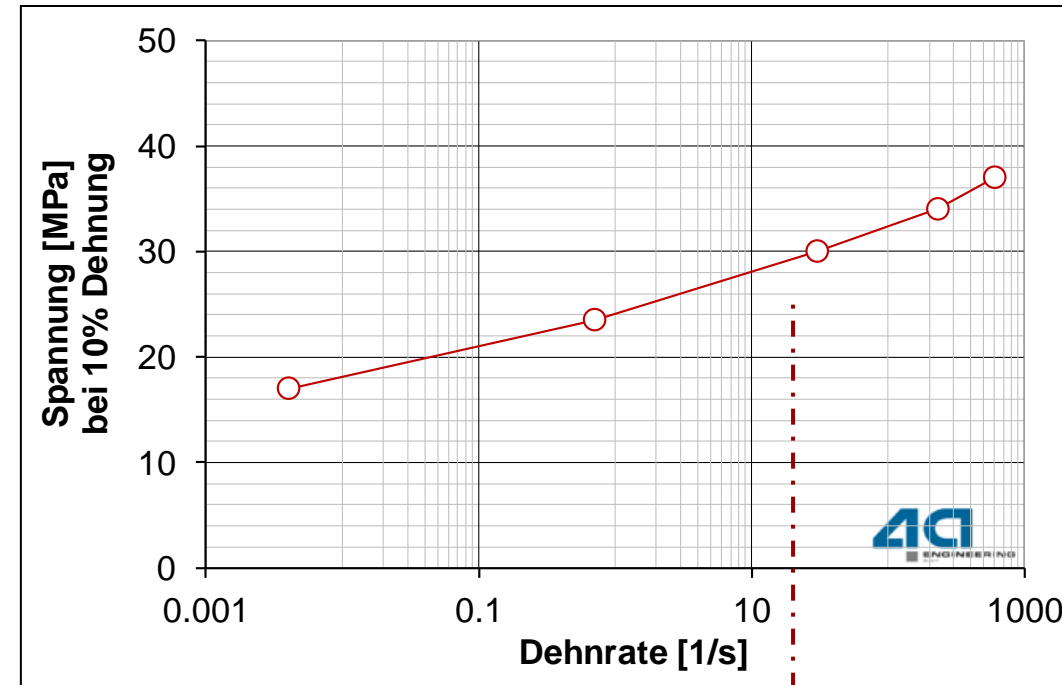
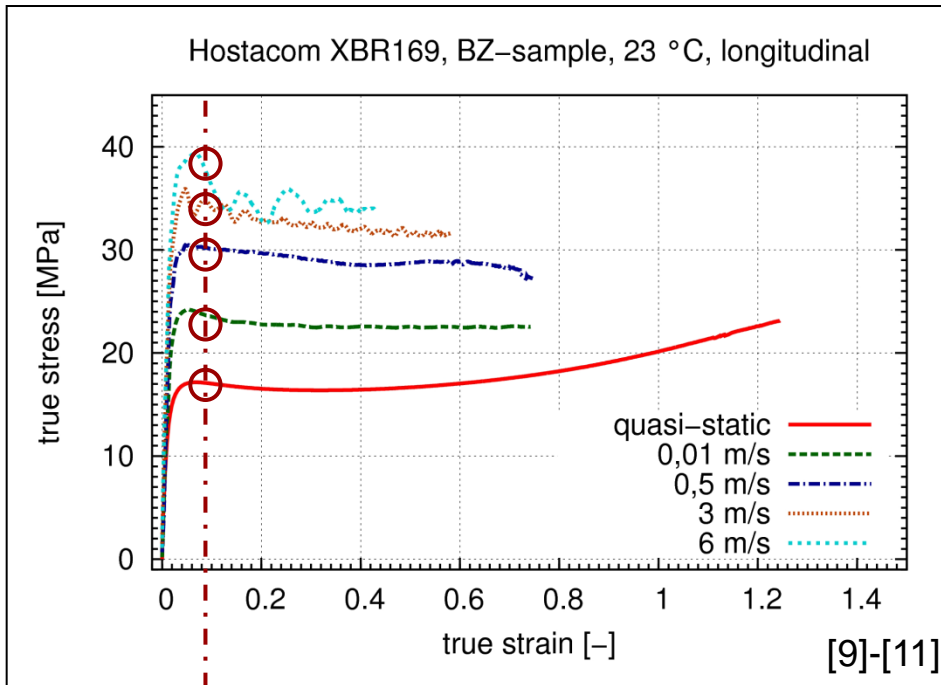
Dehnratenabhängigkeit statisch vs. dynamisch



Belastungsgeschwindigkeit

- statische und dynamische Zugversuche

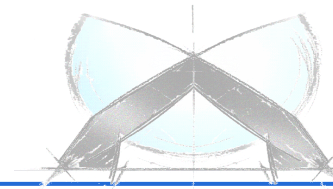
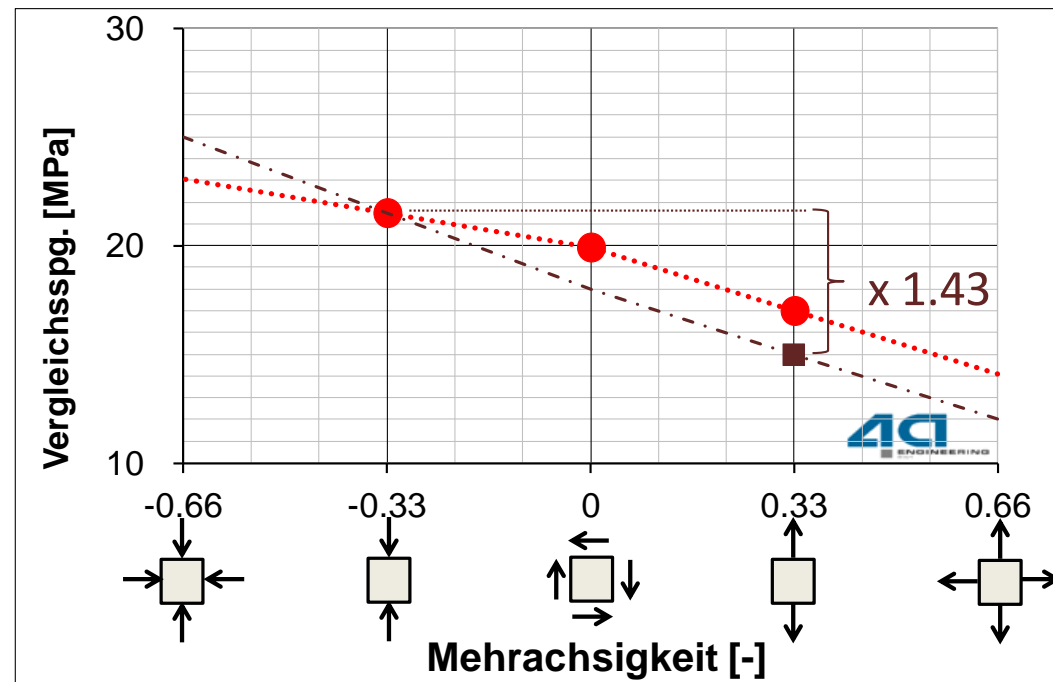
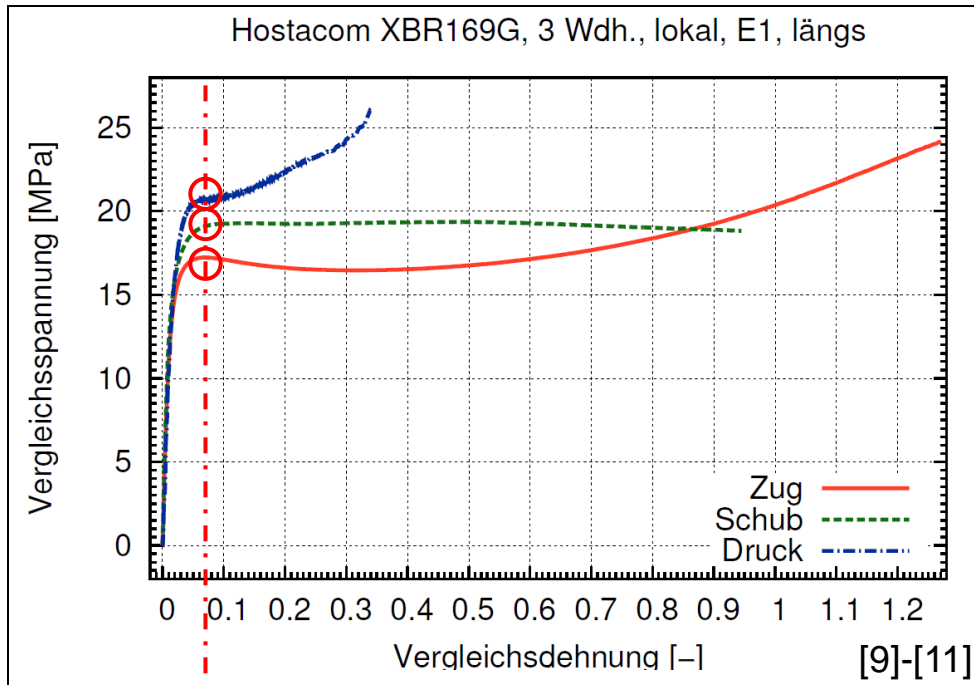
Dehnratenabhängigkeit statisch vs. dynamisch



Belastungsart

- statische Zugversuche
- statische Schub- und Druckversuche

Zug/Druck Asymmetrie dehnratenbereinigt



Verfügbare Materialmodelle für Thermoplaste

Schnittstellenstand in 4a impetus V3.2

➤ Aktuell für LS_DYNA implementiert

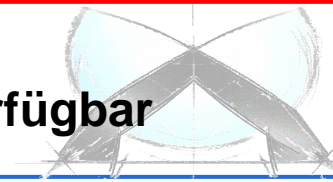
- MAT_19: **MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY* von Mises
- MAT_24: **MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY* von Mises
- MAT_124: **MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION* Drucker Prager
- MAT_187: **MAT_SAMP-1* Allg. Fließfläche

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



Anpassung Materialkarte mit allg. Fließfläche

Überprüfung der Notwendigkeit

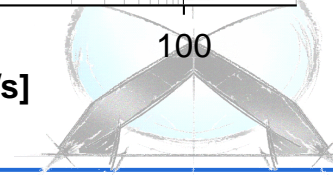
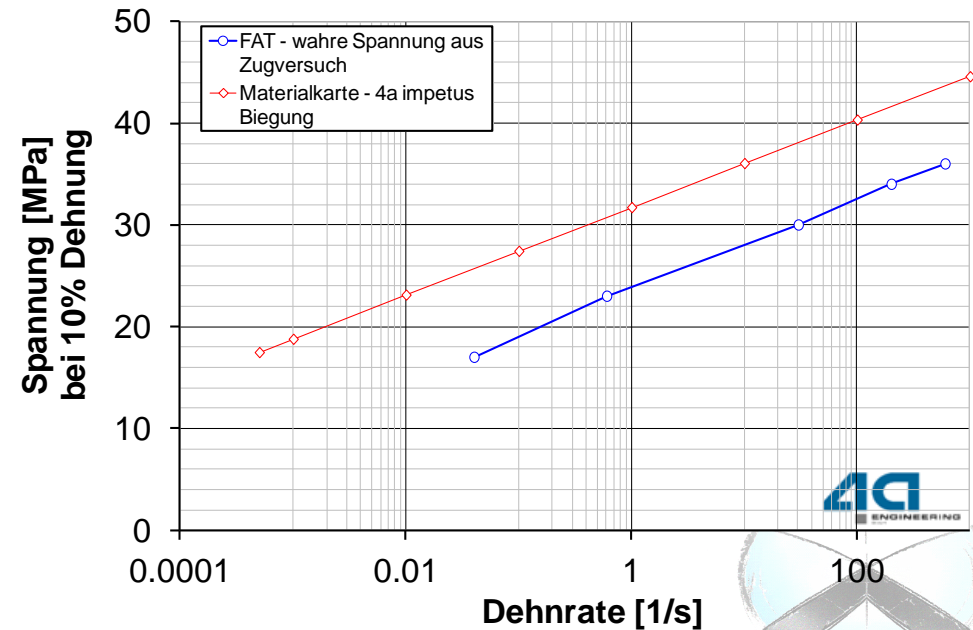
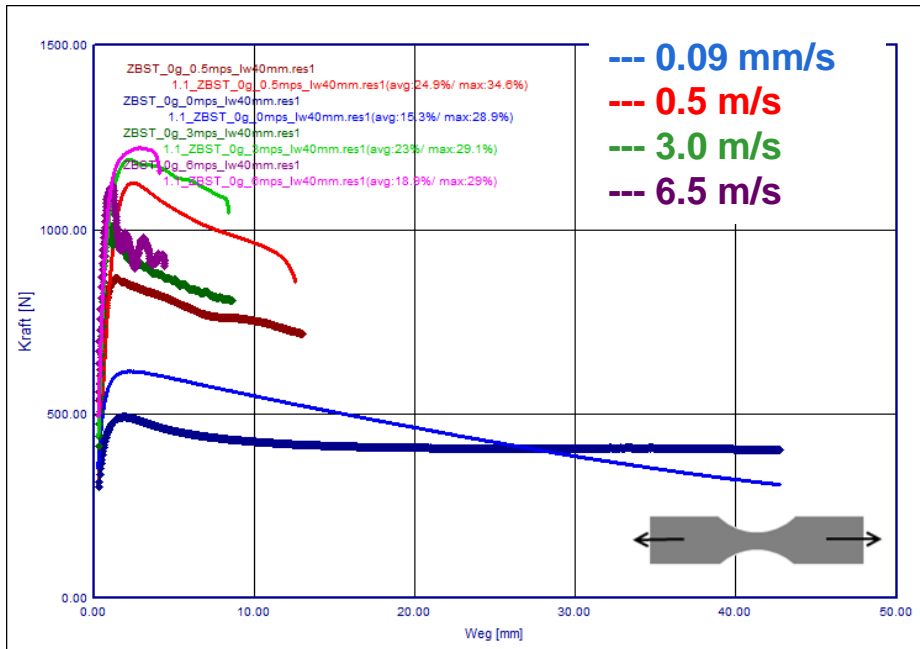
- 1. Schritt: Import externe Versuchsdaten in 4a impetus [9][10][11]
- 2. Schritt: Datenauswertung
- 3. Schritt: Validierung mit vorhandener Materialkarte

Höhere Fließspannungen aufgrund der Zug/Druck Asymmetrie

→ MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION oder MAT_SAMP-1

Lokalisieren aufgrund der Volumenskonstanz

→ Fließkurvenextrapolation oder Berücksichtigung der plastischen Querkontraktion

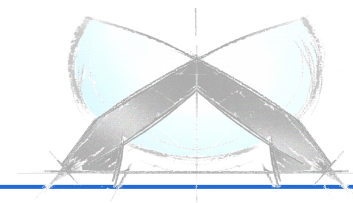
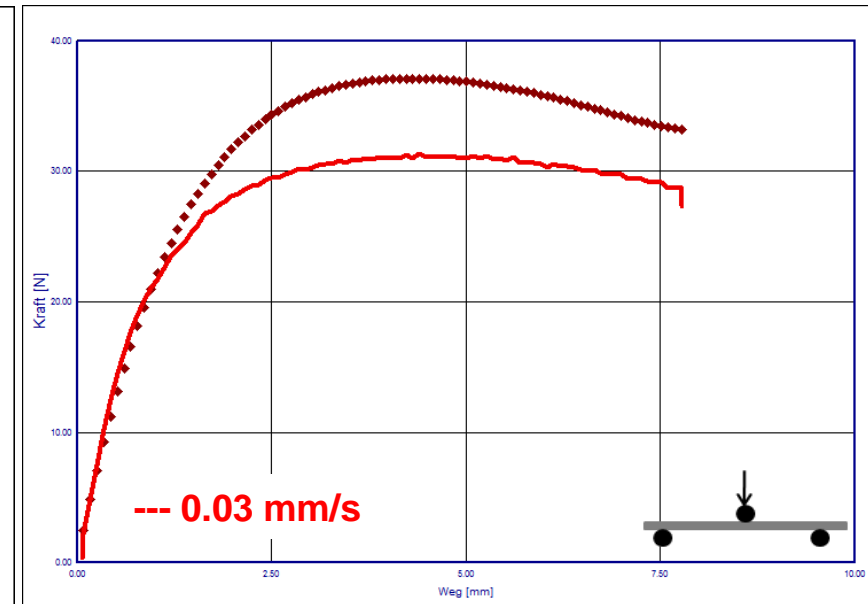
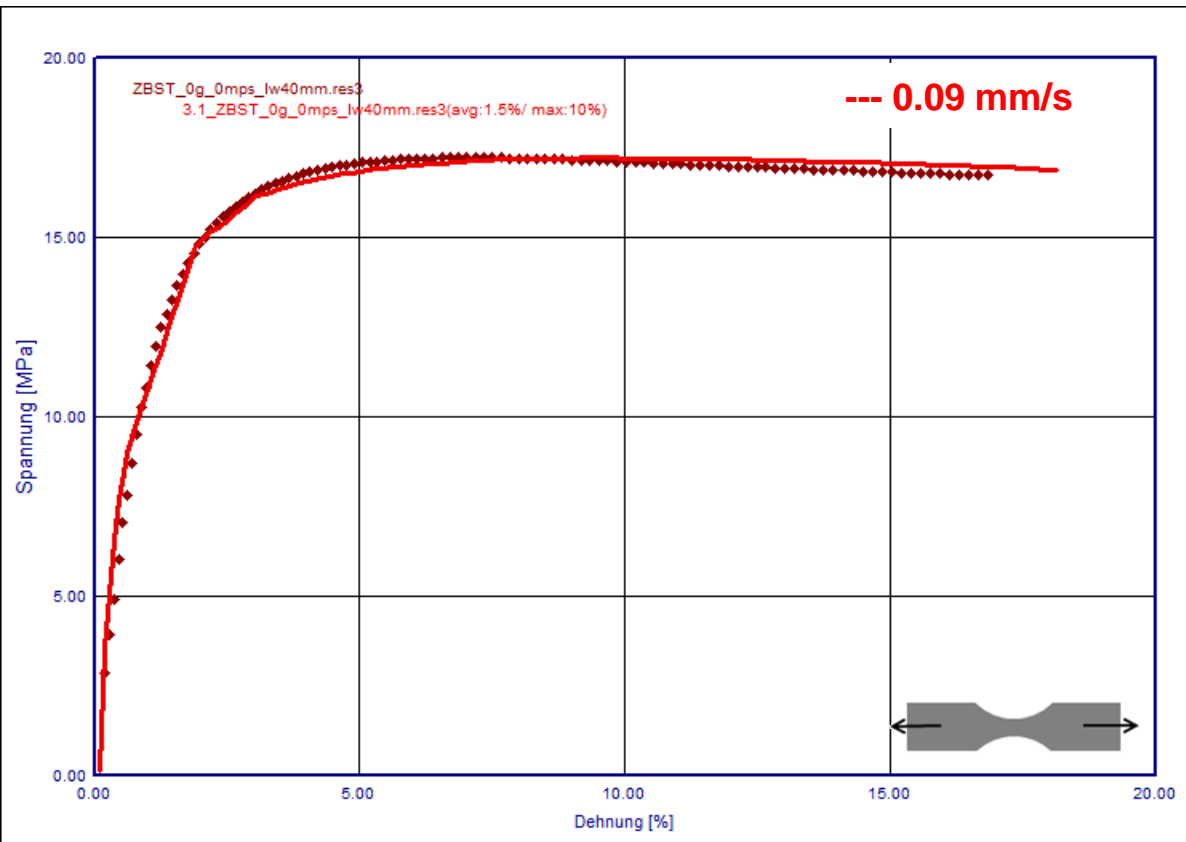


Anpassung Materialkarte mit allg. Fließfläche

Ermittlung der Zug/Druck Asymmetrie

➤ 4. Schritt: Materialcharakterisierung Zug - Parameteridentifikation mit LS-OPT

- vereinfacht am 1-Element Modell
- Dehnratenabhängigkeit aus vorhandener Materialkarte auf Basis Biegung
- Ansatzfunktion 3-Parameter-Modell

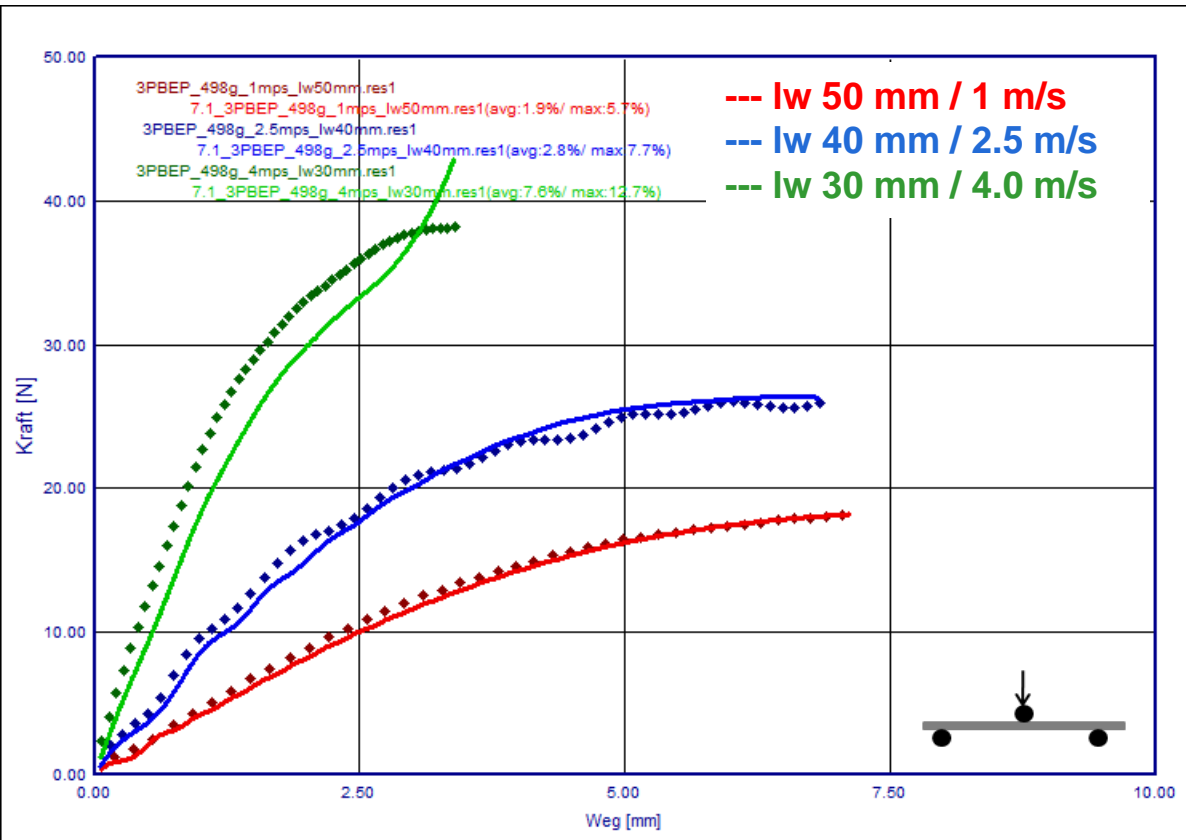


Anpassung Materialkarte mit allg. Fließfläche

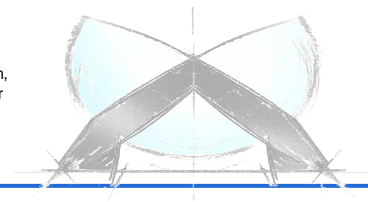
Ermittlung der Zug/Druck Asymmetrie

➤ 5. Schritt: Materialcharakter. mit allg. Fließfläche - Parameteridentifikation mit LS-OPT

- MAT_SAMP-1
- plastische Querkontraktion aus Zugmessungen fixiert
- Schub- und Druckkurven skaliert auf Basis Zug
- Dehnratenabhängigkeit aus vorhandener Materialkarte auf Basis Biegung



Modell 130322_001
 Solver: LS DYNA, Metamodell: 7031_MAT187, Elementgröße: 2mm,
 Elementtyp:16: Fully integrated shell element (very fast), Anzahl der
 Integrationspunkte: 8
 Annahmen: Querk. 0.3, Reibk. 0.1

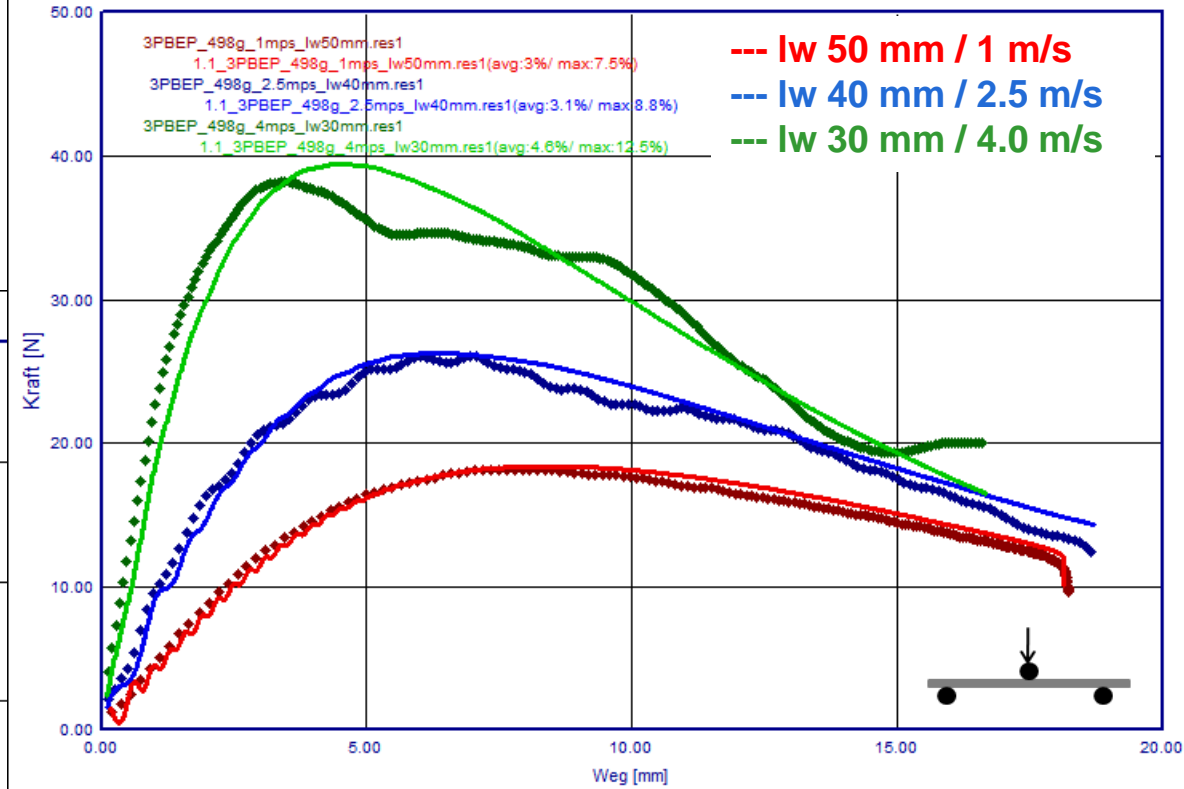
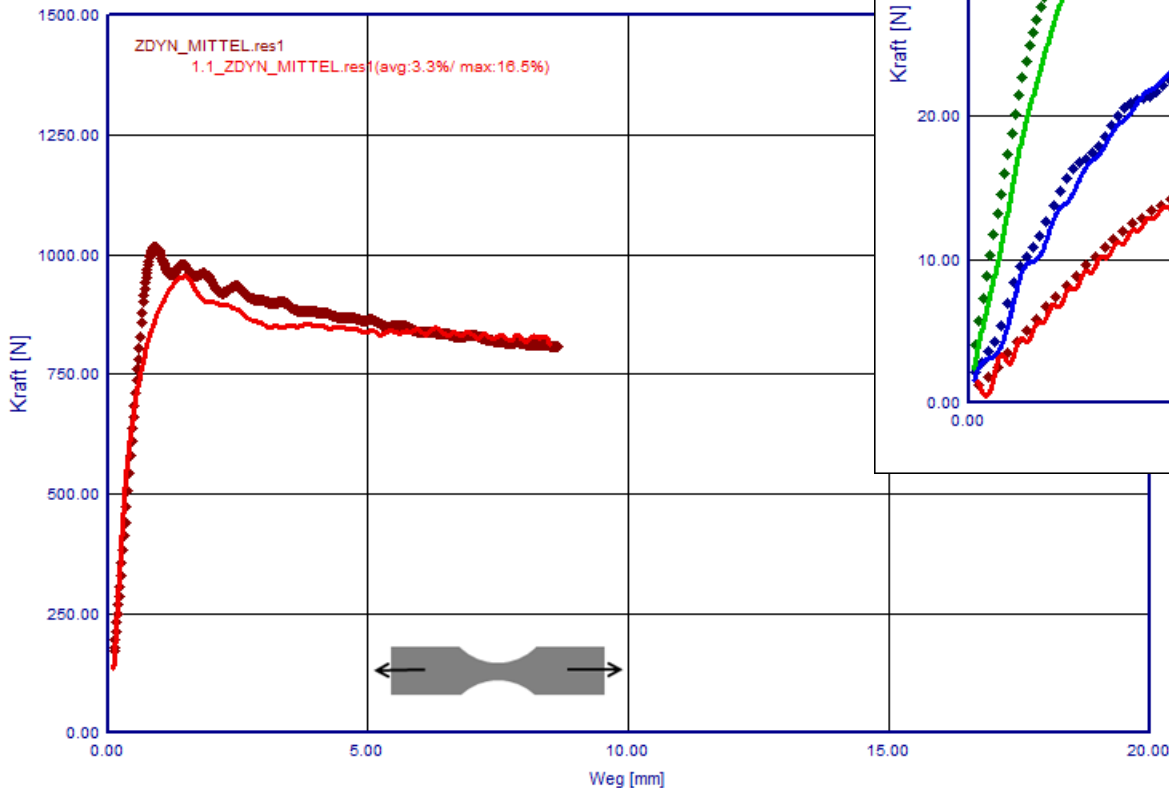


Anpassung Materialkarte mit allg. Fließfläche

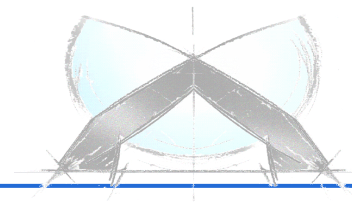
Ermittlung der Zug/Druck Asymmetrie

➤ 6. Schritt: Validierung

gute Übereinstimmung für alle Lastfälle

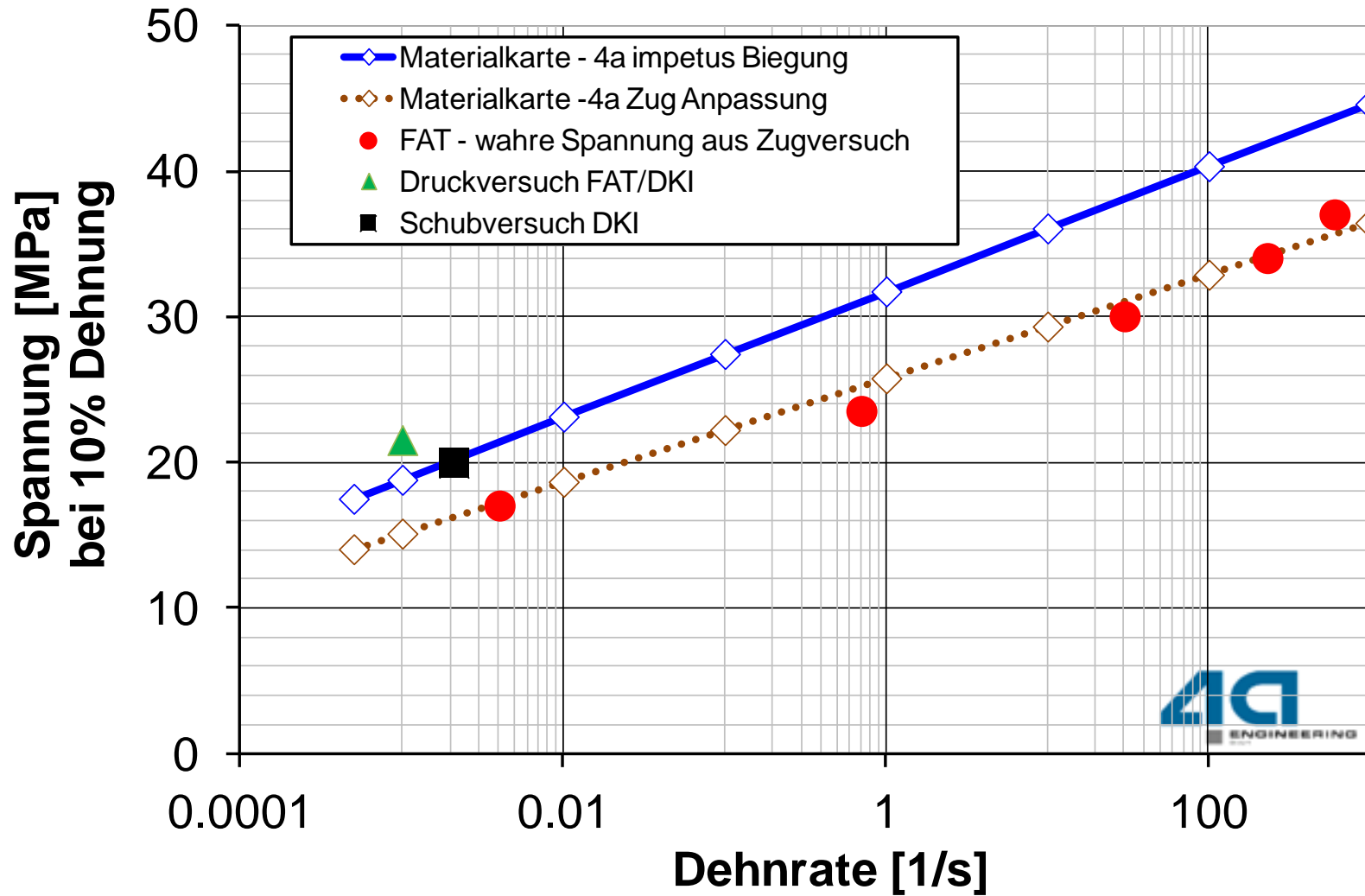


Modell 130323_001
Solver: LS DYNA, Metamodell: 7031_MAT187, Elementgröße: 2mm,
Elementtyp: 16: Fully integrated shell element (very fast), Anzahl der
Integrationspunkte: 9
Annahmen: Querk. 0.3, Reibk. 0.1

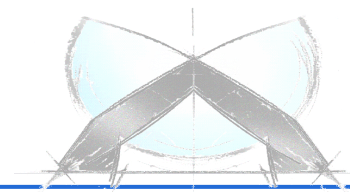


Anpassung Materialkarte mit allg. Fließfläche

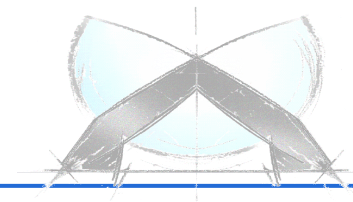
Ermittlung der Zug/Druck Asymmetrie



[11]



Möglichkeiten der Versagensabbildung

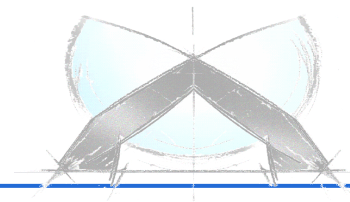


Möglichkeiten der Versagensabbildung

Verfügbare Versagens- bzw. Schädigungsmodelle in LS-DYNA

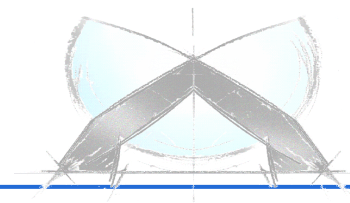
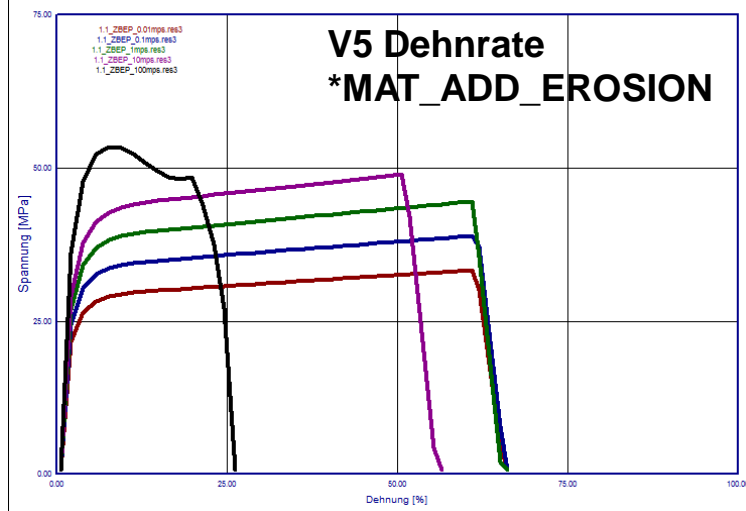
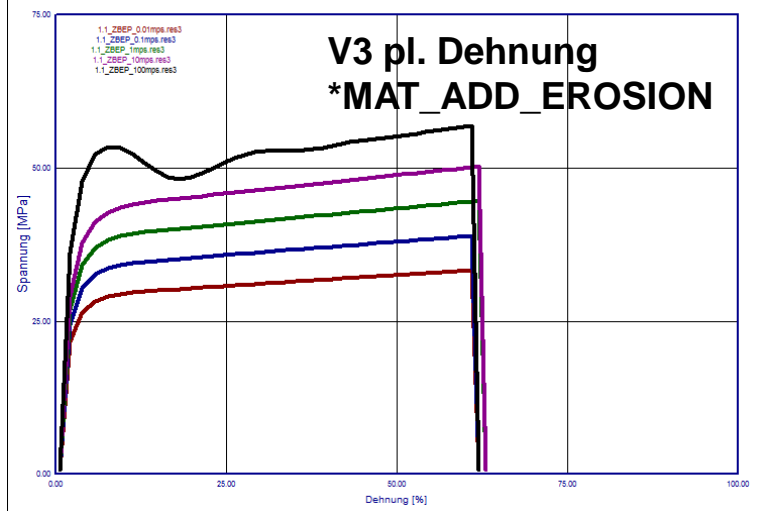
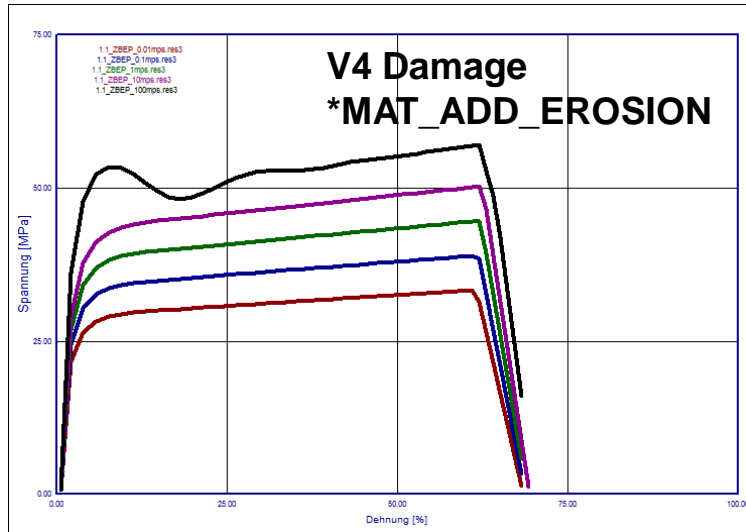
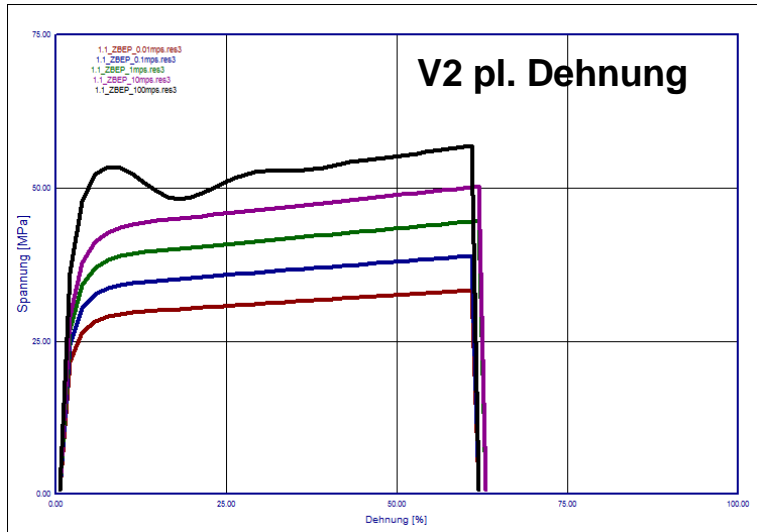
- Plastische Vergleichsdehnung
z.B. **MAT_24: *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY**
- Plastische Vergleichsdehnung mit Schädigung
z.B. **MAT_81: *MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE**
- Dehnratenabhängiges Vergleichskriterium
z.B. **MAT_19: *MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY**
oder **MAT_124: *MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION**
- 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.



Möglichkeiten der Versagensabbildung

1-Element Tests



Möglichkeiten der Versagensabbildung

MAT_ADD_EROSION – DIEM-Modell

- DIEM: Damage Initiation and Evolution Model
- Basis: Standard Material Modell (z.B. *MAT24)
- 3 individuelle Kriterien können eingesetzt werden:

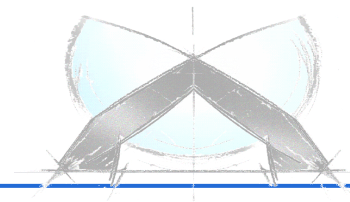
- Duktiles Kriterium: $\varepsilon_D^P = \varepsilon_D^P(\eta, \dot{\varepsilon}^P)$
- Schub Kriterium $\varepsilon_D^P = \varepsilon_D^P(\theta, \dot{\varepsilon}^P)$
- Instabilitätskriterium $\varepsilon_D^P = \varepsilon_D^P(\alpha, \dot{\varepsilon}^P)$

$$\omega_D = \int_0^{\varepsilon^P} \frac{d\varepsilon^P}{\varepsilon_D^P}$$

$$\alpha = \frac{\dot{\varepsilon}_{\min or}^P}{\dot{\varepsilon}_{\max}^P} \longrightarrow \omega_D = \max \frac{\varepsilon^P}{\varepsilon_D^P}$$

- Nach Initiierung erfolgt Schädigungsentwicklung:

$$\sigma = (1 - D)C^{ep} : \varepsilon$$



Möglichkeiten der Versagensabbildung

MAT_ADD_EROSION – DIEM-Modell

➤ DIEM: Damage Initiation and Evolution Model

```
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
```

```
$ mid ro e pr sigy etan fail tdel
$ 100 7.8000E-9 2.1000E+5 0.300000
$ c p lcss lcsr vp
$ 0.000 0.000 99 0 1.000
...
```

```
*MAT_ADD_EROSION
```

```
$ MID EXCL MXPRES MNEPS EFFEPS VOLEPS NUMFIP NCS
$ 100
$ MNPRES SIGP1 SIGVM MXEPS EPSSH SIGTH IMPULSE FAILTM
$ IDAMG
$ -3
```

```
$ IDS: Ductile
```

```
$ DITYP P1 P2
$ 0 200
$ DETYP DCTYP Q1
$ 0 0.10
```

```
$ IDS: Shear ks=0.12
```

```
$ DITYP P1 P2
$ 1 210 0.12
$ DETYP DCTYP Q1
$ 0 0.1
```

```
$ IDS: Instability MSFLD
```

```
$ DITYP P1 P2
$ 2 220
$ DETYP DCTYP Q1
$ 0 0.1
```

Reference of MAT_ADD_EROSION-card

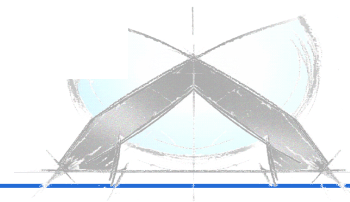
Definition of up to three criteria
(abs(-3)) in the model.

DITYP=0 : Ductile damage initiation criteria
P1=200 : Curve definition

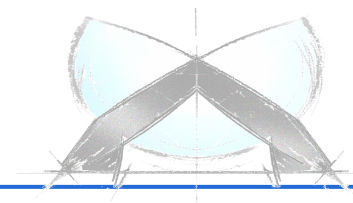
DITYP=1 : Shear damage initiation criteria
P1=210 : Curve definition
P2=0.12 : Pressure influence parameter k_s

DITYP=2 : Instability initiation criteria
P1=220 : Curve definition

➤ Mehr: Dr. Feucht, Dr. Haufe: Damage and Failure Models in LS-DYNA



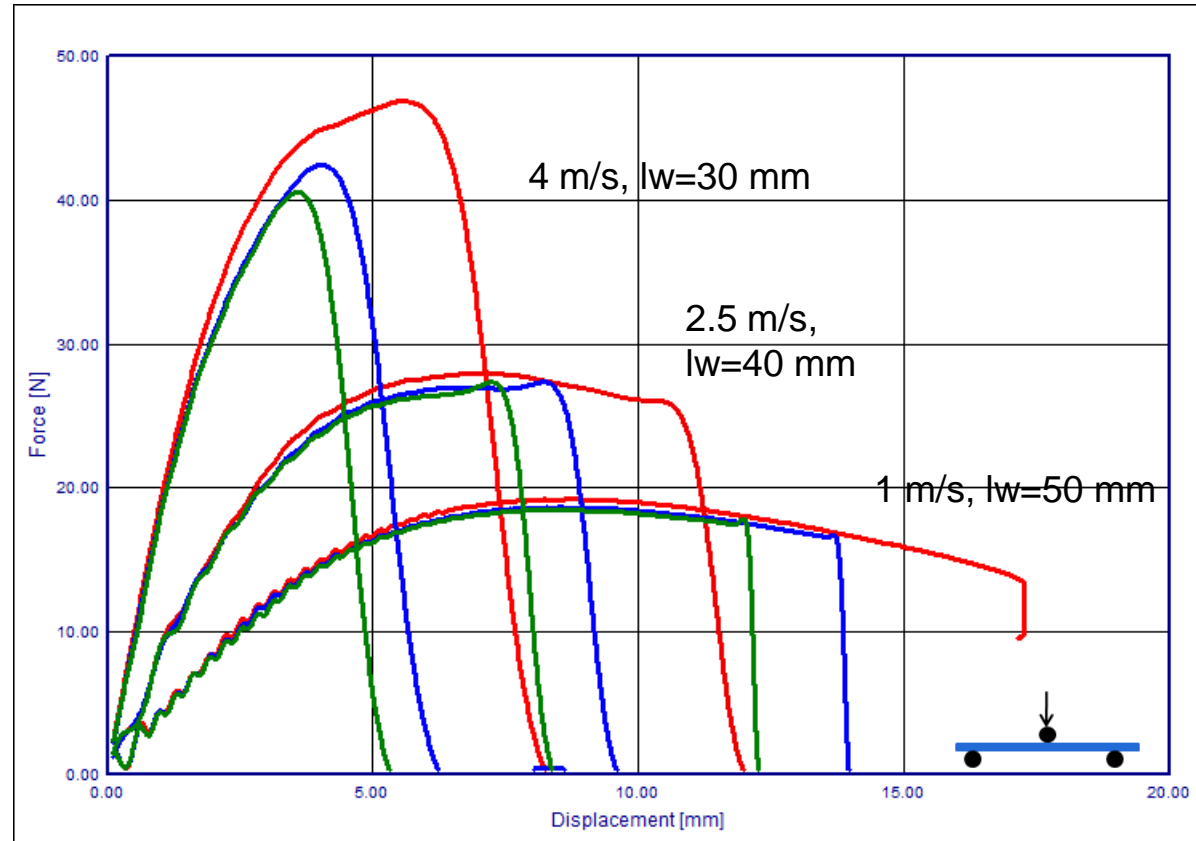
Einfluss Idealisierung



Thermoplaste

Einflussgrößen: Elementgröße

- Beispiel: 3-Punkt-Biegung; *MAT_24 mit Versagensdehnung; Shell-Elemente; 5 Integrationspunkte;

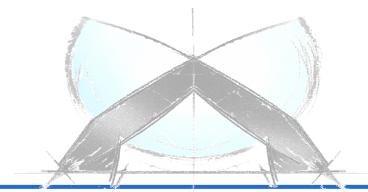


Hostacom

Elementgröße 2 mm

Elementgröße 4 mm

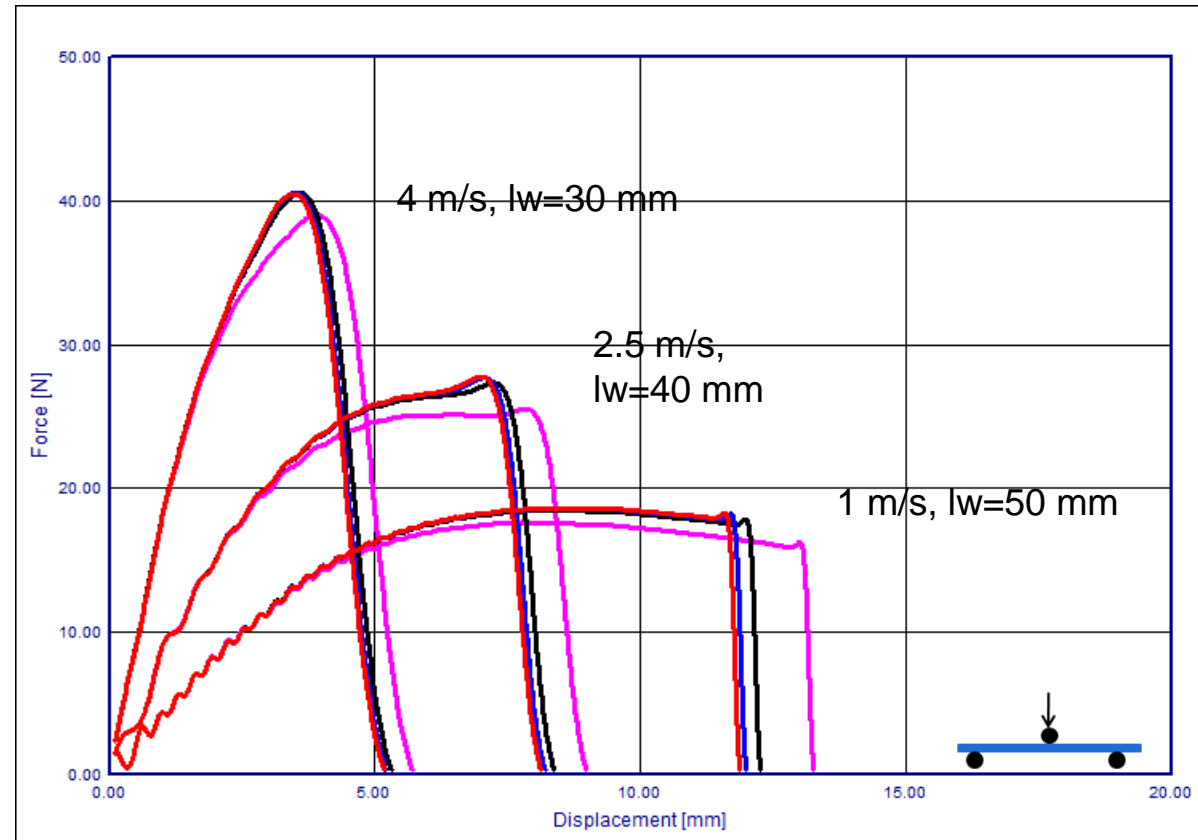
Elementgröße 8 mm



Thermoplaste

Einflussgrößen: Integrationspunkte

- Beispiel: 3-Punkt-Biegung; *MAT_24 mit Versagensdehnung; Shell-Elemente; Elementlänge 2 mm



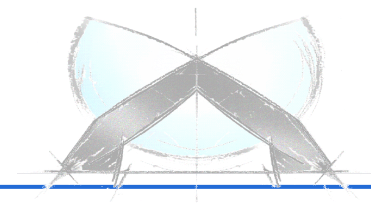
Hostacom

Elementtyp 16; 3 IP

Elementtyp 16; 5 IP

Elementtyp 16; 7 IP

Elementtyp 16, 9 IP

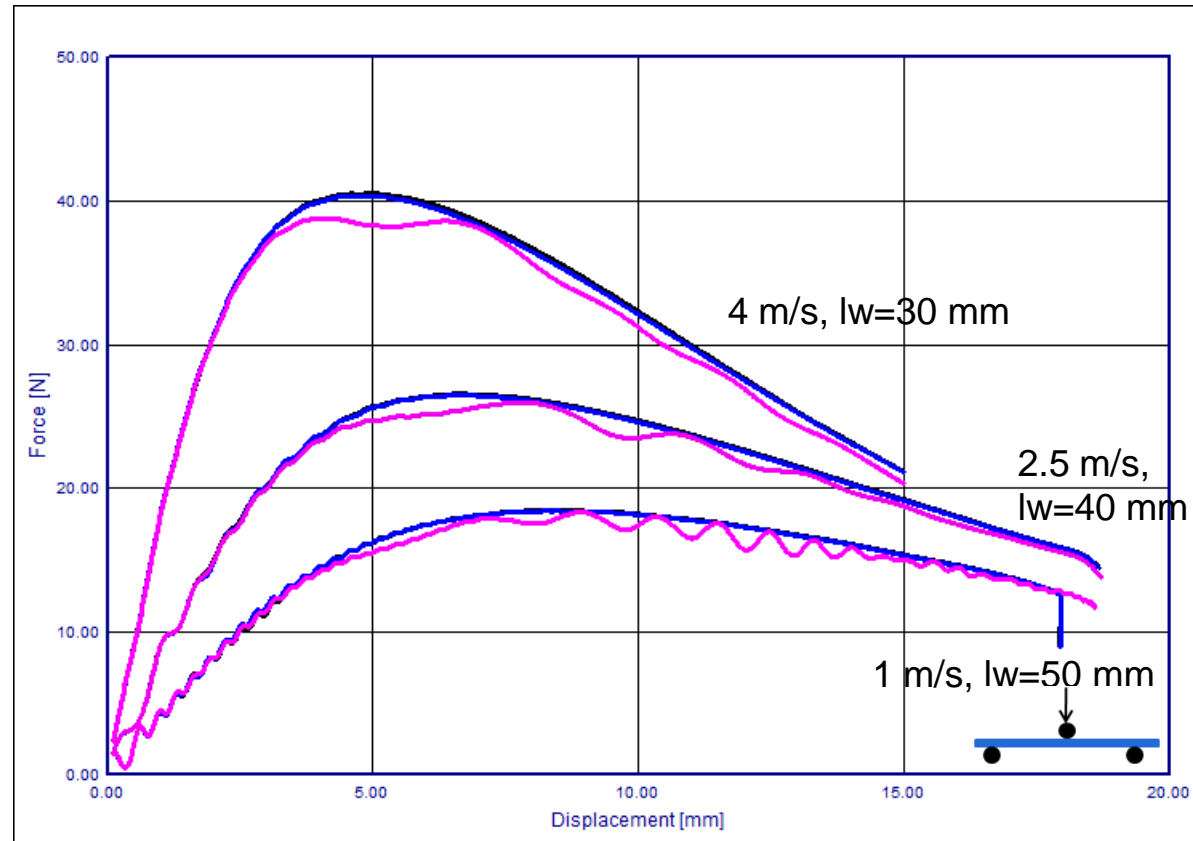


in physics we trust

Thermoplaste

Einflussgrößen: Elementtyp Shell

➤ Beispiel: 3-Punkt-Biegung; *MAT_24; Shell-Elemente; 5 Integrationspunkte



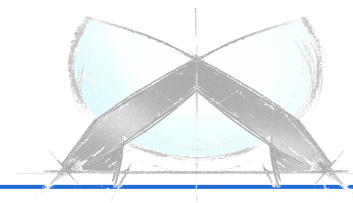
Hostacom

Elementlänge 2 mm

Elementtyp 16

Elementtyp 2

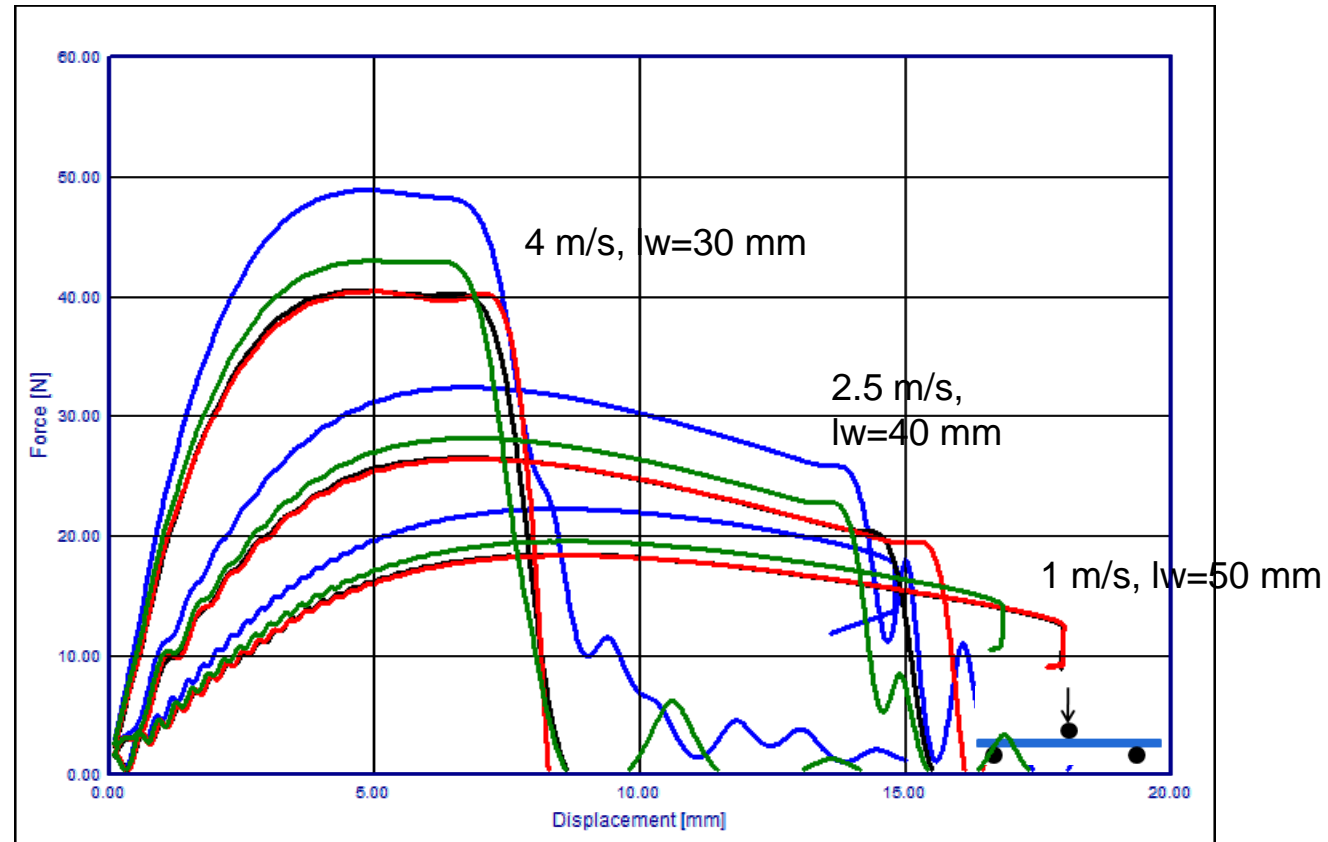
Elementtyp 2, mit Kontaktdämpfung und Knotendrillrotation-Einschränkung



Thermoplaste

Einflussgrößen: Elementtyp

➤ Beispiel: 3-Punkt-Biegung; *MAT_24; Shell- vs. Solid-Elemente



Hostacom

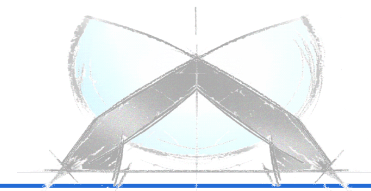
Elementlänge 2 mm

Shell-Elementtyp 16, 5 IP

Solid-Elementtyp 16; 2 Elemente über die Höhe

Solid-Elementtyp 2, 5 Elemente über die Höhe

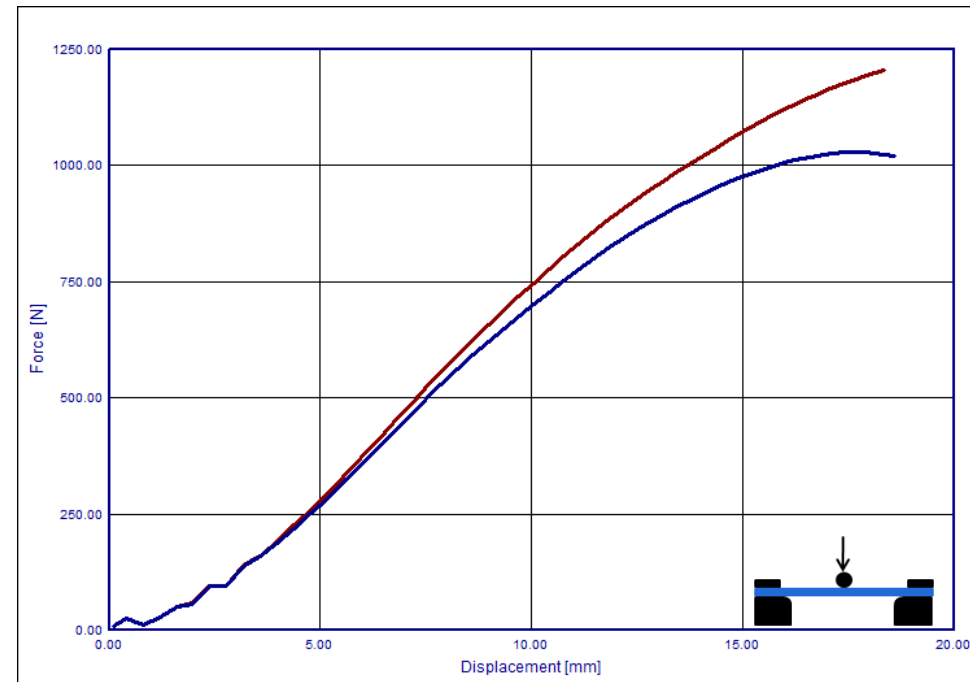
Solid-Elementtyp 2, 5 Elemente über die Höhe, 1mm Elementlänge



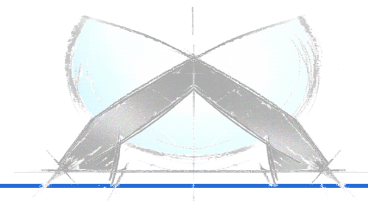
Thermoplaste

Einflussgrößen: Einstellung in Control Card

- 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.



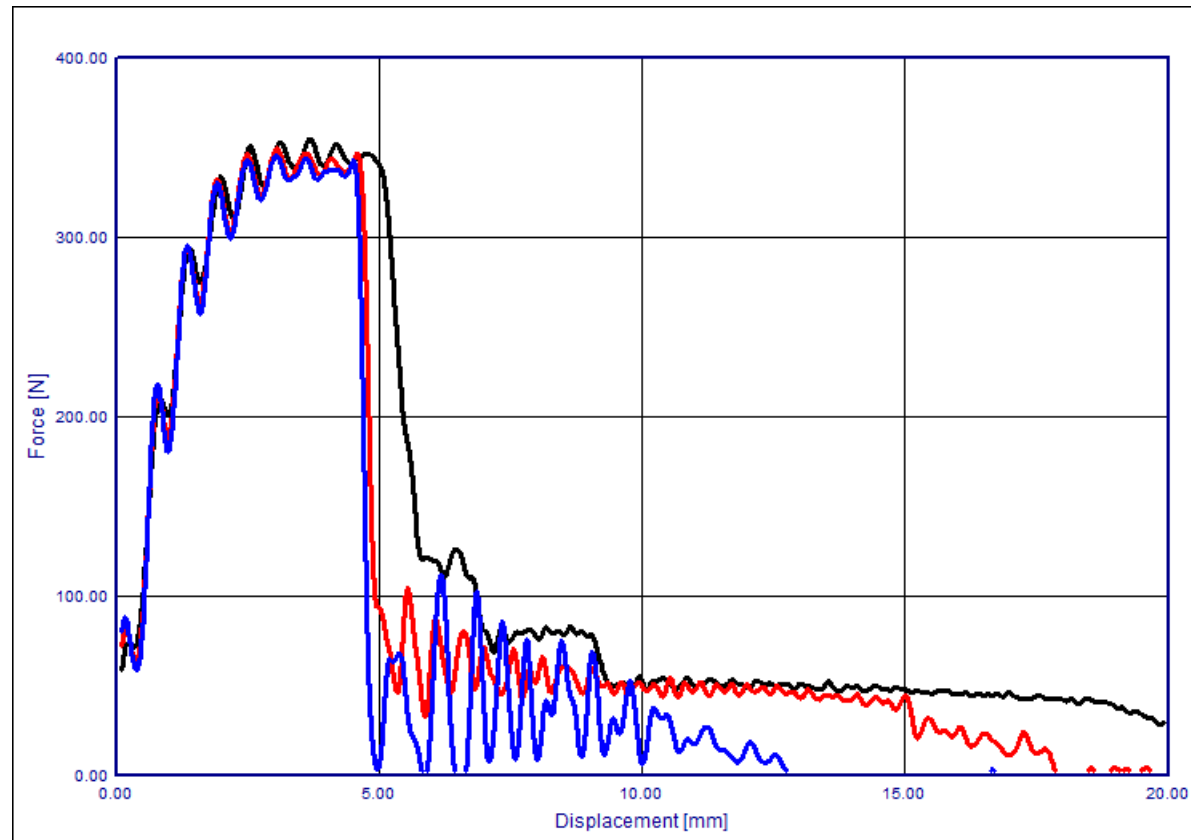
Hostacom
 Elementlänge 2 mm, 5 IP
ISTUPD=0
ISTUPD=1



Thermoplaste

Einflussgrößen: Elementgröße

- Beispiel: 3-Punkt-Biegung T-Probe; 2.5 m/s; *MAT_24 mit Versagensdehnung; Shell-Elemente; 5 IP

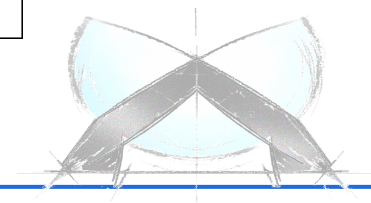


Hostacom

Elementgröße 4 mm

Elementgröße 2 mm

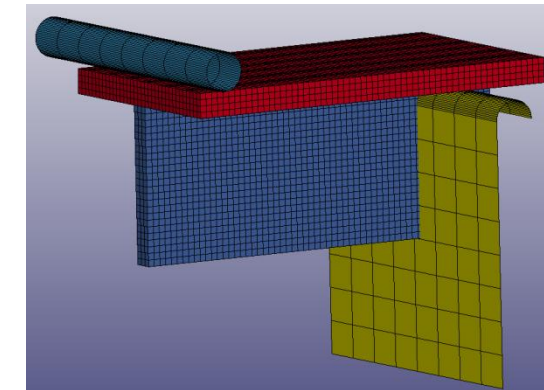
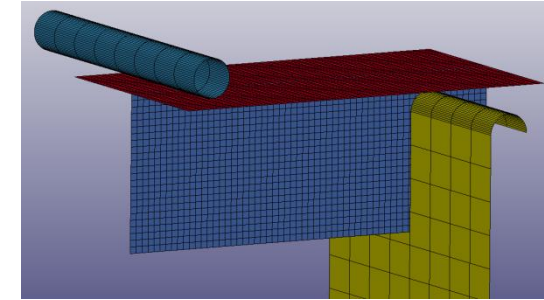
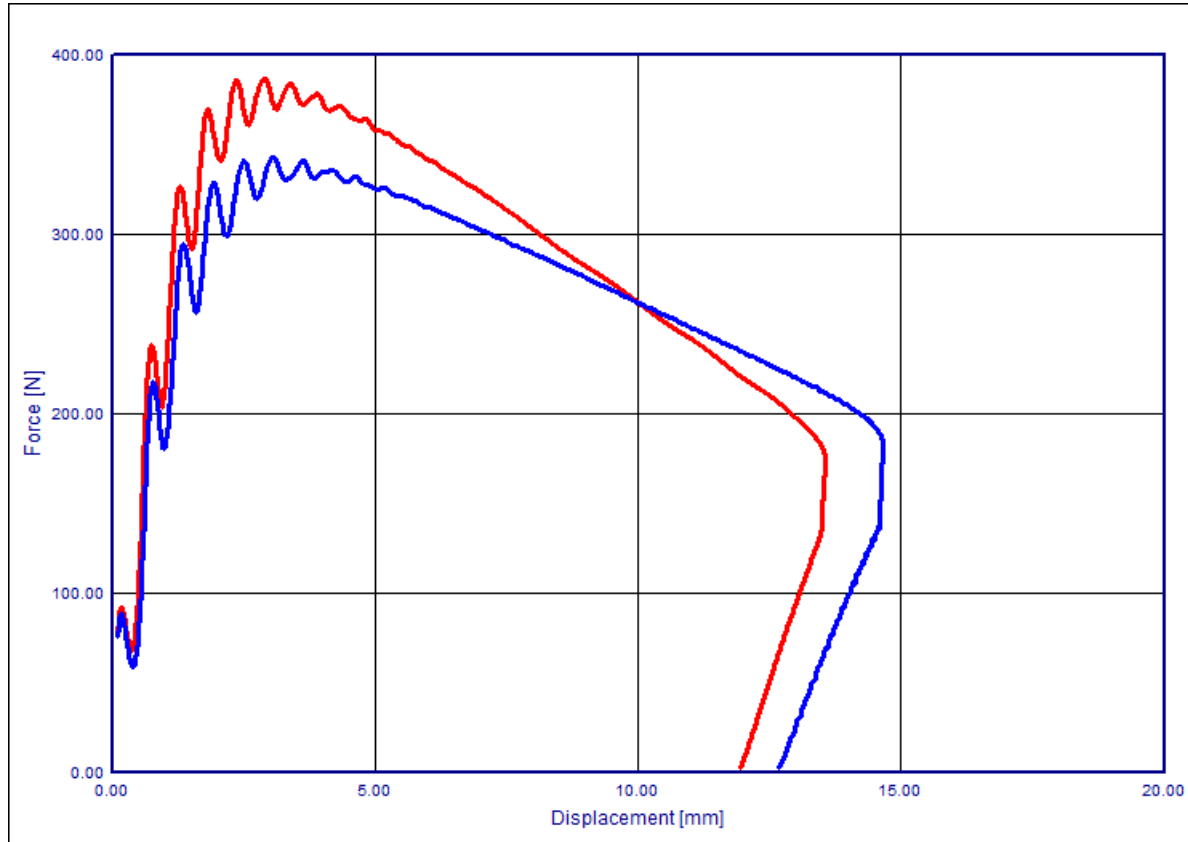
Elementgröße 1 mm



Thermoplaste

Einflussgrößen: Idealisierung

- Beispiel: 3-Punkt-Biegung T-Probe; 2.5 m/s; *MAT_24; Shell- vs. Solid-Elemente

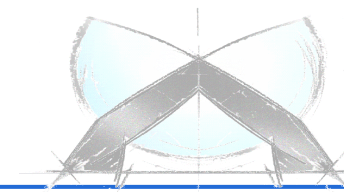


Hostacom

Elementgröße 0.5 mm

Solid-Elemente, Elementtyp 2

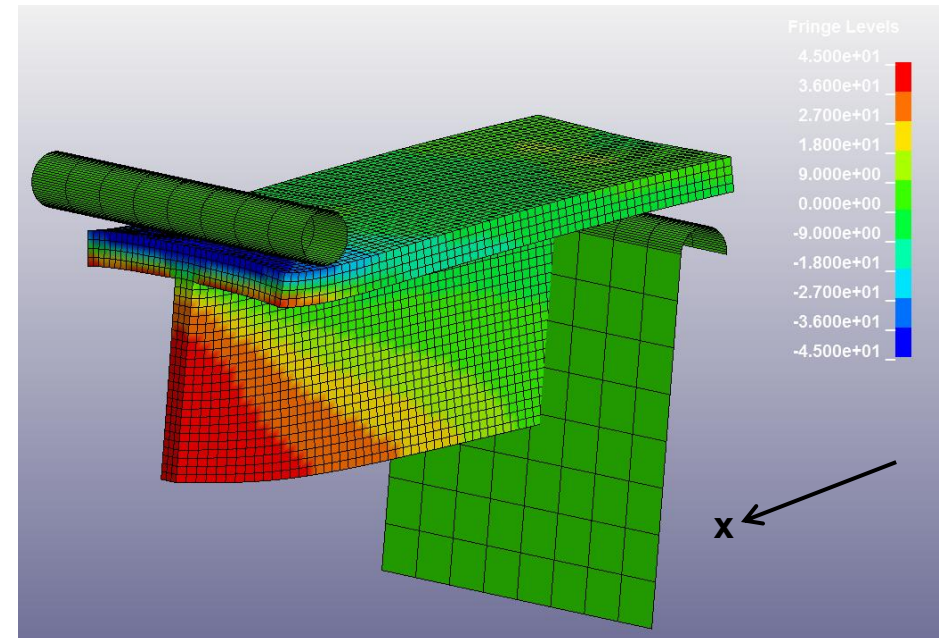
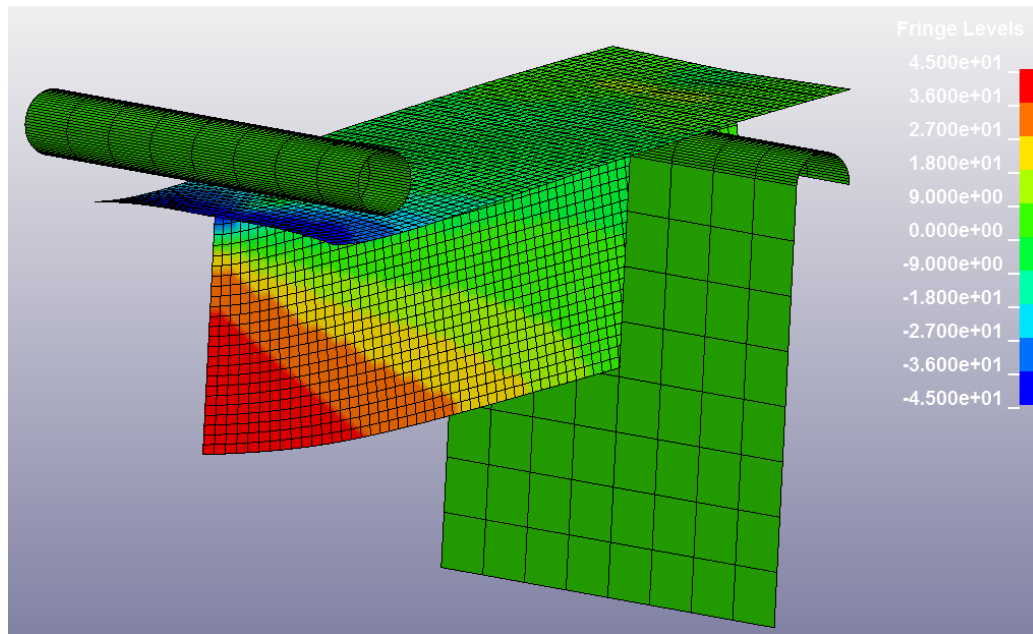
Shell-Elemente, Elementtyp 16



Thermoplaste

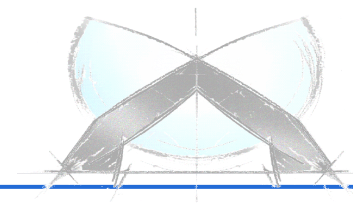
Einflussgrößen: Idealisierung

➤ Beispiel: 3-Punkt-Biegung T-Probe; 2.5 m/s; Vergleich Spannung in x-Richtung

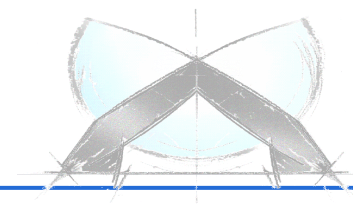


Hostacom

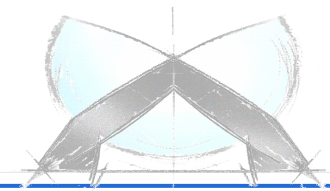
Elementgröße 0.5 mm
 Shell-Elemente (links)
 Solid-Elemente (rechts)



- Es ist wesentlich, dass die Idealisierung schon im Vorfeld abgeklärt wird !
- Die für die Materialkarte verwendeten Einstellungen (Solver, Elementgröße und -typ, Anzahl Integrationspunkte, Shell-Solid-Idealisierung, Control Einstellungen) müssen mit jenen für die Berechnungen der Bauteile übereinstimmen !
- Einfluss auf
 - Kraftniveau
 - Versagenszeitpunkt
 - Versagensverhalten (Dreiachsigkeit, Dehnratenabhängigkeit)



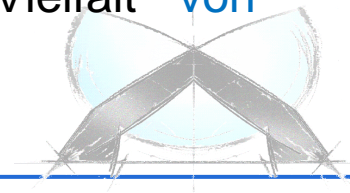
Vorführung



4a impetus

Zusammenfassung

- Mit **statischen und dynamischen Biegeversuchen** lassen sich **einfache Materialkarten** sinnvoll für die Simulationspraxis erstellen.
- Die **gespannte Biegung** bietet für die Materialcharakterisierung eine rasche Umsetzung, Materialien mit einer **Zug-/Druckabhängigkeit** zu charakterisieren.
- **Zusätzliche Versuche** (Zug-, Schub-, Druckversuche, ...) können in 4a impetus importiert und der Materialcharakterisierung und -modellierung zugeführt werden.
- Auf Basis dieser Daten können auch komplexere Materialkarten wie z.B. SAMP-1 erstellt werden.
- Erste Möglichkeiten der **Versagensabbildung** wurden **in 4a impetus implementiert**. Erweiterungen, insbesondere bessere Integration von **Versagens- und Schädigungsmodellen**, sind **geplant**.
- Die **Weiterentwicklungen in diesem Umfeld** werden aufgrund der Vielfalt von **Kundenwünschen geprägt** sein.



Einladung zu den Vorträgen

Dienstag, 7. Oktober

18:00 Uhr:

Nonlinear Viscoelastic Modeling for Foams

V. Effinger, A. Haufe (DYNAmore); P. Du Bois (Consultant); M. Feucht (Daimler AG); Prof. M. Bischoff (Universität Stuttgart)

Mittwoch, 8. Oktober

8:20 Uhr:

Kurz- und langfaserverstärkte Thermoplaste - Materialmodelle in LS-DYNA

S. Hartmann, T. Erhart, A. Haufe (DYNAmore); P. Reithofer, B. Jilka (4a engineering GmbH)

10:30 Uhr:

Experimentelle und numerische Untersuchung eines kurzglasfaserverstärkten Kunststoffes

R. Jennrich, M. Roth, Prof. S. Kolling (Technische Hochschule Mittelhessen);
C. Liebold (DYNAmore); G. Weber (Celanese GmbH)

13:30 Uhr:

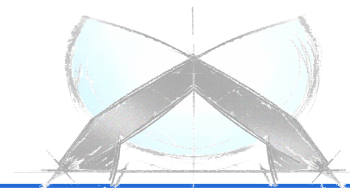
Versagen von Thermoplasten: Teil 1 - Charakterisierung, Versuche

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

13:50 Uhr:

Versagen von Thermoplasten: Teil 2 - Materialmodellierung und Simulation

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

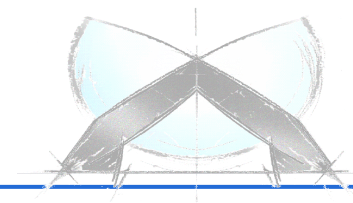
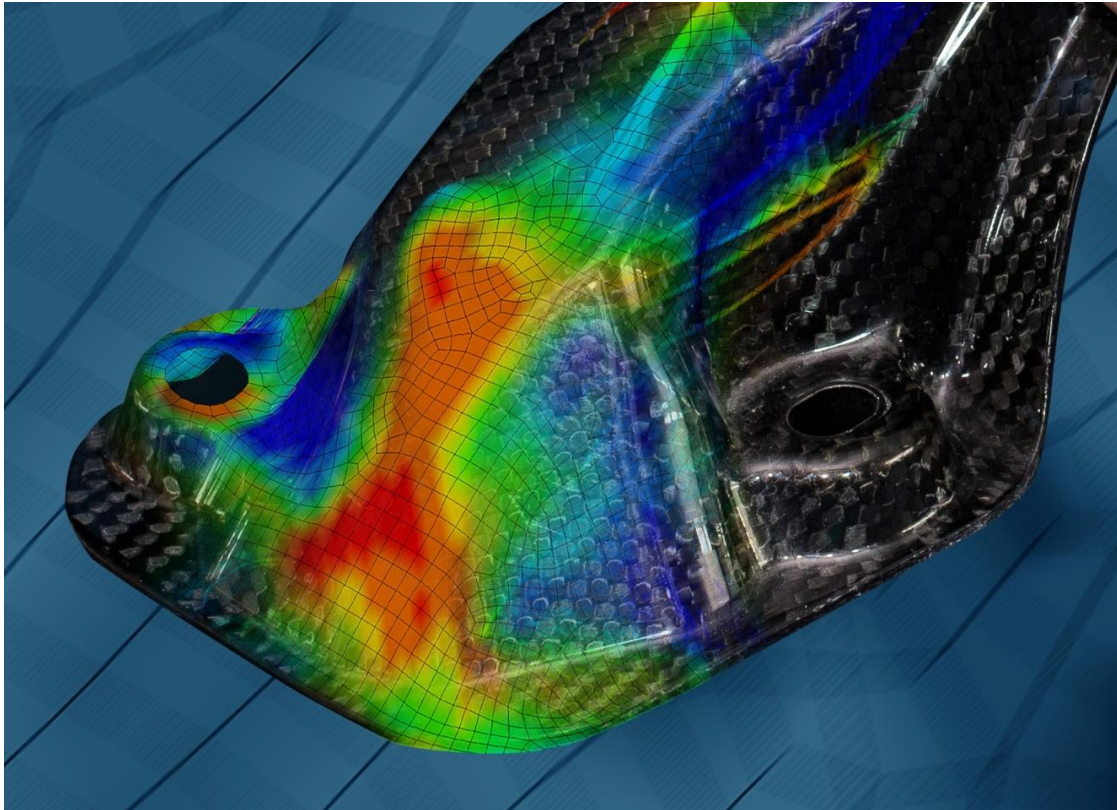


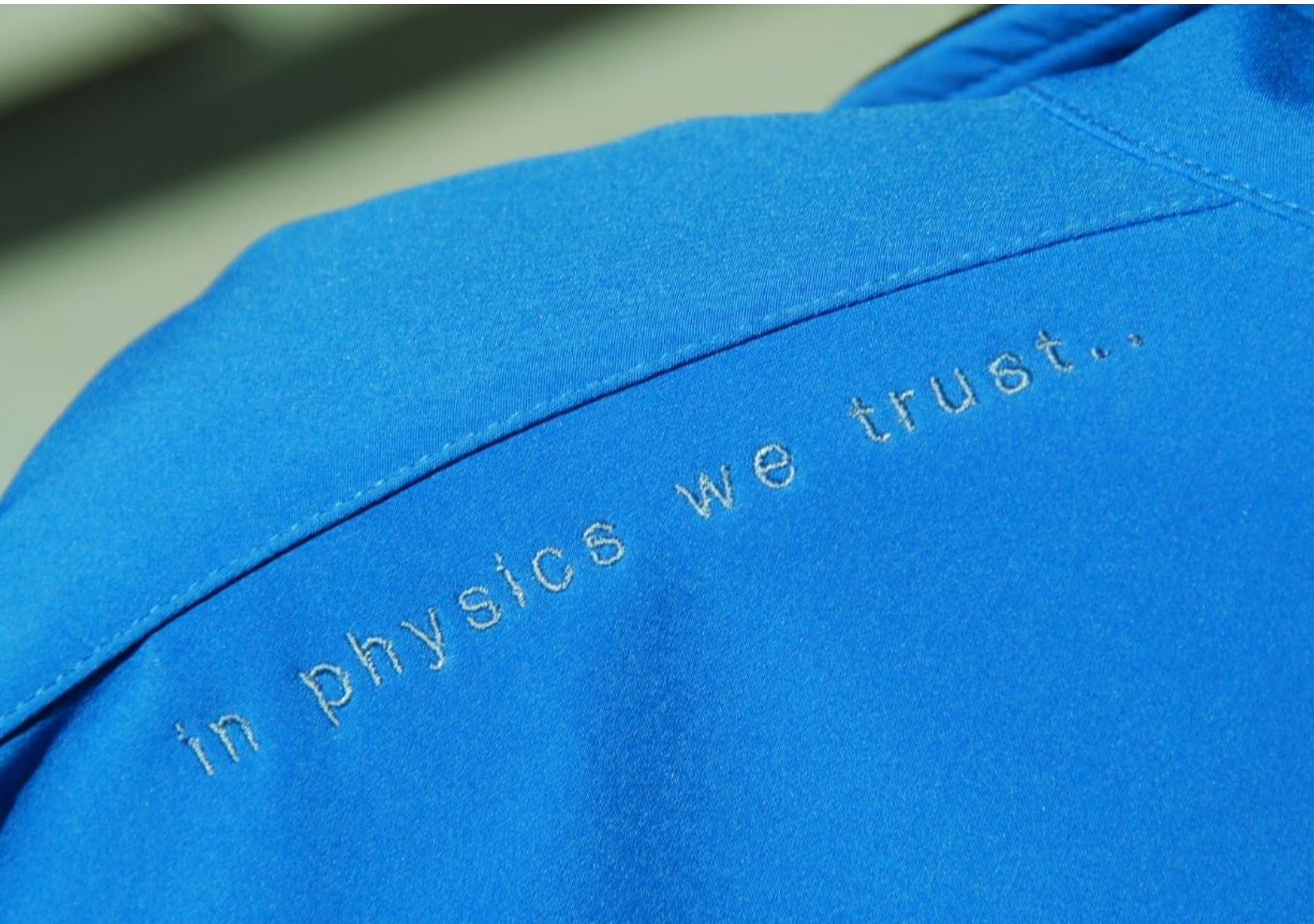
Veranstaltungshinweis

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

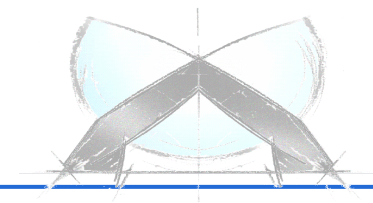
Das Thema heuer lautet „**Leichtbau und Composites**“.

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

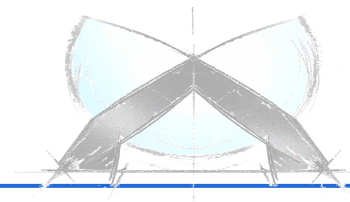




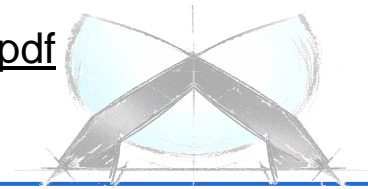
4a engineering GmbH
Industriepark 1
A-8772 Traboch
reithofer@4a.co.at
++43 (0) 664 80106 601



- [1] Werkstoffprüfung der Kunststoffe
R. W. Lang, Vorlesungsbehelf IWKP, Montanuniversität Leoben, 2002
- [2] Characterization of Dynamic Behavior of Engineering Polymers
Z. Major, M. Reiter, 4a –VDI Technologietag 2008
- [3] Material data for CAE simulation. The approach of Basell Polyolefins
M. Nutini, 4a –VDI Technologietag 2008
- [4] Mechanik der Kunststoffe
W. Retting, Hanser Verlag 1991
- [5] Charaktersierung und Modellierung unverstärkter thermoplastischer Kunststoffe zur numerischen Simulation von Crashvorgängen
M. Junginger, Fraunhofer EMI Bericht 15/02
- [6] Characterization of Polyolefines for Design Under Impact: from True Stress / Local Strain Measurements to the F.E. simulation with LS-DYNA Mat. Samp-1
M. Nutini, M. Vitali, 7th GERMAN LS-DYNA Forum, Bamberg 2008



- [7] 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>
- [8] 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)
11. LS-DYNA Forum 2012, Ulm
<http://www.dynamore.de/de/download/papers/ls-dyna-forum-2012/documents/materials-2-1>
- [9] 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
- [10] Mechanical Characterization of Talc Particle Filled Thermoplastics
Frank Kunkel, Florian Becker, Stefan Kolling, Europäisches Dynaforum 2011, Straßburg
<http://www.dynamore.de/de/download/papers/konferenz11/papers/session20-paper3.pdf>



[11] Materialmodelle für Kunststoffe, komplexe Fließflächen und Versagen

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

4a Technologietag 2014

http://technologietag.4a.co.at/images/tt2014/s2v1_Reithofer.pdf

