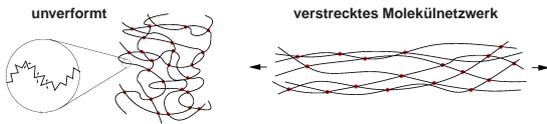


Institut für Mechanik  
**Numerische Untersuchungen zum  
 temperaturabhängigen Deformationsverhalten  
 thermoplastischer Kunststoffe**  
 Diplomarbeit cand. ing. Susanne Müller

**Motivation**

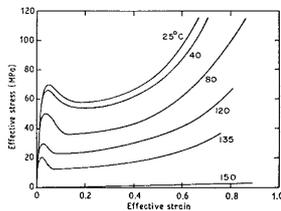
- Molekülver Streckung in vordeformierten amorphen thermoplastischen Kunststoffen bei Raumtemperatur „eingefroren“
- führt bei anschließender Erwärmung zu Formerholung und anisotropem Schrumpf
- Simulation thermomechanischer Be- und Entlastungszyklen mit Boyce-Materialmodell und FE-Programm ABAQUS

**Molekularer Aufbau amorpher Thermoplaste**



- Netzwerk verschlaufter Makromoleküle
- mittlere Anzahl  $N$  von Kettengliedern zwischen Verschlaufungspunkten (•)
- maximale Grenzstreckung  $\lambda_{max} = \sqrt{N}$
- zwei Widerstände gegen plastisches Fließen:
  - energetischer Widerstand gegen Kettensegmentrotation
  - entropischer Widerstand gegen Kettenver Streckung (→ kinematische Verfestigung)

**Deformationsverhalten amorpher Thermoplaste**



- Temperaturabhängigkeit der Fließgrenze
- temperaturabhängiges Verfestigungsverhalten

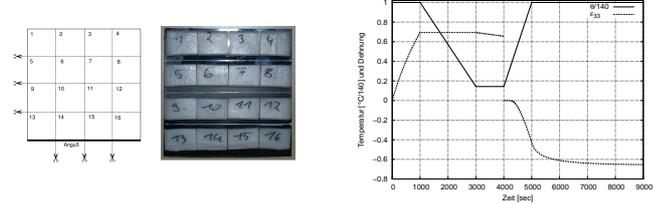
**Materialmodell (Boyce et al., 1988)**

- Elastizitätsgesetz  $\dot{\sigma} = E(D - D^p - D^{th})$
- Fließregel  $D^p = \dot{\gamma}^p \frac{\sigma^D - b^D}{|\sigma^D - b^D|}$ , therm. Dehnung  $D^{th} = k\dot{\theta}I$
- plastische Dehnrate  $\dot{\gamma}^p = \dot{\gamma}_0 \exp\left[-\frac{A_s}{\theta} \left(1 - \left(\frac{\tau}{s}\right)^{\frac{5}{6}}\right)\right]$   
mit  $\tau = |\sigma^D - b^D|$  und  $A, \dot{\gamma}_0 = konst.$
- athermischer Fließwiderstand  $s(p, \gamma^p)$
- Rückspannung  $b = \frac{1}{3}C^R \sqrt{N} \frac{1}{\lambda_c} \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\lambda_c}{\sqrt{N}}\right) B^p$   
mit  $B^p = F^p F^{pT}$  und  $F^p \approx F$

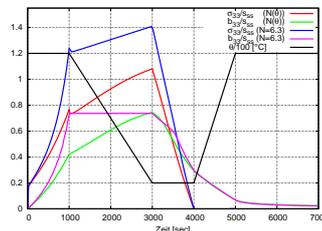
**Temperaturabhängige Verfestigung**

- Verschlaufungsdichte  $n(\theta)$  nimmt mit steigender Temperatur ab (Raha & Bowden, 1972)  
 $n(\theta) = B - D \exp\left(-\frac{E_a}{R\theta}\right)$  mit  $B, D, E_a = konst.$
- wegen  $n(\theta)N(\theta) = const.$  nimmt Anzahl  $N$  der Glieder pro Kette und damit Grenzstreckung  $\lambda_{max}$  mit steigender Temperatur zu
- thermoelastische Beziehung  $b = f(B^p, N(\theta))$  für Rückspannung

**Ergebnisse – Homogene Deformation**



- spritzgegossene Platten zeigen bei Erwärmung (freie Deformation) anisotropen Schrumpf aufgrund Kontraktion ver Streckter Molekülketten (innere Rückspannung)
- numerische Simulation unter Berücksichtigung des temperaturabhängigen Verfestigungsverhaltens



Verlauf der Spannung und Rückspannung

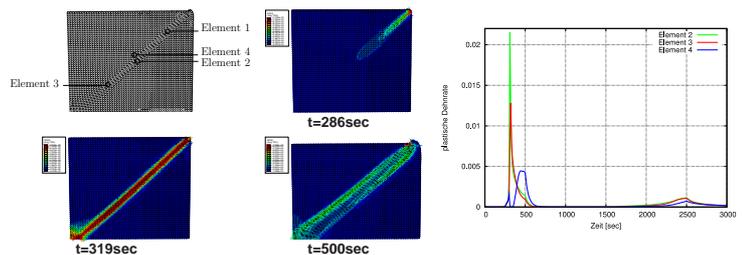
- simulierter Anstieg der Rückspannung bei Abkühlung widerspricht Wiederaufbau Verschlaufungsnetzwerk in lokal entspannter Konfiguration
- kann durch Ansatz von Raha & Bowden nicht beschrieben werden

**Ergebnisse – Inhomogene Deformation**

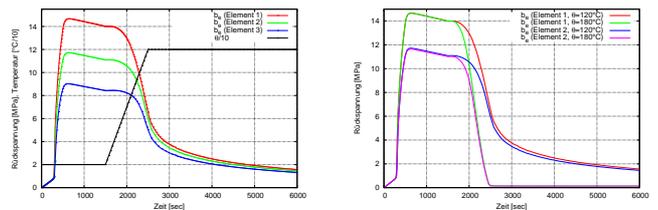
Druckbelastung einer quadratischen Probe mit Imperfektion (EVZ):

	Step 1 $0 \leq t \leq 500 \text{ sec}$	Step 2 $500 \text{ sec} \leq t \leq 1500 \text{ sec}$	Step 3 $1500 \text{ sec} \leq t \leq 2500 \text{ sec}$	Step 4 $t > 2500 \text{ sec}$
Temperatur	$20^\circ \text{C}$	$20^\circ \text{C}$	homogene Erwärmung: $20^\circ \text{C} \rightarrow 120^\circ \text{C}$	$120^\circ \text{C}$
mechanische Belastung	Stauchung mit $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$	globale Entlastung	äußere Belastung = 0	äußere Belastung = 0

**Ausbildung des Scherbandes**



**Verlauf der Rückspannung im Scherband**



- je größer Rückspannung desto schneller verläuft Rückdeformation
- bei höherer Temperatur wird undeformierter Ausgangszustand schneller wieder erreicht

**Zusammenfassung und Ausblick**

- komplexes thermo-mechanisches Verhalten thermoplastischer Kunststoffe konnte in den Simulationen abgebildet werden
- aufgrund der eingebrachten Orientierung liegen im Material innere Spannungen (Rückspannung) vor, die je nach Temperaturniveau wirksam werden
- Ansatz von Raha & Bowden muss erweitert werden