



**Mehrachsige Beanspruchung  
von thermoplastischen  
Konstruktionsschaumstoffen**

**Dr.-Ing. Markus Münch**

**Dr.-Ing. Stephan Rohde**

**Prof. Dr.-Ing. Michael Schlimmer**

**Institut für Werkstofftechnik**

**Universität Kassel**

# Vortragsinhalte

---

- 1 Motivation und Problemstellung**
- 2 Probenentwicklung und experimenteller Aufbau**
- 3 Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung**
- 4 Beschreibung des Versagensverhaltens von Schaumstoffen**
- 5 Numerische Simulation von Schaumstoffen**
- 6 Zusammenfassung**

# Motivation und Problemstellung

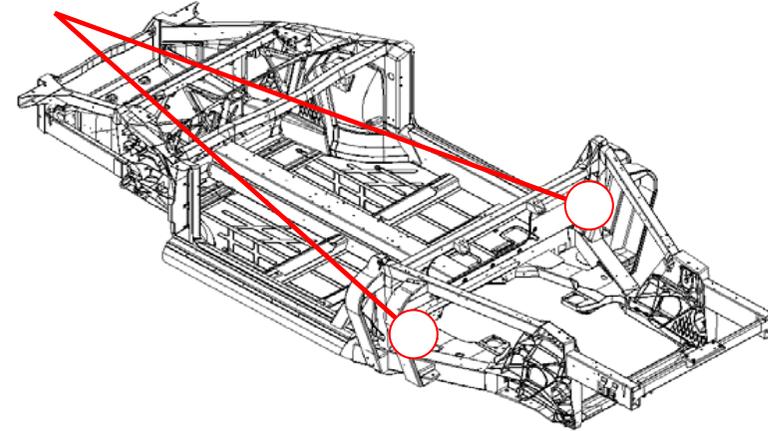


Quelle: BASF

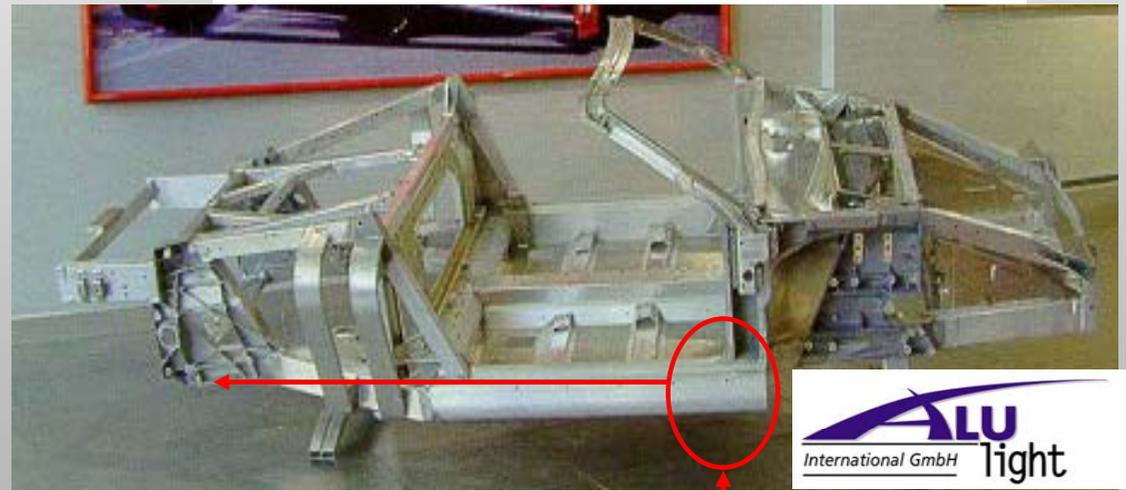
**Coupé**



**Al-Schaum**



**Cabrio**



## Motivation und Problemstellung

---



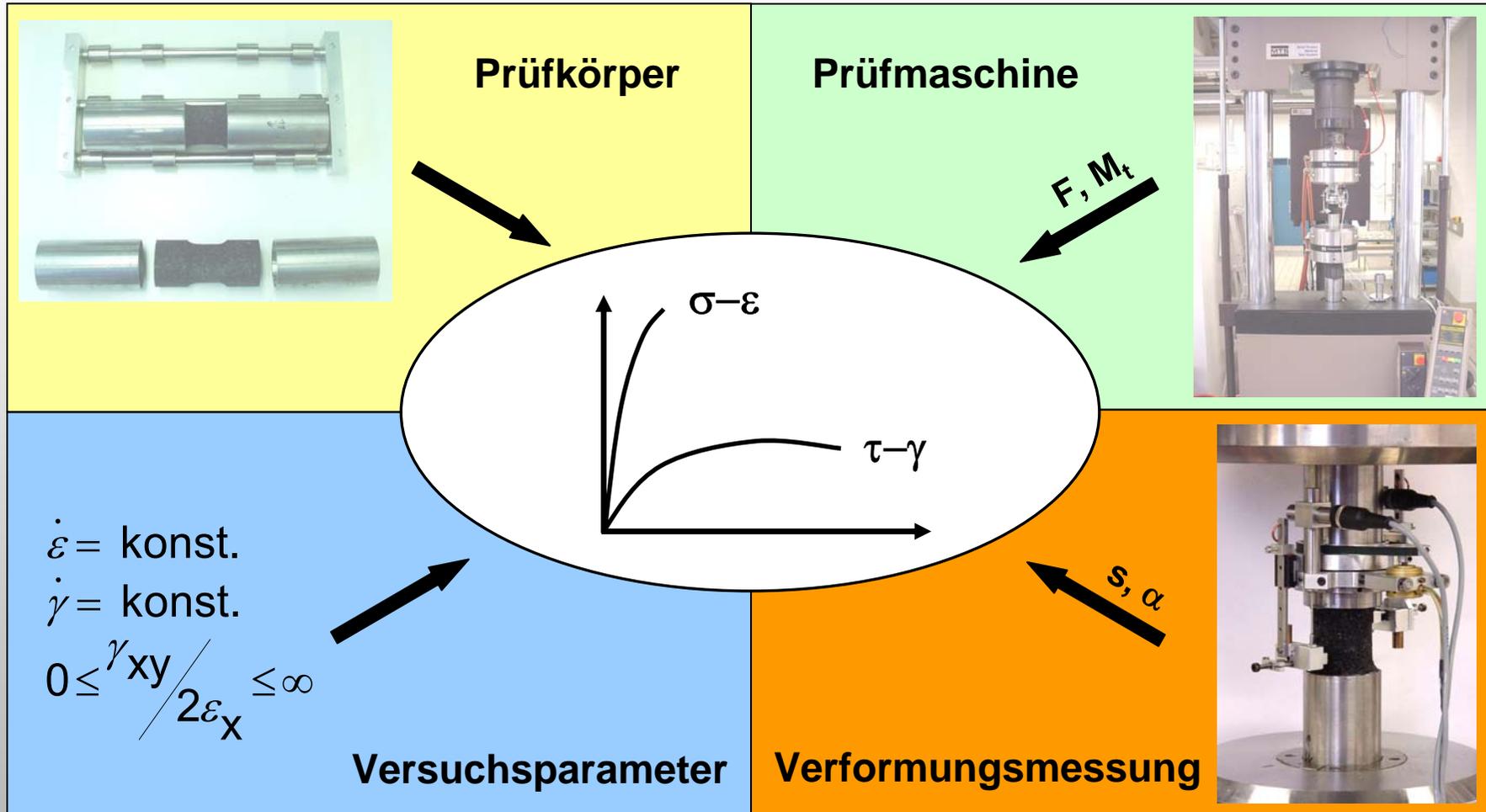
## Experimentelle Ermittlung des mechanischen Verhaltens

### Bisher

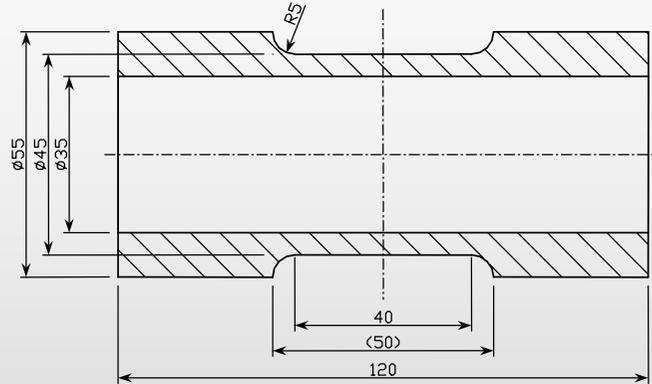
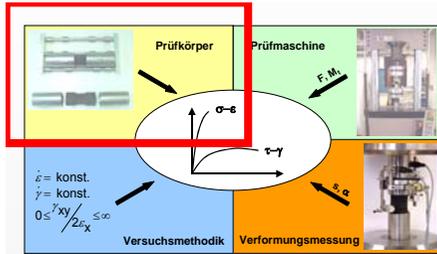
- Überwiegend einachsige Druckversuche
- Unterschiedliche und uneinheitliche Probengeometrien (Quader, Würfel, Schulterproben), werkstoffmechanisch oft nicht sinnvoll
  - keine definierte, makroskopisch homogene Spannungszustände
- Keine lokale Verformungsmessung
- Einspannung des Probekörpers in die Prüfmaschine problematisch
- Versuchsregelung nur über Traversengeschwindigkeit

### Angestrebt

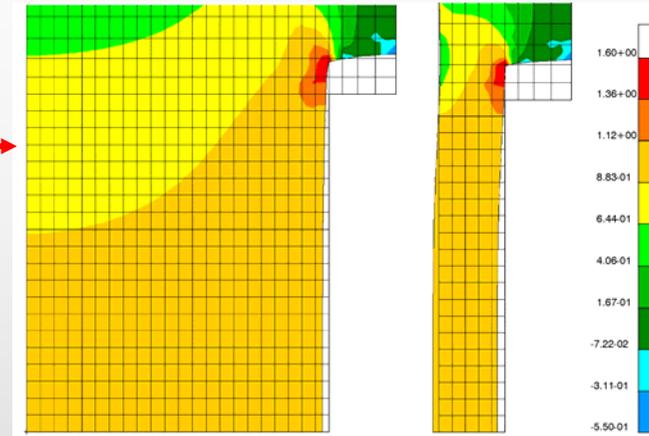
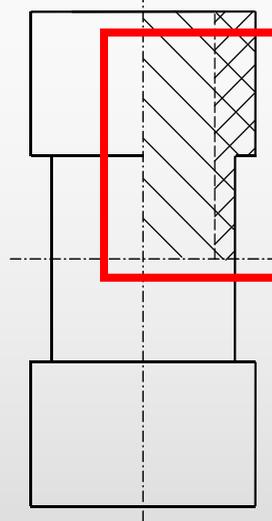
- Eine Probenform für alle Versuchsarten
  - Zug, Druck, Schub und Kombinationen
  - Kurzzeit-, Langzeit-, Schwingbeanspruchung
- Verformungsmessung, Spannung-Verzerrung-Verhalten auch bei kombinierten Beanspruchungsarten
- Versuche mit konstanter Dehnungs- und Gleitungsgeschwindigkeit



## Experimenteller Aufbau



Zylindrische Hohl- oder Vollprobe



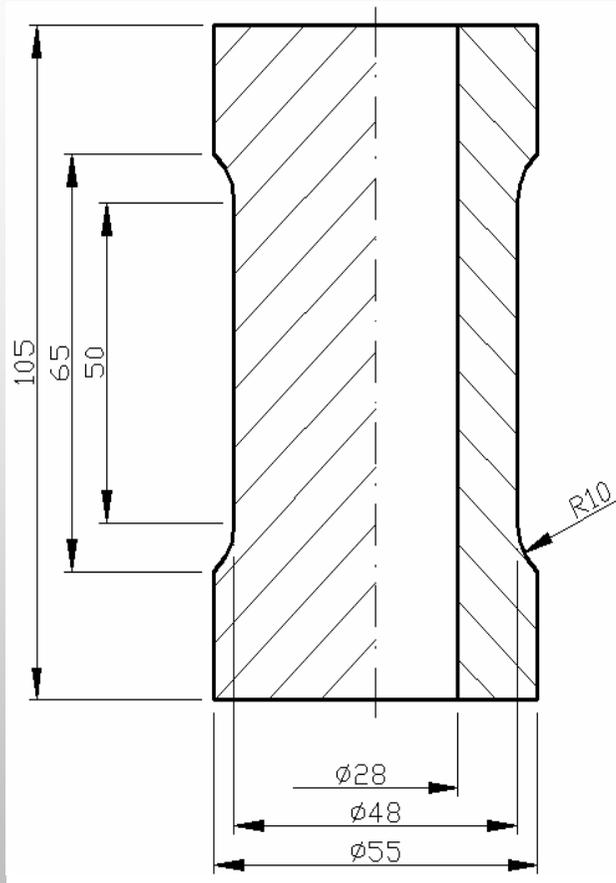
Vollzylinder    Hohlzylinder



### Anforderungen:

- homogene Spannungsverteilung im Prüfquerschnitt
- Möglichkeit zur Erzeugung mehrachsiger Spannungszustände
- Probenherstellung mit Hilfe spanabhebender Bearbeitungsverfahren
- hohe Oberflächenqualität (optische Verformungsmessung)
- Probenherstellung im Schaumwerkzeug mit Schäumhaut

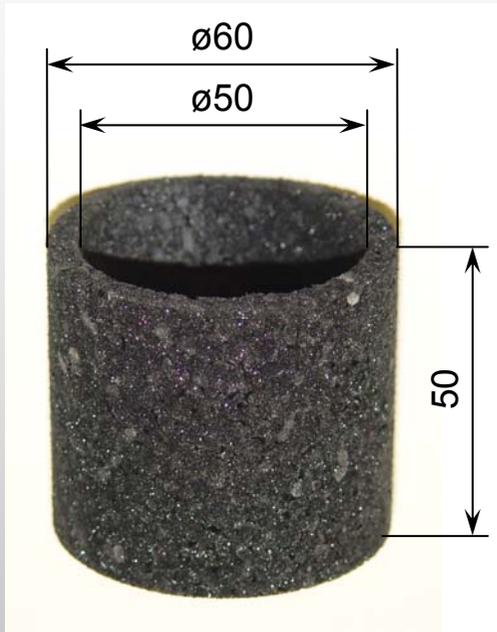
# Probengeometrie und Versuchsaufbau



Fügevorrichtung zur Herstellung  
des Schaumstoffprüfkörpers durch  
Kleben in Metallhülsen:  
**Überlappungsklebung**

- Legierung:  $AlMgSi0,5$
- Halbzeugmaße:  $\varnothing 60 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$

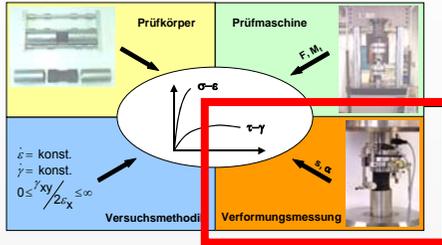
## Gerade zylindrische Hohlprobe



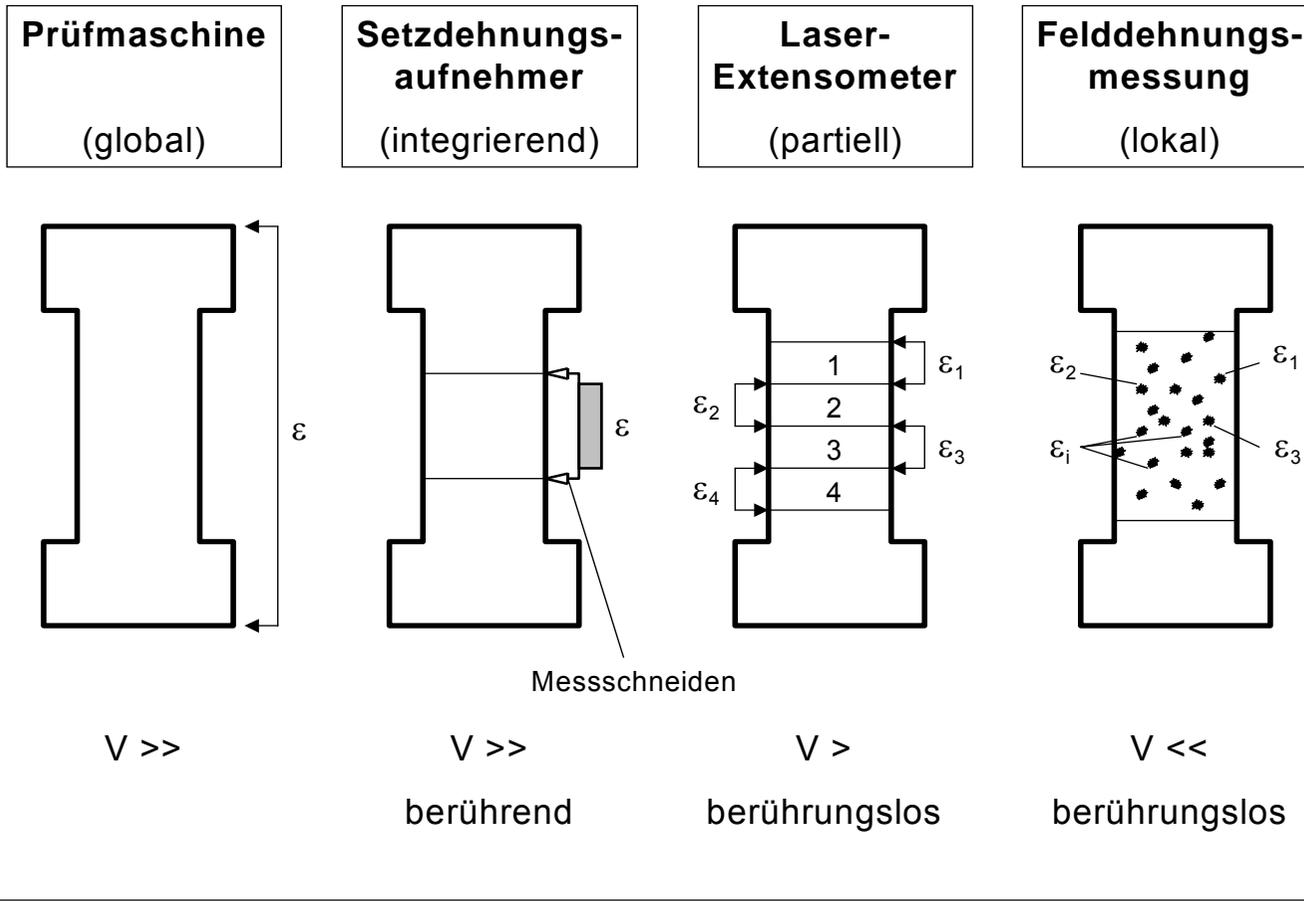
Fügevorrichtung zur Herstellung  
des Schaumstoffprüfkörpers durch **Stumpfkleben**

## Rechteckprobe

- Querschnitt 40 mm x 30 mm
- Zugprobe: 80 mm lang
- Druckprobe: 40 mm lang



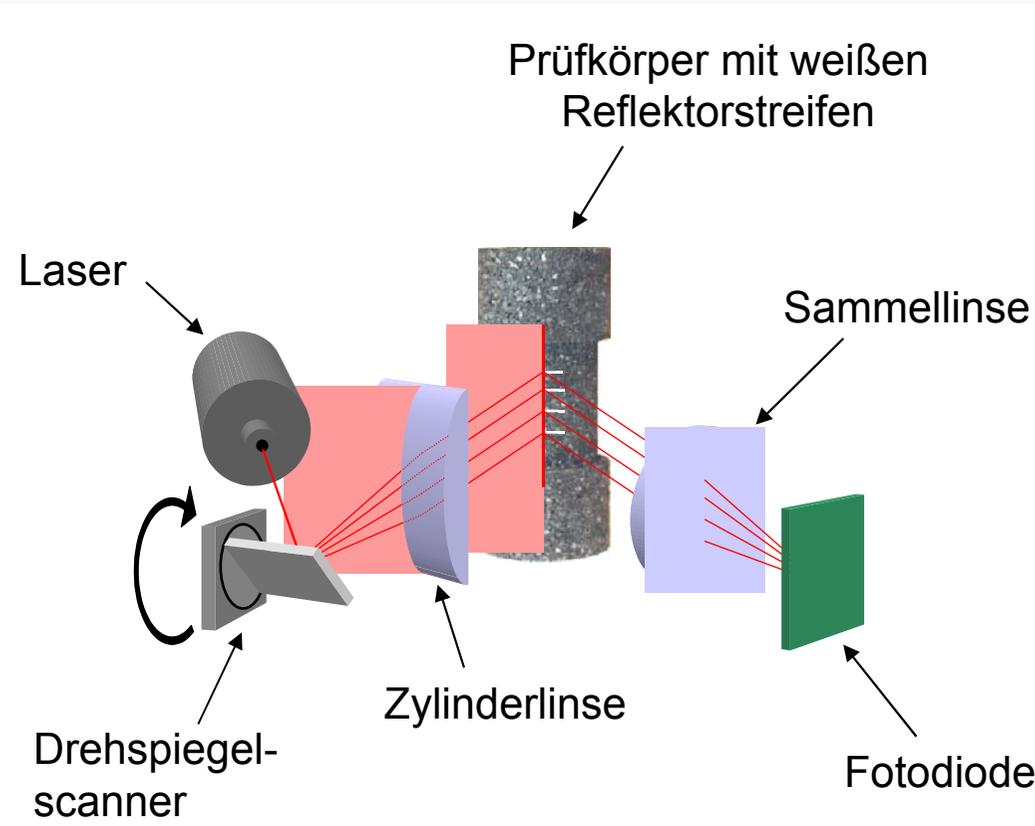
## Experimenteller Aufbau





- **Messung der Verformungen im Bereich homogener Verzerrungen**
- **axial und torsional entkoppelte Messung**
- **Applikation des Verformungsaufnehmers an Einspannhülsen**

**Berührende, integrale Verformungsmessung**



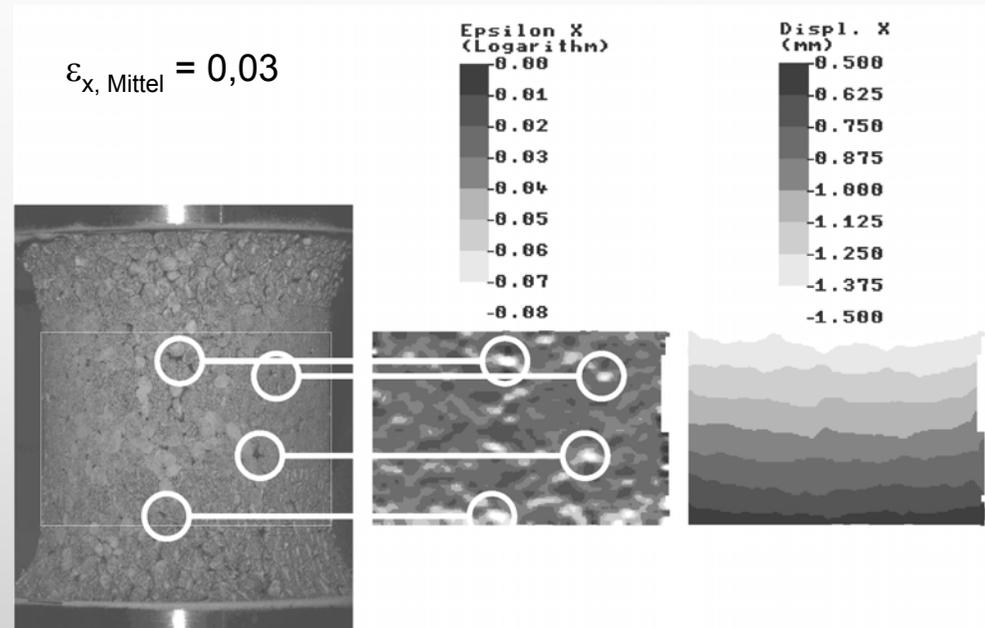
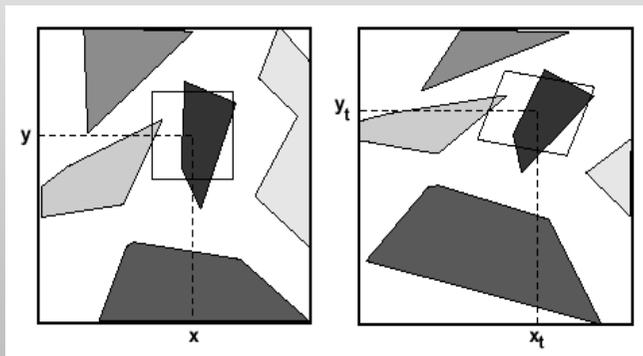
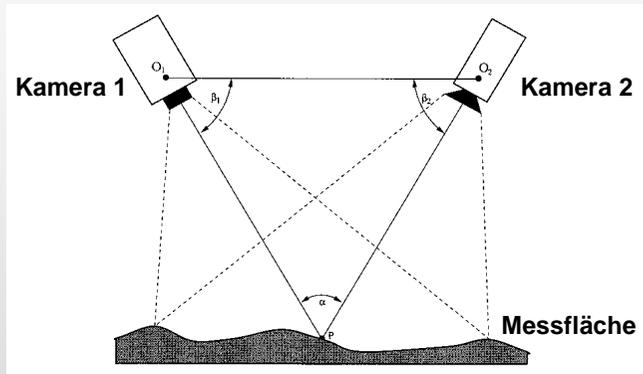
**Vorteile:**

- berührungslos
- partielle Verformungsmessung
- echtzeitfähig

**Nachteil:**

- nur axiale Verformungsmessung

**Berührungslose, partielle Verformungsmessung**

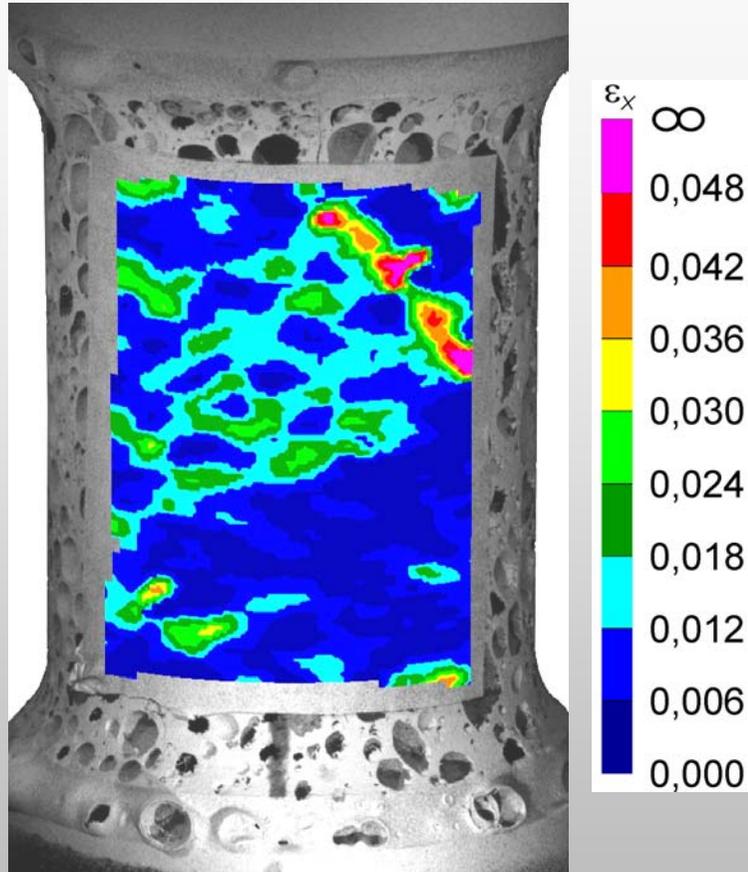


- berührungslos
- lokale Verformungsmessung in Axial- und Querrichtung
- nicht echtzeitfähig

**Berührungslose, lokale Verformungsmessung**

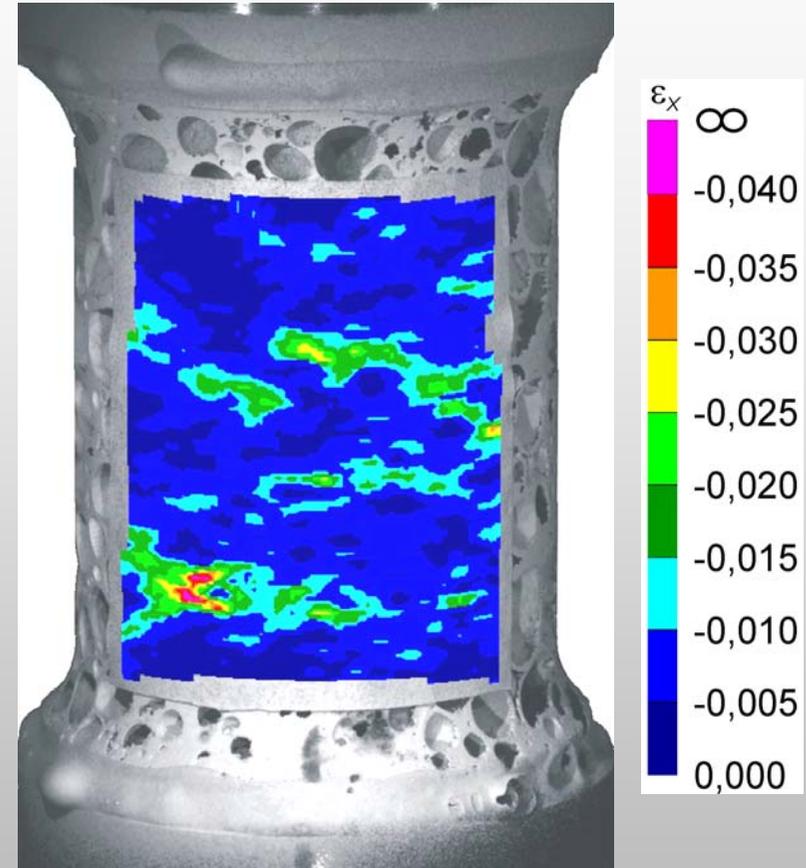
# Versuchsergebnisse Aluminiumschaum

## Zugbeanspruchung



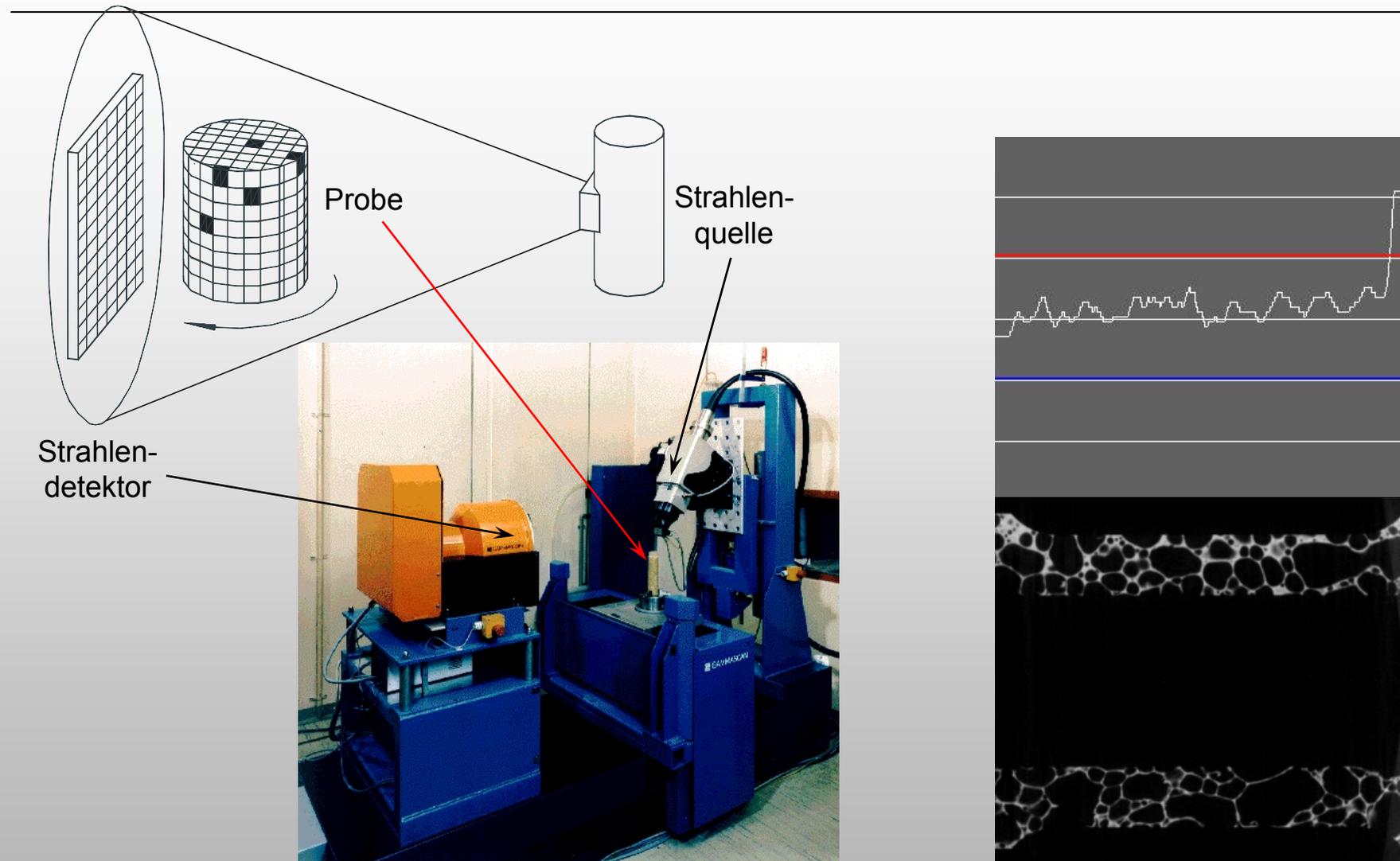
$\epsilon = 0,012$   
 $\sigma = 9,96 \text{ MPa}$

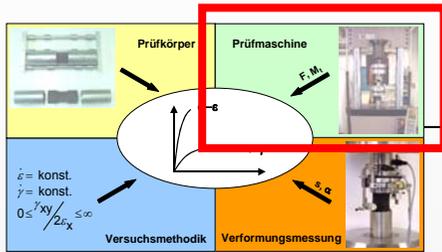
## Druckbeanspruchung



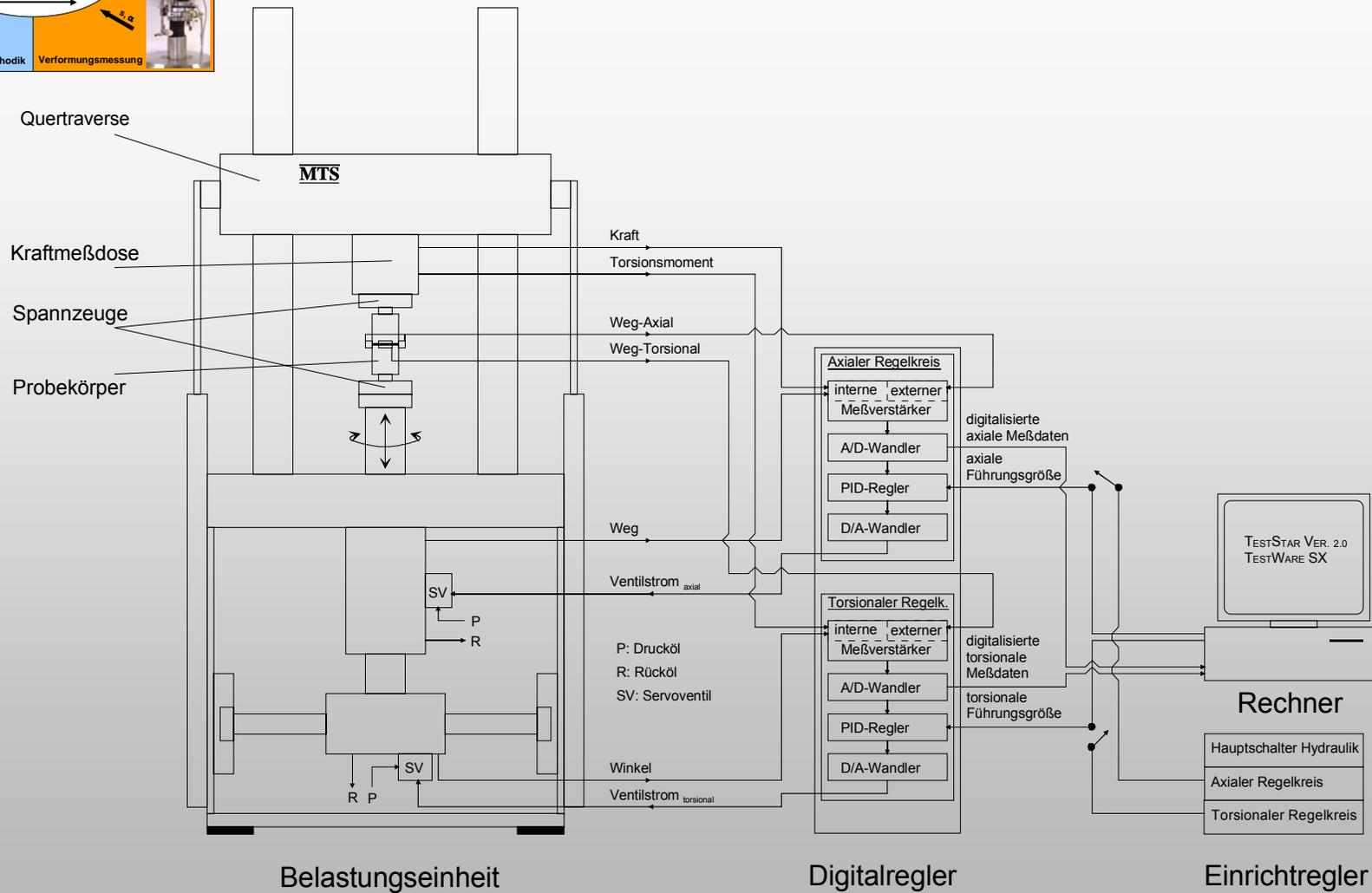
$\epsilon = -0,009$   
 $\sigma = -9,86 \text{ MPa}$

# Versuchsergebnisse Aluminiumschaum

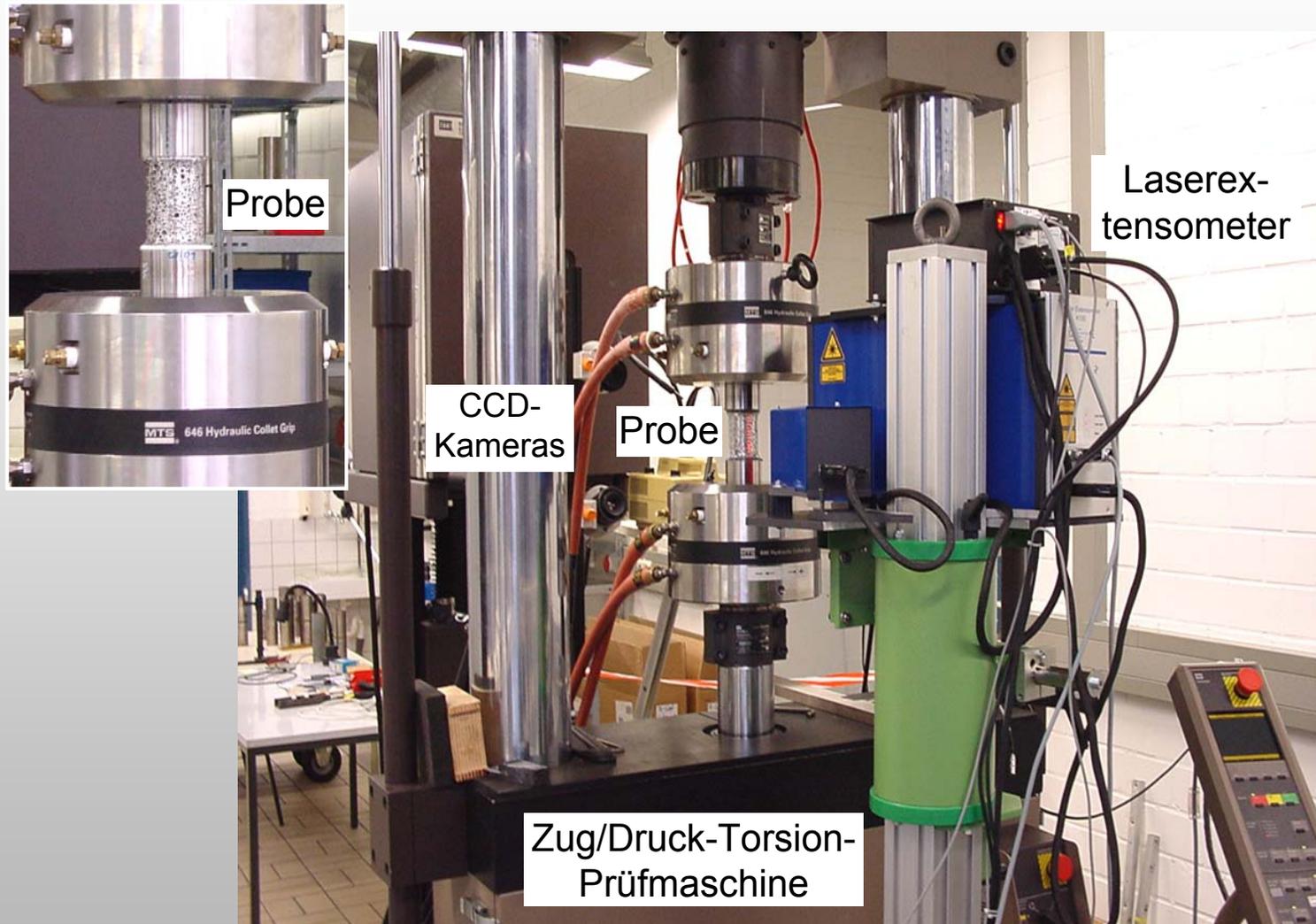




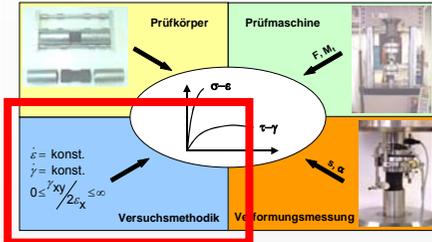
## Experimenteller Aufbau



# Probengeometrie und Versuchsaufbau



Versuchsaufbau zur ein- und mehrachsigen Prüfung von zylindrischen Proben



## Experimenteller Aufbau

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0}$$

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_0)$$

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t, T, \dots)$$

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_p}$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\pi}{180^\circ} \frac{r}{l_0 + \Delta l} \varphi\right)$$

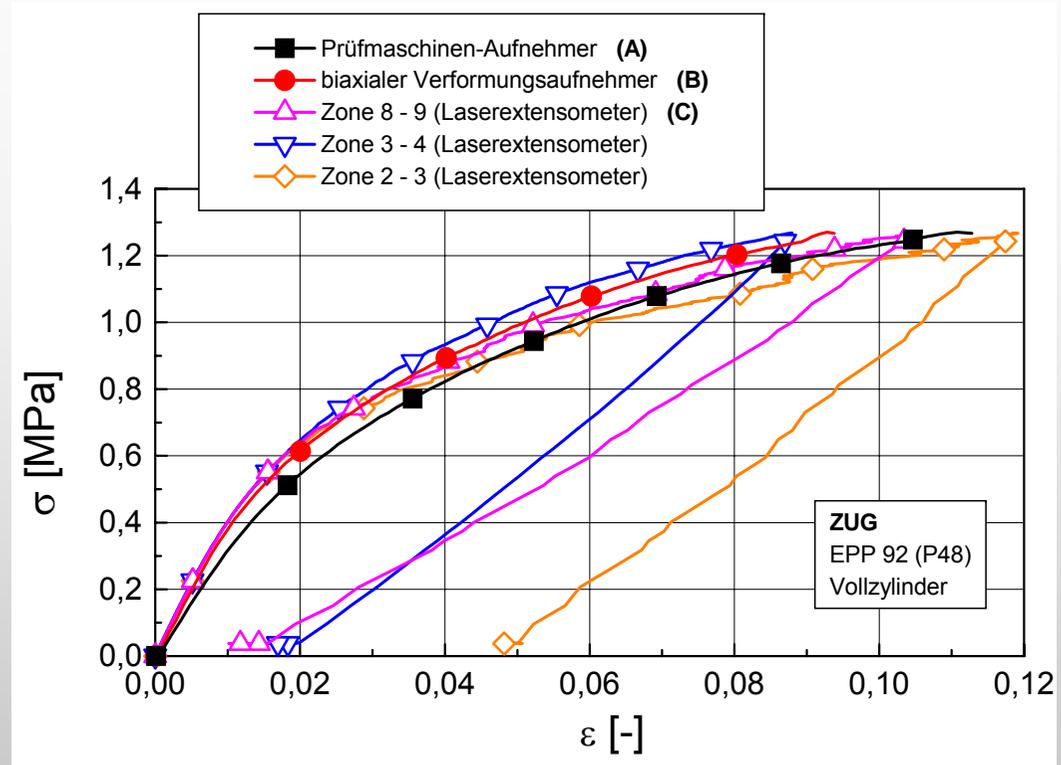
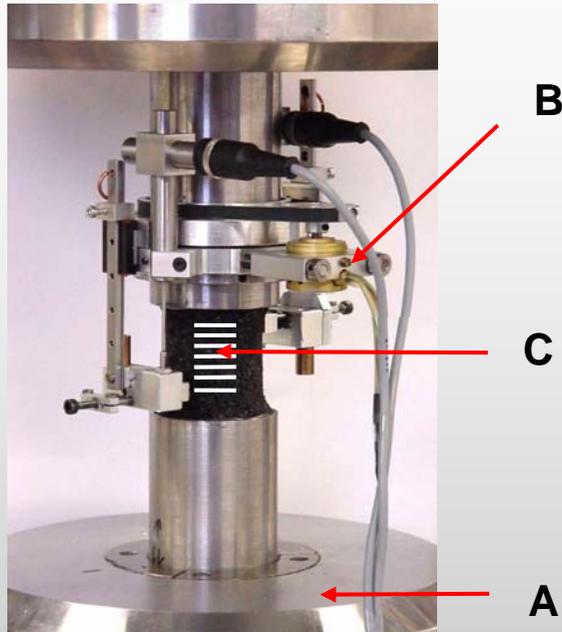
$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \text{konst.} : \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \text{konst.}, \frac{d\gamma_{xy}}{dt} = \text{konst.}$$

### Verzerrungskombinationen (Gleitungs-Dehnungsverhältnisse) der untersuchten Verzerrungszustände

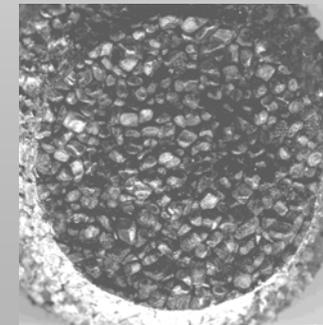
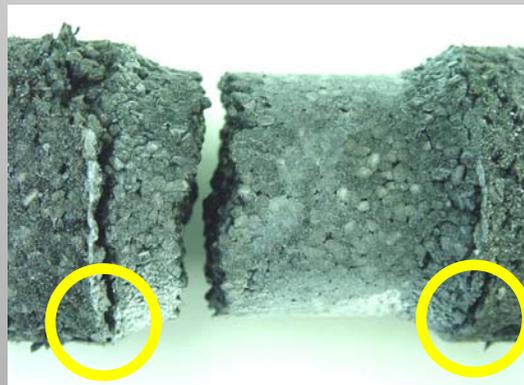


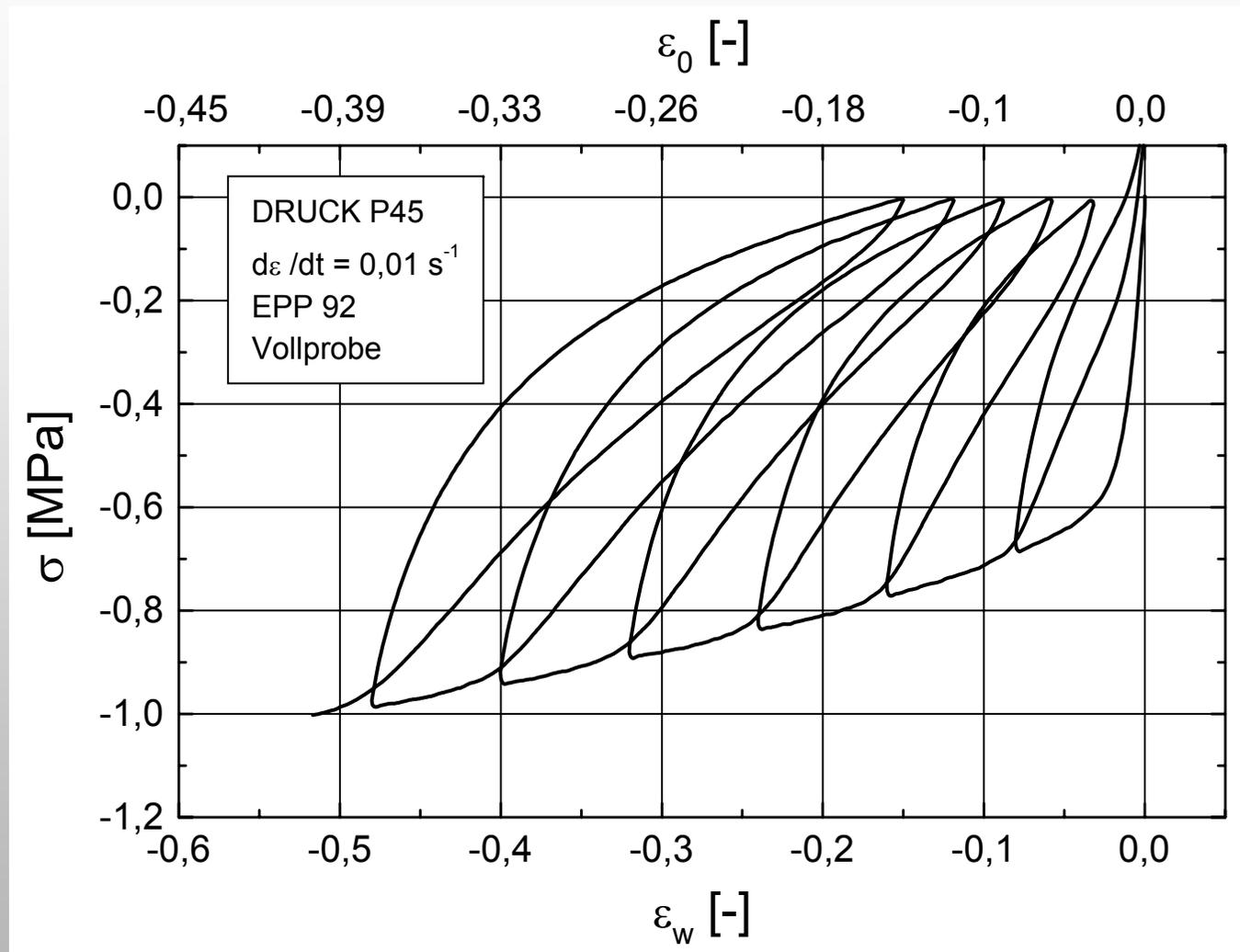
	ZUG / DRUCK	TORSION	Verzerrungs-kombination G3E6	Verzerrungs-kombination G6E3
$\gamma_{xy}/2$	0	1	1/3	2/3
$\varepsilon_x$	1	0	2/3	1/3
$\gamma_{xy}/2\varepsilon_x$	0	$\rightarrow \infty$	0,5	2

# Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung

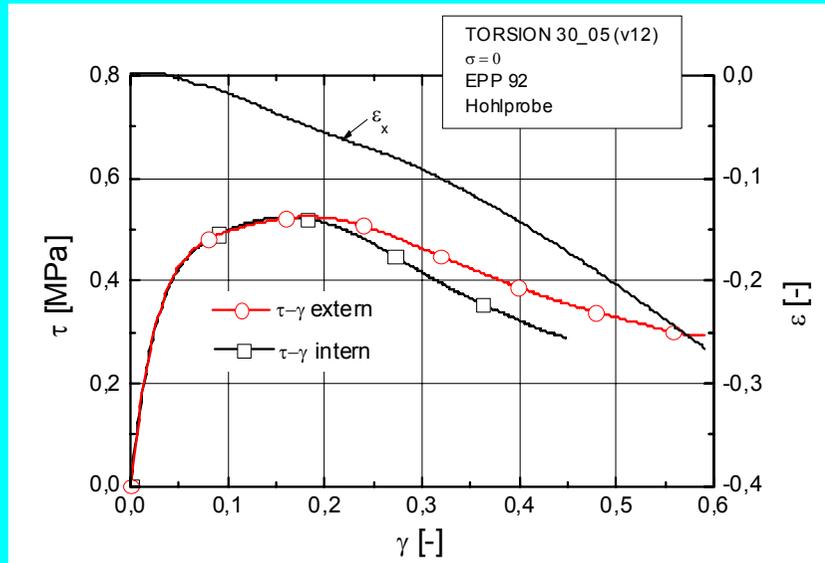


## EPP unter Zugbeanspruchung



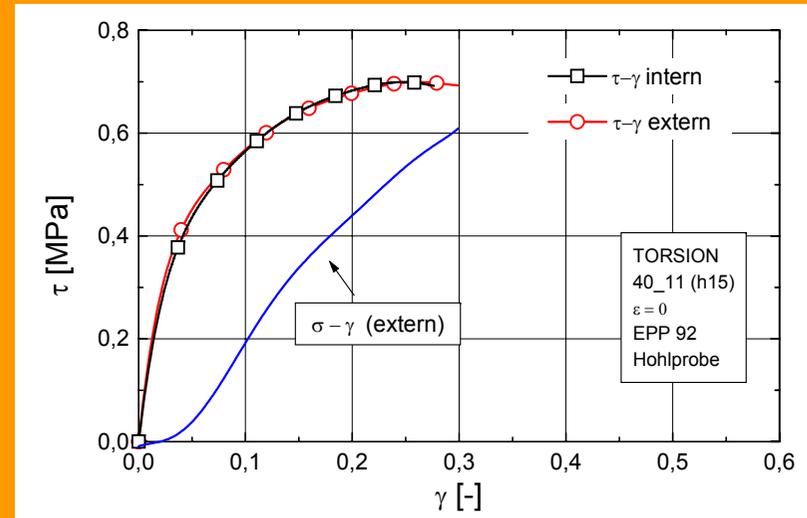


# Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung



pure shear:

$\sigma = 0$



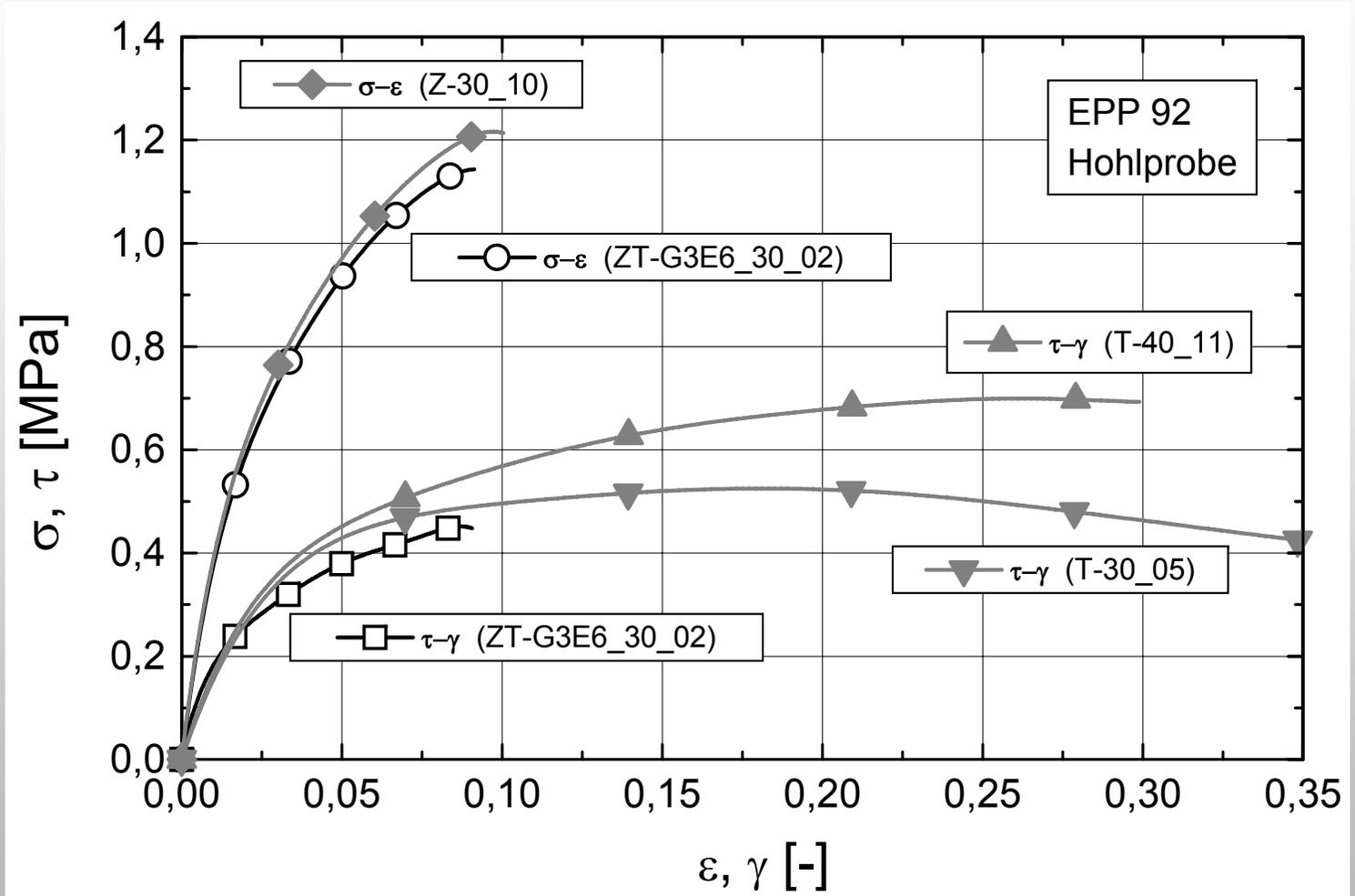
simple shear:

$\varepsilon = 0$



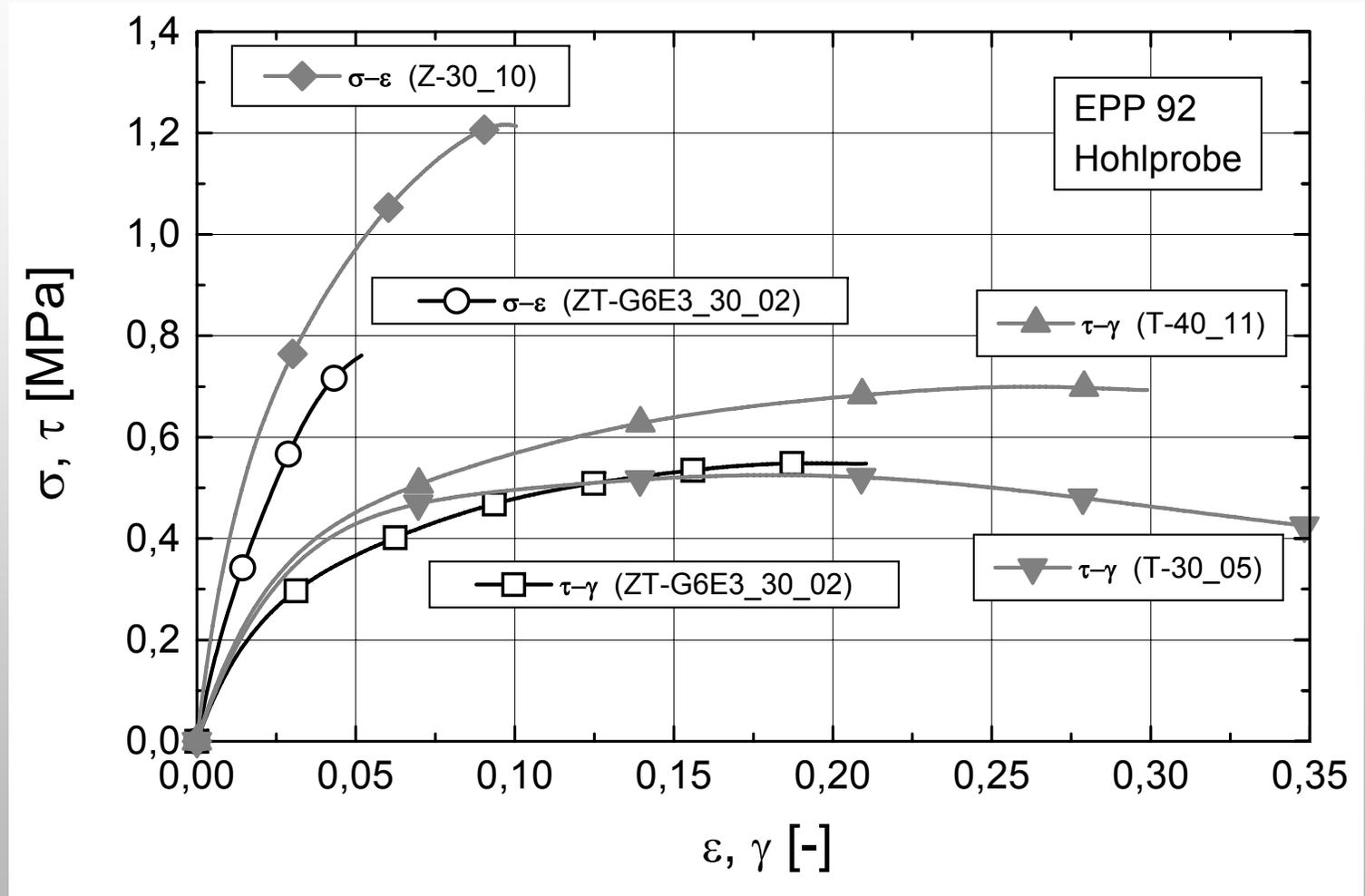
## EPP unter Schubbeanspruchung

# Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung



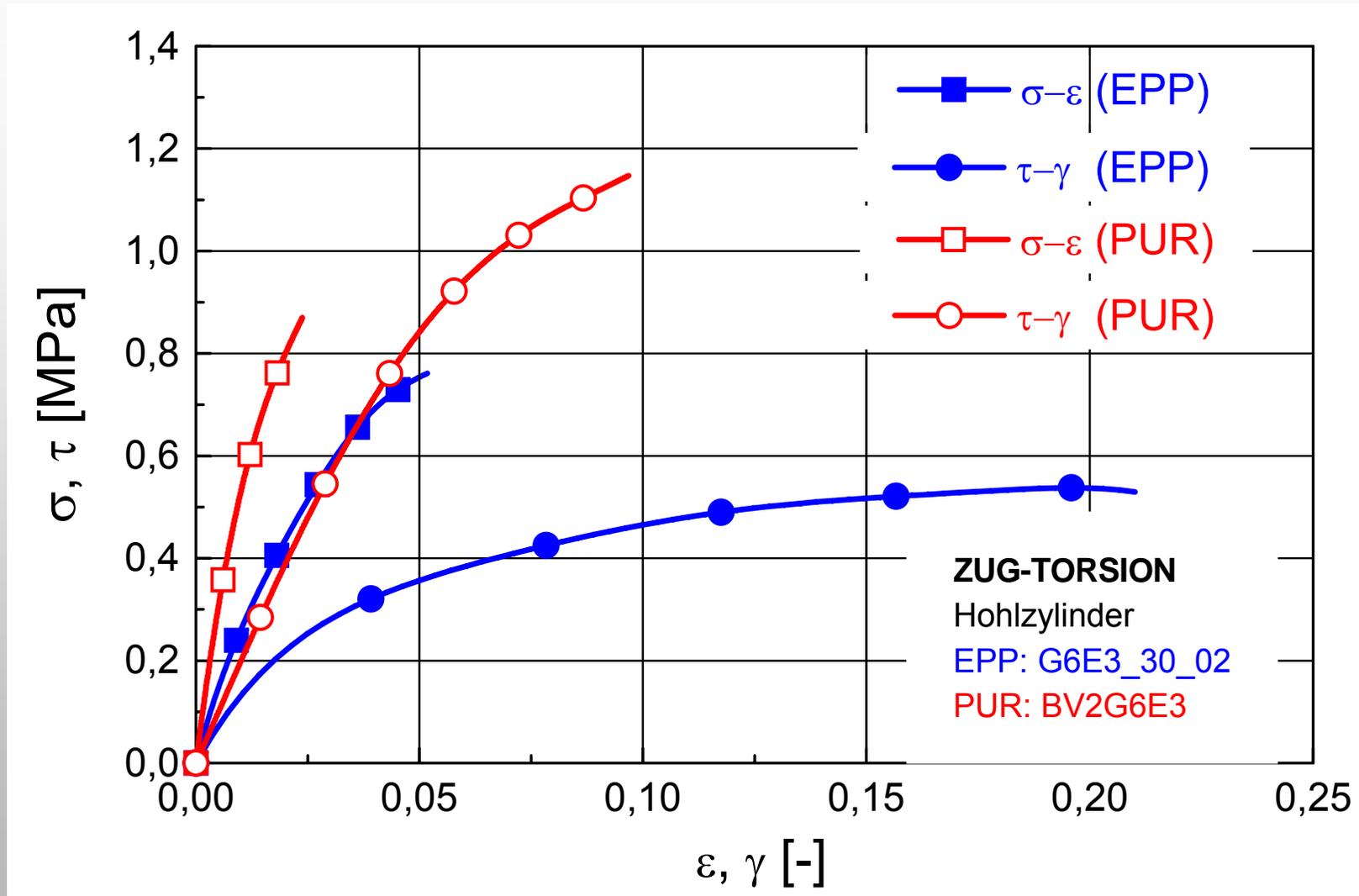
## EPP unter kombinierter Zug-Schubbeanspruchung

# Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung



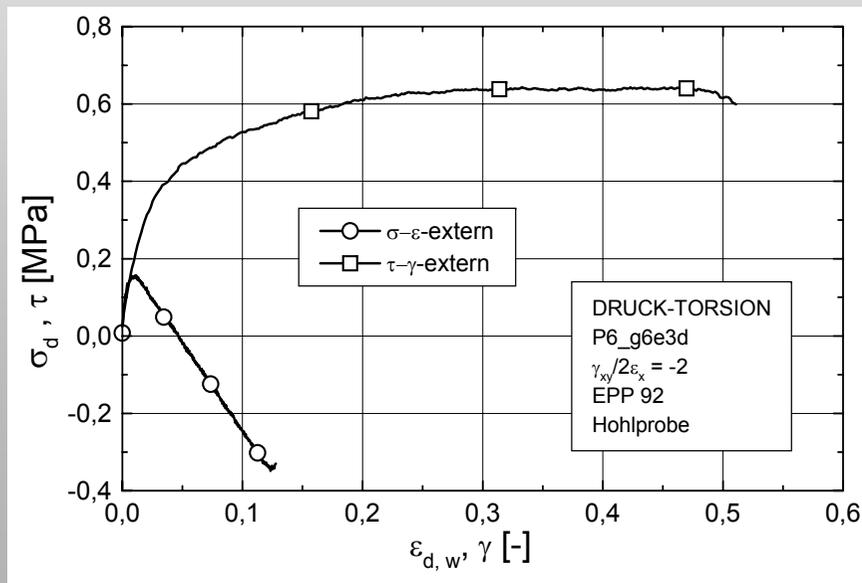
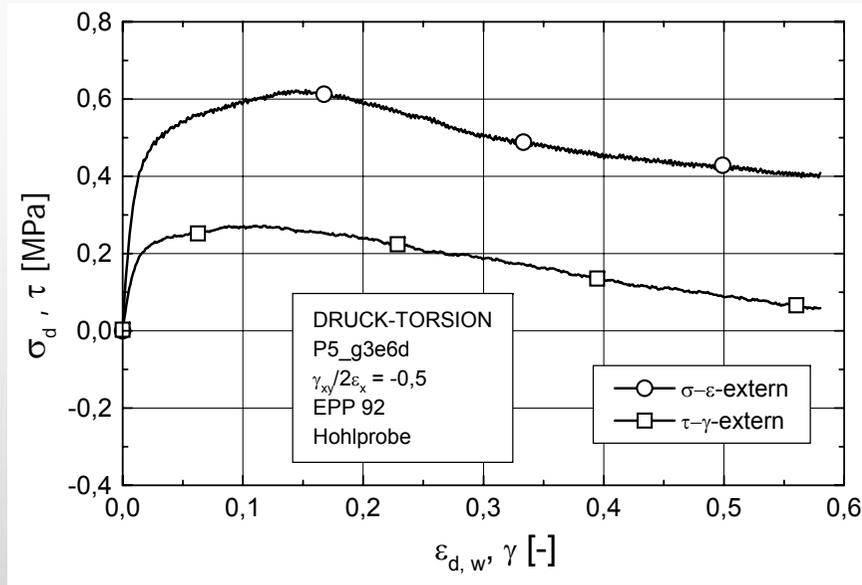
## EPP unter kombinierter Zug-Schubbeanspruchung

Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung



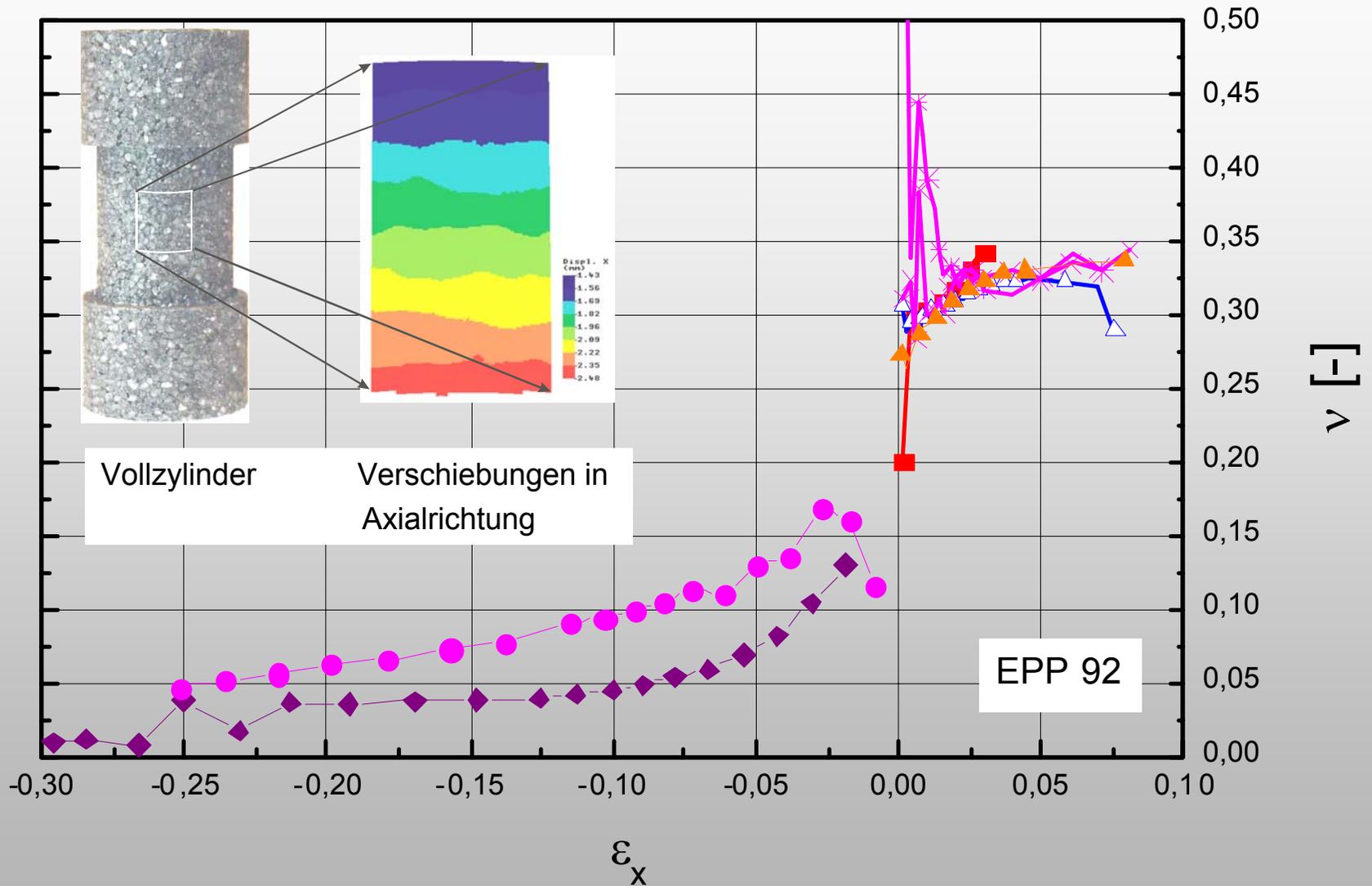
EPP unter kombinierter  
Zug-Schubbeanspruchung

# Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung

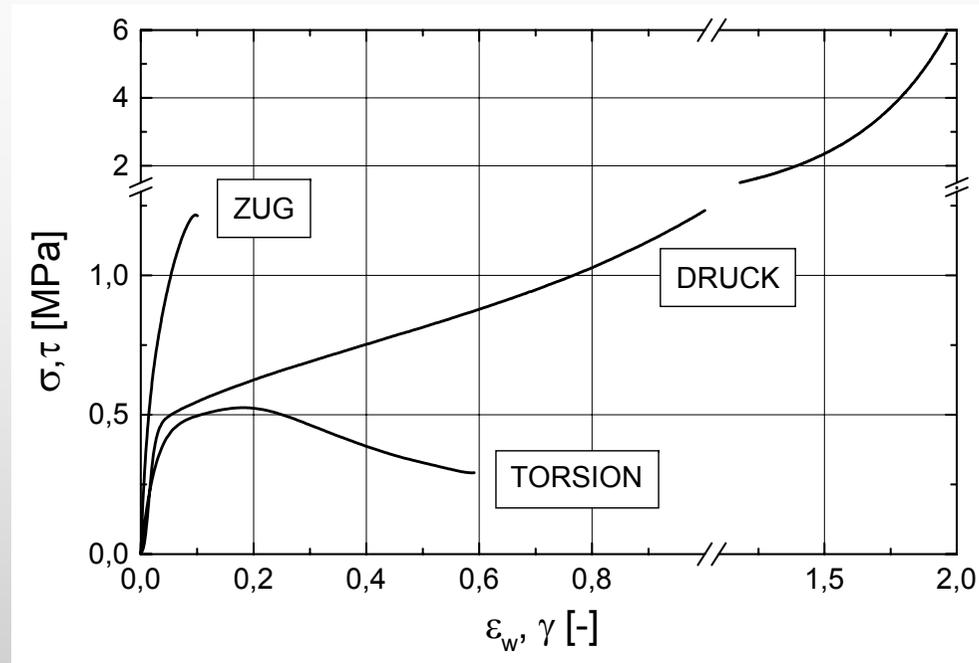


**EPP unter  
kombinierter  
Druck-Schub-  
beanspruchung**

# Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung



# Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung



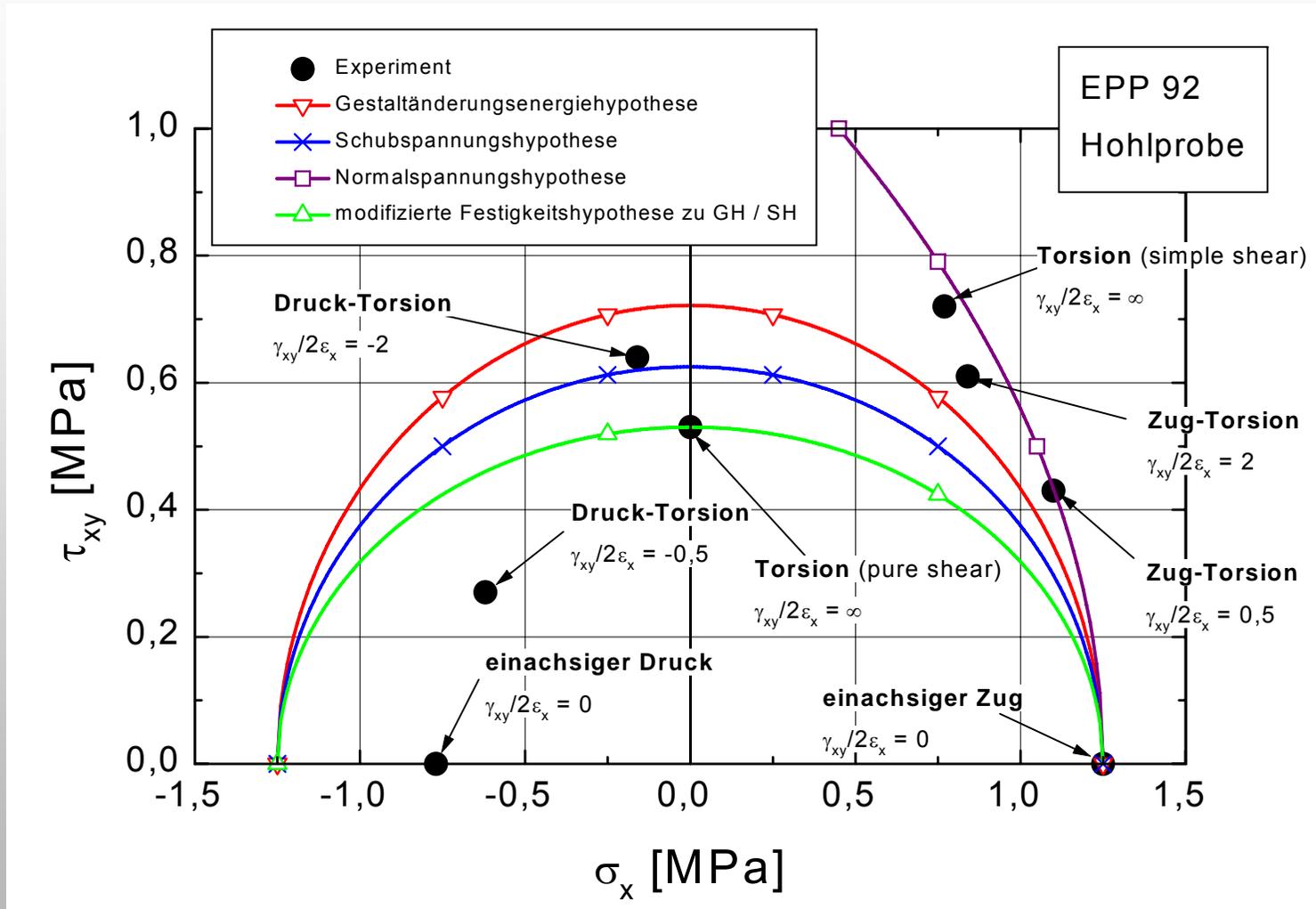
Linearelastische Konstanten des Schaumstoffs EPP für eine Dehngeschwindigkeit von  $d\epsilon/dt = 10^{-2}$  und einer Gleitungsgeschwindigkeit von  $d\gamma/dt = 2 \cdot 10^{-2}$

$E_z$ [MPa]	$G$ [MPa]	$\nu$ [-]	$E_d$ [MPa]	$\sigma_{zM}$ [MPa]	$\tau_{\max}^{1)}$ [MPa]	$\tau_{\max}^{2)}$ [MPa]	$\sigma_{d, 40\%}$ [MPa]	$\epsilon_{zR}$ [-]	$\gamma_R^{1)}$ [-]
37,1	14,0	0,33	38,0	1,25	0,72	0,53	0,77	0,09	0,27

<sup>1)</sup> Wert aus Torsionsversuchen unter behinderter Axialverformung ( $\epsilon_x = 0$ )

<sup>2)</sup> Wert aus Torsionsversuchen unter unbehinderter Axialverformung ( $\sigma_x = 0$ )

# Beschreibung des Versagensverhaltens von Schaumstoffen

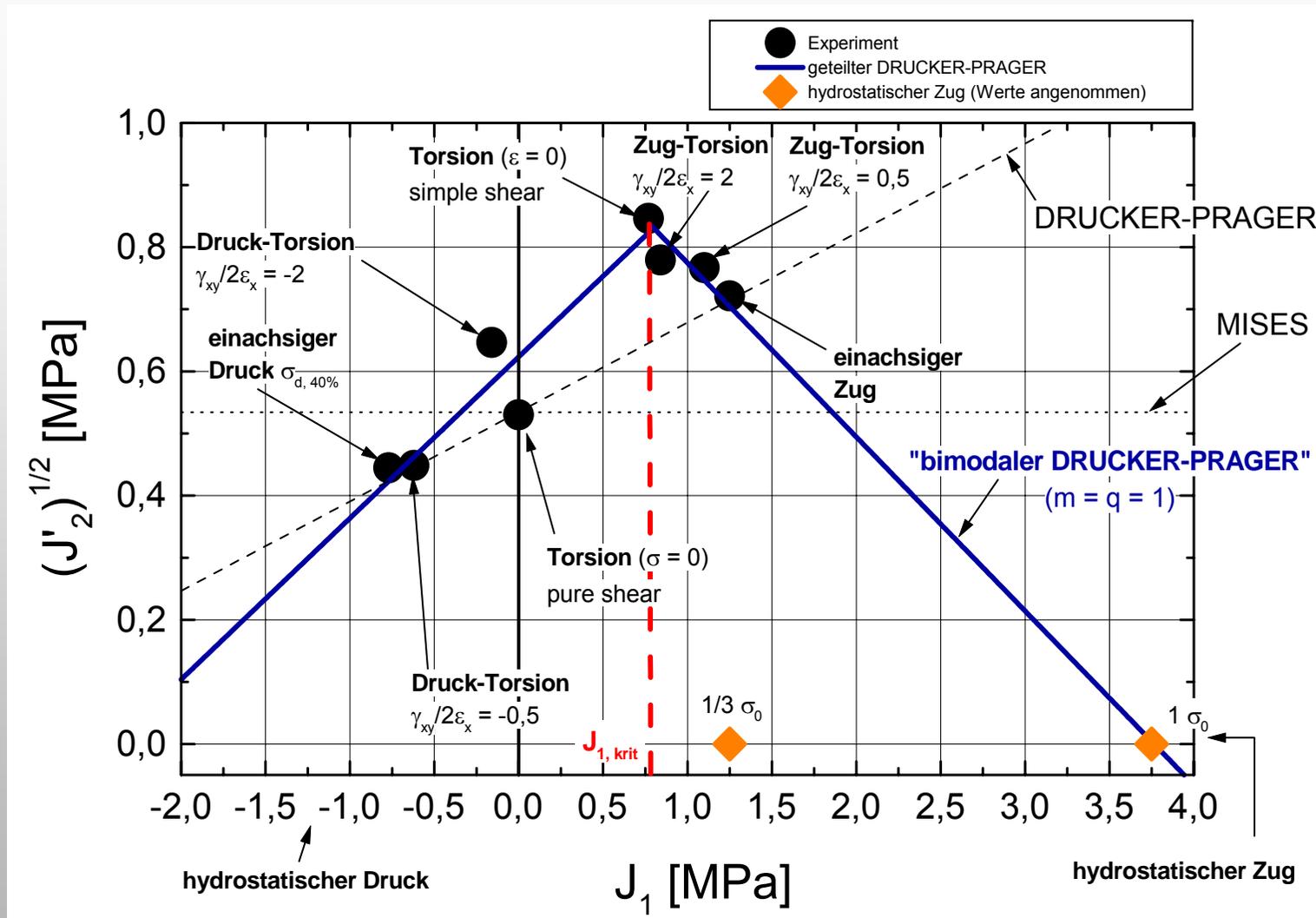


## SCHLIMMER (1983)

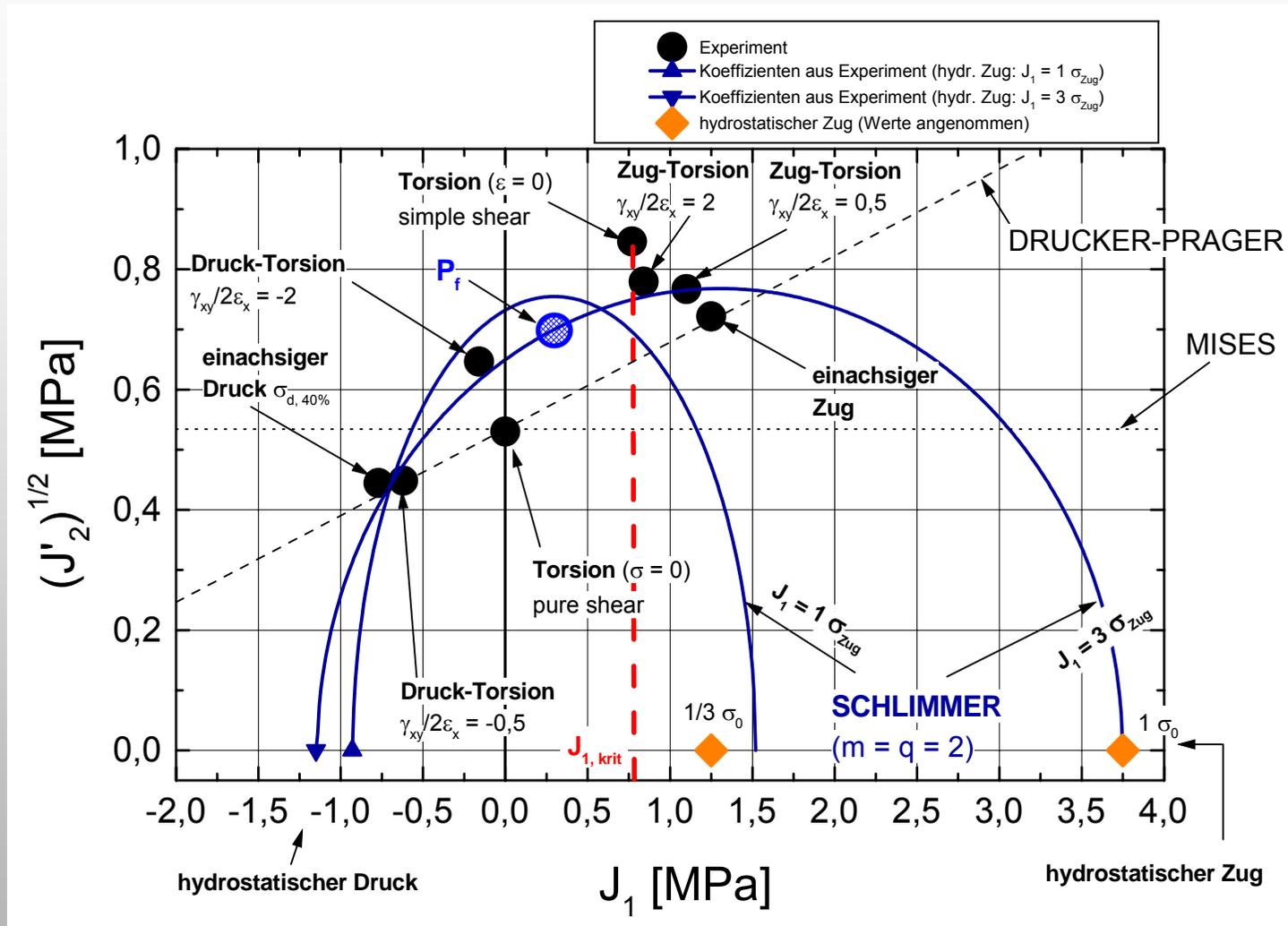
$$F = \left(\frac{1}{3}\right)^{m/2} \sum_{p=1}^q \left( {}^m a_p \sigma_F^{m-p} J_1^p \right) + J_2^{m/2}$$

MISES	DRUCKER-PRAGER	SCHLIMMER
$m=1; q=1; a_1=0$	$m=1; q=1$	$m=2; q=2$
$F = \sqrt{J_2}$	$F = \sqrt{J_2} + \sqrt{\frac{1}{3}} a_1 J_1$	$F = J_2 + \frac{1}{3} (a_1 \sigma_v J_1 + a_2 J_1^2)$

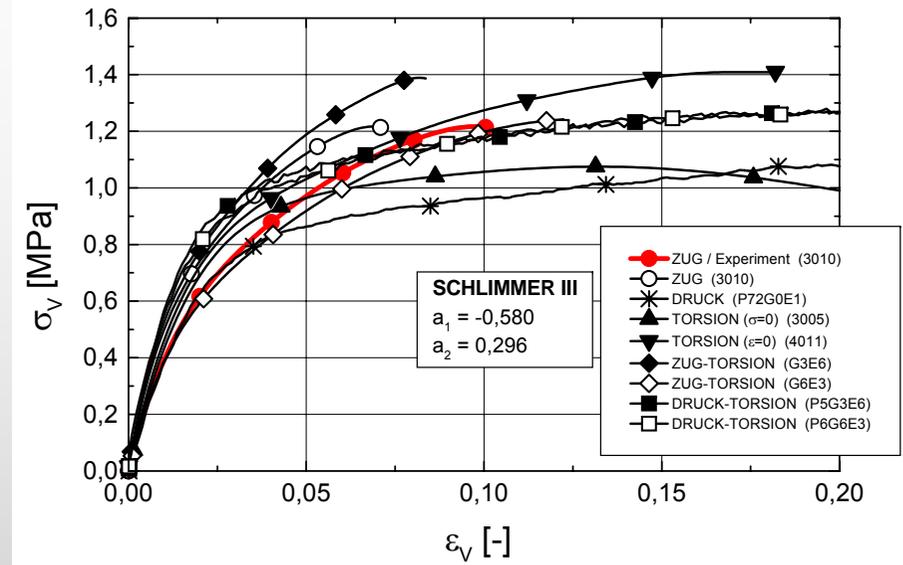
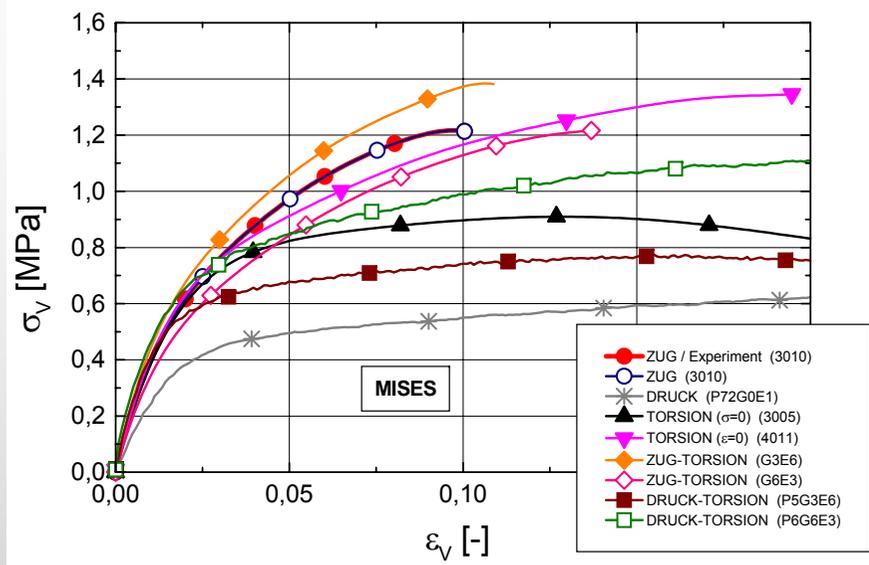
# Beschreibung des Versagensverhaltens von Schaumstoffen



# Beschreibung des Versagensverhaltens von Schaumstoffen



# Beschreibung des Versagensverhaltens von Schaumstoffen



	Versagensbedingung	$\sigma_v - \varepsilon_v$ - Diagramm
MISES	-	-
DRUCKER-PRAGER	-	-
Bimodaler DRUCKER-PRAGER	+	-
SCHLIMMER	+ (kompliziert)	+

## Versuchsparameter

Prüfgeschwindigkeiten:

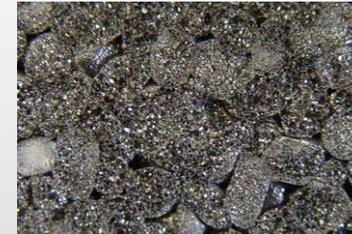
- $\dot{\varepsilon} = 0,001 \text{ s}^{-1}$
- $\dot{\varepsilon} = 0,01 \text{ s}^{-1}$
- $\dot{\varepsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$
- $\dot{\varepsilon} = 0,65 \text{ s}^{-1}$

Beanspruchungsarten:

- Zug
- Druck
- Torsion
- Zug-Torsion
- Druck-Torsion

Verwendete Schaumdichten:

- 44 g/dm<sup>3</sup>



- 72 g/dm<sup>3</sup>

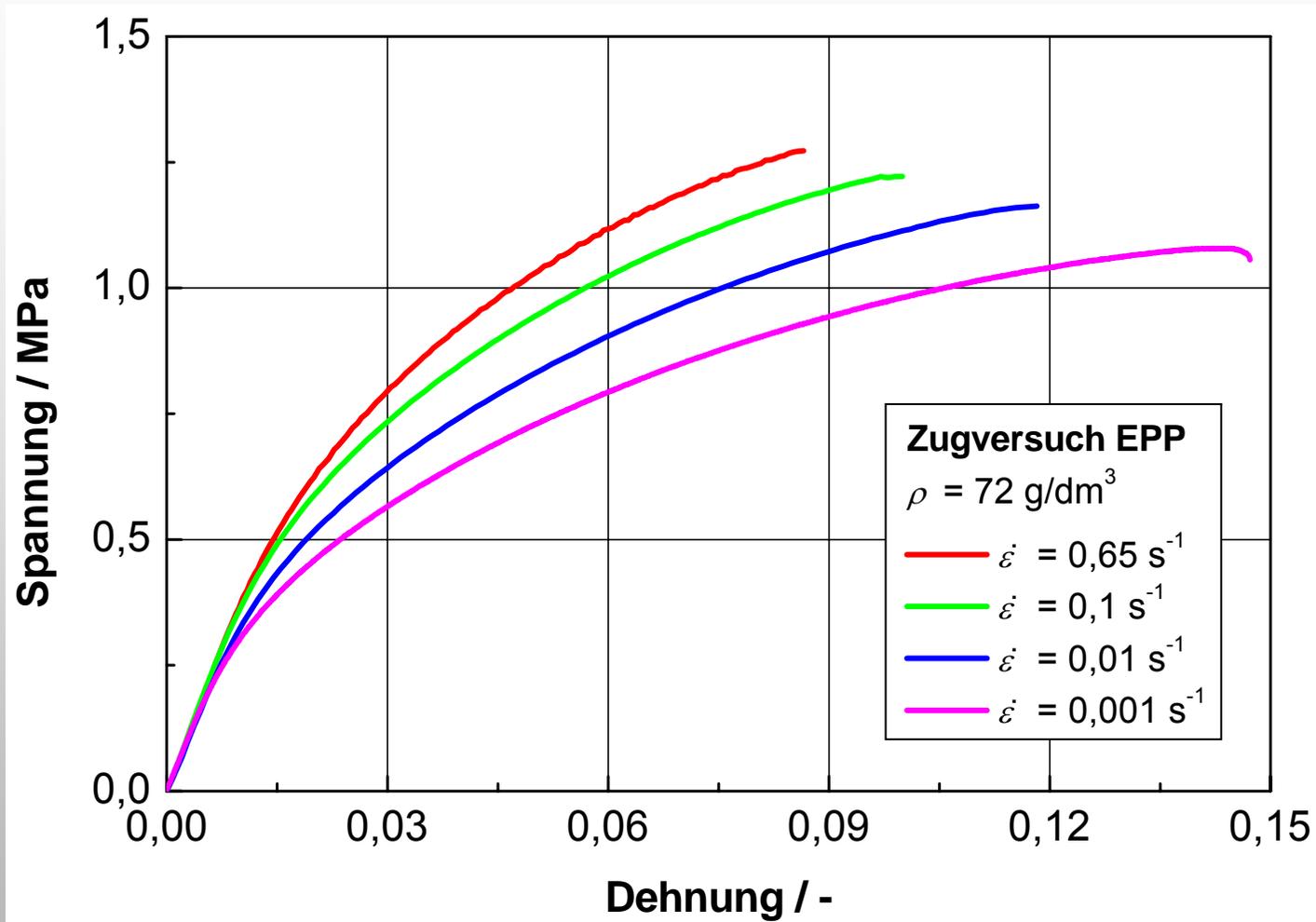


- 92 g/dm<sup>3</sup>

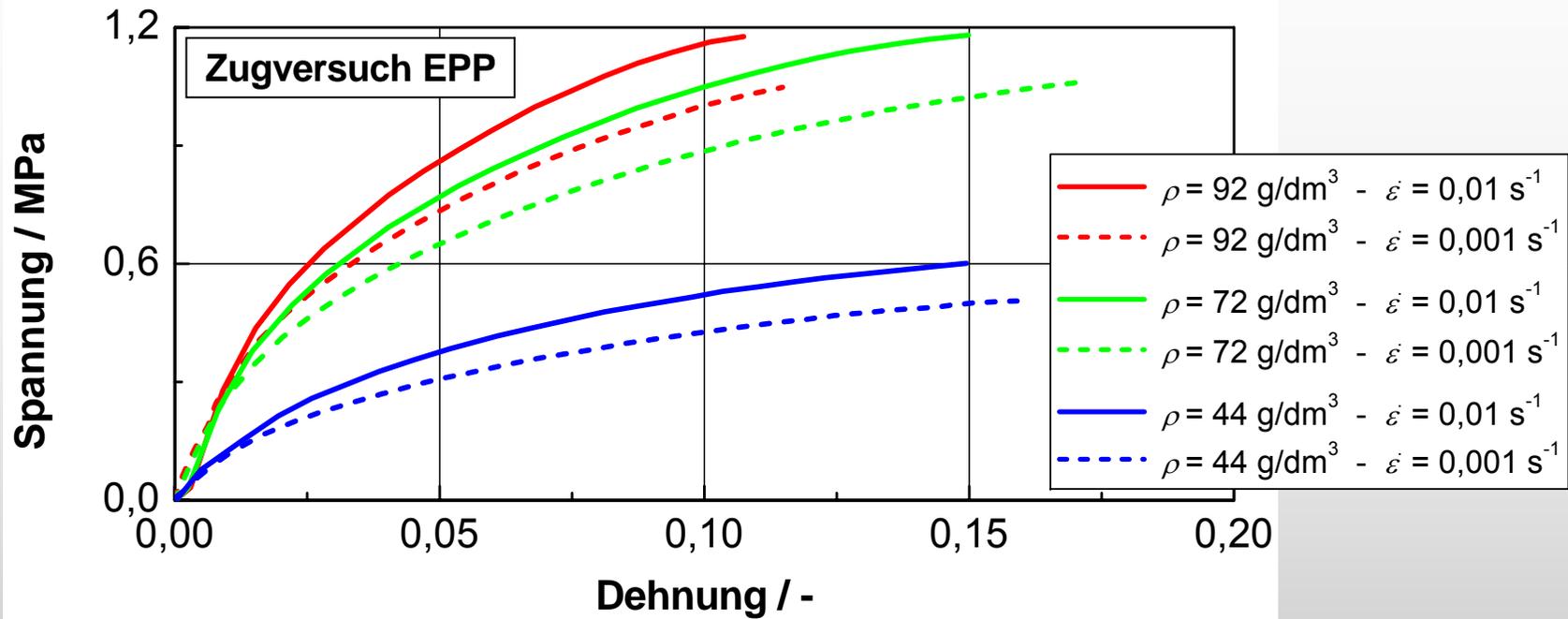
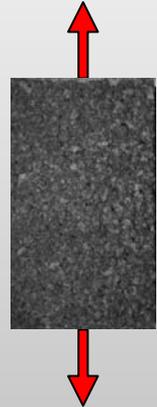


10 mm

# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



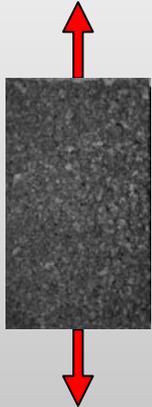
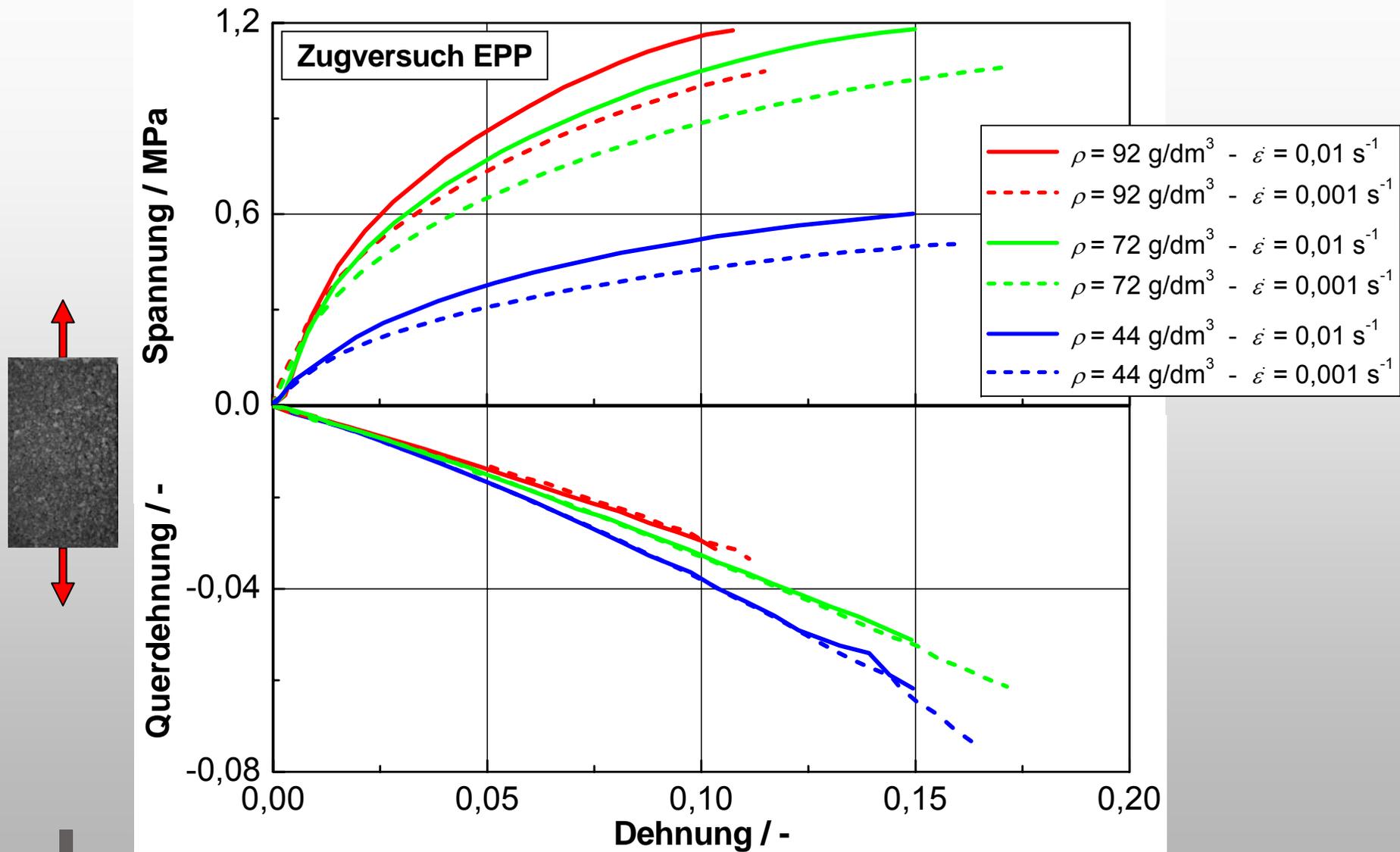
# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



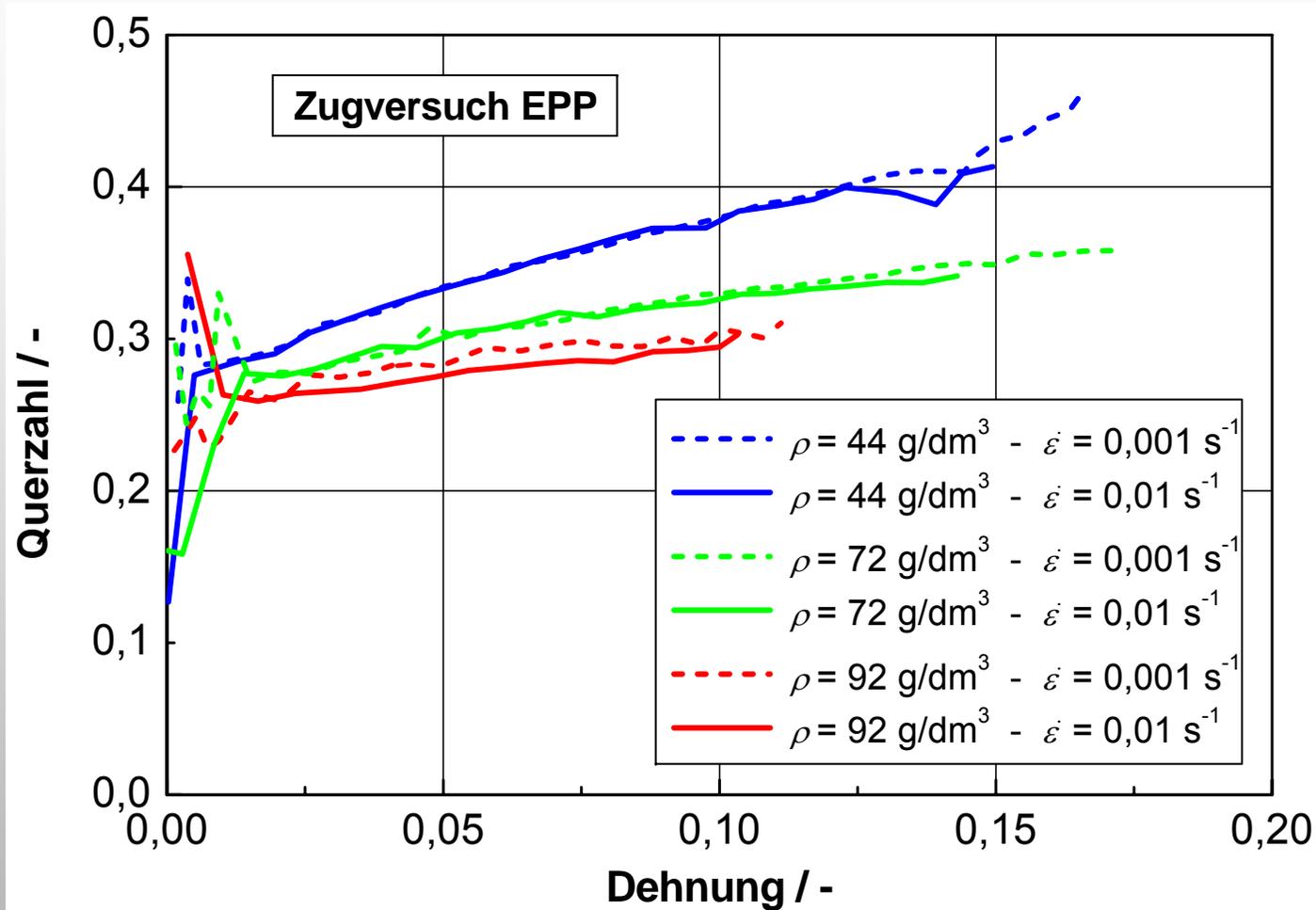
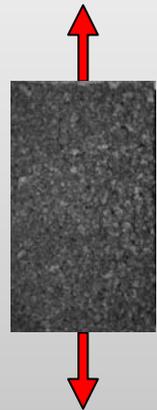
$\rho / \text{g/dm}^3$	$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	$E^* / \text{MPa}$	$\sigma^{\text{max}} / \text{MPa}$
44	0,001	16,3	0,51
	0,01	16,4	0,60
72	0,001	26,4	1,06
	0,01	26,8	1,18
92	0,001	30,0	1,08
	0,01	30,4	1,18

$E^*$  = Sekantenmodul bei 1 % Dehnung

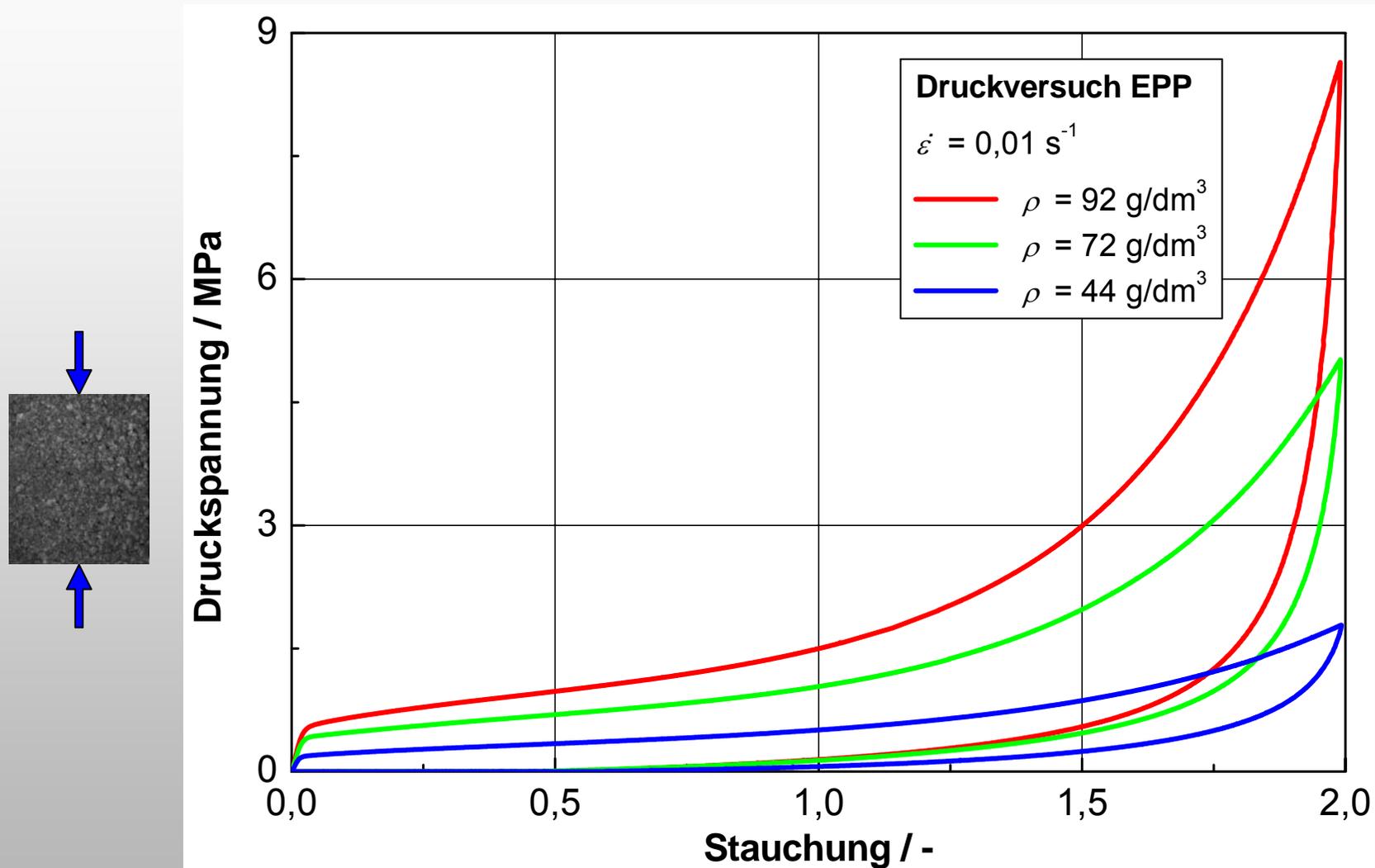
# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



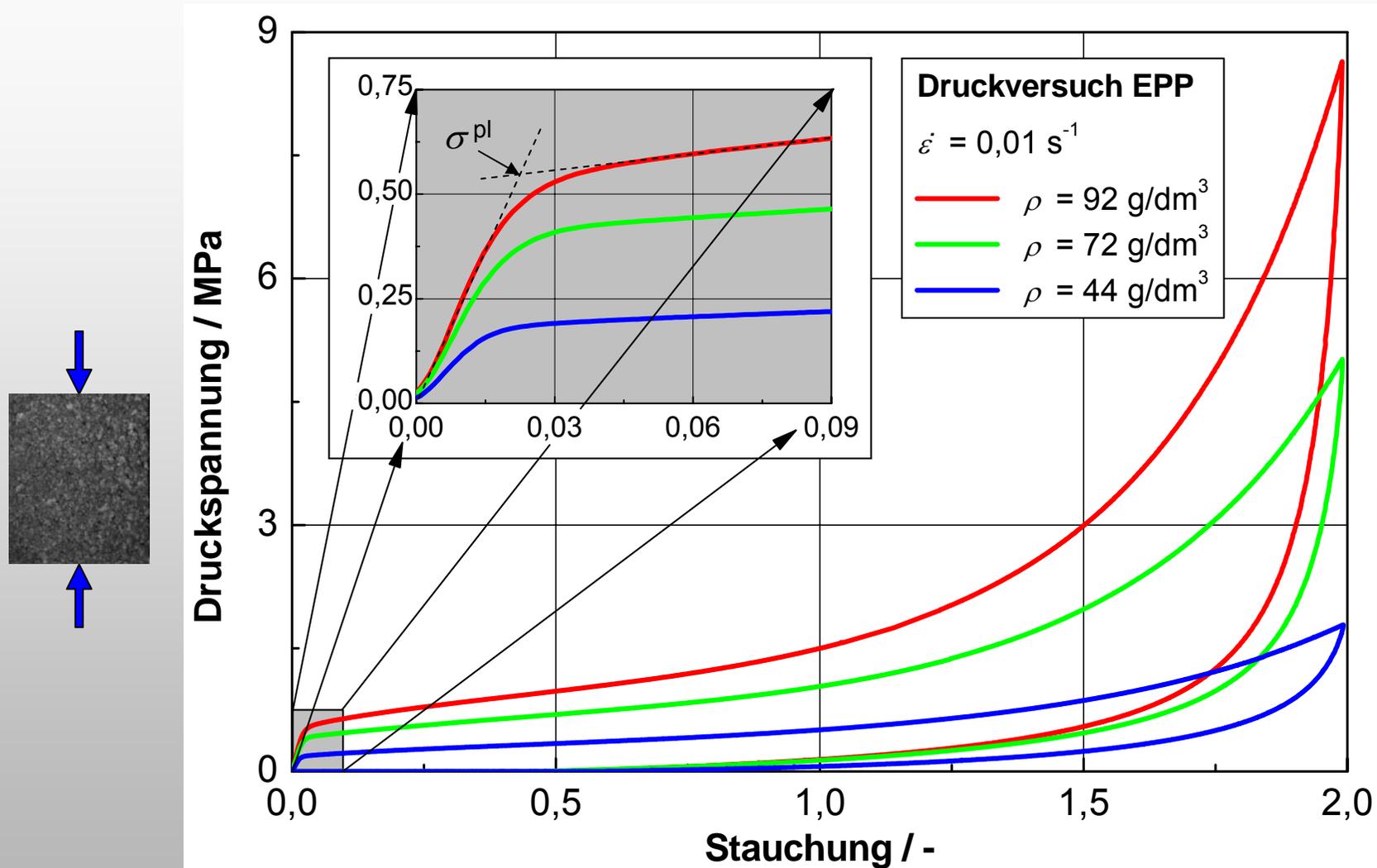
# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



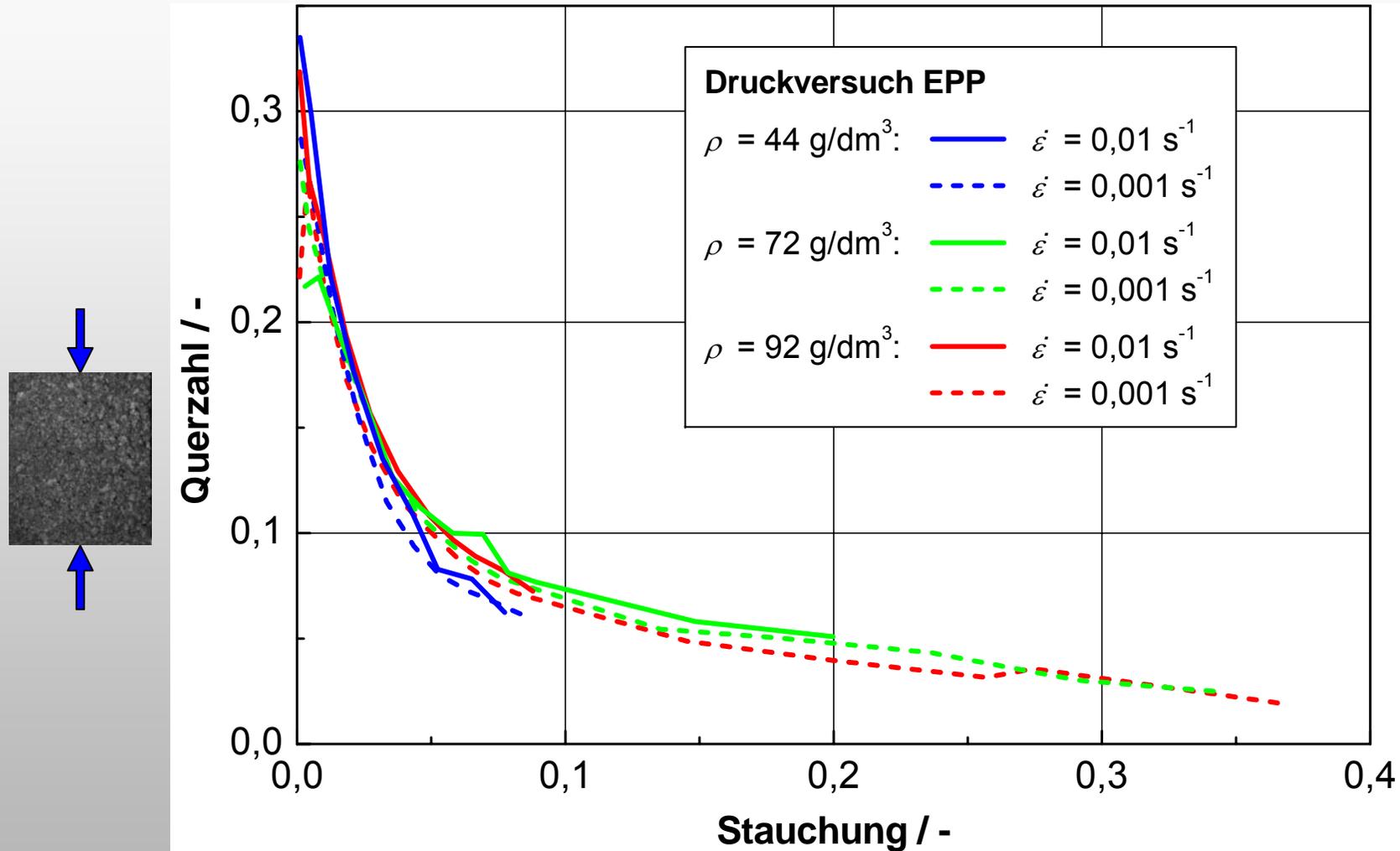
# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



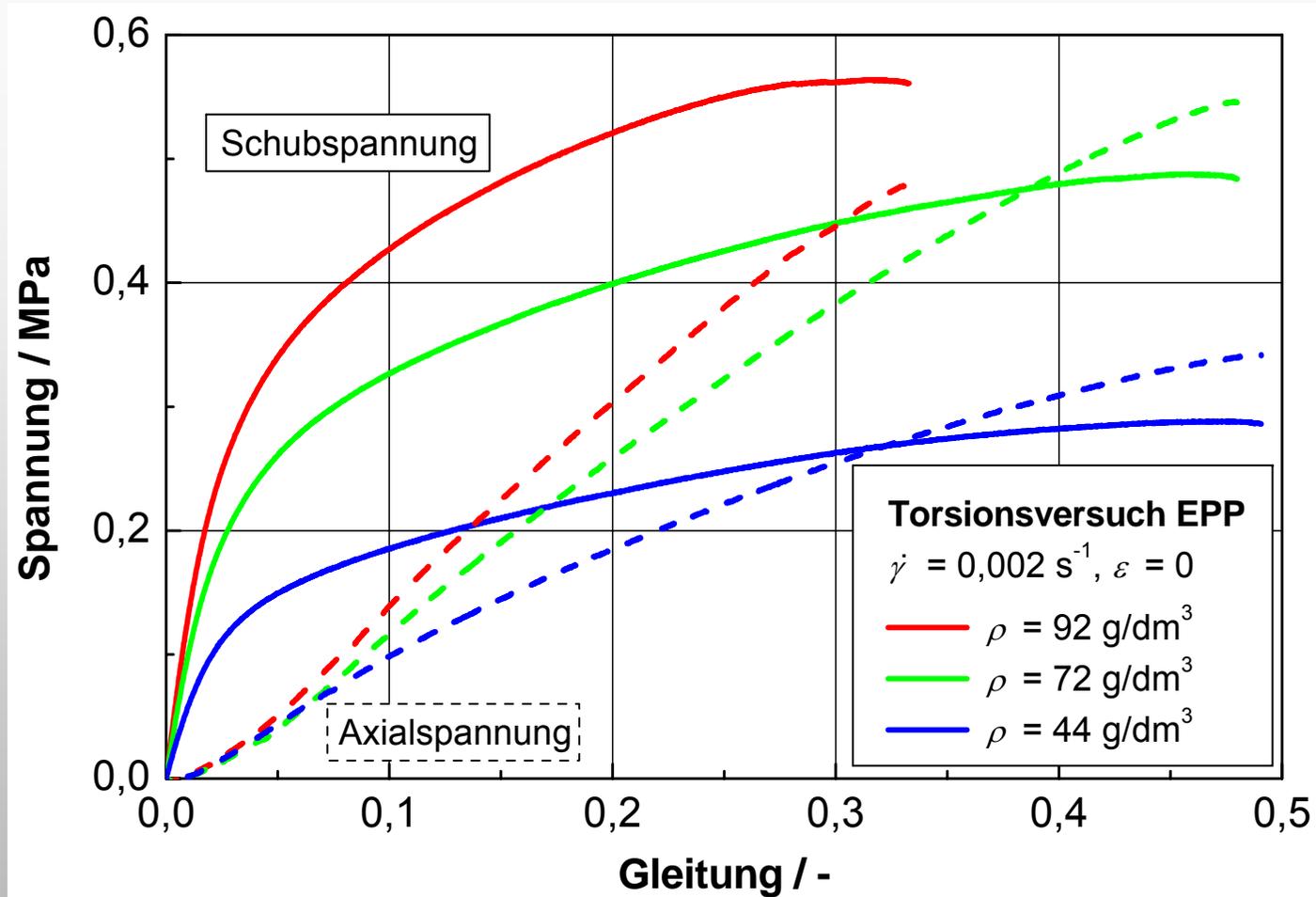
# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



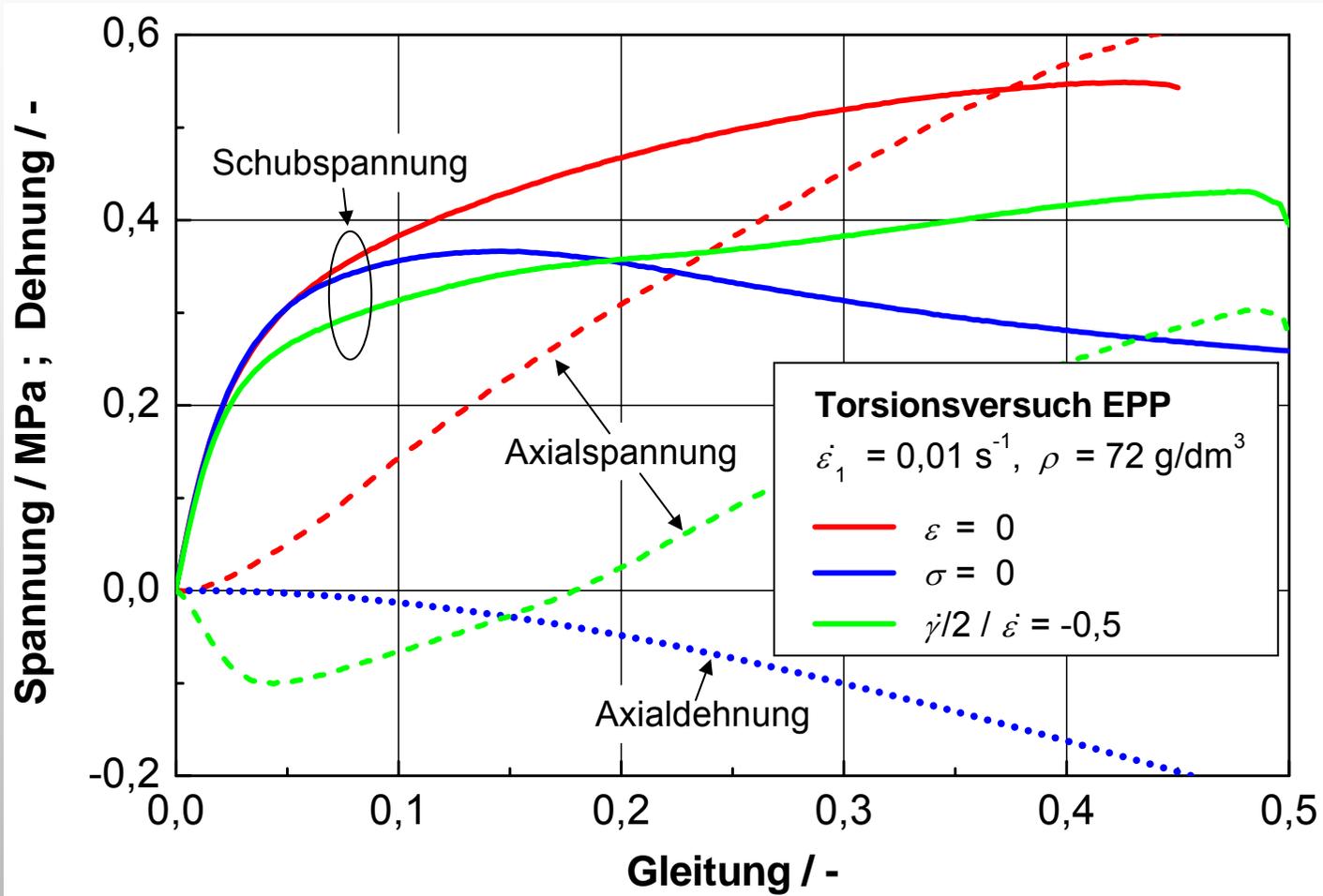
# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



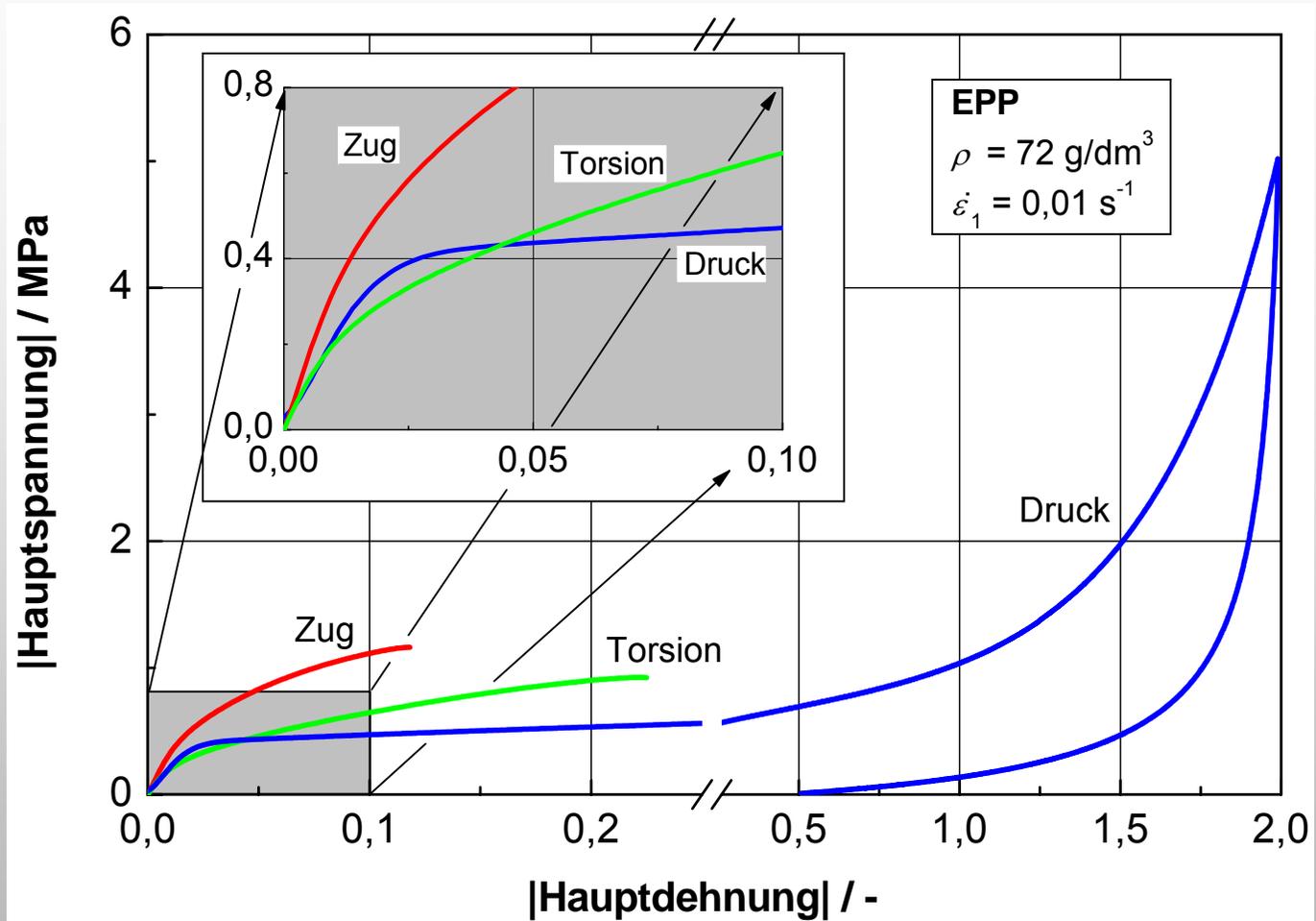
# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



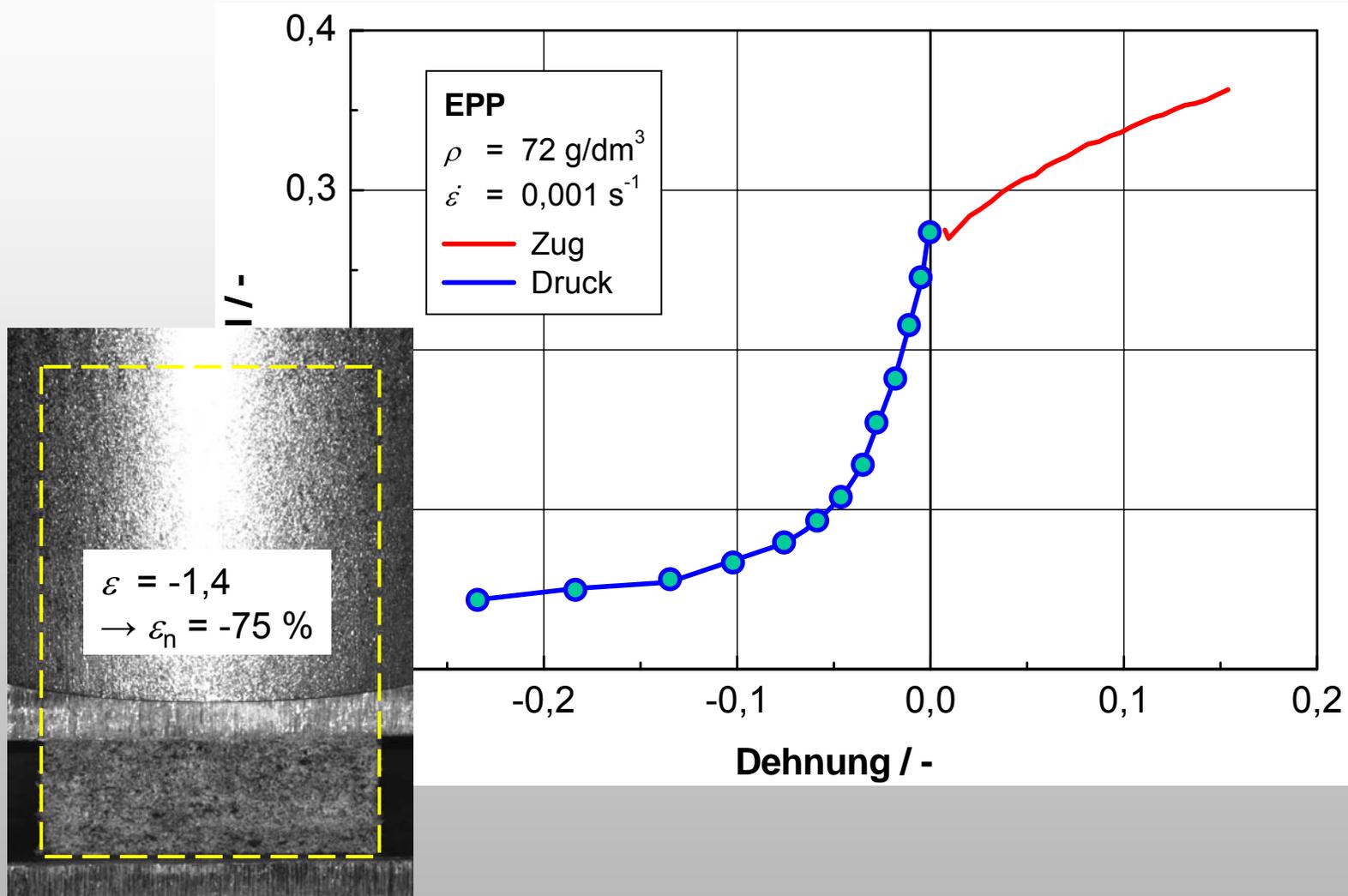
# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



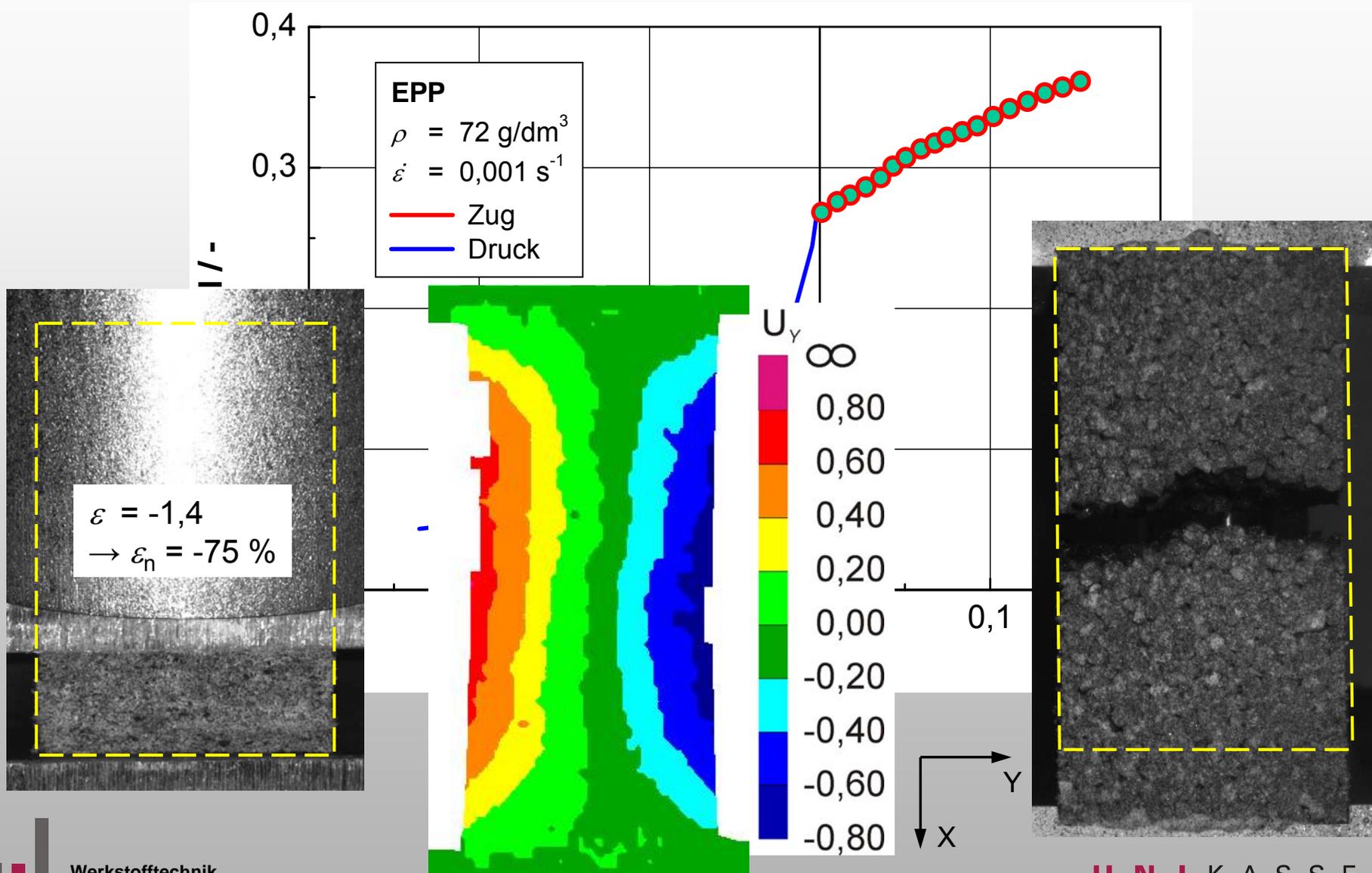
# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen

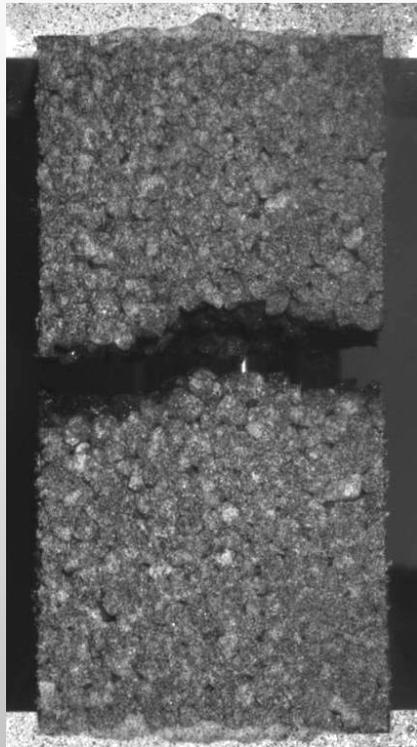


# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen

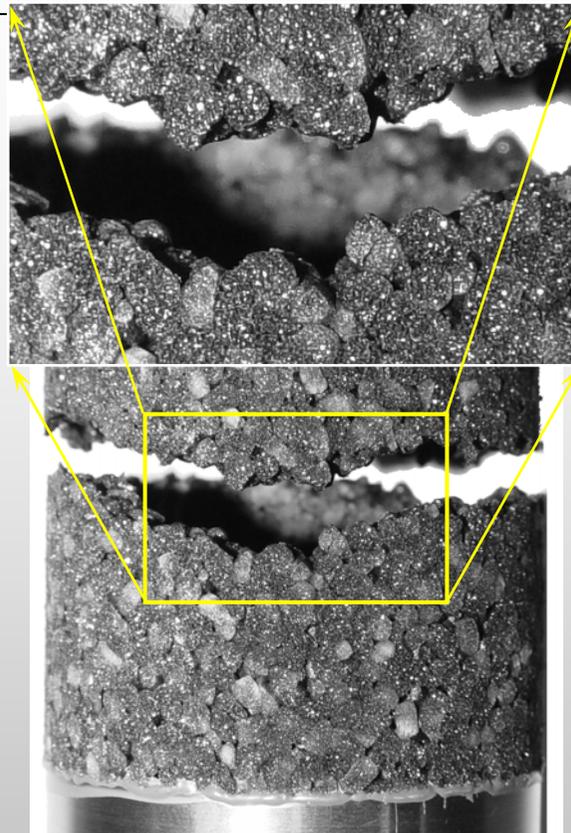


Querzahl-Dehnung-Verhalten

# Versuchsergebnisse expandiertes Polypropylen



Flachprobe  
Zugversuch



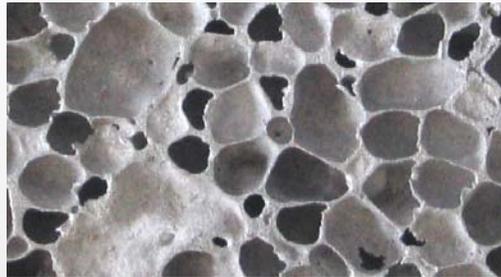
Rohrprobe  
Zugversuch



Rohrprobe  
Torsionsversuch

# Vergleich des mechanischen Verhaltens von Aluminiumschaum und EPP

**Aluminiumschaum**



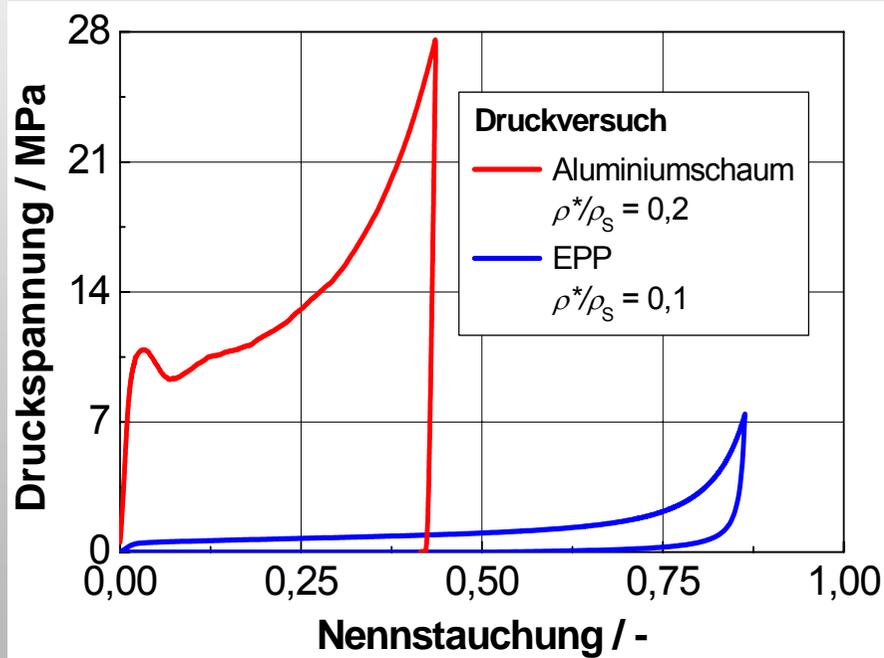
$$\rho^*/\rho_S = 0,15 \text{ bis } 0,26$$

**EPP**



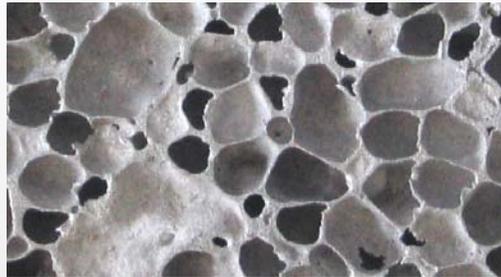
$$\rho^*/\rho_S = 0,05 \text{ bis } 0,10$$

10 mm



# Vergleich des mechanischen Verhaltens von Aluminiumschaum und EPP

## Aluminiumschaum



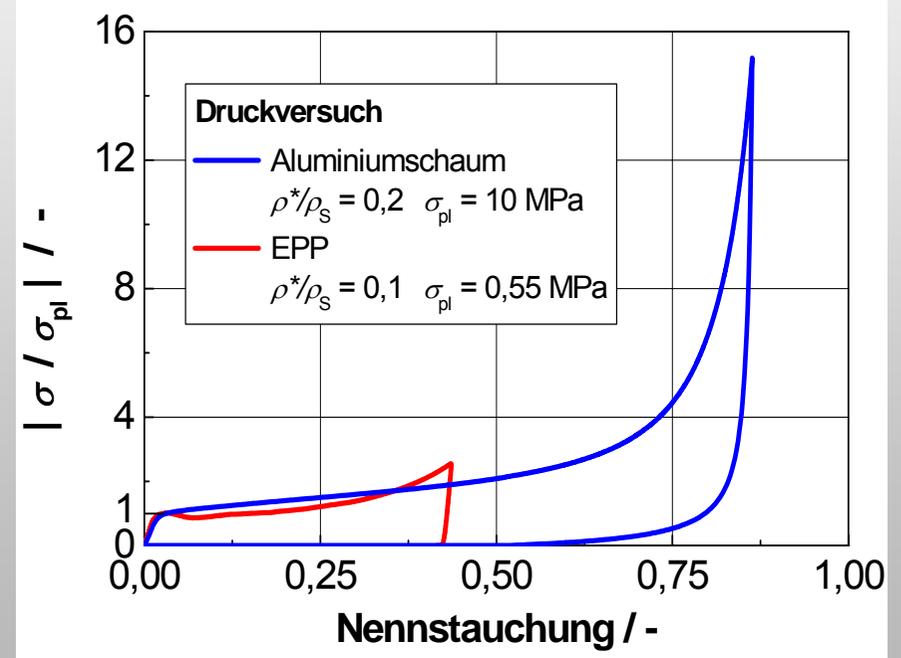
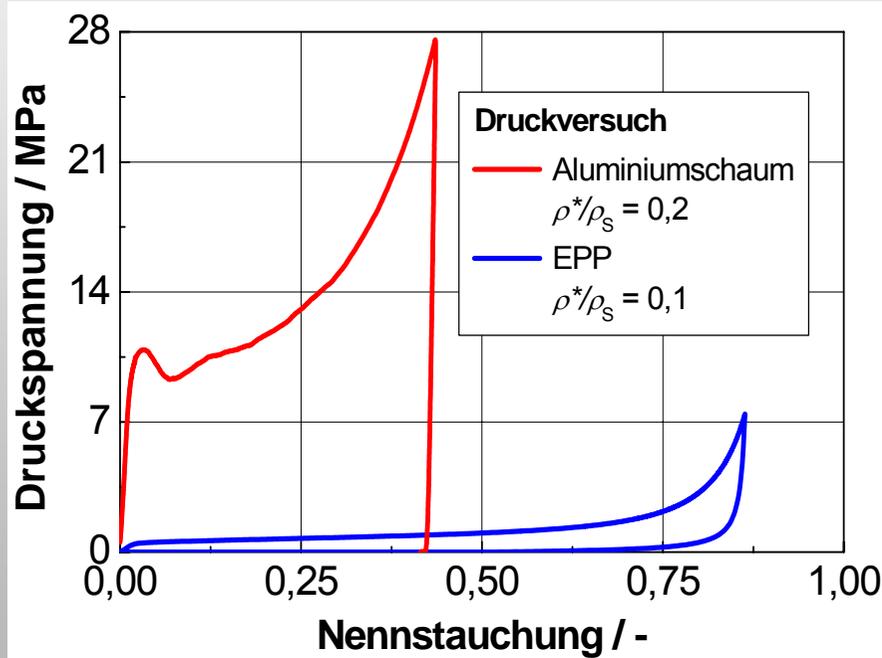
$$\rho^*/\rho_S = 0,15 \text{ bis } 0,26$$

## EPP



$$\rho^*/\rho_S = 0,05 \text{ bis } 0,10$$

10 mm



# Vergleich des mechanischen Verhaltens von Aluminiumschaum und EPP

## Aluminiumschaum



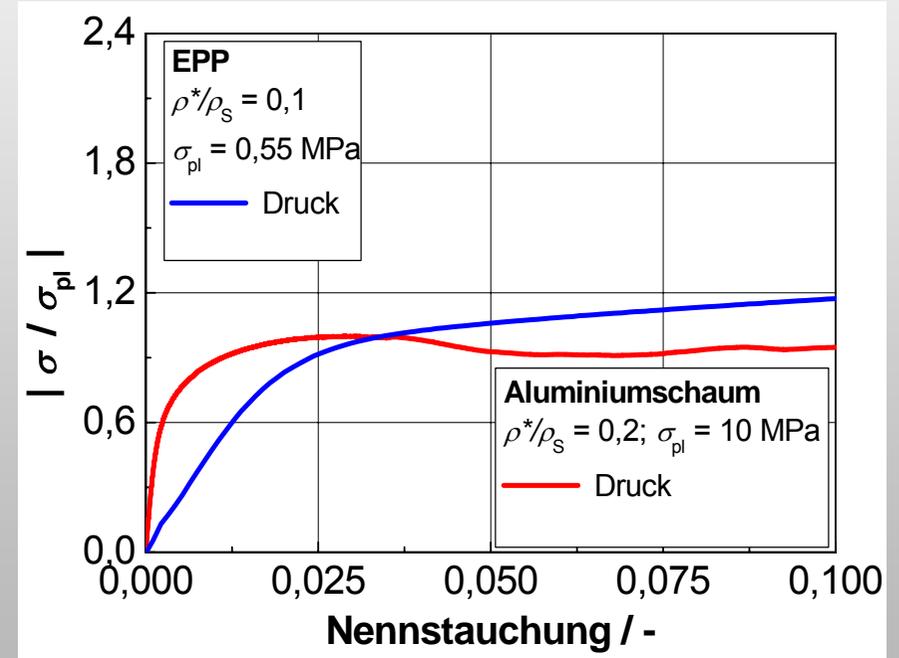
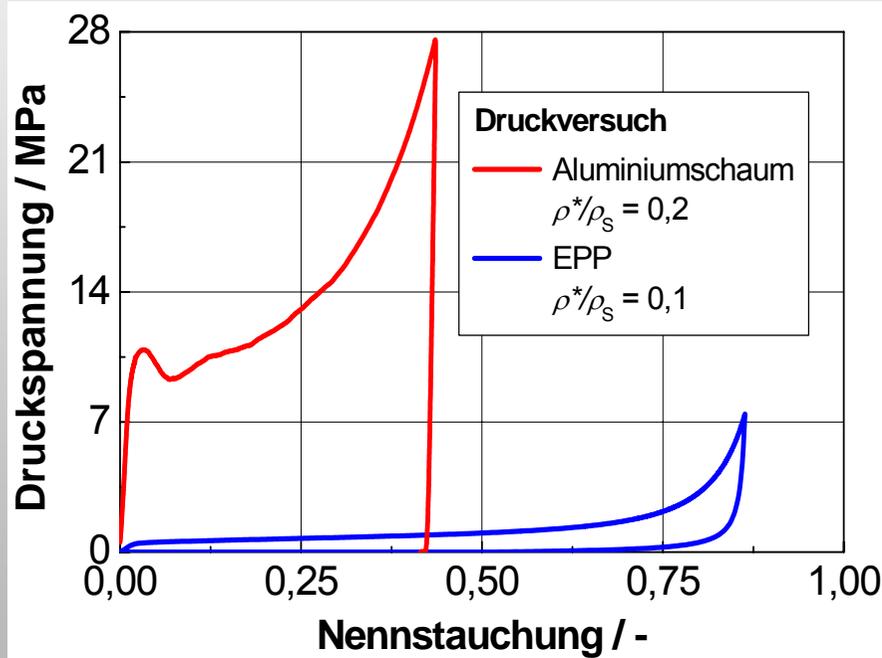
$$\rho^*/\rho_S = 0,15 \text{ bis } 0,26$$

## EPP



$$\rho^*/\rho_S = 0,05 \text{ bis } 0,10$$

10 mm



# Vergleich des mechanischen Verhaltens von Aluminiumschaum und EPP

## Aluminiumschaum



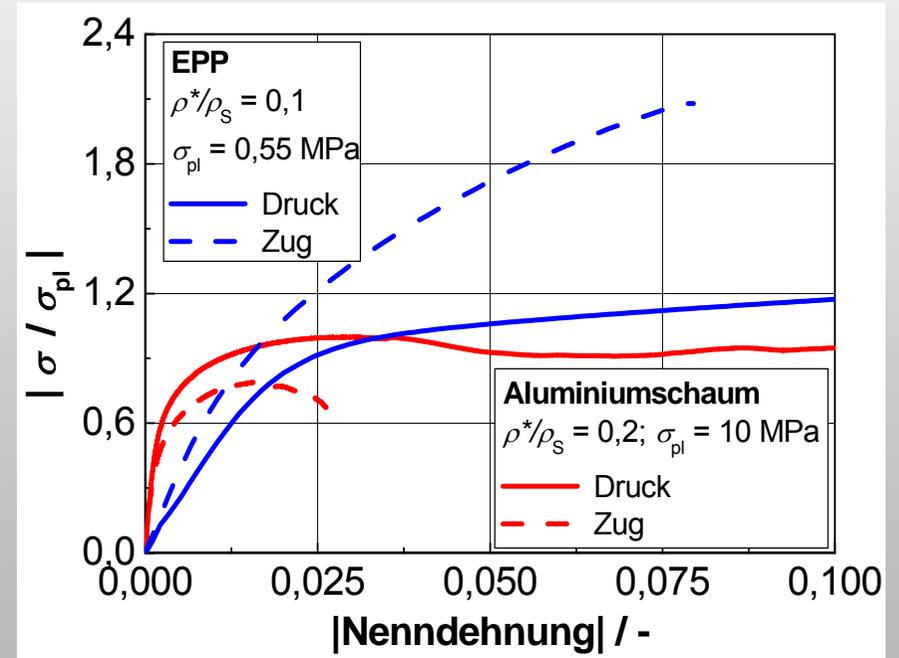
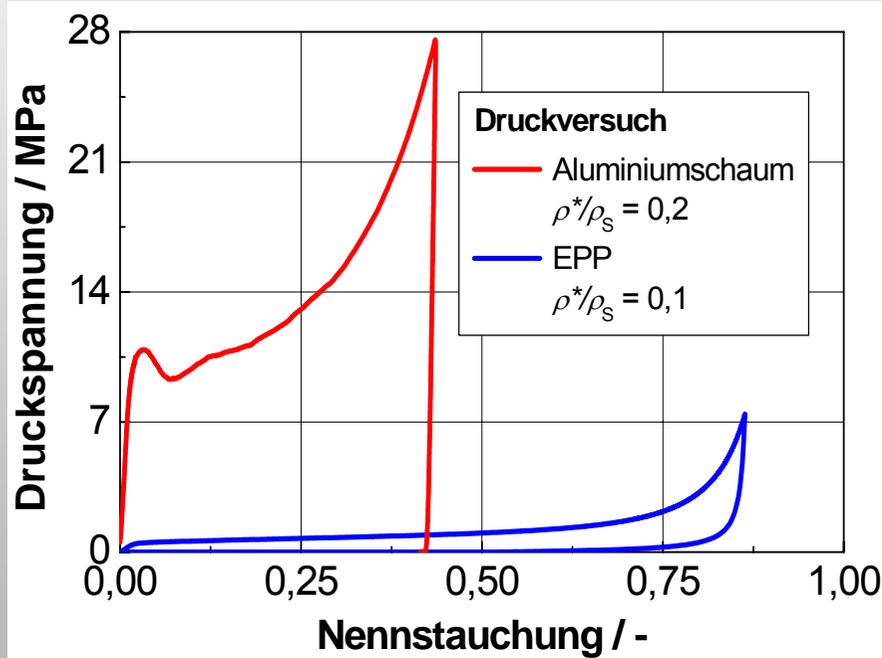
$$\rho^*/\rho_S = 0,15 \text{ bis } 0,26$$

## EPP

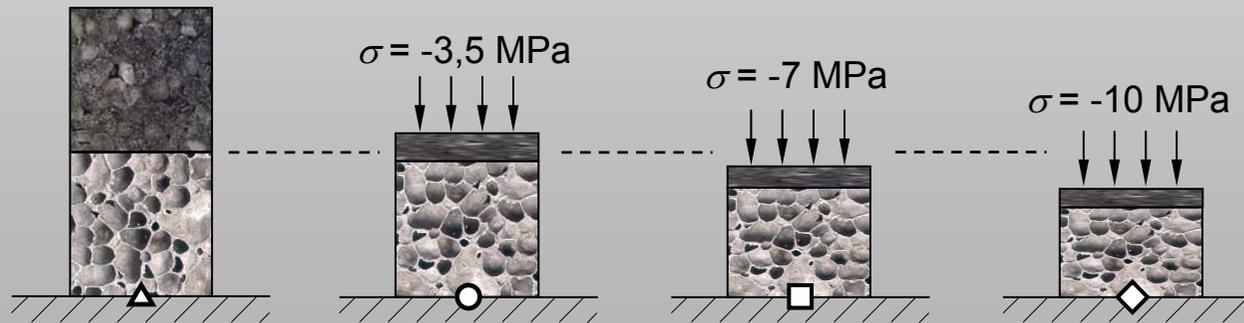
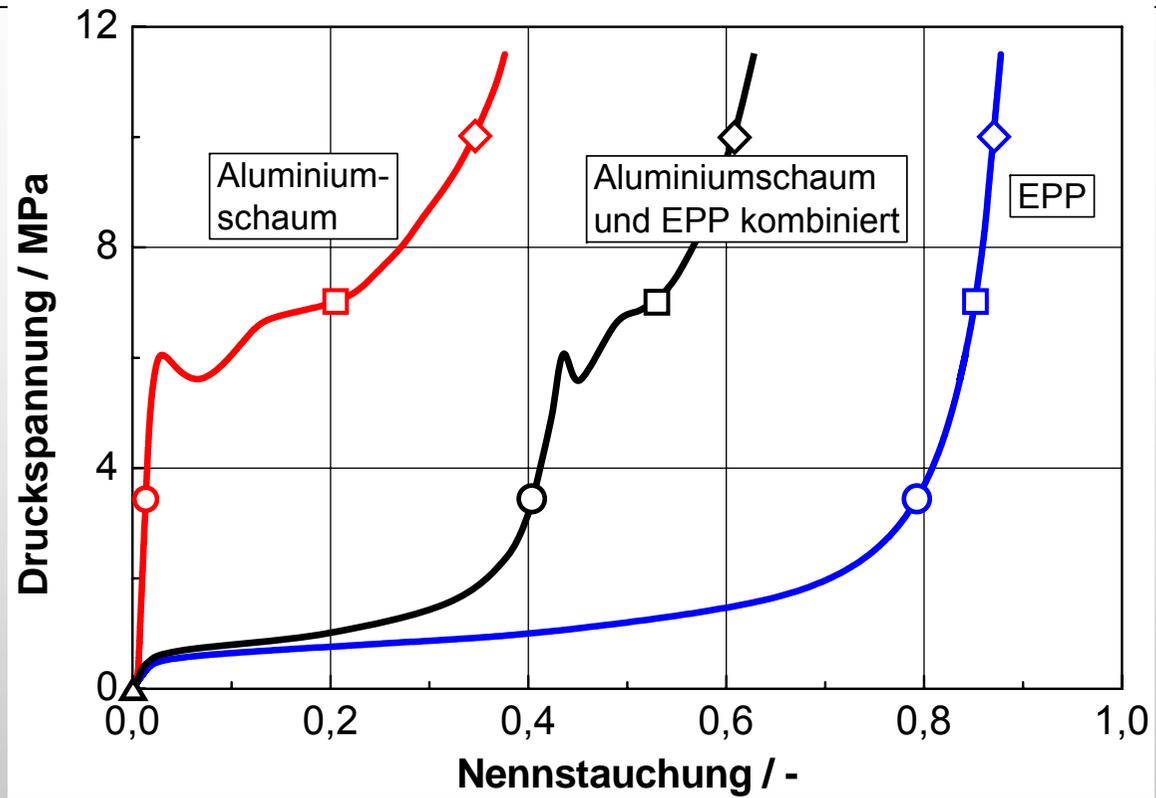


$$\rho^*/\rho_S = 0,05 \text{ bis } 0,10$$

10 mm



# Vergleich des mechanischen Verhaltens von Aluminiumschaum und EPP

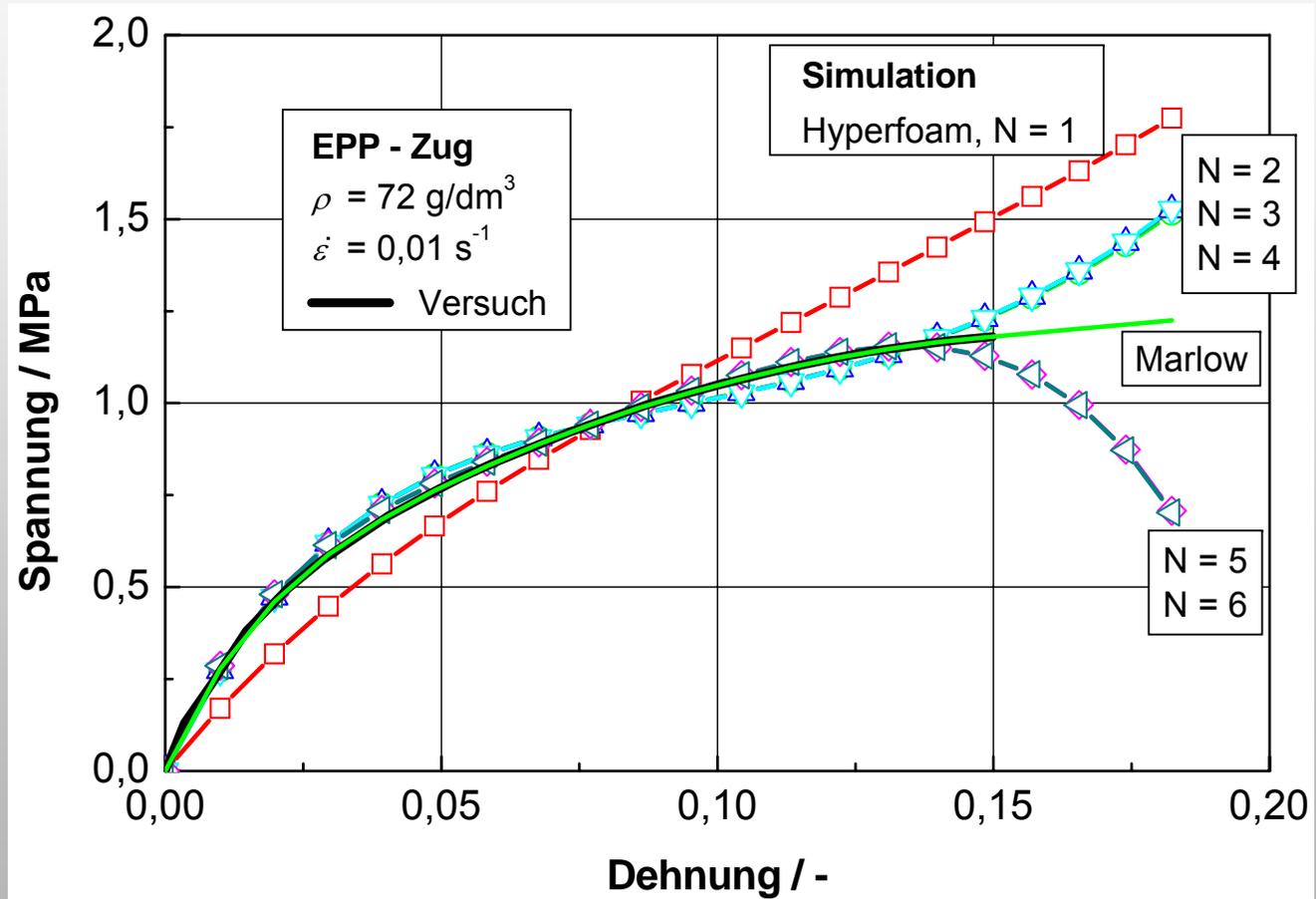


# Numerische Simulation von Schaumstoffen

Hyperfoam Modell: 
$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i\beta_i} - 1) \right]$$

Marlow Modell: 
$$W = W_{dev}(\bar{I}_1) + W_{vol}(J)$$

mit  $J = \sqrt{I_3} = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 = \frac{V}{V_0}$

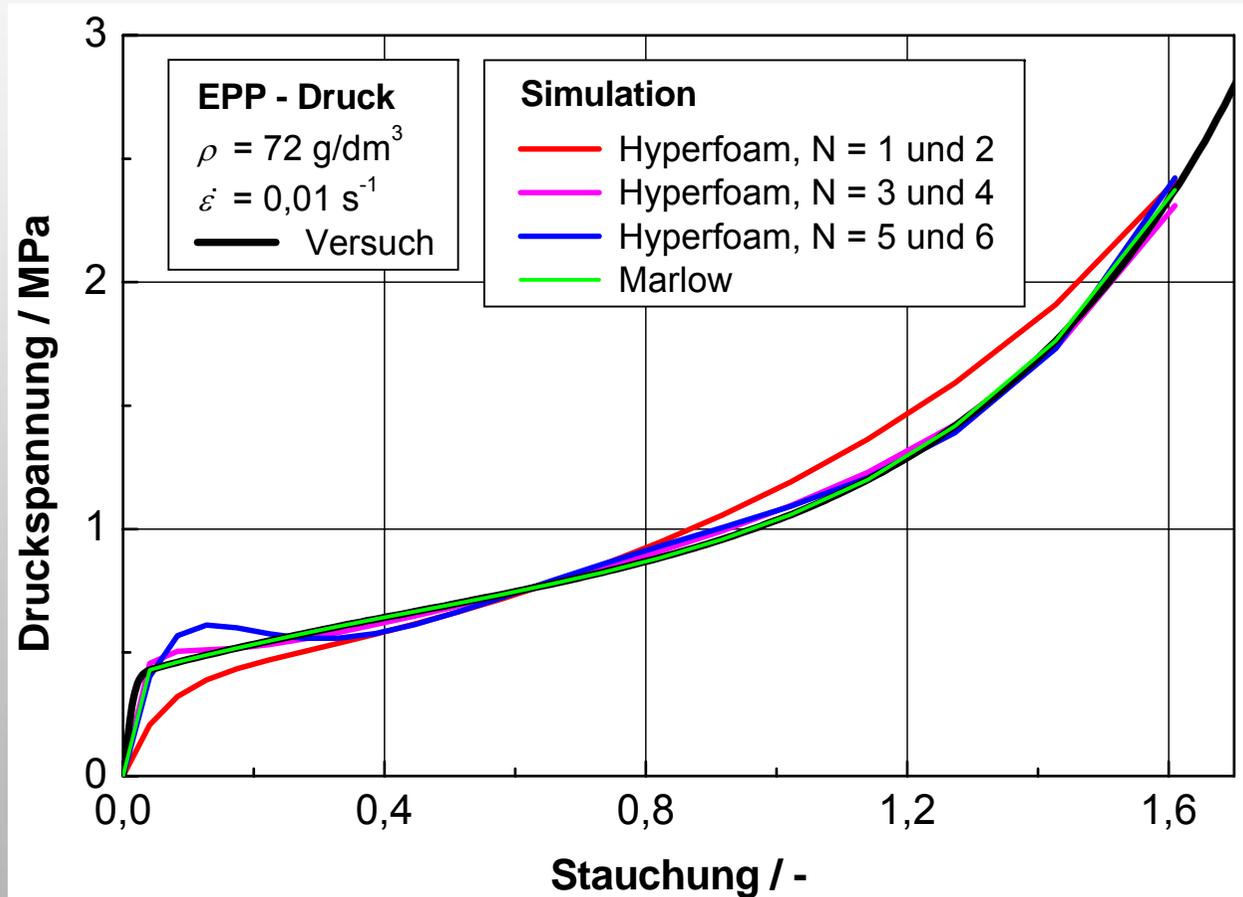


# Numerische Simulation von Schaumstoffen

Hyperfoam Modell: 
$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right]$$

Marlow Modell: 
$$W = W_{dev}(\bar{I}_1) + W_{vol}(J)$$

mit  $J = \sqrt{I_3} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{V}{V_0}$

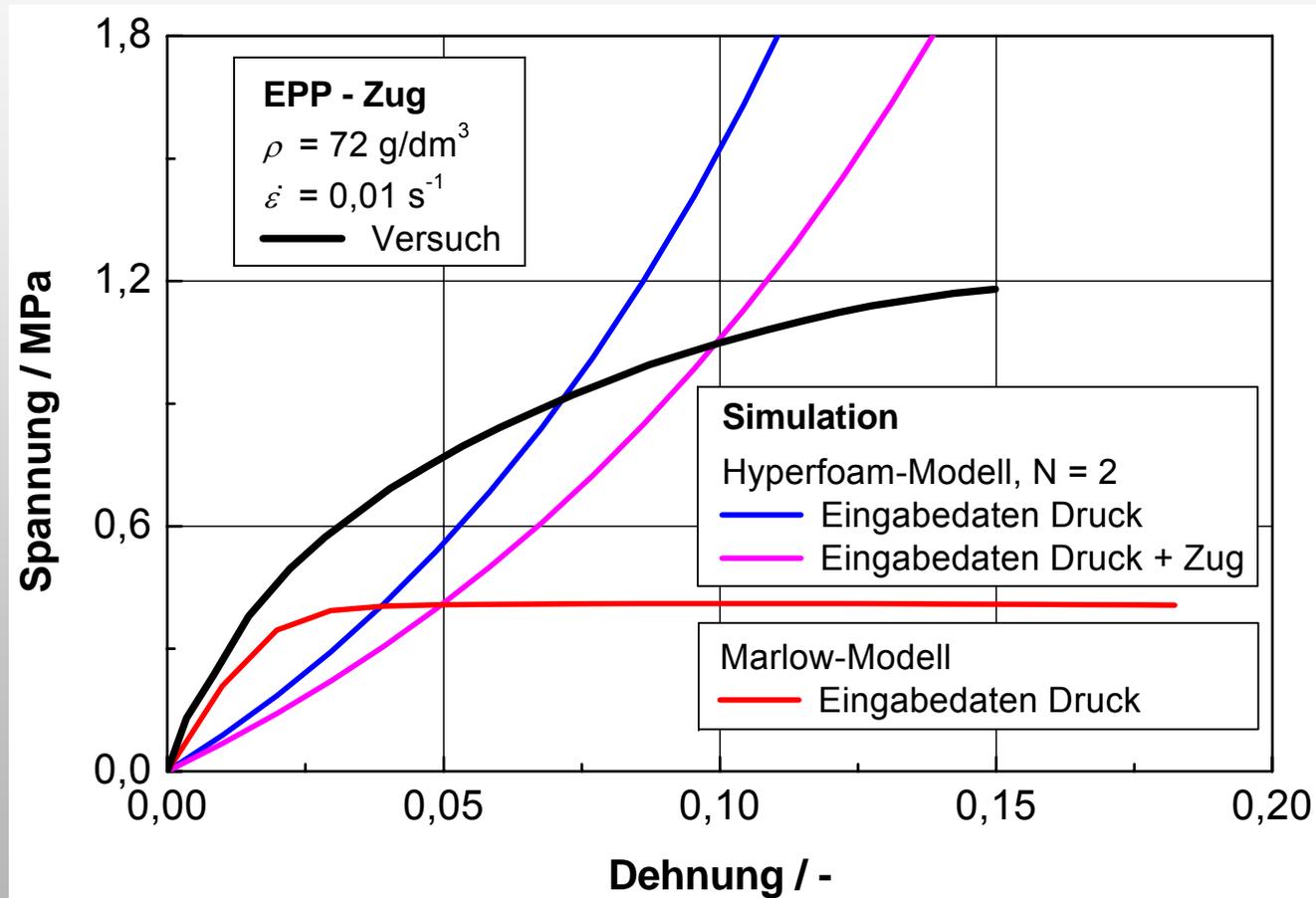


# Numerische Simulation von Schaumstoffen

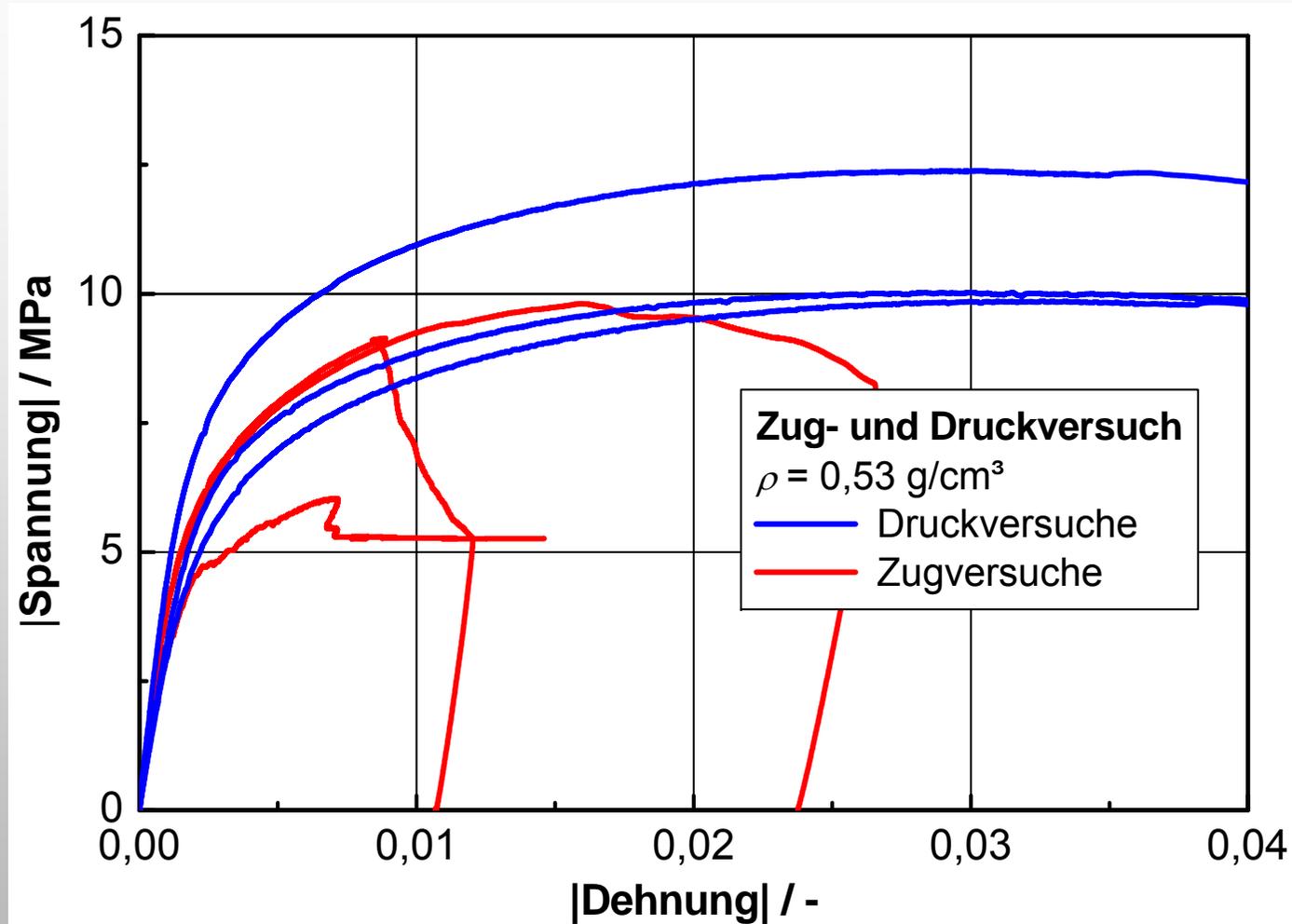
Hyperfoam Modell: 
$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i\beta_i} - 1) \right]$$

Marlow Modell: 
$$W = W_{dev}(\bar{I}_1) + W_{vol}(J)$$

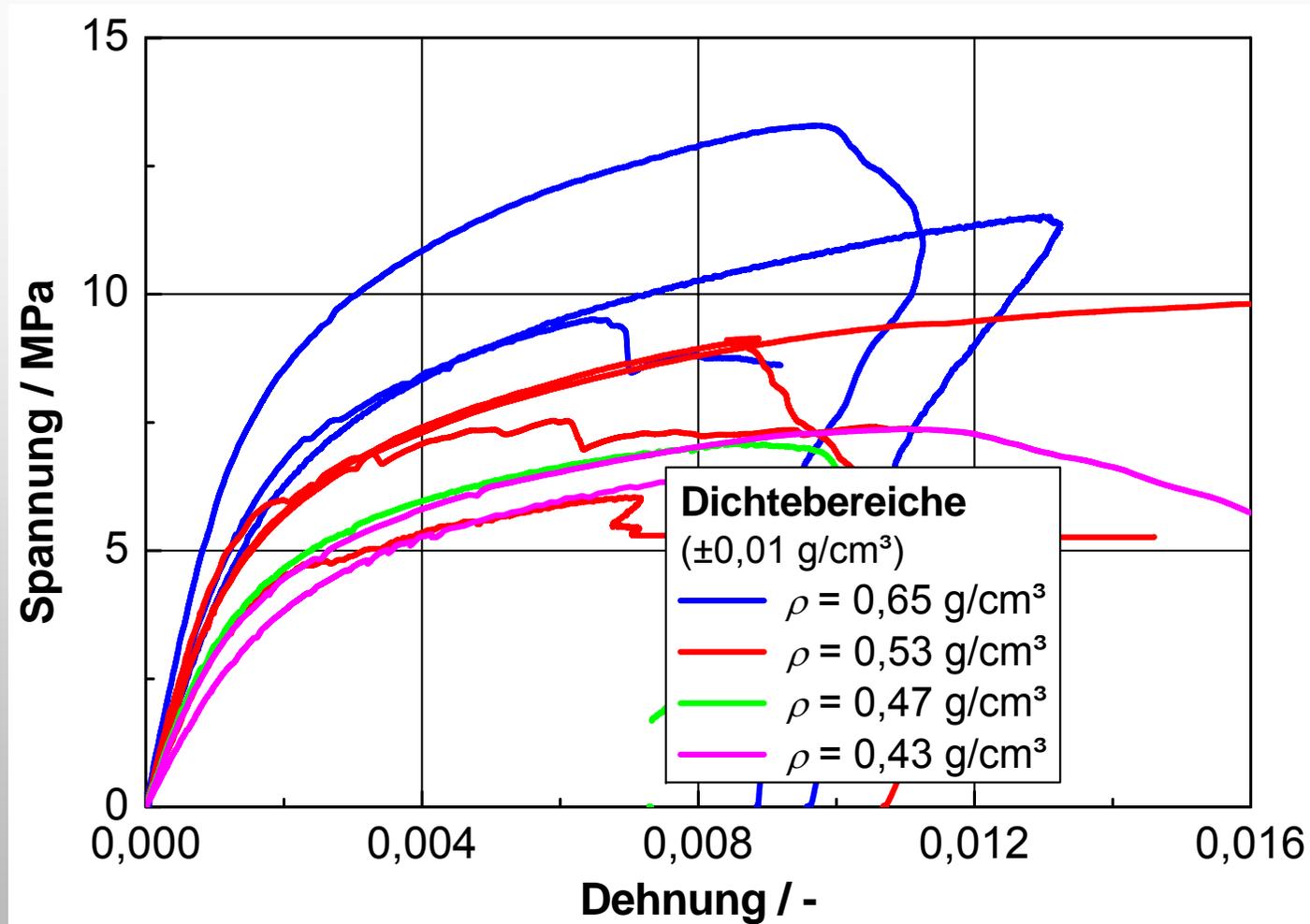
mit  $J = \sqrt{I_3} = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 = \frac{V}{V_0}$



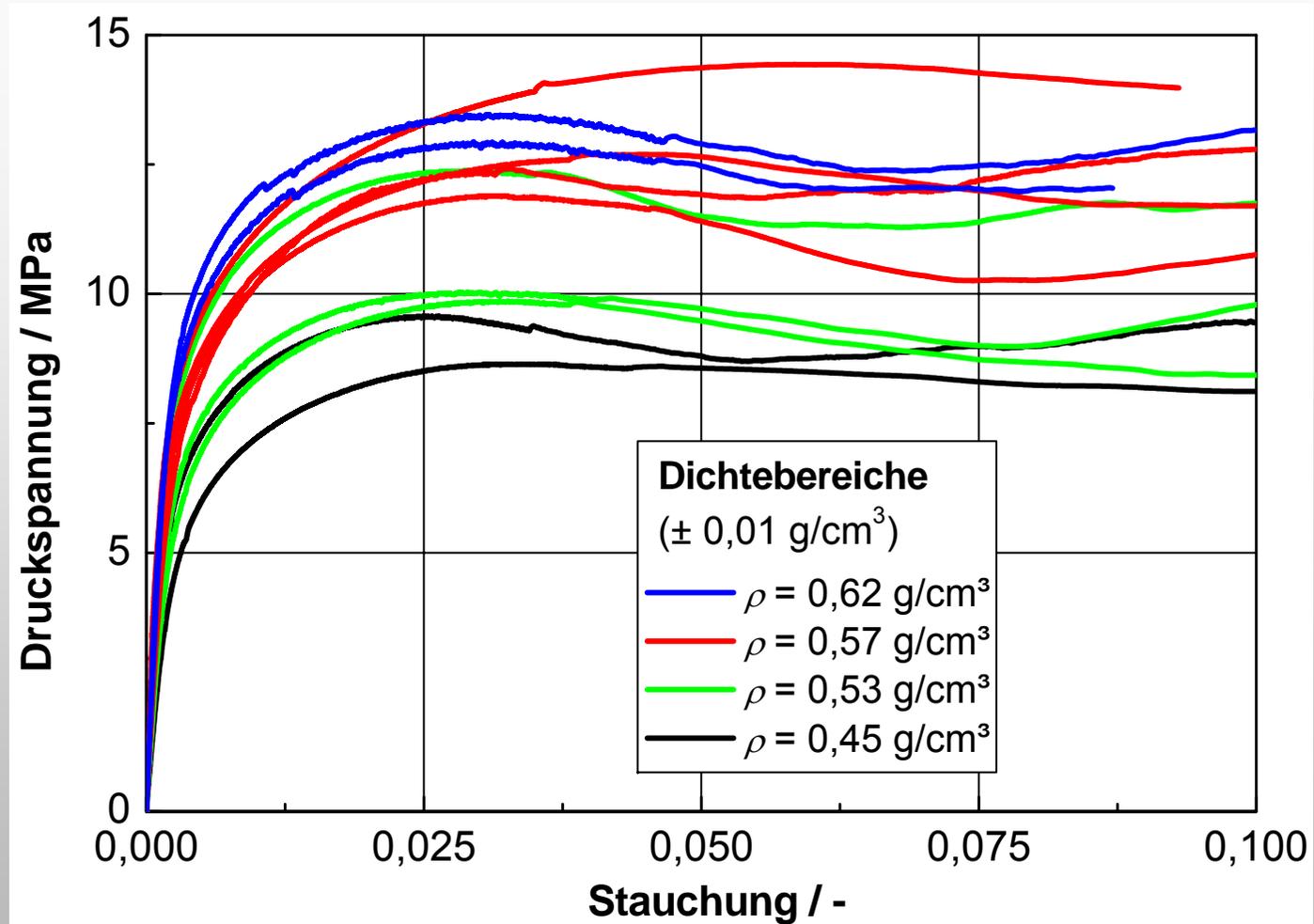
# Versuchsergebnisse Aluminiumschaum



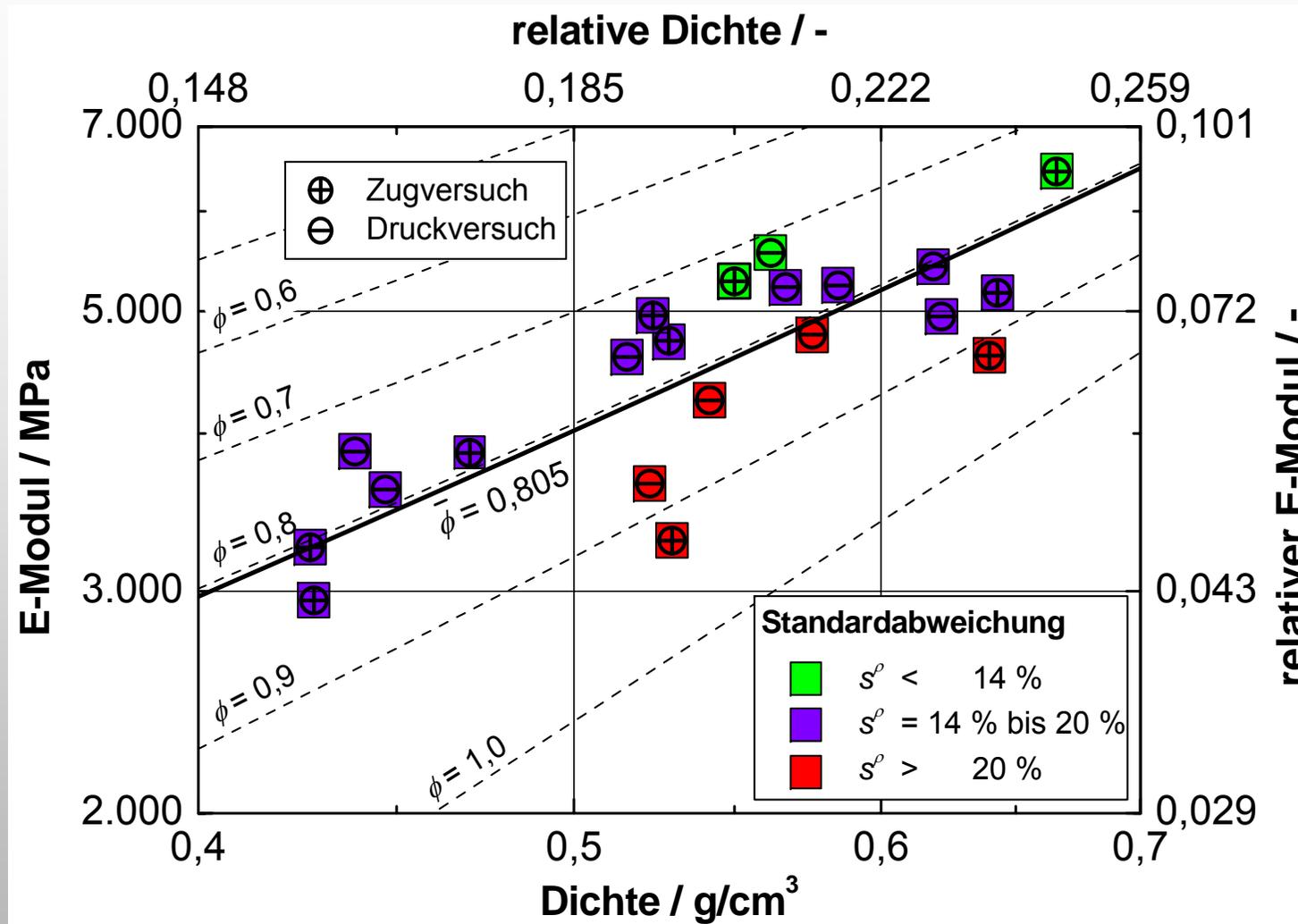
# Versuchsergebnisse Aluminiumschaum



# Versuchsergebnisse Aluminiumschaum

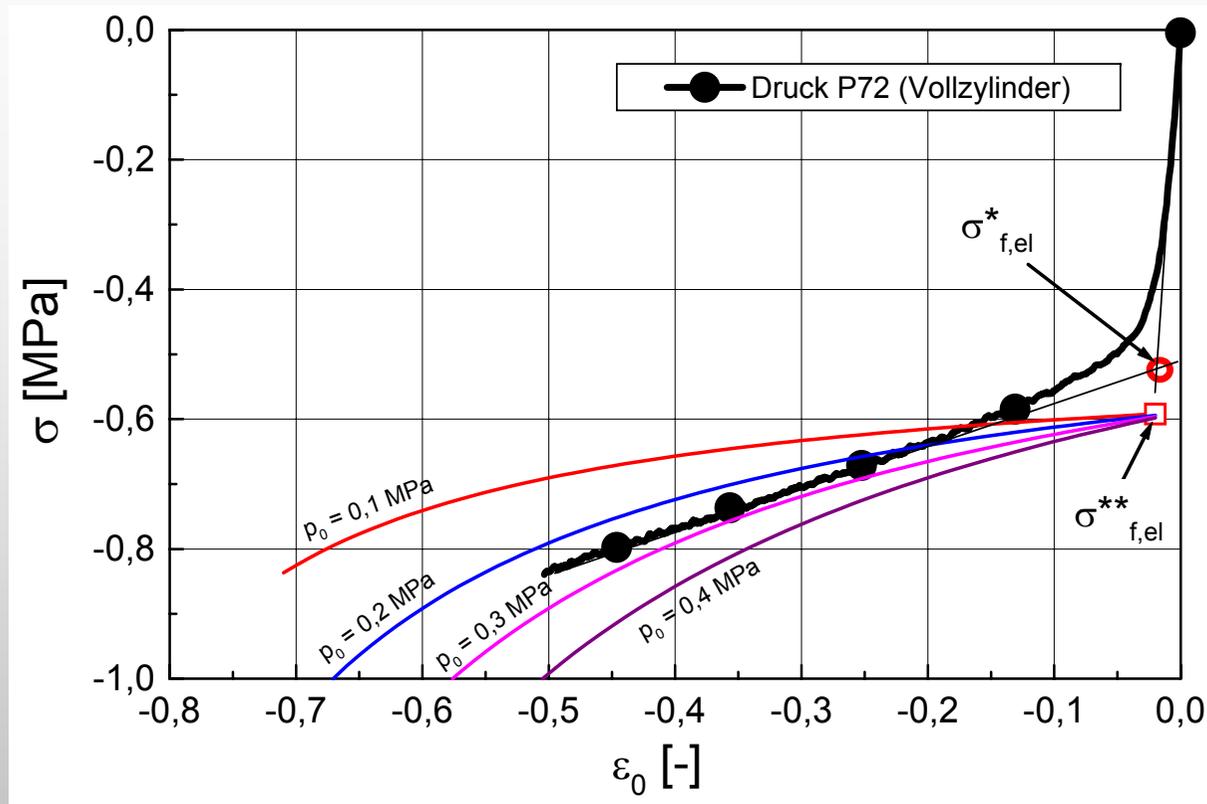


# Versuchsergebnisse Aluminiumschaum



$$\frac{E^*}{E_s} = \phi^2 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \phi) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)$$

# Versuchsergebnisse aus ein- und mehrachsiger Beanspruchung



Gibson-Ashby

$$\sigma_f = \sigma_{f,el}^{**} + \frac{p_0 \varepsilon (1 - 2\nu_f)}{1 - \varepsilon (1 - 2\nu_f) - \rho_f / \rho_s} \quad \sigma_{f,el}^{**} = \left[ 0,05 \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^2 + \frac{p_0 - p_{at}}{E_s} \right] E_s$$

# Zusammenfassung

---

- **Ermittlung des makroskopischen mechanischen Werkstoffverhaltens unter ein- und mehrachsiger Beanspruchung**
- **Entwicklung einer neuen Versuchsmethodik**
  - **eine Probenform für alle Versuchsarten sowie geeignete Probeneinspannung**
  - **Verformungsmessung (integral, partiell, lokal)**
  - **Versuchsdurchführung mit konstanter Dehnungs- und Gleitungsgeschwindigkeit**
- **Untersuchung des Querkontraktionsverhaltens von EPP mit Hilfe optischer Messverfahren**
- **Beschreibung des Versagensverhaltens**
  - **bimodale Versagensbedingungen**
  - **Überführung in den Vergleichspannungszustand mit Anstrengungshypothesen auf Grundlage des Plastischen Potentials mit quadratischen Ansätzen nach SCHLIMMER**
- **FE-Berechnungen mit Hyperfoam-Modell und MARLOW-Modell**