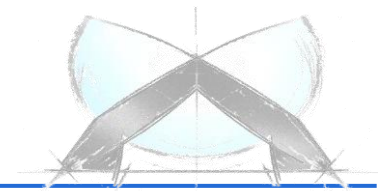
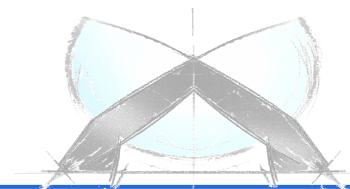


Workshop „Plastics“, Bamberg  
6.10.2014

**DYNA**more 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



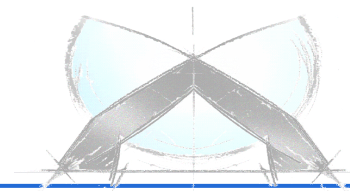
# Eigenschaften von Kunststoffen

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

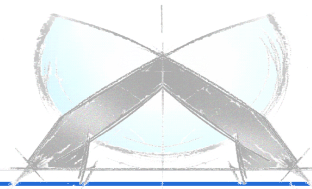
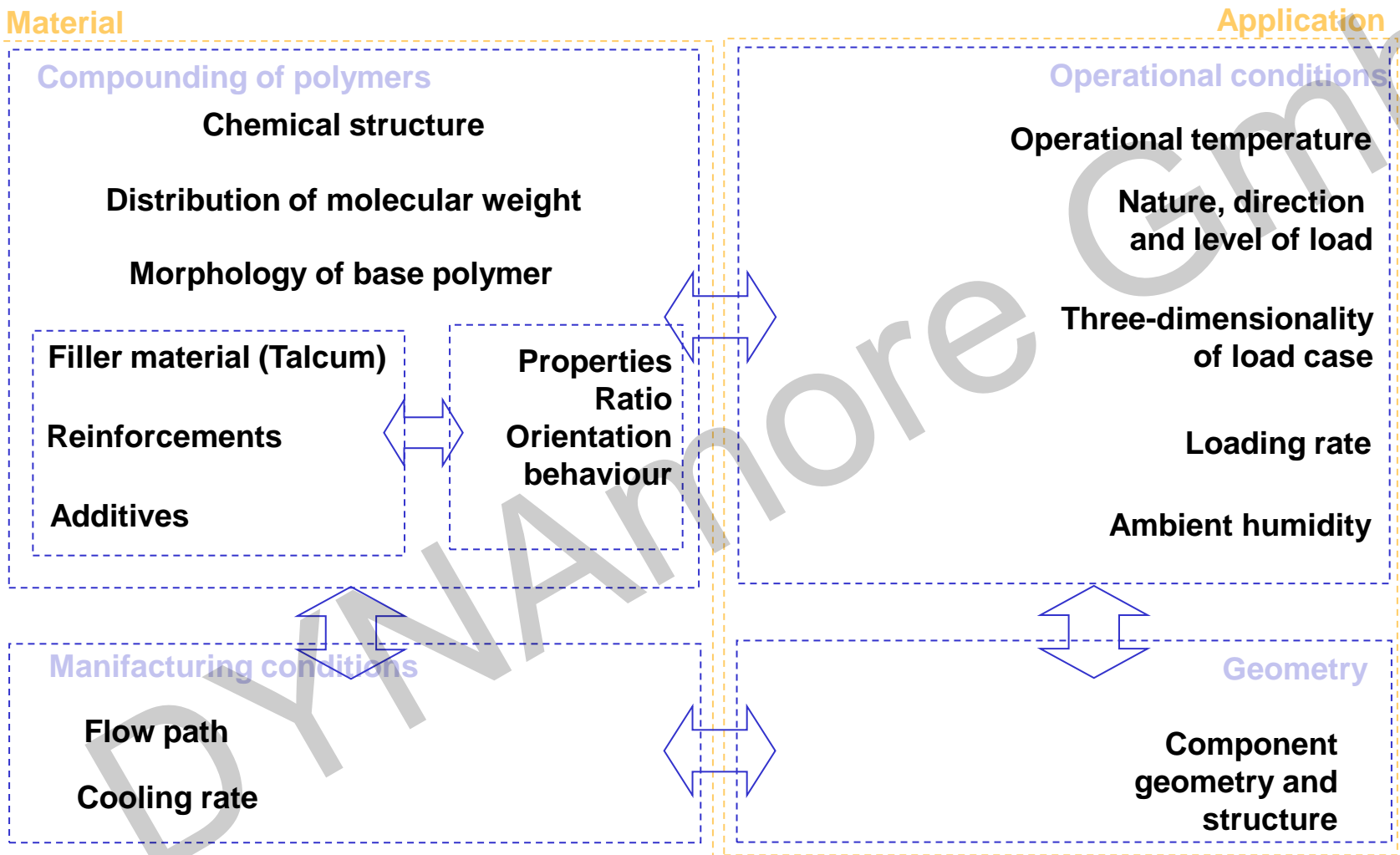


Modellierung von Kunststoffen, Bamberg  
6. Oktober 2014

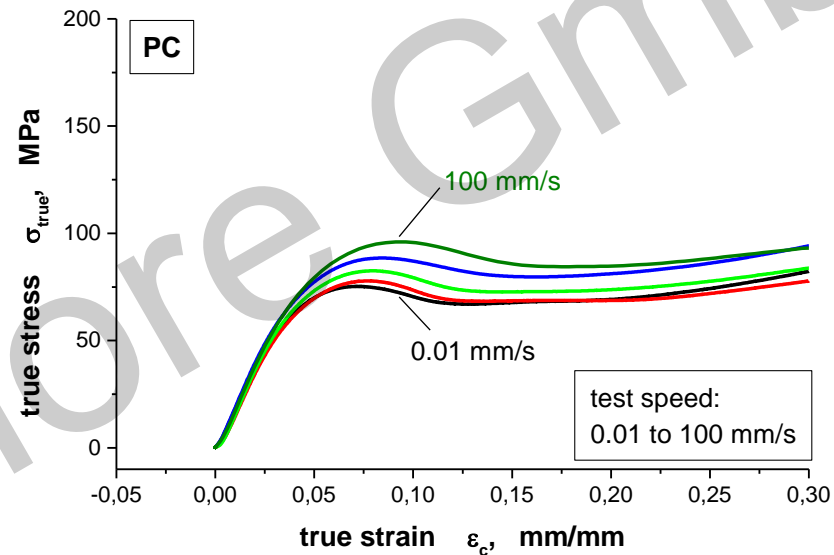
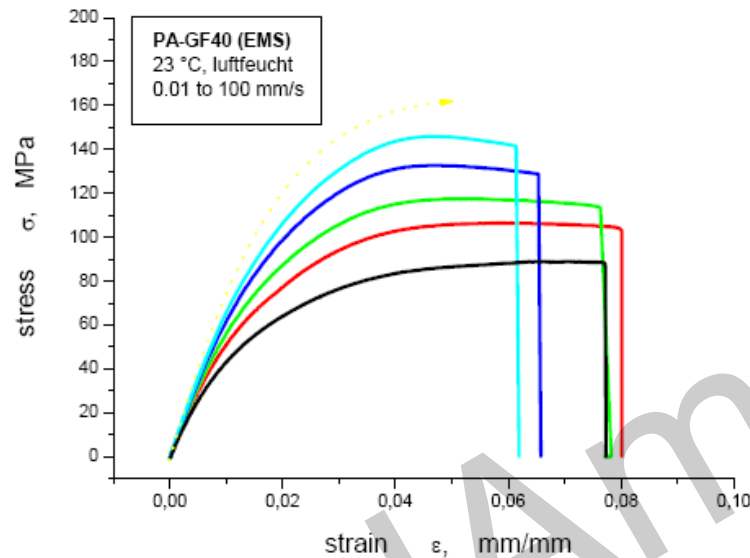
**DYNAmore GmbH**  
Industriestraße 2  
70565 Stuttgart  
<http://www.dynamore.de>



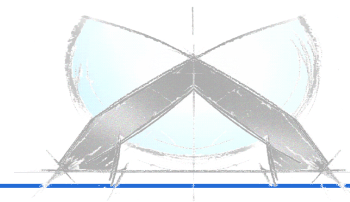
Influence parameters for material behaviour of plastics:



## ➤ Rate dependency (test speed)

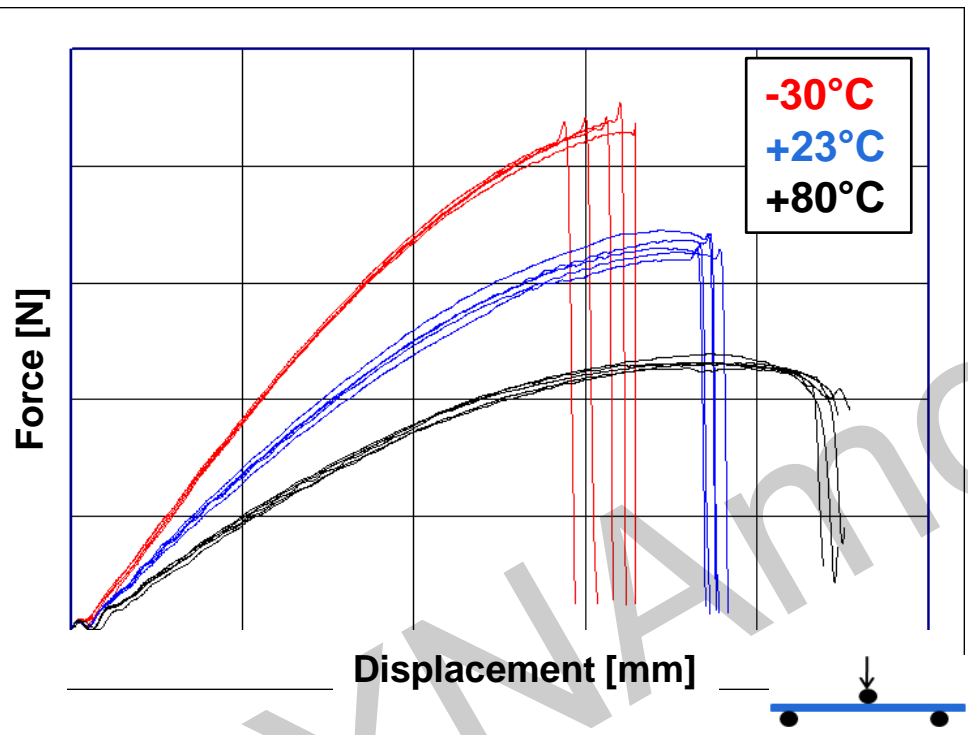


- Rate dependency differs from material to material
- Examples for different materials [1], [2], [3]

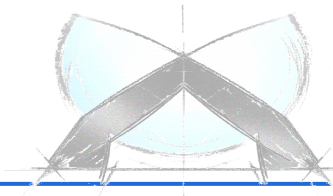
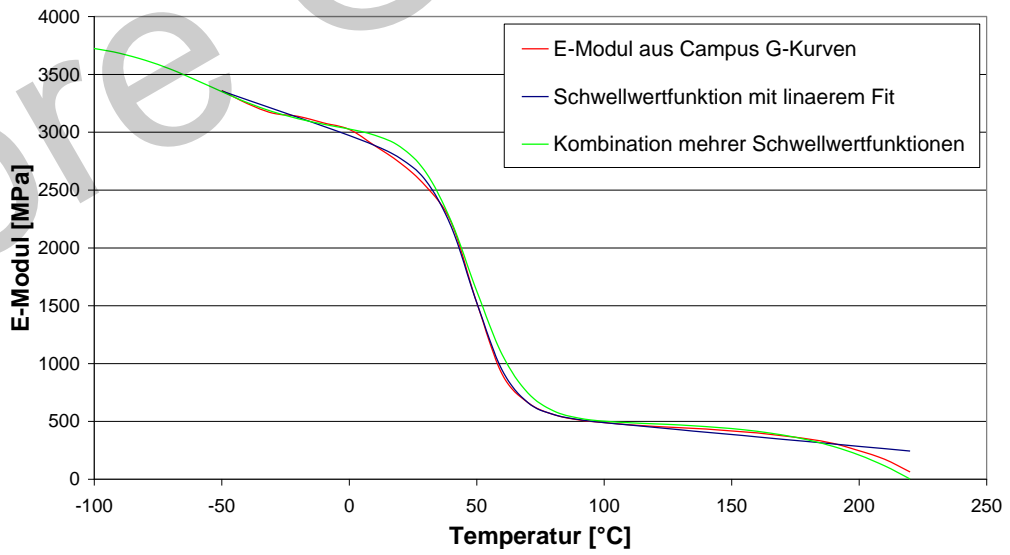


## ➤ Temperature effects

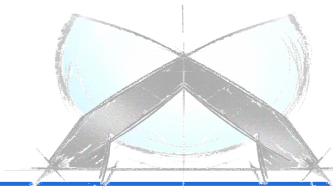
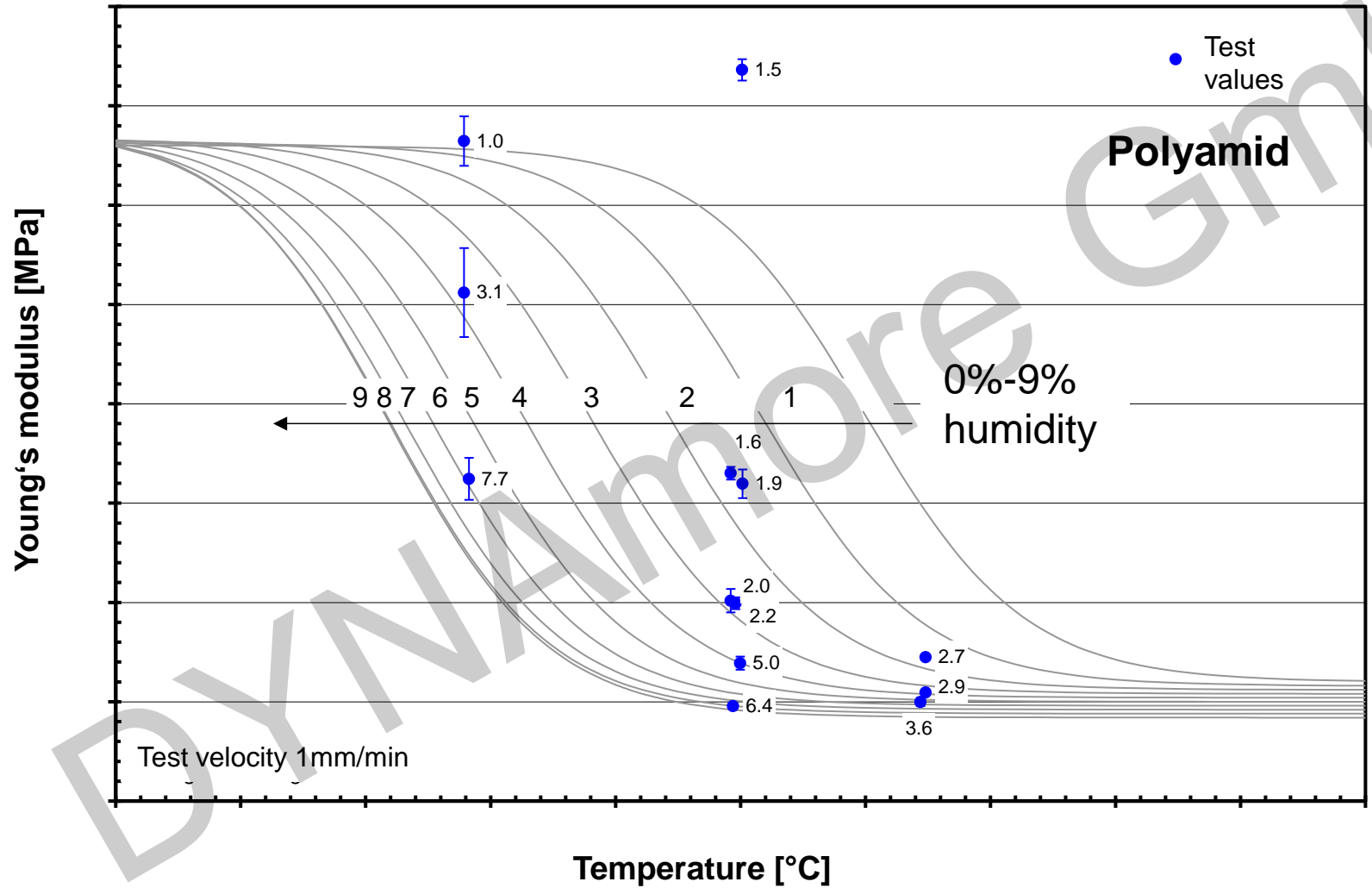
PP GF40



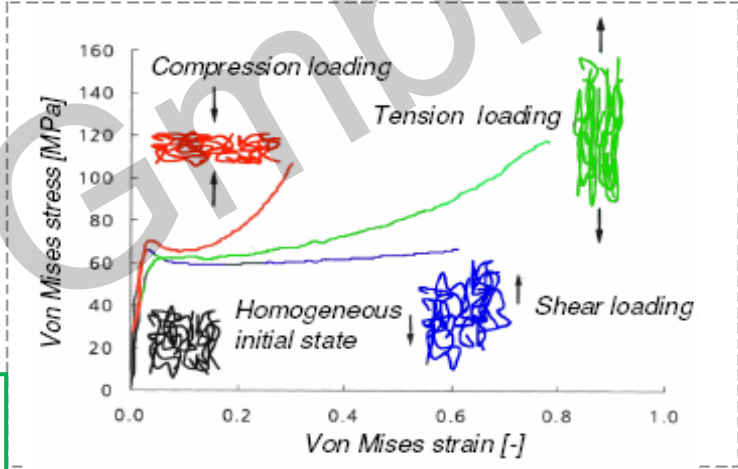
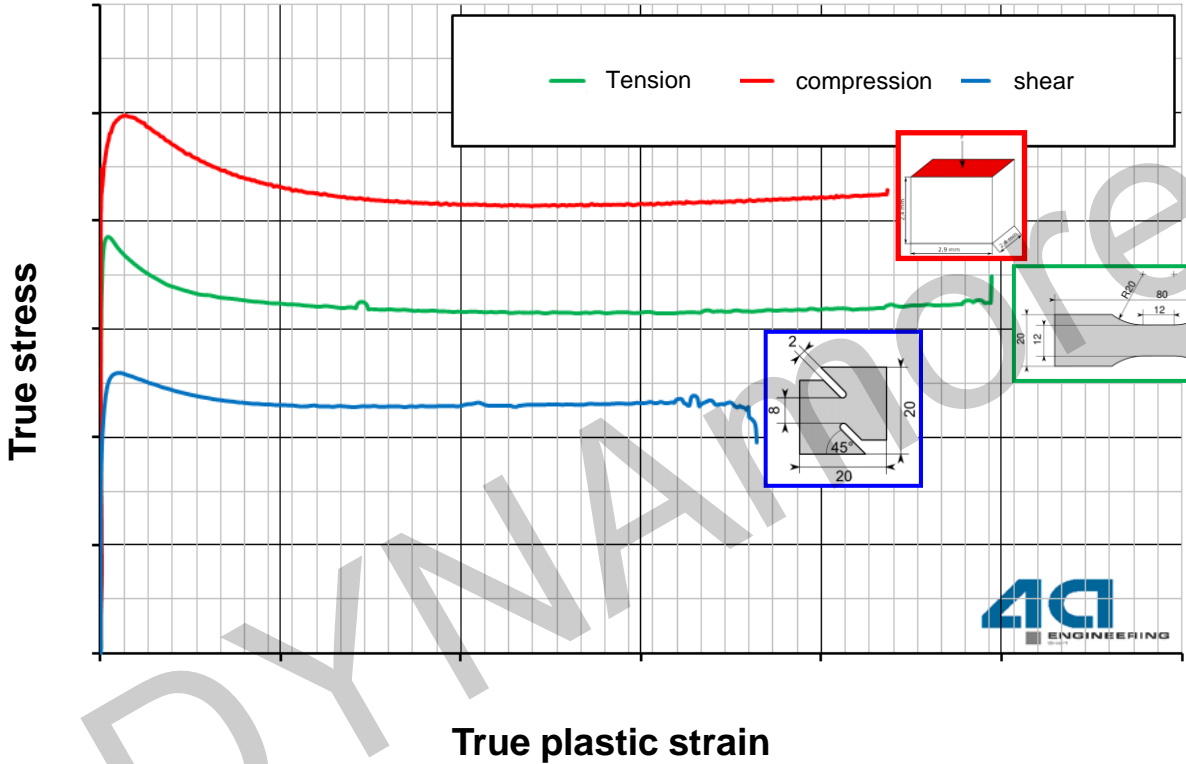
### Young's modulus of PA



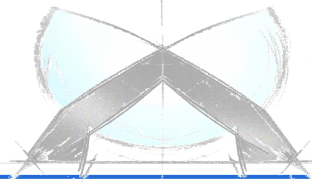
## ➤ Humidity effects



## ➤ Load type dependency



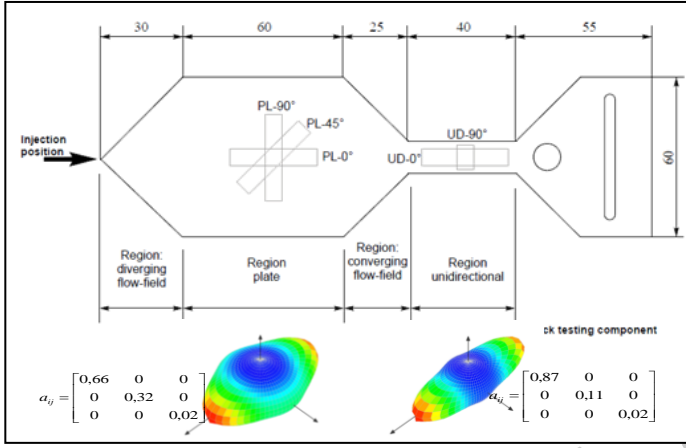
Many plastics show a strong load type dependency (tension / compression / shear). [4] [5] [6]



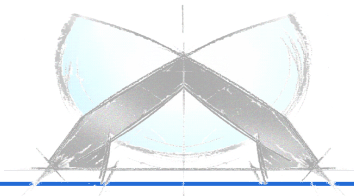
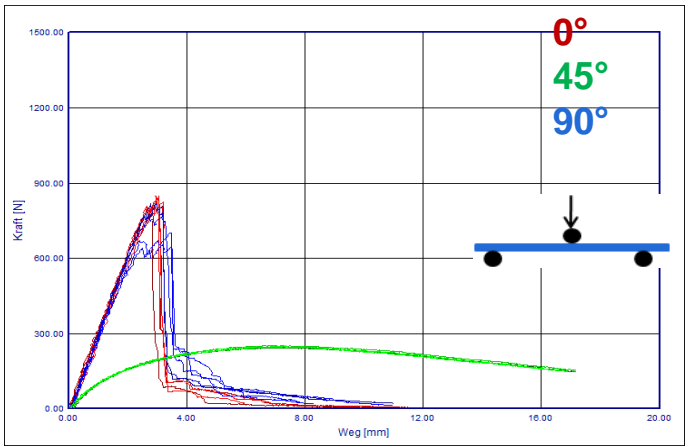
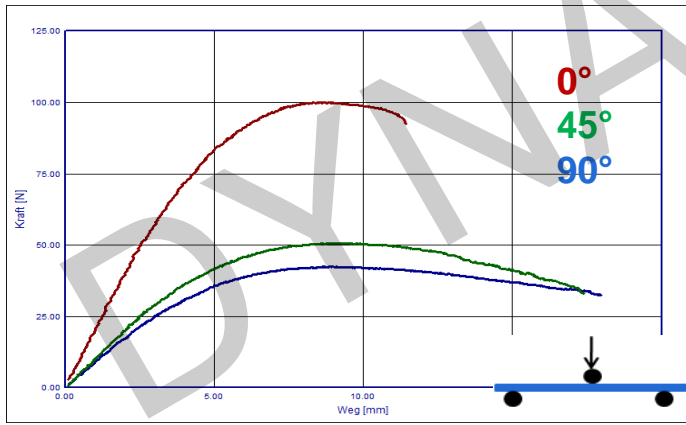
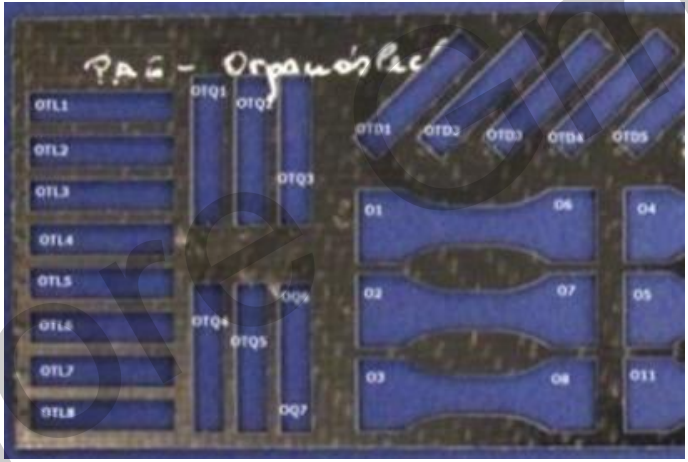


- Anisotropy due to fibre reinforcement
- Process chain (injection moulding, joint lines)

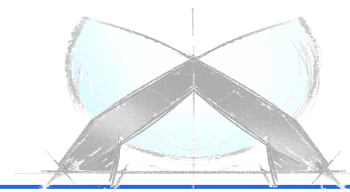
## Short fibre thermoplastics [7]



## Composite – “Organoblech” [8]

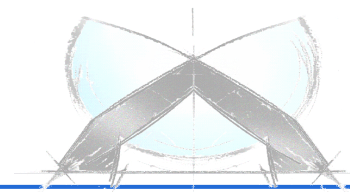


- Influence parameters
  - rate dependency (test speed)
  - temperature effects
  - humidity effects
  - load type dependency
  - anisotropy due to fibre reinforcement
  - process chain (injection moulding, joint lines)
- Further influence parameters
  - aging
  - radiation (UV) effects



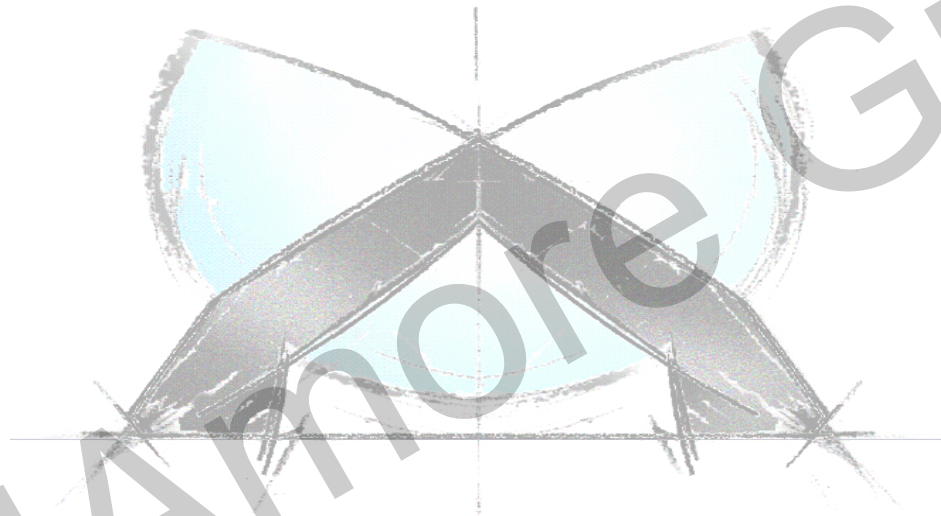
- Due to influences
  - Specimen conditioning before testing
  - Micromechanical modeling
- State of the art: Influence parameters are neglected for crash simulation but not during testing

DYNAmore GmbH



# Kurzvorstellung des Prüfsystems 4a impetus

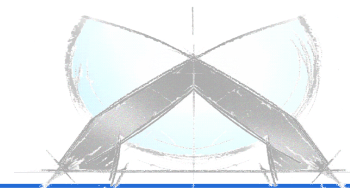
P. Reithofer, M. Rollant, A. Fertschej (4a engineering GmbH)

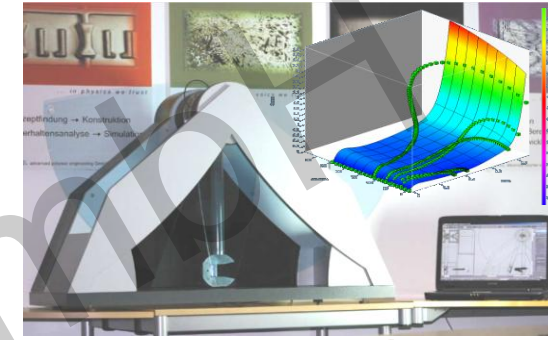


Modellierung von Kunststoffen, Bamberg

6. Oktober 2014

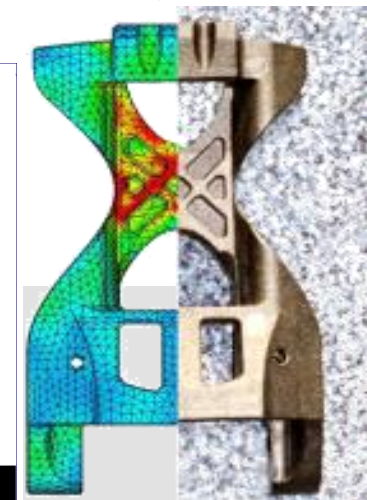
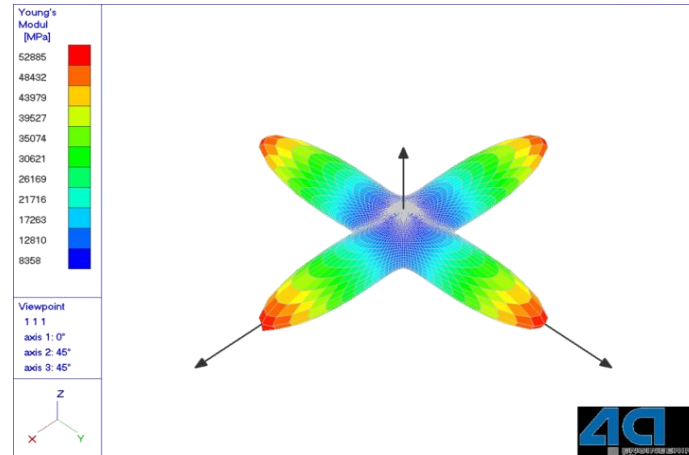
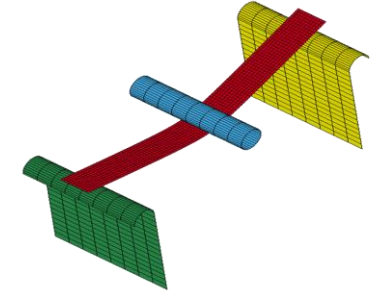
4a engineering GmbH  
Industriepark 1  
A-8772 Traboch  
reithofer@4a.co.at  
++43 (0) 664 80106 601



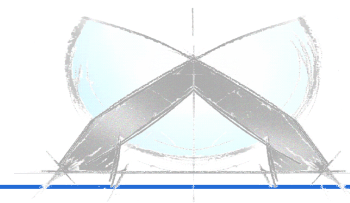


.. in physics  
we trust

- 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

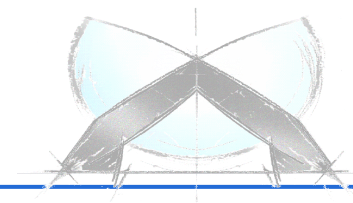


- Einleitung
- Prüfmöglichkeiten
- Beispielmessergebnisse
- Vorführung dynamischer Biegeversuche  
(unverstärkter, kurzfaserverstärkter Kunststoff, Alu,  
Stahl, Holz, Composite, ...)



# Einleitung

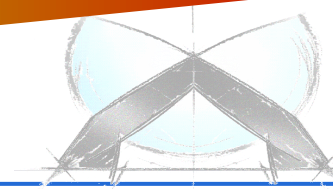
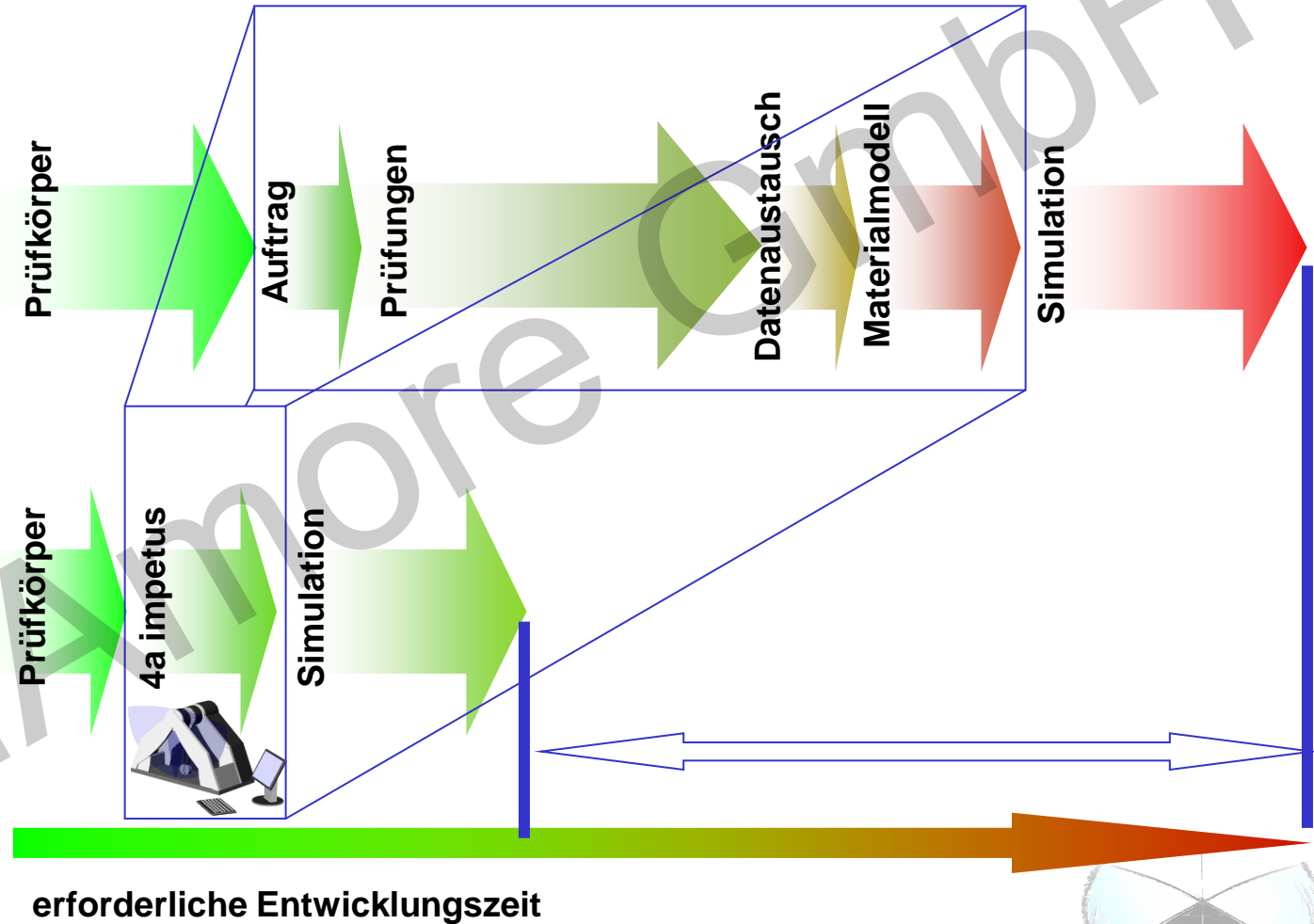
DYNAMORE GmbH



# 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

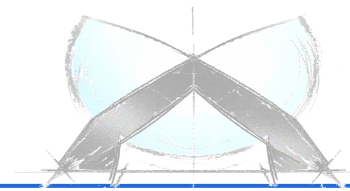
### ➤ Sensoren

Temperatur- und Feuchtesensor

Tauschbare Beschleunigungssensoren

Winkelsensoren

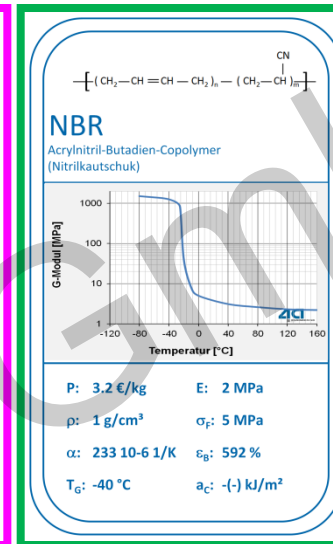
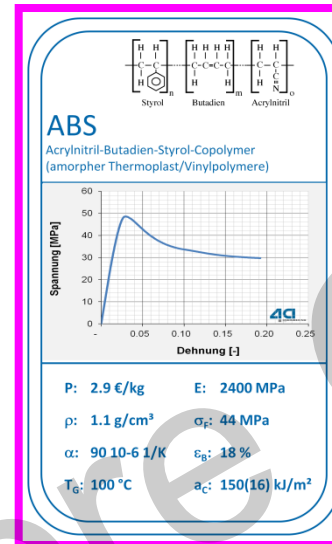
zur Bestimmung von Anfangsgeschwindigkeit und Nullpunkt



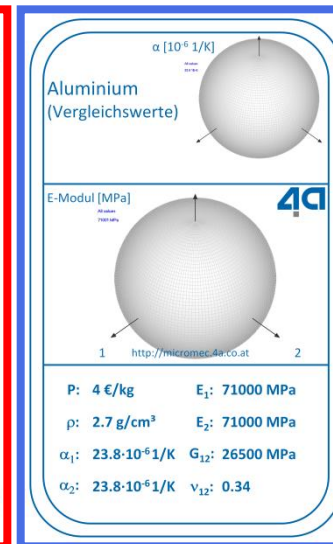
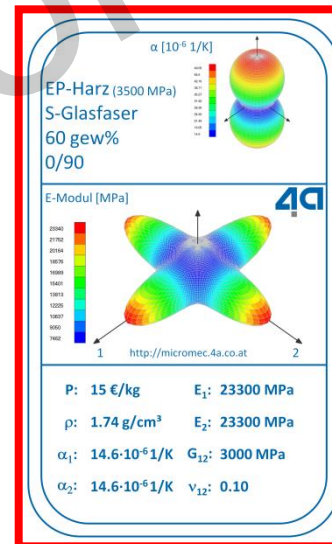
# Einleitung

## Geprüfte Materialien

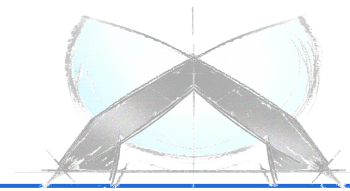
- **Thermoplaste** (ASA, ABS+PA; ABS+PC; PA6; PA6(6) GF30..50; PA66+P6; PBT GF30; PC; PE; PP; PP+Lack; PP/EPDM; PP GF20..40; PP Impakt modifiziert; PP MX10; PP MX20; PP MX40; PP CF; PP+EPDM; MuCell-Materialien, ...)
- **Schäume** (EPP30..80; PU RG 55, PU RG 65)
- **Elastomere** (EPDM, SILIKON)
- **Duroplaste**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



aus:  
4a Quartett  
Kartenspiel  
"Kunststoffe"

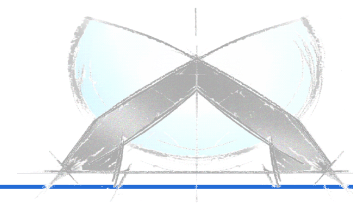


aus:  
4a Quartett  
Kartenspiel  
"Composites"



# Prüfmöglichkeiten

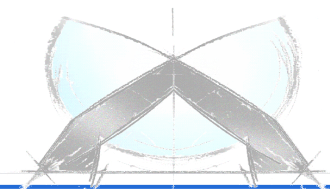
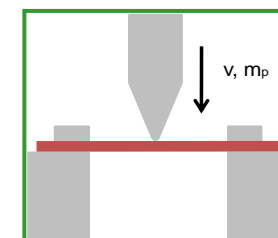
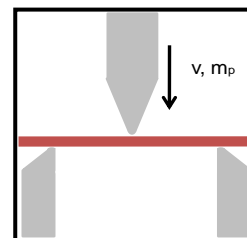
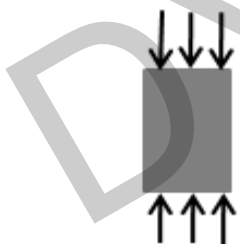
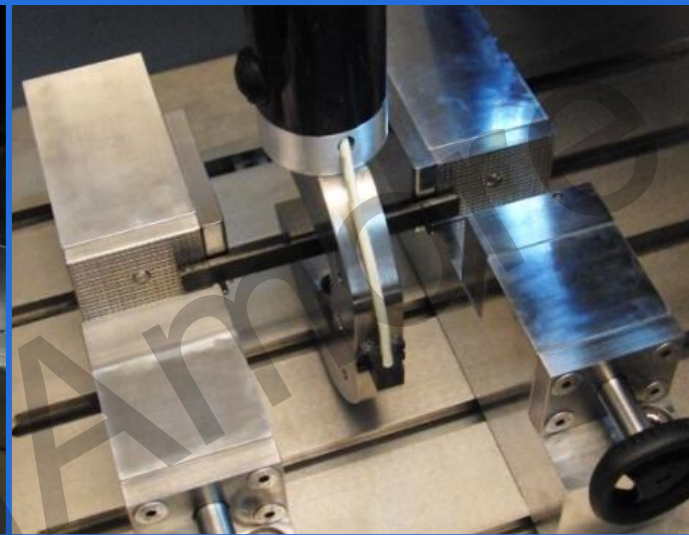
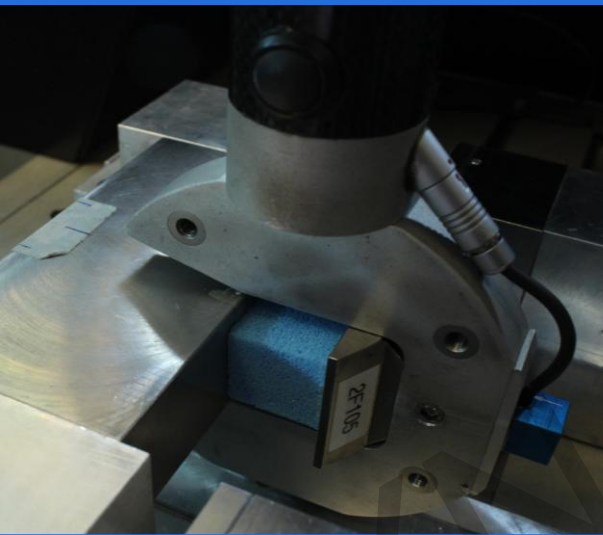
DYNAMOIDS GmbH



# Prüfmöglichkeiten

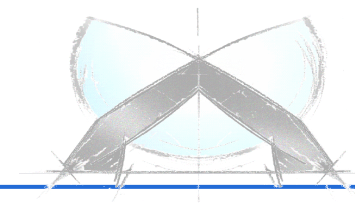
## Testmöglichkeiten - Materialcharakterisierung

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





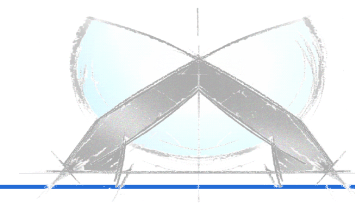
4Q ENGINEERING GmbH



Stage 0



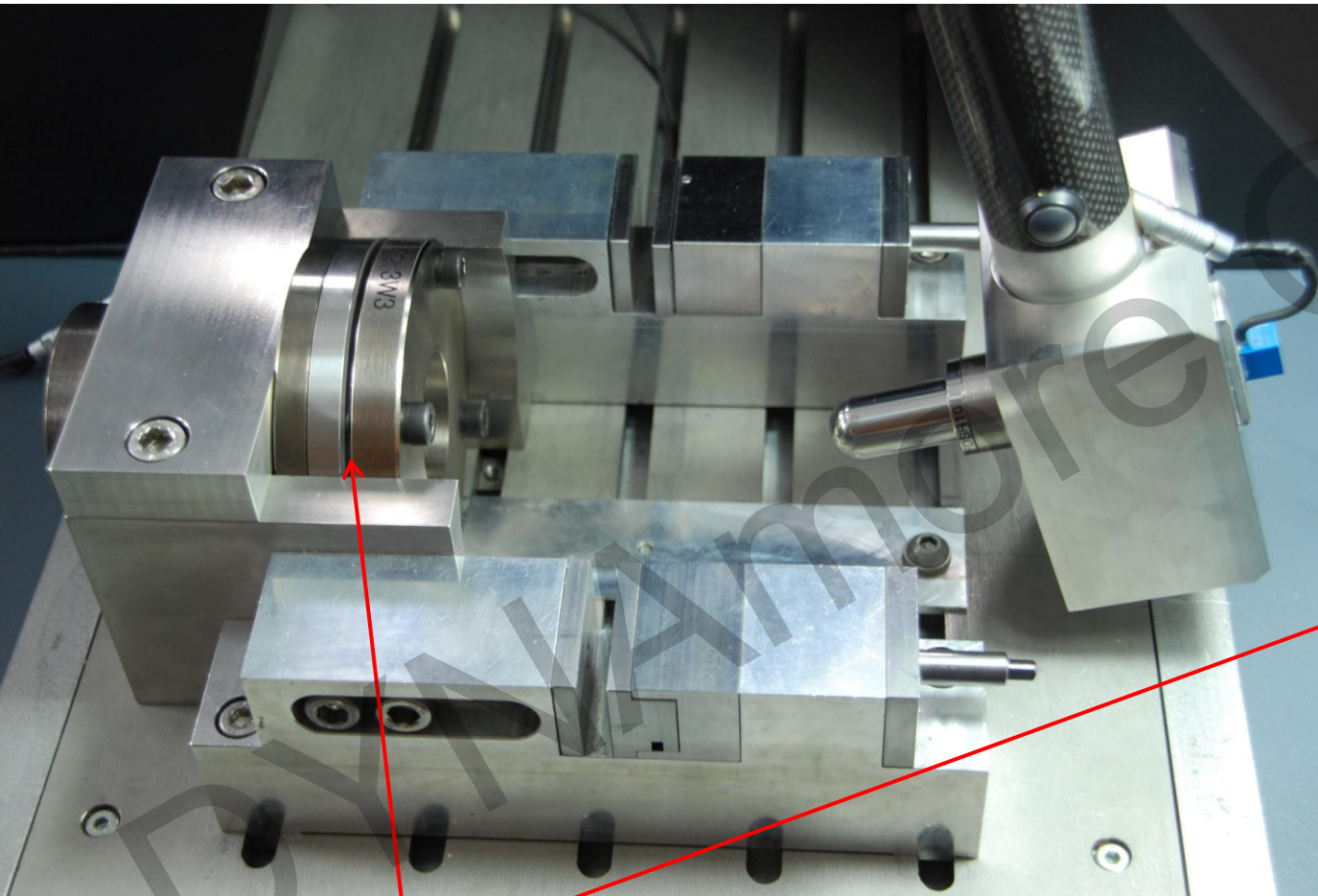
mbH



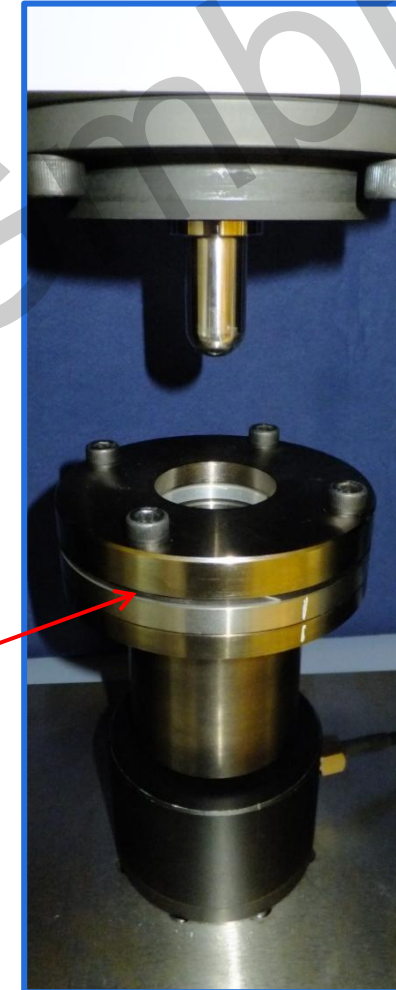
# Prüfmöglichkeiten

neue Prüfmöglichkeit dynamischer Durchstoßversuch

- Durchstoßversuch für mehrachsige Belastung / mehrachsige Versagensabbildung



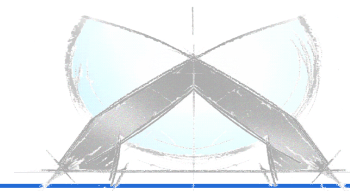
Einspannung Platte



# Prüfmöglichkeiten

## Temperiermagazin für temperierte Prüfungen

- Ein komplettes Versuchs-Setup kann innerhalb von weniger als 2 Minuten durchgeführt werden, was einem Temperaturunterschied von ca.  $0.6^{\circ}\text{C}$  zwischen erster und letzter Probe im Versuchs-Setup entspricht.

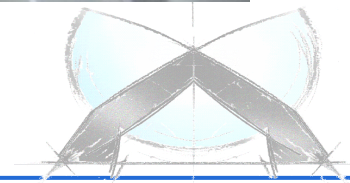
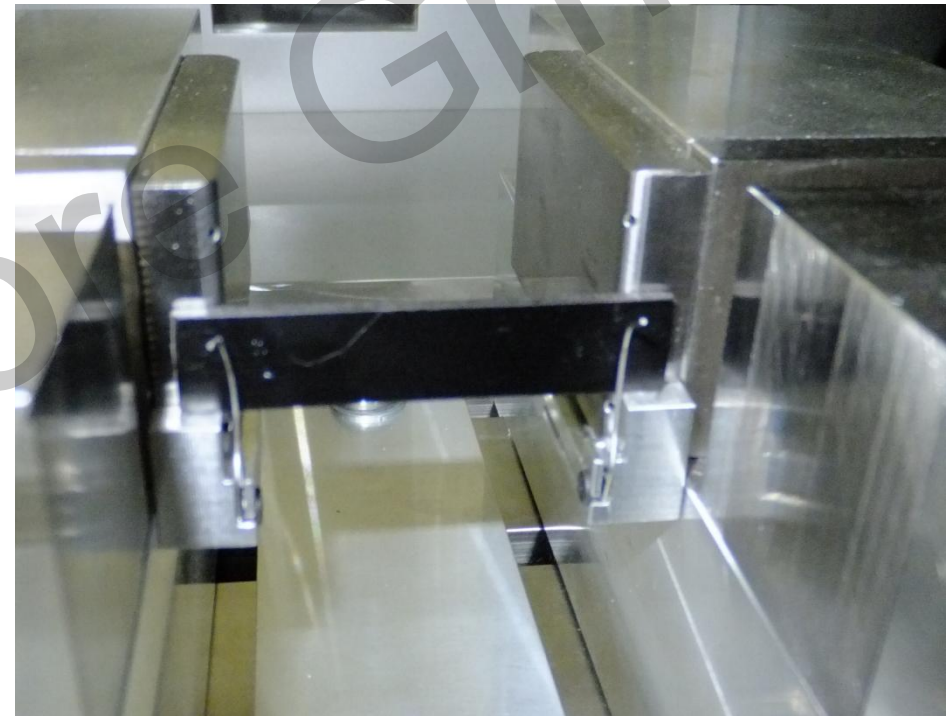
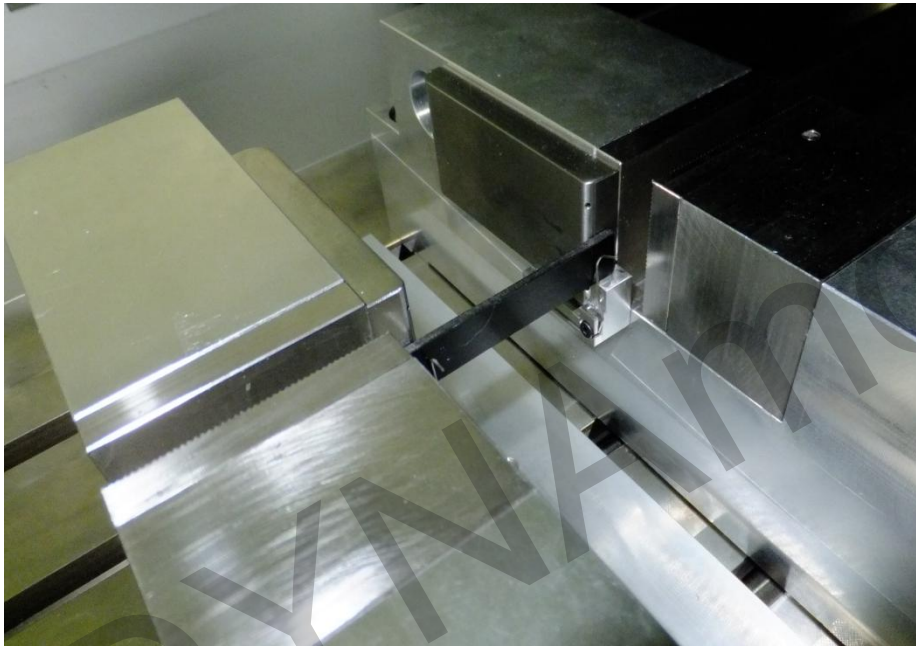




# Prüfmöglichkeiten

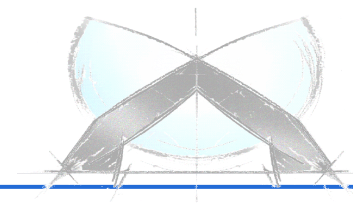
## Probenfixierungshilfe für dynamische Biegeprüfung

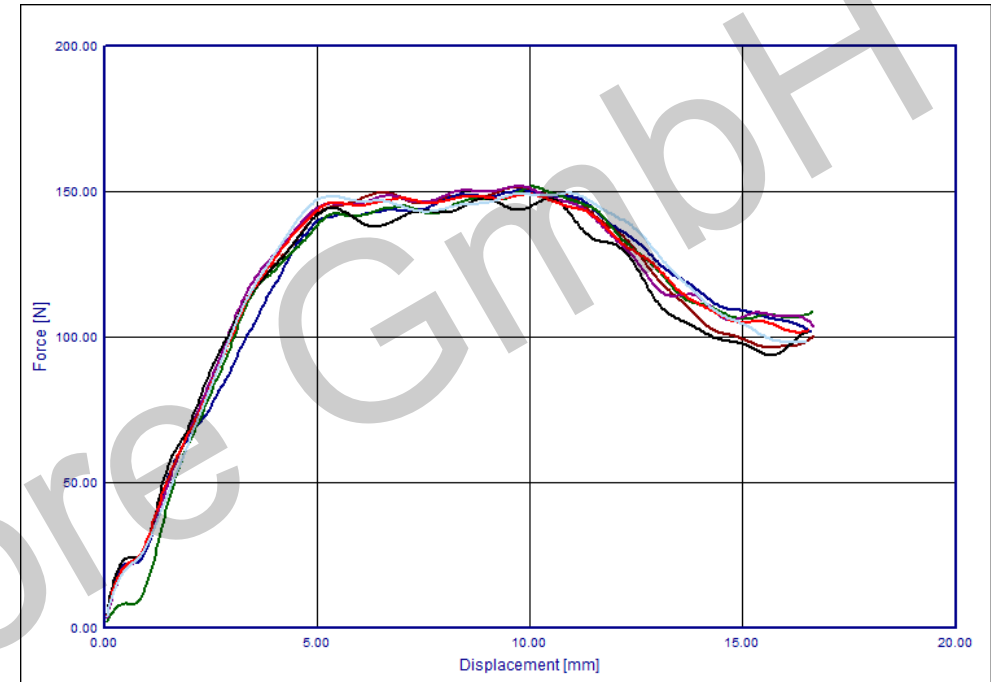
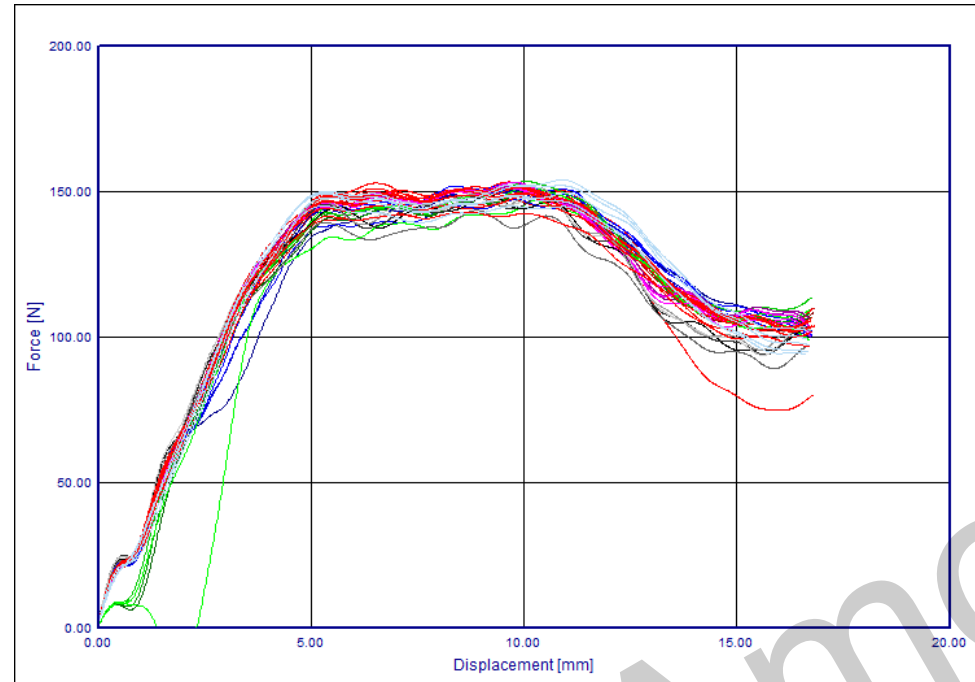
- Magnetische Positionierhilfe mit Federn zur Probenjustierung an die Auflager ermöglicht rasches Einlegen der Proben
- Durch die Feder wird die Probe definiert gegen das Widerlager gedrückt.



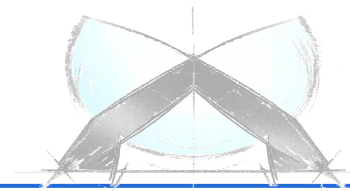
# Beispielsergebnisse

DYNAMORE GmbH



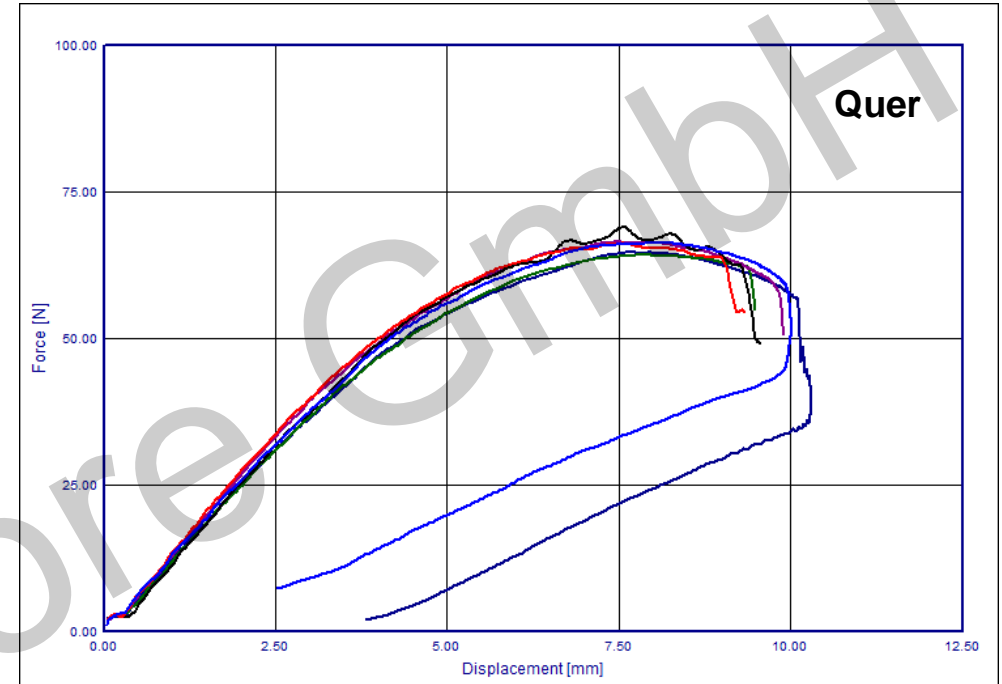
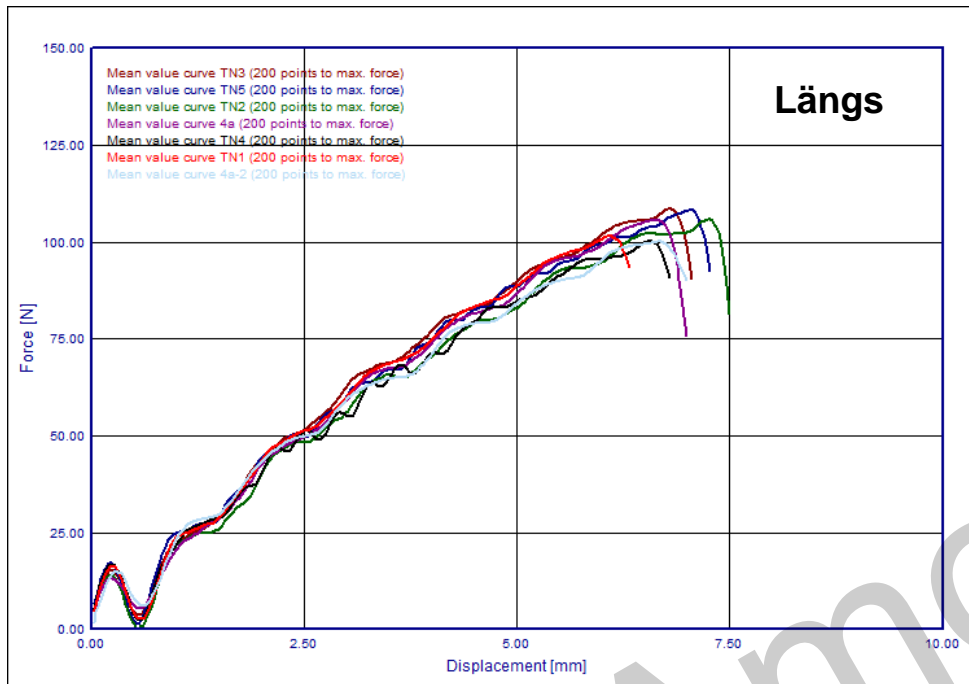


- Im Rahmen eines Ringversuches wurden einige Materialien auf mehreren 4a impetus Prüfsystemen getestet.
- Die Biegeprüfungen des Materials PCABS (Dicke 3 mm) zeigen auf allen Prüfsystemen eine gute Übereinstimmung.

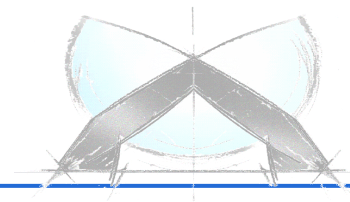


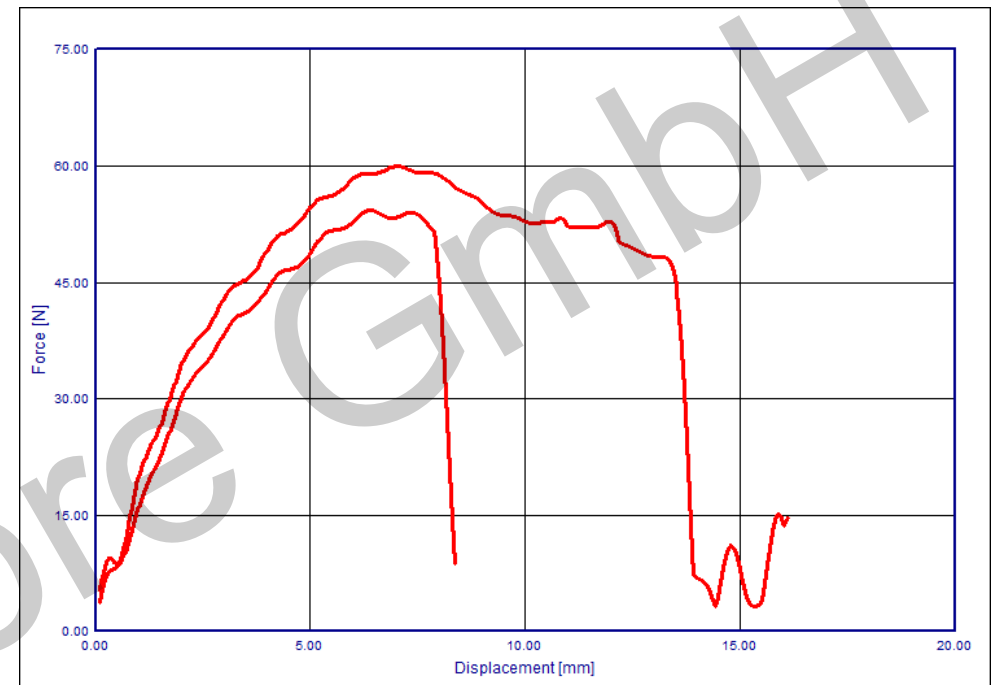
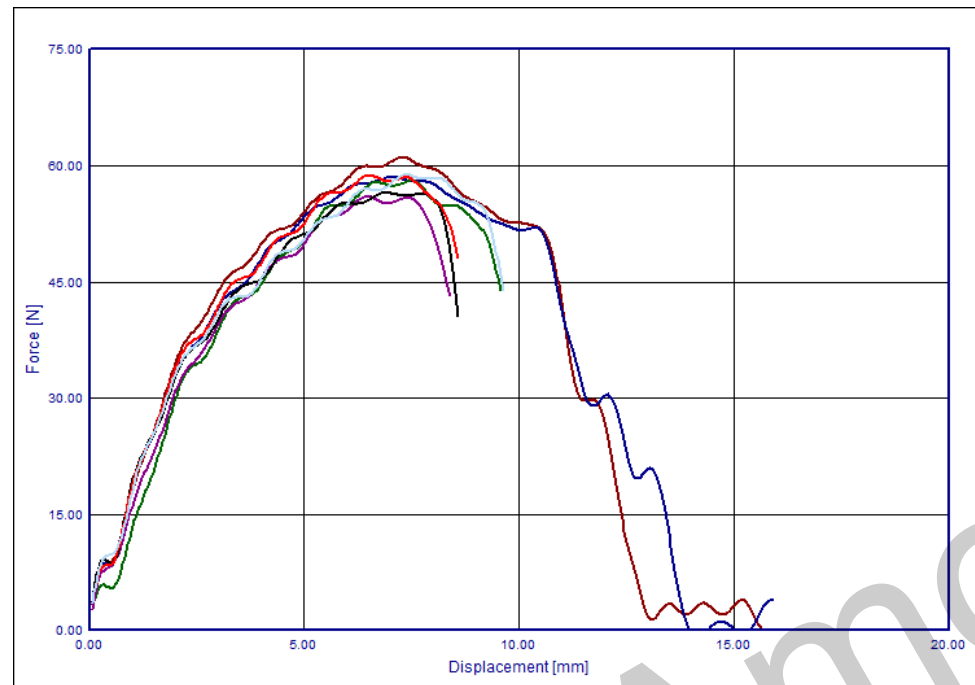
# Beispielsergebnisse

## PPGF30 längs/quer

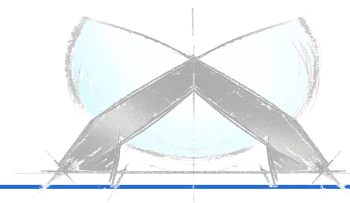


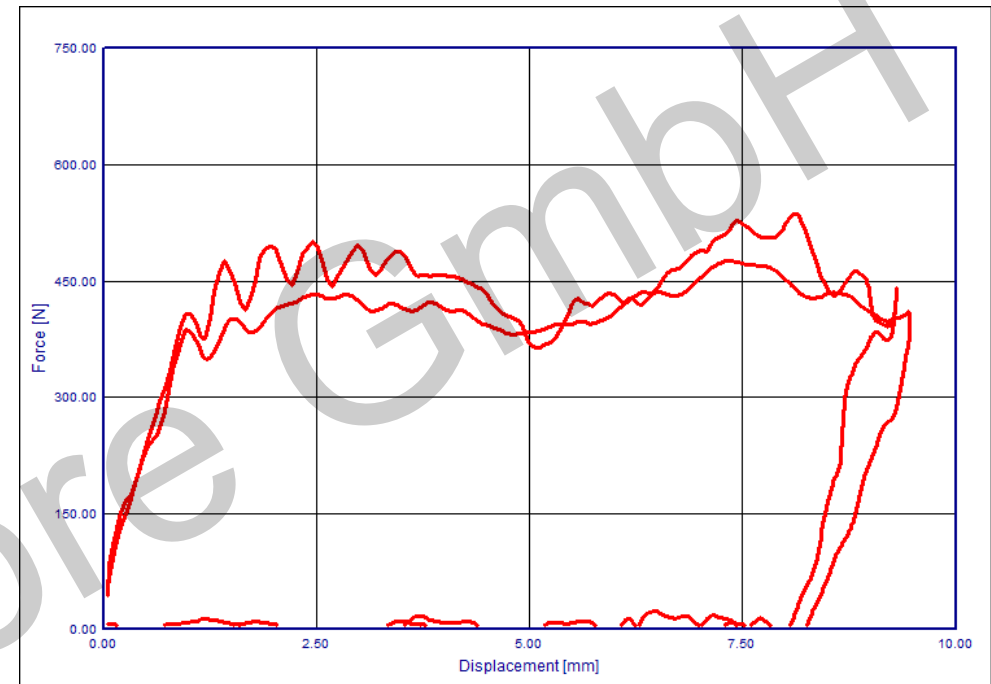
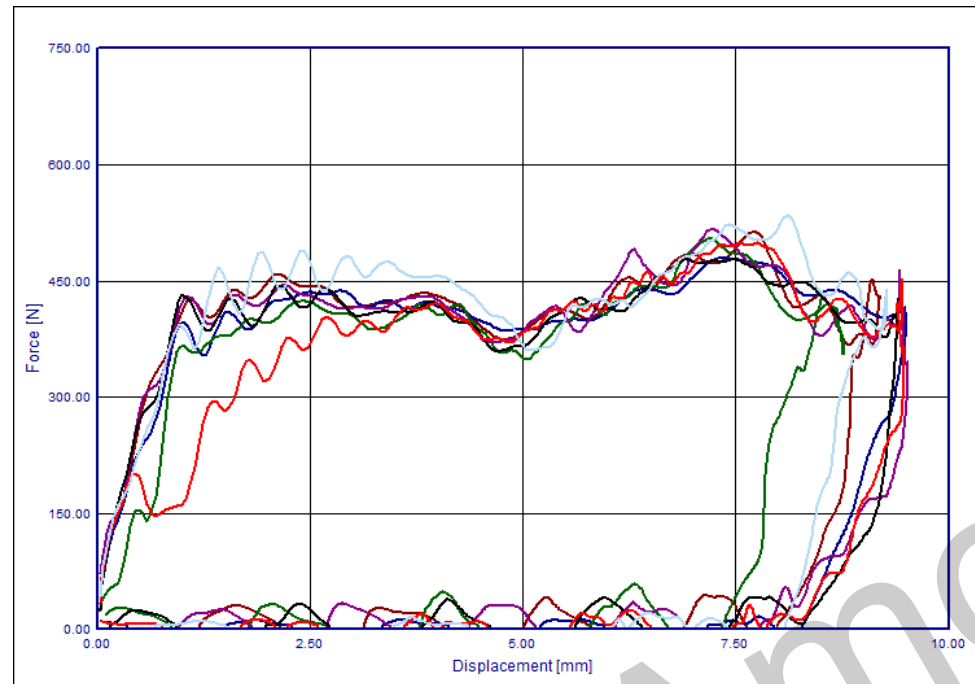
- Die Mittelwertkurven des Materials PPGF30 in Längs- und Querrichtung zeigen ebenfalls auf allen Prüfsystemen eine gute Reproduzier- und Vergleichbarkeit.



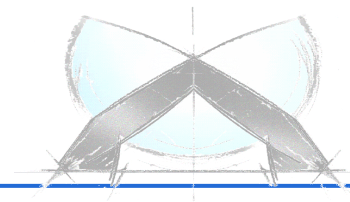


- In Hinblick auf das Versagen wurde ein verstärktes Material auf allen Prüfsystemen geprüft und zeigte wiederum eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Versuche.
- Die Streubreite des Versagens ist im rechten Diagramm mit den beiden Extrema visualisiert.



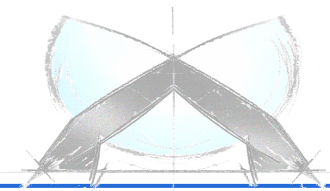


- Für eine Aluminiumlegierung sind hohe Kräfte und Beschleunigungen zu erwarten. Es konnte auf allen Systemen ein vergleichbares Ergebnis erzielt werden.
- Die Streubreite der Versuche ist wieder im rechten Diagramm mit den beiden Extrema visualisiert.



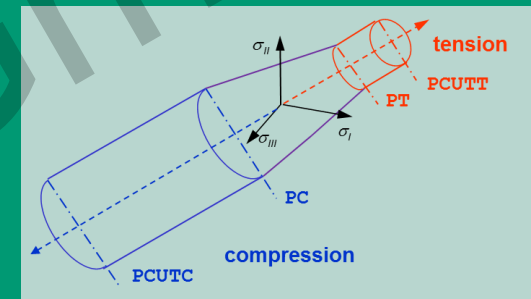
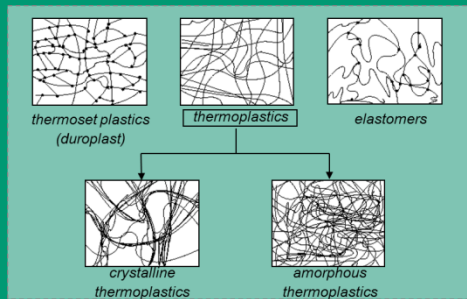


# Vorführung



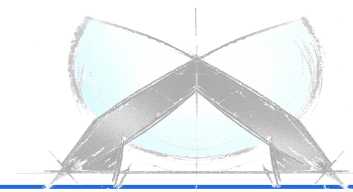
# Material models for plastics

V. Effinger (DYNAmore GmbH)



Workshop „Plastics“, Bamberg  
6.10.2014

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



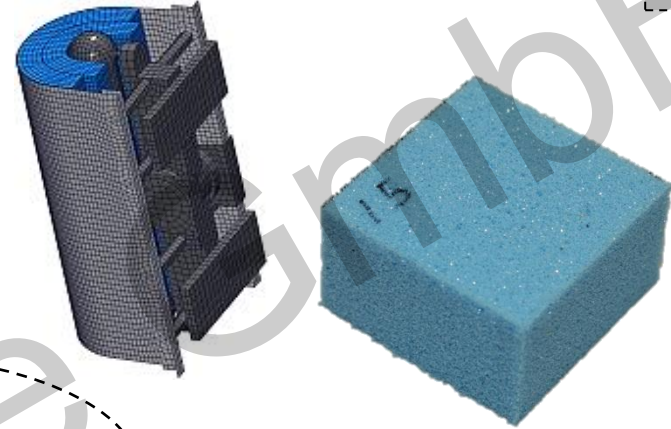


# Overview

## Rubbers



## Foams



# Polymers

## Reinforced Plastics



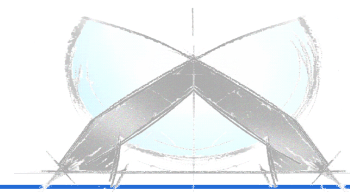
## (Thermo)Plastics



# 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)

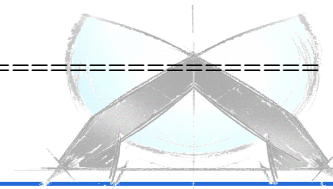
## ➤ Pressure dependent Plasticity

- **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
=====

```

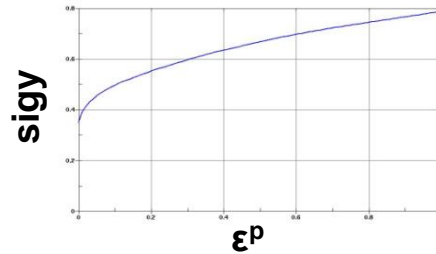


\*MAT\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION (#124)

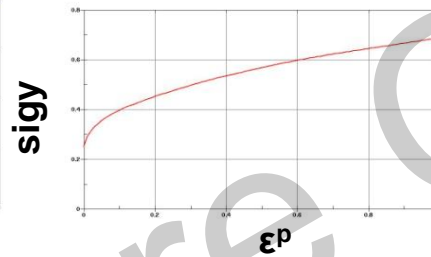
➤ Pressure dependent Plasticity

- Hardening curves

compression LCIDC

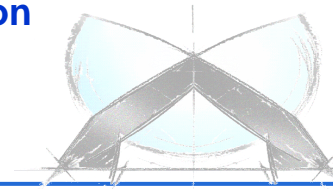
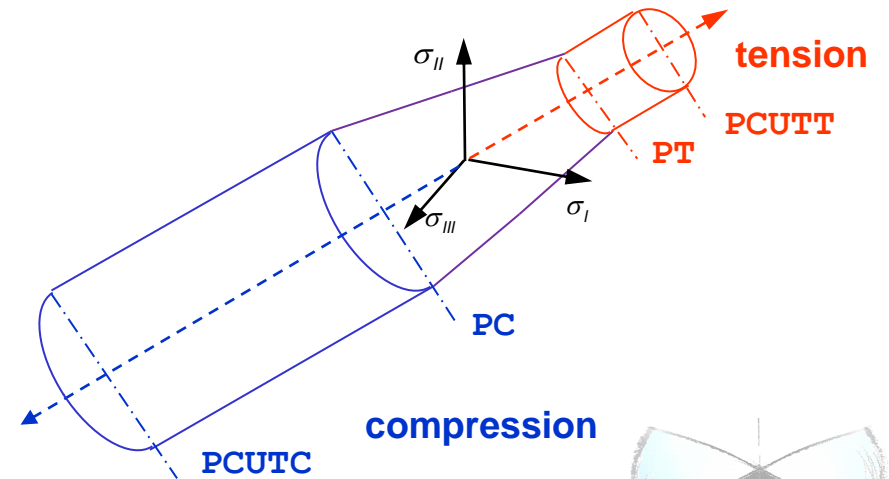
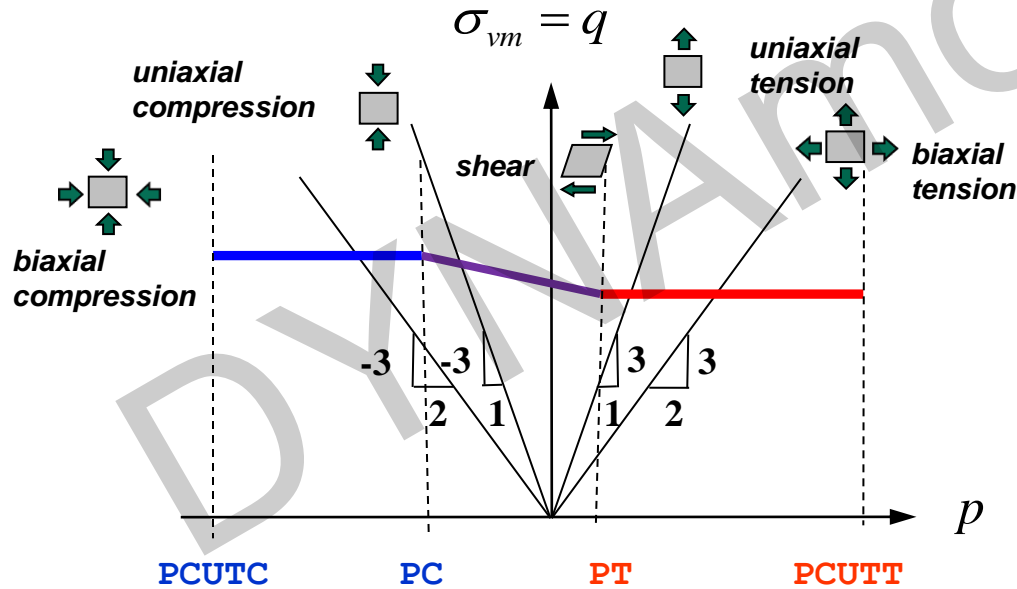


tension LCIDT



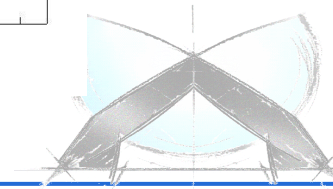
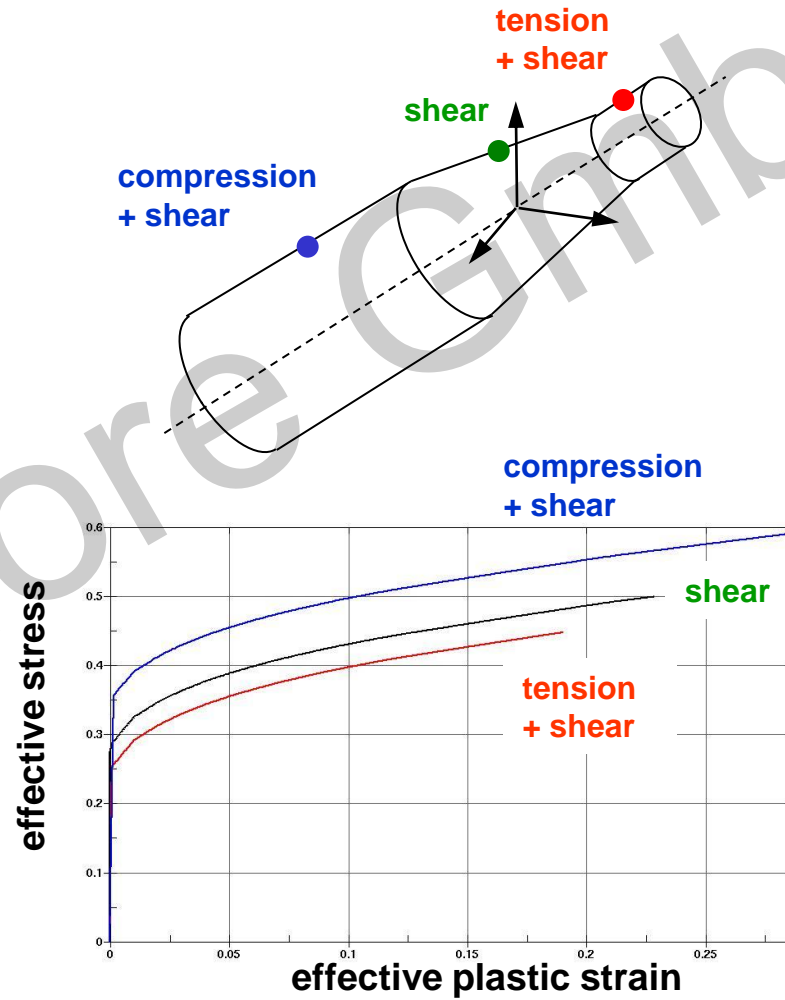
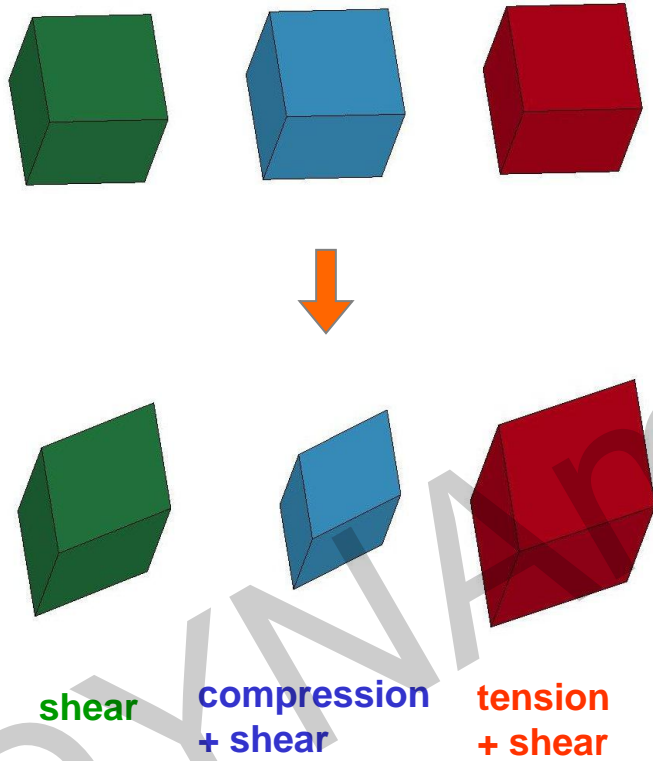
- Yield surface

$$\sigma_{vm} = q$$



➤ Pressure dependent Plasticity

▪ Example



## ➤ Rate dependent Plasticity

Input variables for rate effects:

1st possibility:

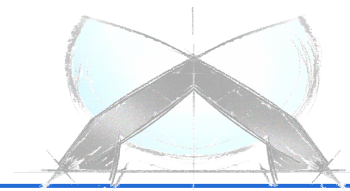
- **C, P:** Cowper & Symonds: Scaling of yield function

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

*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**

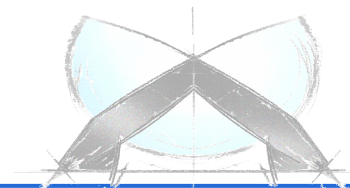
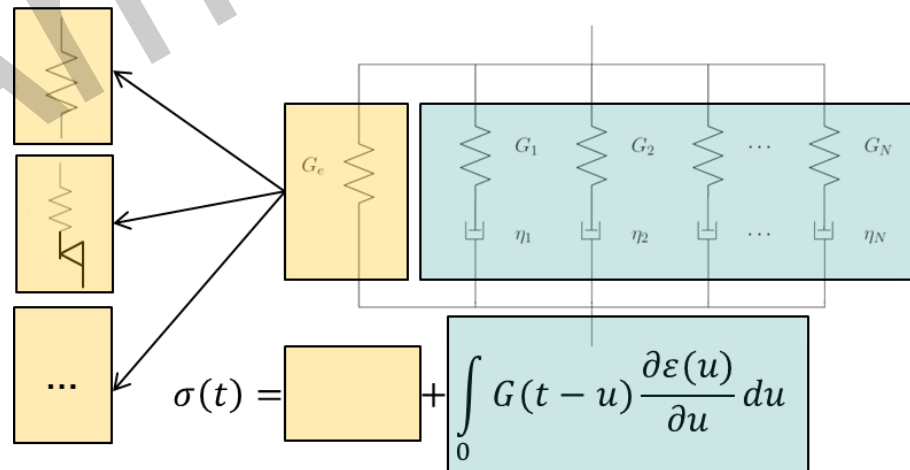
■ **Linear Viscoelasticity**

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

Nonlinear spring  
e. g. hyperelasticity

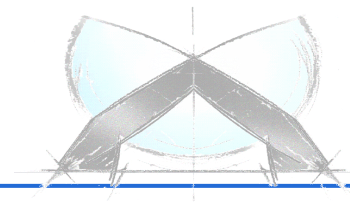
Friction element  
e. g. Elasto-Plasticity

Viscoplasticity,  
Damage, Failure,...





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



# \*MAT\_SAMP-1 (#187)

## ➤ Input

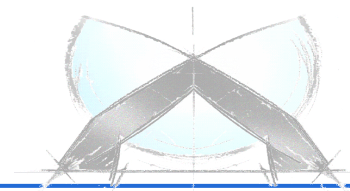
- Linear Elasticity
- Pressure dependent Plasticity
- Rate dependent Plasticity
- Non-associated Plasticity
- Damage formulation
- Rate and pressure dependent Failure

```

=====
$
*MAT_187
$      MID      RO      BULK      SHEAR      EMOD      NUE      RBCFAC
      1      1.05E-06
$      LCID_T      LCID_C      LCID-S      LCID-B      RNUEP      LCID-P      INC DAM
      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      20      0      0
=====

```

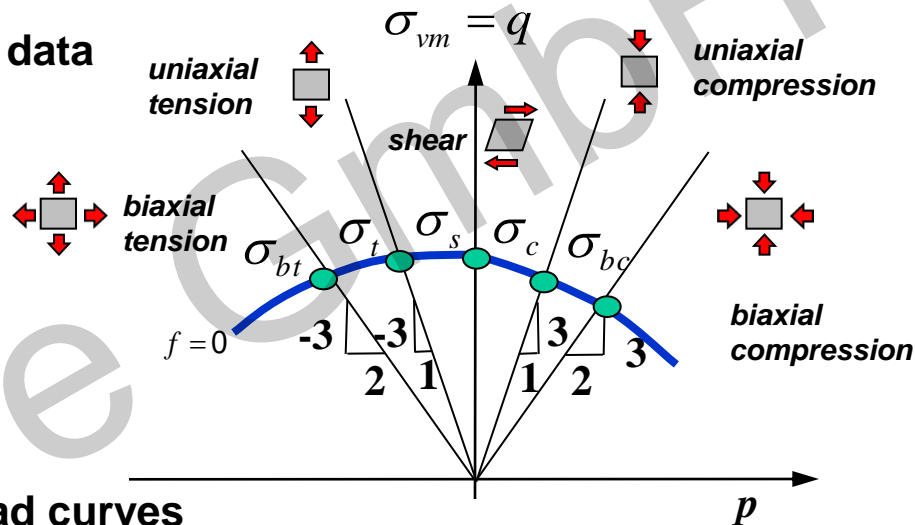
- Numeric and output parameters



➤ 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

$n \leq 2$

- Linear yield surface

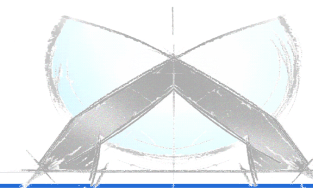
$n = 3$

- Quadratic yield surface

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

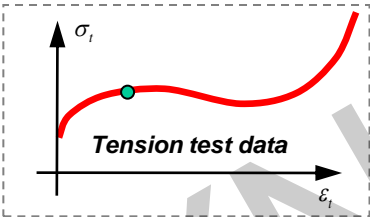
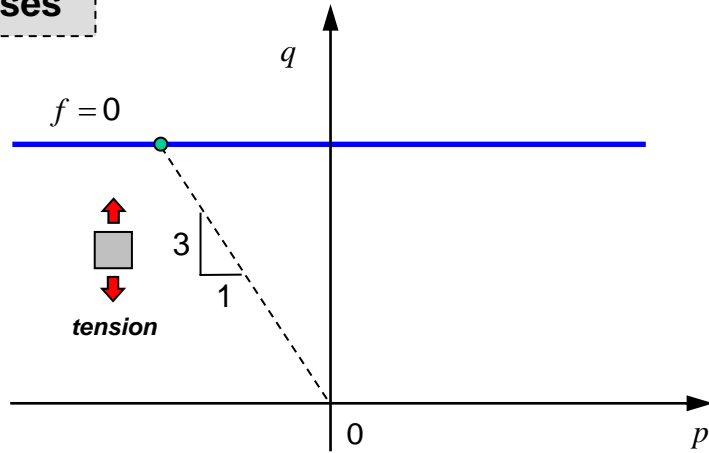
$n = 4$

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

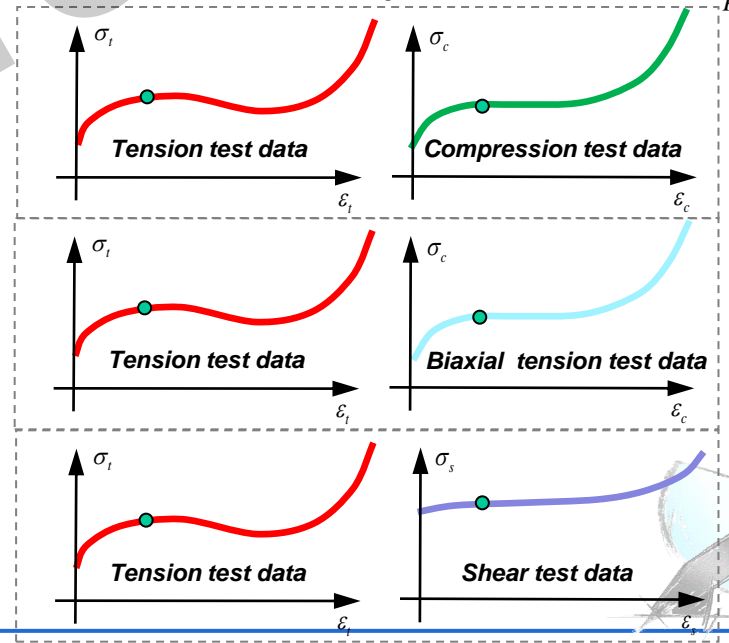
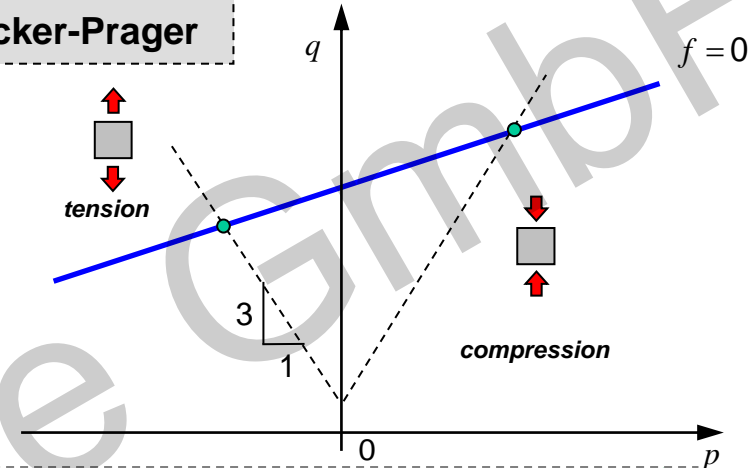


➤ Pressure dependent Plasticity: Linear yield surface

Von Mises



Drucker-Prager

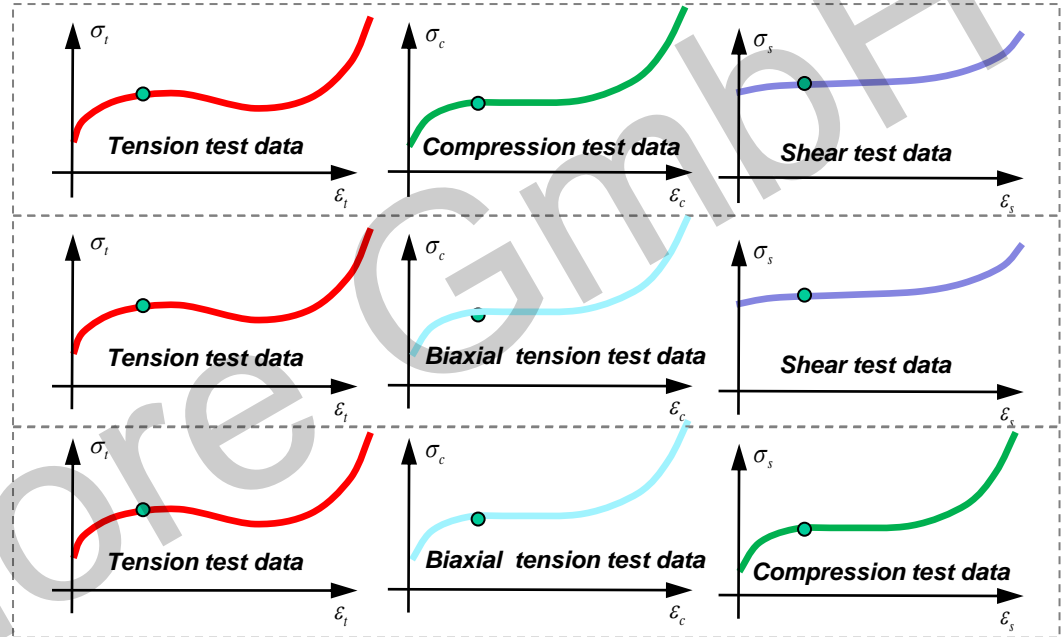
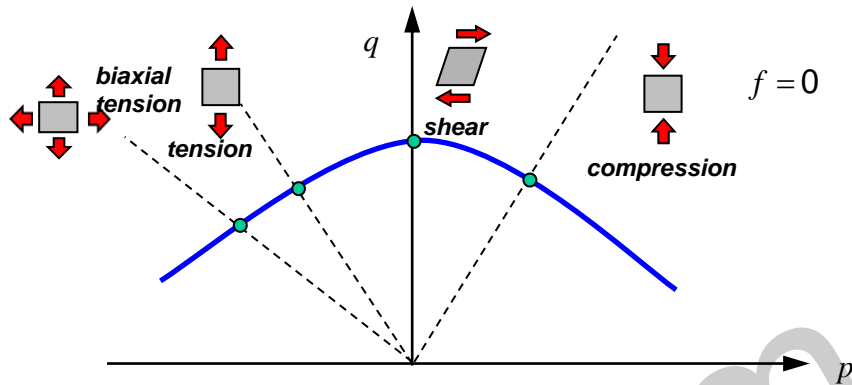


in physics we trust

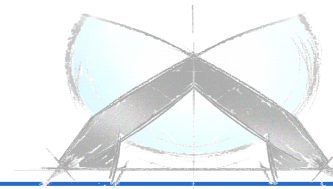
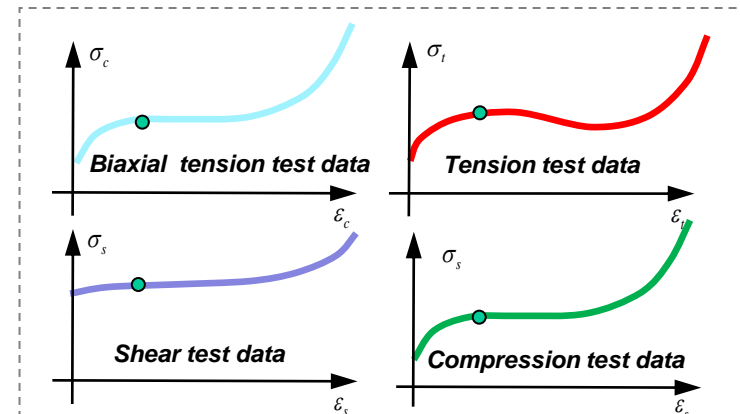
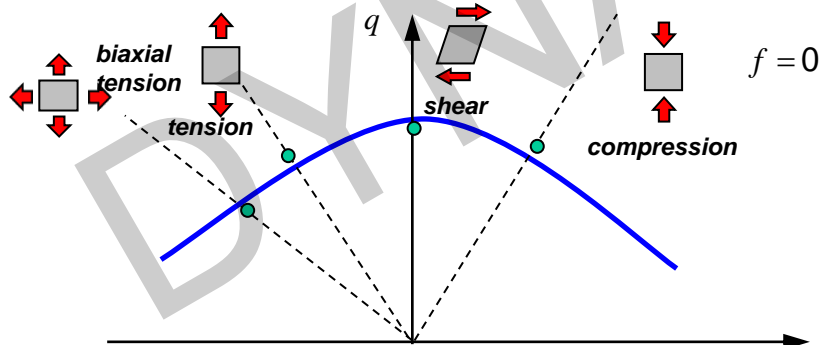
➤ **Pressure dependent Plasticity: Quadratic yield surface**

**3 load curves**

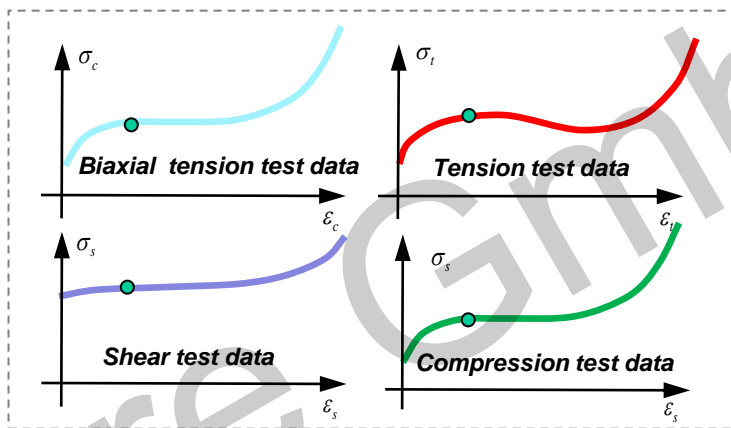
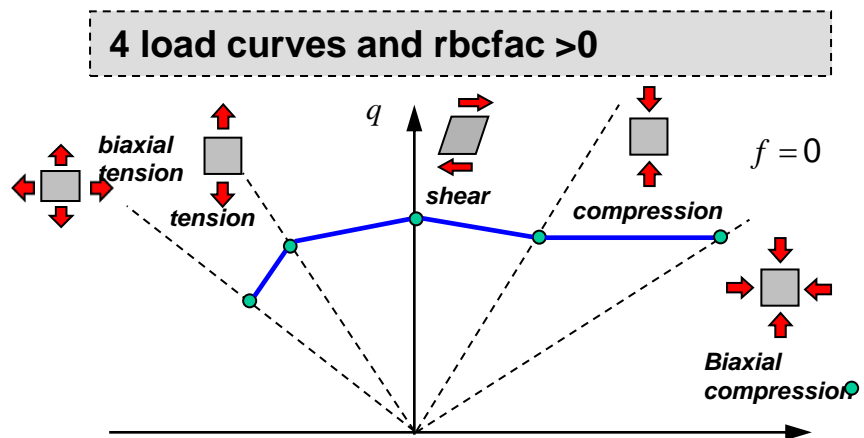
$$f(p, \sigma_{vm}, \bar{\epsilon}^{pl}) = \sigma_{vm}^2 - A_0 - A_1 p - A_2 p^2 \leq 0$$



**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  $(\epsilon_{bi}^p / |\sigma_{bi}|)$

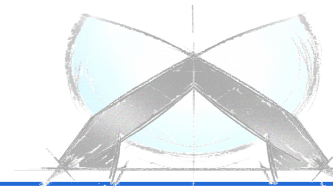
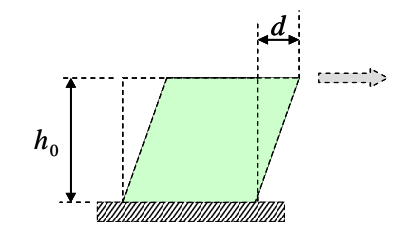
$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{bi} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{bi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad d\epsilon^p = \begin{pmatrix} d\epsilon_{bi}^p & 0 & 0 \\ 0 & d\epsilon_{bi}^p & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2\nu_p}{1-\nu_p} d\epsilon_{bi}^p \end{pmatrix}$$

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

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

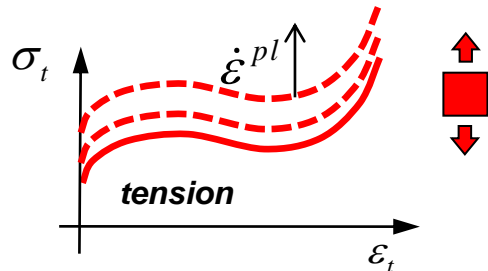
$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_s & 0 \\ \sigma_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad d\epsilon^p = \begin{pmatrix} 0 & d\epsilon_s^p & 0 \\ d\epsilon_s^p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

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



➤ Rate dependent Plasticity: Table definition

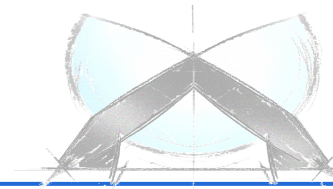
- LCID-T references strain rate dependent table



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
  
```



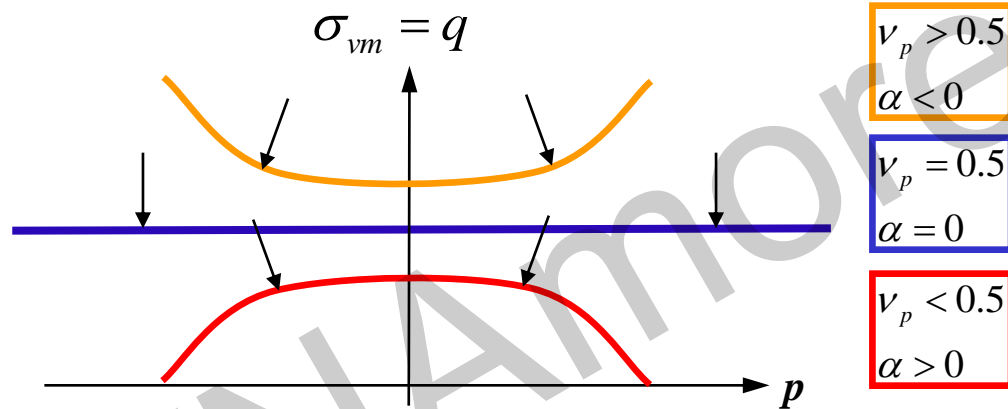


➤ **Non-associated Plasticity**

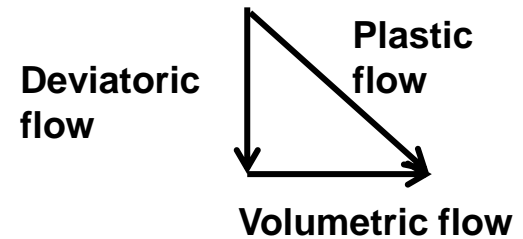
- Plastic flow rule and plastic potential

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

- „Plastic“ Poisson’s ratio determines plastic flow

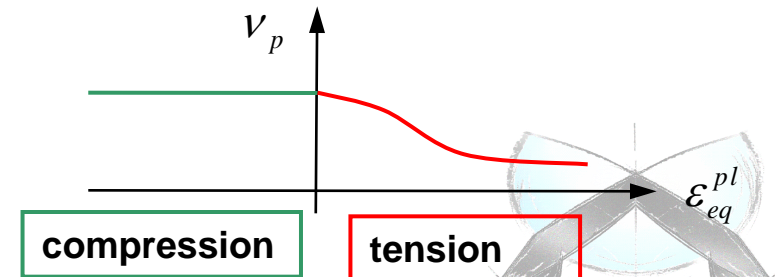


$$\alpha = \frac{9}{2} \frac{1 - 2\nu_p}{1 + \nu_p}$$



- „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      INC DAM
      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
    
```

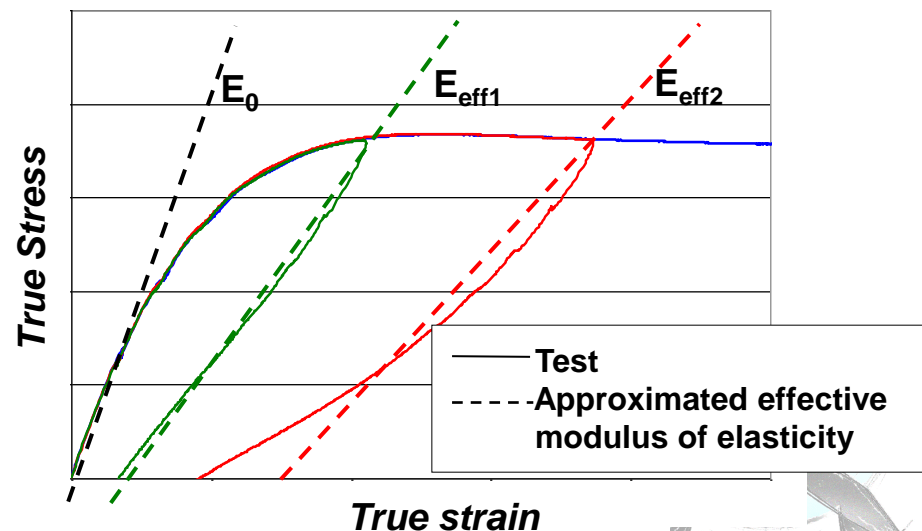
**Damaging of the stresses by scalar curve definition**  $d(\bar{\epsilon}^{pl}) = [0,1[$

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

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

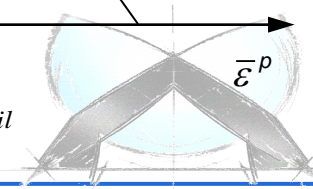
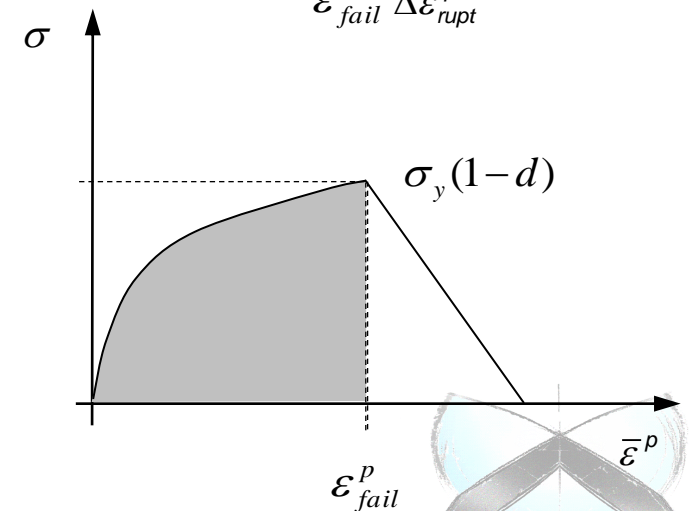
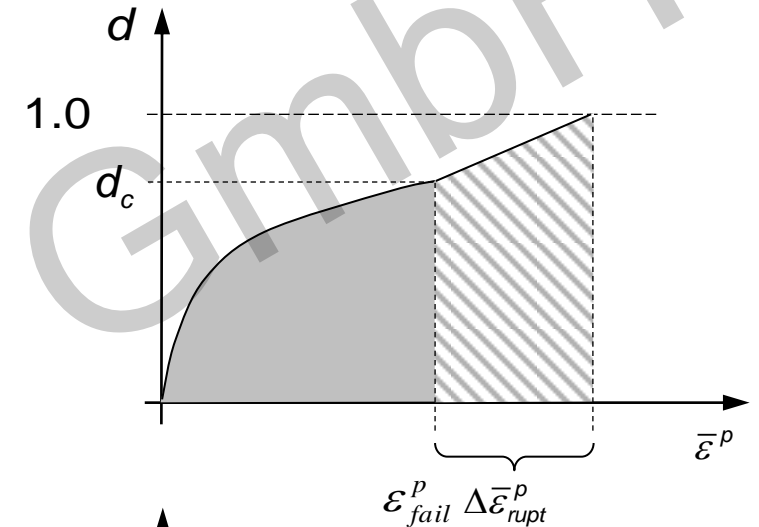
- Regularization by an input optional curve

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

- 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  $\varepsilon_{fail}^p$
- 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

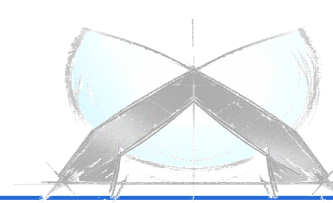
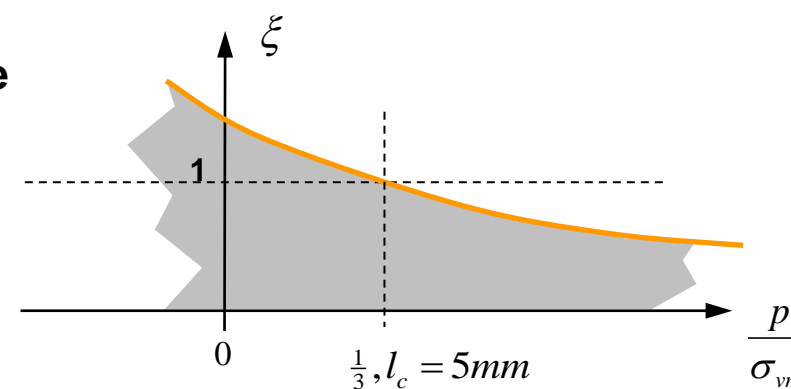
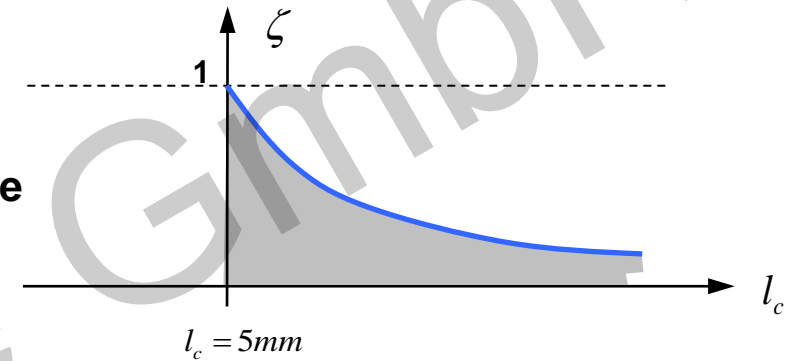
$$\zeta = \zeta(l_c)$$

- Triaxiality dependent failure by an optional input curve

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

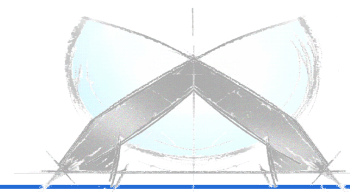
- Finally:  $\varepsilon_{fail}^p = \varepsilon_{fail}^p(\dot{\varepsilon}^p) \cdot \underbrace{\xi\left(\frac{p}{\sigma_{vm}}\right)}_{\frac{p}{\sigma_{vm}} = \frac{1}{3}, l_c = 5mm} \cdot \zeta(l_c)$

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



➤ **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



# \*MAT\_SAMP-1 (#187)

## ➤ 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



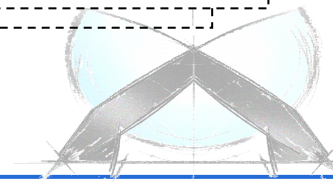
```

*MAT_187
$   MID          RO          BULK          SHEAR          EMOD          NUE          RBCFAC
    1  1.05E-06
$   LCID_T        LCID_C        LCID-S        LCID-B        RNUPE        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          0          0          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)**

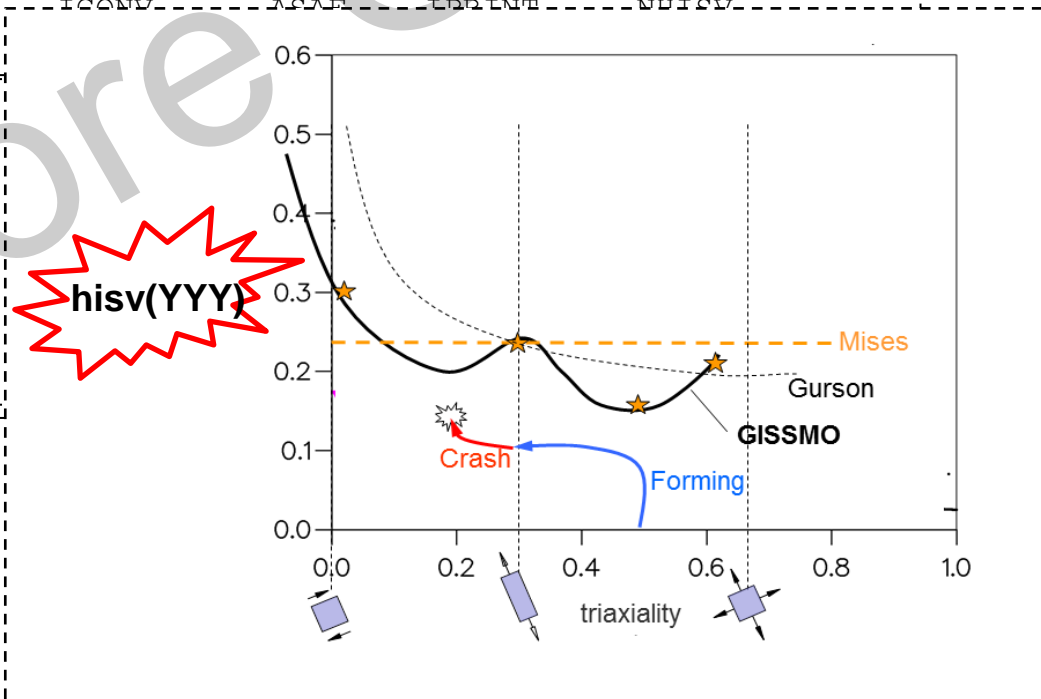
➤ **New options: Combining multiple GISSMO cards with reference to one material model**



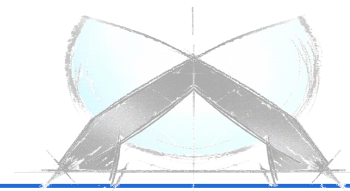
```
*MAT_187
$ MID RO BULK SHEAR EMOD NUE RBCFAC
$ 1 1.05E-06
$ LCID_T LCID_C LCID-S LCID-B RNUEP LCID-P INCDAM
$ 99 200 300 400 0.3
$ LCID_D EPFAIL DEPRPT LCID_TRI LCID_LC
$ -500
$ MAXITER MIPS INCFAIL
$ 20
```

```
*MAT_ADD_EROSION
1
0
▪ DMGTYP=YYYY
$ IDAM DMGTYP LCSDG ECRIT
$ 1 0061 1000010 -1000009
$ SIZEFLG REFSZ NAHSV LCSRS
$ 0 0 14
$
```

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



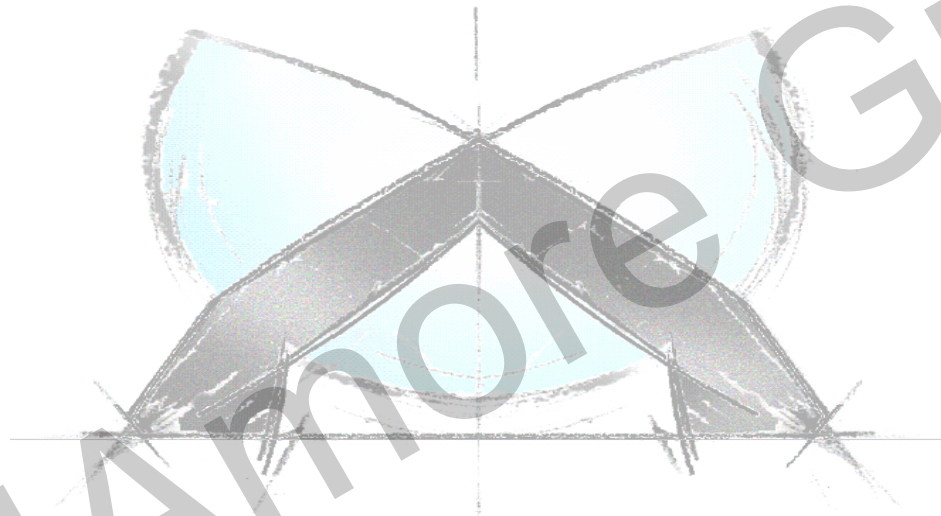
- <http://www.dynamore.de>
- <http://www.dynalook.com>
- <http://www.dynasupport.com>
  - History variables:  
<http://www.dynasupport.com/howtos/material/history-variables>
  - Material models for implicit solver:  
<http://www.dynasupport.com/howtos/implicit/elements-and-material-models-available-for-implicit>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





# Anpassung komplexe Fließkurve mit 4a impetus

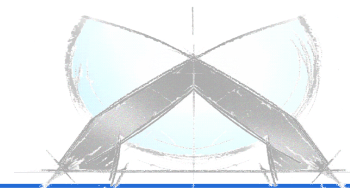
P. Reithofer, M. Rollant, A. Fertschej (4a engineering GmbH)



Modellierung von Kunststoffen, Bamberg

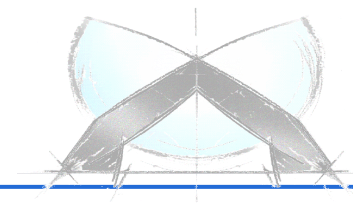
6. Oktober 2014

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

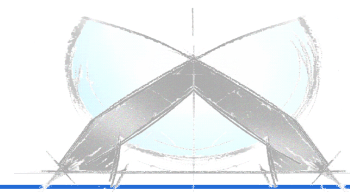
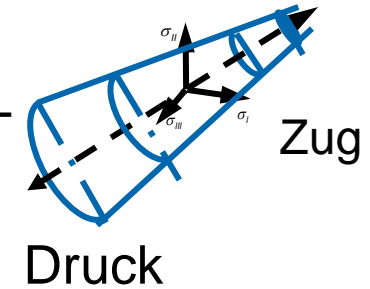
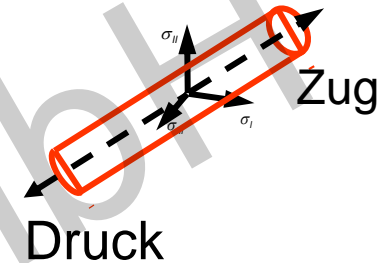
DYNAMORE GmbH



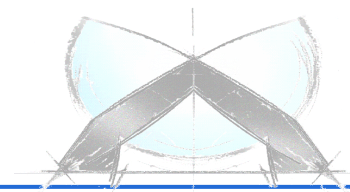
# Einleitung

## 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.

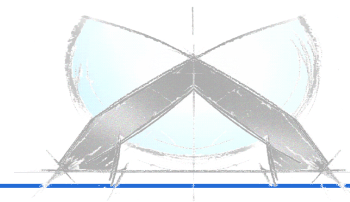
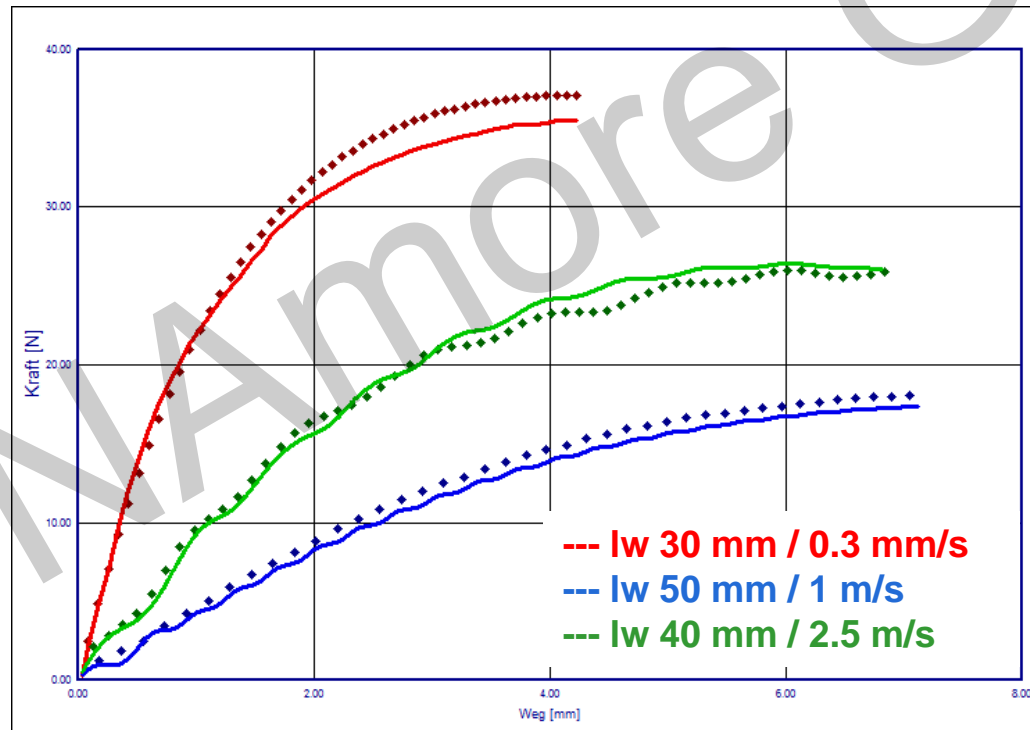


# Einleitung

## Vorgehensweise 4a impetus Biegeversuche

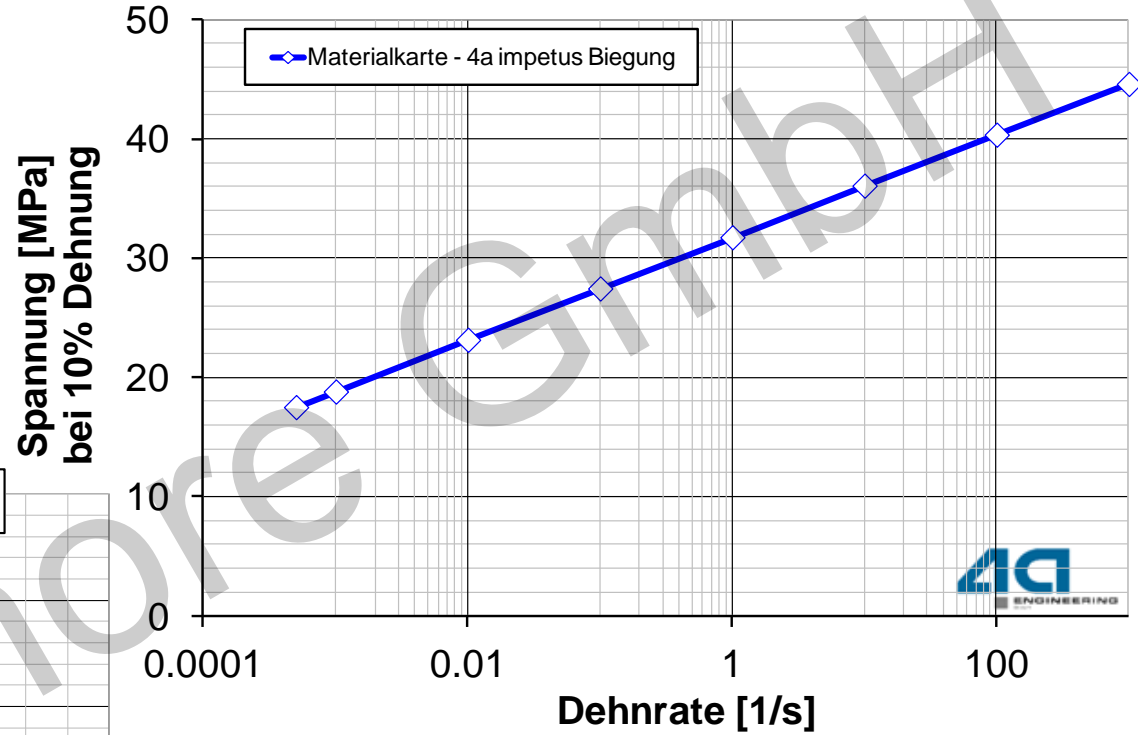
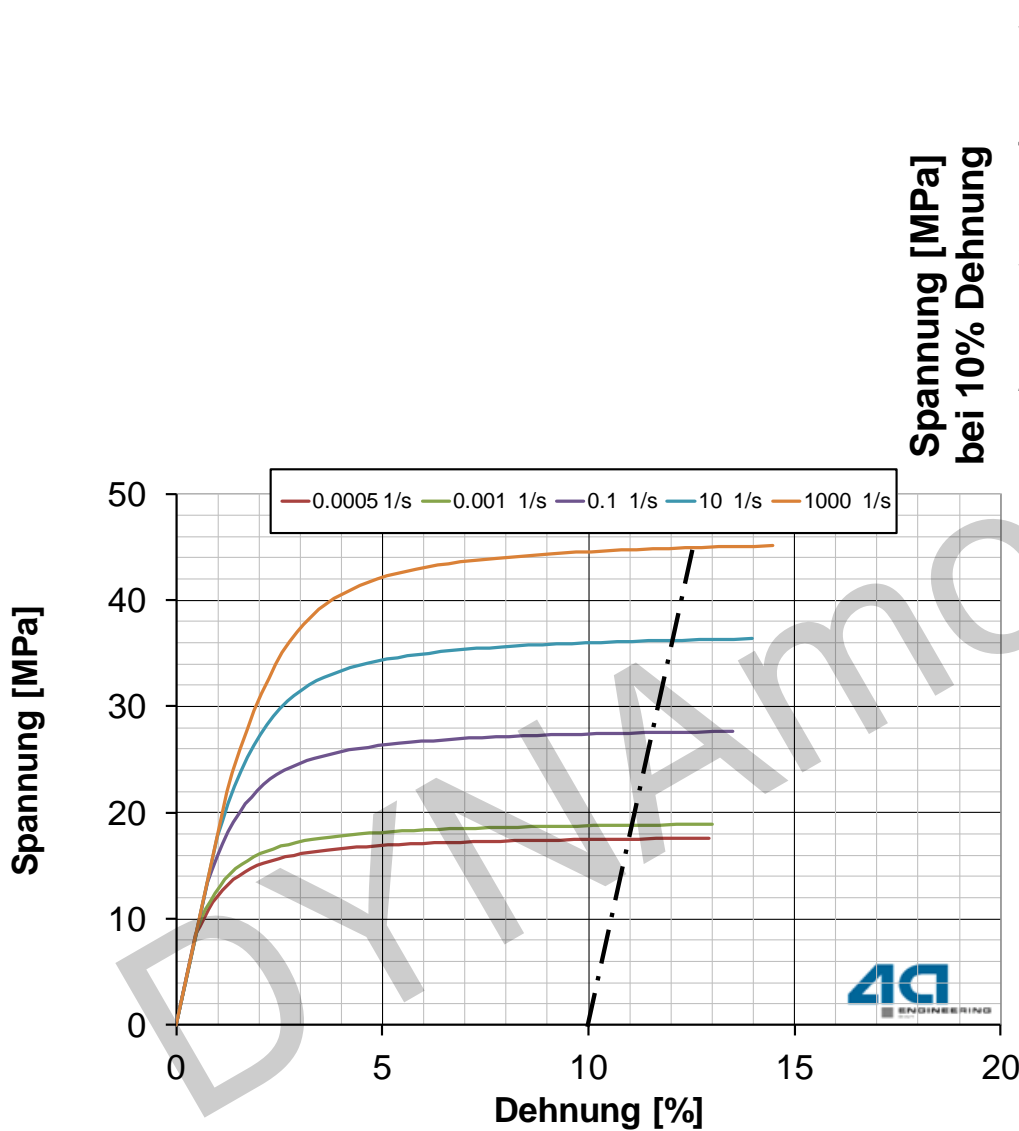
- 1. Schritt: Durchführung statischer und dynamischer Biegeversuche
- 2. Schritt: Datenauswertung
- 3. Schritt: Materialcharakterisierung - Parameteridentifikation mit LS-OPT

E-Modul → plastischen Kenndaten → Dehnratenabhängigkeit → Validierung

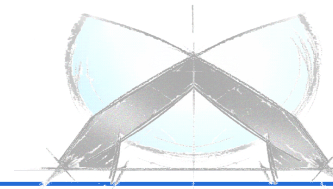


# Einleitung

## Vorgehensweise 4a impetus Biegeversuche



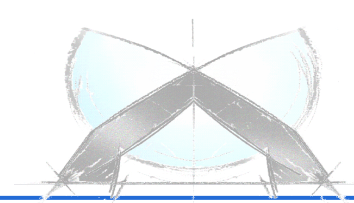
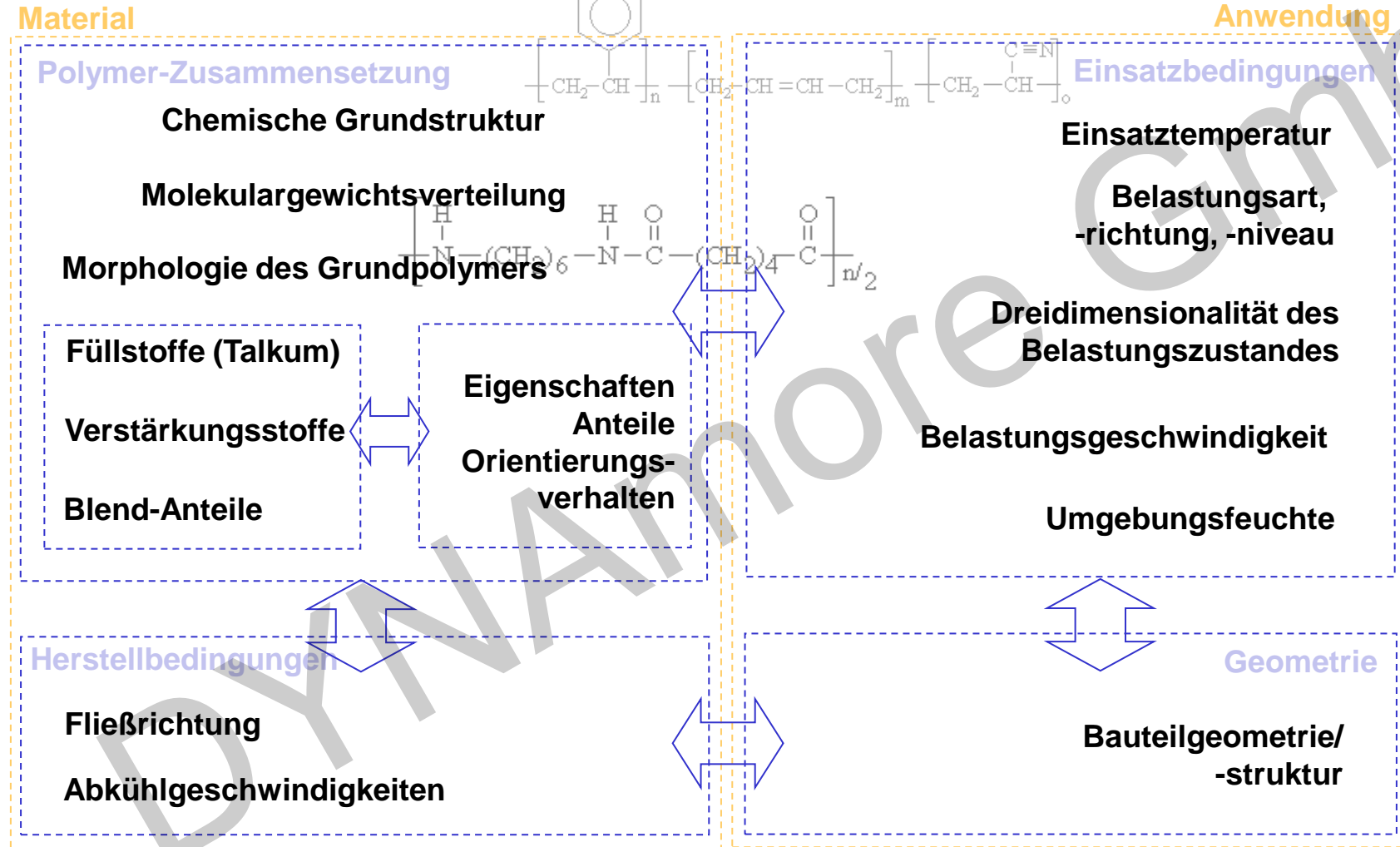
[9]-[11]



# Materialverhalten von Kunststoffen

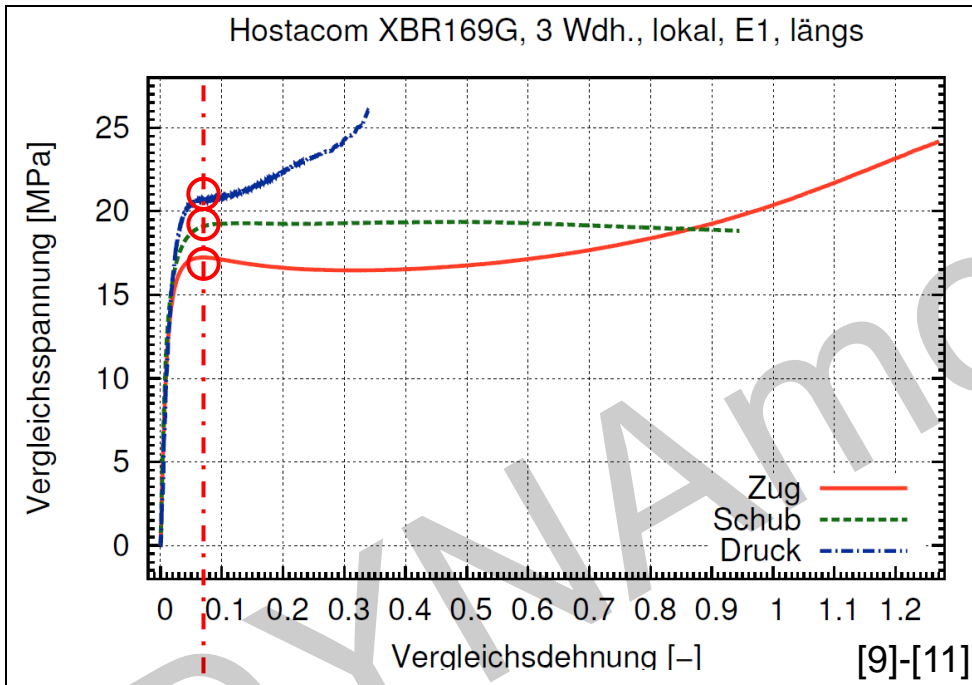
## Einflüsse

Einflüsse auf das Materialverhalten von Kunststoffen:

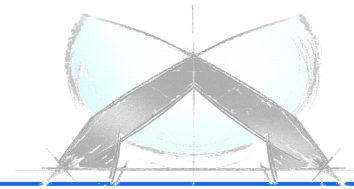
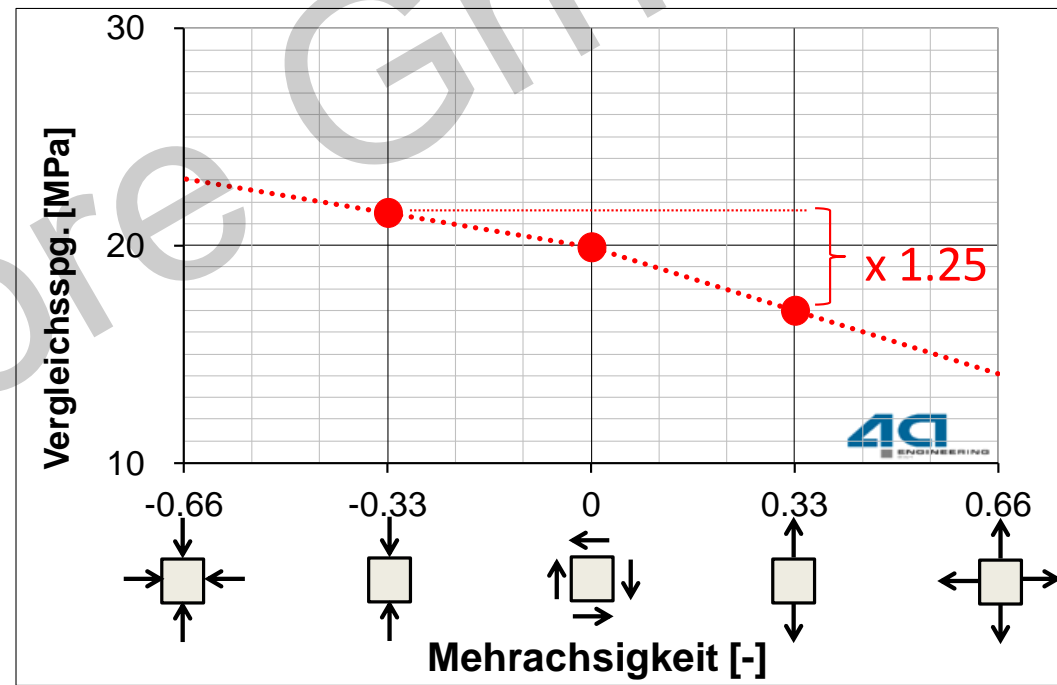


### Belastungsart

- statische Zugversuche
- statische Schub- und Druckversuche



### Zug/Druck Asymmetrie

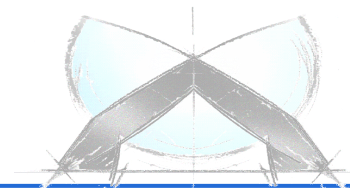
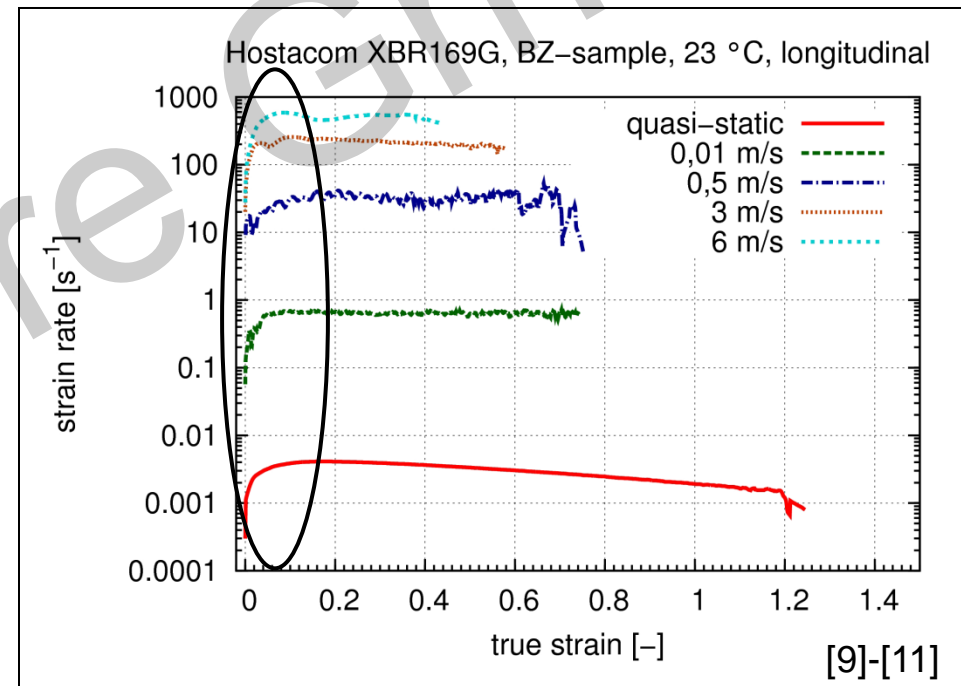
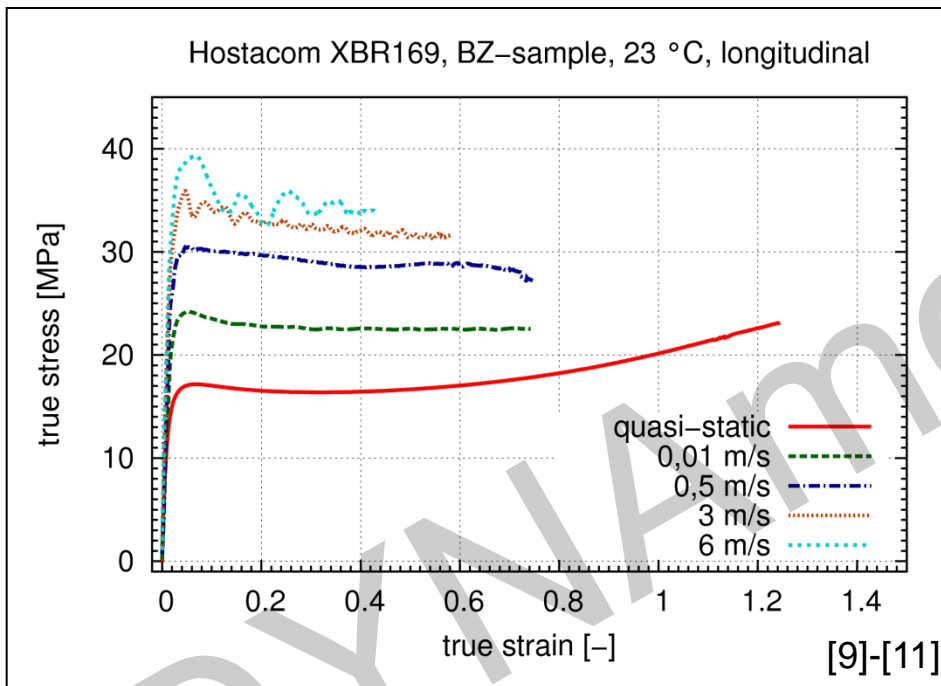




### Belastungsgeschwindigkeit

- statische und dynamische Zugversuche

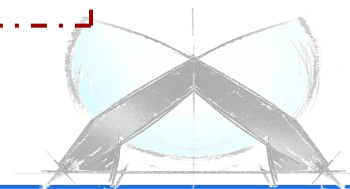
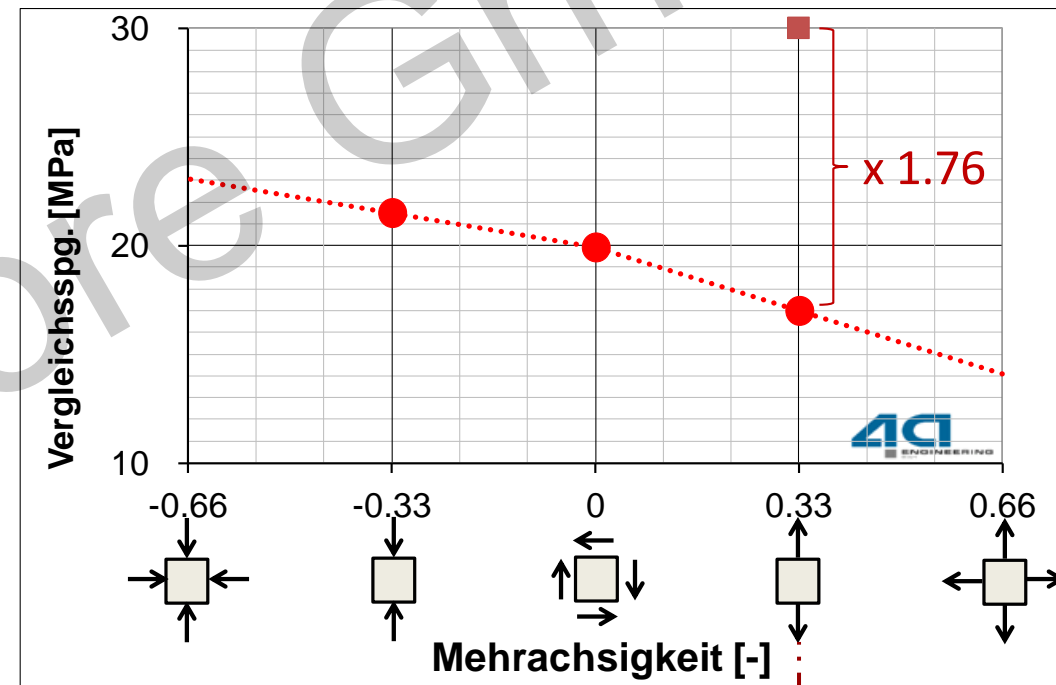
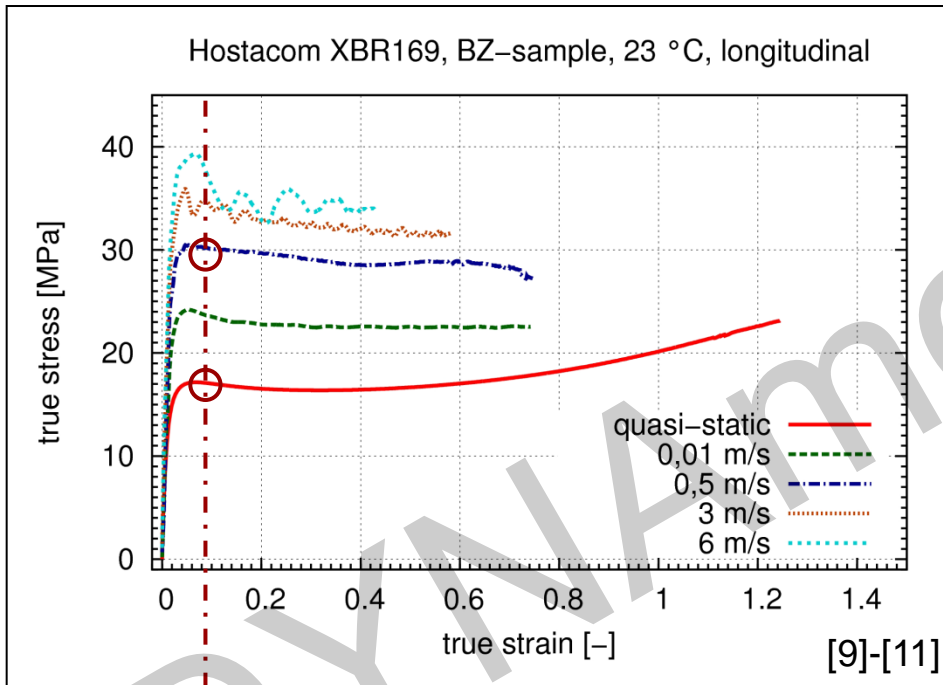
### Dehnrage variiert vor allem im Bereich des Fließbeginns



### Belastungsgeschwindigkeit

- statische und dynamische Zugversuche

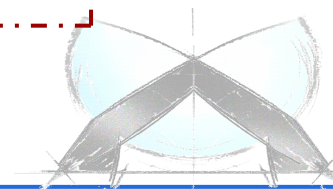
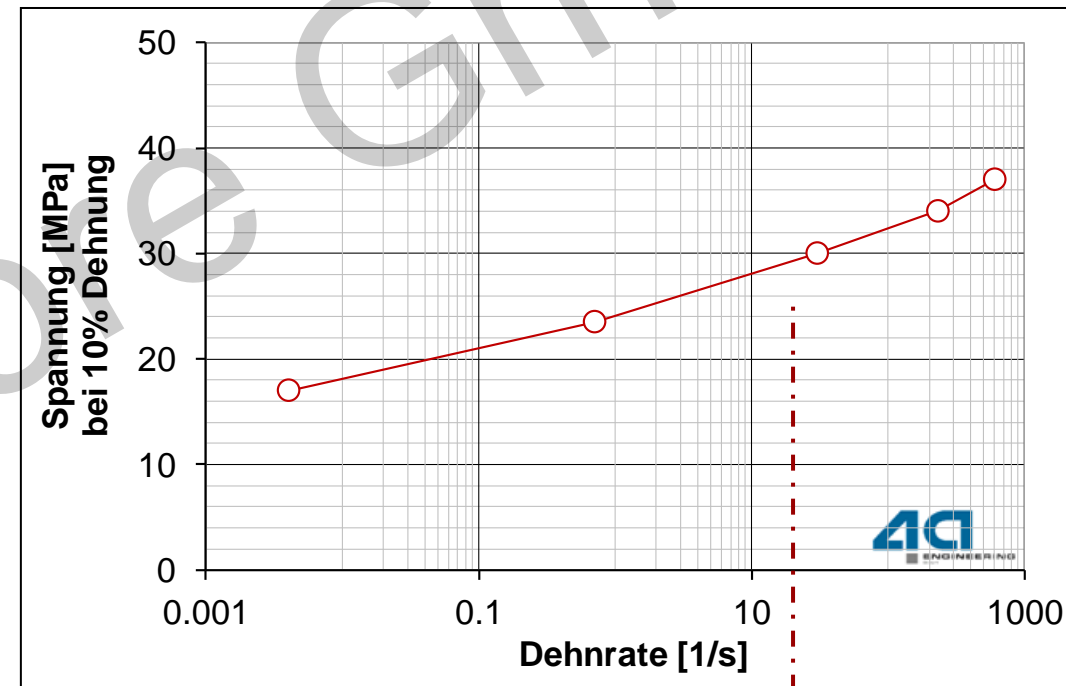
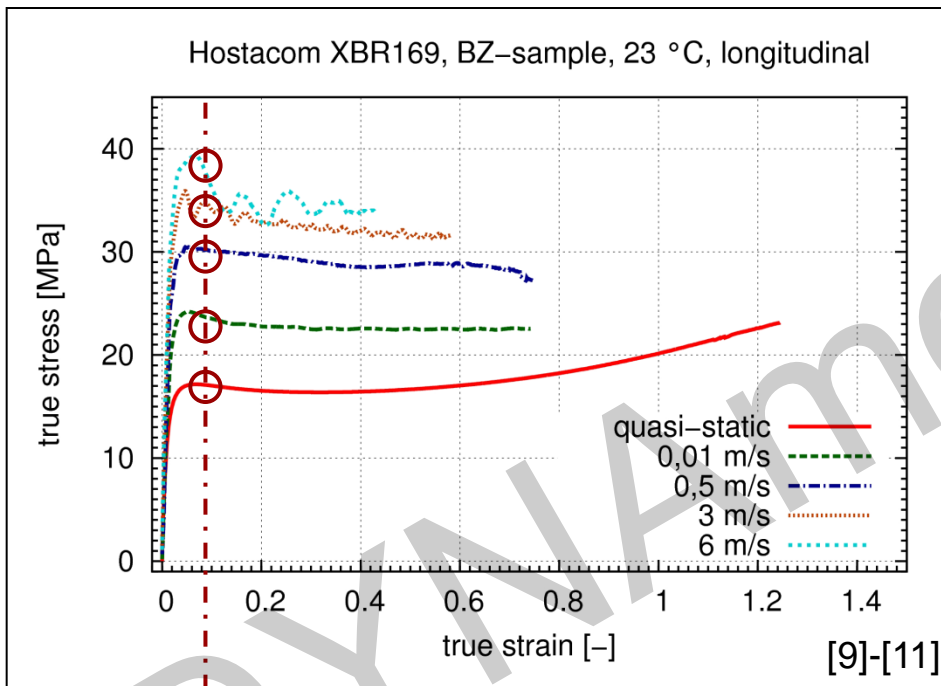
### Dehnratenabhängigkeit statisch vs. dynamisch



### Belastungsgeschwindigkeit

- statische und dynamische Zugversuche

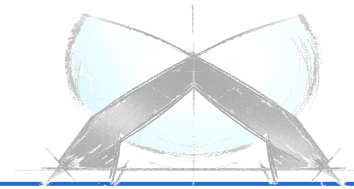
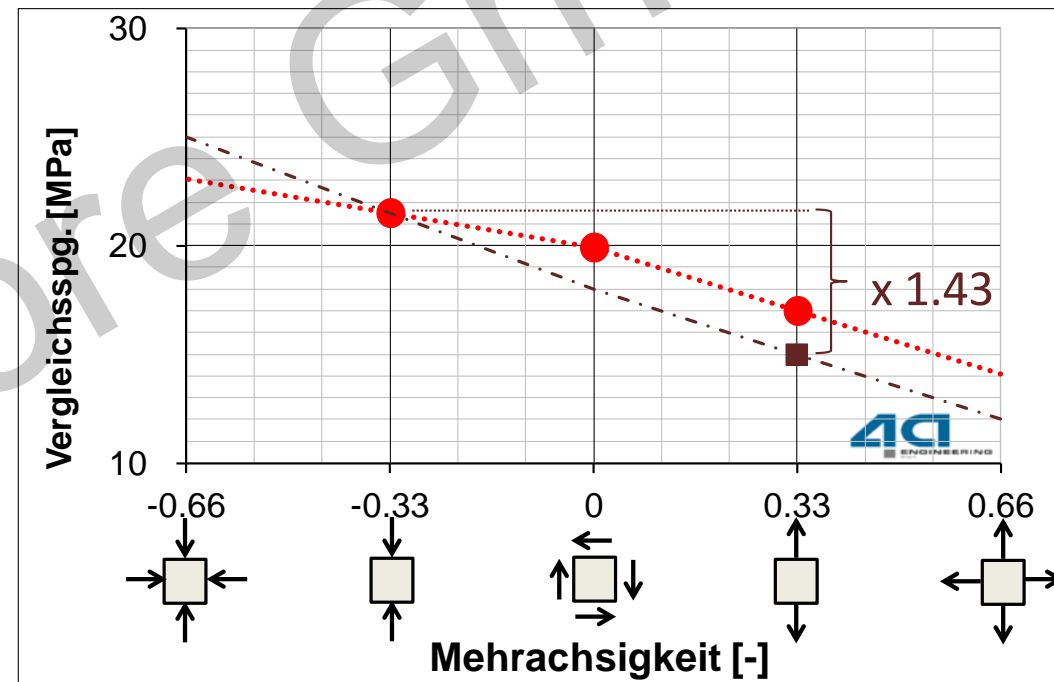
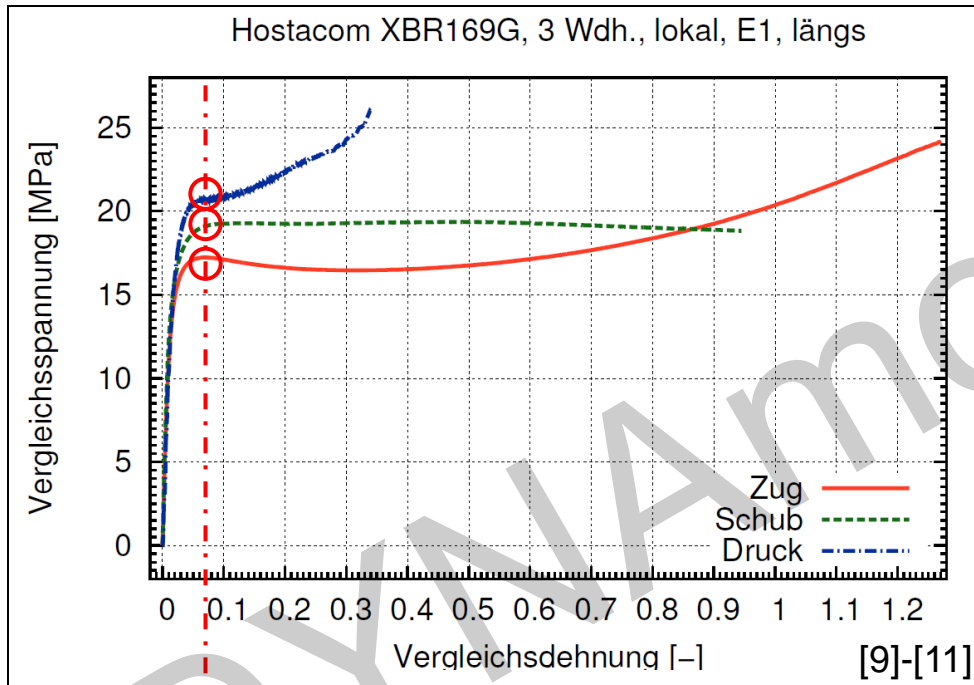
### Dehnratenabhängigkeit statisch vs. dynamisch



### 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

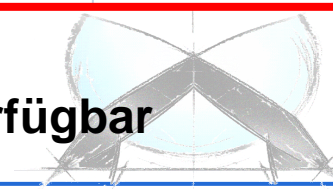
- MAT\_19: *\*MAT\_STRAIN\_RATE\_DEPENDENT\_PLASTICITY* von Mises
- MAT\_24: *\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY* von Mises
- MAT\_124: *\*MAT\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION* Drucker Prager
- MAT\_187: *\*MAT\_SAMP-1* Allg. Fließfläche

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

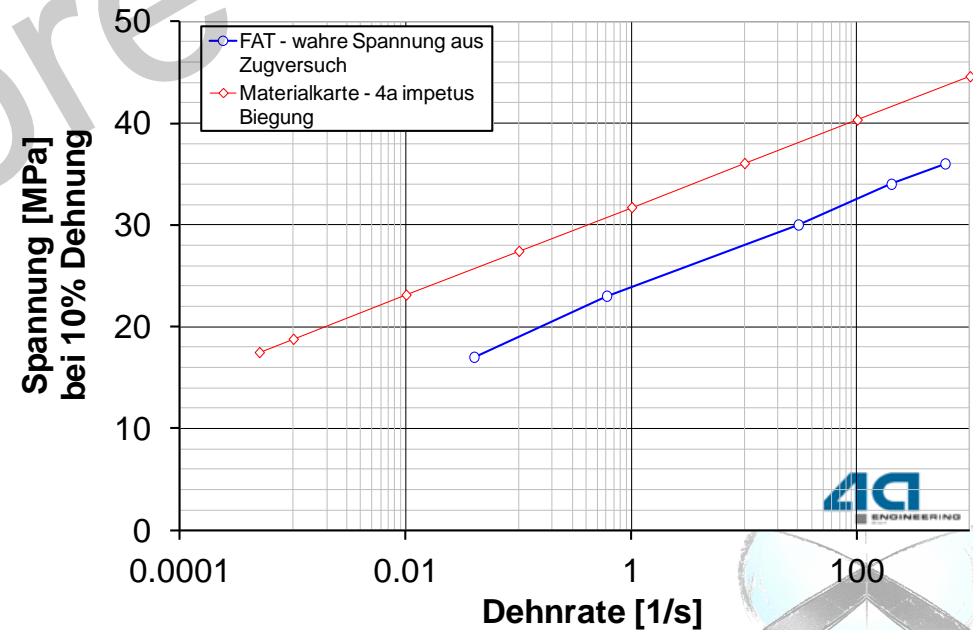
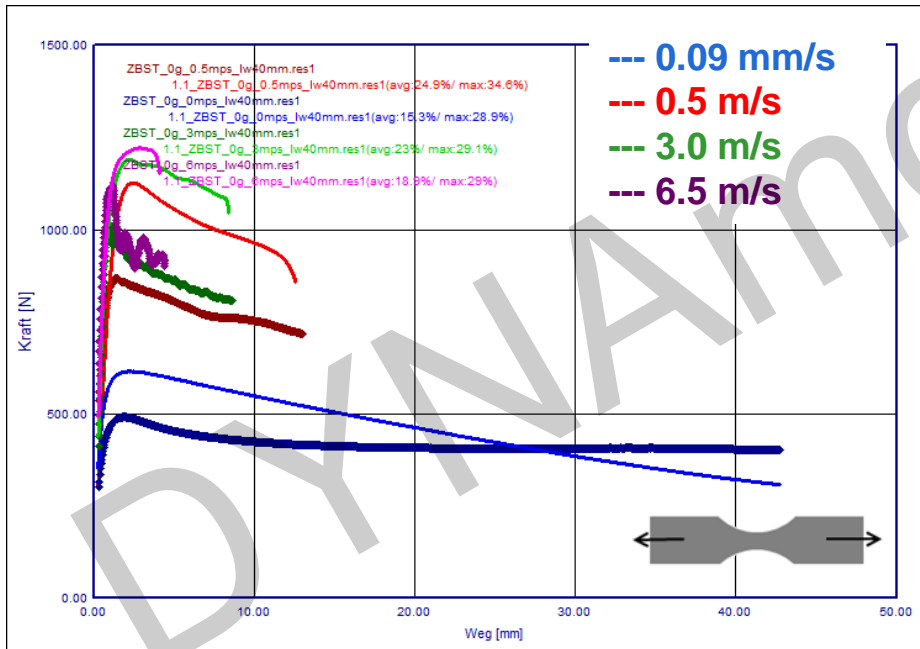
- 1. Schritt: Import externe Versuchsdaten in 4a impetus [9][10][11]
- 2. Schritt: Datenauswertung
- 3. Schritt: Validierung mit vorhandener Materialkarte

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

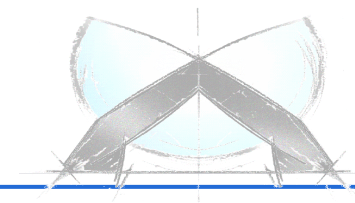
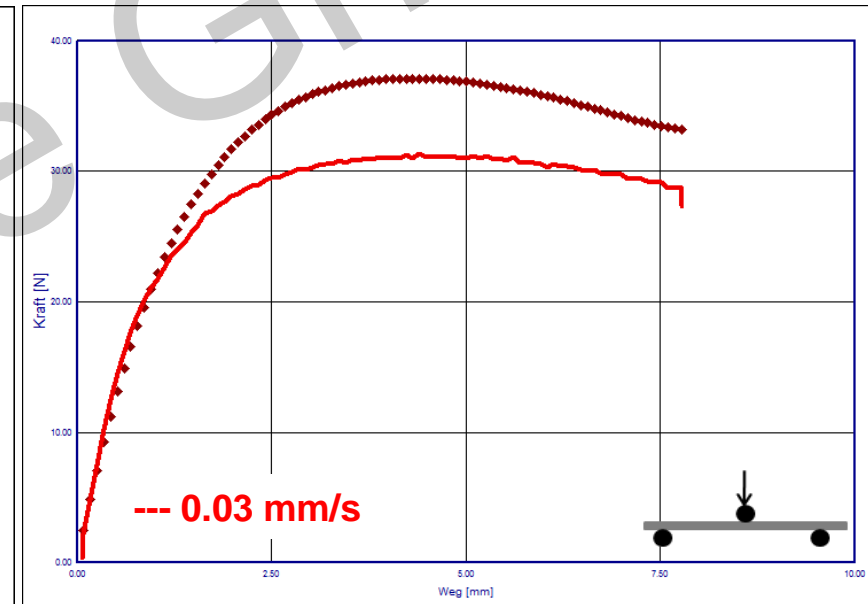
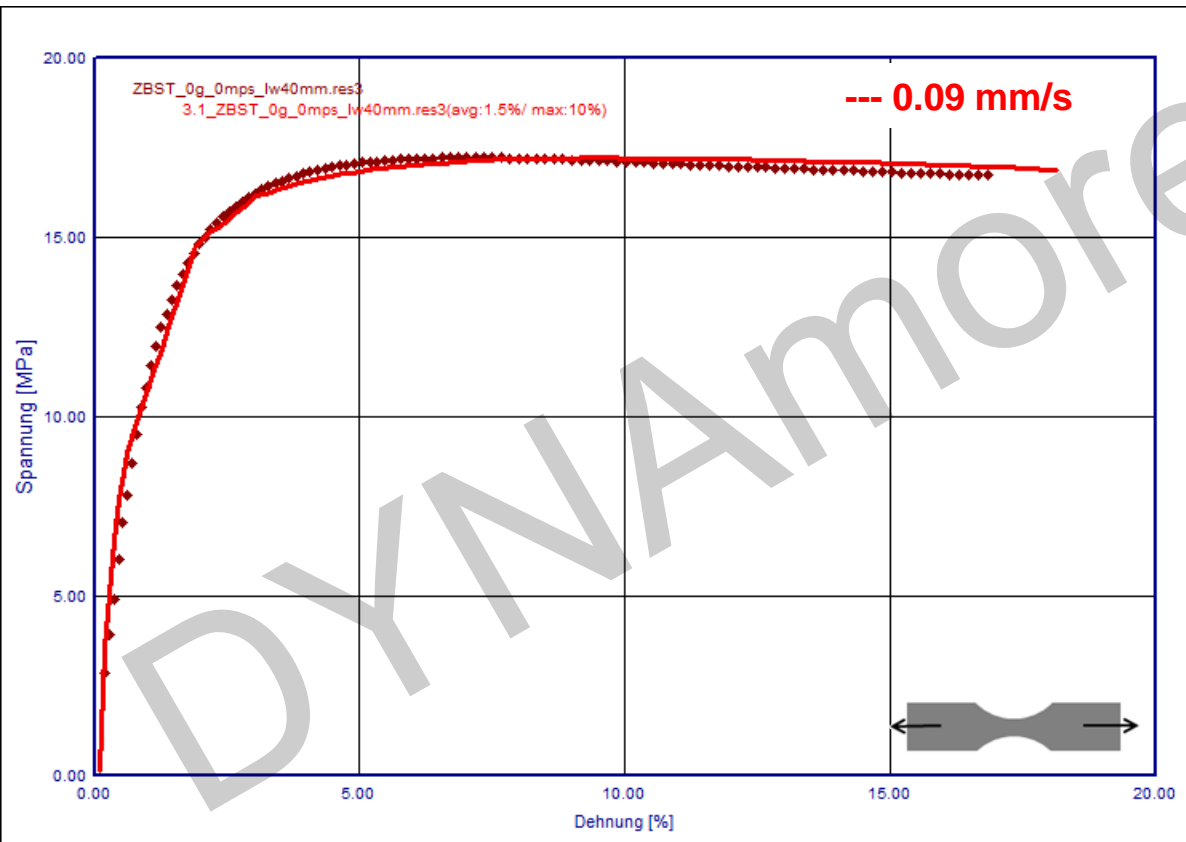


# Anpassung Materialkarte mit allg. Fließfläche

## 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

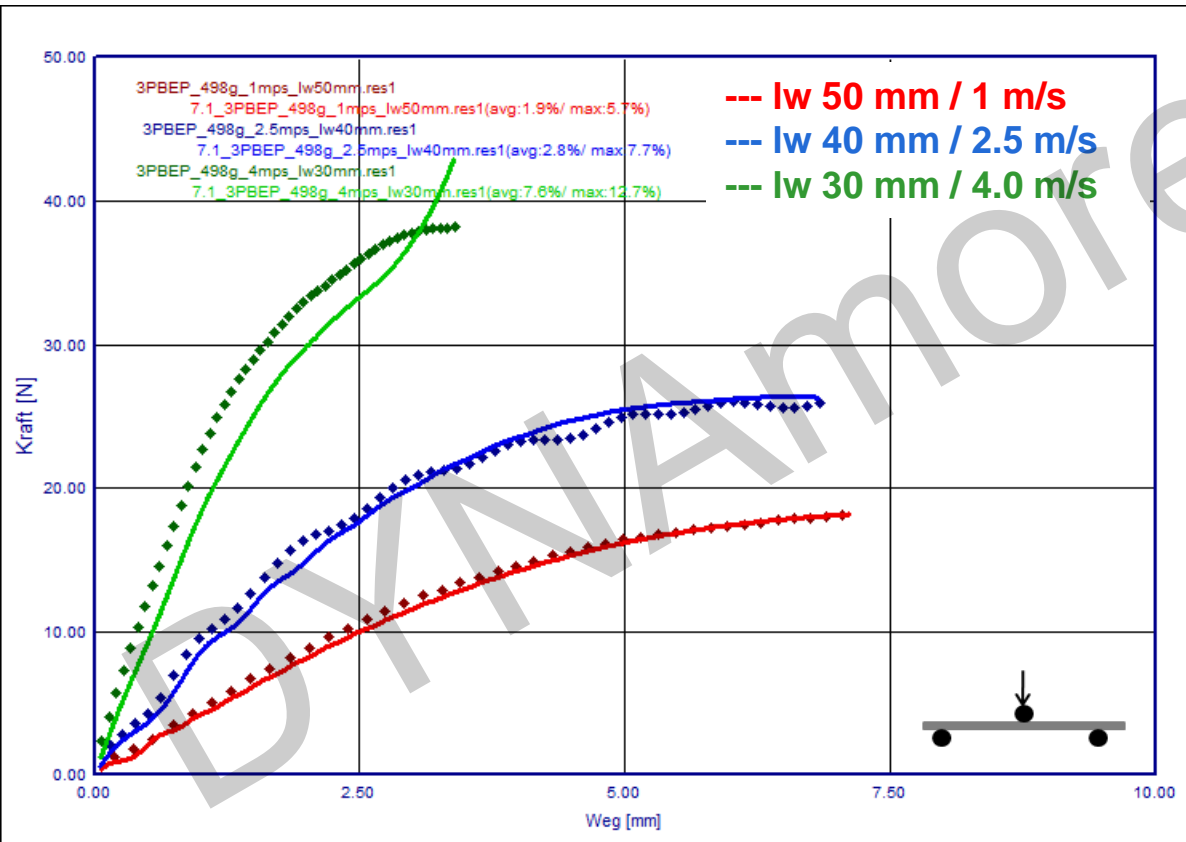


# Anpassung Materialkarte mit allg. Fließfläche

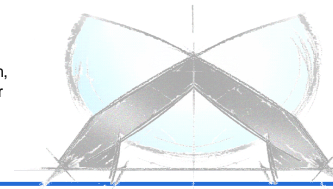
## Ermittlung der Zug/Druck Asymmetrie

### ➤ 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



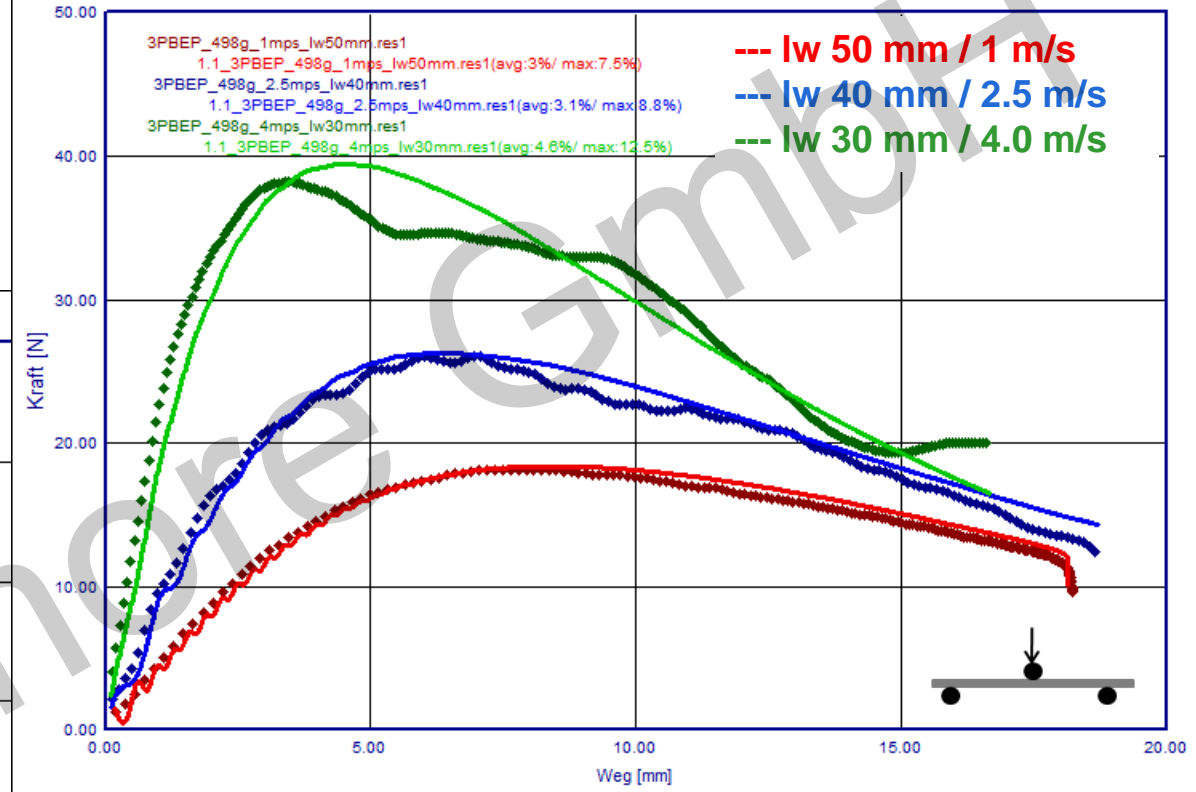
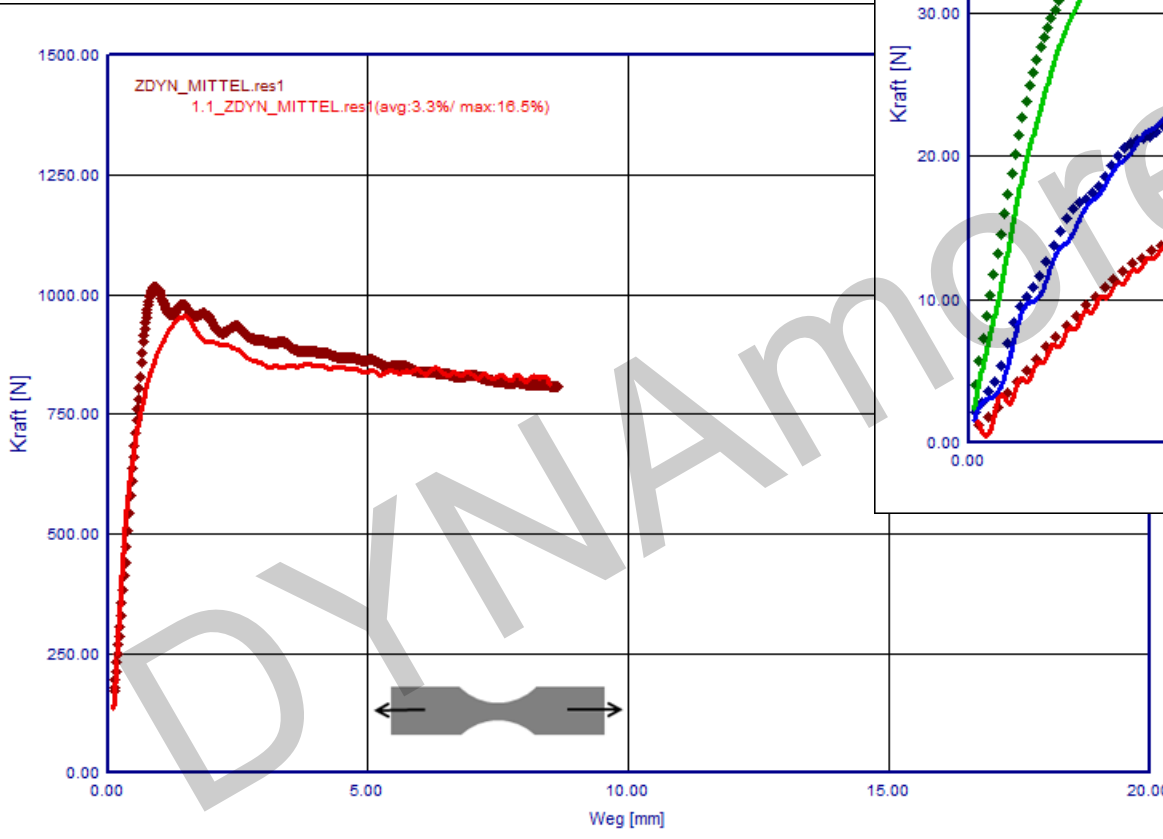


# Anpassung Materialkarte mit allg. Fließfläche

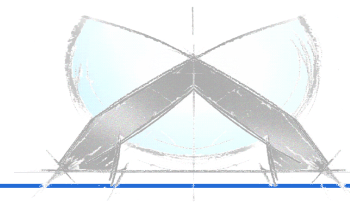
## Ermittlung der Zug/Druck Asymmetrie

### ➤ 6. Schritt: Validierung

gute Übereinstimmung für alle Lastfälle

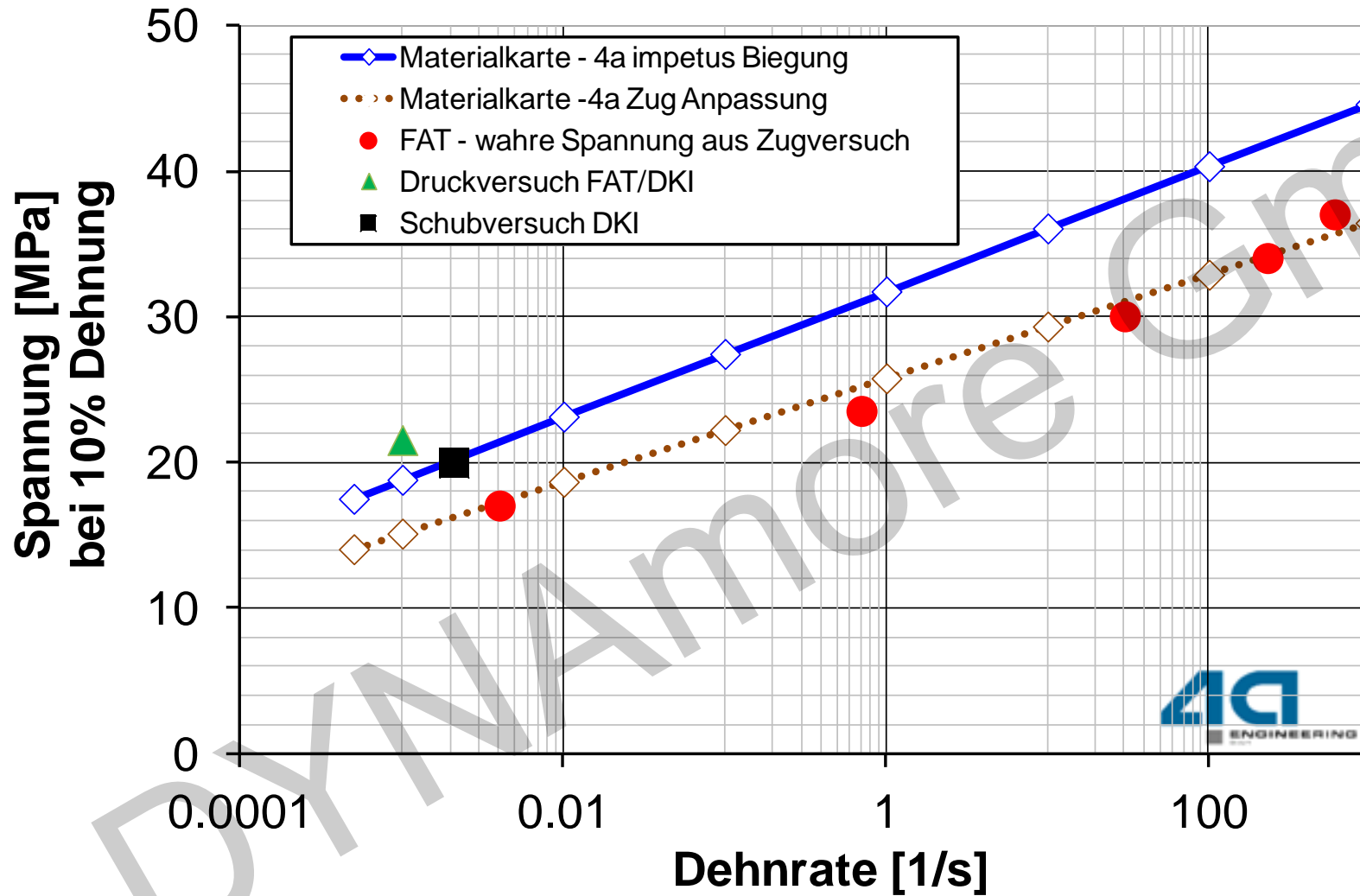


Modell 130323\_001  
 Solver: LS DYNA, Metamodell: 7031\_MAT187, Elementgröße: 2mm,  
 Elementtyp: 16: Fully integrated shell element (very fast), Anzahl der  
 Integrationspunkte: 9  
 Annahmen: Quer. 0.3, Reibk. 0.1

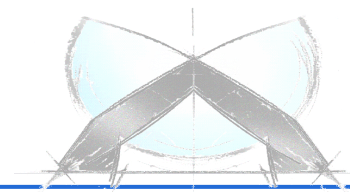


# Anpassung Materialkarte mit allg. Fließfläche

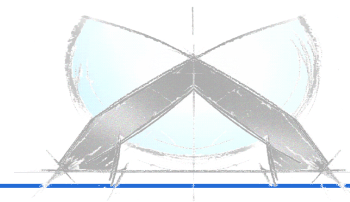
Ermittlung der Zug/Druck Asymmetrie



[11]



# Möglichkeiten der Versagensabbildung

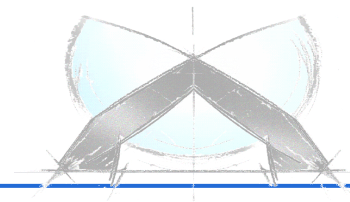


# Möglichkeiten der Versagensabbildung

Verfügbare Versagens- bzw. Schädigungsmodelle in LS-DYNA

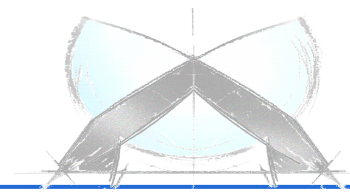
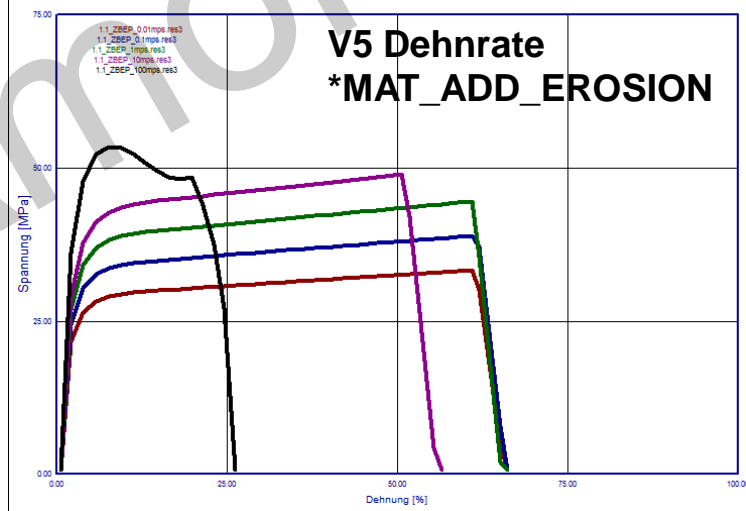
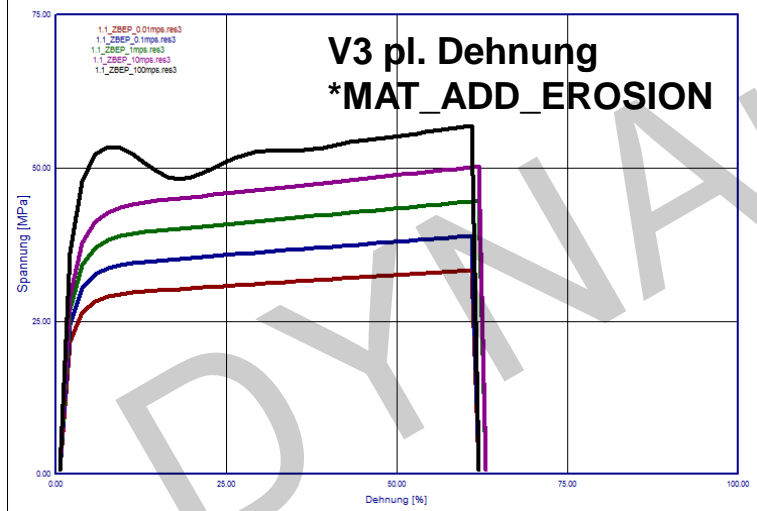
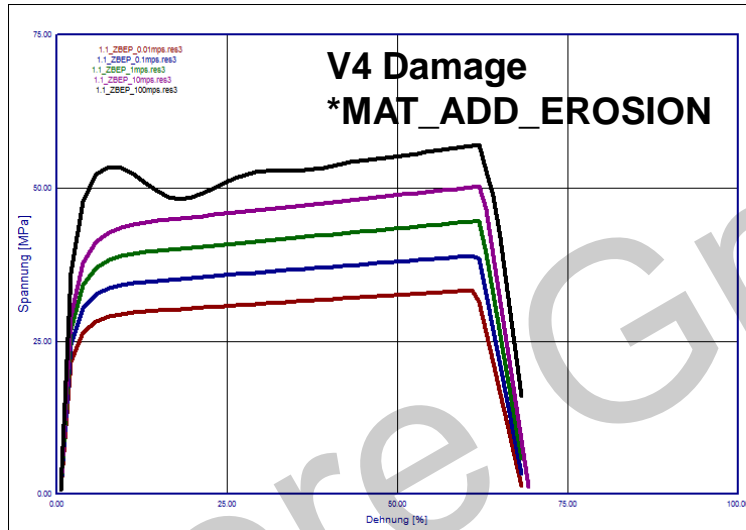
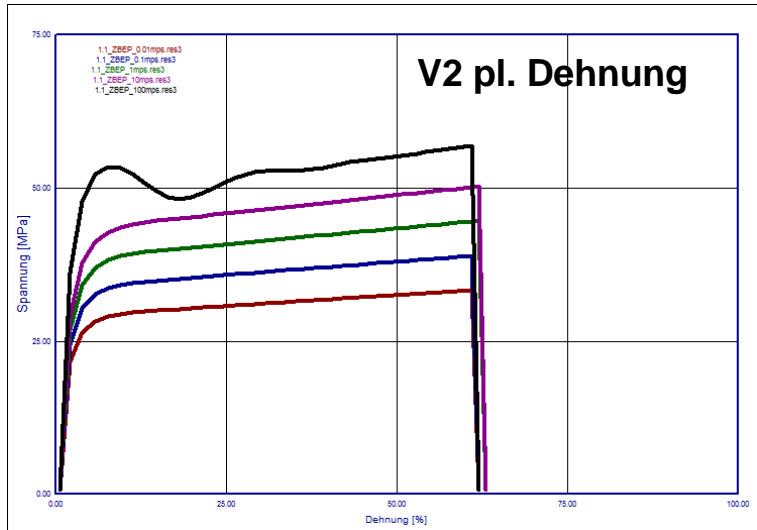
- Plastische Vergleichsdehnung  
z.B. **MAT\_24: \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY**
- Plastische Vergleichsdehnung mit Schädigung  
z.B. **MAT\_81: \*MAT\_PLASTICITY\_WITH\_DAMAGE**
- Dehnratenabhängiges Vergleichskriterium  
z.B. **MAT\_19: \*MAT\_STRAIN\_RATE\_DEPENDENT\_PLASTICITY**  
oder **MAT\_124: \*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:

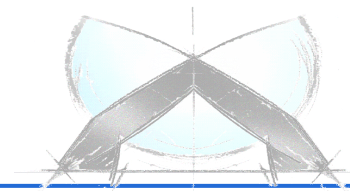
- Duktiles Kriterium:  $\varepsilon_D^P = \varepsilon_D^P(\eta, \dot{\varepsilon}^P)$
- Schub Kriterium  $\varepsilon_D^P = \varepsilon_D^P(\theta, \dot{\varepsilon}^P)$
- Instabilitätskriterium  $\varepsilon_D^P = \varepsilon_D^P(\alpha, \dot{\varepsilon}^P)$

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

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

- 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
```

Reference of MAT\_ADD\_EROSION-card

\$ IDS: Ductile

```
$ DITYP P1 P2
$ 0 200
```

```
$ DETYP DCTYP Q1
$ 0 0.10
```

Definition of up to three criteria

\$ IDS: Shear ks=0.12

```
$ DITYP P1 P2
$ 1 210 0.12
```

```
$ DETYP DCTYP Q1
$ 0 0.1
```

- 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  $k_s$

\$ IDS: Instability MSFLD

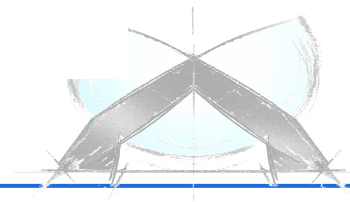
```
$ DITYP P1 P2
$ 2 220
```

```
$ DETYP DCTYP Q1
$ 0 0.1
```

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

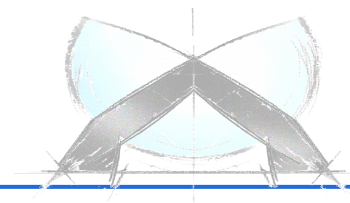
(abs(-3)) in the model.

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



# Einfluss Idealisierung

DYNAMOTECH GmbH

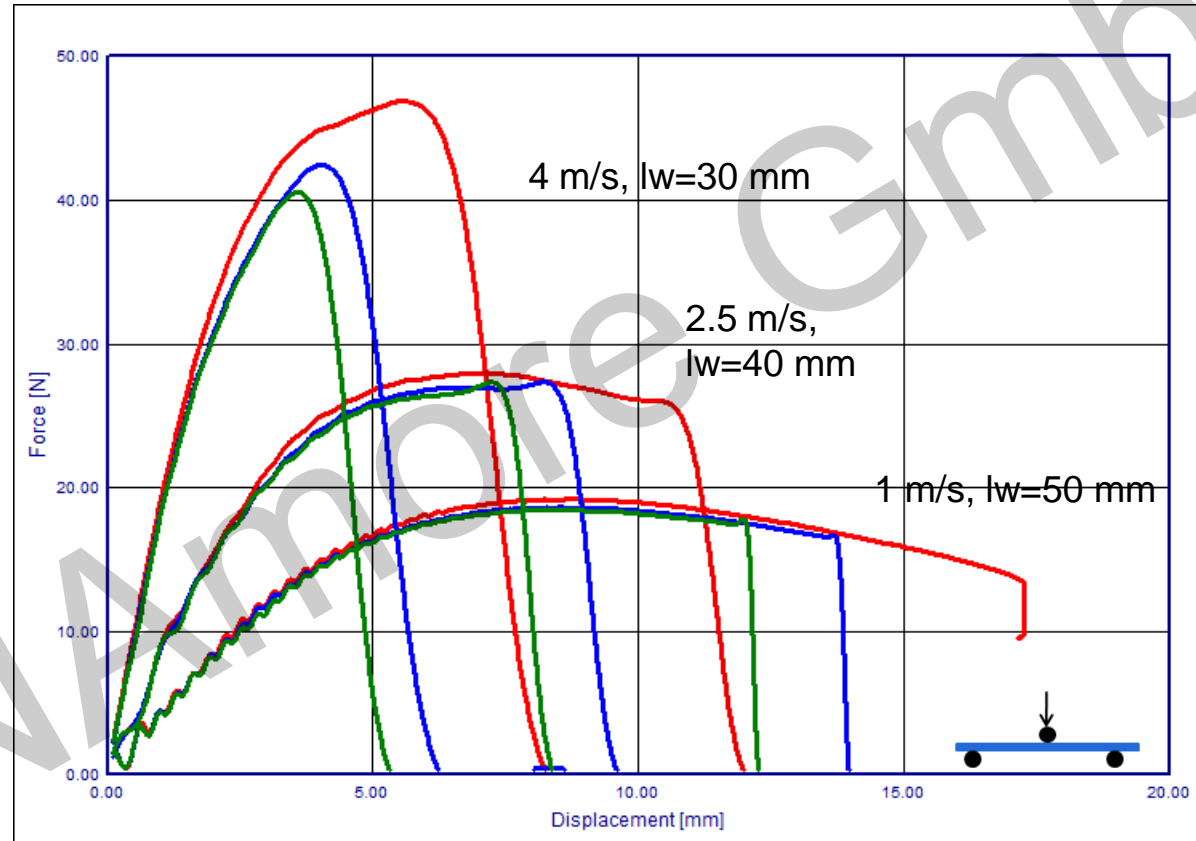




# Thermoplaste

Einflussgrößen: Elementgröße

- Beispiel: 3-Punkt-Biegung; \*MAT\_24 mit Versagensdehnung; Shell-Elemente; 5 Integrationspunkte;

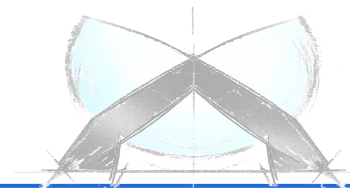


Hostacom

Elementgröße 2 mm

Elementgröße 4 mm

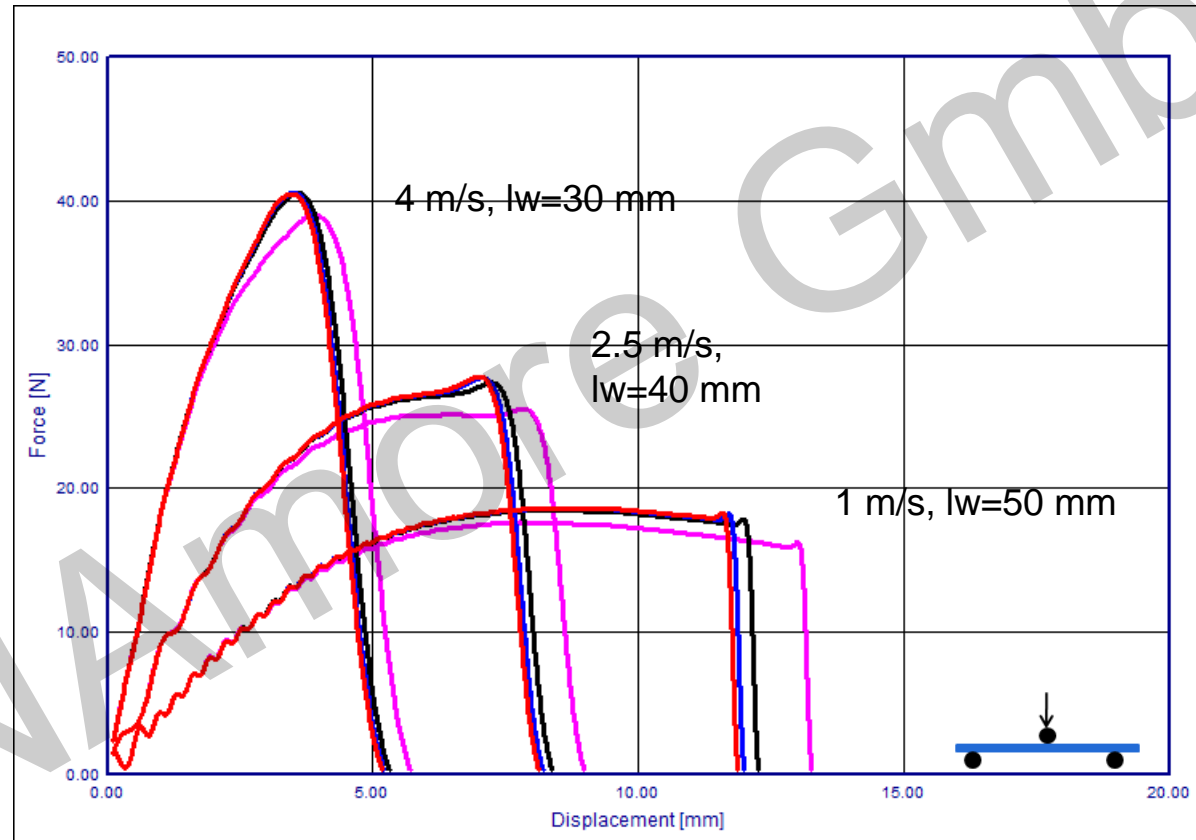
Elementgröße 8 mm



# Thermoplaste

Einflussgrößen: Integrationspunkte

- Beispiel: 3-Punkt-Biegung; \*MAT\_24 mit Versagensdehnung; Shell-Elemente; Elementlänge 2 mm



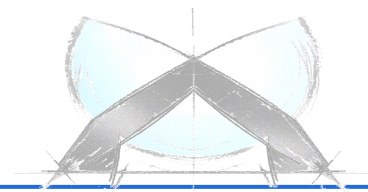
Hostacom

Elementtyp 16; 3 IP

Elementtyp 16; 5 IP

Elementtyp 16; 7 IP

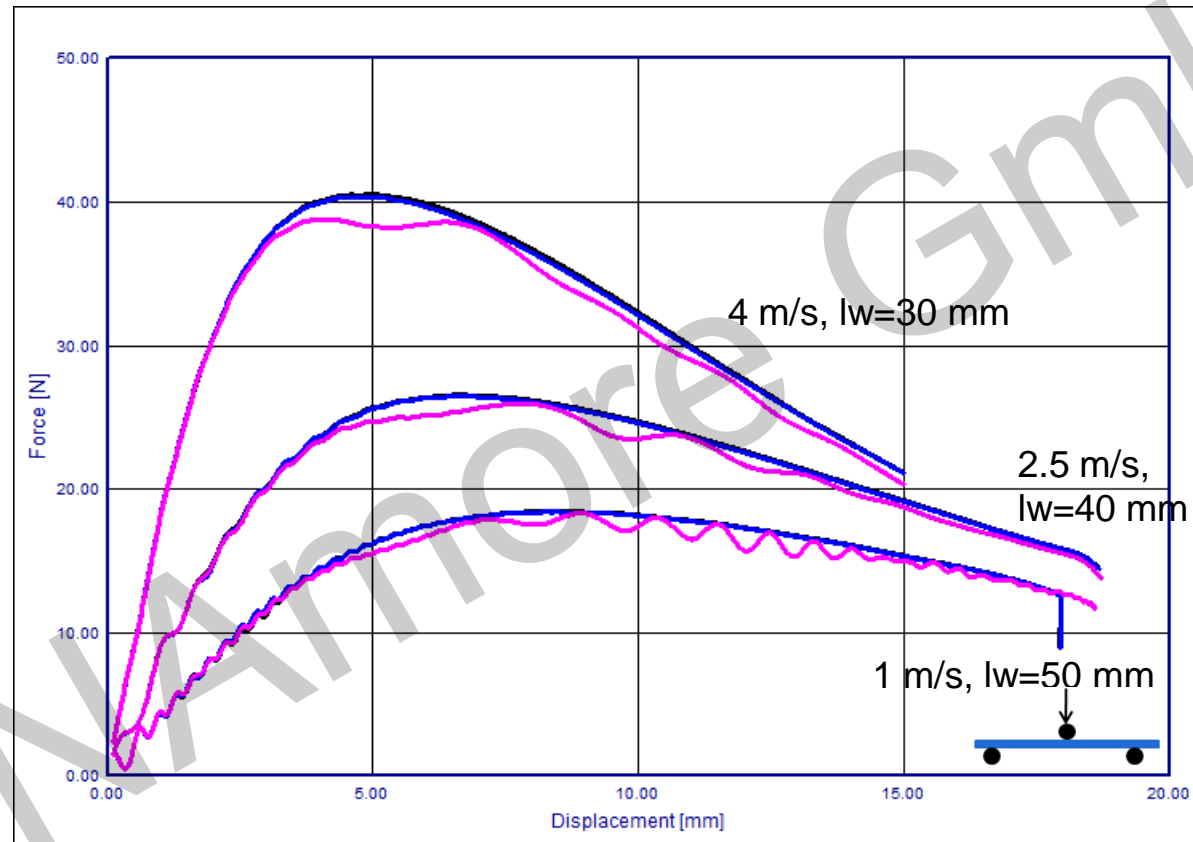
Elementtyp 16, 9 IP



# Thermoplaste

Einflussgrößen: Elementtyp Shell

➤ Beispiel: 3-Punkt-Biegung; \*MAT\_24; Shell-Elemente; 5 Integrationspunkte



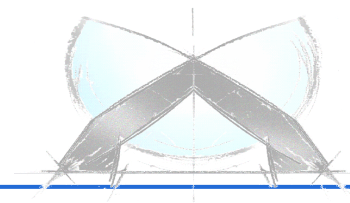
**Hostacom**

Elementlänge 2 mm

Elementtyp 16

Elementtyp 2

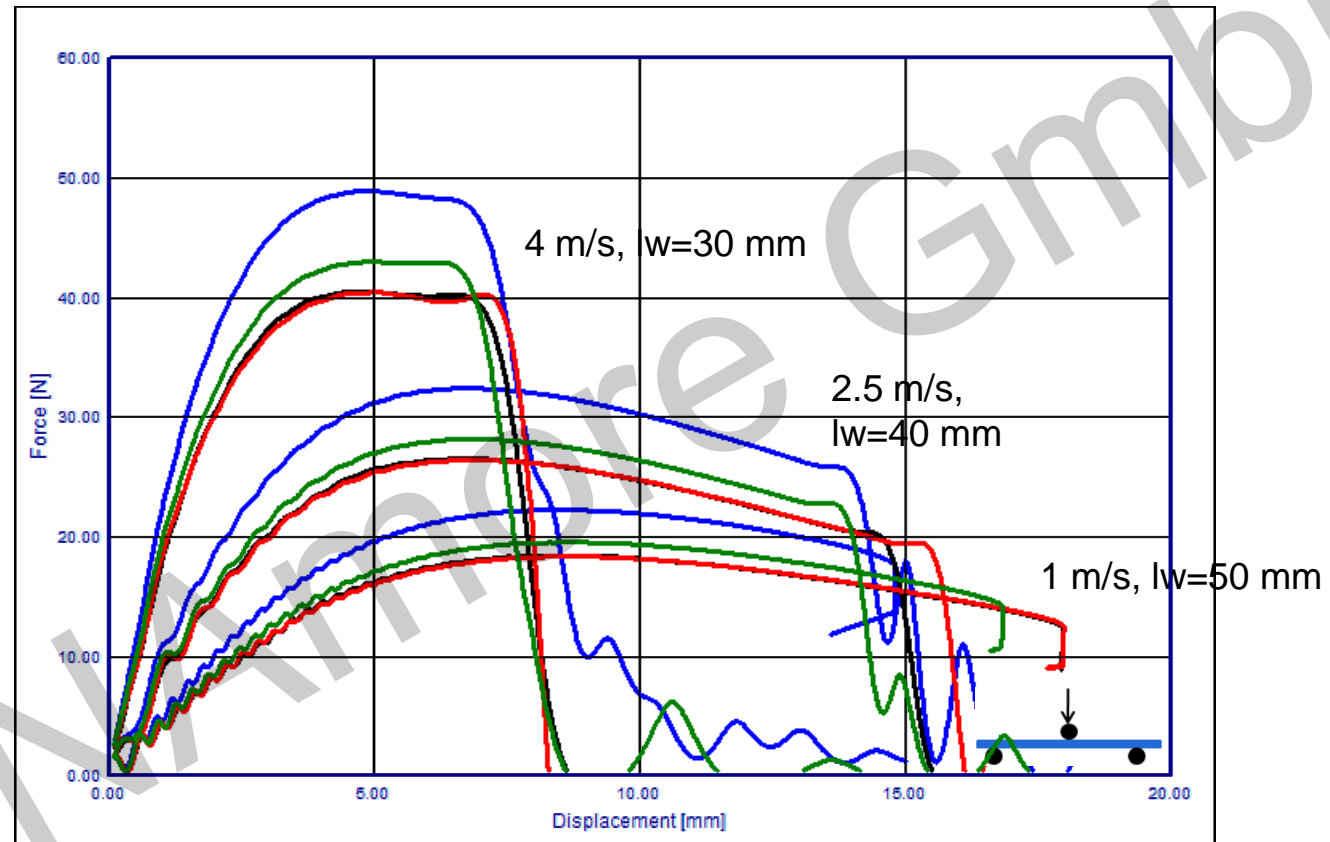
Elementtyp 2, mit Kontaktdämpfung und Knotendrillrotation-Einschränkung



# Thermoplaste

Einflussgrößen: Elementtyp

➤ Beispiel: 3-Punkt-Biegung; \*MAT\_24; Shell- vs. Solid-Elemente



**Hostacom**

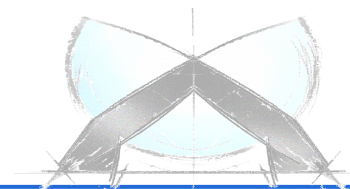
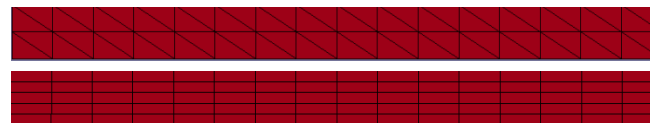
Elementlänge 2 mm

Shell-Elementtyp 16, 5 IP

Solid-Elementtyp 16; 2 Elemente über die Höhe

Solid-Elementtyp 2, 5 Elemente über die Höhe

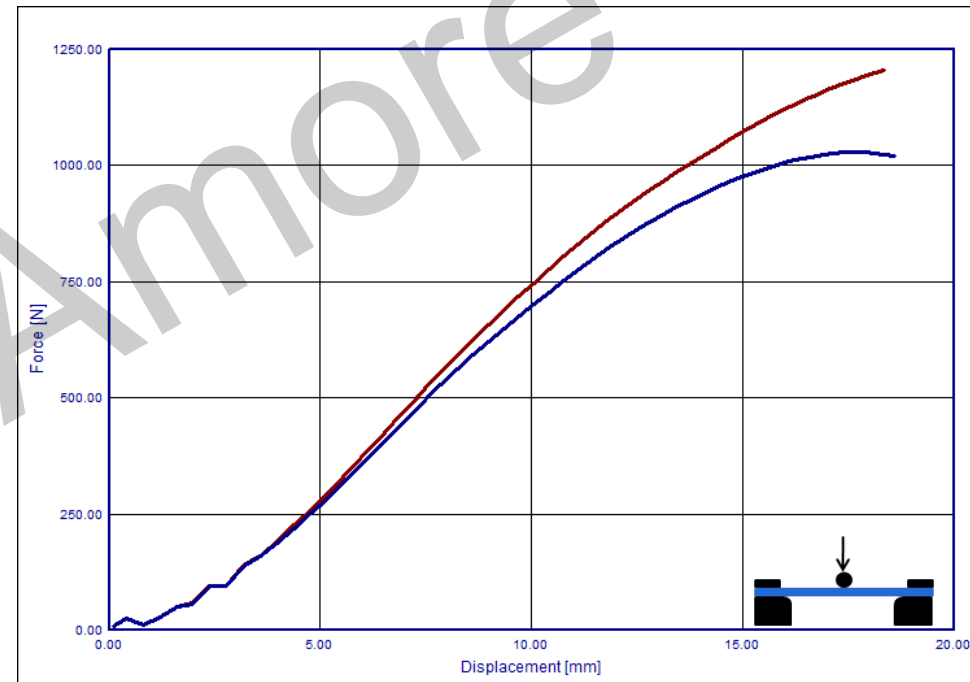
Solid-Elementtyp 2, 5 Elemente über die Höhe, 1mm Elementlänge



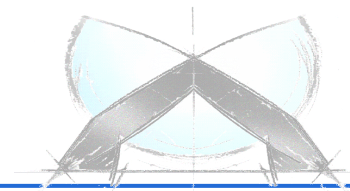
# Thermoplaste

## 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.



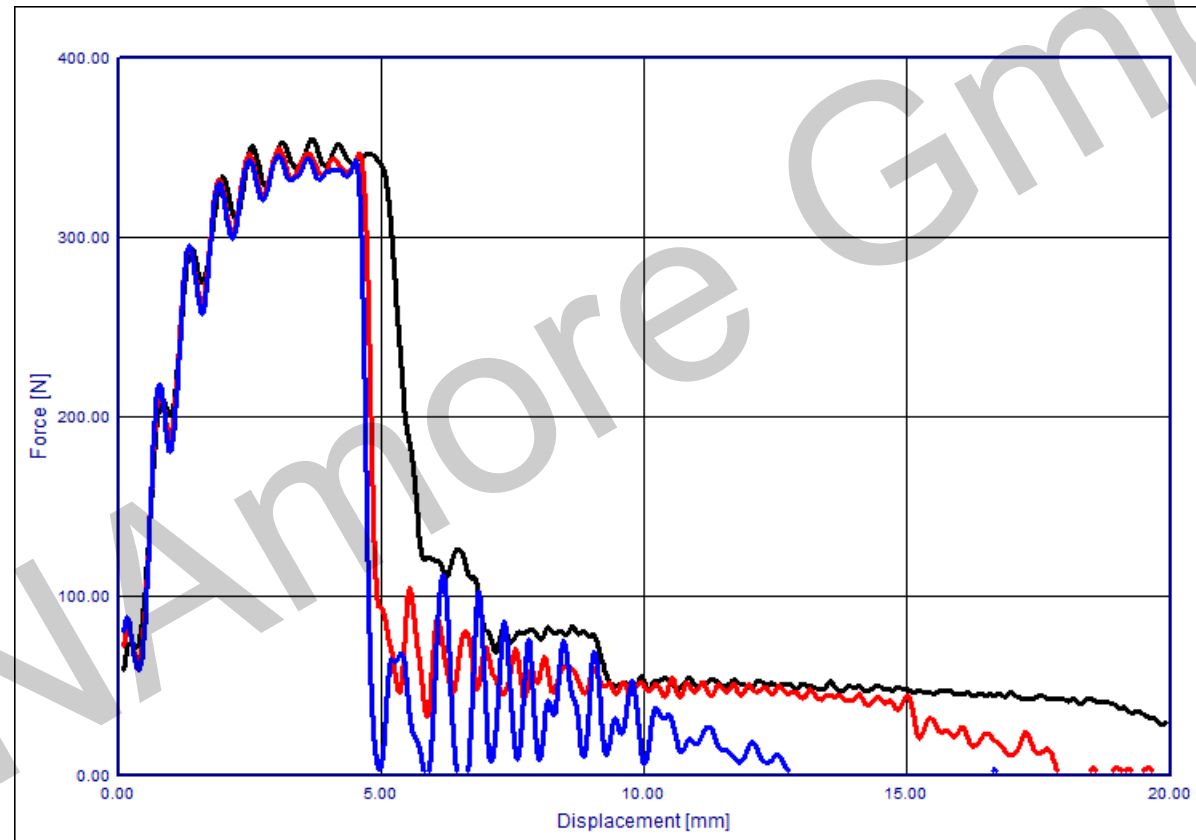
**Hostacom**  
 Elementlänge 2 mm, 5 IP  
**ISTUPD=0**  
**ISTUPD=1**



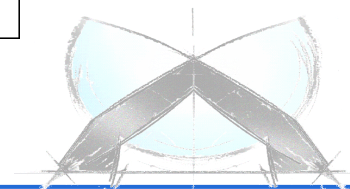
# Thermoplaste

Einflussgrößen: Elementgröße

- Beispiel: 3-Punkt-Biegung T-Probe; 2.5 m/s; \*MAT\_24 mit Versagensdehnung; Shell-Elemente; 5 IP



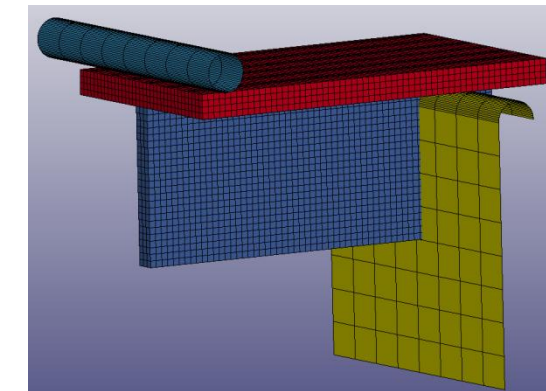
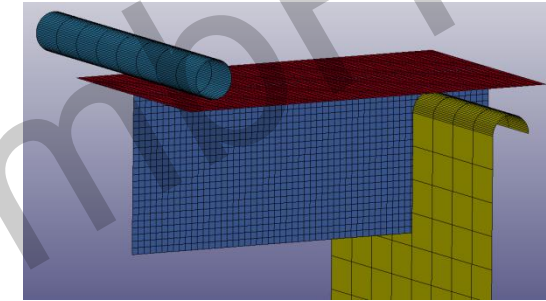
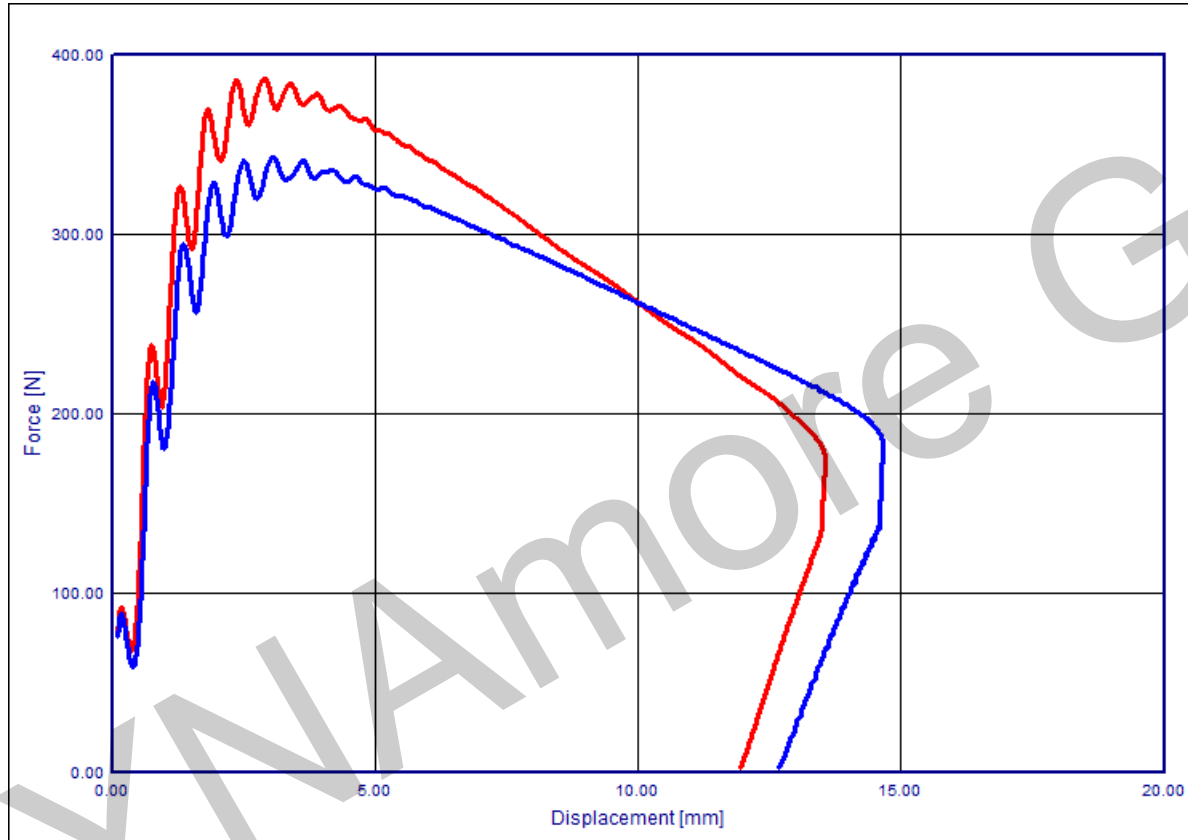
**Hostacom**  
 Elementgröße 4 mm  
 Elementgröße 2 mm  
 Elementgröße 1 mm



# Thermoplaste

Einflussgrößen: Idealisierung

➤ Beispiel: 3-Punkt-Biegung T-Probe; 2.5 m/s; \*MAT\_24; Shell- vs. Solid-Elemente

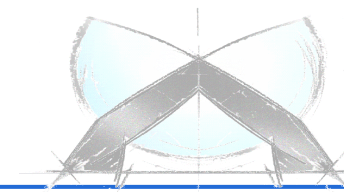


Hostacom

Elementgröße 0.5 mm

Solid-Elemente, Elementtyp 2

Shell-Elemente, Elementtyp 16

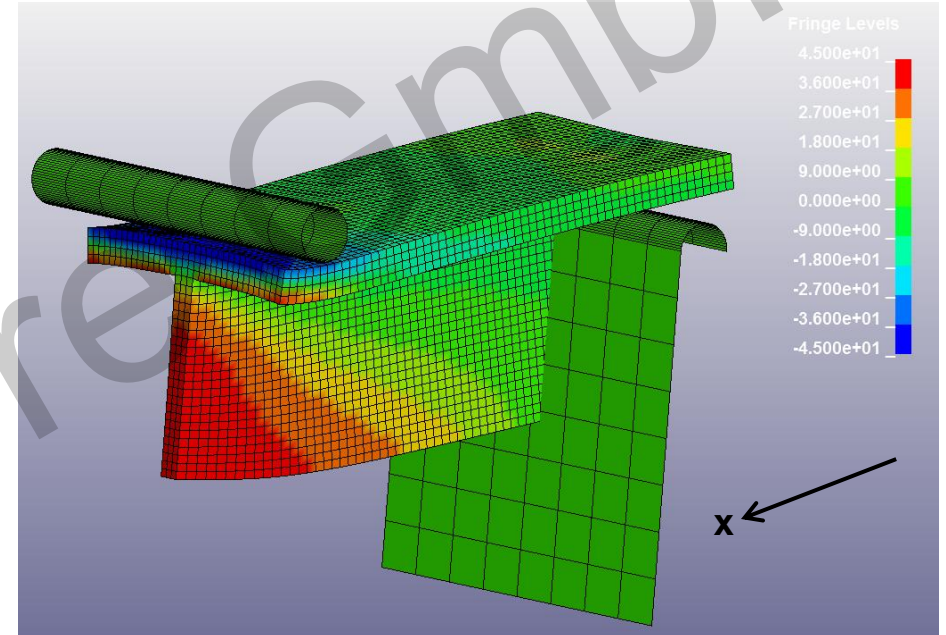
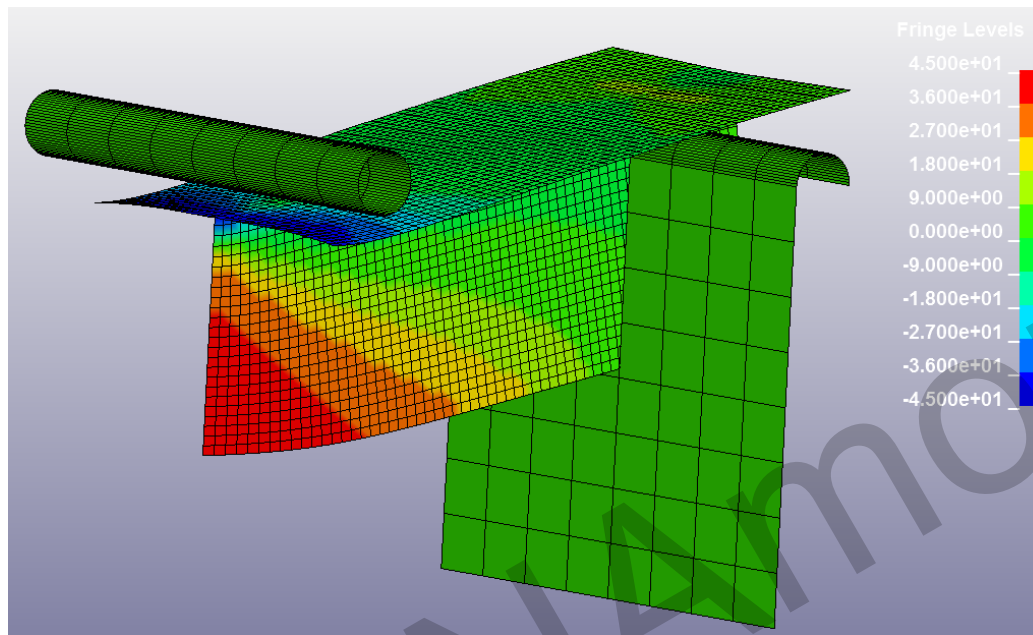


in physics we trust

# Thermoplaste

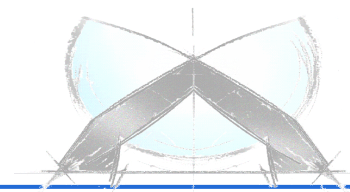
Einflussgrößen: Idealisierung

➤ 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)

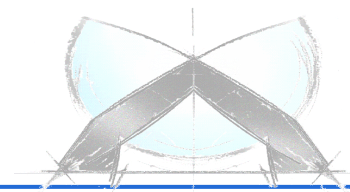




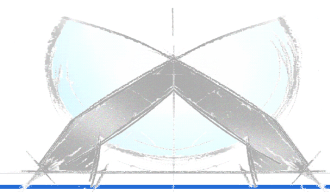
# Thermoplaste

## Zusammenfassung

- 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 (Dreiaxsigkeit, Dehnratenabhängigkeit)



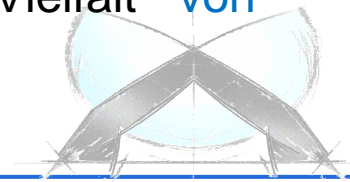
# Vorführung



# 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:

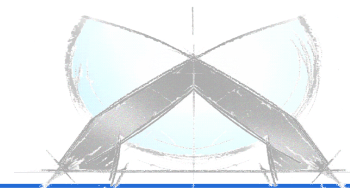
### **Versagen von Thermoplasten: Teil 1 - Charakterisierung, Versuche**

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)

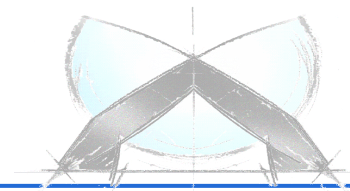
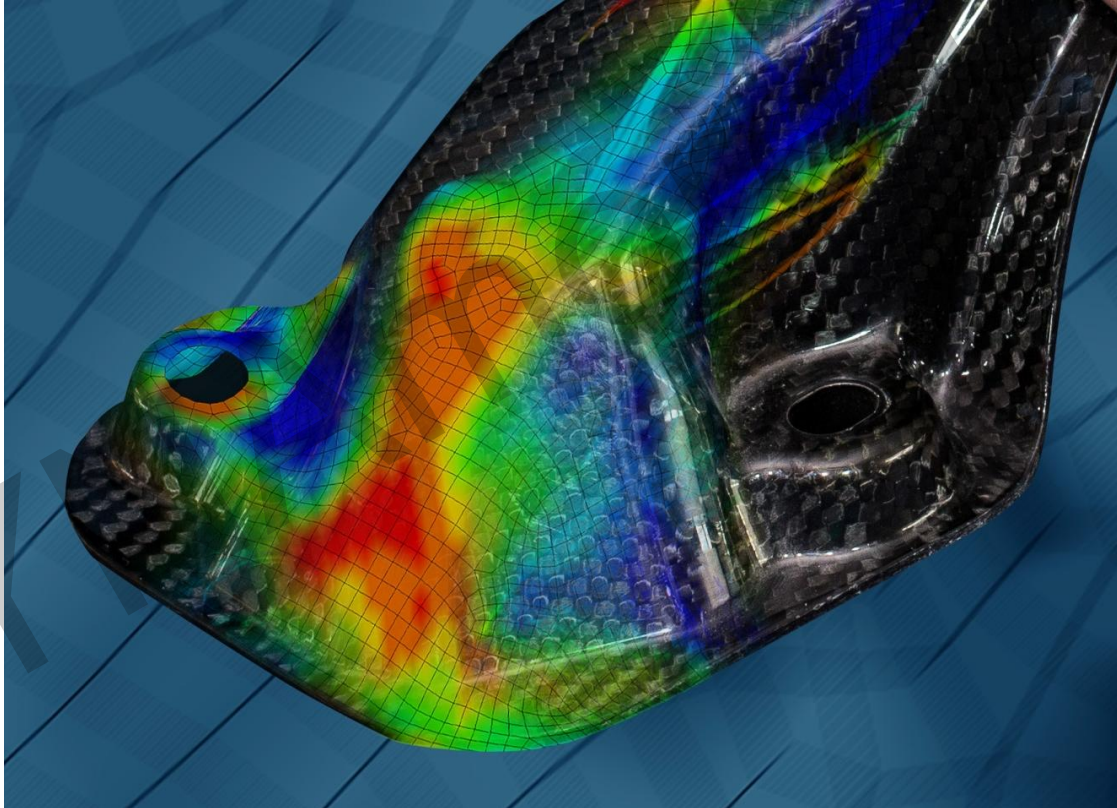


# Veranstaltungshinweis

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

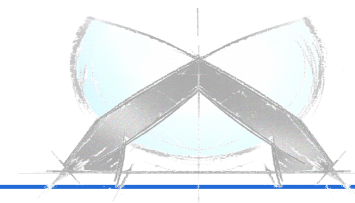
Das Thema heuer lautet „**Leichtbau und Composites**“.

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





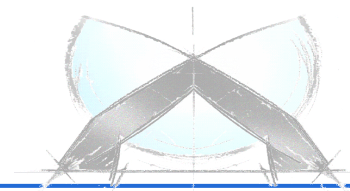
4a engineering GmbH  
Industriepark 1  
A-8772 Traboch  
reithofer@4a.co.at  
++43 (0) 664 80106 601



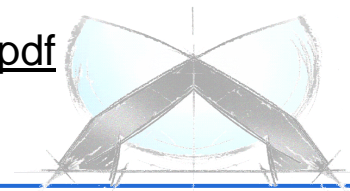
# 4a impetus

## Literaturnachweis

- [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](http://technologietag.4a.co.at/images/tt2014/s2v1_Reithofer.pdf)

DYNAMORE GmbH

