

SPEZIELLE METHODEN ZUR EFFEKTIVEN FE-SIMULATION VON FREIFORMSCHMIEDEPROZESSEN MIT DER SOFTWARE QFORM VX

Dmitry Gerasimov^{1*}, Arthur Gartvig¹, Karl C. Grötzinger²

¹QFX Simulations Ltd.

²Institut für Umformtechnik (IFU), Universität Stuttgart

ZUSAMMENFASSUNG: Umformprozesse wie Recken, Radialschmieden, Über-Dorn-Schmieden und partielles Schmieden sind dadurch gekennzeichnet, dass ein auf Schmiedetemperatur erwärmter Block in mehreren Schritten lokal umgeformt wird. Für das Handling der beim Freiformschmieden oft großen Werkstücke kommen spezielle Vorrichtungen oder Manipulatoren zum Einsatz. Das Ausgangswerkstück ist gewöhnlicherweise ein Gussblock, der zu Beginn des Schmiedeprozesses eine hohe Inhomogenität aufweist und damit ungleichmäßige mechanische Eigenschaften besitzt. Deshalb ist es bei der Simulation wichtig, mehrere Aufgaben zu lösen: Zunächst ist die Ausgangsstruktur des Blocks mit der Temperaturverteilung und der relativen Dichte zu berücksichtigen. Anschließend ist im gesamten Volumen des Werkstücks ein optimales FE-Netz zur genauen Berechnung der thermischen und mechanischen Aufgaben zu erzeugen. Schließlich sind korrekte Randbedingungen für das Werkstückhandling während des Umformprozesses zu definieren. In diesem Artikel sind die in die Software QForm VX implementierten Methoden beschrieben: spezielle Randbedingungen für die Definition von Schmiedemanipulatoren; die Möglichkeit, das Netz des Blocks mit entsprechender Temperaturverteilung und relativer Dichte aus Software zur Gussimulation zu importieren; die Methode des doppelten Netzes sowie spezielle Interface-Möglichkeiten von QForm VX, die die Simulation von Freiformschmiedeprozessen wesentlich vereinfachen.

ABSTRACT: Forming processes such as cogging, radial forging, mandrel forging and partial forging are thereby characterized that a pre-heated forging block is locally formed in several steps. Special holding devices or manipulators are used to handle the big workpieces in open-die forging processes. The initial workpiece is usually a cast ingot which has a huge inhomogeneity in its structure as well as irregular mechanical properties at the beginning of the forging process. Because of this fact, it is necessary to solve several problems during the forging simulation. First, the initial structure of the ingot with the corresponding temperature distribution as well as the relative density have to be taken into account. The generation of an optimal finite element mesh all over the workpiece volume for an accurate calculation of the thermal and mechanical problems is the following step. Finally, correct boundary conditions for the workpiece handling during the forming process have to be defined. This paper describes the following methods which are implemented in QForm VX: special boundary conditions for the definition of forging manipulator; the possibility to import the mesh of the ingot containing the specific temperature distribution and the relative density from software for casting simulation; the dual mesh method as well as special interface options of QForm VX to significantly simplify the simulation of an open-die forging process.

SCHLÜSSELWÖRTER: Freiformschmieden, Schmiedemanipulator, FEM, Reckschmieden, QForm

1 EINLEITUNG

Freiformschmiedeprozesse kommen vorwiegend für Großteile im Maschinenbau, im Schiffsbau und im Energiesektor zum Einsatz. Die in Einzel- oder Kleinserien erzeugten Schmiedeteile werden in der Regel einer mechanischen Bearbeitung unterzogen, um die gewünschten Funktionsflächen und Anschlussmaße zu erzeugen. Populäre Anwendungsbeispiele für Freiformschmiedeteile sind Rotoren, Turbinenschaufeln, Hochdruckkessel und Antriebsteile für Großpressen, also

genau dort, wo große Bauteile hohen Belastungen ausgesetzt sind.

Der Verfahrensablauf beim Freiformschmieden gliedert sich gewöhnlicherweise in die folgenden Prozessschritte: Erwärmung des Gussblocks, Durchführen der Schmiedeooperationen und Wärmebehandlung des Schmiedeteils. In Abhängigkeit von der Komplexität und Größe des Werkstücks kann eine mehrmalige Erwärmung während des Schmiedeprozesses erfolgen. Zu den grundsätzlichen Umformoperationen beim Freiformschmieden gehören Stauchen, Recken, Lochen und Trennen.

* Korrespondierender Autor: Dmitry Gerasimov, 2-oj Yuzhnoportovyy proezd, 16-2, Moskau, Tel. +7 (499) 643-04-53, E-Mail: gerasimov@qform3d.com

Ziel des Freiformschmiedens ist eine Verbesserung der Materialeigenschaften und das Beheben von Defekten zur Homogenisierung der Werkstückstruktur. Die Simulation hilft dabei schon während der Technologieentwicklung, die mechanischen Eigenschaften des zukünftigen Erzeugnisses abzuschätzen und die Abfolge der Formänderungsoperationen zu optimieren. Für die effektive Simulation eines Freiformschmiedeprozesses müssen die folgenden Aufgaben gelöst werden: Berücksichtigung der Ausgangsstruktur des Gussblocks und Untersuchung ihrer Änderung während des Schmiedeprozesses; korrekte Definition der Randbedingungen für den Schmiedemanipulator; Verwendung eines optimalen FE-Netzes sowohl für die Berechnung der thermischen und mechanischen Aufgaben als auch für das Erzielen einer geringen Rechenzeit für die große Anzahl an Umformoperationen; die handliche Beschreibung aller Längsverschiebungen und Drehungen des Blocks nach jedem Schmiedehub, da bei einigen Prozessen die Anzahl der Umformoperationen mehrere Hundert betragen kann. Alle diese Aufgaben können mit der Simulationssoftware QForm erfolgreich gelöst werden [1].

2 GUSSBLOCK

Ein Gussblock ist in der Regel das Ausgangswerkstück für große Schmiedeteile. Der Block aus beruhigtem Stahl besitzt zunächst inhomogene mechanische Eigenschaften und eine ungleichmäßige chemische Zusammensetzung. Grund für diese Inhomogenität sind Kristallisationsprozesse und die Größe des Blocks: je größer der Gussblock, desto stärker ist die Inhomogenität ausgeprägt. Charakteristisch für einen Gussblock aus beruhigtem Stahl sind der Kopf und der Fuß des Blocks, die während des Schmiedeprozesses entfernt werden [2]. Die Güte der Schmiedestücke hängt von der Struktur des Ausgangsblocks ab. In Abbildung 1 ist die charakteristische Strukturinhomogenität eines Gussblocks dargestellt.

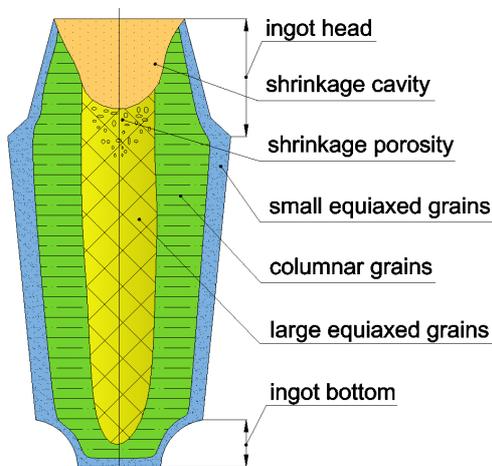


Abbildung 1: Makrostruktur eines Gussblocks

Die chemische Inhomogenität des Gussblocks hängt vom Gehalt der Legierungselemente, von den Guss- und Abkühlungsparametern und von vielen weiteren Faktoren ab. Die höchste Konzentration an Verunreinigungen ist im Blockkopf vorhanden. Zu den Defekten gehören Lunker und Poren, die infolge der Volumenreduktion bei der Rekristallisation entstehen. Die Simulation des Gussprozesses spielt in diesem Fall eine zentrale Rolle für die Berücksichtigung der oben genannten Faktoren bei der Schmiedesimulation. Es gibt verschiedene Software-Produkte zur Simulation der Gussprozesse, die nicht nur die Analyse der Gusstechnologie, sondern auch einen Export der Ergebnisse in Software für die Umformsimulation ermöglichen [3, 4].

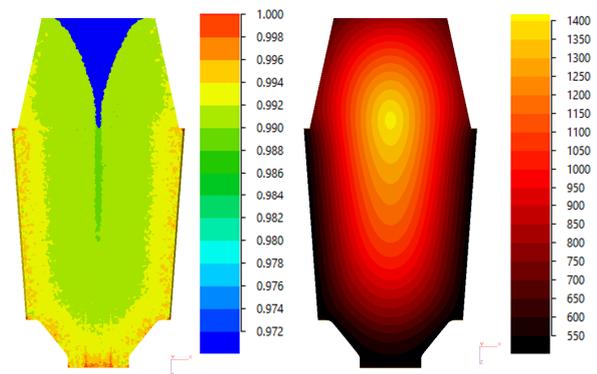


Abbildung 2: Import der Ergebnisse in QForm aus einer Software zur Simulation von Gussprozessen: Verteilung der relativen Dichte (links) und der Temperatur (rechts)

In Abbildung 2 ist ein in QForm importierter Gussblock mit der Temperaturverteilung und der relativen Dichte dargestellt. Die Ergebnisse stammen aus einer Software zur Simulation von Gussprozessen. Gegebenenfalls können auch andere für die Analyse der Schmiedetechnologie notwendige Simulationsergebnisse importiert werden.

Für die Berechnung der relativen Dichteänderung während der Umformung wird die Greens Theorie für nichtkompakte Werkstoffe verwendet [5]. Bei der Anwendung dieser Methode werden in einem resolvierenden Gleichungssystem die modifizierten physikalischen Gleichungen und geänderte Plastizitätsbedingungen verwendet.

Bei der Erwärmung großer Blöcke auf Schmiedetemperatur wird eine große Menge Brenngas aufgewendet. Außerdem wird viel Werkstoff infolge der lang andauernden Erwärmung im Ofen, die in einigen Fällen mehrere Zehn Stunden andauert, abgebrannt. Deshalb ist es sinnvoll, die Erwärmungsdauer des Gussblocks zu minimieren. Diese Aufgabe kann erfolgreich durch die Simulation der Erwärmung in QForm gelöst werden. Die Berechnung basiert auf der Temperaturverteilung im Ausgangszustand, die aus der Software zur Simulation der Gussprozesse importiert wird.

3 SCHMIEDEMANIPULATOR

Im Freiformschmiedeprozess spielt der Schmiedemanipulator eine wichtige Rolle. Der Manipulator hält den Schmiedeblock und führt die translatorischen und rotatorischen Arbeitsbewegungen aus. Der Aufbau des komplexen hydromechanischen Steuersystems eines Manipulators [6, 7] kann während der Simulation des Schmiedeprozesses vernachlässigt werden.

Die Hauptaufgabe ist in diesem Fall die Definition der Randbedingungen für das im Manipulator gelagerte Ende des Werkstücks. Die Randbedingungen werden so gewählt, dass das Werkstück während des Schmiedeprozesses stets in einer horizontalen Lage gehalten wird und dass die Längsbewegungen des Schmiedemanipulators infolge der Einwirkung der Umformkräfte berücksichtigt werden können.

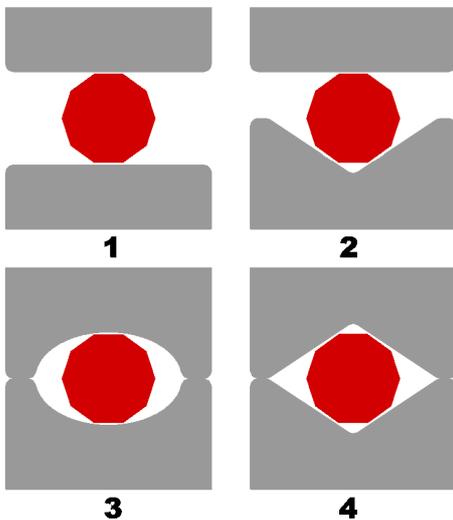


Abbildung 3: Sattelformen: 1 - Flachsattel, 2 - Sattelkombination aus Flach- und Spitzsattel, 3 - Rundsattel, 4 - Spitzsattel

Die Richtung der durch die Formänderung des Werkstücks erzeugten Kräfte auf den Manipulator hängt von der verwendeten Sattelform ab. In Abbildung 3 sind einige Sattelformen dargestellt, die beim Reckschmieden verwendet werden.

Im Falle einer symmetrischen Formänderung, beispielsweise bei Verwendung von Flachsättern, kann vereinfacht als Randbedingung für die FE-Knoten am eingespannten Ende des Werkstücks die halbe Geschwindigkeit des oberen Sattels bzw. des Pressenstößels definiert werden (siehe Abbildung 4).

Eine asymmetrische Formänderung, wie sie beispielsweise bei der Kombination aus Flach- und Spitzsattel auftritt, muss hinsichtlich der Geschwindigkeiten anders betrachtet werden. In QForm wird vorgeschlagen, diese Aufgabe mittels des universellen Schmiedemanipulator-Modells zu lösen, das beim Reckschmieden mit beliebigen Sattelformen verwendet werden kann. In Abbildung 5 ist das Schema

der Randbedingungen für eine asymmetrische Formänderung des Werkstücks dargestellt.

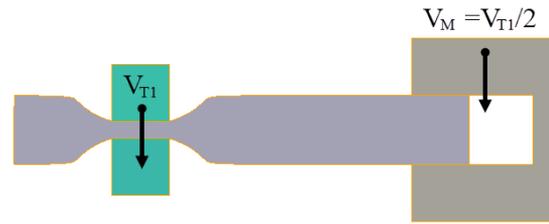


Abbildung 4: Vereinfachtes Schema des Schmiedemanipulators bei einer symmetrischen Formänderung

Die Randbedingungen für die FE-Knoten des eingespannten Endes des Werkstücks sichern die horizontale Lage des Werkstücks im Verlauf des Schmiedeprozesses. Zusätzlich kann eine Verschiebung des Werkstücks entlang seiner Längsachse erlaubt oder unterbunden werden. Auch ist es möglich, optional das Werkstück nach jedem Schmiedehub automatisch um die während des Umformprozesses erfolgte Längsverschiebung zurückzusetzen. Hierdurch kann der Rückgang des Manipulators nach der Verschiebung infolge der Längskräfte berücksichtigt werden.

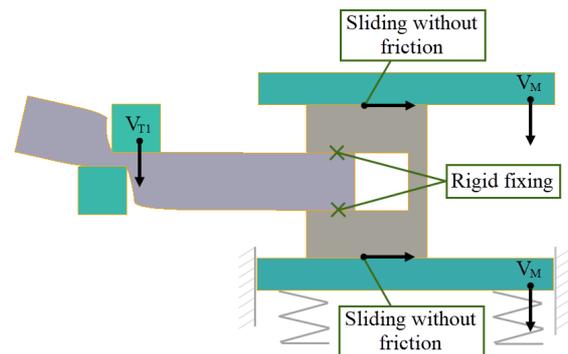


Abbildung 5: Das universelle Schema des Manipulators bei einer asymmetrischen Formänderung

Der Vorteil einer solchen Methode ist die unkomplizierte Angabe der Randbedingungen. Das komplexe Modell eines realen Schmiedemanipulators braucht dabei nicht beschrieben zu werden, da die Randbedingungen mithilfe des universellen Wirkprinzips des Manipulators definiert werden.

Des Weiteren ermöglicht QForm den Import der Verschiebungen und Drehungen des Werkstücks sowie des Endabstands der Werkzeuge für alle Schmiedehübe aus einer MS Excel Tabelle. Dadurch können die Bewegungsabläufe des Manipulators während des gesamten Schmiedeprozesses eindeutig beschrieben und die Definition der Eingangsdaten bedeutend vereinfacht werden.

4 DUAL MESH METHODE

Die für die Umformsimulation verwendete Methode der finiten Elemente (FE-Methode) erstellt für die

Gesamtheit der im Volumen des Werkstücks erzeugten finiten Elemente ein Gleichungssystem. Durch Lösen des Gleichungssystems werden die Werte der Unbekannten in den Knoten bestimmt. Die Berechnungswerte in beliebigen Punkten des umgeformten Körpers werden durch Approximation der Werte in den FE-Knoten bestimmt. Je größer die Abmessungen des Schmiedestücks beim Freiformschmieden, desto geringer ist die relative Dicke der oberflächennahen Schicht, die einen starken Temperaturgradienten aufweist.

Es wurde betrachtet, inwiefern die Größe der FE-Elemente die Genauigkeit der Temperaturberechnung auf der freien Oberfläche des zylindrischen Werkstücks bei Abkühlung an der Luft beeinflusst. Die Lösung der thermischen Aufgabe erfolgt mit der Methode der finiten Volumina [8] auf Basis des verwendeten FE-Netzes. Die Temperaturverteilung ist eine stückweise lineare Funktion durch das Element. Die Temperaturwerte in den Knoten werden dabei auf Basis des Energieausgleichs berechnet. Abbildung 6 zeigt, dass eine Verringerung der Elementgröße um den Faktor 3 die Werte in den Knoten einer stückweise linearen Funktion der analytischen Lösung annähert. Zu erklären ist dies mit dem Energietransfer vom Werkstück an die Umgebung, der jeweils nur aus dem ganzen Element erfolgen kann.

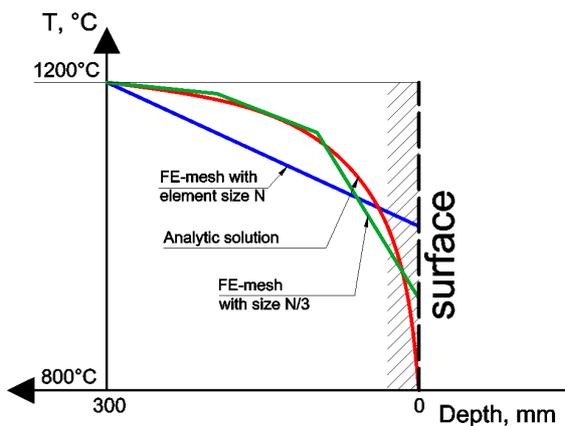


Abbildung 6: Einfluss der Elementgröße des FE-Netzes auf die Temperaturverteilung der zylindrischen Werkstückoberfläche

Die Neuvernetzung während der Berechnung einer plastischen Aufgabe erfolgt bei der Degeneration von umgeformten Elementen, sowie infolge der Verschiebungen der Umformgeschwindigkeitsgradienten und der Kontaktzonen und führt zu einem zusätzlichen Fehler. Auf das neu generierte Netz wird die approximative Verteilung des Feldes vor der Neuvernetzung gelegt und den neuen Knoten werden die entsprechenden Werte zugeordnet. Die neue Temperaturverteilung wird im gesamten Volumen als eine stückweise lineare Funktion dieser zugeordneten Werte erzeugt. Dies ist schematisch für eine eindimensionale Aufgabe in Abbildung 7 dargestellt.

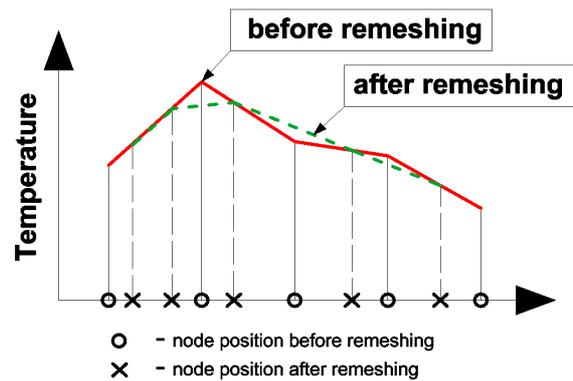


Abbildung 7: Mechanismus des Glättens der Extremwerte bei der Neuvernetzung

Die durchgezogene Linie stellt die Berechnungsfunktion vor der Neuvernetzung dar und die Lage der Knoten des Ausgangsnetzes ist mit Kreisen markiert. Nach der Neuvernetzung sind die Knoten verschoben, ihre neue Lage ist mit Kreuzen gekennzeichnet. Die jeweiligen Werte in den neuen Knoten werden aus der alten Funktion übernommen. Die Strichlinie beschreibt die Verteilung des Berechnungsfeldes nach der Neuvernetzung. Auf diese Weise werden die Extremwerte der stückweise linearen Temperaturverteilung oder des Umformgrades nach der Neuvernetzung geglättet. Insbesondere bei der Simulation eines Freiformschmiedeprozesses, der durch eine Vielzahl an Umformoperationen charakterisiert ist, ist dieser Effekt bemerkbar. Deshalb ist ein möglichst dichtes Netz bei der Simulation des Freiformschmiedens sowohl auf der Oberfläche als auch im ganzen Volumen des Werkstücks notwendig.

Die Dual Mesh Methode wurde bereits erfolgreich bei der Simulation von Ringwalzprozessen angewendet [9]. Die Idee dieser Methode besteht darin, dass für ein und denselben verformten Körper gleichzeitig zwei FE-Netze verwendet werden. Jedes Netz erfüllt seine eigene Funktion. Bei der Simulation von Umformprozessen wird ein Großteil der Rechenzeit für die Berechnung der Spannungen und Verschiebungen in den FE-Knoten des verformten Werkstücks aufgewendet. Deshalb ist es sinnvoll, die Anzahl der Knoten außerhalb der Umformzone zu minimieren. Außerdem ist es notwendig, die Werkstückgeometrie und die Umformgrad-Verteilung zu speichern, sowie die thermische Aufgabe mit optimaler Genauigkeit im ganzen Werkstückvolumen, auch außerhalb der Formänderungszone, zu berechnen. Bei Verwendung der Dual Mesh Methode in der Software QForm [10] dient das erste Netz, das Berechnungsnetz, der Berechnung der Spannungs- und Umformgradfelder. Dieses Netz ist nur in der Umformzone fein und im restlichen Volumen grob. Die Geometrie des umgeformten Körpers und die aus dem Berechnungsnetz übernommene Umformgrad-Verteilung wird im zweiten Netz, dem geometrischen Netz, gespeichert. Des Weiteren erfolgt in diesem Netz die Berechnung der thermischen Aufgabe. Die Dichte des geometrischen Netzes muss im ganzen Volumen des

Werkstücks genügend fein sein und gleichzeitig der Dichte des Berechnungsnetzes in der Umformzone entsprechen.

In Abbildung 8 ist das in die Software QForm implementierte Prinzip der Dual Mesh Methode dargestellt. Oben ist das Berechnungsnetz mit kleinen Elementen in der Formänderungszone und mit großen Elementen im restlichen Volumen dargestellt. Unten ist das geometrische Netz gezeigt, das optimal fein im ganzen Volumen ist.

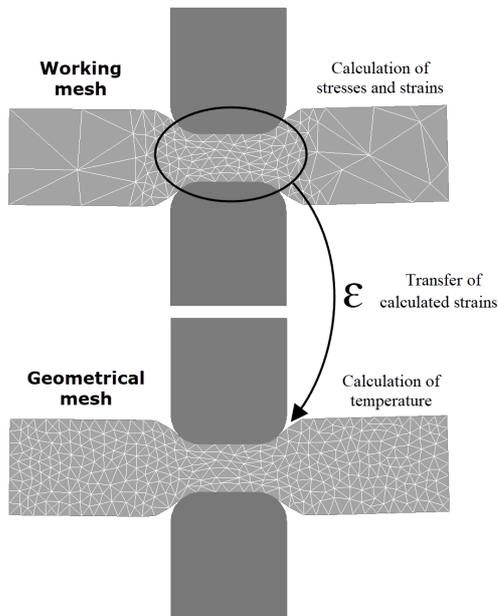


Abbildung 8: Prinzip der Dual Mesh Methode: Berechnungsnetz (oben) und geometrisches Netz (unten)

Die Dual Mesh Methode kann nicht nur für die Simulation von Freiformschmiedeprozessen, sondern auch für die Simulation beliebiger Prozesse mit lokalisierter Formänderungszone wie beispielsweise Längs-, Schräg- und Ringwalzen effektiv verwendet werden. Außerdem ist es möglich, diese Methode für eine genauere Berechnung der thermischen Aufgabe in Gesenkschmiedeprozessen zu verwenden.

5 SIMULATIONSERGEBNISSE

In den Abbildungen 9-14 sind einige Simulationsergebnisse aus der Software QForm dargestellt, die die beschriebene ganzheitliche Betrachtung bei der Simulation von Freiformschmiedeprozessen demonstrieren.

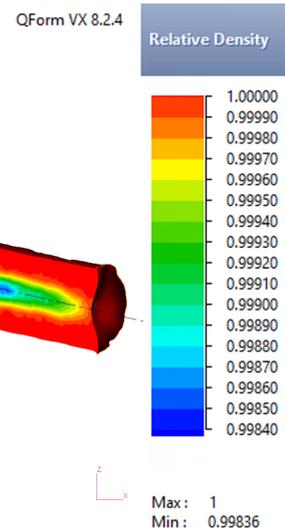


Abbildung 9: Verteilung der relativen Dichte im Block während des Reckschmiedens

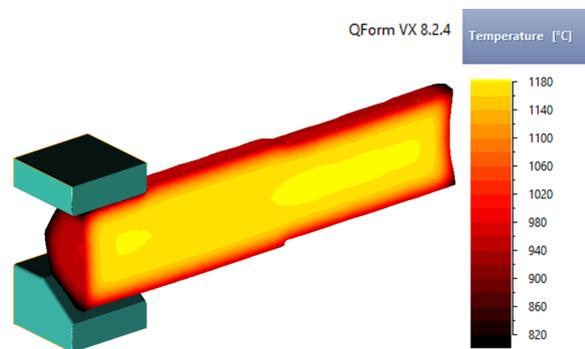


Abbildung 10: Freiformschmieden in kombinierten Sätteln und Temperaturverteilung im Längsschnitt des Blocks

Blow	Cooling in air [s]	Cooling on tool [s]	Energy share [%]	Displ. [mm]	Rot. angle [°]	Final dist. (1) [mm]
-	3	0	100			
1	3	0	100	-1600	180	280
2	3	0	100	0	60	280
3	3	0	100	0	60	280
4	3	0	100	0	60	280
5	3	0	100	0	60	280
6	3	0	100	0	60	280
7	3	0	100	280	60	280
8	3	0	100	0	60	280
9	3	0	100	0	60	280
10	3	0	100	0	60	280
11	3	0	100	0	60	280
12	3	0	100	0	60	280
13	3	0	100	280	60	280
14	3	0	100	0	60	280
15	3	0	100	0	60	280
16	3	0	100	0	60	280
17	3	0	100	0	60	280
18	3	0	100	0	60	280
19	3	0	100	280	60	280

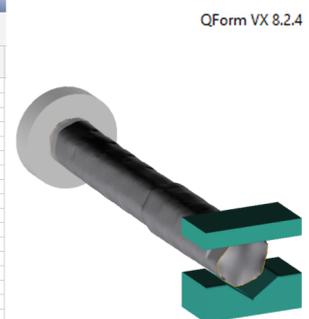


Abbildung 11: Ausschnitt aus der Tabelle der Schmiedehübe mit der folgenden Information über jeden Hub: Abkühlzeit des Werkstücks an der Luft, Werte der Längsverschiebungen und Drehungen des Werkstücks vor jedem Hub, Abstand zwischen den Werkzeugen am Ende jedes Hubs

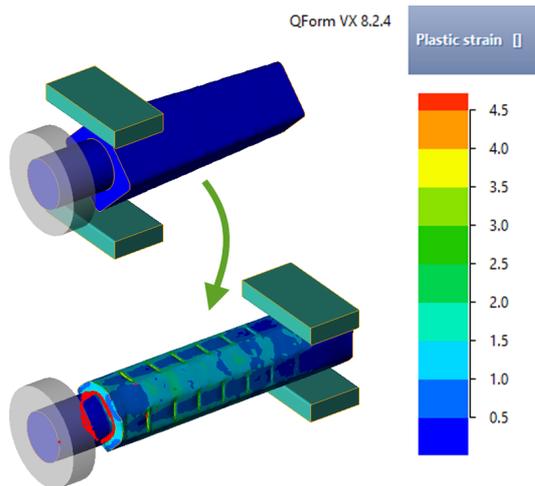


Abbildung 12: Glätten der Blockkanten im 131. Schmiedehub; Form des Blocks am Anfang und am Ende des Prozesses mit der Umformgradverteilung

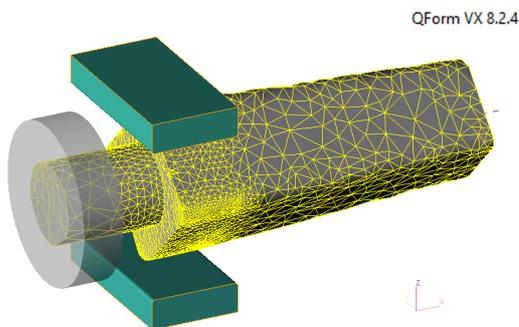


Abbildung 13: Dual Mesh Methode: Berechnungsnetz mit hoher Netzdicke in der Formänderungszone und geringer Netzdicke im restlichen Volumen. In diesem Netz werden die Spannungs- und Umformgradfelder berechnet.

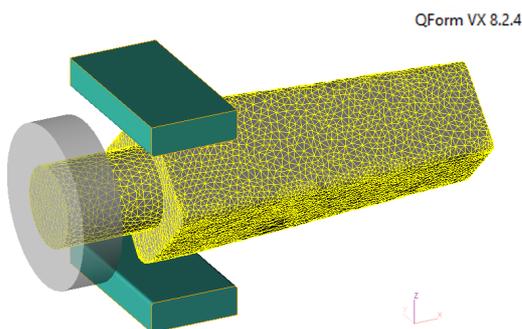


Abbildung 14: Dual Mesh Methode: das geometrische Netz mit hoher Netzdicke im ganzen Volumen. In diesem Netz wird die Berechnung der thermischen Aufgabe durchgeführt sowie die Werkstückgeometrie und die Umformgradverteilung gespeichert.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die in der Software QForm verwendete ganzheitliche Betrachtung der Simulation von Freiformschmiedeprozessen ermöglicht neben der

Berücksichtigung wichtiger Faktoren zur Prozessentwicklung und -optimierung eine wesentliche Erhöhung der Effektivität und Geschwindigkeit der mathematischen Berechnung.

LITERATURNACHWEIS

- [1] M. Efimov, A. Selutin, A. Kolomojets, A. Ryabcev, V. Pashinsky, S. Stebunov: Experience of Simulation Implementation to Development of Technological Processes for Production of Large Forged Products at Energomashspetsstal (Kramatorsk), 19th International Forgemasters Meeting, 2014.
- [2] L.N. Sokolov, N.K. Golubyatnikov, V.N. Efimov, I.P. Shelaev: Theorie und Technologie des Freiformschmiedens, Lehrmittel, Kiev, Vysshaya shkola, S. 40-52, 1989.
- [3] A.D. Abdullin, A.A. Ershov: End-to-end simulation of casting and metal forming processes with ProCAST & QForm software, Metallurgist, Vol. 58, Nos. 5-6, September, 2014.
- [4] I. Hahn, M. Schneider, Hendrik Schafstall, and C. Barth: Sequential Casting/Forging Simulations Aid Forged Steel Quality, FORGE - June, 2014.
- [5] R.J. Green: A Plasticity Theory for Porous Solids, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 14, S. 215-224, 1972.
- [6] D. S. Liu, G. Li, X. Guo, Y. G. Shang, D. H. Liu: Performance Optimization of forging manipulator during the whole forging stroke, in Proceedings of the International Conference Intelligent Robotics and Applications (ICIRA '10), S. 305-316, 2010.
- [7] R. Aversa, R.V. Petrescu, B. Akash, R. Bucinell, J. Corchado, F. Berto, M.M. Mirsayar, G. Chen, S. Li, A. Apicella, F.I.T. Petrescu: Kinematics and Forces to a New Model Forging Manipulator, American Journal of Applied Sciences 14 (1), S. 60-80, 2017.
- [8] A.V. Vlasov: Simulation of thermal processes during metal forming with using of QForm software by finite volume method, Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure, Vol. 11, S. 21-24, 2016.
- [9] N. Kim, S. Machida, S. Kobayashi: Ring rolling process simulation by the three dimensional finite element method, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 30 (4), S. 569-577, 1990.
- [10] D. Gerasimov, N. Biba, S. Stebunov, M. Kadach: Implementation of a Dual Mesh Method for Longitudinal Rolling in QForm V8, Production and Further Processing of Flat Products, Material Science Forum. V. 854, S. 158-162, 2016.