

Berechnung der Gefügeentwicklung in Schmiedeteilen mit Hilfe des Simulations-Programms *eesy-2-form*.

Die Simulation von Schmiedeprozessen mit Hilfe der FEM (Finite-Elemente-Methode) ist seit geraumer Zeit sowohl im Warm- als auch im Kaltbereich in einer Vielzahl von schmiedetechnischen Betrieben Stand der Technik. Der vorliegende Beitrag zur Vorausberechnung der Gefügeentwicklung in einem Warm Schmiedeteil zeigt die Anwendung der Simulationstechnik auf eine Fragestellung, die über den klassischen Einsatzbereich weit hinausgeht. Die dargestellten exemplarischen Ergebnisse sollen nicht primär ein spezielles Ergebnis dokumentieren sondern vielmehr die heute verfügbaren oder auch in einer numerischen Simulationsumgebung umsetzbaren Möglichkeiten aufzeigen.

Michael Twickler, Gerhard H. Arfmann

Die besondere Eignung der Finite-Elemente-Methode (FEM) als numerisches Hilfswerkzeug zur detaillierten Berechnung von Beanspruchungen in Bauteilen unter Last, sei es als fertiges Bauteil unter Einsatzbedingungen oder sei es während des Herstellungsprozesses, z.B. in einem Schmiedeprozess, ist hinlänglich bekannt. Der beeindruckenden Rechnerentwicklung, insbesondere in den letzten 10 Jahren, ist es primär zu verdanken, dass dieses numerische Verfahren heute als ein begleitendes Standardhilfswerkzeug für den Konstrukteur eingesetzt werden kann.

Wesentliche Triebfeder für den Einsatz von Simulationen war in der Vergangenheit zunächst der Ansatz, die Gestaltgebung eines Bauteils in einem Schmiedeprozess durch Stofffluss-Simulationen vorzuberechnen, um dadurch die zeit- und kostenintensive 'Trial and Error' Vorgehensweise abzulösen. Die Festlegung eines geeigneten

Schmiedeverfahrens, die Auswahl des einzusetzenden Schmiedeaggregats sowie eine Optimierung der Schmiedefolge waren die Hauptzielgrößen bei der Umsetzung der Simulationsergebnisse.

Mit zunehmender Verbreitung der Simulationstechnik im Schmiedebereich, verbunden mit dem Ansatz, das Schmiedeprodukt noch deutlicher als 'High-Tech'-Produkt darzustellen, erweiterte sich der Einsatz der Simulationstechnik auf Bereiche wie Eigenschaftseinstellungen (geforderte Umformgrade und Festigkeiten, Faserverläufe, etc.) und Überprüfung einzuhaltender Prozessparameter (Temperatur, Umformgeschwindigkeit, etc.).

Die Darstellung oder auch Betonung, bei Auslegung und Optimierung eines Schmiedeteils die Simulationstechnik einzusetzen, war in den Anfängen durchaus geeignet, den entsprechenden

Schmiedebetrieb als 'High-Tech'-Betrieb darzustellen. Mittlerweile hingegen wird von

Dokumentation des Schmiedeproduktes zu erhalten.

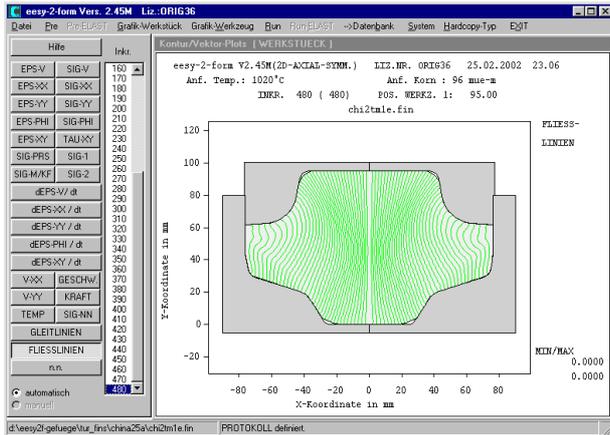


Bild1: Faserverlauf (Fließlinien)

Den Endabnehmern der Schmiedeprodukte, und hier allen voran von den Flugtriebwerks-herstellern, der Einsatz der Simulationstechnik im Schmiedebetrieb nicht nur anerkannt sondern vielfach zwingend gefordert, um eine möglichst umfassende und detaillierte

Die zunehmenden Anforderungen an das Schmiedeprodukt in Richtung Leistungssteigerung im allgemeinen und die Erkenntnis, dass eine Verbesserung der mechanischen technologischen Eigenschaften eng verbunden ist mit der resultierenden Gefügestruktur, führt heute zu der Anforderung an die Simulationstechnik, die Gefügeentwicklung während des Schmiedeprozesses möglichst detailliert abzubilden, um damit eine methodische Bestimmung der notwendigen Prozessparameter zur Erzielung eines definierten Mikrogefüges zu ermöglichen.

Somit müssen heute bei anspruchsvoller Schmiedesimulation je nach Anforderung (abhängig vom jeweiligen Werkstoff) unterschiedliche Gefügeteilmodelle (dynamische Rekristallisation, Grobkorn-Feinkornbildung, statische Rekristallisation, Kornwachstum, etc.) zum Einsatz kommen.

Auf den nicht unerheblichen experimentellen Aufwand, der betrieben werden muss, um die grundlegenden Gleichungen zur Beschreibung der Gefügeentwicklung in Bauteilen unter Umformbedingungen mit Leben zu erfüllen, soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Das Augenmerk soll vielmehr gerichtet werden auf die generelle Problematik bei der numerischen Umsetzung und auf die Darstellung einiger interessanter Gefügegrößen in einem exemplarischen Schmiedebeispiel.

Bild 2 fasst die wesentlichen Ansätze zur Beschreibung eines Gefügemodells sowie ihre jeweilige Prozesszuordnung und einige mögliche Besonderheiten zusammen. Für ein umfassendes Modell sind im Allgemeinen drei Teilmodelle für die Bereiche "dynamische Rekristallisation", "statische Rekristallisation" sowie "Kornwachstum" erforderlich. Als wesentliche Einflussgrößen sind - neben dem Ausgangsgefüge - der Umformgrad, die während der Umformung herrschende Umformgeschwindigkeit, die Umformtemperatur sowie die Prozesszeit zu nennen.

Alle genannten Größen treten in einem allgemeinen Schmiedeprozess als lokale und zeitlich veränderliche Größen auf. Hierin begründet liegt eine erste Problematik in der

Typische Gefüge-Teilmodelle:

- 1. Modell für die dynamische Rekristallisation**

$$D_{dyn,rek} = f(D_0, \epsilon, \dot{\epsilon}, T, \text{etc.})$$

->dyn. rekristallisierte Korngröße

$$F_{dyn,rek} = f(\text{div. Prozessparam.})$$

->dyn. rekristallisierte Fraktion

Auftreten: während bzw. unmittelbar nach der Umformung

Besonderheiten: eventuell Ausbildung eines Duplex-Gefüges
- 2. Modell für die statische Rekristallisation**

$$D_{stat,rek} = f(D_0, \epsilon, T, t, \text{etc.})$$

->stat. rekristallisierte Korngröße

$$F_{stat,rek} = f(\text{div. Prozessparam.})$$

->stat. rekristallisierte Fraktion

Auftreten: während der Pausen- bzw. Haltezeit nach vorausgegangener Umformung

Besonderheiten: eventuell vorzeitiger Rekristallisationsstopp
- 3. Modell für das Kornwachstum**

$$\Delta D_{kx} = f(D_{stat,rek}, T, t, \text{etc.}) \quad \text{mit } kx = stat. \text{ oder } dyn.$$

->Zuwachs des xx. rekristallisierten Kornes

Auftreten: für ΔD_{dyn} : nach Abschluß der dynamischen Rekristallisation
für ΔD_{stat} : nach vollständiger statischer Rekristallisation des Restgefüges

Besonderheiten: ???

Bild 2: Typische Gefüge-Teilmodelle

numerischen Umsetzung. Für diejenigen der o.g. Einflussgrößen, die in den formulierten Gesetzmäßigkeiten als skalare und/oder

zeitlich konstante Größen angesetzt sind, sich in einem Umformprozess aber tatsächlich als veränderliche Größen darstellen, müssen geeignete Ansätze und Algorithmen gefunden werden, die eine zulässige Mittelung der einzelnen Größen ermöglichen, ohne dabei die generellen Ansätze so stark zu vereinfachen, dass eine detaillierte Aussage zum resultierenden Gefüge nicht mehr möglich ist.

Eine zweite Problematik birgt das Zusammenspiel der einzelnen Gefügeteilmodelle. Bild 3 zeigt dazu schematisch den typischen (theoretischen) Ablauf einer Gefügeentwicklung, bei der - ausgehend von einem Ausgangsgefüge - zunächst eine Umformung mit daraus resultierender dynamischer Rekristallisation stattfindet, der sich dann eine Pausenzeit mit statischer Rekristallisation und möglicherweise auch mit Kornwachstum anschließt. Diese zeitliche Abfolge kann z.B. in einem Walzprozess durchaus gewährleistet werden, da hierbei das umzuformende Material, bedingt durch seinen vorgegebenen Weg

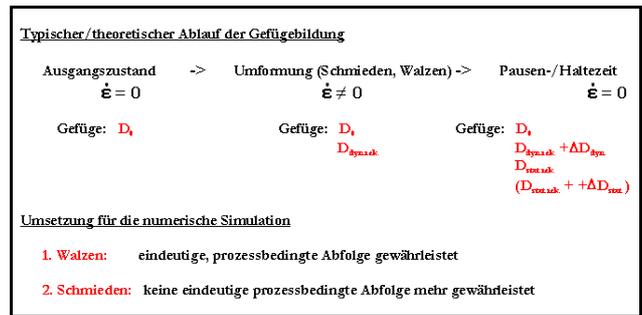


Bild 3: Typischer Ablauf einer Gefügebildung

durch den Walzspalt, nahezu zu jedem Zeitpunkt eindeutig einem der drei Teilbereiche zugeordnet werden kann. Eine derart eindeutige prozessbedingte Abfolge liegt in einem beliebigen Schmiedevorgang aber nicht mehr vor. Daraus erwächst die Notwendigkeit, bei der Umsetzung von Gefügeteilmodelle in einem Simulationsprogramm zusätzliche Kriterien zu formulieren und diese zu jedem Zeitpunkt und für jeden Punkt des Werkstückes zu kontrollieren, um das gegenseitige, störungsfreie Wechselspiel der einzelnen Teilmodelle zu gewährleisten.

Die nachfolgenden Bilder zeigen Ergebnisse einer Simulation einer einstufigen Schmiedeoperation. Es handelt sich hier um die Schmiedung einer Scheibe aus Inconel mit einer Einsatztemperatur von ca. 1200 °C (siehe Bild 5), deren Ausgangsgeometrie

(FEM-Netz) in Bild 4 wiedergegeben ist. Die im Vergleich zum Inneren um rund 10°C kältere Mantelfläche der Scheibe ist das Ergebnis der Abkühlung der Scheibe auf ihrem Weg vom Ofen in die Presse.

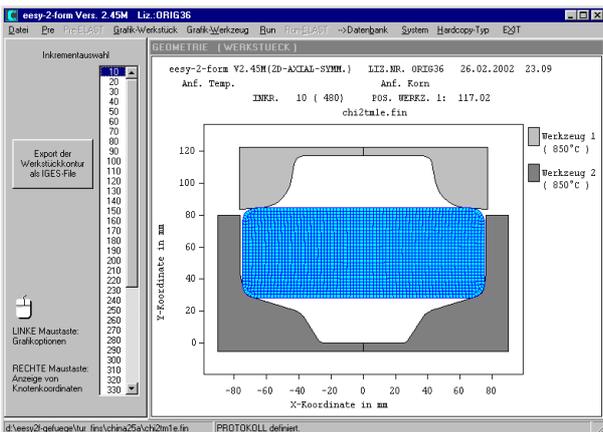


Bild 4: Ausgangsgeometrie der Scheibe

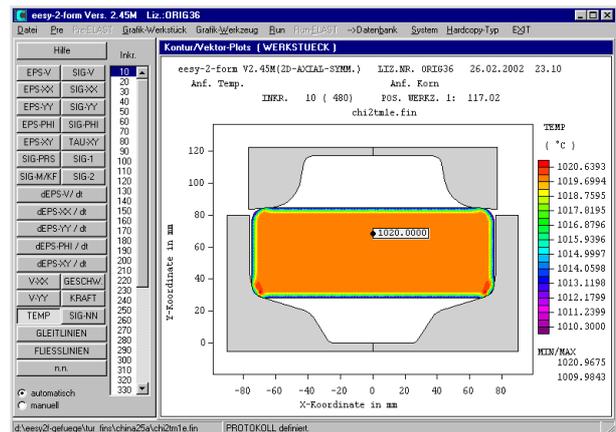


Bild 5: Ausgangstemperaturverteilung

Nach einem Pressen von 22,5mm und einer zugehörigen Prozesszeit von rund 23 Sekunden ist diese Schmiedeoperation

beendet. Bis auf ein jeweils kleines freies Volumen im Ober- und auch im Unterwerkzeug werden die Gesenke dabei nahezu

vollständig ausgefüllt (Bild 6). Der in Bild 7 wiedergegebene Kraftverlauf weist mit seinem

starken Kraftanstieg auf den letzten 2,5mm Pressenweg auf diesen Zustand deutlich hin.

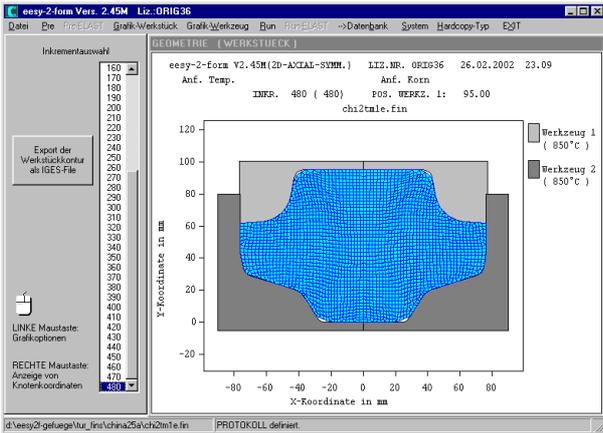


Bild 6: Endgeometrie

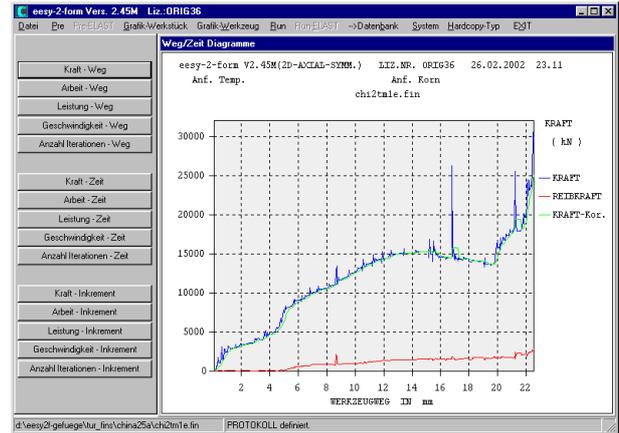


Bild 7: Kraftverlauf

Die nachfolgend Sequenz der paarweise zu betrachtenden Bilder 8 bis 13 zeigt für drei Zwischenzustände der Schmiedeoperation die jeweilige Umformgradverteilung (EPS-V) zur Charakterisierung der stattfindenden Umformung und die dadurch bedingte Gefügeveränderung, hier zunächst ausgedrückt durch den Rekristallisationszustand (Rek. Zust.). Hierbei handelt es sich nicht um eine

physikalische Gefügegröße, sondern lediglich um einen Indikator, der - ausgehend von dem Wert 0 - in den Bereichen, in denen es bereits zu einer Rekristallisation des Gefüges (dynamisch oder auch statisch) gekommen ist, den Wert 1 annimmt. Deutlich zu erkennen ist das Voranschreiten der Rekristallisationsfront mit zunehmender Umformung, ausgehend von den Ecken der Scheibe.

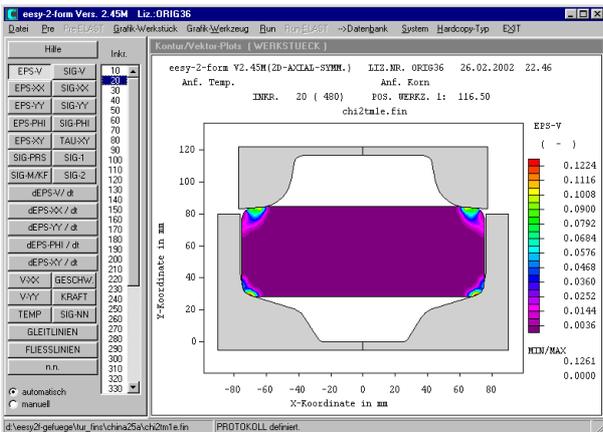


Bild 8: Umformgradverteilung

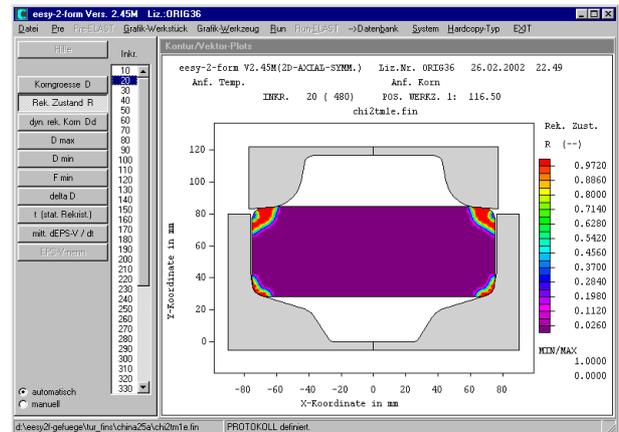


Bild 9: Rekristallisationsfront

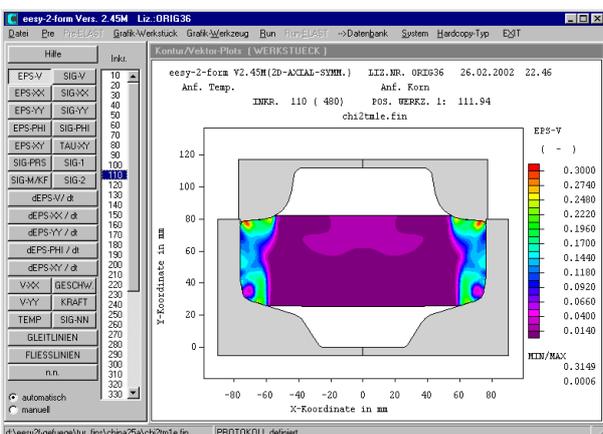


Bild 10: Umformgradverteilung

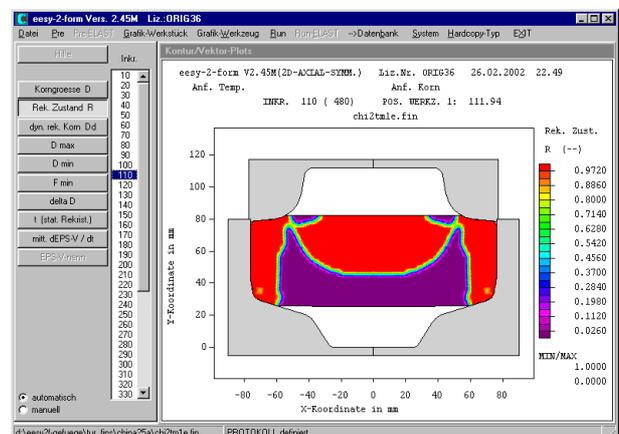


Bild 11: Rekristallisationsfront

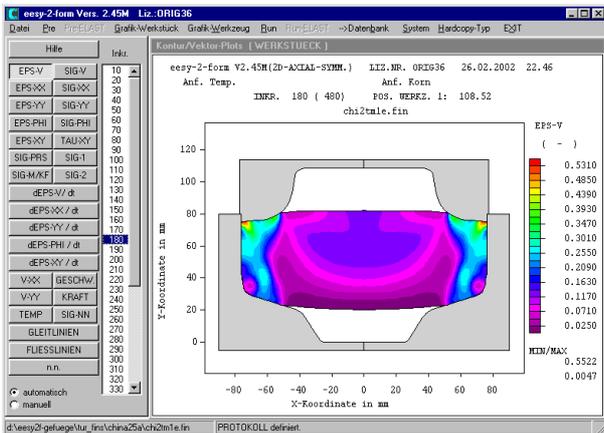


Bild 12: Umformgradverteilung

Ein Ergebnis dieser voranschreitenden Gefügeveränderung, bei der es sich hier im wesentlichen um dynamische Rekristallisation handelt, ist in Bild 14 in Form der resultierenden Korngröße (D) für den Zwischenzustand gemäß Bild 12 (13) dargestellt. In guter Übereinstimmung mit dem in Bild 13 wiedergegebenen Verlauf der Rekristallisationsfront ist in Bild 14 zu erkennen, dass die Ausgangskorngröße von 96 Mikrometer nur noch am unteren Rand der Scheibe zu finden ist. In den übrigen Bereichen liegt eine durch die Rekristallisation bedingte Kornverfeinerung vor.

Das abschließende Darstellung in Bild 15 gibt die Zeiten (in Minuten) an, die einzelne

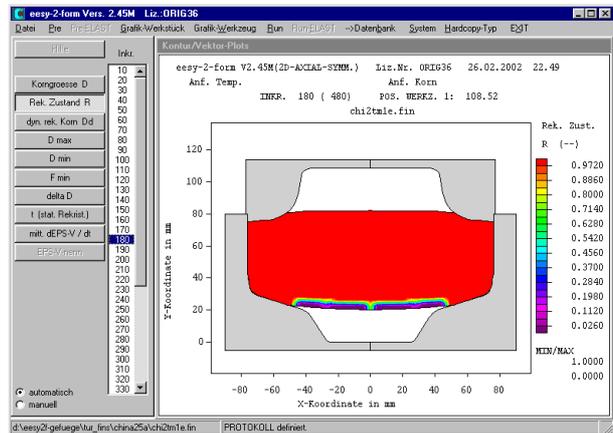


Bild 13: Rekristallisationsfront

Bereiche des Werkstücks eventuell bereits in einer Phase der statischen Rekristallisation zugebracht haben. Dieses trifft hier für die untere Ecke der Scheibe zu. Da in dem für dieses Schmiedebeispiel verwendete Gefügemodell eine statische Rekristallisation erst nach vorangegangener dynamischer Rekristallisation stattfinden kann, bedeutet das Ergebnis in Bild 15 auch, dass dieser Bereich der Scheibe zunächst ausreichend umgeformt worden ist, eine dynamische Teilrekristallisation anzustoßen, die dann im weiteren Verlauf jedoch durch die Ausbildung einer "toten" Zone vorzeitig gestoppt wurde, so dass sich eine statische Rekristallisation anschließen konnte.

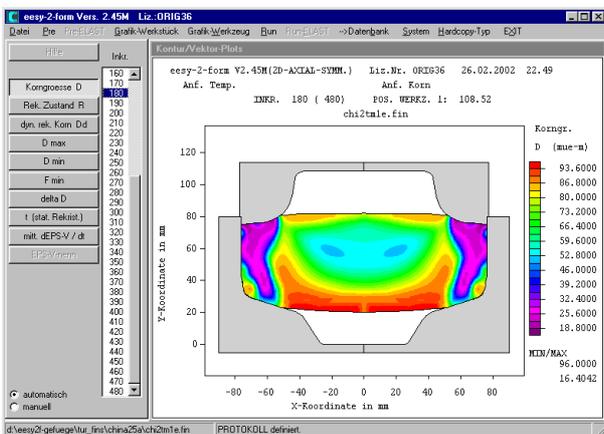


Bild 14: Korngrößenverteilung

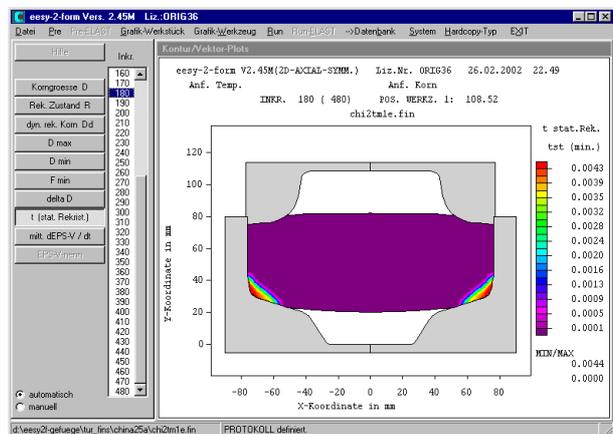


Bild 15: Zeit der statischen Rekristallisation

Die dargestellten Ergebnisse und Erläuterung sollten primär nicht dem Ziel dienen, einzelne Ergebnisse einer komplexen Gefügesimulation im Detail zu diskutieren, sondern vielmehr die generelle Information vermitteln, dass es heute möglich ist, unter Verwendung geeigneter Ansätze und angepasster Algorithmen in einem dafür geeigneten Simulationssystem - wie z.B. dem System *eesy-2-form* - Schmiedesimulationen durchzuführen, deren Ergebnisse und Anwendbarkeit weit über den bisherigen klassischen Anwendungsbereich hinausgehen.