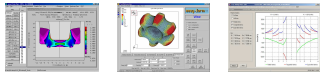


Unterschiedliche Ansätze zur simulationsgestützten Bestimmung der Mikrostruktur in Massivumformprozessen

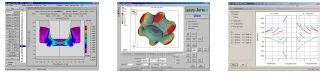
*Dr. Michael Twickler, Dr. Gerhard H. Arfmann
CPM GmbH, Herzogenrath*



Bestimmung der Mikrostruktur, Warum?

Motivation:

- **möglichst realistische Abbildung des Umformprozesses in der Simulation (Fließverhalten, Verfestigungsverhalten, etc.)**
- **Nachweis über die Einstellung eines geforderten Gefüges (mittlere Korngröße, maximal zulässige Korngröße, etc.)**
- **Bereitstellung der notwendigen Gefügeinformation für sich anschließende Nachbehandlungen (Wärmebehandlung o.ä.)**
- **Ableitung von Bauteileigenschaften**
- **Hilfsgrößen für weitergehende experimentelle Untersuchungen (z.B. Fließlinienlage für Ultraschalluntersuchungen)**
- **etc.**



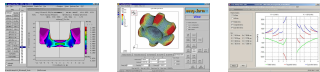
Das einfachste Modell: "Pausenzeit = Rekristallisation"

Modellvorstellung:

- genügend hohe Temperaturen und ausreichend eingebrachte Umformenergie bewirken im Umformteil Rekristallisationsvorgänge (dynamisch, statisch)
- die Rekristallisationsvorgänge verzehren bereits eingebrachte Umformung
- die lokalen Temperaturen und Umformgrade sind immer ausreichend, Rekristallisationsvorgänge zu ermöglichen
- die Umformpausen (Transport des Umformteils) sind immer ausreichend lang, eine vollständige Rekristallisation zu erreichen
- vollständige Rekristallisation ist gleichbedeutend mit vollständigem Verzehren der bereits eingebrachten Umformung
- während der Umformung stattfindende dynamische Rekristallisationsvorgänge haben keine Auswirkungen auf das aktuelle Material- bzw. aktuelle Fließverhalten

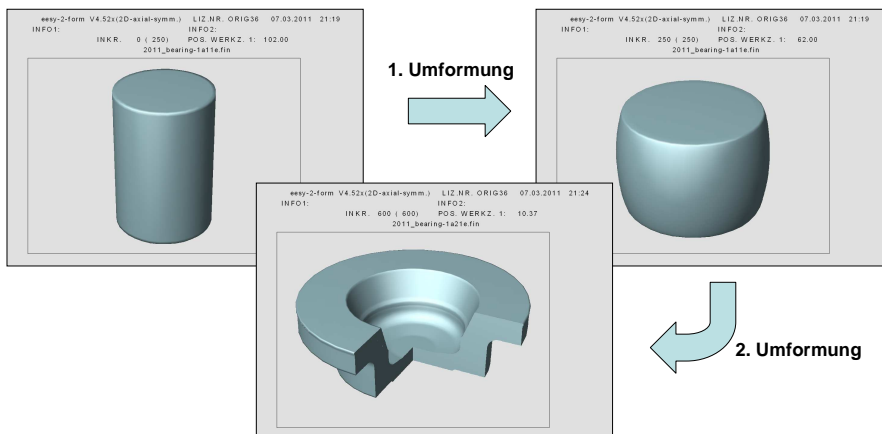


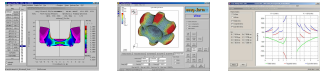
Ende einer Umformung = Pausenzeit = vollständige Rekristallisation



Das einfachste Modell: "Pausenzeit = Rekristallisation"

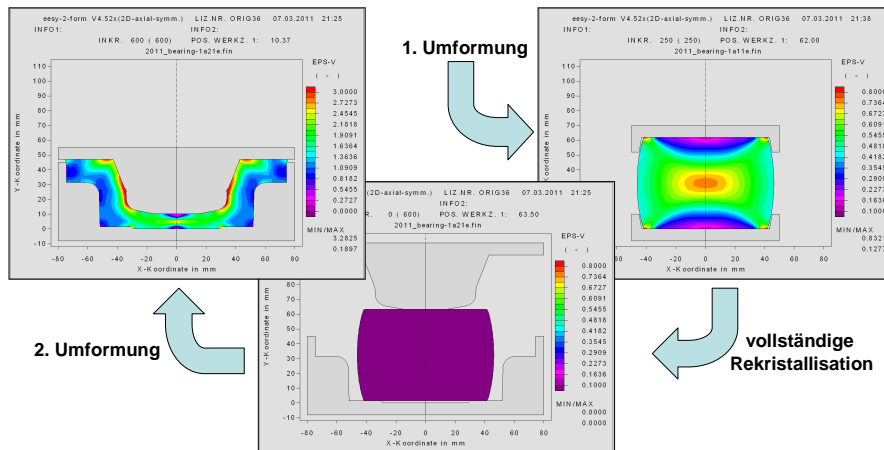
Beispiel: Lagerschale, 2-stufige Umformung bei 1150°C





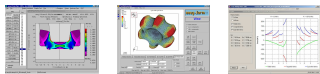
Das einfachste Modell: "Pausenzeit = Rekristallisation"

Beispiel: Lagerschale, 2-stufige Umformung bei 1150°C



(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

5



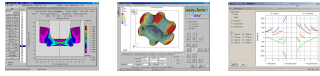
Das einfachste Modell: "Pausenzeit = Rekristallisation"

Ergebnisse:

- alle Umformungen einer mehrstufigen Prozessfolge starten mit 'jungfräulichem' Materialverhalten ohne eine Vorgeschichte
=> die resultierenden Umformgrade geben ein oft recht realistisches Abbild der tatsächlichen Materialbeanspruchung
=> es kann eine erste Bewertung der aktuellen Umformung bezüglich eines Grenzumformvermögens vorgenommen werden
=> die berechneten Umformkräfte und Werkzeuglasten sind nicht verfälscht durch eine Akkumulation der Materialverfestigung in etwaigen Vorstufen
- Informationen zum Rekristallisationszustand des Materials: **nicht vorhanden**
- Quantitative Angaben zur Korngröße oder zur Korngrößenverteilung: **nicht vorhanden**
- Hinweis auf etwaiges Kornwachstum: **nicht vorhanden**
- weitere gefügespezifische Ergebnisse: **nicht vorhanden**
- nachhaltige Auswirkung auf das verwendete Werkstoffmodell: **keine, Fließkurve bleibt unverändert**

(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

6



Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

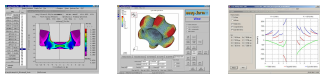
Modellvorstellung (1):

- es lässt sich ein Modell für die dynamische Rekristallisation formulieren, z.B. wie

$$\text{dynamisch} \left\{ \begin{array}{l} D_{\text{dyn.rek.}} = f(D_0, \epsilon, \delta\epsilon/\delta t, T, \text{etc.}) \Rightarrow \text{dyn. rekrist. Korngröße} \\ F_{\text{dyn.rek.}} = f(\text{div. Prozessparameter}) \Rightarrow \text{dyn. rekrist. Anteil} \\ \text{Relevanz: während bzw. unmittelbar nach der Umformung} \end{array} \right.$$

- es lässt sich ein Modell für die statische Rekristallisation formulieren, z.B. wie

$$\text{statisch} \left\{ \begin{array}{l} D_{\text{stat.rek.}} = f(D_0, \epsilon, T, t, \text{etc.}) \Rightarrow \text{stat. rekrist. Korngröße} \\ F_{\text{stat.rek.}} = f(\text{div. Prozessparameter}) \Rightarrow \text{stat. rekrist. Anteil} \\ \text{Relevanz: während der Pausen- bzw. Haltezeiten nach vorangegangener Umformung} \end{array} \right.$$



Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

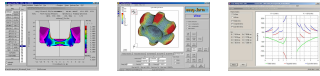
Modellvorstellung (2):

- es lässt sich ein Modell für das Kornwachstum formulieren, z.B. wie

$$\text{Wachstum} \left\{ \begin{array}{l} \Delta D_{\text{xx.rek.}} = f(D_{\text{xx.rek.}}, T, t, \text{etc.}) \text{ mit } \text{xx.} = \text{stat. oder dyn.} \\ \Rightarrow \text{Zuwachs des xx. rekristallisierten Korns} \\ \text{Relevanz: für } \Delta D_{\text{dyn.rek.}}: \text{ nach Abschluss der dynamischen Rekristallisation} \\ \text{für } \Delta D_{\text{stat.rek.}}: \text{ nach vollständiger statischer Rekristallisation des Restgefüges} \end{array} \right.$$

- es lassen sich sinnvolle Mischungsregeln formulieren, die zu einem geeigneten Zeitpunkt die einzelnen Gefügefraktionen wieder zusammenfassen, z.B. wie

$$\text{Mischung} \left\{ \begin{array}{l} D_{0\text{-neu}} = f(D_0, D_{\text{dyn.rek.}}, D_{\text{stat.rek.}}, \Delta D_{\text{dyn.rek.}}, \Delta D_{\text{stat.rek.}}, F_{\text{dyn.rek.}}, F_{\text{stat.rek.}}) \\ \Rightarrow \text{neuer Mittelwert für die Ausgangskorngröße} \end{array} \right.$$



Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

Modellvorstellung (3):

- das Verzehren der bereits eingebrachten Umformung ist äquivalent der Summe der rekristallisierten Anteile (lokal betrachtet), wie z.B.

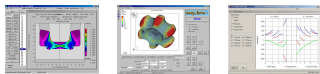
Entfestigung $\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{v\text{-neu}} = f(\epsilon_v, F_{\text{dyn.rek.}}, F_{\text{stat.rek.}}) \Rightarrow \text{neuer reduzierter Umformgrad} \\ \text{Relevanz: nach Abschluss der dynamischen Rekristallisation und} \\ \text{während der statischen Rekristallisation} \end{array} \right.$

- das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Phasen der Gefügeveränderung lässt sich formulieren und umsetzen, da in der Regel keine eindeutige prozessbedingte Abfolge der einzelnen Gefüge-Teilmodelle vorliegt. Dazu erforderlich:

- gegenseitige Abhängigkeiten
- Start/Stopp-Bedingungen

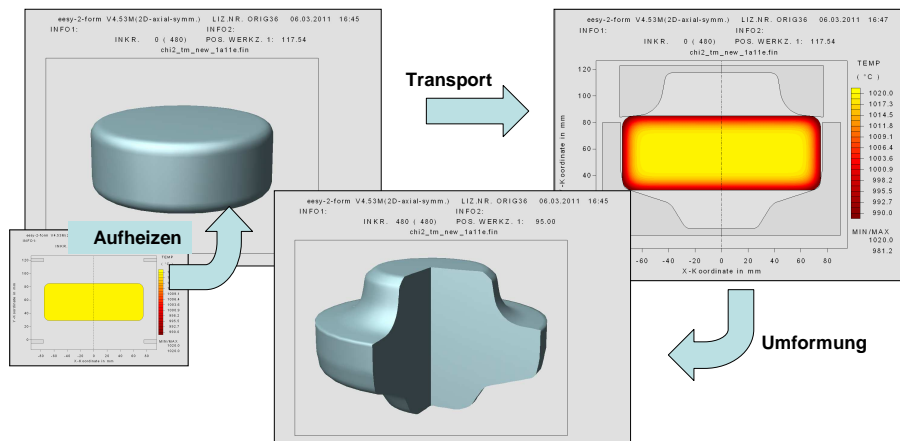


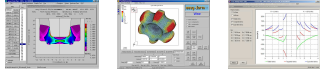
Dynamisch/Statisches Modell für Umformung und Haltezeiten



Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

Beispiel: Turbinenscheibe aus Inconel 718, einstufige Umformung bei 1020°C

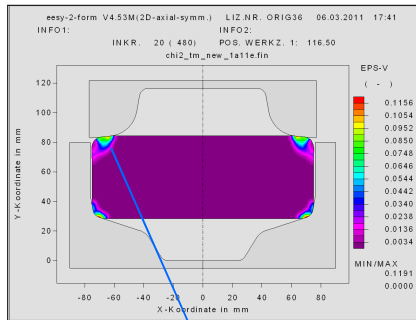




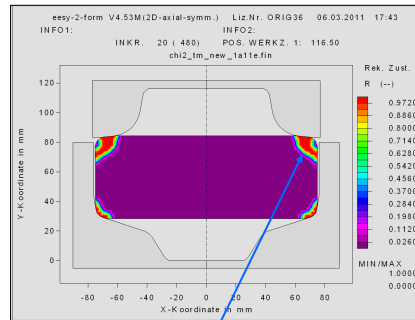
Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

Beispiel: Turbinenscheibe aus Inconel 718, einstufige Umformung bei 1020°C
hier: Situation nach 5% Pressenweg

Umformgradverteilung [-]



Rekristallisationsfront [-]

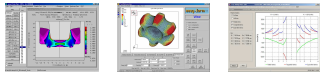


ausreichend hohe Umformung

dynamische Rekristallisation (lokal)

(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

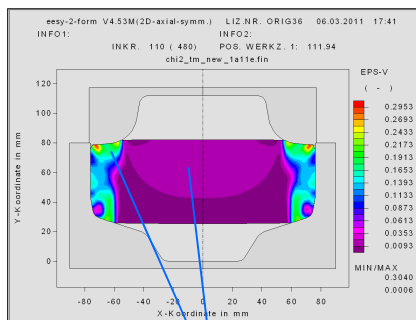
11



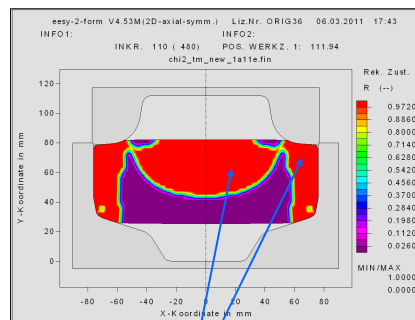
Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

Beispiel: Turbinenscheibe aus Inconel 718, einstufige Umformung bei 1020°C
hier: Situation nach 25% Pressenweg

Umformgradverteilung [-]



Rekristallisationsfront [-]

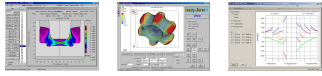


ausreichend hohe Umformung

dynamische Rekristallisation (lokal)

(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

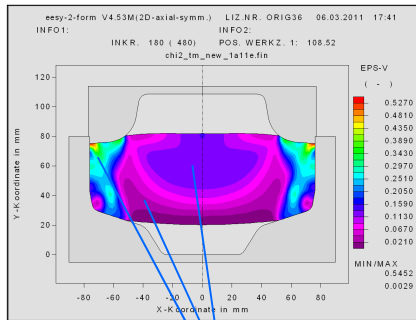
12



Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

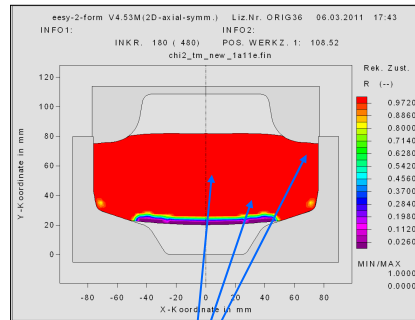
Beispiel: Turbinenscheibe aus Inconel 718, einstufige Umformung bei 1020°C
hier: Situation nach 40% Pressenweg

Umformgradverteilung [-]



ausreichend hohe Umformung

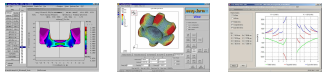
Rekristallisationsfront [-]



dynamische Rekristallisation (lokal)

(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

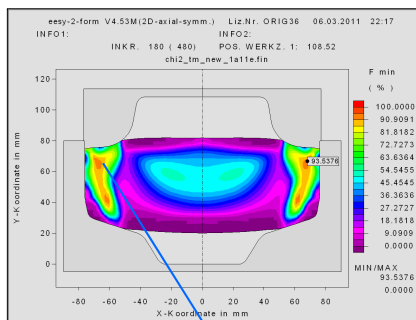
13



Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

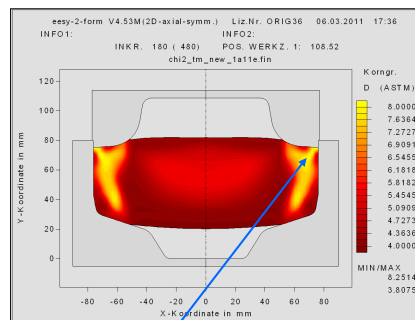
Beispiel: Turbinenscheibe aus Inconel 718, einstufige Umformung bei 1020°C
hier: Situation nach 40% Pressenweg

rekristallisierter Anteil [%]



hoher rekristallisierter Anteil

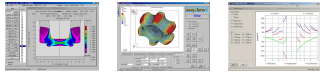
Korngröße [ASTM]



feines (dyn. rekristallisiertes) Korn

(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

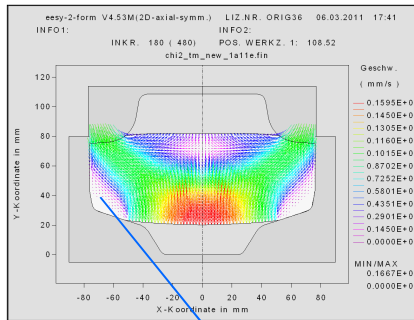
14



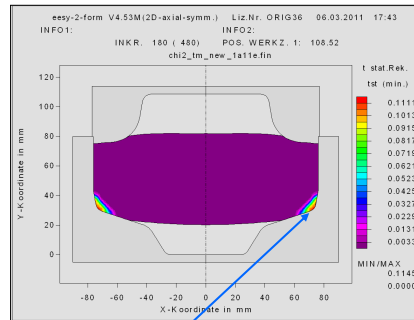
Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

Beispiel: Turbinenscheibe aus Inconel 718, einstufige Umformung bei 1020°C
hier: Situation nach 40% Pressenweg

Materialfluss [mm/sec]



Dauer der statischen Rekristallisation [min]

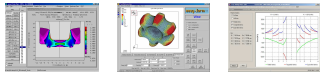


'tote' Zone, d.h. aktuell keine Umformung

stat. Rekristallisation trotz Umformung

(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

15



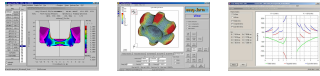
Das typische Modell: "Dynamisch/Statisch mit Kornwachstum"

Ergebnisse:

- resultierender Umformgrad als Maß für den tatsächlichen Verformungs- und Verfestigungszustand (lokale Verteilung)
=> realistische Ableitung und Bewertung diverser Zielgrößen wie z.B. Materialbeanspruchung, Grenzformvermögen, Umformlasten, Werkzeuglasten
- Rekristallisationszustand: vorhanden, aufgeteilt in dynamischen und statischen Anteil
- Korngröße und Korngrößenverteilung: vorhanden, als summarische Größe und auch in ihren Anteilen aus der dynamischen und der statischen Fraktion
- Hinweis auf etwaiges Kornwachstum: vorhanden, quantitative Angabe
- weitere gefügespezifische Ergebnisse: vorhanden, z.B. Rekristallisationszeiten, Rekristallisationsstopp, Wachstumszeiten, etc.
- alle Gefügegrößen in ihrer lokalen Verteilung im Bauteil: vorhanden
- nachhaltige Auswirkung auf das verwendete Werkstoffmodell: keine, Fließkurve bleibt unverändert

(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

16



Das komplexe Modell: "Versetzungsbasiertes Modell"

Modellvorstellung (1):

- die Dehnung ϵ als nicht pfadunabhängige Größe wird nicht länger als Zustandsvariable für ein konstitutives Gesetz zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens herangezogen, d.h.

$$\sigma = f(\delta\epsilon/\delta t, T, \epsilon) \quad \text{ist nicht länger gültig}$$

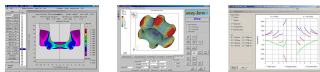
- als neue Zustandsgröße wird die Versetzungsdichte ρ eingeführt, wie z.B.

$$\sigma = f(\delta\epsilon/\delta t, T, \rho)$$

- für die Versetzungsdichte lässt sich eine Evolutionsgleichung zur Berechnung der umformbedingten Veränderung dieser Größe bestimmen, wie z.B.

$$\delta\rho/\delta t = (\delta\rho/\delta t)^+ + (\delta\rho/\delta t)^-$$

mit $(\delta\rho/\delta t)^+$: Prozesse, die Versetzungen erzeugen
und mit $(\delta\rho/\delta t)^-$: Prozesse, die Versetzungen abbauen



Das komplexe Modell: "Versetzungsbasiertes Modell"

Modellvorstellung (2):

- als Prozesse zur Veränderung der Versetzungsdichte werden berücksichtigt

- a) die Versetzungserzeugung

$$\delta\rho/\delta t = M * \delta\epsilon/\delta t / (b * L_{\text{eff}}) \quad \text{mit } L_{\text{eff}} = f(\rho)$$

- b) die Versetzungsvernichtung durch spontane Annihilation

$$\delta\rho/\delta t = c_3 * M * d_{\text{spontan}} * \delta\epsilon/\delta t / b * \rho$$

- c) die Versetzungsvernichtung durch thermisch aktiviertes Klettern

$$\delta\rho/\delta t = c_4 * (v_k/d_{\text{dipol}}) * \rho \quad \text{mit } v_k = f(\sigma) \quad \text{und } d_{\text{dipol}} = f(\sigma, \rho)$$

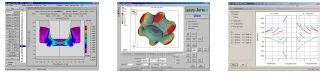
- die Fließspannung lässt sich abhängig von der Versetzungsdichte berechnen, wie z.B.

$$\sigma_{\text{VM}} = M * (\tau_{\text{eff}} + \tau_{\text{pass}})$$

$$\text{mit } \tau_{\text{pass}} = \alpha * b * G * \rho^{1/2},$$

$$\text{mit } \tau_{\text{eff}} = k_B * T / V * \text{asinh}(\text{arg})$$

$$\text{und mit } \text{arg} = (\delta\gamma/\delta t) / (\rho_m * b * \lambda * v) * \exp(Q/k_B * T)$$



Das komplexe Modell: "Versetzungsbasiertes Modell" *)

Modellvorstellung (3):

- die weiteren Veränderungen der Mikrostruktur lassen sich beschreiben durch Gesetzmäßigkeiten für

a) dynamische Rekristallisation,

$$x_{\text{dyn.rek}} = f(R_{\text{dyn.rek}}, N_{\text{dyn.rek}})$$

b) statische Erholung und statische/metadynamische Rekristallisation,

$$x_{\text{stat.rek}} = f(R_{\text{stat.rek}}, N_{\text{stat.rek}})$$

c) Ausscheidungsvorgänge während Haltezeiten und

$$F_p = f(R_p, N_p)$$

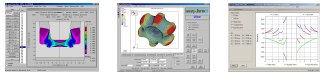
d) Kornwachstum nach vollständiger Rekristallisation

$$R_{\text{gr}} = f(R_{\text{dyn.rek}}, \delta R_{\text{dyn.rek}} / \delta t)$$



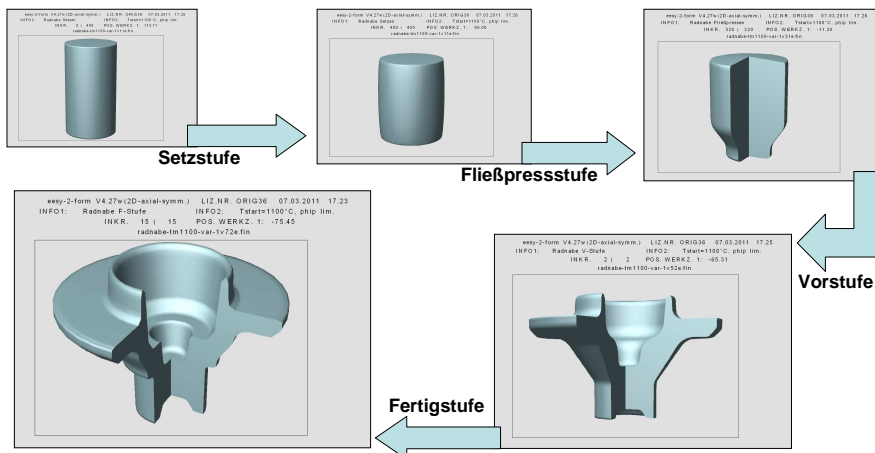
Versetzungsbasiertes Werkstoff- und Gefügemodell

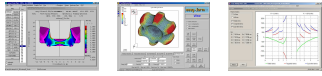
*) Modellformulierungen nach F. Roters, MPIE Düsseldorf und L. Mosecker, U. Prah, W. Bleck, IEHK RWTH Aachen



Das komplexe Modell: "Versetzungsbasiertes Modell"

Beispiel: Radnabe, 4-stufige Umformung bei $T_{\text{start}} = 1100^\circ\text{C}$, Ausgangskorn: $54,8 \mu\text{m}$

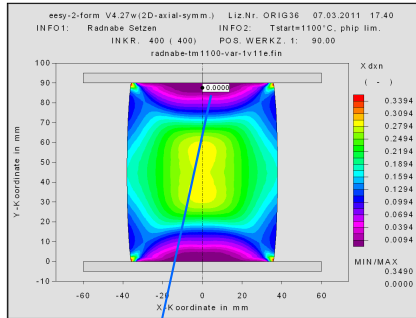




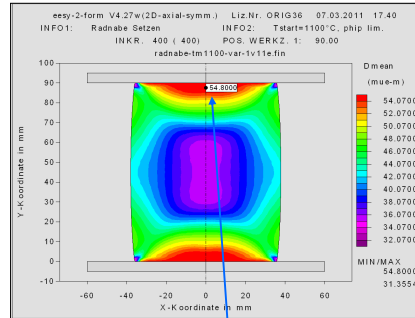
Das komplexe Modell: "Versetzungsbasiertes Modell"

Beispiel: Radnabe, 4-stufige Umformung bei $T_{\text{start}} = 1100^\circ\text{C}$, Ausgangskorn: $54,8 \mu\text{m}$

rekristallisierter Anteil [-]



Korngröße [μm]

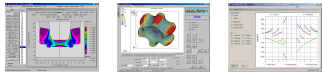


noch nicht rekristallisierter Bereich

Korngröße = Ausgangskorngröße

(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

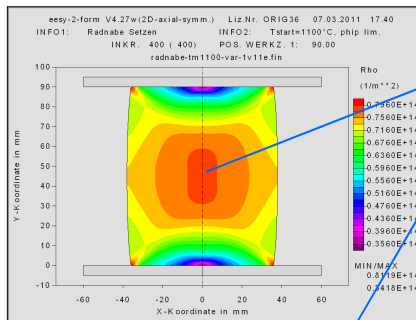
21



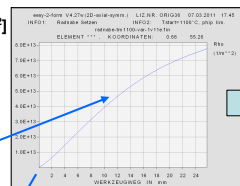
Das komplexe Modell: "Versetzungsbasiertes Modell"

Beispiel: Radnabe, 4-stufige Umformung bei $T_{\text{start}} = 1100^\circ\text{C}$, Ausgangskorn: $54,8 \mu\text{m}$

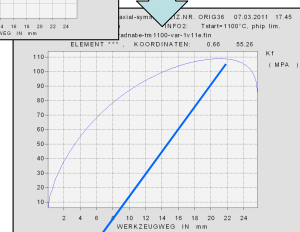
Versetzungsdichte [$1/\text{m}^2$]



Versetzungsdichte [$1/\text{m}^2$]



Fließspannung [MPa]

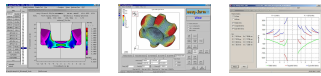


Versetzungsevolution (zeitlich)

Fließspannung (zeitlich)

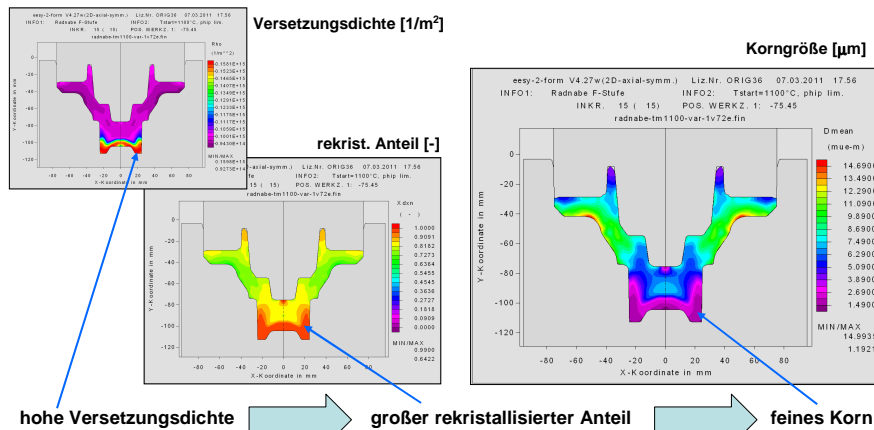
(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

22



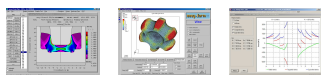
Das komplexe Modell: "Versetzungsbasiertes Modell"

Beispiel: Radnabe, 4-stufige Umformung bei $T_{\text{start}} = 1100^\circ\text{C}$, Ausgangskorn: 54,8 μm



(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

23



Das komplexe Modell: "Versetzungsbasiertes Modell"

Ergebnisse:

- ein Werkstoffmodell, das das Zusammenspiel von Mikrostruktur, Fließspannung und Umformung beschreibt
- die Fließspannung: **berechnet aus der aktuellen Versetzungsdichte** und weiteren Gefügeparametern als eine von einer gemessenen Kurve unabhängige Größe
- Rekristallisationszustand: **vorhanden, aufgeteilt in dynamischen und statischen Anteil**
- Korngröße und Korngrößenverteilung: **vorhanden, als summarische Größe und auch in ihren Anteilen aus der dynamischen und der statischen Fraktion**
- Hinweis auf etwaiges Kornwachstum: **vorhanden, quantitative Angabe**
- weitere gefügespez. Ergebnisse: **vorhanden, z.B. Menge und Größe von Ausscheidungen**
- nachhaltige Auswirkung auf das verwendete Werkstoffmodell: **ja, die Fließkurve wird zu jedem Zeitpunkt und für jeden Ort aktuell aus der Versetzungsdichte bestimmt**

(c) Dr. Michael Twickler - 14. Workshop Simulation in der Umformtechnik - 17./18. März 2011 -
Technische Universität Dortmund

24



Danksagung:

Einige der hier gezeigten Schmiedebeispiele wurden uns im Rahmen von gemeinsamen, zum Teil auch öffentlich geförderten Projekten von den beiden Firmen **Leitritz Turbinenkomponenten Remscheid GmbH, Remscheid** und **Hirschvogel Umformtechnik GmbH, Denklingen** zur Verfügung gestellt. Dafür bedanken wir uns hier an dieser Stelle recht herzlich.

Für die Förderung der Arbeiten zum "Versetzungsbasierten Modell" im Rahmen des Verbundprojektes "Mikrostrukturbasierte Modellierung des Umformverhaltens von mikrolegierten Stählen bei mehrstufigen Schmiedeprozessen" bedanken wir uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung