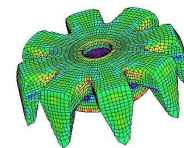
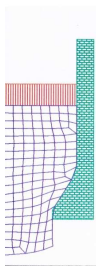
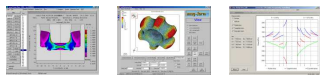


## EESYFEM Simulation und Technologie von CPM GmbH



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



FEM Simulation in der Kaltumformung

Vorgeschichte

### Vorgeschichte

bis in die 1980er Jahre

Großrechner, Abteilungsrechner  
(Verwaltung, Finanzen, Ingenieurwendungen in Großbetrieben)

Einführung von Rechnern im Ingenieurbereich in der Umformtechnik

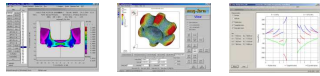
Einführung von CAD

Diverse Kleinrechner (Atari, Sinclair, Z80 etc ganz selten für  
„ernsthafte“ Anwendungen)

1981 IBM PC



Wikipedia



FEM Simulation in der Kaltumformung

Vorgeschichte



Der „reale“  
Ingenieur

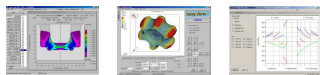


Der Ingenieur im Wandel

1980er



Der CA-Ingenieur



FEM Simulation in der Kaltumformung

Vorgeschichte



Der „reale“  
Ingenieur



Entwicklung eines einfach zu handhabenden  
Systems zur Simulation vom Massivumformung  
auf zukünftigen lokalen Rechnerstrukturen



Der CA-Ingenieur



FEM Simulation in der Kaltumformung    Forschungsarbeiten in den 80er Jahren

### Forschungsarbeiten in den 80er Jahren

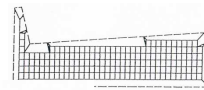
#### Basientwicklungen FEM (2D)

Elementtypen

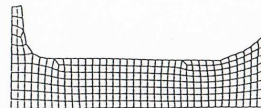


Kontaktalgorithmen

Löser von Gleichungssystemen



Vernetzungsmethoden

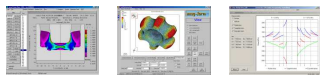


Einfache Handhabung

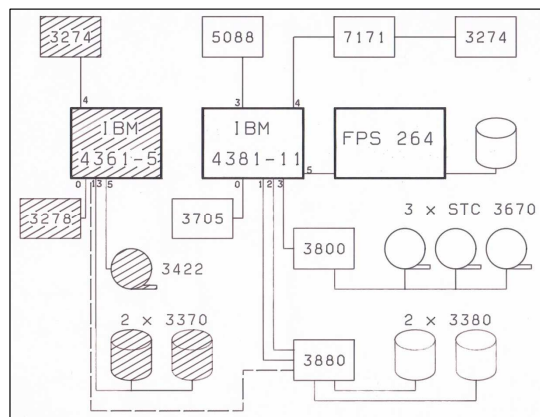
Materialgesetze

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

5



FEM Simulation in der Kaltumformung    Forschungsarbeiten in den 80er Jahren

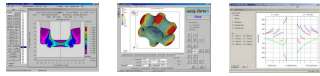


#### Entwicklungsumfeld in den 1980ern

**Leistung** ca.. 60 MFLOPS  
**Vergleich**  
**Core i7,**  
**3,47 GHz, 83,2 GFLOPS**  
**6 Kerne**

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

6



FEM Simulation in der Kaltumformung    Forschungsarbeiten in den 80er Jahren

**Erster Prototyp eines FEM Programms zur Anwendung auch auf PC**

**CAPS-Finel V1.0 (1989)**

2D achsen-symmetrisch und eben

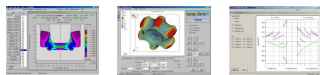
Modellierung, Simulation, Postprocessing in einem System

Einfache Benutzerführung durch Frage-Antwort Dialog

Starr-plastisches Materialgesetz

Thermische Kopplung

Automatisches Vernetzen



FEM Simulation in der Kaltumformung    Forschungsarbeiten in den 80er Jahren

**CAPS-Finel V1.0 (1989)**

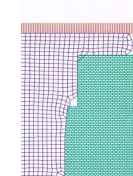
Prototyp simuliert

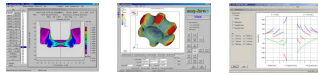
erste **industrielle Prozesse in der Warm und Kaltumformung**

**Weiterentwicklung erfolgt in Richtung**

- Einsatz auf PC
- Erarbeitung einer grafischen Benutzeroberfläche  
(-> „Windows“ gab es noch nicht)
- Randbedingungen
- Materialdaten

**Beginn von Arbeiten über Mikrostruktur mit Luftfahrtfirmen**

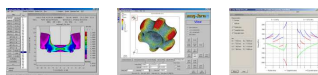
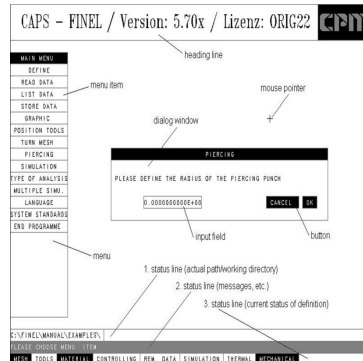




**Entwicklung eines grafischen Interfaces und erste Installationen**



Grafische Oberfläche und  
Menüführung  
CAPS-Finel



**Industrieeinführung und spezielle Entwicklungen für die  
Kaltumformung 1990er**

**Entwicklung eines grafischen Interfaces und erste Installationen**

**Projekt der deutschen Schraubenindustrie**

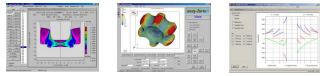
**Verbesserung technologischer Module**

**Einfache Handhabung Mehrstufiger Prozesse**

**Elastische Werkzeuge**

**Materialdaten**

**Mikrostruktur**



FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

## Industrieeinführung und spezielle Entwicklungen für die Kaltumformung 1990er

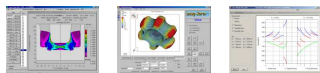
**Neuer Reibungsansatz**

**Schadenanalyse**

**Erste 3D Anwendungen**

**3D Toolbox**

**Neues „easy“ Design (eesy-2-form, eesy-form)**



FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

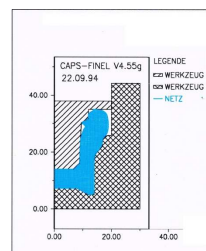
## Projekt der deutschen Schraubenindustrie

Ab 1991 Aufnahme von CPM in ein Projekt des DSV

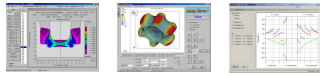
Neben Prozeßüberwachung, Stadiengangauslegung,  
Pressenbewegungsablauf und Kollisionsanalyse sollte auch

**Simulation**  
mit Hilfe der FEM

entwickelt werden.



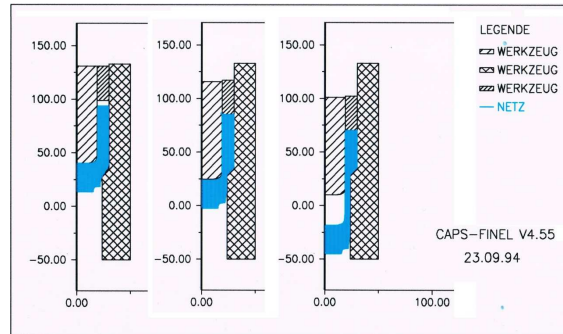
Simulation einer  
Faltenbildung 1994



FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

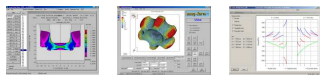
### Verbesserung technologischer Module

Hier: Werkzeuge mit Feder



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

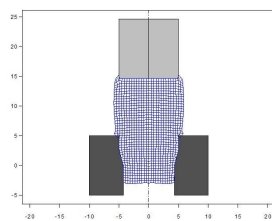
13



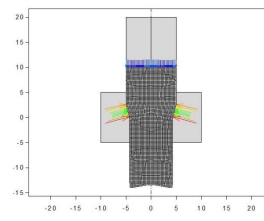
FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

### Verbesserung technologischer Module

Hier: Reibung



Falsches Ergebnis

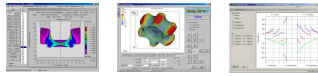


Richtiges Ergebnis

Reibungsbeschreibung, hier: Reduktion

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

14



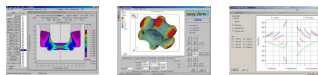
### Neuer Reibungsansatz

**Friction**

**Coulomb**  $F_r = \mu * N$

**Max. shear stress**  $\tau = m * k$

**Combined  
Coulomb / max. shear stress**



### Verbesserung technologischer Module

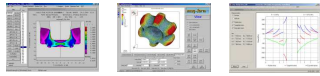
Hier: Möglichkeit der Ergänzung nicht vermaschter Geometrien

	Xfkoord	Yfkoord
R1	1.581	-2.767
R2	1.586	-1.315
P1	2.400	-1.461

Statistik: R = 3.0000

Aktuelle Version Easy-2-form





FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

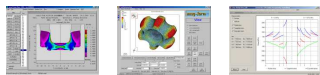
**Erste 3D Entwicklungen**

Ende des 90er Jahre wurde die Entwicklung der 3D Software intensiviert

Hexaederelemente

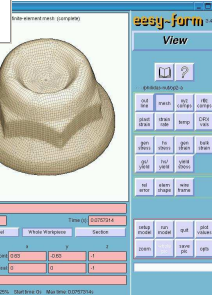
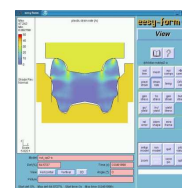
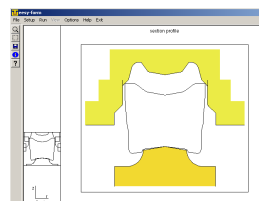
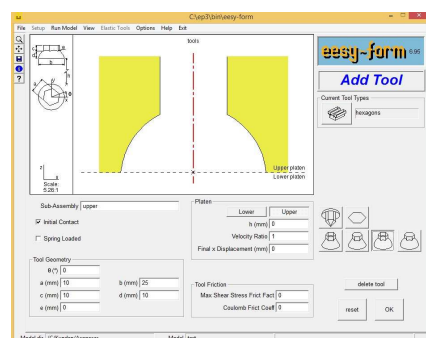
Elastisch-plastisches Materialgesetz

Möglichkeit der Generierung einfacher Geometrien direkt im System (zusätzlich zum üblichen Transfer via stl aus CAD Systemen)

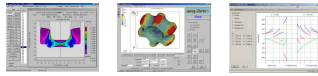


FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

**3D Toolbox**

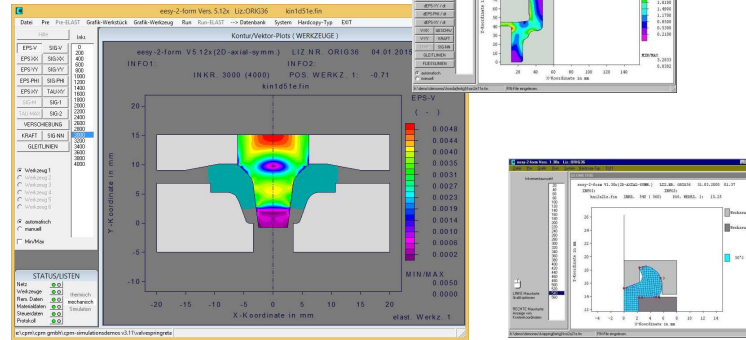


**3D Simulation Mutter – Modulierung über Toolbox**

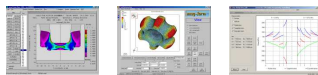


FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

Neues „easy“ Design

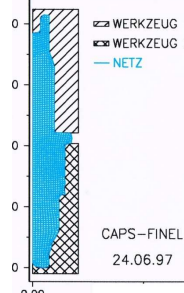
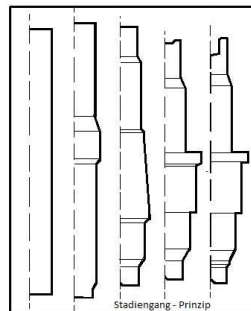
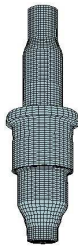


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland



FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

Einfache Handhabung Mehrstufiger Prozesse



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

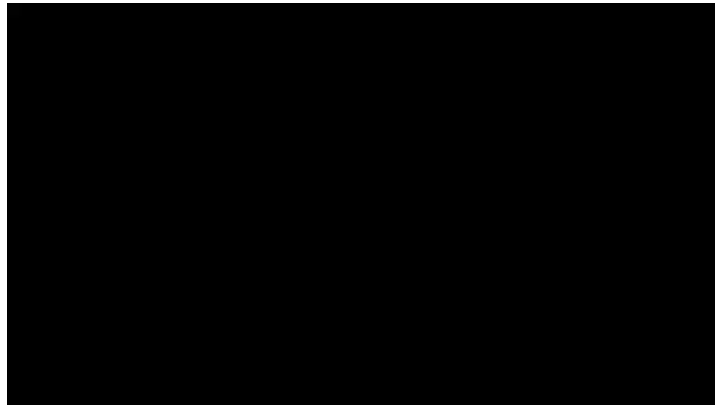


FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

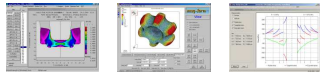
### Einfache Handhabung Mehrstufiger Prozesse



Zündkerze 2000



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

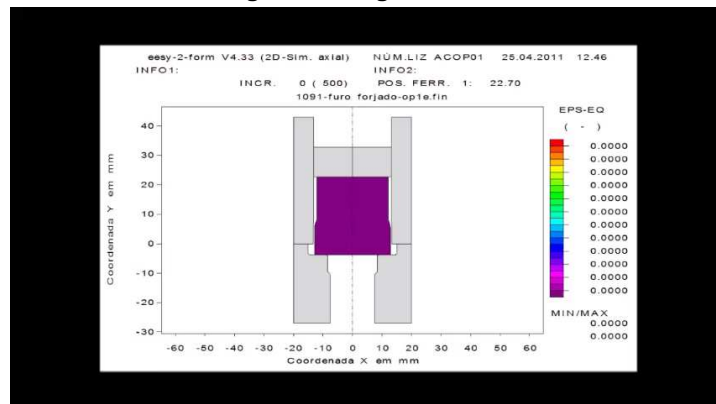


FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

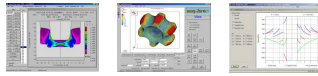
### Einfache Handhabung Mehrstufiger Prozesse



„Mehrstufen  
in einer  
Stufe“ mit  
komplexer  
Werkzeug-  
bewegung

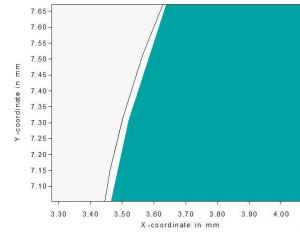
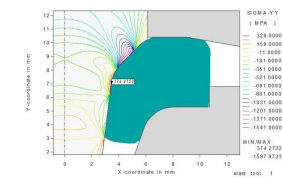
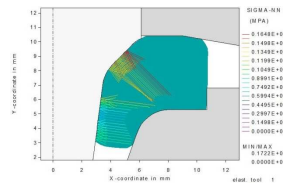


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland



FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

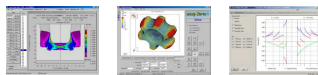
**Fehleranalyse**



**Analyse**

Druck auf der Oberfläche  
Axialspannung alternierend  
im Werkzeug  
und Erklärung  
Fehlender Kontakt  
während der Umformung  
(keine Luft oder Öl!)

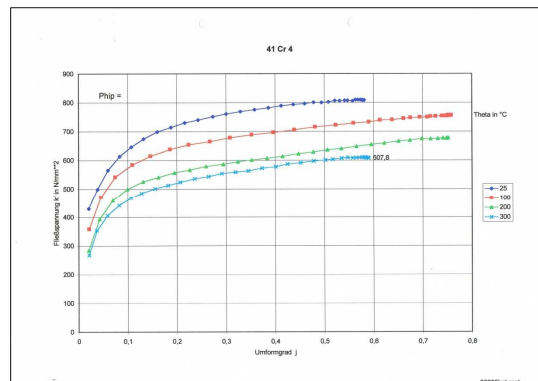
Stempelbruch beim Fertigen eines Ventildfertellers

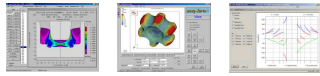


FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

**Materialdaten**

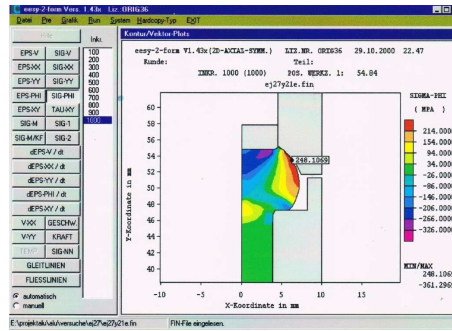
Ein Projekt des  
Landes NRW  
ermöglichte es  
einen ersten  
umfassenden  
Bestand von  
Fließkurven  
zu ermitteln





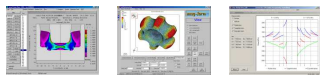
FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

**Schadenanalyse**



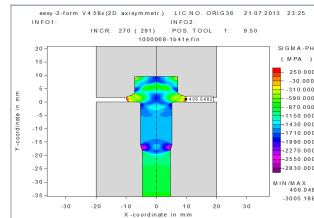
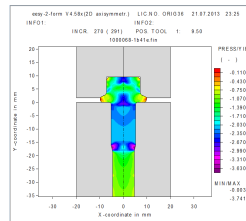
Hier Spannungsanalyse zur Erklärung eines Risses an einer Alu Schraube

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland



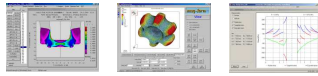
FEM Simulation in der Kaltumformung **Industrieeinführung und spezielle ....**

**Schadenanalyse**



Hier Spannungsanalyse zur Erklärung einer Aufplatzung (Materialfehler)

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland



FEM Simulation in der Kaltumformung **Vervollständigung....3D.... (2000er)**

**Vervollständigung und Ertüchtigung technologischer Module, Werkzeuganalyse und 3D Simulation mit automatischem generieren hexagonaler Elemente (2000er)**

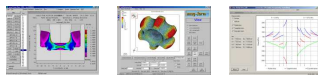
Verbesserung und Vervollständigung technologischer Module (Kontakt, Reibung, Faltenbildung, lokal unterschiedliche Reibung...)

**System zur Auslegung und Optimierung von Werkzeugen**

**Vollautomatisches Vernetzen (hex) in 3D**

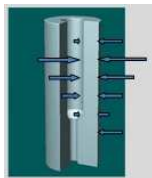
Lokale Reibungsbeschreibung

**Zusätzliche oberflächennahe Analysen -> Tribosystem**



FEM Simulation in der Kaltumformung **Vervollständigung....3D.... (2000er)**

**System zur Auslegung und Optimierung von Werkzeugen**



easy-DieOpt Vers. 2.04 License for: 11-CPM GmbH, Herzogenrath, Germany

File 2-RING-SYSTEM (cold) 2-RING-SYSTEM (warm) 3-RING-SYSTEM 4-RING-SYSTEM Language System EXIT

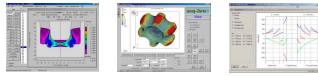
License for: 11-CPM GmbH, Herzogenrath, Germany

	Insert	Sleeve	Casing
Material name	G55	S-6-5-2	X40CrMoV51
Material number		1.3343	1.2344
Young's modulus [MPa]	450000	208000	216000
Poisson's ratio [-]	0.25	0.28	0.28
Tensile strength [MPa]		2100.0	1670.0
Yield strength [MPa]		1850.0	1470.0
Tempering temp. [°C]		580	600
Equivalent stress [MPa]	1560.7	1665.0	1323.0
Tangential stress [MPa]	0.0	637.6	899.6

Contraction (-) / Expansion (+): of D1 0.011 mm of Da 0.154 mm

Assembly:  (Casing + Sleeve) <- Insert  
 (Insert + Sleeve) -> Casing  
 Without intermediate correction

Buttons: New calculation, Optimization (Interference), Optimization (Complete), Optimization (S1,D2,S2 only), Help, Graphic

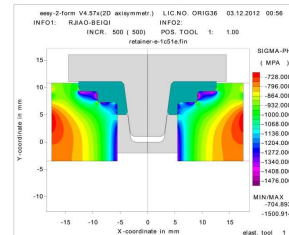
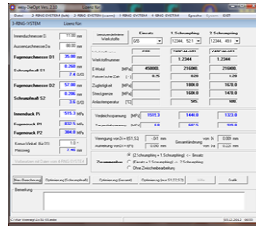
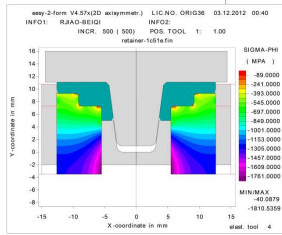


FEM Simulation in der Kaltumformung Vervollständigung....3D.... (2000er)

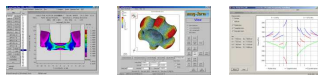
System zur Auslegung und Optimierung von Werkzeugen

Konventionell

Optimiert

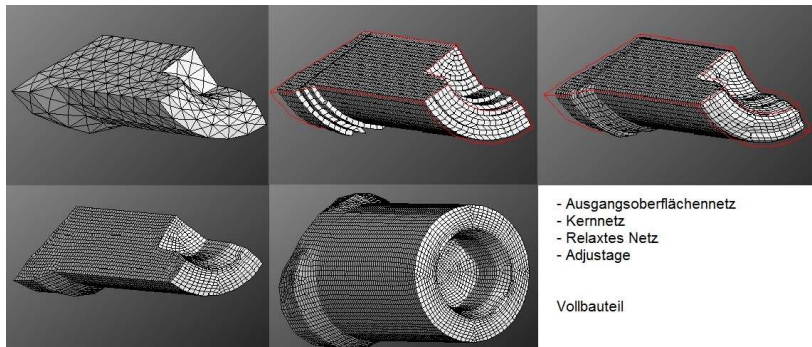


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

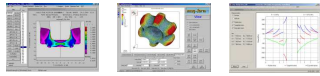


FEM Simulation in der Kaltumformung Vervollständigung....3D.... (2000er)

Vollautomatisches Vernetzen (hex) in 3D

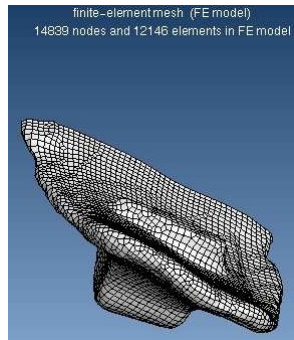


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

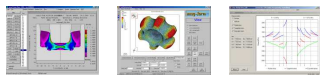


FEM Simulation in der Kaltumformung **Vervollständigung....3D.... (2000er)**

### Vollautomatisches Vernetzen (hex) in 3D



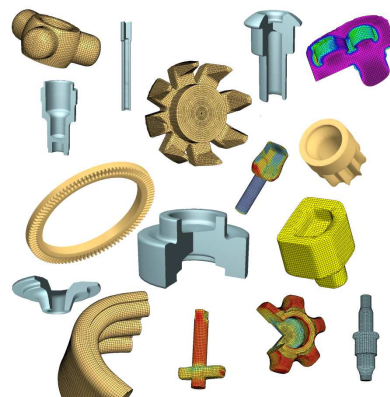
Luftfahrtteil



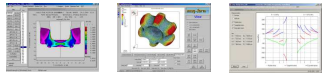
FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

### Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick

Im Folgenden werden einige  
aktuell Anwendungsbeispiele  
gezeigt und zukünftige  
Entwicklungen angesprochen





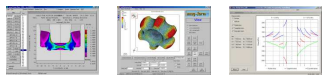


FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**

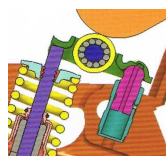


Fertigung eines Rotors  
aus Blech

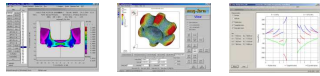


FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**

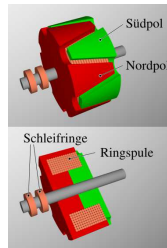


Ventilsteuerung  
Ausgleichselement

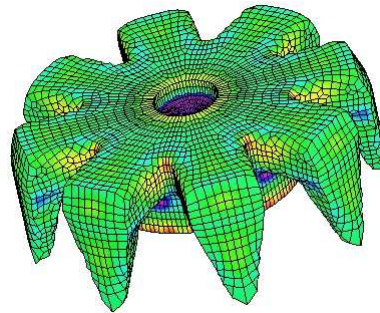


FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

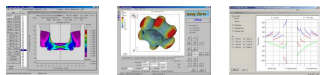
**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**



(Schenkelpolmaschine – Wikipedia)

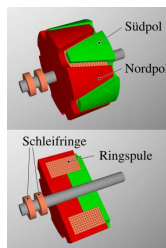


Polklaue



FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**

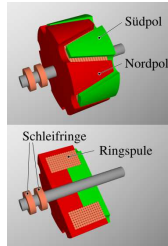


(Schenkelpolmaschine – Wikipedia)

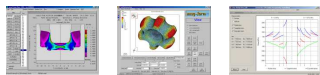


FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**



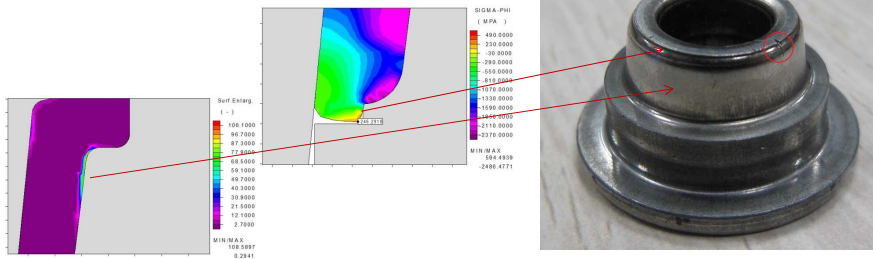
(Schenkelpolmaschine – Wikipedia)



FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**

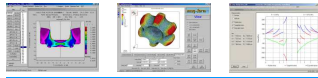
**Aufrauhung und Riss an einem Ventildfederteller**



Oberflächen  
vergrößerung

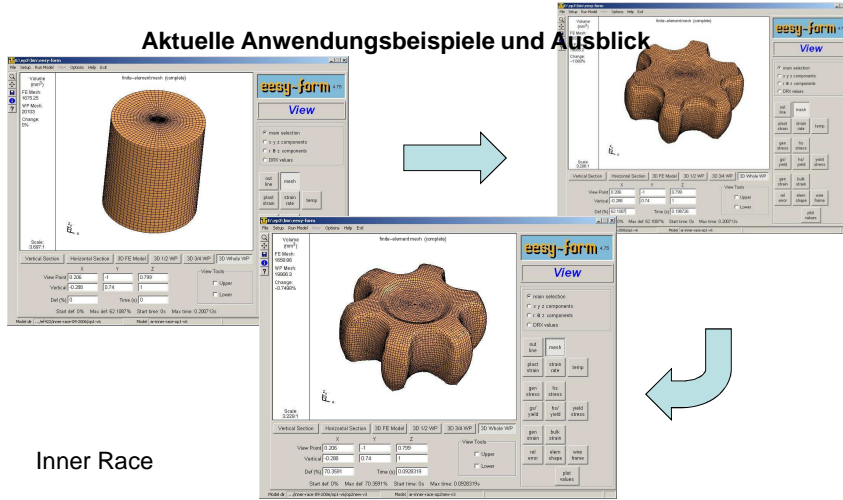
Umfangsspannung

Fehlerhafter Ventildfederteller



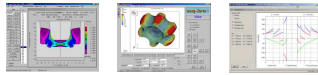
FEM Simulation in der Kaltumformung Aktuelle .....-beispiele und Ausblick

Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick

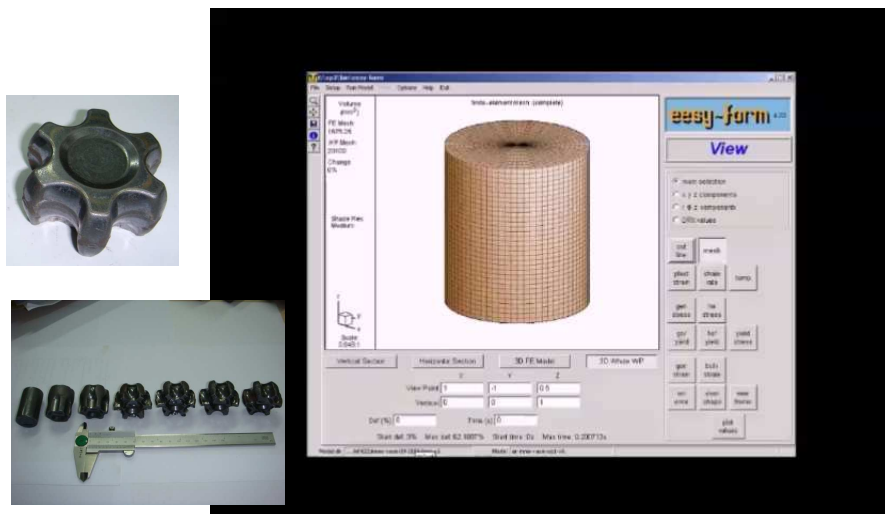


Inner Race

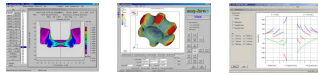
(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland



FEM Simulation in der Kaltumformung Aktuelle .....-beispiele und Ausblick

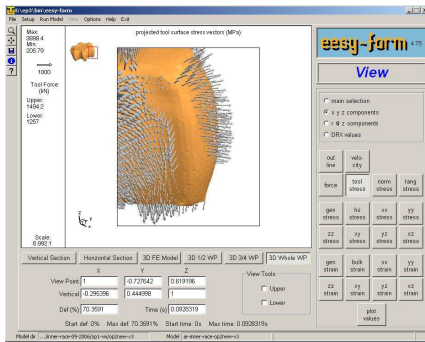


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

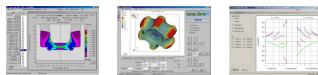
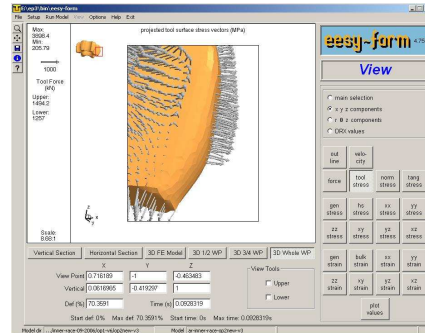


FEM Simulation in der Kaltumformung Aktuelle .....-beispiele und Ausblick

Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick

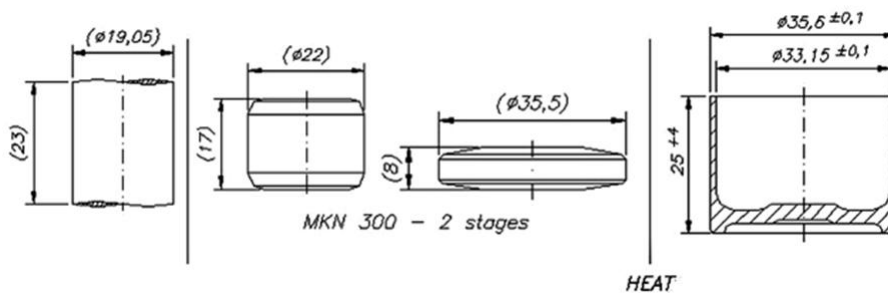


Inner Race

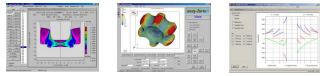


FEM Simulation in der Kaltumformung Aktuelle .....-beispiele und Ausblick

Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick



Ventilstößel

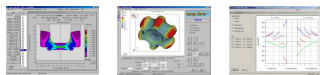


FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**

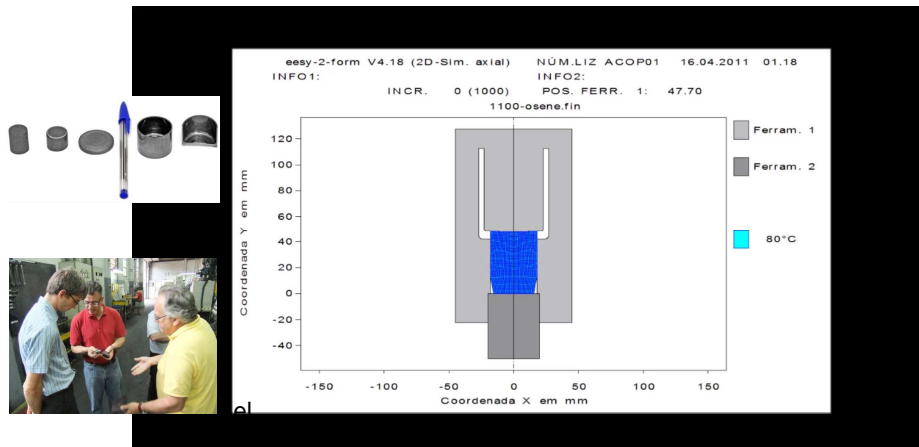


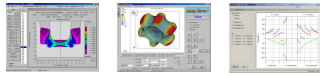
Ventilstößel



FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**

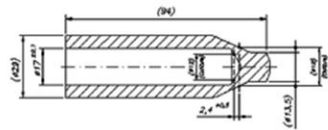
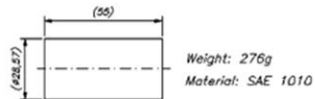




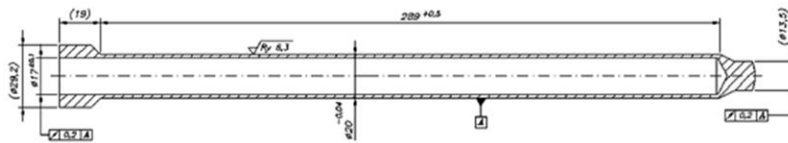
VDI  
30

FEM Simulation in der Kaltumformung Aktuelle .....-beispiele und Ausblick

### Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick

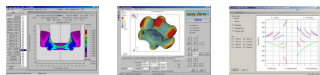


Fertigung eines Stoßdämpfers



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

45



VDI  
30

FEM Simulation in der Kaltumformung Aktuelle .....-beispiele und Ausblick

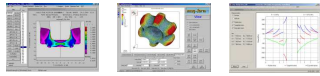
### Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick



Fertigung eines Stoßdämpfers

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

46

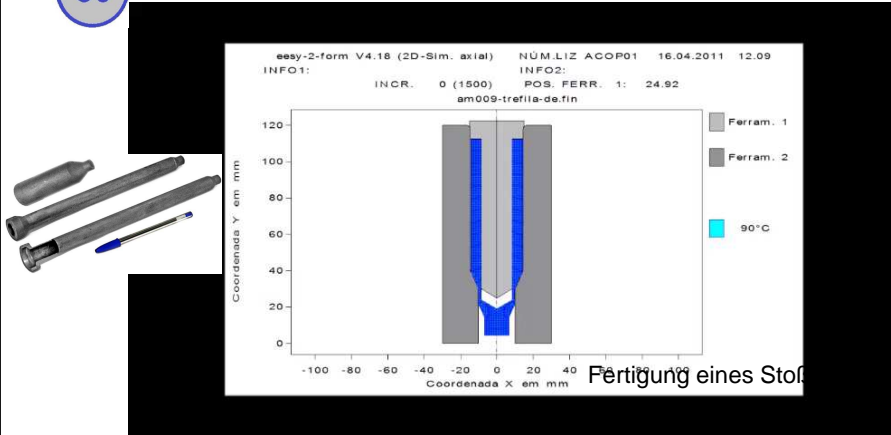


VDI

30

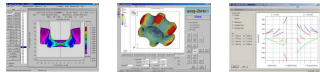
FEM Simulation in der Kaltumformung Aktuelle .....-beispiele und Ausblick

### Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

47



FEM Simulation in der Kaltumformung Aktuelle .....-beispiele und Ausblick

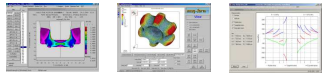
### Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

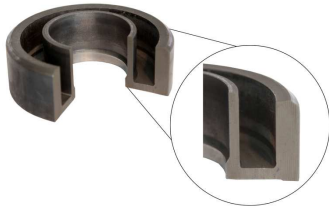
48



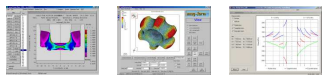


FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**

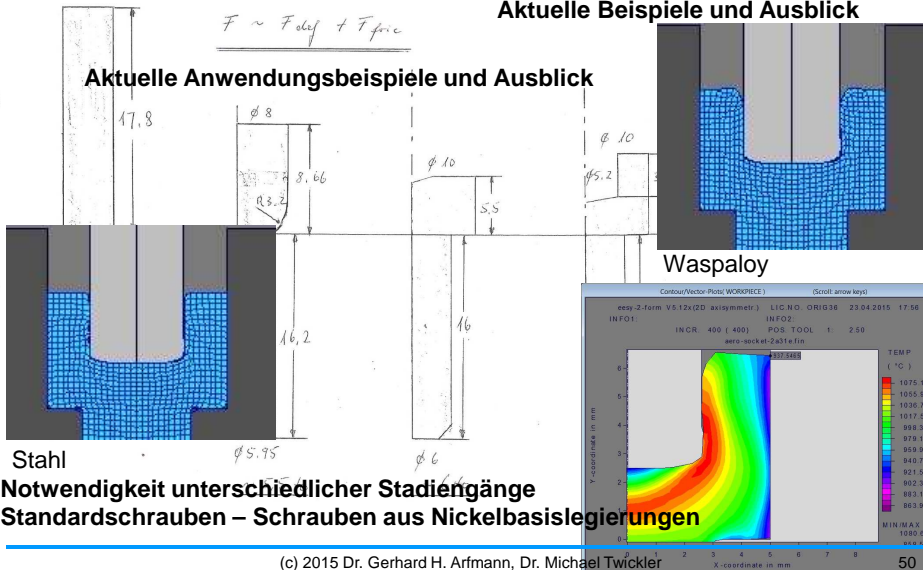


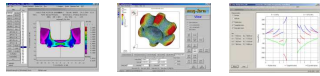
Fertigung eines Rotors



**Aktuelle Beispiele und Ausblick**

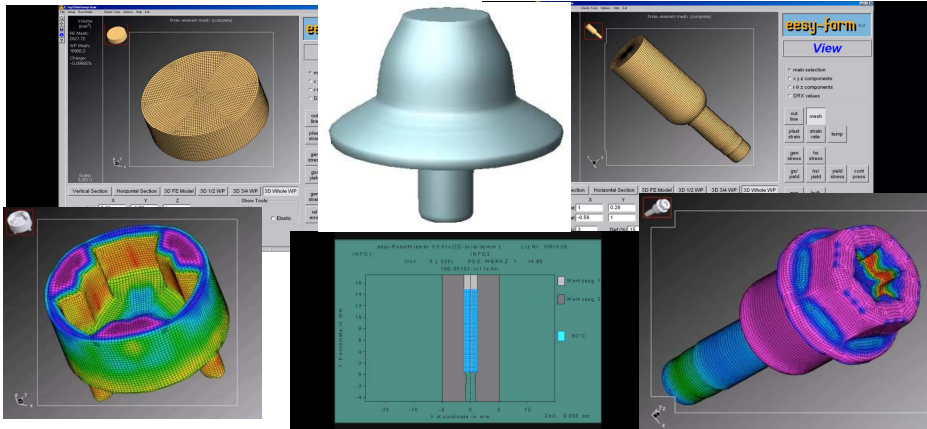
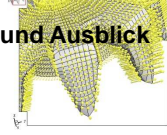
**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**



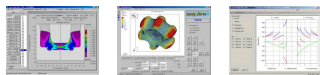


FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland



FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**



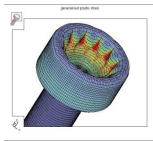
(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland



FEM Simulation in der Kaltumformung **Aktuelle .....-beispiele und Ausblick**

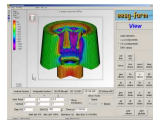
**Aktuelle Anwendungsbeispiele und Ausblick**

Zukünftige Entwicklungen



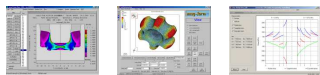
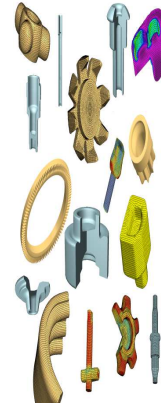
Integration der Umformtechnischen Simulation  
in die gesamte Produktionskette

Vervollständigung der benötigten Materialdaten



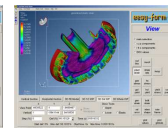
Entwicklung weiterer Teilmodule

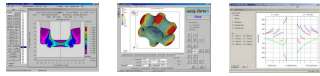
Reduzierung von umfassenden Systemen zu  
hochspezialisierten, effizienten Spezialsystemen



**Danksagung**

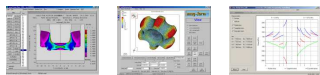
Die Autoren danken ihren Kunden, die relevante Informationen zu den praktischen Beispielen und generelle Informationen zur Anwendung der FEM beigetragen haben. Solche Informationen sind sehr hilfreich, um Simulationssysteme weiter zu entwickeln, aber auch um die sachgerechte Anwendung der Simulationstechnik durch Vorträge wie diesen zu unterstützen.





## **“Various Approaches to deal with Microstructure in Simulation of Bulk Metal Forming”**

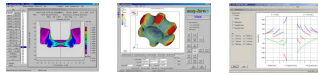
*Dr. Michael Twickler, Dr. Gerhard H. Arfmann  
CPM GmbH, Herzogenrath*



## *Why to determine the microstructure?*

### **Motivation:**

- most realistic modeling of the forming processes in the Simulation (Material flow, Strain hardening, etc.)
- prove of reaching a certain specified grain structure (average grain size, max permitted grain size , etc.)
- provide the necessary grain structure information for subsequent further treatment (heat treatment or others)
- derivation of product properties
- information to support further experimental investigations (i.e. orientation of flow lines for ultra sonic testing)
- etc.



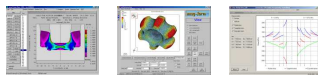
## The most simple Model: "Pause Time = Recrystallization"

### Basic approach:

- sufficiently high temperatures and a least energy brought in by forming result in recrystallization in the part (dynamic, static)
- the recrystallization reduces the deformation that is already in the part
- the local temperature and strain are always sufficient to enable recrystallization
- the pause time (transport of the part) is always sufficient to allow for complete recrystallization
- complete recrystallization is identical with complete reset of any deformation that is already in the part
- dynamic recrystallization during the forming will have no effect to the material properties nor to the material flow

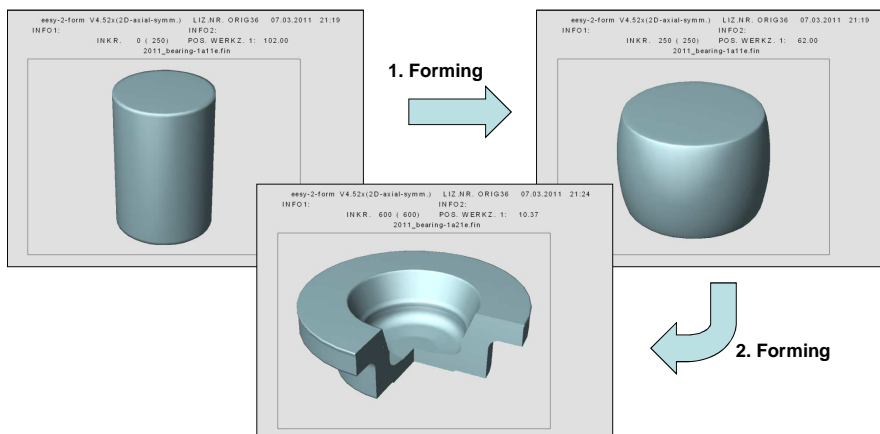


End of forming = Pause time = Complete recrystallization



## The most simple Model: "Pause Time = Recrystallization"

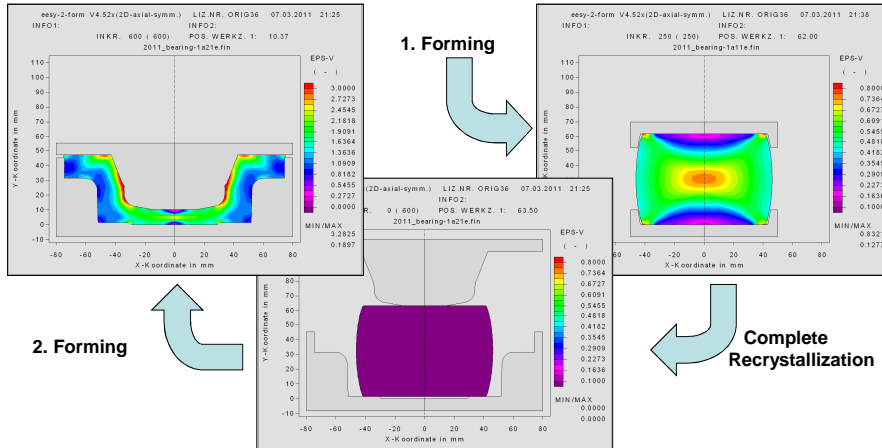
### Example: Bearing Shell, 2-Step Forming at 1150°C





## The most simple Model: "Pause Time = Recrystallization"

Example: Bearing Shell, 2-Step Forming at 1150°C



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

59



## The most simple Model: "Pause Time = Recrystallization"

Results:

- in a multi step forming process each step starts with completely recrystallized material behavior (there is no forming history)  
=> the resulting strain values often show a realistic picture of the real material situation  
=> a basic interpretation of the actual deformation regarding the limit of formability can be performed  
=> the calculated forming and tool loads are not influence by an accumulation of strain from previous operations
- Information about the state of recrystallization of the material: **not available**
- evaluable information about grain size or grain size distribution: **not available**
- information about grain growth: **not available**
- further microstructure relevant results: **not available**
- influence on the used material model: **none, Yield stress – strain curve remains unchanged**

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

60



## The typical Model: "Dynamic/Static with grain growth"

### Model idea (1):

- a model of the dynamic recrystallization can be formulated like

dynamisch {

$$D_{\text{dyn.rek.}} = f(D_0, \epsilon, \delta\epsilon/\delta t, T, \text{etc.}) \Rightarrow \text{dyn. recryst. grain size}$$

$$F_{\text{dyn.rek.}} = f(\text{several process parameters}) \Rightarrow \text{dyn. recryst. fraction}$$

Relevance: during respectively directly after the forming

- a model of the static recrystallization can be formulated like

statisch {

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

$$F_{\text{stat.rek.}} = f(\text{several process parameters}) \Rightarrow \text{stat. recryst. fraction}$$

Relevance: during pause time between respectively hold time after previous deformation



## The typical Model: "Dynamic/Static with grain growth"

### Model idea (2):

- a model for grain growth can be formulated like

Wachstum {

$$\Delta D_{\text{xx.rek.}} = f(D_{\text{xx.rek.}}, T, t, \text{etc.}) \text{ with } \text{xx.} = \text{stat. or dyn.}$$

$$\Rightarrow \text{growth of the xx. recrystallized grain}$$

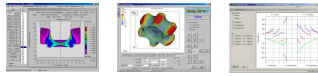
Relevance: for  $\Delta D_{\text{dyn.rek.}}$ : after the end of the dynamic recrystallization  
for  $\Delta D_{\text{stat.rek.}}$ : after complete static recrystallization of the leftover grainstructure

- it is possible to find reasonable rules to allow at a certain step of time to merge the separate grain fractions like

Mischung {

$$D_{0\text{-neu}} = f(D_0, D_{\text{dyn.rek.}}, D_{\text{stat.rek.}}, \Delta D_{\text{dyn.rek.}}, \Delta D_{\text{stat.rek.}}, F_{\text{dyn.rek.}}, F_{\text{stat.rek.}})$$

$$\Rightarrow \text{new average of the initial grain size}$$



## The typical Model: "Dynamic/Static with grain growth"

### Model idea (3):

- the reduction of the amount of strain in the part is equivalent to the sum of the recrystallized fractions (considered locally) like

Strain Softening {  $\epsilon_{v\text{-neu}} = f(\epsilon_v, F_{\text{dyn.rek.}}, F_{\text{stat.rek.}}) \Rightarrow$  new reduced strain

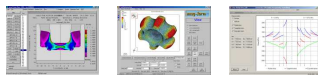
Relevance: after completion of the dynamic recrystallization and during the static recrystallization

- the complex interaction between the several mechanism of microstructure change can be formulated and coded. Normally there is no strict sequence how the various models interact during a process. Knowledge is needed about:

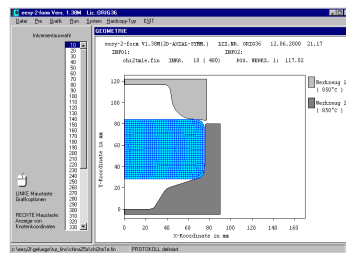
- interaction and dependencies of the various models
- Start/Stop-conditions for the models



Dynamic/Static Model for Forming and Hold Times

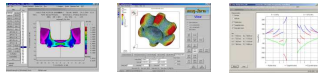


## SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS *eesy-2-form*

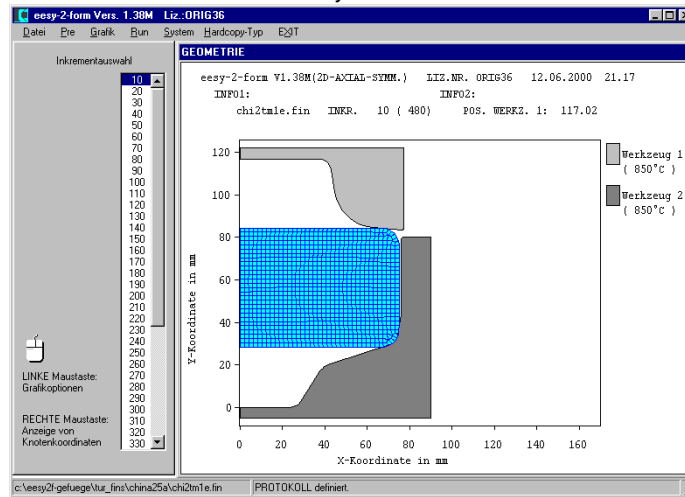


Ergebnisse von Arbeiten aus den 1990er Jahren !!!



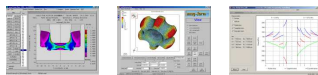


SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*

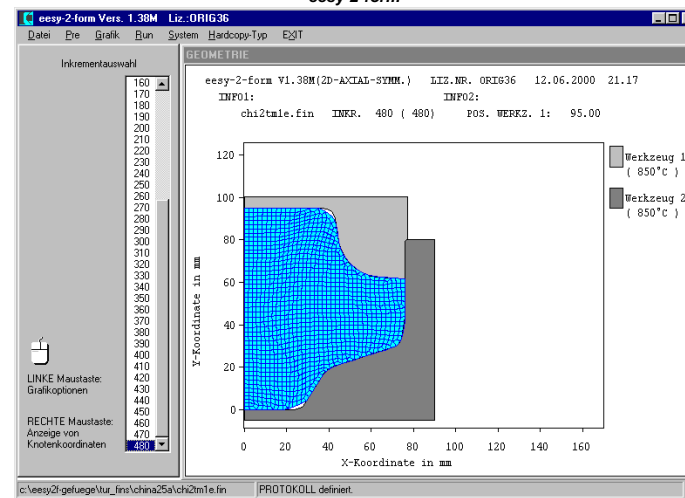


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

65

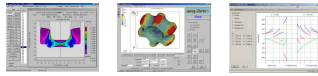


SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*

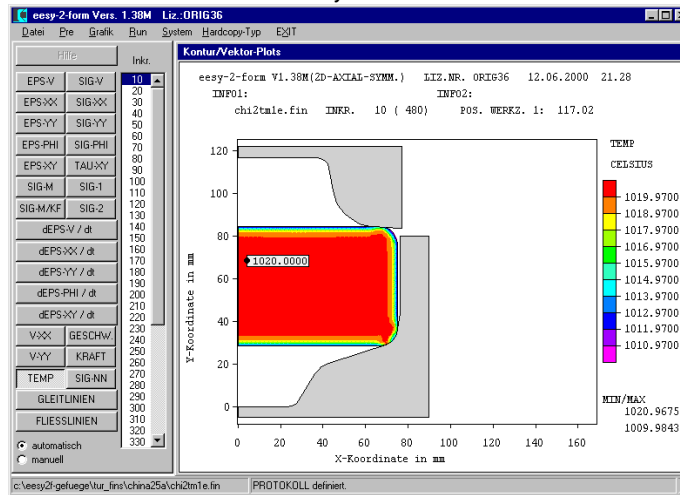


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

66

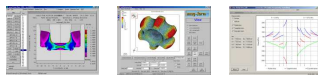


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS**  
*easy-2-form*

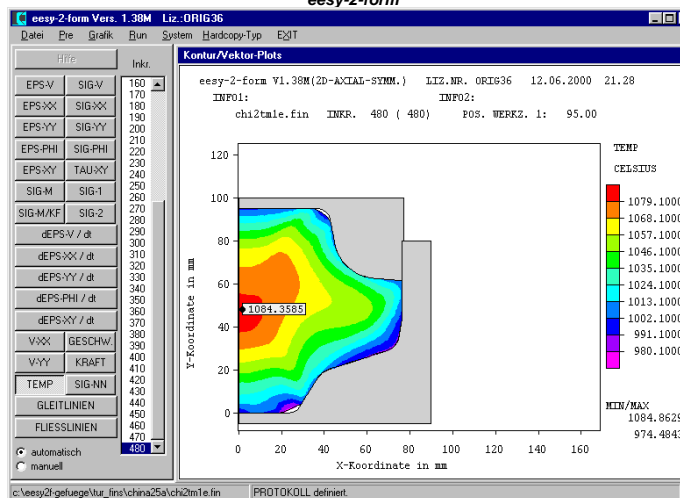


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

67

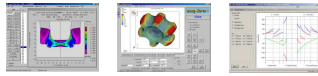


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS**  
*easy-2-form*

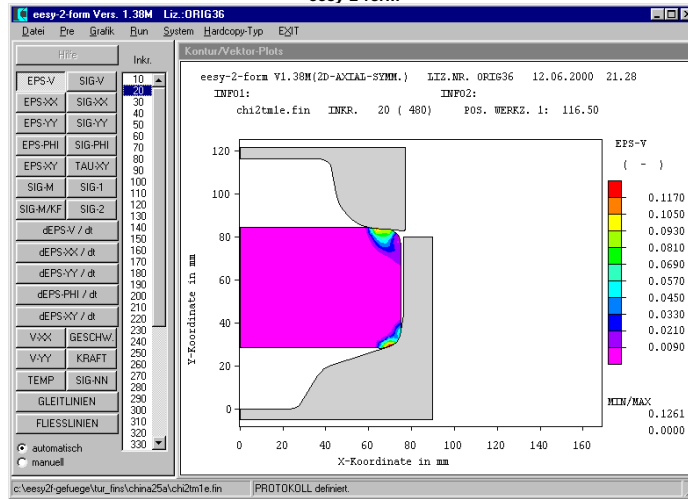


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

68

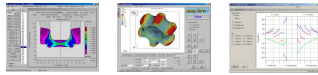


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS *easy-2-form***

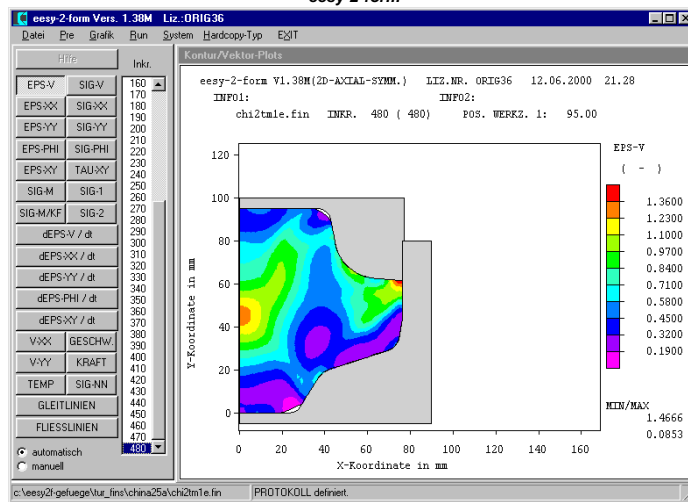


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

69

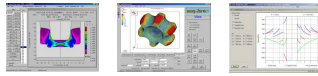


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS *easy-2-form***

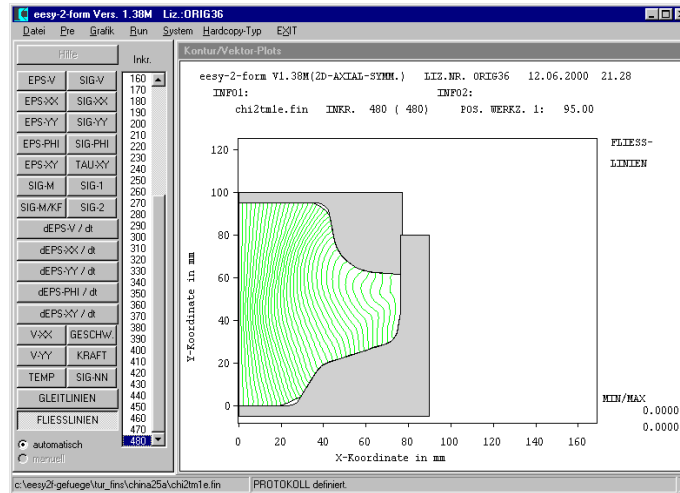


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

70

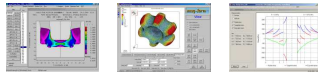


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

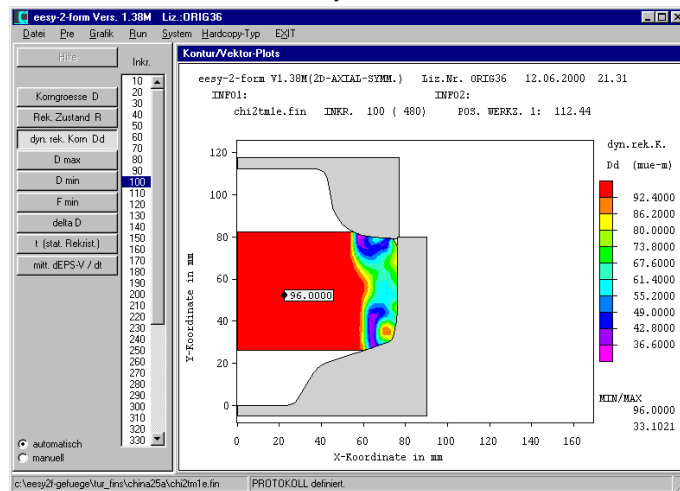


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

71

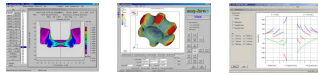


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

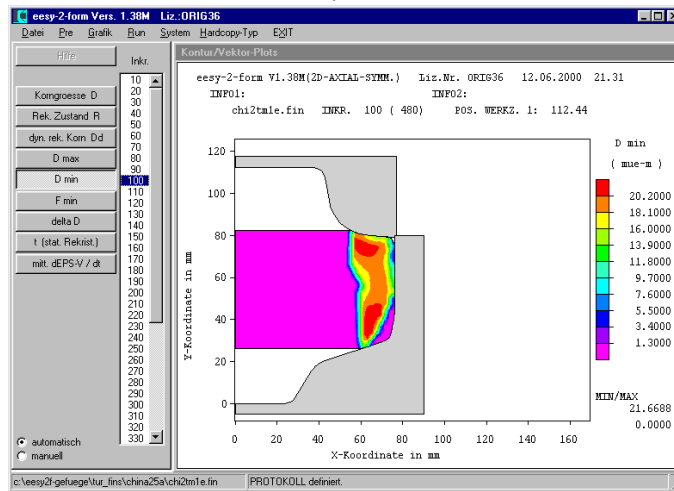


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

72

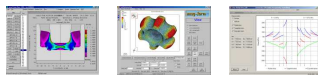


SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*

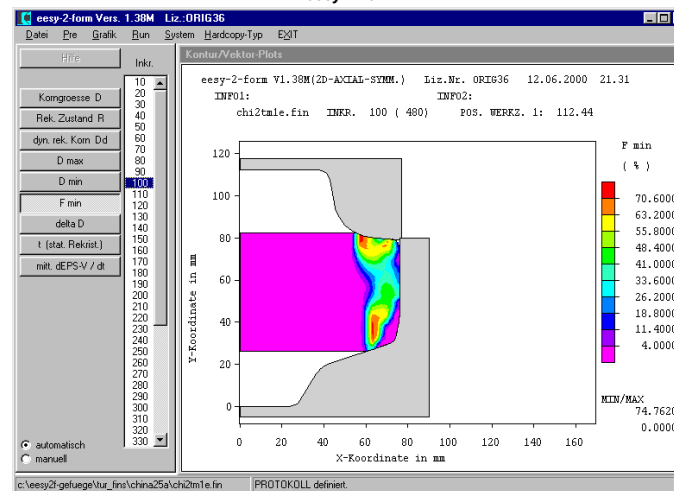


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

73

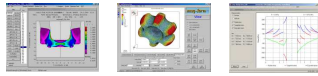


SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*

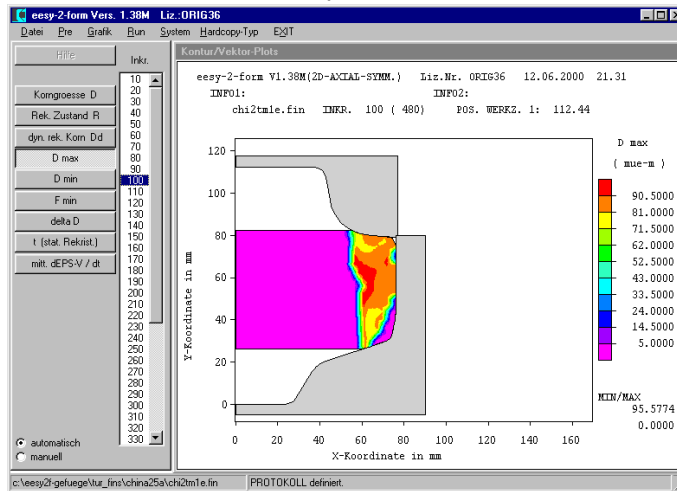


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

74

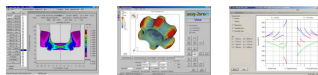


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

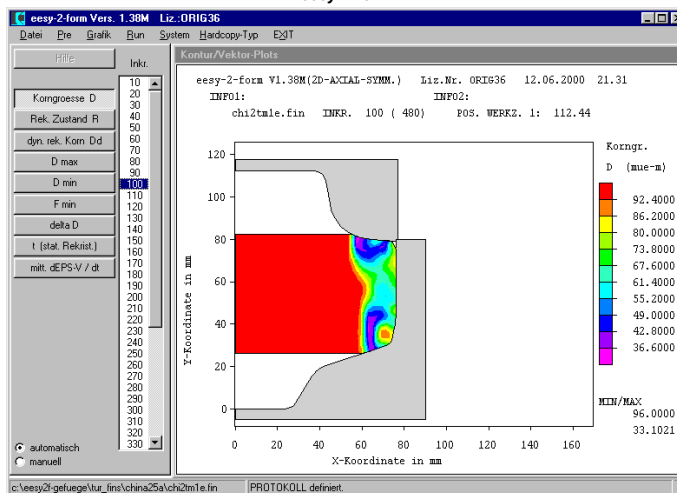


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

75

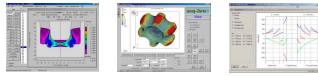


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

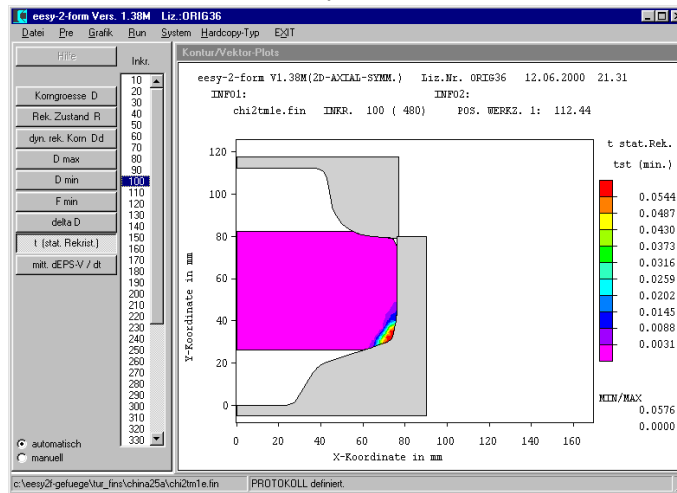


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

76

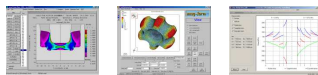


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

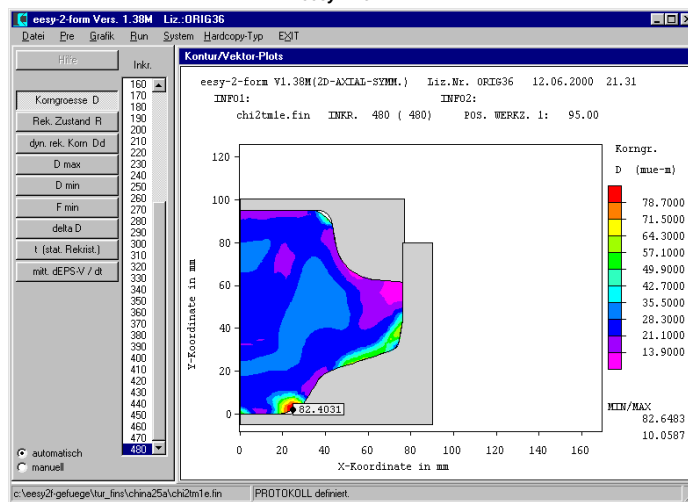


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

77

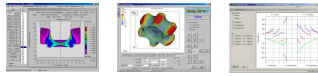


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

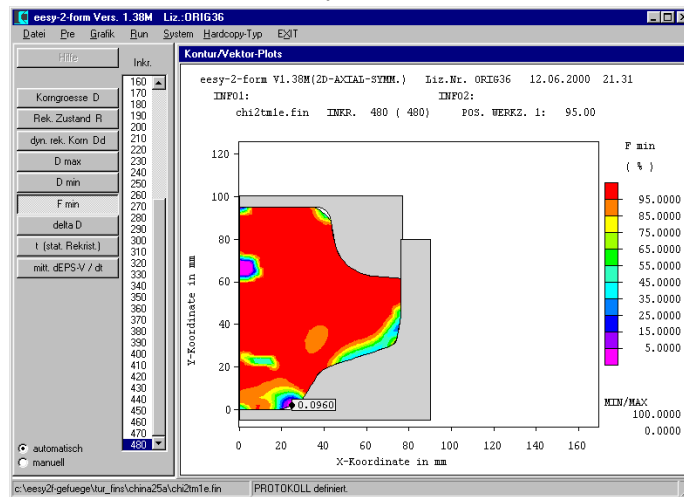


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

78

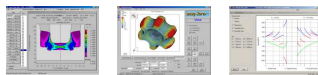


SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*

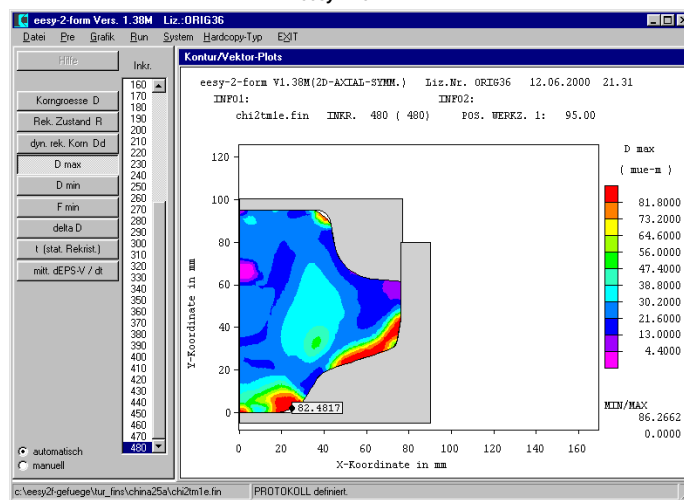


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

79



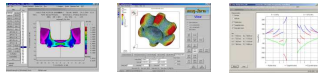
SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*



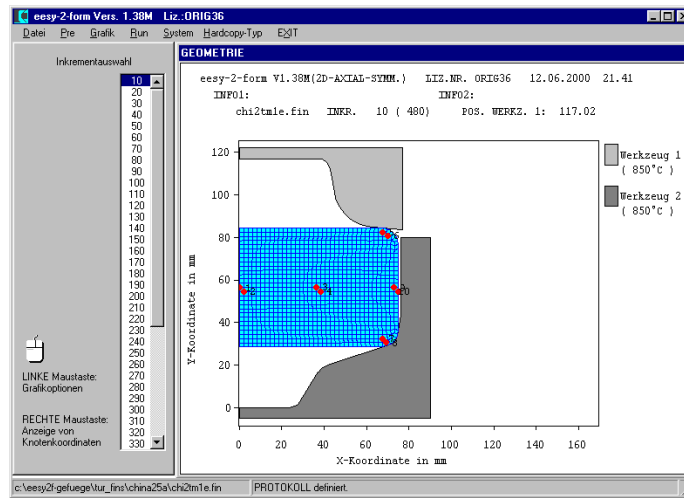
(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

80



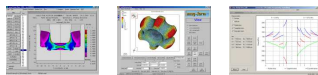


SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*

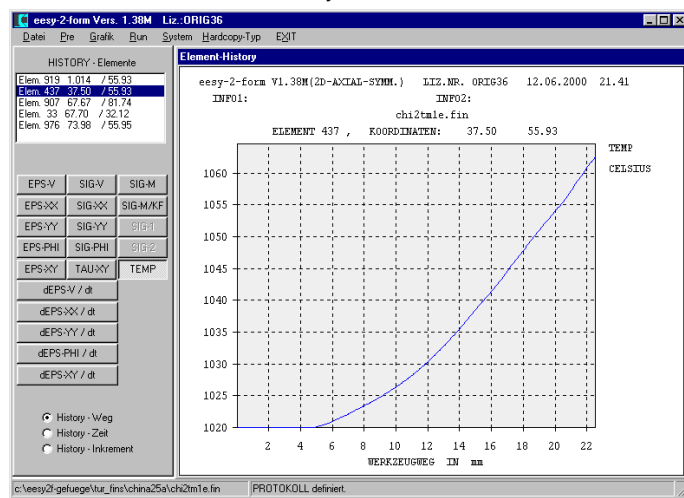


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

81

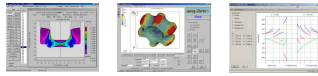


SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*

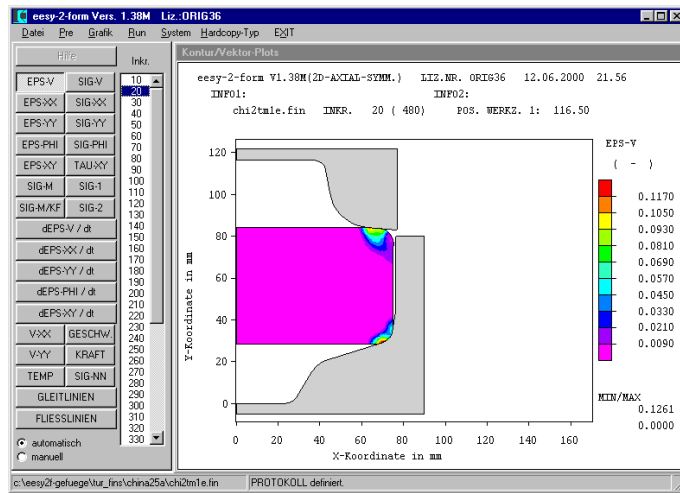


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

82

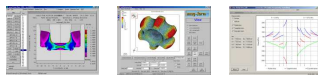


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

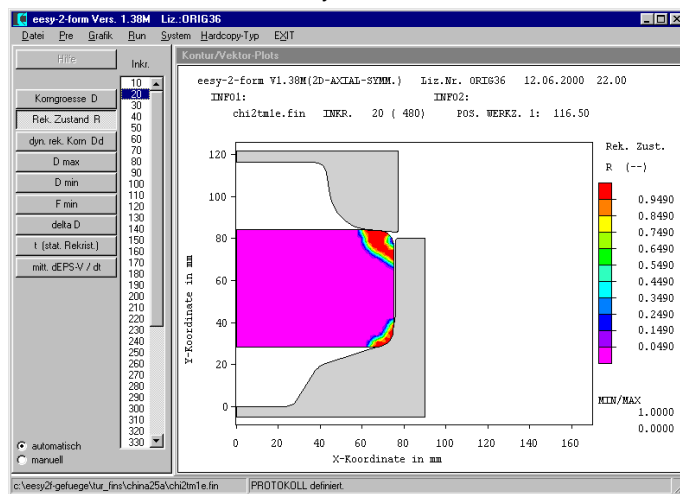


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

83

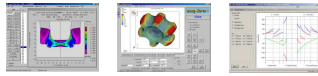


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

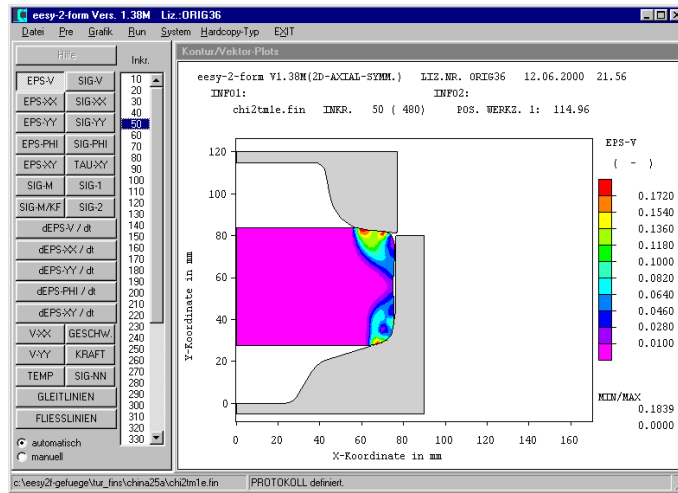


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

84

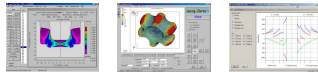


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

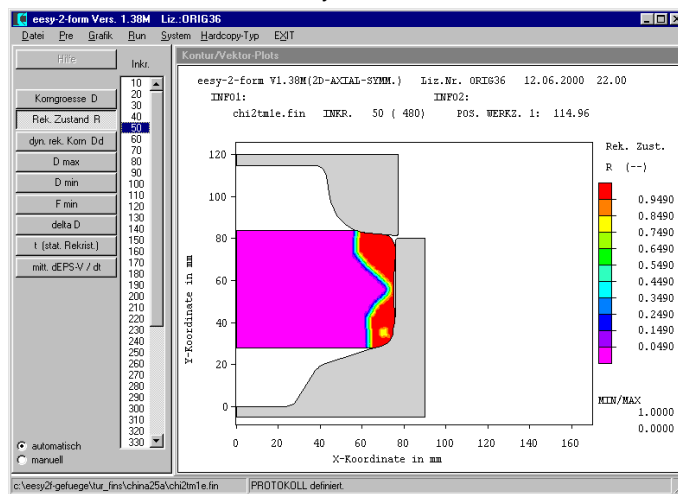


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

85

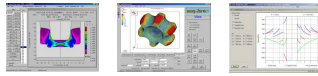


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

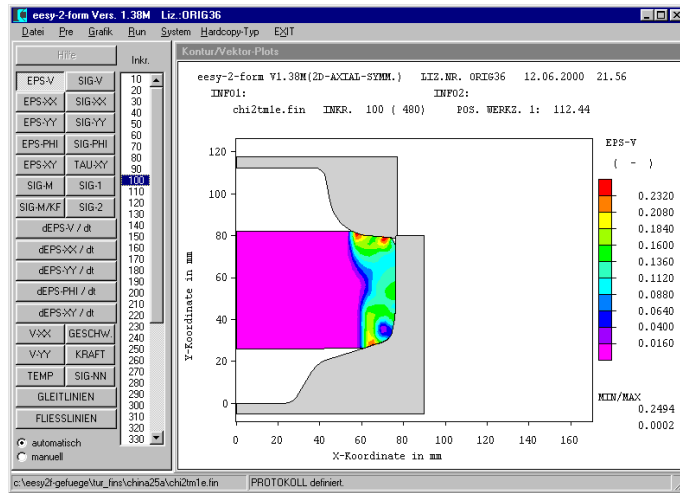


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

86

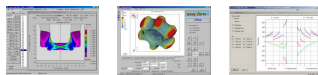


SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*

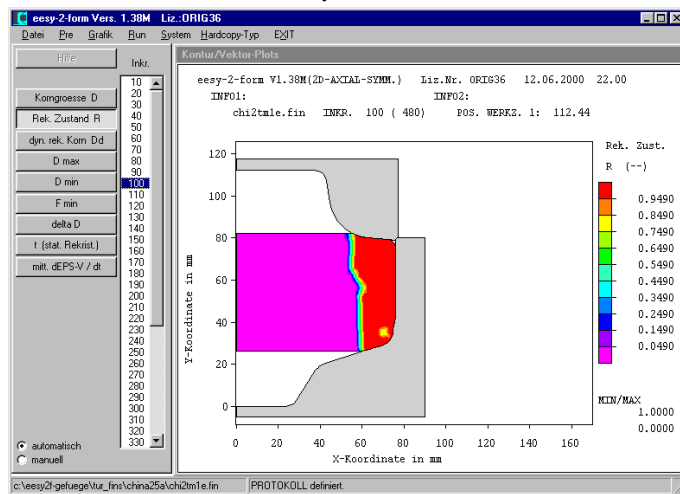


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

87

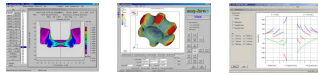


SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
*easy-2-form*

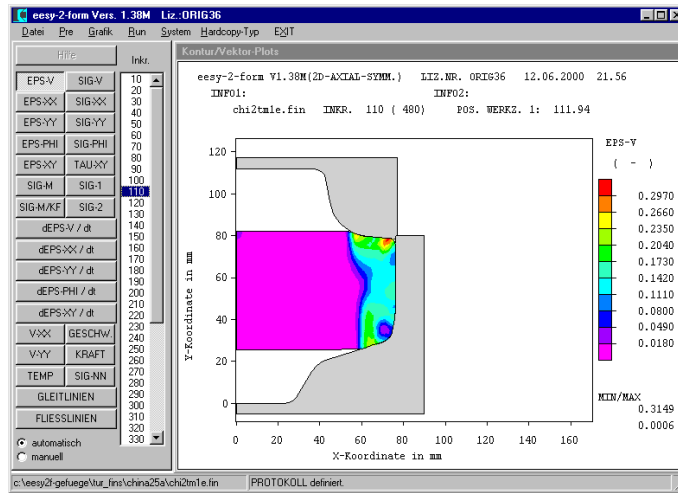


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

88

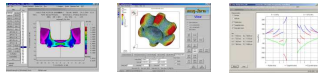


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

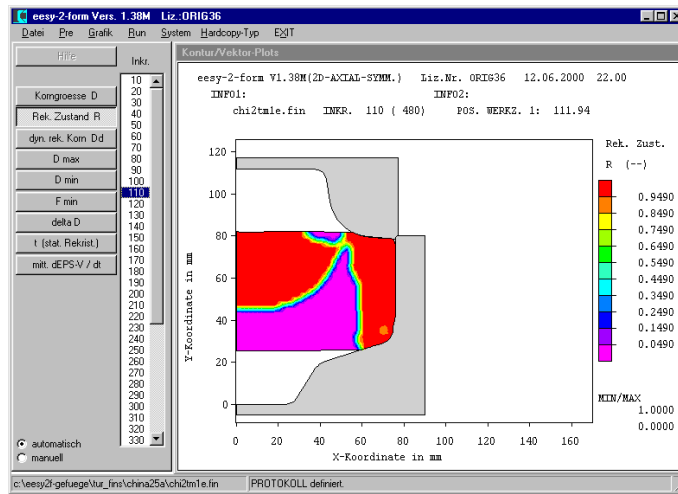


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

89

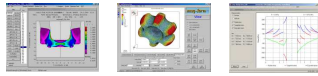


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

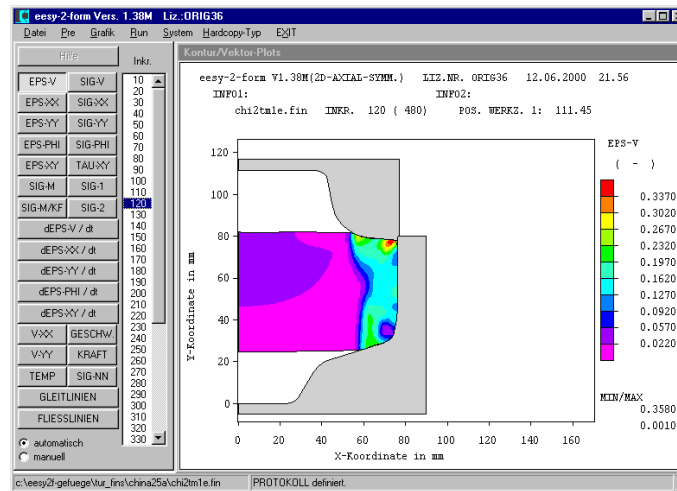


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

90

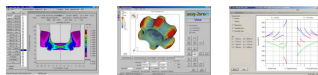


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

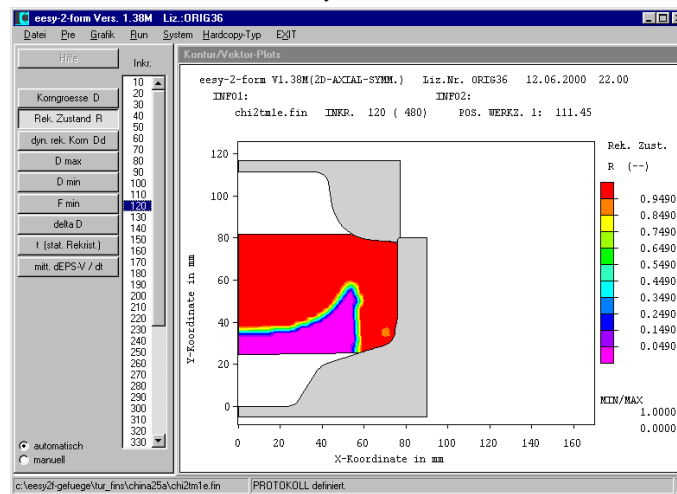


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

91

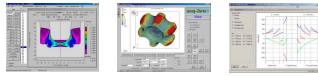


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

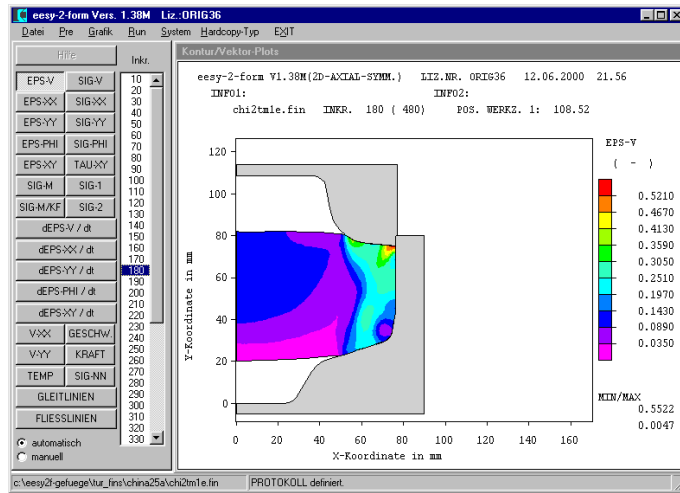


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

92

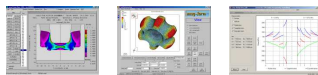


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

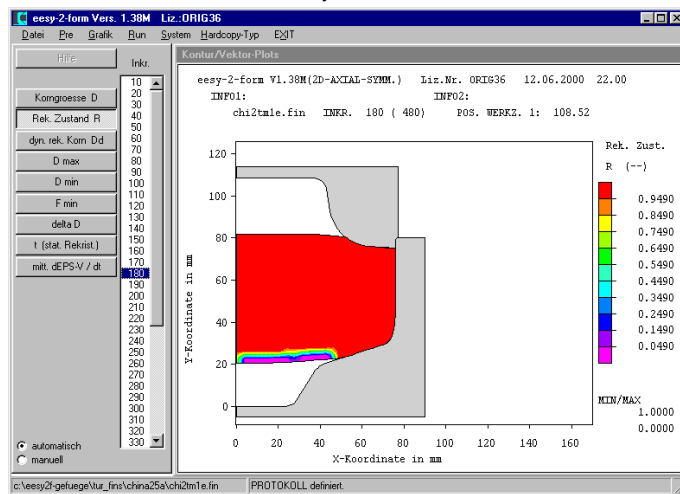


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

93

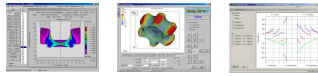


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

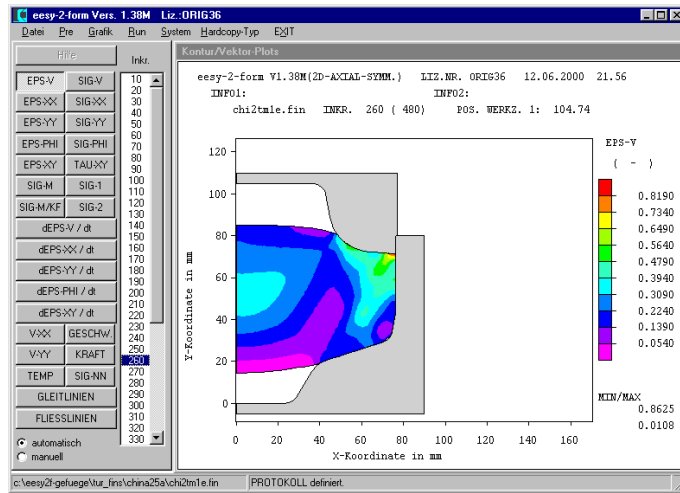


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

94

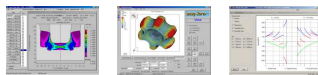


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

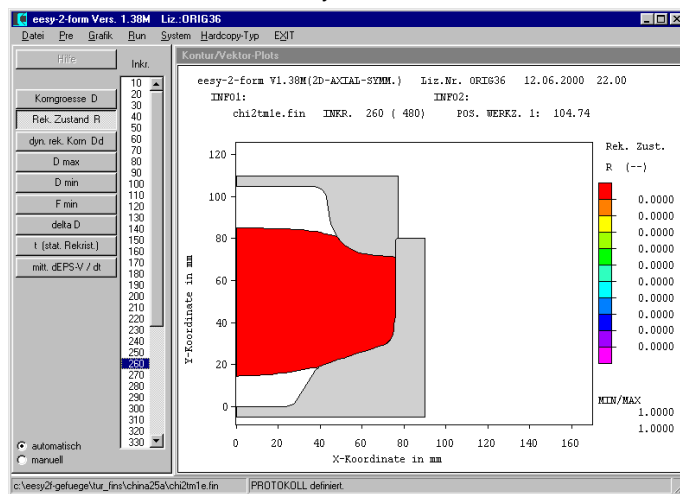


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

95



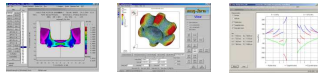
**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**



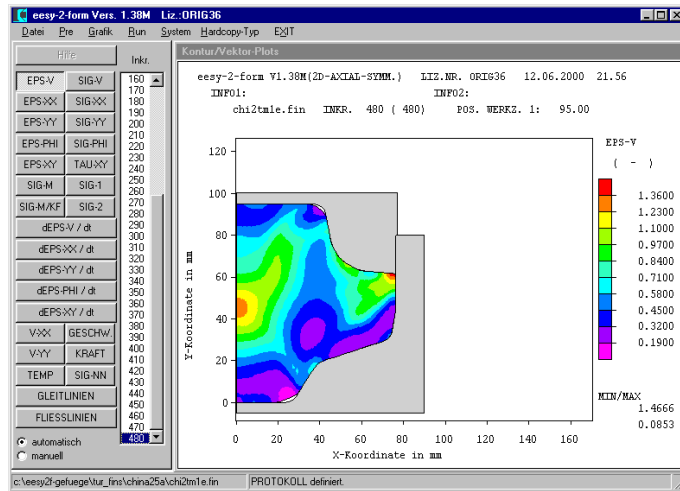
(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

96



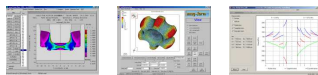


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

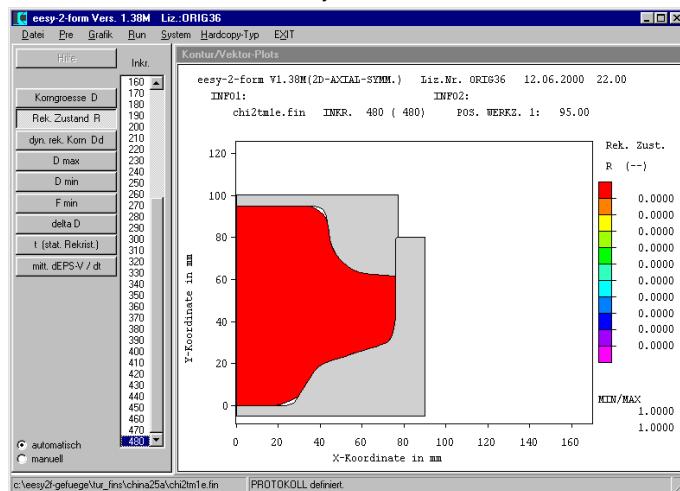


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

97

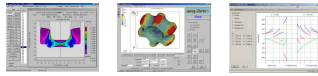


**SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS  
easy-2-form**

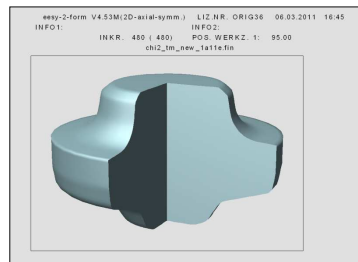


(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

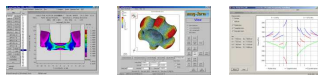
98



## SIMULATION DER GEFÜGEENTWICKLUNG BEIM SCHMIEDEN MIT HILFE DES SOFTWARE-SIMULATIONSPROGRAMMS *eesy-2-form*

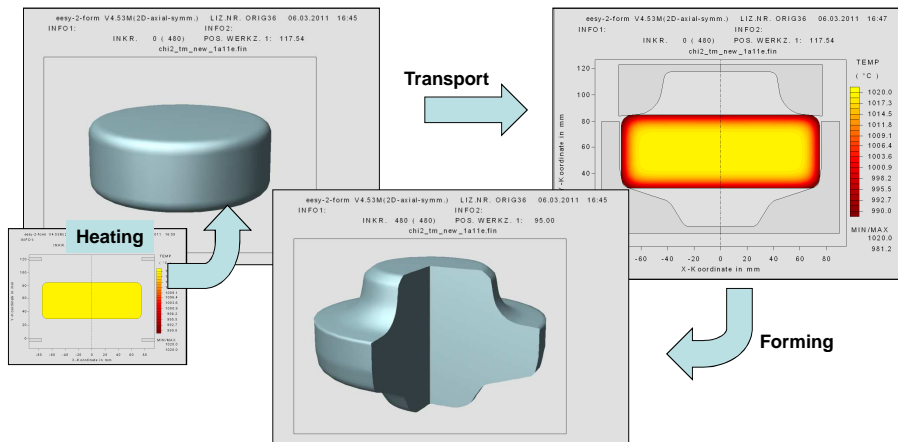


Ergebnisse von Arbeiten zusammen mit einem Kunden und  
CISRI Peking aus den 2000er Jahren !!!



## The typical Model: "Dynamic/Static with grain growth"

Example: Turbine disc made from Inconel 718, one step forming at 1020°C

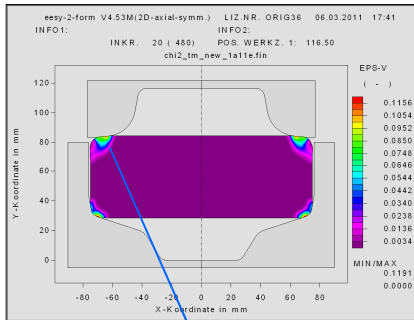




### The typical model: "Dynamic/Static incl. Grain Growth"

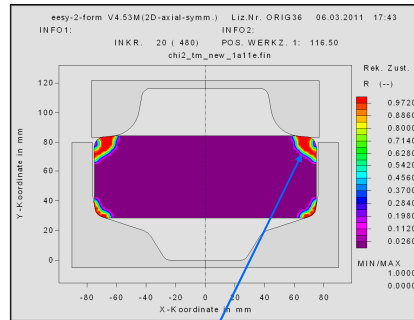
Example: Turbine disc made from Inconel 718, one step forming at 1020°C  
- results after 5% press movement

Equivalent Strain [-]



Certain amount of strain

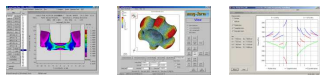
Recrystallization [-]



Dynamic recrystallization (local)

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

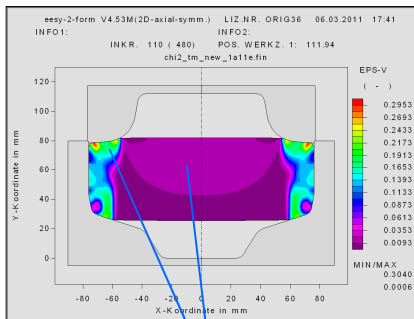
10  
1



### The typical model: "Dynamic/Static incl. Grain Growth"

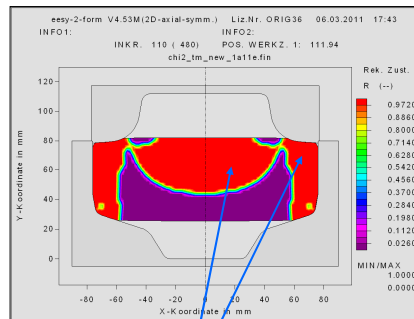
Example: Turbine disc made from Inconel 718, one step forming at 1020°C  
- results after 25% press movement

Equivalent Strain [-]



Certain amount of strain

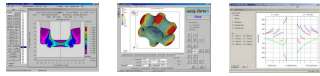
Recrystallization [-]



Dynamic recrystallization (local)

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

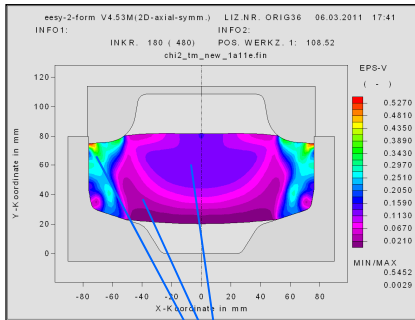
10  
2



*The typical model: "Dynamic/Static incl. Grain Growth"*

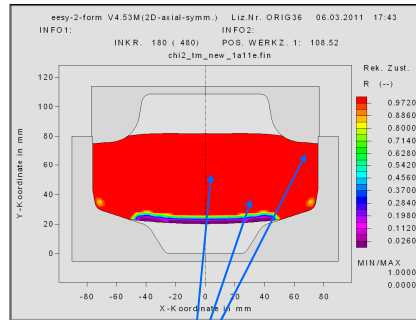
Example: Turbine disc made from Inconel 718, one step forming at 1020°C  
- results after 40% press movement

Equivalent Strain [-]



Certain amount of strain

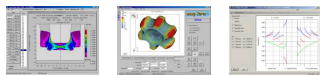
Recrystallization [-]



Dynamic recrystallization (local)

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

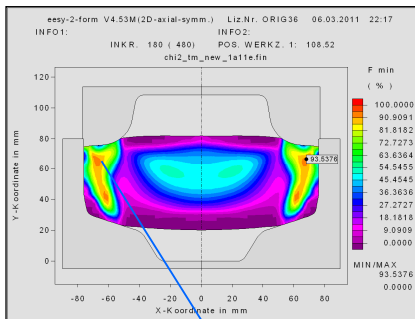
10  
3



*The typical model: "Dynamic/Static incl. Grain Growth"*

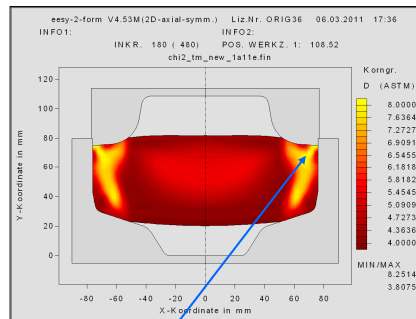
Example: Turbine disc made from Inconel 718, one step forming at 1020°C  
- results after 40% press movement

Recrystallized Fraction [%]



High recrystallized fraction

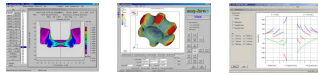
Grain Size [ASTM]



Fine (dyn. recrystallized) grain

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

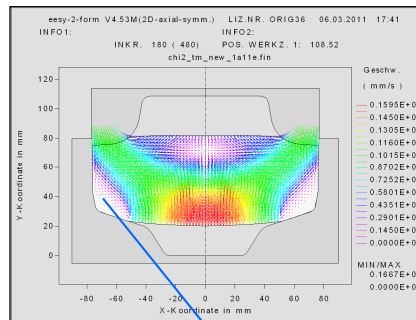
10  
4



## The typical model: "Dynamic/Static incl. Grain Growth"

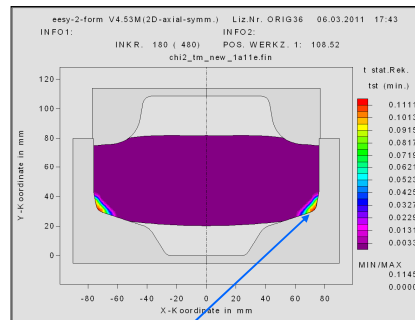
Example: Turbine disc made from Inconel 718, one step forming at 1020°C  
- results after 40% press movement

Material Flow [mm/sec]



„Dead“ zone, - actually no forming

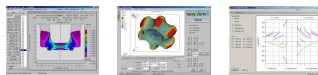
Duration of Static Recrystallization [min]



stat. recrystallization after forming

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

10  
5



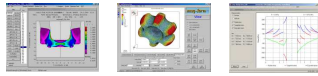
## The typical model: "Dynamic/Static incl. Grain Growth"

### Results:

- resulting strain represents the actual deformation and hardening situation (locale distribution)  
==> realistic calculation and evaluation of several variables like material stress, deformability, forming loads, tool loads
- state of recrystallization: available, split in dynamic and static fraction
- grain size and grain size distribution : available, as global value and in it's dynamic and static fractions as well
- Indication of grain growth : available, quantitative value
- further microstructure spec. results : available, i.e. recrystallization time, recrystallization stop, timing of growth, etc.
- all grain characteristics as local distribution in the part: available
- sustainable effects on the material model used : non, yield stress-strain curve remains unchanged

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

10  
6



## The complex model: "Dislocation Based Model"

### Model idea (1):

- strain  $\epsilon$  as not path independent value is no longer used as state value for the constitutive law to describe the mechanical behavior i.e.

$$\sigma = f(\delta\epsilon/\delta t, T, \epsilon) \quad \text{is no longer valid}$$

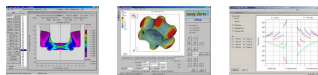
- as new state value the dislocation density  $\rho$  is introduced like

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

- for the dislocation density an evolution equation to describe it's development during the forming operation can be given as

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

with  $(\delta\rho/\delta t)^+$ : Processes that generate dislocations  
and with  $(\delta\rho/\delta t)^-$ : Processes that reduce dislocations



## The complex model: "Dislocation Based Model"

### Model idea (2):

- Processes that change the dislocation density

#### a) dislocation generation

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

#### b) dislocation reduction by spontaneous annihilation

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

#### c) dislocation reduction by thermally activated climbing

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

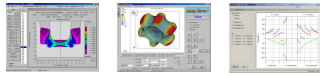
- the yield stress can be calculated as depending of the dislocation density like

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

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

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

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



## The complex model: "Dislocation Based Model" \*)

### Model idea (3):

- the additional changes of the microstructure can be described adequate equations for

a) dynamic recrystallization,

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

b) static recovery and static/metadynamic recrystallization,

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

c) precipitation during hold time and

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

d) grain growth after complete recrystallization

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

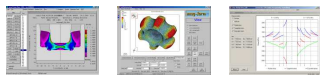


Dislocation Based Material and Grain model

\*) Modelling along F. Roters, MPIE Düsseldorf und L. Mosecker, U. Prahl, W. Bleck, IEHK RWTH Aachen

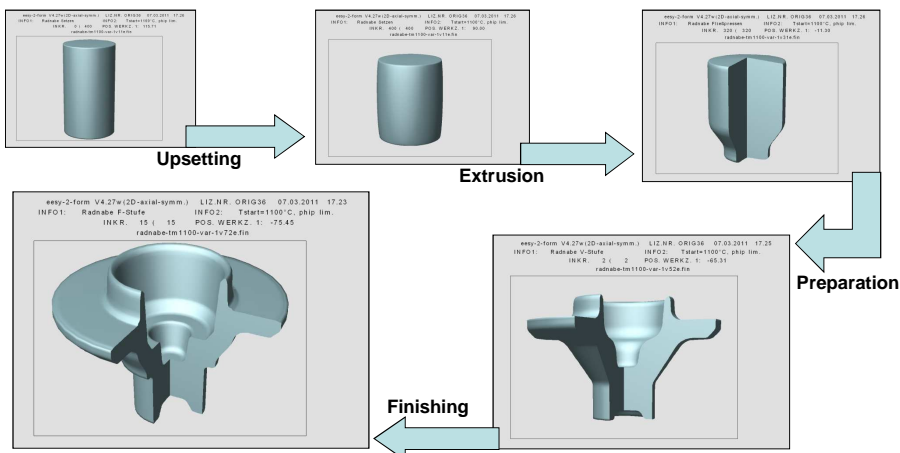
(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

10  
9



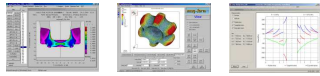
## The complex model: "Dislocation Based Model"

Example: Wheel Hub, 4-step forming at  $T_{\text{start}} = 1100^\circ\text{C}$ , initial grain size:  $54,8 \mu\text{m}$



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

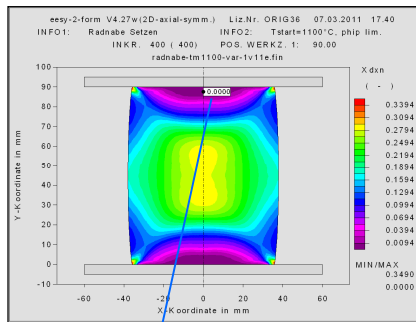
11  
0



## The complex model: "Dislocation Based Model"

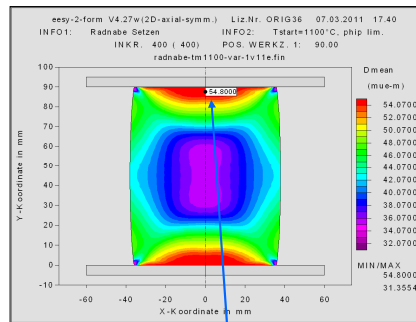
Example: Wheel Hub, 4-step forming at  $T_{start} = 1100^{\circ}\text{C}$ , initial grain size:  $54,8 \mu\text{m}$

Recrystallized Fraction [-]



Not yet recrystallized area

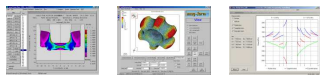
Grain Size [ $\mu\text{m}$ ]



Grain size = Initial grain size

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

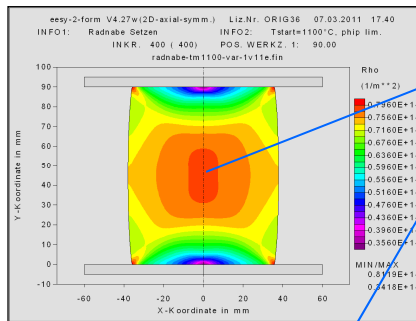
111



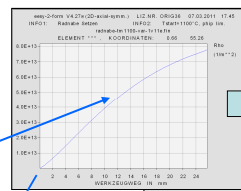
## The complex model: "Dislocation Based Model"

Example: Wheel Hub, 4-step forming at  $T_{start} = 1100^{\circ}\text{C}$ , initial grain size:  $54,8 \mu\text{m}$

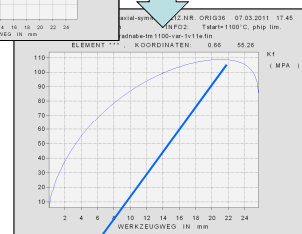
Dislocation Density [ $1/\text{m}^2$ ]



Dislocation evolution (over time)



Yield Stress [MPa]

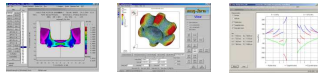


Yield stress (over time)

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

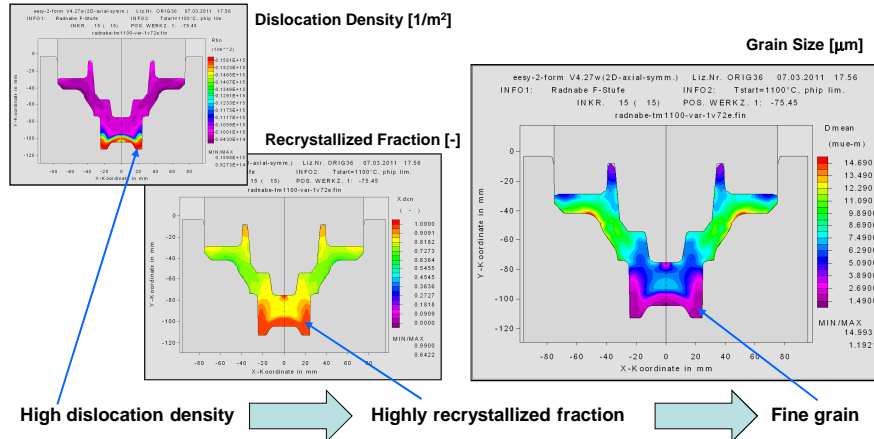
11  
2





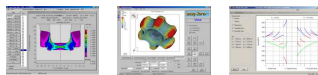
## The complex model: "Dislocation Based Model"

Example: Wheel Hub, 4-step forming at  $T_{start} = 1100^{\circ}\text{C}$ , initial grain size:  $54,8 \mu\text{m}$



(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

11  
3



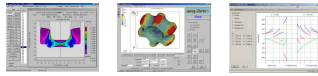
## The complex model: "Dislocation Based Model"

Results:

- a material model that describes the dependency of microstructure, yield stress and deformation
- yield stress: **calculated based on the dislocation density and further grain structure parameters as a value independent from a measured curve**
- state of recrystallization: **available, split in dynamic und static fraction**
- grain size and grain size distribution: **available as a general value and in its dynamic and static fractions as well**
- Indication of grain growth: **available, quantitative value**
- further microstructure spec. results: **available: i.e. amount and size of precipitations**
- sustainable effects on the material model used: **YES, the yield stress – strain curve will be determined at any time and location out of the dislocation density**

(c) 2015 Dr. Gerhard H. Arfmann, Dr. Michael Twickler  
Hausmesse bei Wafios Umformtechnik, 06.-09.05.2015, Wuppertal, Deutschland

11  
4



*Acknowledgement:*

The information for some of the forging parts presented were provide by **Leistritz Turbinenkomponenten Remscheid GmbH, Remscheid** and **Hirschvogel Umformtechnik GmbH, Denklingen**.

We would like to thank the

**German “Bundesministerium für Bildung und Forschung”**



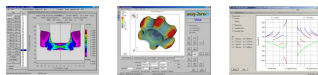
Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

for the funding of the research related to the

**“Dislocation Based Model”**

as part of the joint research project

**“Mikrostrukturbasierte Modellierung des Umformverhaltens  
von mikrolegierten Stählen bei mehrstufigen Schmiedeprozessen“.**



## Trust in “eesy” simulation



**Customers are happy to work on their daily tasks  
with “eesy” simulation**