



# Mikro- und makroskopisches Verformungsverhalten offenporiger Metallschwämme

S. Demiray, W. Becker, J. Hohe

becker@mechanik.tu-darmstadt.de.

Institut für Mechanik



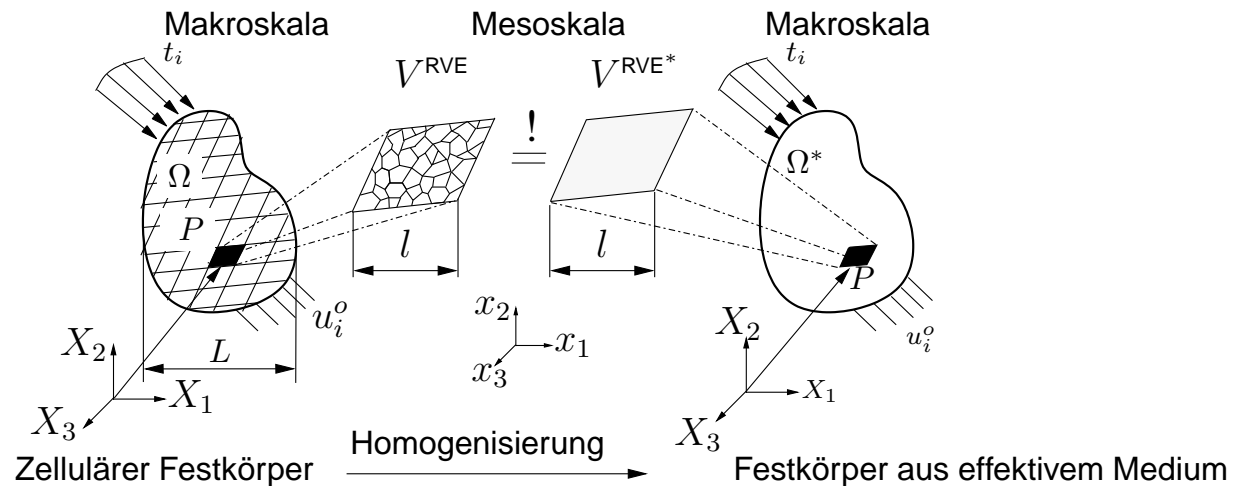
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



## Inhalt

- Einführung
- Mikromechanische Modellierung
  - Numerische Homogenisierung
  - 3-D Modellschaum
- Vergleich von Simulation mit experimentellen Daten
  - Materialien
  - Einsinnige Belastungsversuche
  - Isotherme Ermüdungsversuche
- Effektive Fließflächen
  - Anfangsfließfläche
  - Evolution der Fließfläche
- Zusammenfassung

# Energetische Homogenisierung



## ■ Äquivalenzbedingungen

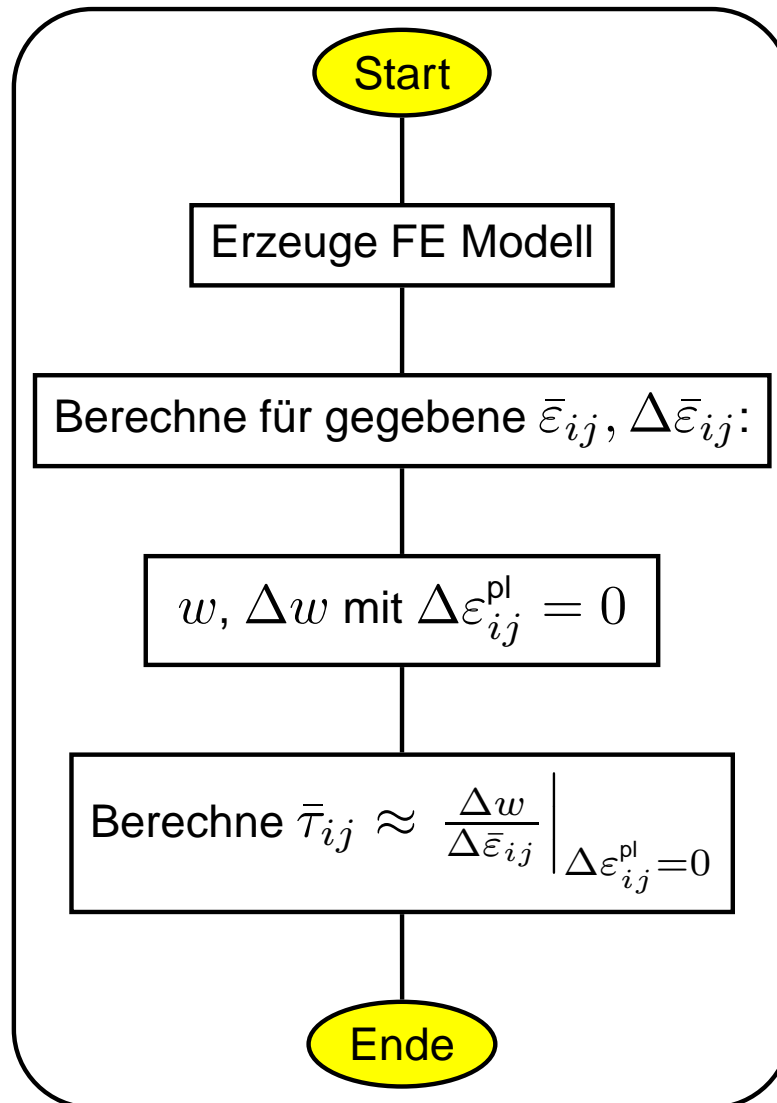
- Makroskopisch äquivalente Deformationszustände

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V^{RVE}} \int_{V^{RVE}} \varepsilon_{ij} dV \stackrel{!}{=} \frac{1}{V^{RVE}} \int_{V^{RVE}} \varepsilon_{ij}^* dV = \bar{\varepsilon}_{ij}^*$$

- Gleicher Betrag an gespeicherter Verzerrungsenergie in beiden RVEs

$$\bar{w} = \frac{1}{V^{RVE}} \int_{V^{RVE}} w dV \stackrel{!}{=} \frac{1}{V^{RVE^*}} \int_{V^{RVE^*}} w^* dV = \bar{w}^*$$

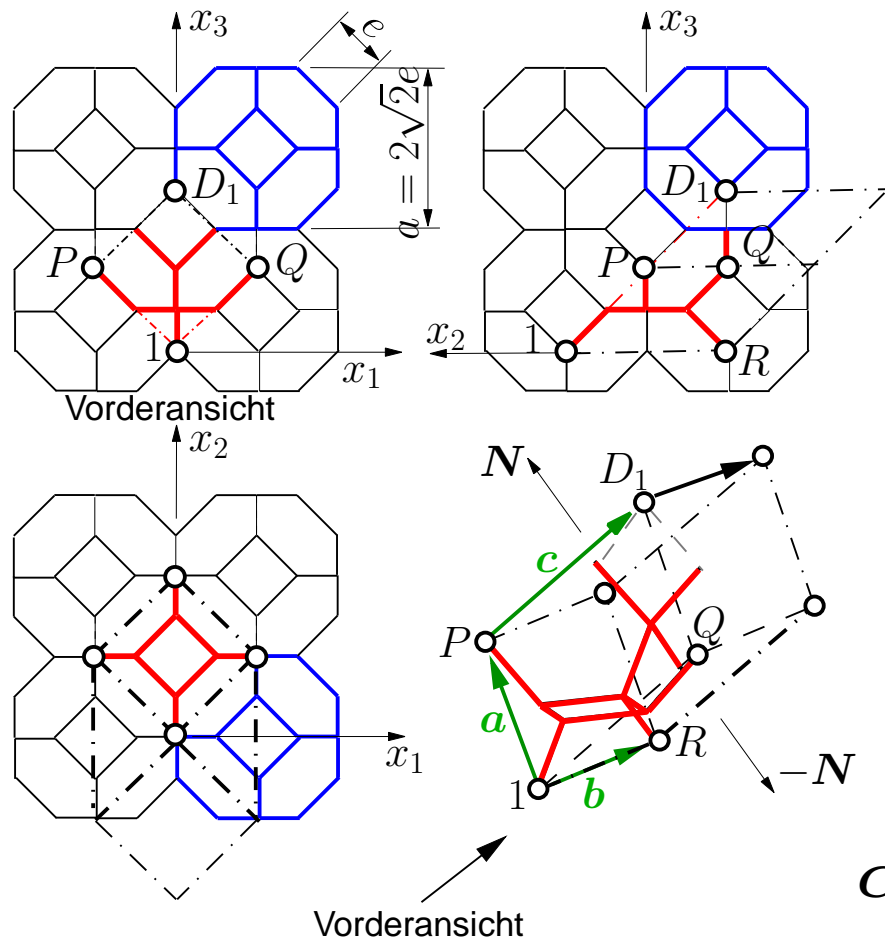
## Ablauf der Homogenisierungsrechnung



- Elastisch-plastisches Materialmodell auf der Mesoskala
- Numerische Berechnung der effektiven Spannungen  $\bar{\tau}_{ij}$
- Plastische Verzerrungen werden „eingefroren“ bei der Variation der Effektivdehnungen  $\bar{\varepsilon}_{ij}$



## 3-D Modellschwamm



- Kubisch-raumzentrierte (krz)  
Anordnung von Oktaederstümpfen

- Volumen des Oktaederstumpfs

$$V_{\text{Tetraikaidekaeder}} = 8\sqrt{2}e^3$$

- Volumen des primitiven RVEs

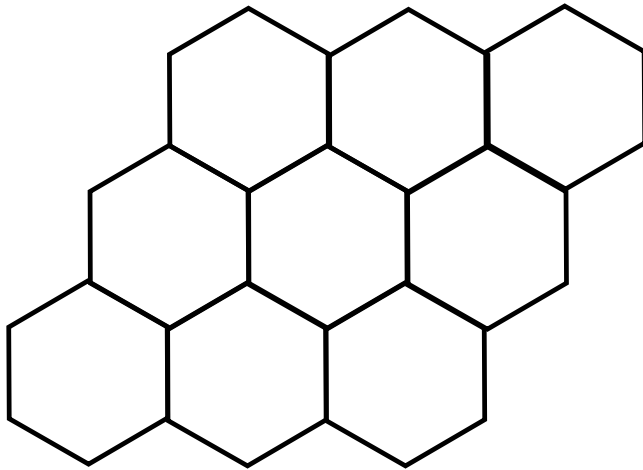
$$V_{\text{RVE}} = (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c} = \frac{1}{2}a^3 = 8\sqrt{2}e^3$$

- Kubische Symmetrie:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & & & \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & & & \\ & & & C_{66} & & \\ & & & & C_{66} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$$

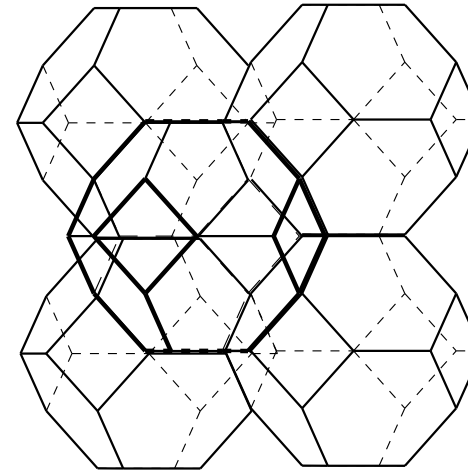
## Modellierung von offenporigen Metallschwämmen

### 2-D Modellschaum



- Hexagonale Mikrostruktur
- Sechs Symmetrieebenen  
⇒ Isotropes Verhalten für kleine Deformationen
- Raumfüllendes Polygon

### 3-D Modellschaum

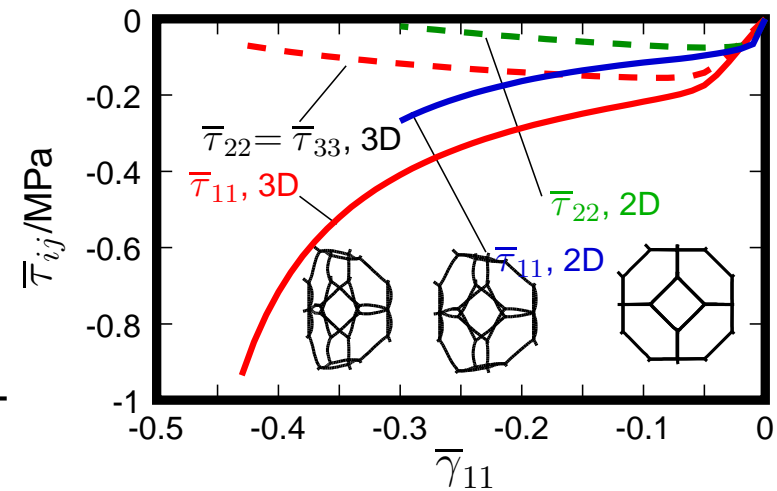


- krz-Gitter bestehend aus Tetrakaidekaeder-Zellen
- Kubische Symmetrie; sehr geringe Anisotropie
- Raumfüllender Polyeder

## Einfluß der Modelldimension

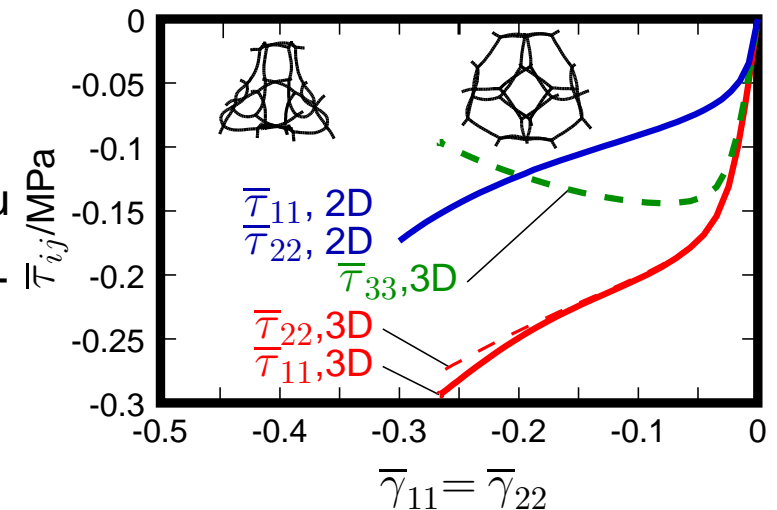
### Einachsige Druckdeformation

- niedrigste Beuleigenform als Anfangsimperfektion
- qualitativ ähnliches Materialverhalten
- quantitative Unterschiede in den Spannungsgrößen



### Biaxiale Druckdeformation

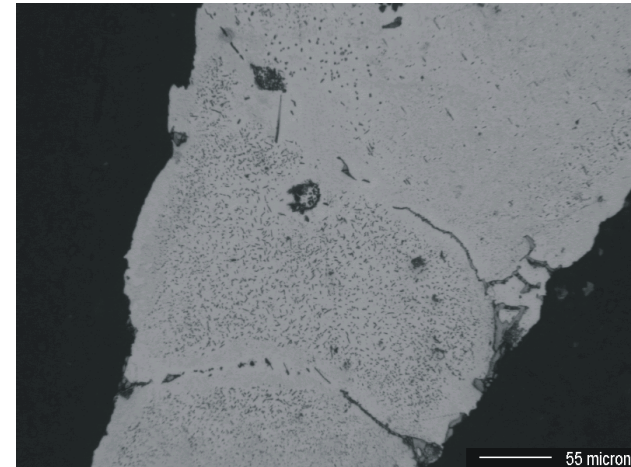
- kein ausgeprägtes Spannungs-Plateau im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen



## Materialien

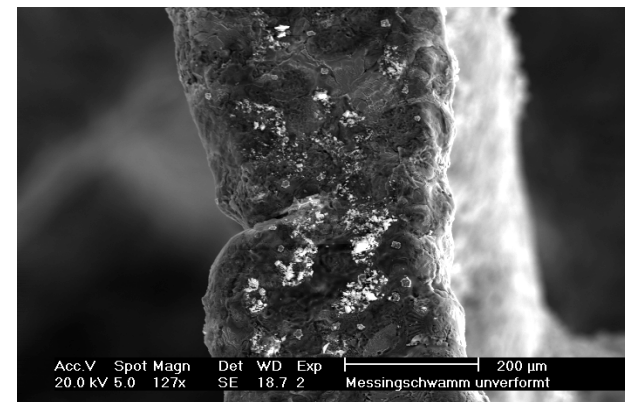
### ■ **PORMET-Schaum:**

- AlSi9Cu3,  $\rho = 0.15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
- Sprödes Verhalten
- Korndurchmesser  $\approx$  Zellstegdicke
- Silizium-Ausscheidungen an den Korngrenzen



### ■ **Messingschwamm:**

- $\alpha$ -Messing (11% Zn; 3,5%Si),  
 $\rho = 0.4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
- Duktiles Deformationsverhalten
- feinkörnige Mikrostruktur der Zellstege
- Hersteller: Gießerei-Institut, RWTH Aachen

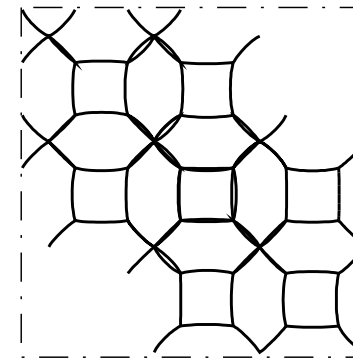
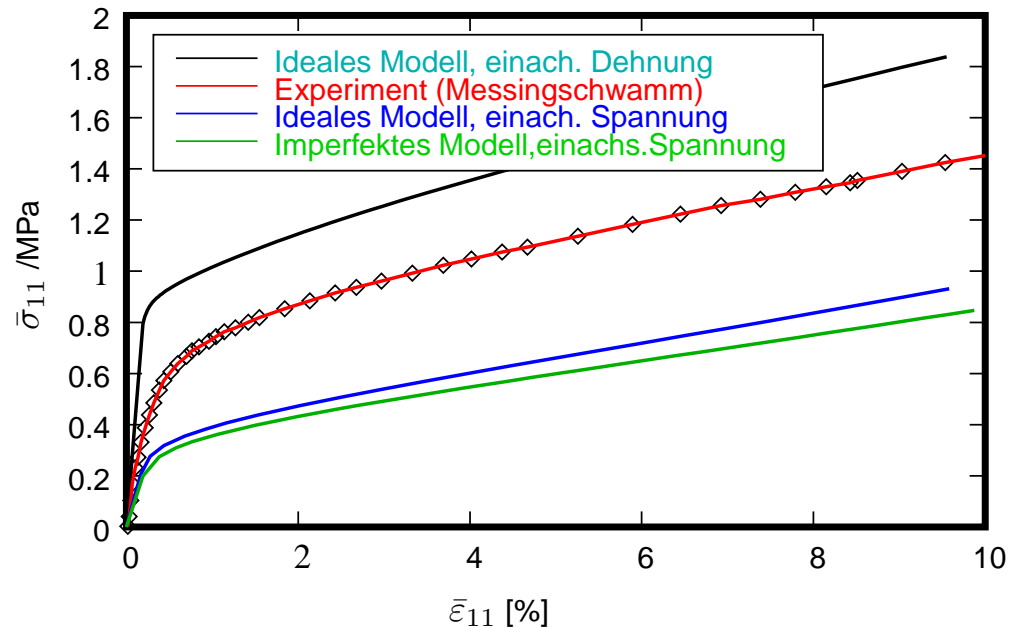


## Experimenteller Versuchsaufbau

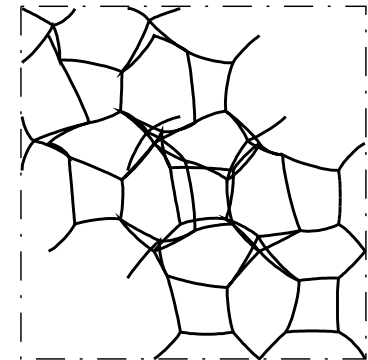


- Isotherme und thermomechanische Prozeßführung möglich
- Versuchsdurchführung durch Projektpartner an der Universität Siegen (Prof. Christ)
- Proben:
  - Abmessungen:  
 $32\text{mm} \times 50\text{mm} \times 118\text{mm}$
  - Relative Dichte:  $\bar{\rho} = 0.0848$
- Speziell-konstruierte Probenaufnahmen

## Einfluß der Randbedingungen

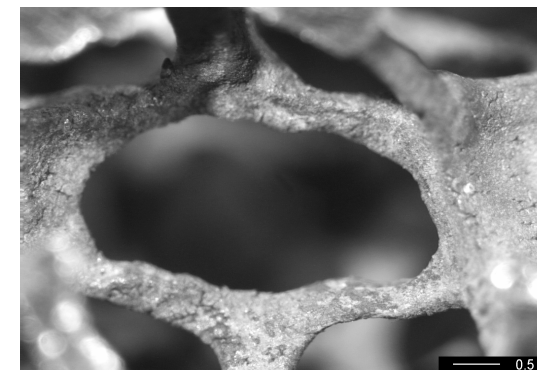


Regulärer  
Modellschaum

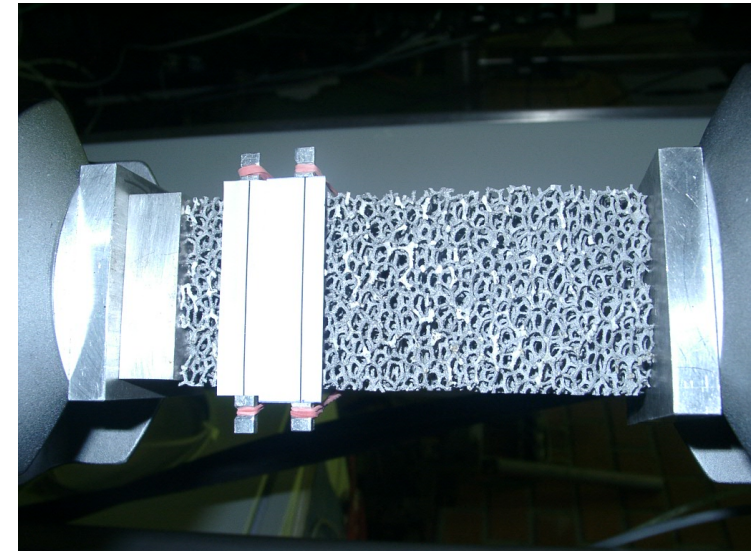
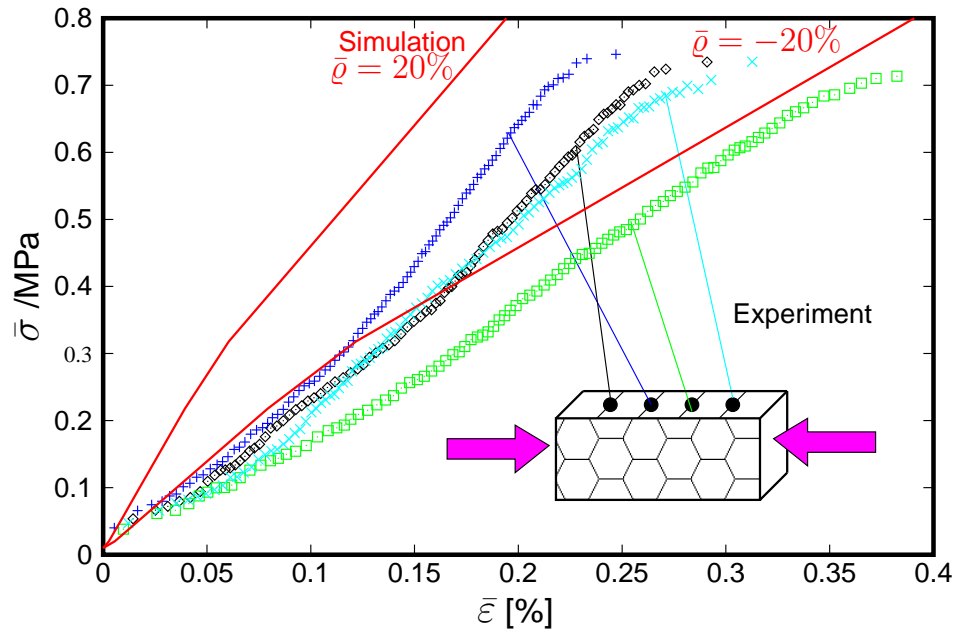


Irregulärer  
Modellschaum

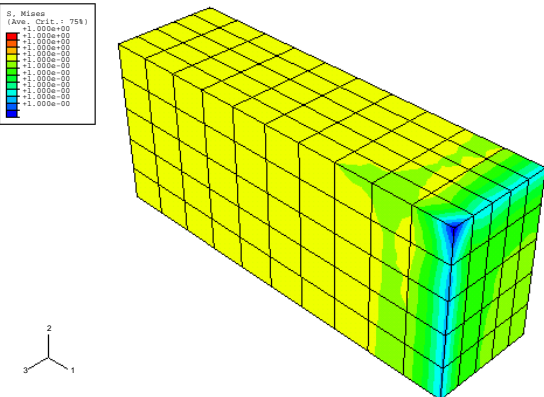
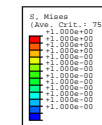
- Versuch: Festeingespannte Probenenden
- Simulation: Homogene einachsige Dehnungen und Spannungen
- Experimentelle Spannungs-Dehnungskurve liegt zwischen den beiden theoretischen Grenzfällen
- Ausrichten von Zellstegen in die Belastungsrichtung



# Einfluß der lokalen Schaumdichte

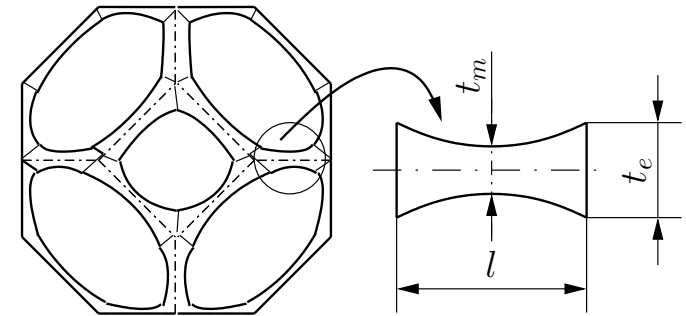
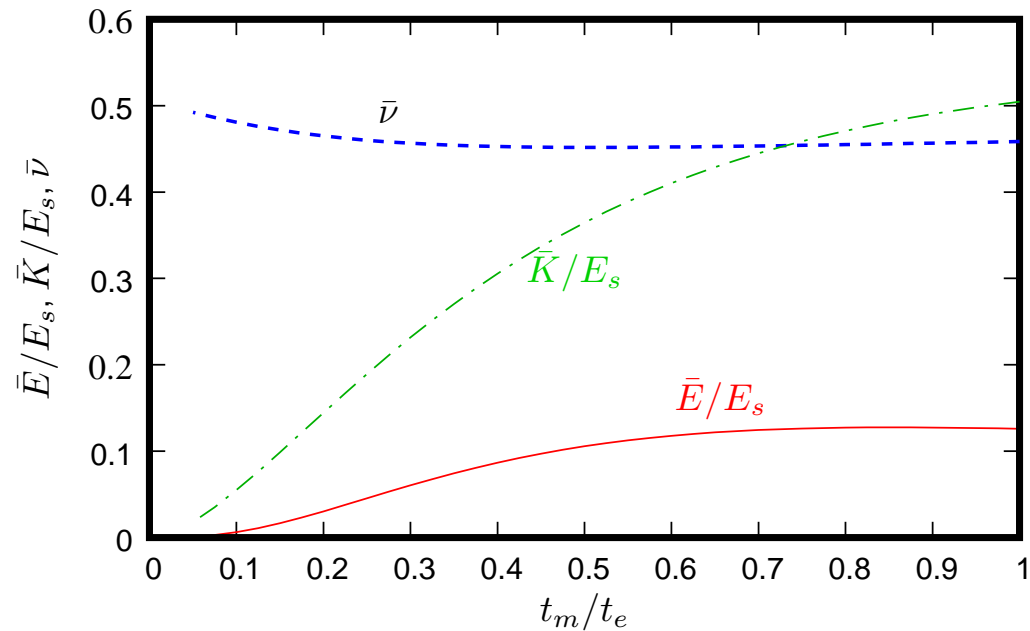


- Experiment: Inhomogenität der Probe auf der Makroebene
- Simulation: Variation der relativen Dichte um  $\pm 20\%$
- Unterschiedliche Spannungs-Dehnungskurven resultieren aus Schwankungen der relativen Dichte





## Einfluß der Materialverteilung



- Lichtmikroskopie: Ungleichmäßige Materialverteilung infolge des Fertigungsprozesses
- Effektive Poissonzahl  $\bar{\nu} \approx 0.5$ ; fast unabhängig von der Materialverteilung  $t_m/t_e$ .
- geringe Abhängigkeit des effektiven E-Moduls im Bereich  $0.4 \leq \frac{t_m}{t_e} \leq 0.6$ .



# Homogenisierungskonzept zur Ermittlung von Fließflächen

Lastpfade im Dehnungsraum

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \lambda \bar{\varepsilon}_{ij}^0$$

Kriterium für makroskopisches Fließen:

$$\exists \mathbf{x} \in V : F(\sigma_{ij}) := \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} - \sigma_y = 0$$

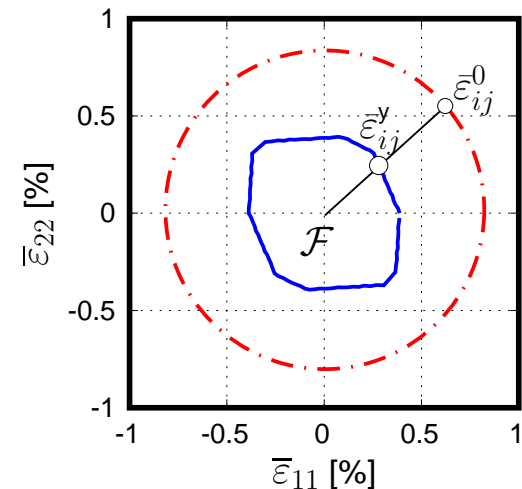
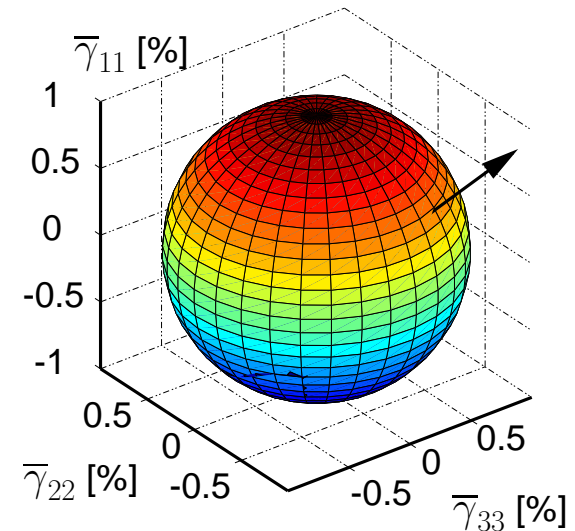
Definition effektiven Größen:

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \frac{1}{V_{RVE}} \int_V \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) dV$$

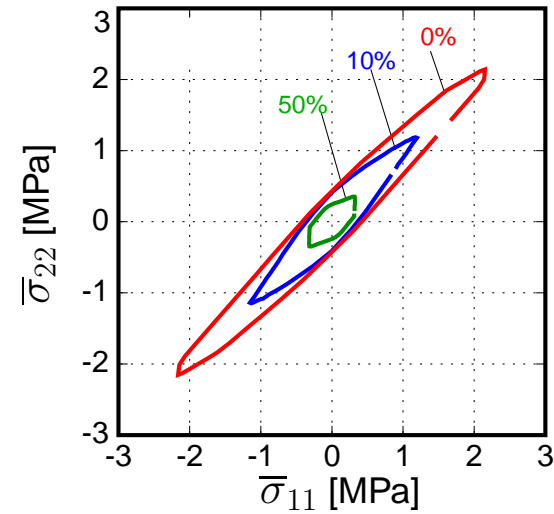
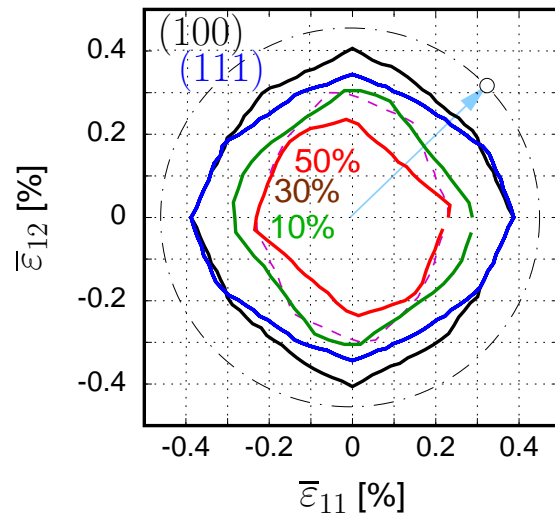
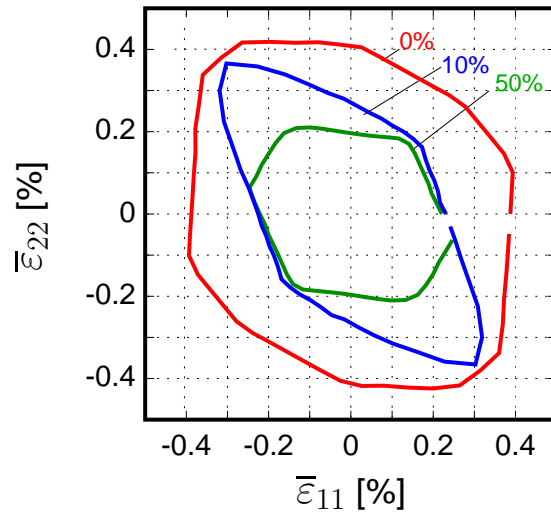
$$\bar{\mathbf{F}} = \langle \mathbf{F} \rangle = \frac{1}{V_{RVE}} \int_V \mathbf{F}(\mathbf{x}) dV$$

Numerische Homogenisierung:

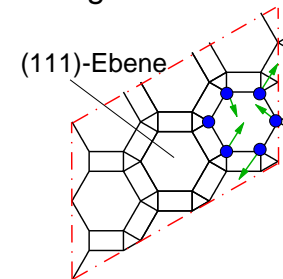
$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{\partial V} \mathbf{t} \otimes \mathbf{x} dV$$



# Einfluß von Imperfektionen



Randomisierung des idealen Modellschaums

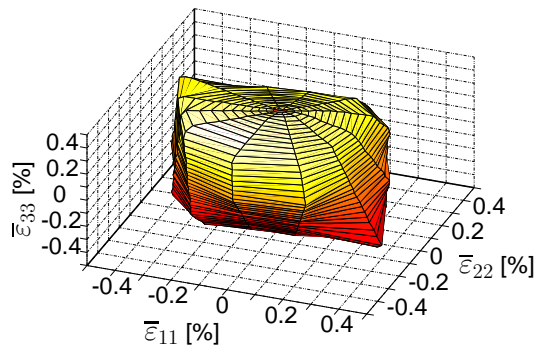


$$\frac{\bar{\sigma}_y}{\sigma_s} \sim \bar{\rho} \quad \text{Streckung}$$

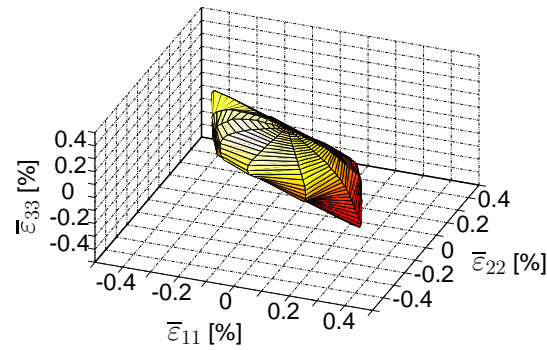
$$\frac{\bar{\sigma}_y}{\sigma_s} \sim \bar{\rho}^{\frac{3}{2}} \quad \text{Biegung}$$

# Gestalt der Makro-Fließflächen

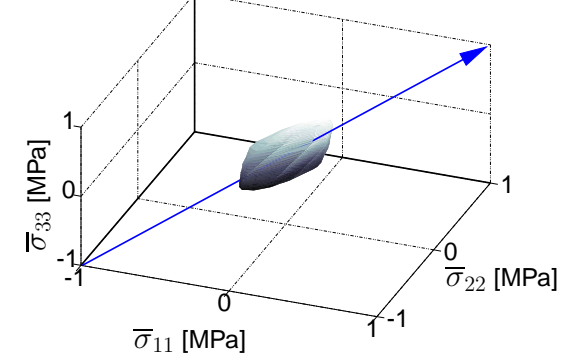
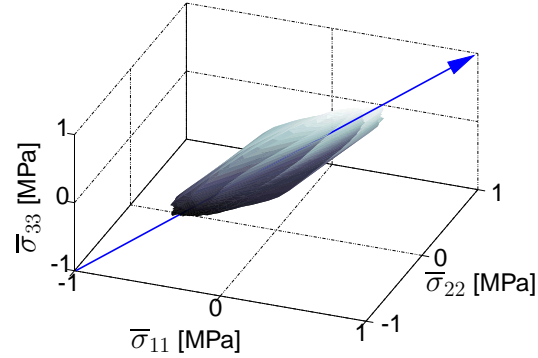
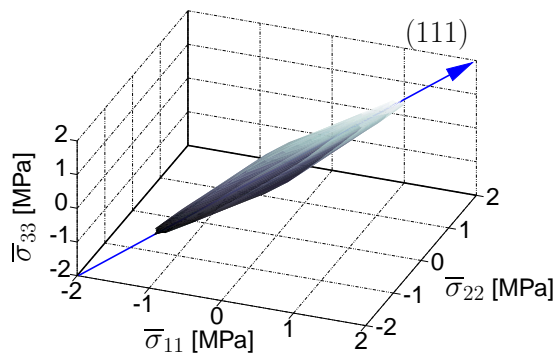
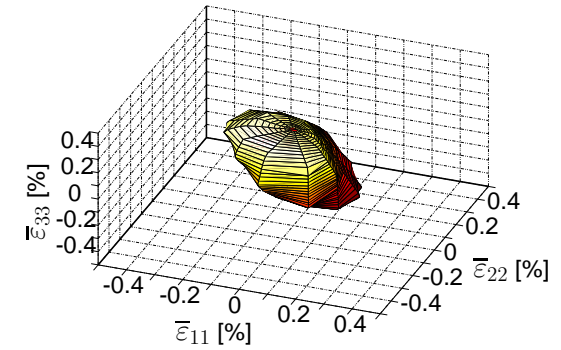
Perfekte Mikrostruktur



30%-Modellschaum

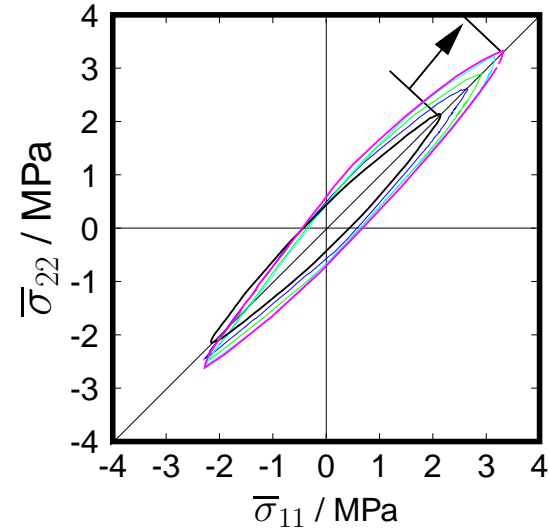
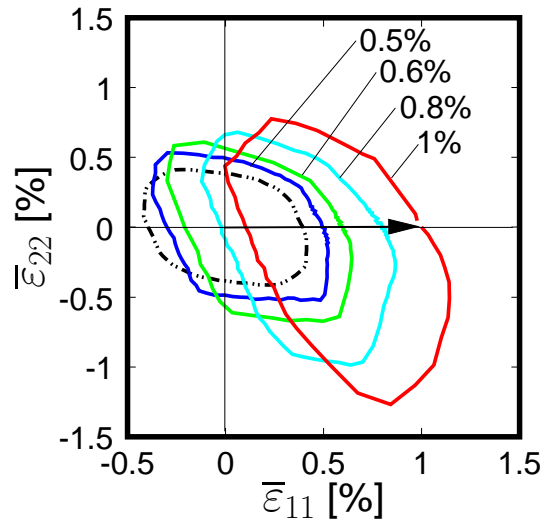


50%-Modellschaum

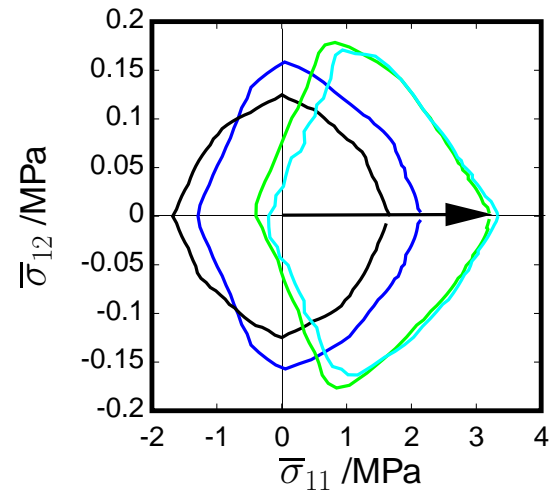
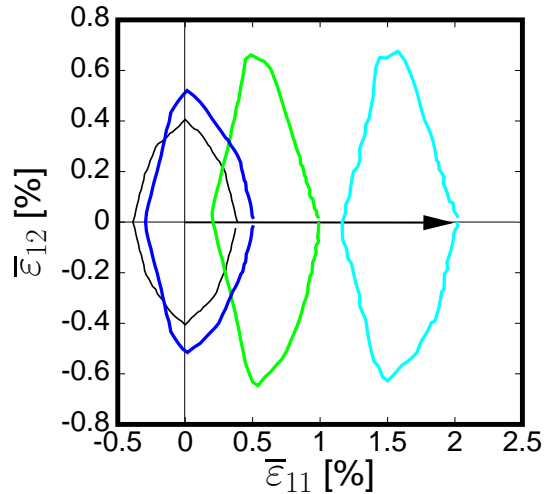


## 3-D Modellschaum: Einachsige Zugdeformation

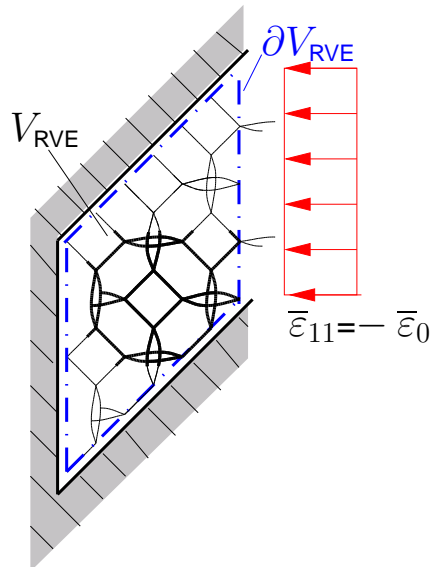
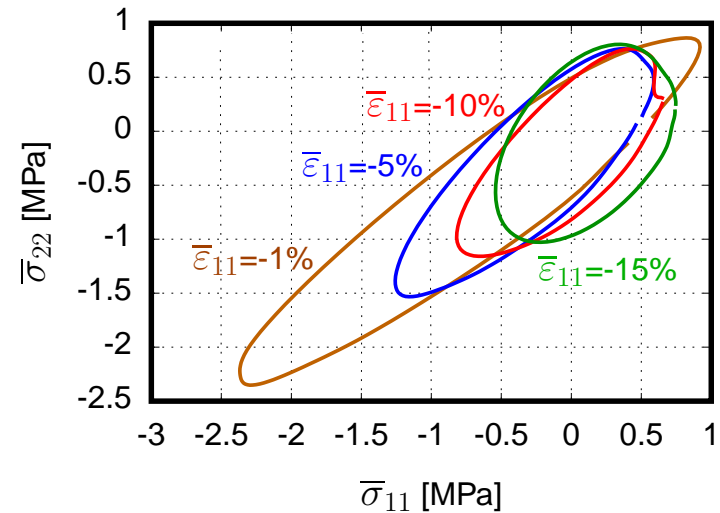
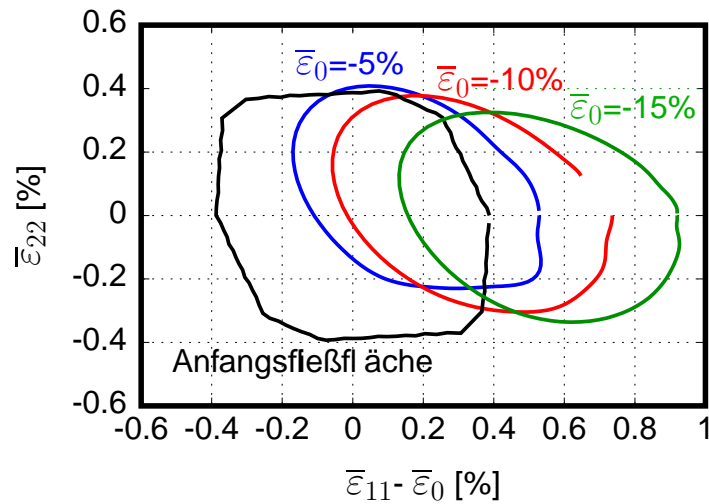
- Lastpfade in der  $\bar{\varepsilon}_{11} - \bar{\varepsilon}_{22}$  Ebene



- Lastpfade in der  $\bar{\varepsilon}_{11} - \bar{\varepsilon}_{12}$  Ebene



## Evolution der Makro-Fließfläche



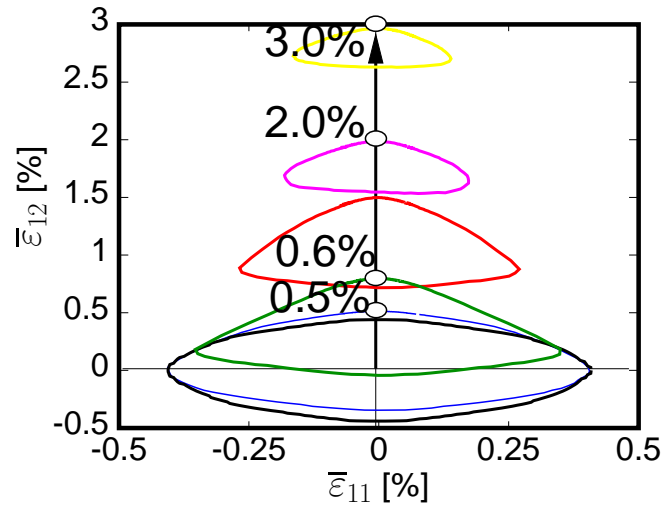
- Randbedingungen:

$$\bar{\epsilon} = \begin{bmatrix} \bar{\epsilon}_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{mit } \bar{\epsilon}_0 \leq 0$$

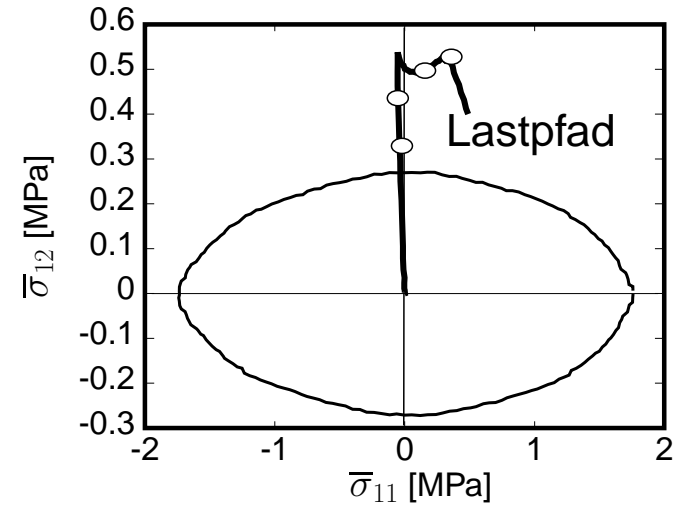
- Zellstege: elastisch-ideal plastisch  
 $\sigma_y = 200 \text{ MPa}$

## 3-D Modellschaum: Schubdeformation

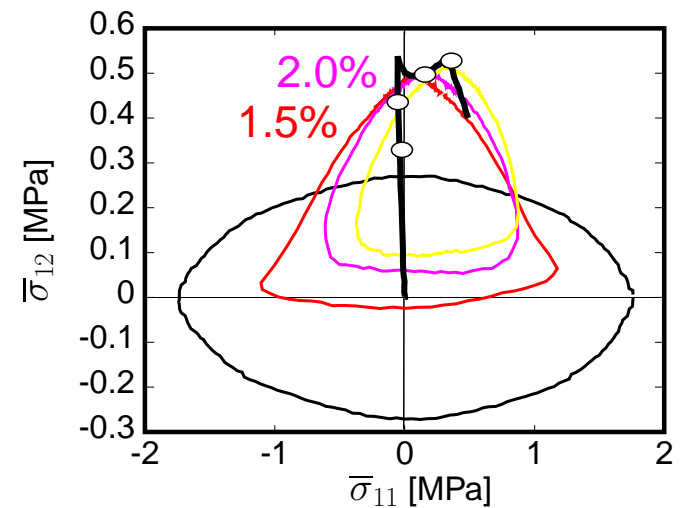
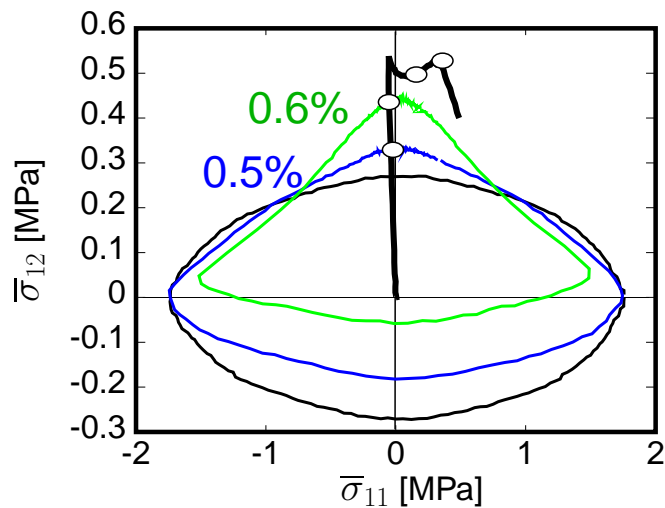
a) Dehnungsraum



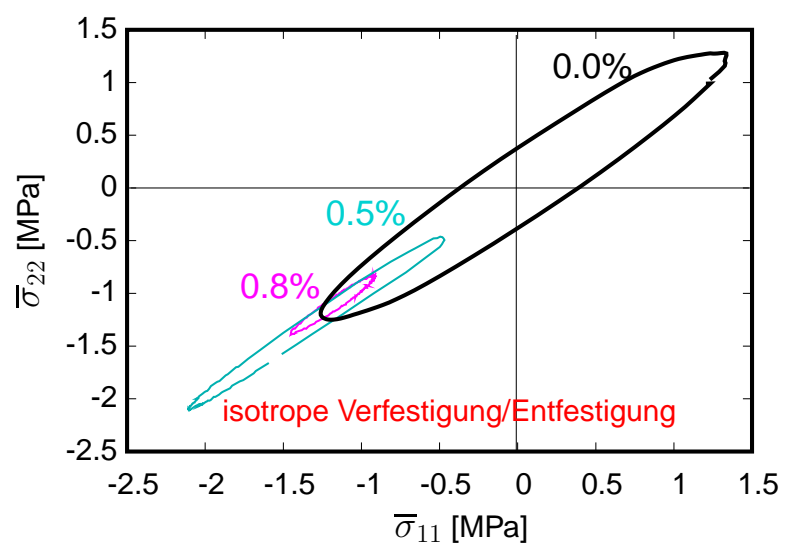
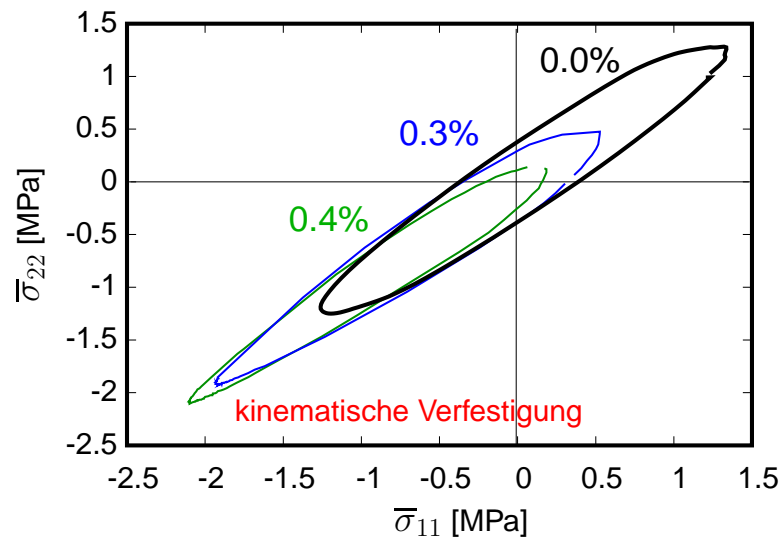
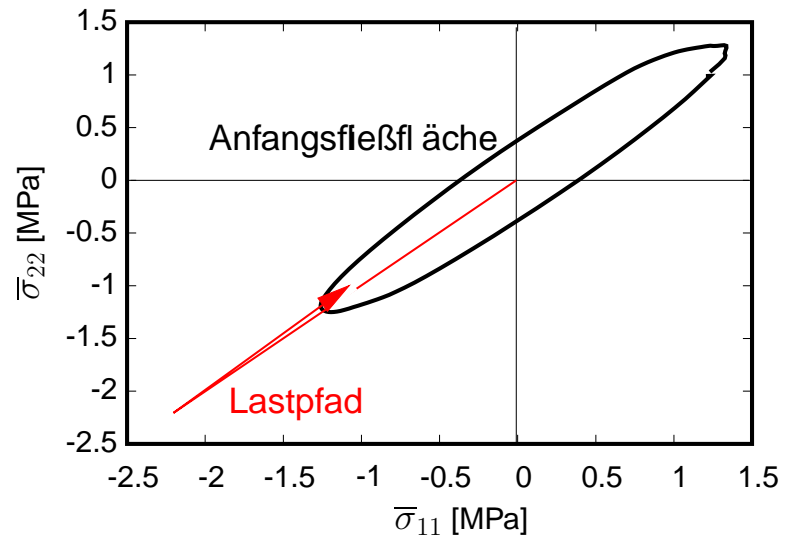
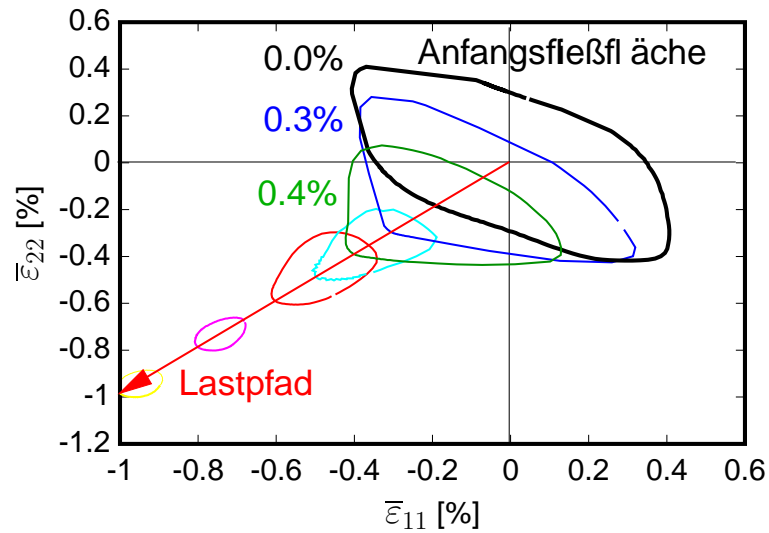
b) Lastpfad im Spannungsraum



c) Spannungsraum



## 3-D Modellschaum: Biaxiale Stauchung





## Zusammenfassung

- Berechnung der effektiven, mechanischen Eigenschaften mittels verzerrungsenergiebasierter Homogenisierung
- FE-Modelle auf der Basis von idealisierten, periodischen Mikrostrukturen
- Simulationsergebnisse zeigen in Verbindung mit experimentellen Versuchen:
  - quantitativ unterschiedliches Verhalten von 2-D und 3-D Modellschäumen für äquivalente Lastfälle
  - Ausbildung von deformationsinduzierten Anisotropien
  - signifikanter Einfluß der Randbedingungen/ Probeneinspannung
  - Inhomogenität der Proben ist verantwortlich für Streuung der effektiven Spannungs-Dehnungskurven
- Numerische Experimente zur Ermittlung der Makro-Fließflächen
  - effektive Makro-Fließflächen zeigen interessante Effekte in ihrem Evolutionsverhalten