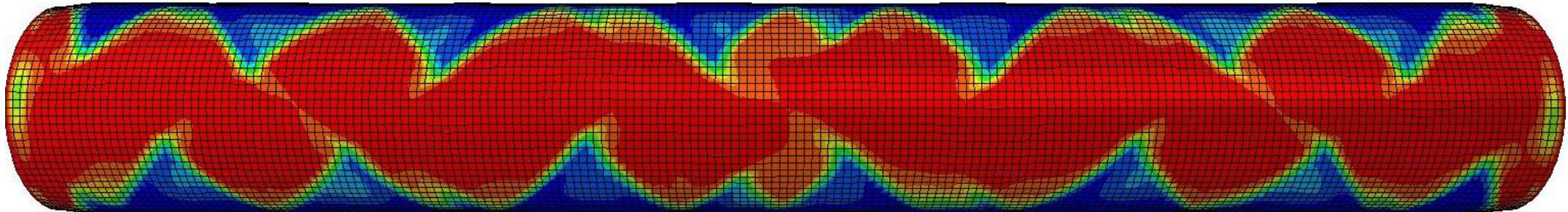
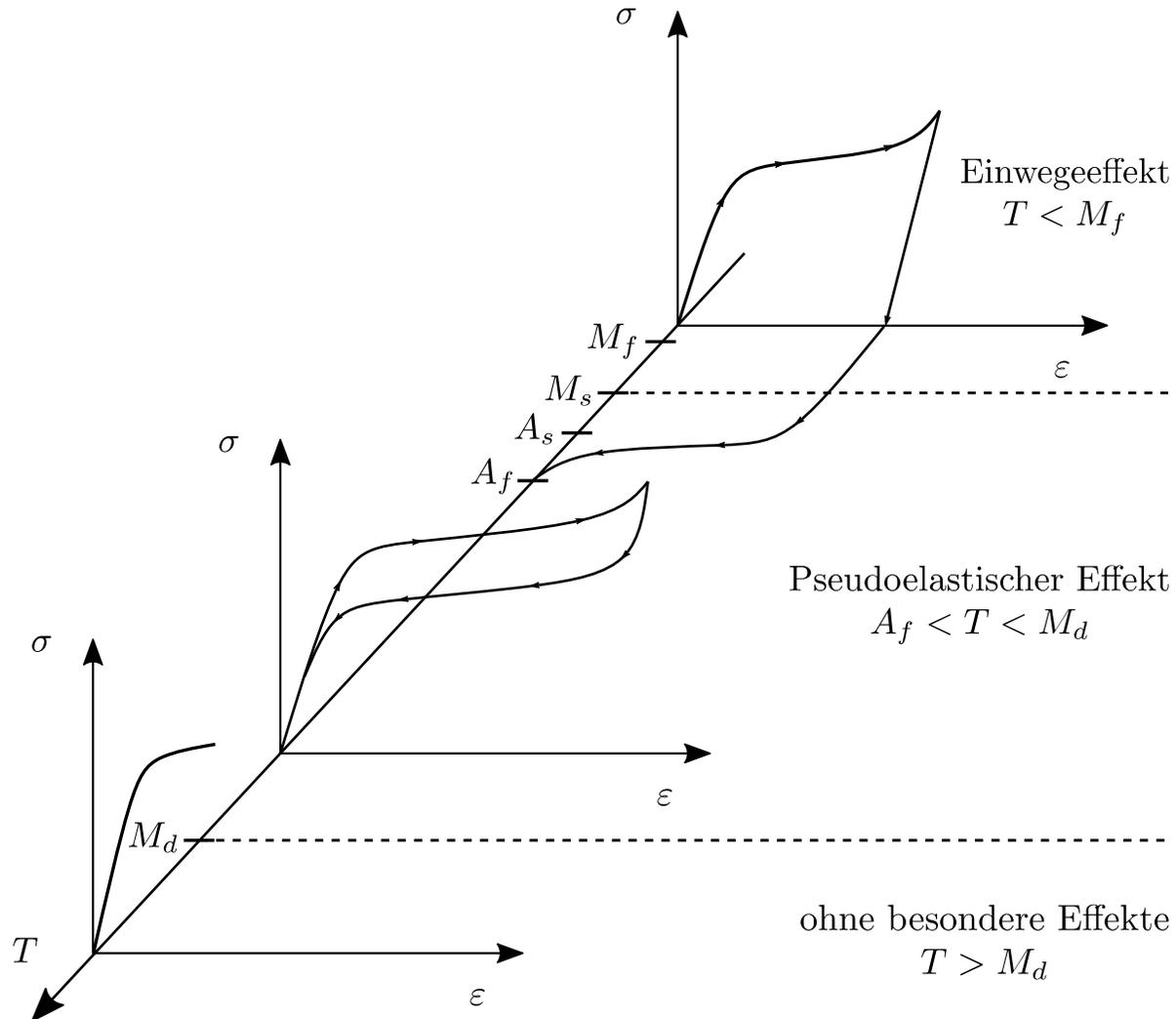


# FE-Simulation von Lokalisierungsphänomenen in pseudoelastischen Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen



Richard Gypstuhl

# 1. Formgedächtnislegierungen – Mechanisches Verhalten



- Temperatur  $A_f < T < M_d$
- spannungsinduzierte Phasenumwandlung und Entzwillung des Martensit
- Lokalisierung durch Entfestigung

## 2. Materialmodell und Erweiterungen – Grundmodell nach Lagoudas

- auf Basis einer Elastoplastizität modelliert

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}} \cdot (\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{\alpha}}(T - T_0) - \underline{\underline{\varepsilon}}^t)$$

- Ansatzgleichung für innere Variable Transformationsdehnung

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^t = \underline{\underline{\Lambda}}^t \dot{\xi} \quad \xi \in [0, 1], \quad \xi = 0 : \text{Austenit}, \quad \xi = 1 : \text{Martensit}$$

$\underline{\underline{\sigma}}$	Spannungstensor
$\underline{\underline{\varepsilon}}$	Dehnungstensor
$\underline{\underline{\varepsilon}}^t$	Tensor der Transformationsdehnung
$\underline{\underline{\alpha}}$	Tensor der Wärmeausdehnung
$\underline{\underline{C}}$	Steifigkeitstensor
$\underline{\underline{\Lambda}}^t$	Richtungstensor
$\xi$	Martensitgehalt
$\zeta$	Phasenumwandlungsrichtung

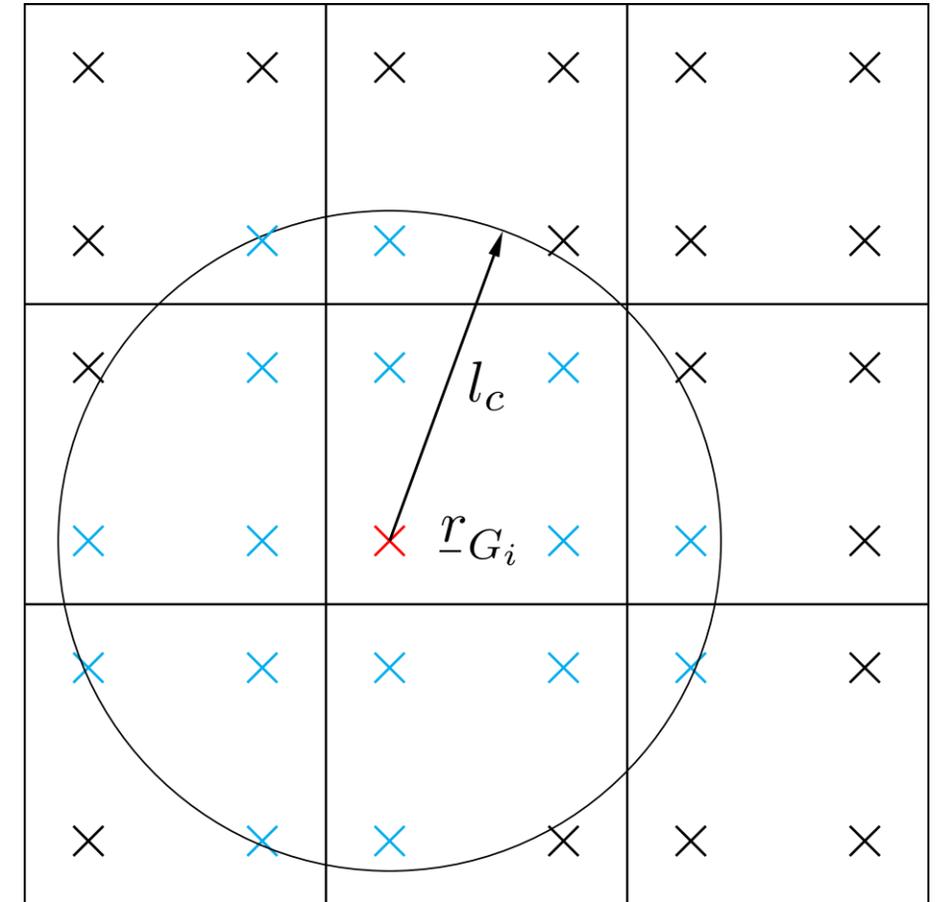
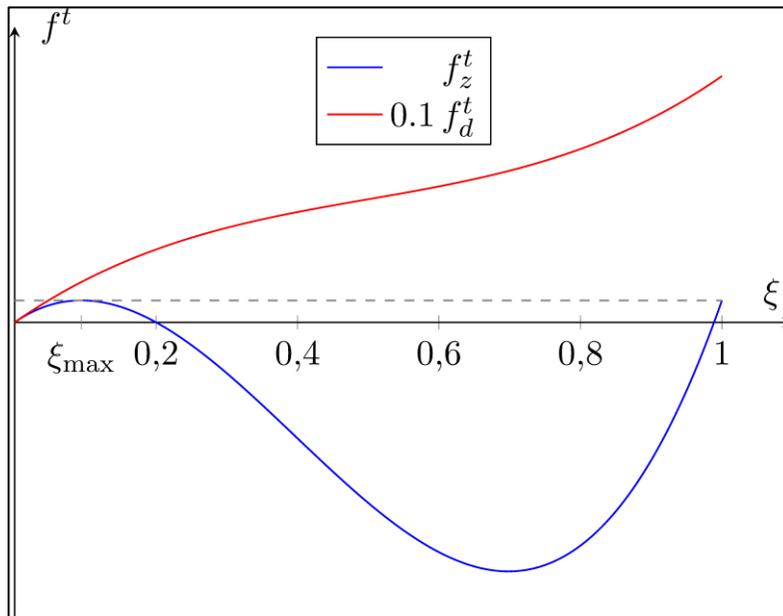
- Zeitableitung von Martensitgehalt ist Phasenumwandlungsrichtung
 
$$\zeta = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \xi = 0 \text{ oder } \Phi_{\text{fwd}} = 0 \\ -1, & \text{wenn } \Phi_{\text{rev}} = 0 \\ \text{konst.}, & \text{wenn } \Phi_{\text{fwd}} \neq 0 \text{ und } \Phi_{\text{rev}} \neq 0 \end{cases}$$
 → wird als plastischer Multiplikator verwendet  
 → Bestimmung Phasenumwandlungsrichtung über eigenes Kriterium:
- zwei Fließfunktionen, zwei Kuhn-Tucker-Bedingungen, richtungsabhängig

$$\begin{aligned} \dot{\xi} > 0 : \quad & \Phi_{\text{fwd}} = \Phi_{\text{fwd}}(\underline{\underline{\sigma}}, T, f_{\text{fwd}}^t) \\ & \dot{\xi} \geq 0, \Phi_{\text{fwd}} \leq 0, \dot{\xi} \Phi_{\text{fwd}} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\xi} < 0 : \quad & \Phi_{\text{rev}} = \Phi_{\text{rev}}(\underline{\underline{\sigma}}, T, f_{\text{rev}}^t) \\ & \dot{\xi} \leq 0, \Phi_{\text{rev}} \leq 0, \dot{\xi} \Phi_{\text{rev}} = 0 \end{aligned}$$

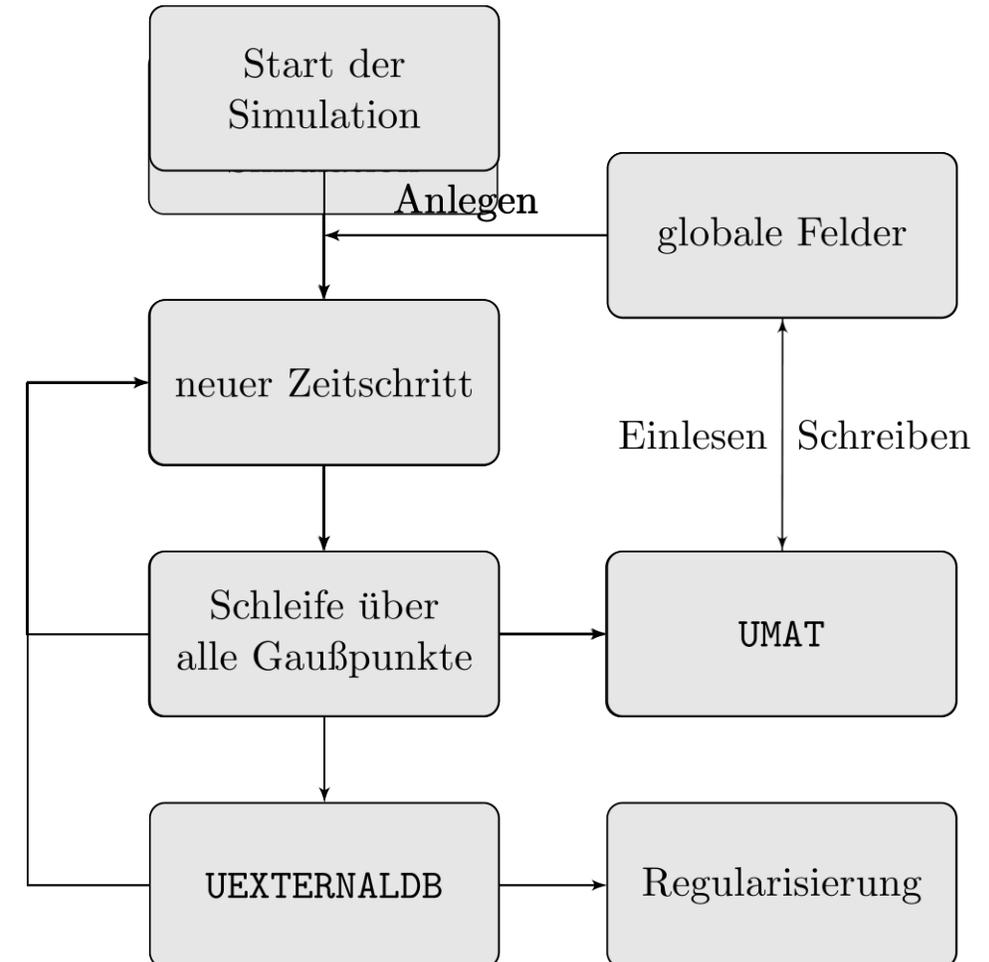
### 3. Regularisierung – Theorie

- Mechanismus, um Netzabhängigkeit durch Entfestigung entgegenzuwirken
- Einbringen einer festen Länge  $l_c$
- lokale Werte werden gemittelt  $\rightarrow$  nichtlokaler Wert

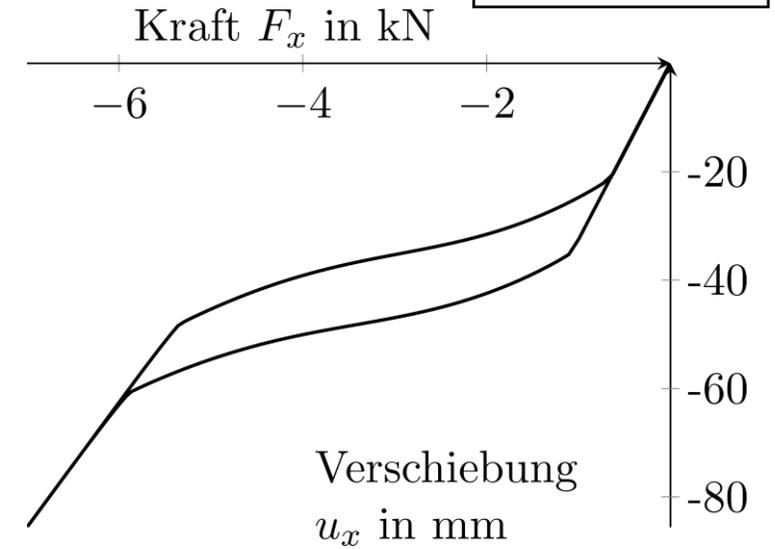
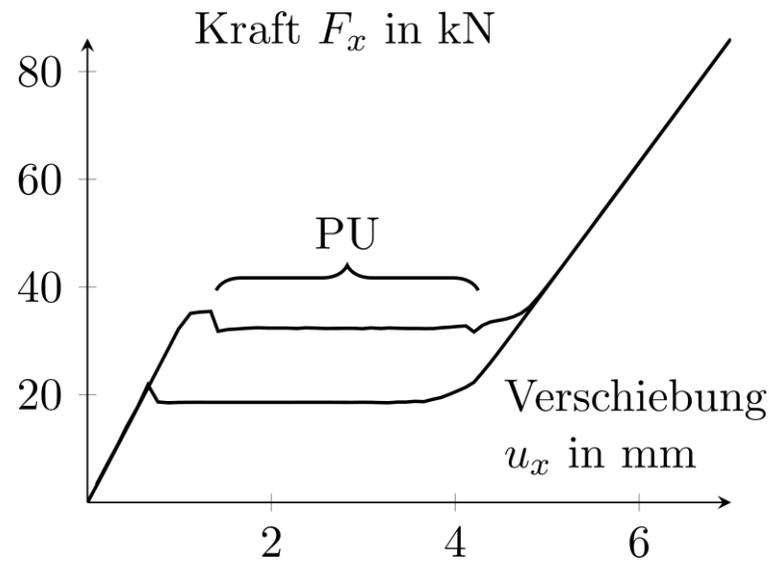
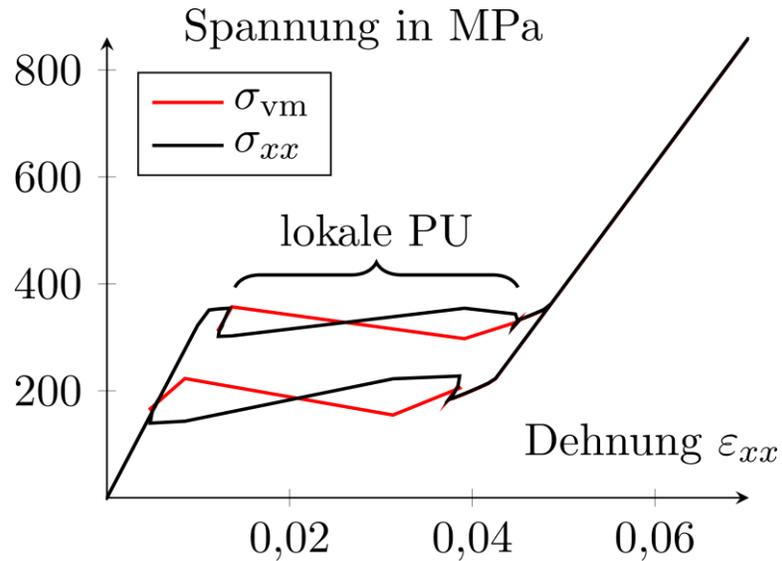
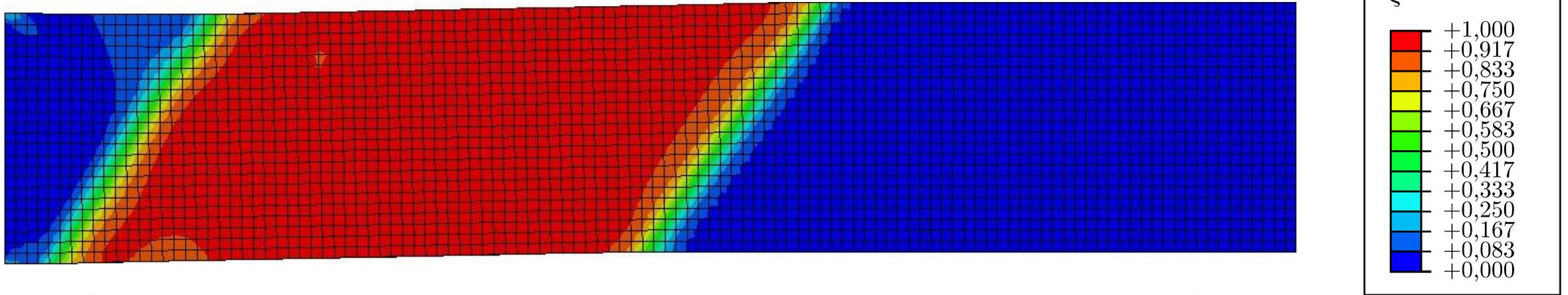


### 3. Regularisierung – Finite-Elemente-Implementierung

- UMAT: nur Informationen des aktuellen Gaußpunktes
- Anlegen eines globalen Feldes zur Speicherung notwendiger Werte
- Durchführung der Regularisierung in UEXTERNALDB
- Einlesen der Werte vor der Spannungsberechnung, Schreiben nach der Spannungsberechnung
- Probleme bei Wiederholung von Zeitschritten durch Diskrepanz von Statusvariablen und Variablen im Feld



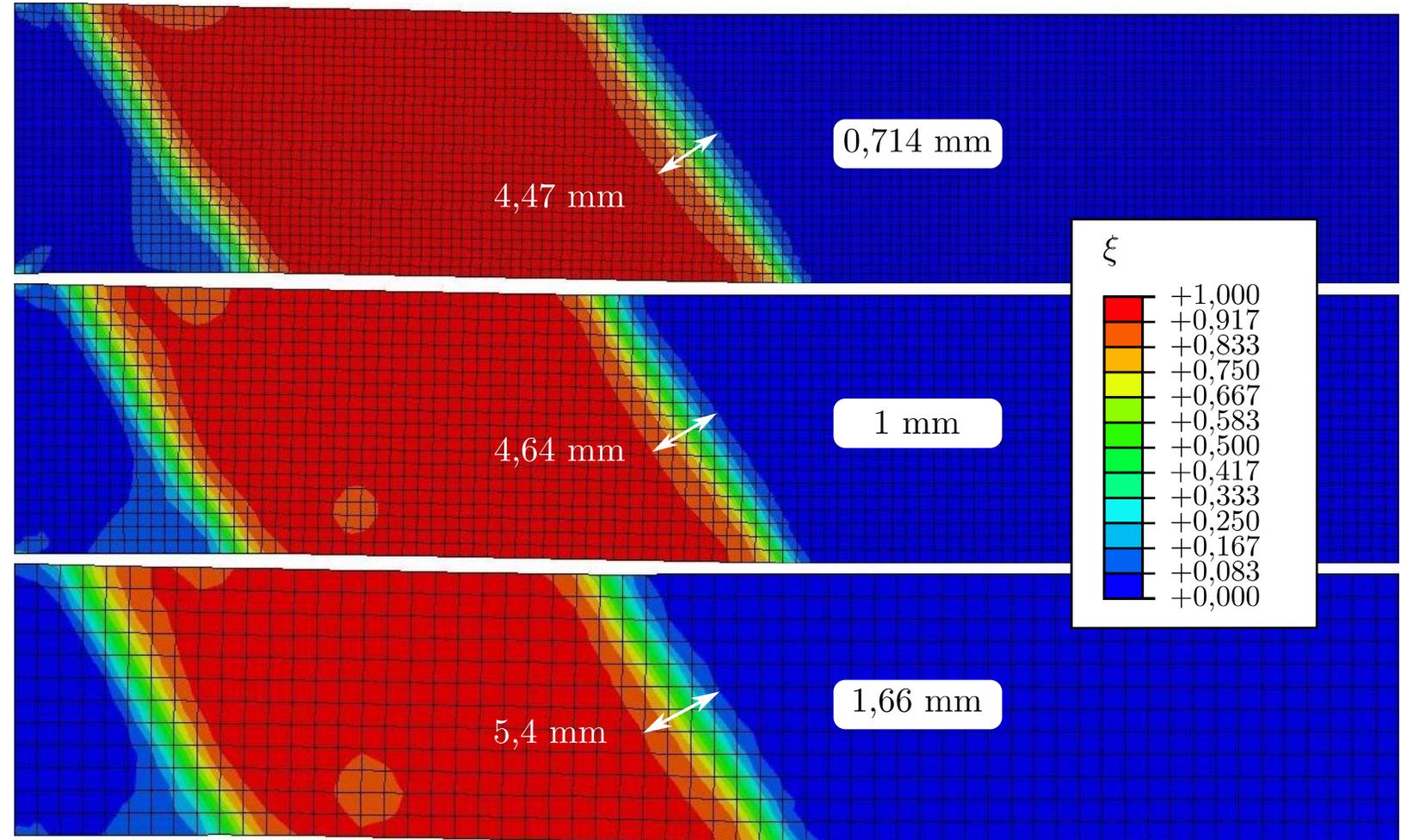
# 4. Simulationen und Ergebnisse – Pseudoelastischer Effekt im Zug: Dynamisch implizit



## 4. Simulationen und Ergebnisse – Pseudoelastischer Effekt im Zug: Dynamisch implizit

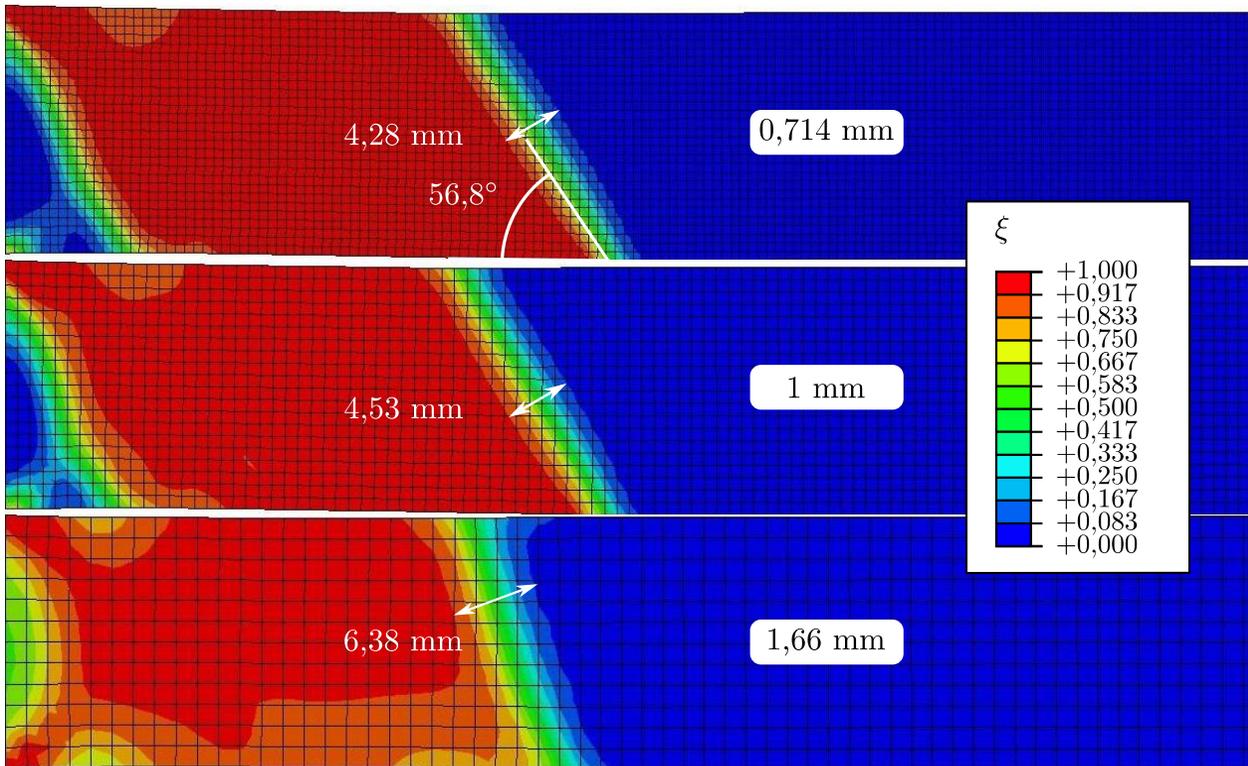
Elementkantenlänge

Breite der  
Transformationsfront

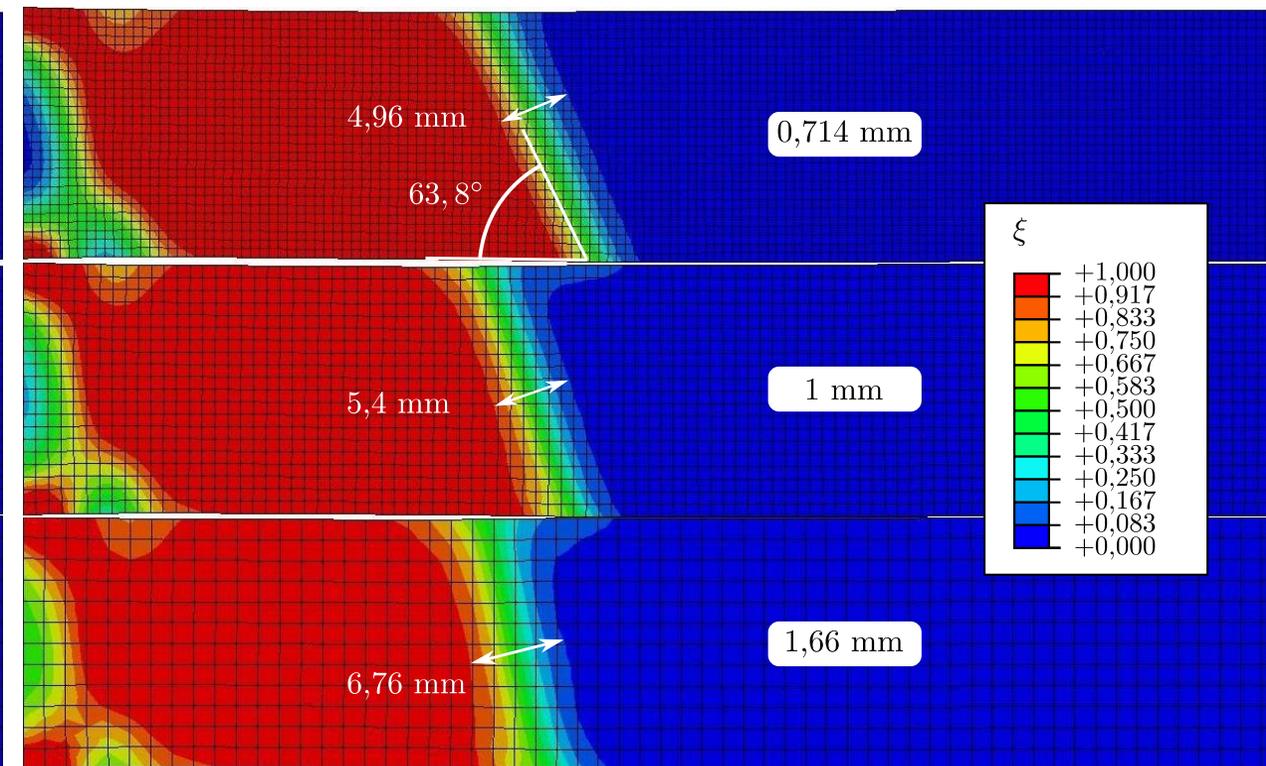


## 4. Simulationen und Ergebnisse – Pseudoelastischer Effekt im Zug: Dynamisch implizit, regularisiert

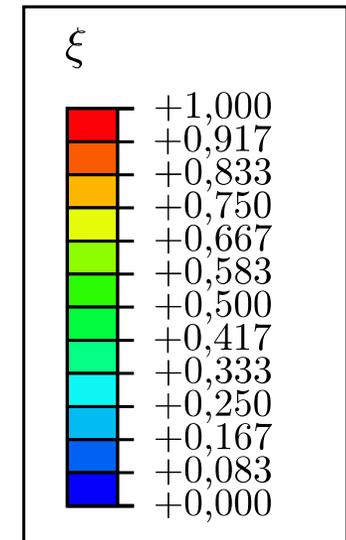
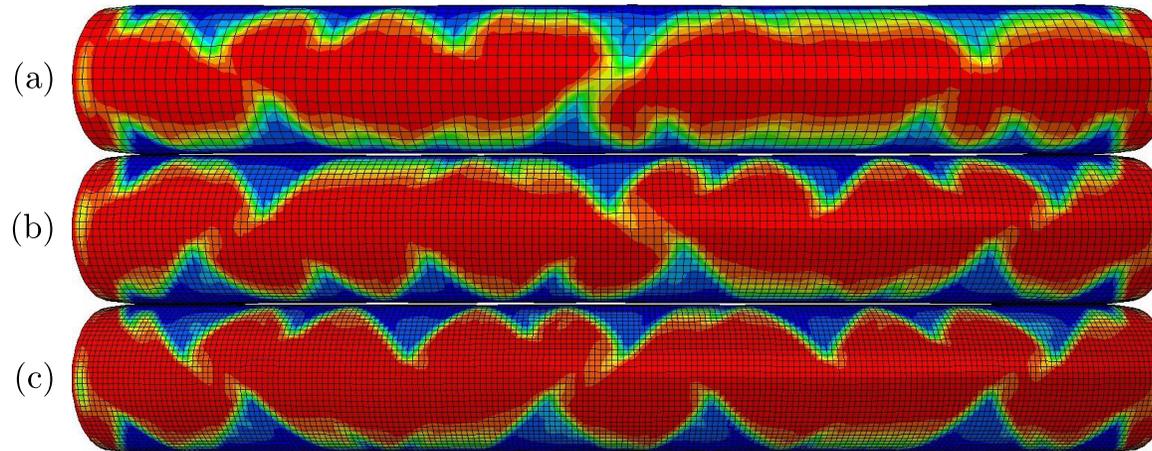
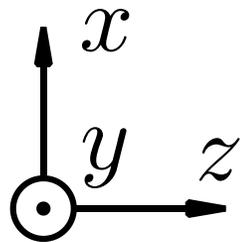
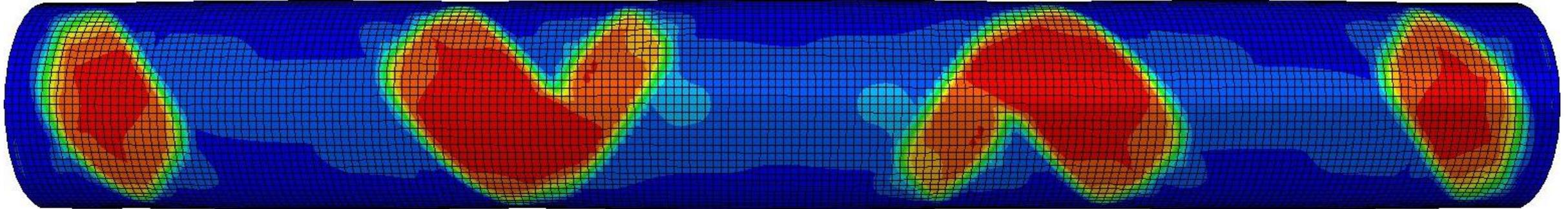
Referenzlänge  $l_c = 1$  mm



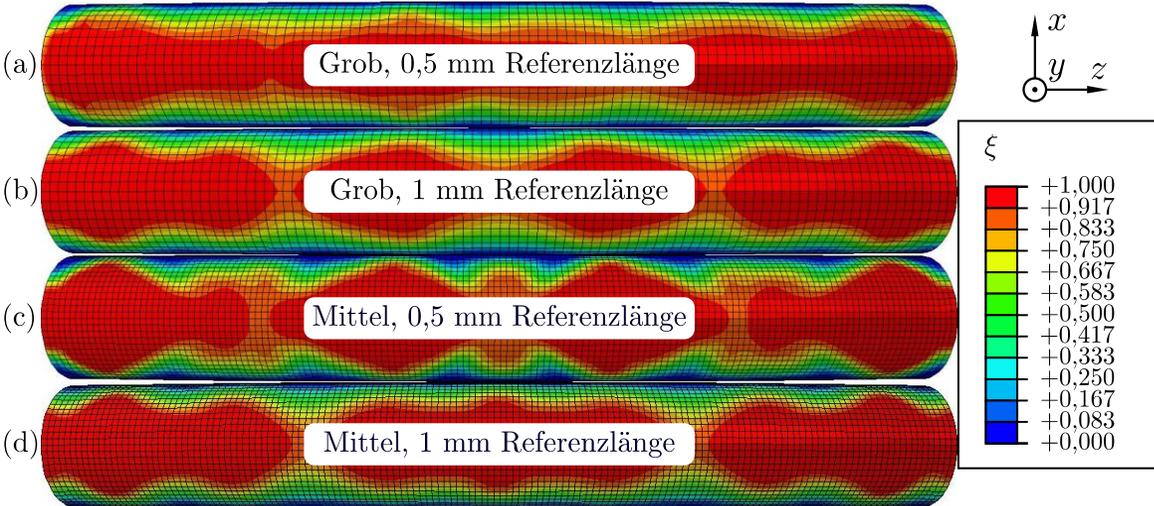
Referenzlänge  $l_c = 2$  mm



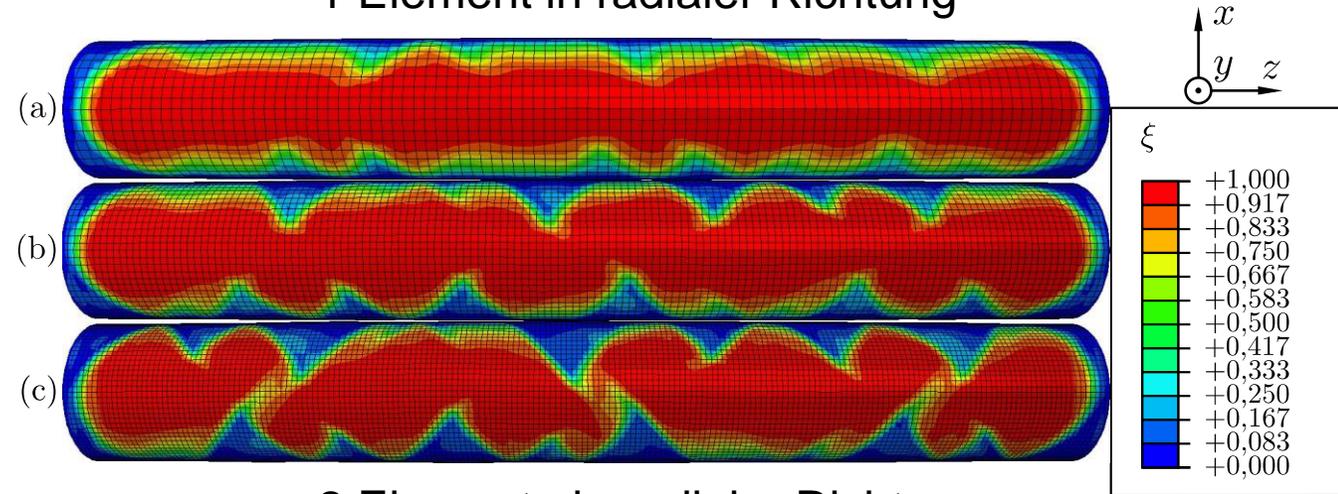
## 4. Simulationen und Ergebnisse – Pseudoelastischer Effekt bei Biegung: Dynamisch explizit



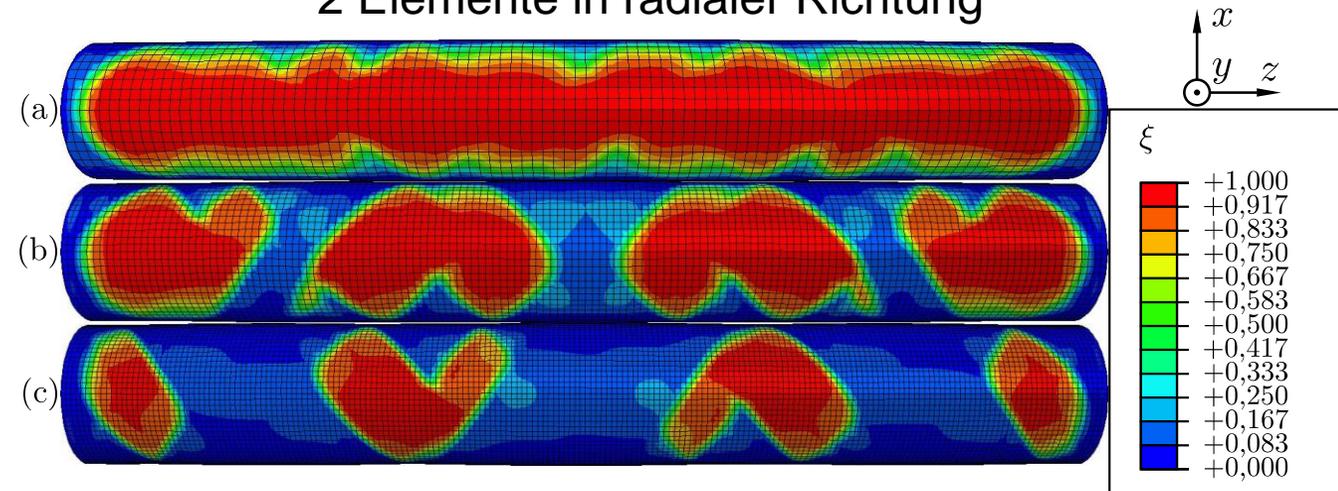
# 4. Simulationen und Ergebnisse – Pseudoelastischer Effekt bei Biegung: Dynamisch implizit



1 Element in radialer Richtung

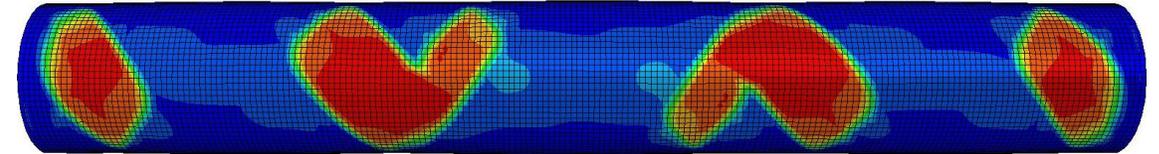
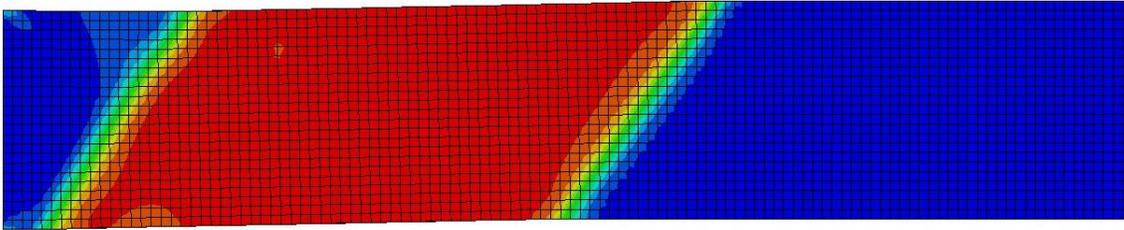


2 Elemente in radialer Richtung

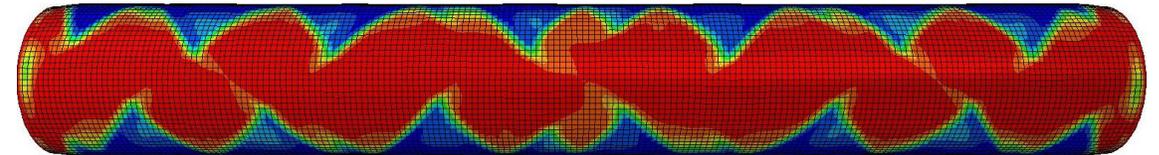
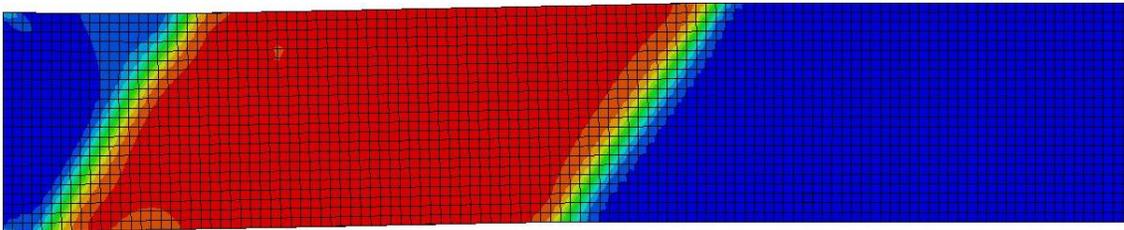


## 5. Zusammenfassung

- implizit ohne Regularisierung: qualitativ gut, Netzabhängigkeit, Konvergenzprobleme



- explizit ohne Regularisierung: gute Alternative ohne signifikante Unterschiede



- implizit mit Regularisierung: keine qualitative Verbesserung, Netzabhängigkeit bleibt

