

# Automatisierte Simulation der Prozesskette vom Blockguss zum wärmebehandelten Stahl

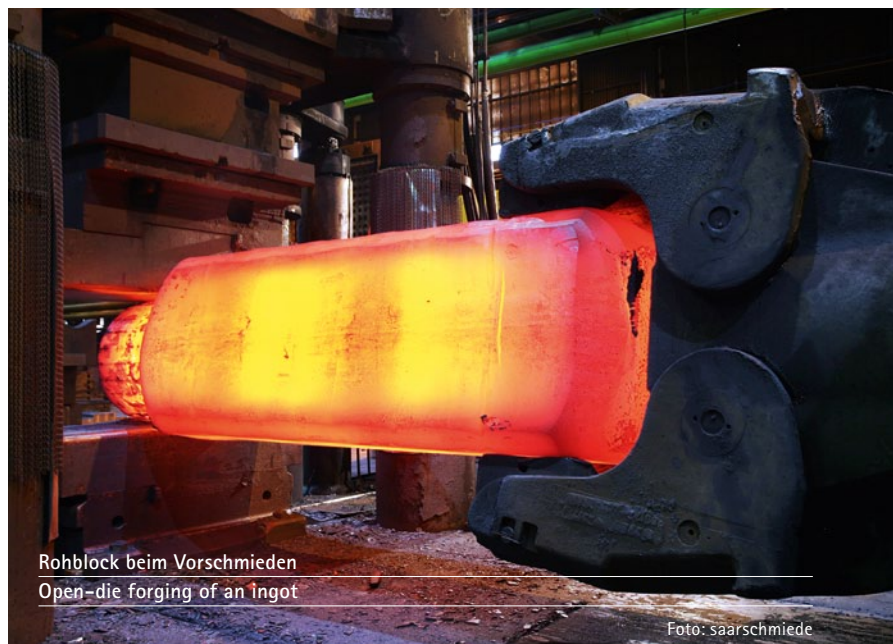
*Automated simulation of the process chain from cast ingots to the heat treated part*

Hendrik Schafstall, Gabriel McBain, Christian Barth, Jan Terhaar und Jan Jarolimeck

Die deutsche und europäische Schmiedeindustrie muss sich nunmehr seit einigen Jahren nachhaltig wirkenden Markttrends stellen, die zu einem Paradigmenwechsel geführt haben bzw. aktuell noch führen. Die anhaltende Verlagerung der Serienproduktion in Billiglohnländer sowie kürzere Produktlebenszyklen zwingen zunehmend zu einer höheren Flexibilität und Effizienzsteigerung sowohl in der Entwicklung als auch der Fertigung. Besonders bei energetisch und fertigungstechnisch aufwendigen inkrementellen Verfahren wie dem Freiformschmieden und Ringwalzen stellt die Ausnutzung der noch vorhandenen Einsparpotenziale einen bedeutenden Beitrag zur Kosteneinsparung dar. Nicht zuletzt rücken bei den Endkunden zunehmend (lokale) Eigenschaftsanforderungen an die Bauteile in den Vordergrund – ein Wandel von designorientierter hin zur eigenschaftsorientierten Fertigung. In diesem Zusammenhang gewinnt der Ansatz einer durchgängigen Prozesskettensimulation immer mehr an essenzieller Bedeutung.

*For a number of years the German as well as the European forging industry has been facing some sustainable market trends, which have led to a paradigm shift that still lasts. The continuing shift of mass production to low cost countries and shorter product life cycles force the manufacturer to greater flexibility and efficiency in development and manufacturing. There is still a certain potential for cost savings. Utilizing these opportunities becomes especially important for very complex and energy-consuming incremental forming technologies like open die forging and ring rolling. Additional (local) property demands of the customers for their parts/components become more and more standard requirements – a change of design-oriented towards property-oriented manufacturing. In this context, the approach of an integrated simulation of entire process chains is becoming increasingly essential.*

Der internationale Wettbewerb sowie die globalen ökologischen und ökonomischen Bedingungen führen zunehmend zu einem Umdenken im Bereich der industriellen Fertigung. Die zukünftigen Entwicklungen und deren fertigungstechnische Umsetzung werden von einer ressourcenschonenden, bauteileigenschaftsoptimierten Herstellungskette geprägt sein. Bisher werden viele Fertigungsschritte einzeln betrachtet und ausgelegt, ohne deren Wechselwirkung auf nachfolgende Fertigungsverfahren mit zu berücksichtigen. Durch eine gezielte Abstimmung der Fertigungsstufen können wesentliche, bislang oft ungenutzte Potenziale hinsichtlich Energieeinsatz und Fertigungsaufwand aktiviert werden. Dies ist besonders ausgeprägt bei energieaufwendigen Verfahren, wie bei den inkrementellen Verfahren, z. B. dem Freiformschmieden oder dem Ringwalzen. So können Bauteileigenschaften bereits frühzeitig induziert und durch das Fertigungsverfahren gezielt beeinflusst werden.



Rohblock beim Vorschmieden  
Open-die forging of an ingot

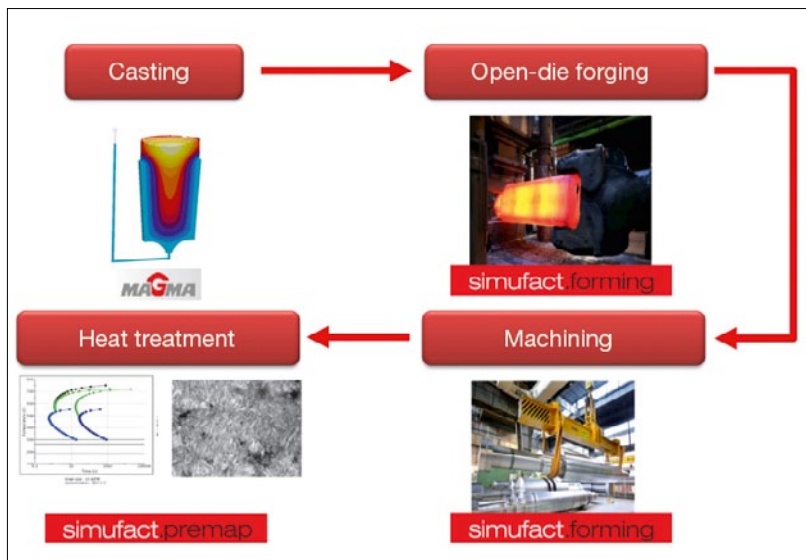
Foto: saarschmiede

Die Kenntnis der jeweiligen physikalischen Zusammenhänge und deren Beeinflussung werden immer wichtiger, und zwar fachübergreifend. Ein modernes Hilfsmittel zur Veranschaulichung und Darstellung derartiger Zusammenhänge ist die Prozesssimulation. Hiermit können sowohl Machbarkeitsstudien als auch Prozessoptimierungen und Sensibilitätsstudien durchgeführt sowie ein verstärktes Prozessverständnis vermittelt werden. Die Prozesssimulation wird auf unterschiedlichste Weise in den einzelnen Fachbereichen eingesetzt, ohne Kenntnisse daraus für nachfolgende Fertigungsstufen zu nutzen. Oft wird immer wieder von homogenem Material ausgegangen und die Auswirkungen der Vorstufen werden nicht beachtet. Im Folgenden sollen daher einige Ansätze aufgezeigt werden,

wie die Anforderungen der Zukunft im Bereich der inkrementellen Fertigung mithilfe der Simulation erfüllt werden können und wie dabei das Wissen aus den Vorstufen der (Umform-) Prozesse gezielt genutzt werden kann.

### Vom Blockguss zum Fertigteil

Eine typische Prozesskette zur Herstellung eines Bauteils ist in Bild 1 dargestellt. Ausgehend von einem Gussblock wird das Werkstück in mehreren Hitzen überschmiedet und so der Schmiederohling erzeugt. Dieser wird anschließend spanend nachbearbeitet und am Ende wärmebehandelt. Während der einzelnen Prozessschritte wird das Materialgefüge immer wieder durch unterschiedliche metallkundliche Vorgänge beeinflusst und verändert. Dazu gehören die inhomogene Gefügeausbildung während des Gießprozesses und Gefügeänderungen aufgrund von plastisch oder temperaturinduzierten und diffusionsgesteuerten Mechanismen, Bild 2, während der Umformung. Dies wird wesentlich durch das Ausgangsgefüge und deren Zusammensetzung zu Beginn des Freiformschmiedens beeinflusst und muss dementsprechend in der Simulation mit berücksichtigt werden.



1

Prozesskette, vom Blockguss bis zum finalen wärmebehandelten Bauteil  
Process chain from the cast ingot to the final heat treated product

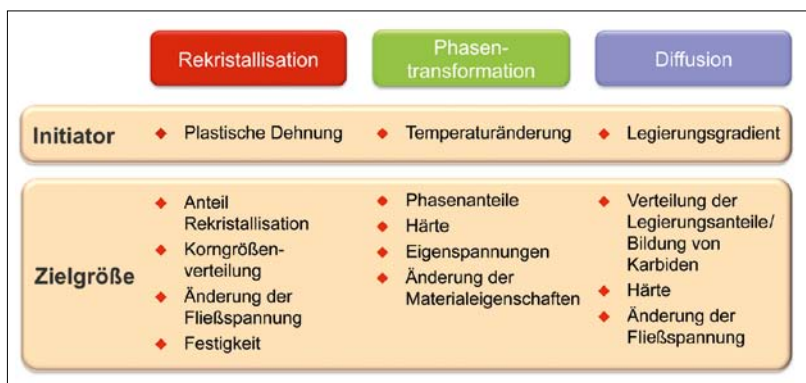
### Prozesssimulation

Für die jeweiligen Fragestellungen gibt es unterschiedliche programmtechnische Ansätze und Simulationslösungen, die in den unterschiedlichen Fachbereichen zum Einsatz kommen. Zur Erzeugung des Rohblocks wird eine Gießsimulation (z. B. MagmaSoft) eingesetzt. Das Ziel ist es hierbei, den Herstellungsprozess des Gussblocks zu optimieren und das Endgefüge im Rohblock zu bestimmen.

Zu den wesentlichen, zunächst interessierenden Ergebnisgrößen für nachgeschaltete Fertigungsprozesse gehören:

- Makroskopische Lunker, Bild 3
- Porosität, Bild 4
- Makroseigerungen (Verteilung der chemischen Zusammensetzung), Bild 5.

Zur Berücksichtigung des Ausgangszustandes des Blockes nach dem Gießen wurde gemeinsam mit der Firma Magma und einem Industriepartner eine Schnittstelle entwickelt, über die alle wesentlichen Größen mit in die Umformsimulation und in die nachgeschaltete Wärmebehandlung übernommen werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsbereiche und Lösungsalgorithmen werden die Ergebnisse auf ein anwendungsspezifisches Netz für die Umformung übertragen. Dies ist beispielhaft in Bild 5 anhand der Elementverteilung von Kohlenstoff und Chrom dargestellt. Die lokal vorliegende Elementkonzentration wird als



2

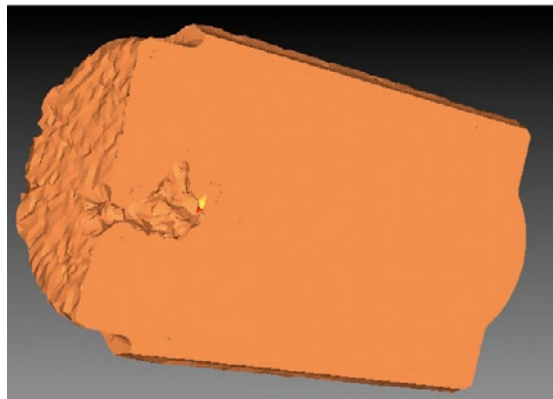
Darstellung der wichtigsten physikalischen Einflüsse auf die Mikrostruktur während der Umformung und Wärmebehandlung  
Most important physical effects on the microstructure during forming and heat treatment

Eigenschaft durch die gesamte Simulation mitgeführt und ändert sich aufgrund der physikalischen Vorgänge (Umformung, Temperatur, Diffusion). Dies hat wiederum Wechselwirkungen auf die lokalen Materialeigenschaften. In weitere Projekte mit der Industrie und namhaften Forschungseinrichtungen werden zukünftig weitere physikalische Modelle integriert, um die lokalen Bauteileigenschaften während der Fertigungsprozesse möglichst genau berechnen und damit vorhersagen zu können. Dazu sind neue Industriepartner herzlich willkommen. Die Simulation vereint vielfältiges vorhandenes Wissen aus den unterschiedlichen Teilbereichen und kann die Einflüsse und Wechselwirkungen in ihrer Gesamtheit sichtbar machen. In Bild 4 ist beispielhaft die teilweise Verschmiedung der aus der Gießsimulation übernommenen Porosität aufgezeigt. Dies ermöglicht z. B. eine gezielte „sicherere“ Auslegung der Prozessstufe zur Vermeidung von Undichtigkeiten und Poren im fertigen Bauteil.

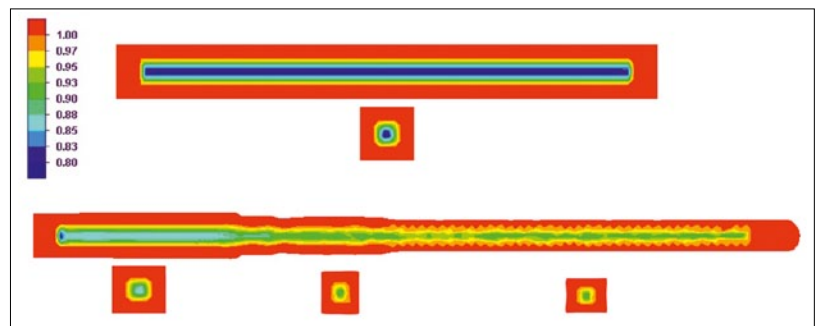
Im Bild 6 sind die Temperaturverteilung (rechts) und die plastische Dehnung während des Freiformschmiedens eines gegossenen Blocks in der ersten Hitze aufgezeigt. Es sind deutlich die unterschiedlich ausgeprägten Zonen zu erkennen, die sich wiederum mit den Seigerungen aus dem Gussprozess überlagern und zu lokal unterschiedlichen Zuständen führen. Am Ende ist dadurch eine inhomogene Verteilung der Mikrostruktur und damit der Bauteileigenschaften im Fertigteil vorhanden.

### Programmtechnische Umsetzung

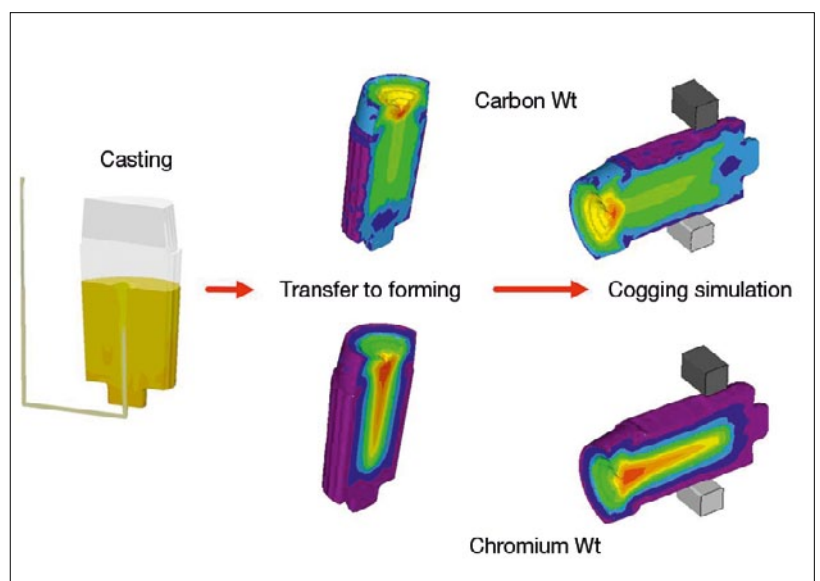
Die Berücksichtigung von Gefügemodellen und die Änderungen der Mischphasen sowie der Kristallstruktur erfordern sehr leistungsfähige Berechnungsprogramme, um aufgrund der äußeren Einwirkung der Werkzeuge und der gleichzeitig ablaufenden Gefügevorgänge ein Simulationsergebnis berechnen zu können. Der hier eingesetzte Solver von Simufact.forming ist in diesem Bereich der mit Abstand leistungsfähigste Solver und beruht auf der Kerntechnologie von MSC Marc der MSC Software Corporation. Er wird seit nunmehr 50 Jahren kommerziell entwickelt und ermöglicht sehr genaue und realitätsnahe Berechnungen. Diese Analysen müssen zudem mit speziellen Elementen, die die Werkstück- bzw. Bauteilstruktur beschreiben, durchgeführt werden. Dies sind sogenannte Hexaederelemente, die den Dehnungs- und Spannungszustand und damit auch die Bauteileigenschaften sehr genau beschreiben können. Dies ist eine notwendige Schlüsseltechnologie, um die Fragestellungen auch in diesem Umfeld für die Zukunft genau beantworten zu können. Es wird ein real elastisch-plastisches Materialmodell verwendet, um die



3  
Makroskopische Lunken in einem Rohblock als Ausgangsgeometrie für die Umformsimulation in Simufact.forming, vernetzt mit Hexaederelementen  
Macroscopic blowholes from casting simulation as initial geometry for cogging simulation in Simufact.forming using a hexahedral mesh



4  
Anfangsporosität anhand der relativen Dichte und nach 89 Hieben in sechs Überschlammierungen, dargestellt im Längs- und Querschnitt  
Initial relative density and after 89 strokes in six passes, cross section lengthwise and crosswise



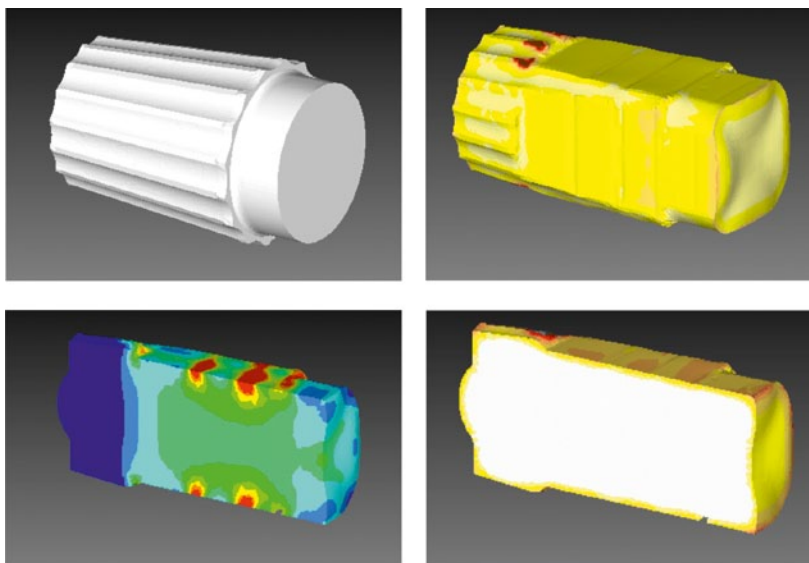
5  
Verteilung von Legierungselementen nach der Gießsimulation als Anfangszustand für die Umformsimulation  
Content of alloying elements after casting simulation as initial condition for forming simulation

Eigenspannungseffekte genau berechnen zu können und im fertigen Produkt sichtbar zu machen. Die eingebrachten Eigenspannungen können wiederum als Funktionsunterstützung im Betrieb verwendet werden oder müssen durch eine Wärmebehandlung wieder entfernt werden. Eigenspannungen können darüber hinaus zu Verzug führen und beeinflussen die Zerspannung.

Weiterhin musste im Vorfeld eine Möglichkeit geschaffen werden, die Daten für die jeweiligen Modelle vorzuhalten und zu verwalten. Dazu wurde eine neue flexible Datenstruktur für die Materialda-

tenverwaltung in Simufact.forming entwickelt, die nun auch die Verteilung der chemischen Analyse berücksichtigt und die Vorgabe phasenabhängiger Materialeigenschaften ermöglicht. Auf der Basis eines lokalen Mischgefüges können so gefügebezogene, lokale Materialeigenschaften berechnet und daraus der Eigenspannungszustand und das resultierende Materialverhalten ermittelt werden. Die dargestellte voll integrative Lösung ermöglicht die zeitgleiche Berechnung von Umformvorgängen mit Phasen- und Gefügeumwandlungen, Bild 7. Diese Möglichkeiten wurden in einem modularen Programmpaket unter dem Begriff Simufact.premap (prediction of material properties) zusammengefasst. Dieser integrierte Ansatz schafft damit die Grundlage, um den derzeitigen und zukünftigen Anforderungen an die Simulation in diesem Bereich gerecht zu werden.

Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse wird weitestgehend von der Genauigkeit der Materialparameter bestimmt. Hierzu stehen zu den unterschiedlichsten Materialdatenbanken entsprechende Schnittstellen zur Verfügung, um die für die jeweiligen Modelle erforderlichen Daten zusammenzuführen. Innovative Materialdatenbanken sind z. B. JMatPro von Sente Software Ltd., mit der basierend auf der chemischen Analyse wesentliche Materialdaten für den gesamten Temperaturbereich und die unterschiedlichen Phasen berechnet werden können, sowie Matilda der Firma GMS Bernau oder Strucsim vom IBF in Aachen, beide mit umfangreichen Gefügemodellen.

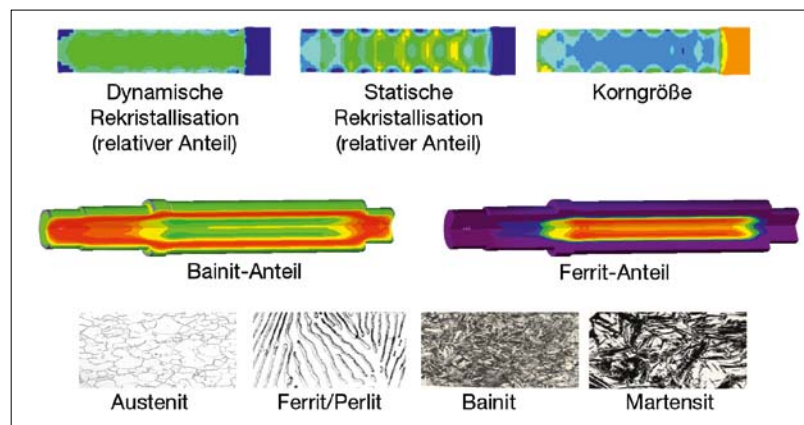


6 Temperaturverteilung (rechts) und plastische Dehnung (unten, links) am Ende der ersten Überschmiedung in der ersten Hitze  
 Temperature distribution (right) and plastic deformation (below, left) at the end of the first pass in the first heat

### Automatische Prozesssteuerung

Die Steuerung von Freiformschmiedeprozessen ist ein weiterer wesentlicher Bestandteil eines effizienten Simulationskonzeptes bei der Prozesskettenbetrachtung. Die Verarbeitung des Rohblocks erfolgt in vielzähligen Überschmiedungen in mehreren Hitzen. Sobald das Umformvermögen aufgrund der Temperaturabnahme erschöpft ist, muss das Werkstück wieder im Ofen erwärmt werden. Die Abfolge der Überschmiedungen bestimmt die Durchschmiedung und das Gefüge, wobei überwiegend die dynamische und statische Rekristallisation bei plastischer Formänderung die bestimmenden Größen sind. Aber auch im Randbereich des Blocks, z. B. an den Druckberührungszonen der Manipulatorzangen, kommt es aufgrund verstärkter Abkühlung zu Phasenumwandlungen.

Schmiedearbeitsgänge können schnell mehrere tausend Hübe beinhalten, zwischen den Hügen sind Pausenzeiten oder nach der Überschmiedung Ofen- und Transportzeiten zu berücksichtigen. Das Zeitverhalten und damit das Temperaturfeld sollten so genau wie möglich berechnet werden, da sie sowohl

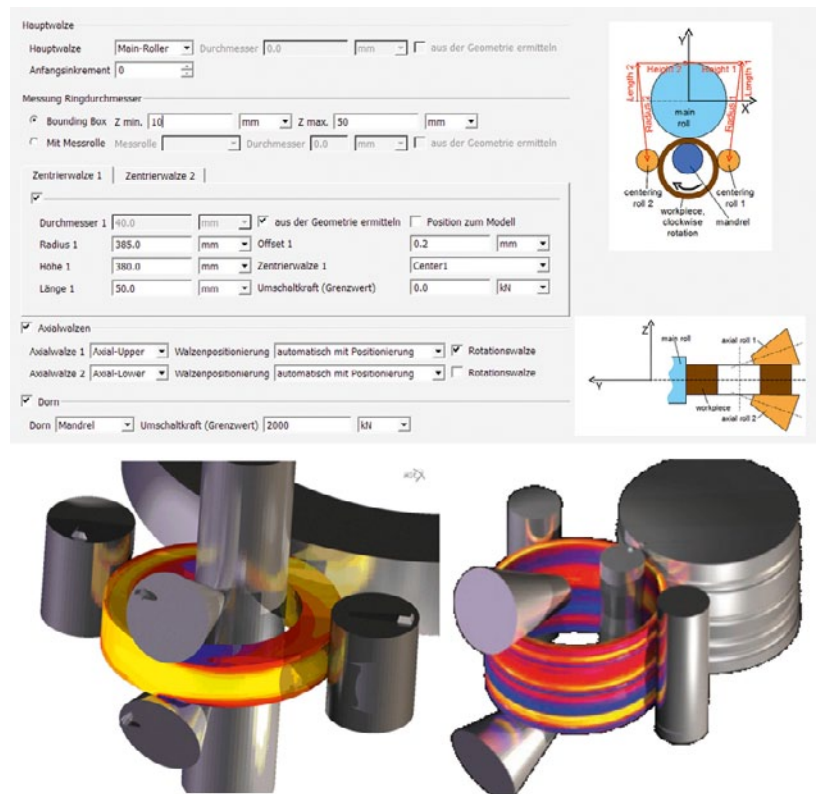


7 Mikrostrukturänderungen aufgrund plastischer Deformation während der Umformung (oben) und Phasenumwandlung während der Wärmebehandlung (unten)  
 Microstructural changes based on plastic deformation during forming (above) and phase transformation during heat treatment (below)

den Kraftbedarf bestimmen als auch die Bauteileigenschaften. Zudem erfährt das Bauteil je nach Strategie unterschiedliche Rotationsbewegungen, die ebenfalls abgebildet werden müssen.

In den letzten Jahren wurden daher adaptive Steuerungskonzepte in Simufact.forming implementiert, die eine automatisierte Berechnung über mehrere Hitzten ermöglichen. Dazu wird der Stichplan grob vorgegeben. Das Handling, u. a. mit einem oder mehreren Manipulatoren, und die Anzahl der Hübe pro Überschmiedung werden dabei automatisch ermittelt. Möglich ist dies, da nach jedem Berechnungsschritt der momentane Zustand u. a. anhand der Geometrieausbildung, Kraft, Durchschmiedung und Temperatur ausgewertet und als Kriterium für das weitere Vorgehen und den nächsten Berechnungsschritt genutzt wird. Bei der Simulation kann ebenfalls die Steifigkeit der Manipulatoren berücksichtigt werden. Es handelt sich hierbei um ein modulares Konzept, das individuell erweitert werden kann, bis hin zu selbstoptimierenden Systemen. Damit kann jeder Anwender seine Besonderheiten bei der Prozessführung individuell abbilden. Die speziellen Freiformschmiedemodule in Simufact.forming ermöglichen so ohne Nutzerinteraktion eine wirtschaftliche und vollständige Analyse des z. T. selbststeuernden Prozesses. Damit ist eine Vielzahl von Variationen zur Erhöhung der Prozesssicherheit möglich, um u. a. die bestimmenden Einflussfaktoren auf die finalen Bauteileigenschaften zu ermitteln und darzustellen.

Die aufgezeigten Möglichkeiten sind ebenso auf die Ringwalzprozesse übertragbar, bei denen, ausgehend vom Rohblock, das Stauchen, Vorschmieden und Lochen berechnet wird, um dann die Ringvorform mit ihren Gefügeinformationen zu seiner Endgeometrie auszuwalzen, Bild 8. Hierbei unterstützt das Ringwalzmodul von Simufact.forming die wesentlichen Ansteuerungsmöglichkeiten und Regelsysteme einer Ringwalzanlage. Basierend auf den sich ergebenden Regelgrößen wie z. B. Ringdurchmesser, Kraft oder Ähnliches, werden die Steuerungsgrößen automatisch im Simulationsprogramm berechnet und für die Ansteuerung der Walzen verwendet. Hierbei werden alle Walzen, wie Zentrierwalzen, Axialwalzen, auch freidrehend oder geregelt, berücksichtigt – auch mit Kraftumschaltung von Dorn oder Zentrierwalzen. Die genaue kinematische Abbildung und die Verwendung der Hexaeder-Vernetzungstechnik erlauben eine sehr genaue Berechnung der Umformung und Rotation des Ringes und damit auch eine genaue Gefügeberechnung und die Berechnung des Eigenspannungszustandes. Gerade bei dünneren Ringen kann es am Ende aufgrund der eingebrachten Eigenspannungen zu großen Deformationen oder Dellen kommen, so-



8

Automatische Prozesssteuerung fürs Ringwalzen von glatten und profilierten Ringen mit maschinenspezifischer Anpassung unter Berücksichtigung der Vorstufen und Eigenschaften  
Automatic process control for ring rolling of non-profiled and profiled rings with machine specific customization under consideration of pre-stages and properties

bald der Ring entspannt wird. Nach dem Abkühlen kann der Ring in Simufact.forming auf sein Endmaß gebracht werden und dann entsprechend einer Wärmebehandlungssimulation unterzogen werden. Die Kenntnisse der gesamten Prozesskette ermöglichen die Freisetzung weiteren Optimierungspotenzials bei der Ringherstellung, die Erweiterung des Anwendungsbereiches bestehender Anlagen und die Übertragung auf andere Materialien.

### Fazit

In diesem Beitrag wurden die aktuellen Entwicklungen der Simufact Engineering GmbH auf dem Gebiet der Prozesskettensimulation bei großen inkrementell hergestellten Bauteilen aufgezeigt. Über neuentwickelte Schnittstellen können Ergebnisgrößen aus der Gießsimulation direkt für die Freiformschmiedesimulation übernommen werden. Aufgrund einer neuen Materialdatenstruktur in Simufact.forming können Materialdaten gemäß der Konzentrationsverteilung berücksichtigt und Mischphasen und deren Materialzustand berechnet werden. Je nach physikalischen Effekten und eingesetzten Materialien kommen während der

Simulation verschiedene metallurgische Modelle zur Anwendung. Deren Verwaltung wird über das neue Materialdatenverwaltungsprogramm vorgenommen. Die Flexibilität und Offenheit des Systems ermöglicht schnelle Erweiterungen und individuelle Anpassungen. Die komplexe Prozesssteuerung der Umformprozesse wird über bereits integrierte Steuerungsmodule für das Freiformschmieden und Ringwalzen in Simufact.forming geregelt. Hierdurch ist ein stichplanorientierter schneller Aufbau möglich, wodurch eine Vielzahl an Varianten berechnet werden kann, um mehr Prozesssicherheit zu erhalten und neue Fertigungspotenziale zu entwickeln. Die hierbei zum Einsatz kommende Hexaeder-Elementtechnologie gewährleistet die dafür notwendige höchste Ergebnisqualität.

Das Ziel ist es, zukünftig ressourcenschonender und prozesssicherer Bauteile mit den entsprechenden finalen Eigenschaften berechnen zu können und dabei die Wechselwirkungen in den einzelnen Herstellungsstufen zu berücksichtigen. Damit können frühzeitig Bauteileigenschaften vorbereitet und eingestellt bzw. Maßnahmen zur Behebung von Defekten aus Vorstufen entwickelt werden. Auch Zerspanung und Wärmebehandlung können einbezogen werden. In Simufact.forming steht dazu eine einheitliche, zukunftsfähige und flexible Plattform

zur Verfügung. Die Bauteileigenschaftsvorhersage wird durch geeignete Werkstoffmodelle gestützt, die je nach Verfügbarkeit kontinuierlich angepasst und erweitert werden. Durch die neue offene flexible Struktur und Datenbasis ist die Softwareplattform auf die Zukunft ausgerichtet und kann kontinuierlich an die neuen Wissensstände und Erfahrungen angepasst werden. Hierzu kann in enger Zusammenarbeit der unterschiedlichen Fachabteilungen eines Unternehmens, ggf. gemeinsam mit dem Softwarehersteller, die Position gestärkt und gezielt auf die sich stetig ändernden Anforderungen reagiert werden.

*Aktualisierte Version eines Vortrags auf der 1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forming (ICRF 2012) vom 3. bis 7. Juni 2012 in Aachen.*

*Dr.-Ing. Hendrik Schafstall, Geschäftsführer, CTO; Dr.-Ing. Gabriel McBain, General Manager Simufact India i.f.; Dr.-Ing. Christian Barth, Assistent der techn. Geschäftsführung, Simufact Engineering GmbH, Hamburg; Dipl.-Ing. Jan Terhaar, Leiter Schmiede; M. Sc. Jan Jarolimeck, Ingenieur Verfahrensentwicklung, Saarschmiede GmbH Freiformschmiede, Völklingen.*

*hendrik.schafstall@simufact.de*