

Integrierte Umform- und Wärmebehandlungssimulation für Massivumformteile

In der industriellen Praxis werden viele massivumgeformte Komponenten nach der Formgebung noch gehärtet. Zur Auslegung von Umformprozessen und zur Verbesserung des Prozessverständnisses hat sich die Umformsimulation als hilfreiches Werkzeug längst etabliert. Deshalb wurde eine integrierte Umform- und Wärmebehandlungssimulation aufgebaut und deren Abhängigkeiten identifiziert und beschrieben. Hierzu zählen vor allem mikrostrukturelle Größen sowie Mikro- und Makroseigerungen.



AUTOREN



**Dr.-Ing.
Martin Hunkel**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Wärmebehandlung der Hauptabteilung Werkstofftechnik am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT in Bremen



Jwalant Kagathara, M. Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Wärmebehandlung der Hauptabteilung Werkstofftechnik am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT in Bremen



**Dipl.-Ing.
Konstantin Schacht**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der AG Integrative Werkstoffsimulation am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen



Amir H. Motaman, M. Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der AG Integrative Werkstoffsimulation am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen



**Prof. Dr.-Ing.
Ulrich Prahl**

leitet die Professur für Umformtechnik am Institut für Metallformung (imf) der TU Bergakademie Freiberg

Im industriellen Prozess der Fertigung von Bauteilen aus Stahl werden sowohl Kalt- als auch Warmmassivumformteile oft gehärtet (zum Beispiel vergütet oder einsatzgehärtet), um die mechanischen Eigenschaften einzustellen. Zur Prozessauslegung der meist mehrstufigen Massivumformung hat sich die Finite-Elemente-(FE-)basierte Umformsimulation in der industriellen Praxis durchgesetzt. Nun besteht der Bedarf, der Umformsimulation eine Wärmebehandlungssimulation anzuschließen, die eine verbesserte Vorhersagegenauigkeit hinsichtlich Gefüge und Verzug bietet.

Derzeit werden sowohl die Umform- als auch die Wärmebehandlungssimulation von Massivbauteilen in der Regel als Insellösung betrieben, das heißt die aus der Simulation des Umformprozesses resultierenden lokalen Größen werden derzeit nicht weiter in einer anschließenden Wärmebehandlungssimulation berücksichtigt. Bild 1 zeigt die identifizierten Abhängigkeiten zwischen Umformung und Wärmebehandlung. Zielgröße einer Wärmebehandlungssimulation ist hierbei, neben dem Gefüge und der Härte, insbesondere der Verzug der Bauteile [1]. Die Vorhersagegüte aller drei Größen ist oft nicht ausreichend, was unter anderem auf die fehlende Kopplung zwischen Umformung und Wärmebehandlung zurückgeführt wird. Insbesondere die Vorhersage des Verzugs von Bauteilen ist eine schwer zu erreichende Aufgabenstellung [2].

Umformvorgänge sind dadurch gekennzeichnet, dass erhebliche Energie in Form einer erhöhten Leerstellen- und Versetzungsdichte in das Bauteil eingebracht wird und dort entweder gespeichert oder über Gefügeänderungen abgebaut wird.

Üblicherweise wird Stranggussmaterial für die Umformung verwendet. Das Material ist dann gekennzeichnet durch unvermeidbare chemische Inhomogenitäten (Seigerungen). Sowohl bei der Warm- als auch bei der Kaltumformung werden Seigerungen stark verformt.

Das Wärmebehandlungsergebnis hängt größtenteils stark vom Zustand nach dem Umformen ab. Relevante Wärmebehandlungsergebnisse sind dabei unter anderen die Härteverteilung und der Verzug der Bauteile. Eine erhöhte Versetzungsdichte aus der Kaltumformung wird beim Erwärmen auf Austenitisierungstemperatur abgebaut. Die unterschiedlichen Korngrößen beeinflussen die Umwandlungskinetik beim Erwärmen und beim Abschrecken. Mikro- und Makroseigerungen haben einen Einfluss auf die Umwandlungskinetik und -dehnung [3].

Das Projekt „Integrierte Umform- und Wärmebehandlungssimulation für Massivumformteile – InUWäM“ hatte zum Ziel, Ergebnisse aus der Umformsimulation auf die Wärmebehandlung zu übertragen, um so die Vorhersagegüte der Wärmebehandlungssimulation zu steigern und gleichzeitig Unternehmen aus dem Bereich Umformung die Möglichkeit zu geben, ihre Umformgänge hinsichtlich des Wärmebehandlungsergebnisses zu optimieren. Schwerpunkt waren die oben beschriebenen Wechselwirkungen zwischen Umformergebnis und Wärmebehandlung auf Gefüge und Plastizität. Diese Wechselwirkungen wurden experimentell untersucht und modellmäßig beschrieben. Die Umsetzung wurde anhand einfacher warm- oder kaltumgeformter Bauteile, die anschließend wärmebehandelt wurden, überprüft.

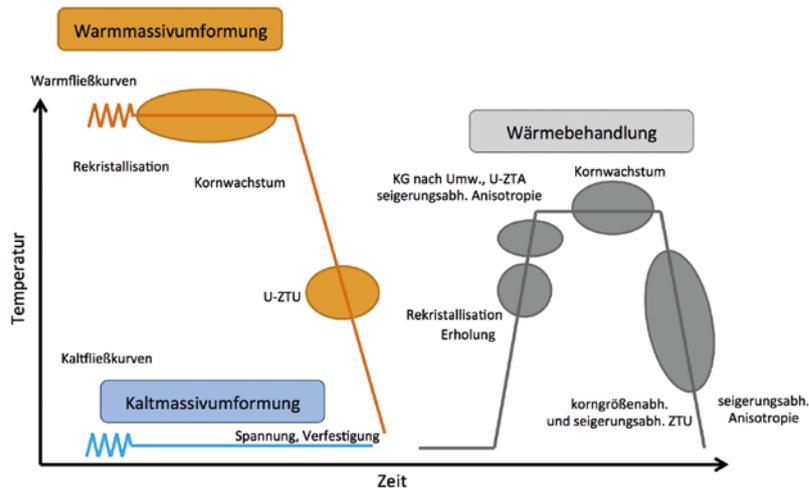


Bild 1: Prozessübergreifende Effekte und Methoden bei Umformung und Wärmebehandlung

EXPERIMENTE

Untersuchungsmaterial war ein stranggegossener Einsatzstahl 20MnCr5. An Modellproben wurden Grundlagenuntersuchungen zur Beschreibung der identifizierten Effekte und zur Datenbestimmung durchgeführt. Die integrierte Umform- und Wärmebehandlungssimulation wurde anhand industrieller Prozesse geprüft. In der Kaltumformroute wurden gepresste Kegelradrohlinge aus 20MnCr5 nach der Umformung, sowie nach einer Einsatzhärtung, nach einer Blindhärtung oder nach einem Spannungsarmglühen charakterisiert. In der Warmumformroute wurde eine Nabe einer Einsatzhärtung unterzogen und charakterisiert.

UMFORMUNG

Für die Berechnung der Fließspannung wird die Berechnung einer mittleren Versetzungsdichte verwendet [4]. Die Änderung der Versetzungsdichte für einen bestimmten Zeitschritt wird durch die Beiträge der Versetzungsakkumulation und -annihilation bestimmt. Die Versetzungsannihilation muss aus den experimentell ermittelten Fließspannungen in Abhängigkeit der Temperatur und chemischen Zusammensetzung definiert werden, wodurch diese auch zur Beschreibung von geseigertem Material dienen kann. Auf der Grundlage der Versetzungsdichte können alle industriell relevanten Größen (beispielsweise Fließspannung, gespeicherte Energie, Härte oder Verfestigungsvermögen) durchgängig berechnet werden und stehen nach

der Umformsimulation für eine anschließende Wärmebehandlungssimulation zur Verfügung.

In der Industrie wird versucht, ungewollte Gefügeentwicklungen, wie beispielsweise das abnormale Kornwachstum, mit dem Umformprozess zu korrelieren. Die gespeicherten Versetzungen können als Maß für das abnormale Kornwachstum dienen. Bild 2 zeigt die berechnete lokale Versetzungsdichte nach dem Kaltumformen eines Kegelrads, die aus EBSD-Messungen im kaltverformten Zustand abgeleitete Versetzungsdichte (ρ_{KAM}) und die lokalen ehemaligen Austenitkorngrenzen nach einer Auslösewärmehandlung von drei Stunden bei 975 °C mit nachfolgender Abschreckung. Die berechnete gespeicherte Versetzungsdichte zeigte eine gute Übereinstimmung mit der Versetzungsdichte aus den EBSD-Messungen und der nachfolgenden Gefügeentwicklung bei der Wärmebehandlung (drei Stunden/975 °C). Bauteilbereiche mit einer hohen Versetzungsdichte sind feinkörnig, wohingegen Bauteilbereiche mit niedriger Versetzungsdichte abnormales Kornwachstum gezeigt haben.

Seigerungen können vereinfacht durch die rein geometrische Verformung abgebildet werden. Hierzu wurde ein Seigerungsindex verwendet, der für Makroseigerungen im Bereich des Kerns den Wert 1 und im Bereich des Rands den Wert 0 annimmt. Dabei wurde der Makroseigerungsverlauf aus einer Makroauf-

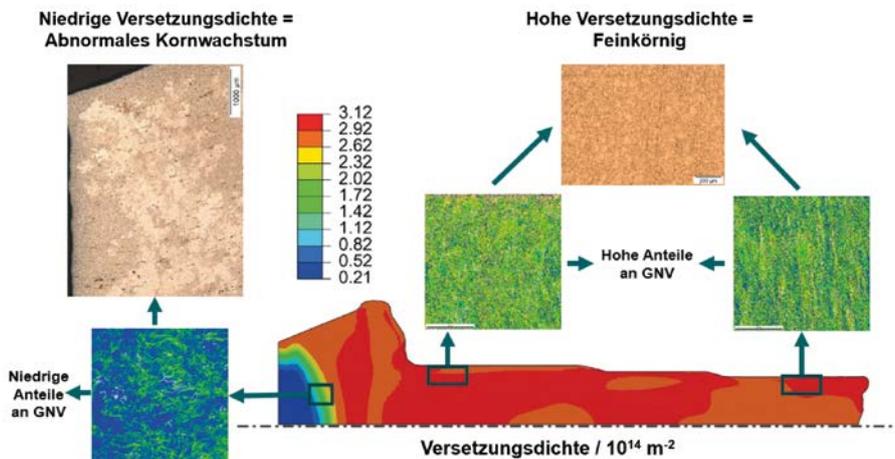


Bild 2: Verteilung von berechneter Versetzungsdichte am Ende der Kaltumformung: An verschiedenen Positionen gemessene Versetzungsdichte (ρ_{KAM}) und die ehemalige Austenitkorngrenze nach einer Blindhärtung (drei Stunden / 975 °C)

nahme des Halbzeugs abgeschätzt. Bild 3 zeigt den Makroseigerungsindex des Kegelrads nach der Umformung.

WÄRMEBEHANDLUNG

Die mechanische Bauteilhistorie, das heißt die Versetzungsdichte, wurde in der Wärmebehandlungssimulation über Erholung und Rekristallisation berücksichtigt. Makroseigerungen

haben einen signifikanten Einfluss auf die lokale Härtebarkeit. Deshalb wurden die Phasenumwandlungen in Abhängigkeit des oben beschriebenen Seigerungsindex für Makroseigerungen abgebildet. Mikro-seigerungen führen zu einem zeiligen Gefüge, daher wurde aus dem Seigerungsindex für die Mikro-seigerungen eine Orientierung bestimmt, über die die anisotrope Umwandlungsdehnung berechnet wurde [6].

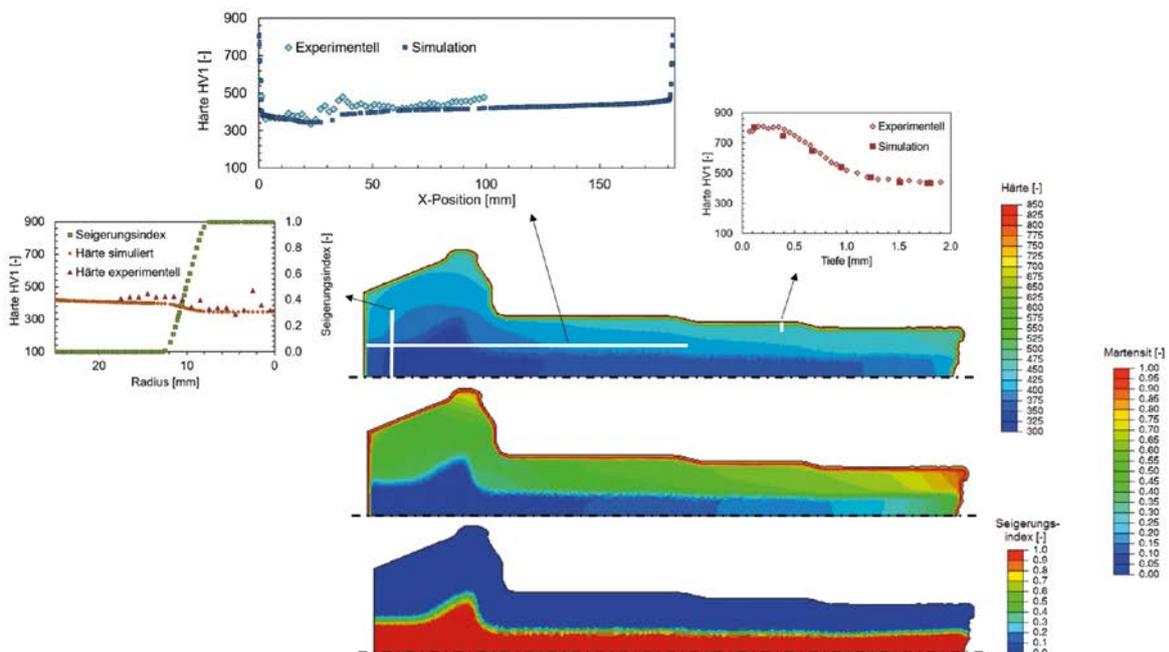


Bild 3: Makroseigerungsabhängige Resultate nach der Einsatzhärtung der Kegelräder

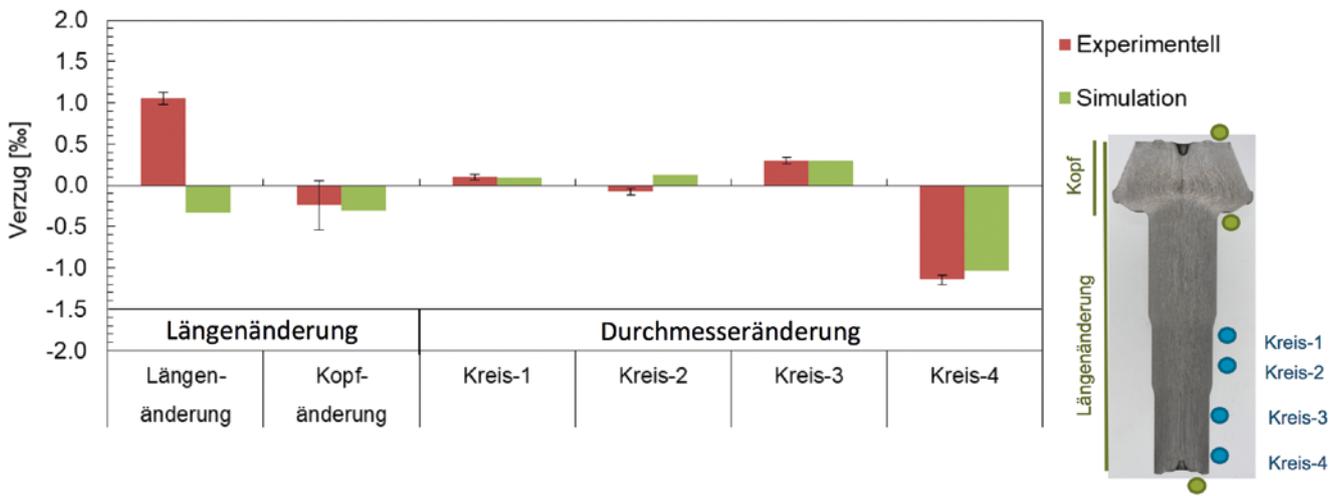


Bild 4: Vergleich zwischen Gesamtlängenänderung, Änderung des Kopfs sowie den Durchmesseränderung an vier Stellen im Bereich des Schafts Bilder: Autoren

	Kaltmassiv- umformung Einsatzhärten	Kaltmassiv- umformung Blindhärten	Warmmassiv- umformung Blindhärten
Gefüge	(+)	(+)	(+)
Härte	(+)	(+)	(+)
Eigenspannungen	○	○	○
Verzug	-	-	-

Legende:
 + gut
 (+) überwiegend gut
 ○ zufriedenstellend
 - nicht zufriedenstellend

Tabelle: Bewertung der Güte der Simulationsergebnisse nach der Wärmebehandlung

Die Einsatzhärtung beinhaltet Erwärmung, Aufkohlung und Abschreckung. Bild 3 zeigt den Makroseigerungsindex, die daraus folgende Martensit- und Härteverteilung und den Vergleich von simulierter und experimentell bestimmter Härte an ausgewählten Positionen. Sowohl die Einsatzschicht als auch den Sprung in der Härte aufgrund des Makroseigerungsgradienten können gut abgebildet werden.

Bei der Vorhersage des Verzugs wirken kumulativ kleine Effekte aus dem Erwärmen, Aufkohlen oder Abschrecken. Aus der Um-

formung beeinflussen die Erholung und Rekristallisation, die Bildung eines zeitigen Gefüges aufgrund der Mikroseigerung und die lokale Umwandlung aufgrund der Makroseigerungen den Verzug. In Bild 4 ist der Vergleich zwischen experimentell bestimmtem und berechnetem Verzug unter Berücksichtigung von Rekristallisation und Seigerungen dargestellt.

BEWERTUNG VON INTEGRIERTER UMFORM- UND WÄRME-BEHANDLUNGSSIMULATION

Die Vorhersage des Gefüges konnte durch die Kombination Umformung und Wärmebehandlung verbessert werden. Fehlender Umformgrad bei der Kaltmassivumformung kann prinzipiell zu Grobkorn führen. Grobkorn konnte bei den Bauteilen im nicht umgeformten Kopfbereich bei erhöhter Wärmebehandlungstemperatur nachgewiesen werden. Weiterhin können Makroseigerungen zu Härtesprüngen nach der Wärmebehandlung führen.

Die betrachteten Effekte haben durchaus einen Einfluss auf den simulierten Verzug nach der Wärmebehandlung. Allerdings gab es punktuell noch deutliche Abweichungen. Ob Effekte aus der Prozesskette noch nicht ausreichend betrachtet wurden oder ob die Effekte während der Wärmebehandlung nicht ausreichend gut beschrieben worden sind, ist derzeit offen. Die Tabelle gibt eine Bewertung der Güte der Simulationsergebnisse nach der Wärmebehandlung wieder. Dabei können Gefüge, Härte und Eigenspannungen überwiegend gut abgebildet werden. Die Vorhersage des Verzugs ist derzeit nur eingeschränkt möglich, da der Verzug sich aus vielen kleinen Effekten additiv zusammensetzt.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine prozessübergreifende Modellierung und Simulation der Umformung und einer nachgeschalteten Wärmebehandlung aufgebaut. Hierzu wurden gezielt Modellerweiterung anhand experimenteller Modellversuche vorgenommen und die Parameter hierfür bestimmt. Der Fokus lag auf den Modellen zum Übertrag der mechanischen und chemischen Größen.

Die lokale Versetzungsdichte kann aufgrund unterschiedlicher Rekrystallisationsvorgänge zu deutlich unterschiedlichem Gefüge führen. Als eine weitere Einflussgröße auf den Verzug wurde der Makroseigerungsverlauf identifiziert. Damit lassen sich Gefüge und Härte verbessert beschreiben, während der Verzug noch deutliche Abweichungen zeigt.



- [1] Nadolski, D. et al.: Einfluss einer Kaltmassivumformung und Wärmebehandlung auf die Maß- und Formänderungen, HTM J, Heat Treatm. Mat. 69 (2014) 5, S. 295 – 305
- [2] Heeß, K. et al.: Maß- und Formänderungen infolge Wärmebehandlung von Stählen, expert verlag, Remchingen (2017)
- [3] Hunkel, M.: Analyse von Seigerungen und seigerungsbedingtem Verzug am Beispiel des Einsatzstahls 20MnCr5, HTM J, Heat Treatm. Mat. 67 (2012), S. 311 – 322
- [4] Schacht, K. et al.: Mikrostrukturbasierte Modelle ermöglichen genauere Simulationsergebnisse bei mehrstufigen Schmiedeprozessen, SchmiedeJOURNAL, September 2015, S. 30 – 36
- [5] Schacht, K.; Motaman, A. H.; Prah, U.; Bleck, W.: A unified dislocation density-dependent physical-based constitutive model for cold metal forming, AIP Conference Proceedings 1896 (2017) 160020
- [6] Hunkel, M.; Nadolski, D.: Coupled process simulation of cold extrusion and heat treatment distortion of steel shafts, Mat.-wiss. Werkstoff. 47 (2016), pp. 762 – 770



Das Vorhaben IGF 18531N der Forschungsvereinigungen Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV), Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) und Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. (AWT) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Der Schlussbericht kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**



IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages