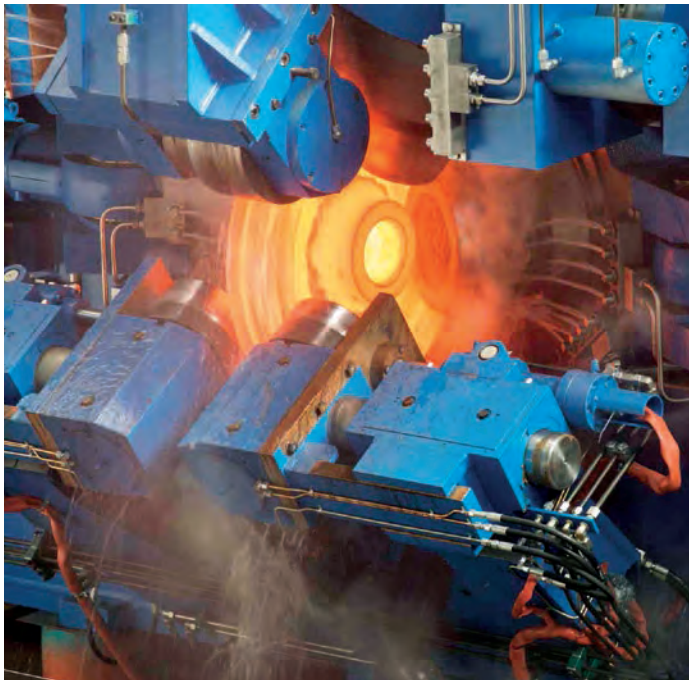


Forging methods make an important contribution to the efficient and sustainable use of resources because of their specific design and implementation. This design and implementation must be done on the premise of fast and flexible production as well as an ongoing increase in competitive capacity – with a simultaneous reduction of costs. This requires a preferably simple analytic approach to defining the required early and intermediate forms,

## Engineering Environment for the Design, Control and Optimisation of Process Chains in Forging

the generation of data for process control and tool design and also calls for examining individual forming operations as well as the numerical/simulative aspects of the entire process chain. This is suitably done in a user-friendly engineering environment whose concept will be presented in the following using the example of train wheel production.



Radwalze Typ MHRV-180/80 (Hersteller Schuler SMG).

Bild: Schuler

Dr.-Ing. Dirk Klug, Waghäusel,  
Dr.-Ing. Hendrik Schafstall, Hamburg und  
Dipl.-Ing. Markus Bergmann, Chemnitz

Massivumformverfahren leisten durch ihre konkrete Ausgestaltung beispielsweise in Bezug auf die zu erzielenden Form- und Materialeigenschaften und Umsetzung von Verfahrenskombinationen einen wichtigen Beitrag für einen effizienten und nachhaltigen Ressourceneinsatz. Diese Ausgestaltung und Umsetzung hat unter den Prämissen einer schnellen und flexiblen Produktion sowie einer kontinuierlichen

### Einleitung

Den permanenten Herausforderungen nach Kostenreduktion und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit wird in der Massivumformung durch eine zunehmende Automatisierung der Fertigungsabläufe bei gleichzeitiger Reduktion

des Ressourceneinsatzes und verbesserter Produktqualität begegnet. Die Produzenten stehen vor der Aufgabe, einerseits eine schnelle, sichere und flexible Produktion zu gewährleisten und andererseits die Fertigungs-

abläufe in jeder Hinsicht möglichst optimal zu gestalten. Zwar gibt es eine Reihe von Systemen, die den Produzenten bei diesen Aufgaben zum Teil auch miteinander gekoppelt unterstützen, jedoch sind diese Systeme spezi-

# Engineering-Umgebung für die Auslegung, Steuerung und Optimierung von Prozessketten in der Massivumformung

Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit – bei gleichzeitiger Kostenreduktion – zu erfolgen. Hierfür ist es notwendig, mit möglichst einfachen analytischen Ansätzen erforderliche Vor- und Zwischenformen zu bestimmen, Daten für die Prozesssteuerung und Werkzeugauslegung zu generieren sowie die einzelnen Umformoperationen als auch die gesamte Prozesskette numerisch-simulativ zu betrachten. Zweckmäßig geschieht das in einer nutzerfreundlichen Engineering-Umgebung, deren Konzept im Folgenden beispielhaft anhand der Fertigung von Eisenbahnradern vorgestellt wird.

alisiert, komplex und zeitintensiv [1], [2]. Vor-dergründiges Interesse des Produzenten ist es hingegen, die Fertigungsabläufe möglichst einfach und schnell mit hinreichender Genauigkeit gestalten zu können. Um diese Diskrepanz zu beseitigen, wurde in Zusammenarbeit der Autoren ein Konzept für die Verknüpfung von bewährten analytischen Ansätzen zur Prozesskettenauslegung, die Generierung und Bereitstellung von Daten für die Fertigungssysteme sowie eine durchgängige numerische Simulation der Umformprozesskette im Rahmen einer modernen Engineering-Umgebung entwickelt und am Beispiel einer Fertigungslinie für Eisenbahnräder realisiert.

**Prozesskette**

Der Herstellung von Eisenbahnrädern mittels Massivumformung liegt in der Regel die Prozesskette Trennen Rohteil, Erwärmung Rohteil, Vorformen, Zwischenformen, Fertigformen und Abkühlen beziehungsweise Wärmebehandlung zu Grunde. Durch die Form der Eisenbahnräder mit stark profiliertem Querschnitt ist es notwendig, die Vorform schrittweise der zu erzielenden Fertigform anzupassen. Eine Ausbildung der Querschnittsformen ausschließlich durch Schmieden findet nur bei kleineren Rädern statt. Üblicherweise wird die geschmiedete Querschnittsvorform durch mehrachsige Walzen bei gleichzeitiger Durchmesserergrößerung reduziert und profiliert. Die abschließende Ausbildung der Fertigform erfolgt

dann durch Kumpeln und Lochen. Während die Prozesskette in ihrem Aufbau kaum veränderlich ist, erfordert die Gestaltung der jeweiligen Zwischenformen, ihr Abgleich mit den realen Fertigungsergebnissen und ihre Optimierung eine iterative Vorgehensweise [3], [4].

Eine erste Auslegung von Zwischenformen und Werkzeuggeometrien findet auf der Grundlage von analytischen Ansätzen, die auf empirischem und experimentell-theoretischem Wissen basieren, statt. Im Rahmen der analytischen Ansätze erfolgt die Berücksichtigung grundlegender Aspekte des Umformverhaltens der Werkstoffe wie zum Beispiel Stauchverhältnis, Umformvermögen, Umformgrad und der Einfluss der Fließspannung. Diese vereinfachenden Ansätze lassen keine genaue Berechnung der Umformvorgänge zu, wie sie zum Beispiel für die Präzisierung der analytischen Ansätze oder die komplexe Optimierung der Prozesskette notwendig sind. Dazu bedarf es der numerischen Lösung der Verfahren der elementaren und allgemeinen Plastizitätstheorie. So können dann auch Fragestellungen zum Einfluss von Temperaturverlauf, Werkstoffzusammensetzung, Gefüge und Wärmeübergang sowie den Vorgängen im Kontaktbereich Werkstück/Werkzeug beantwortet werden.

**Umformsimulation**

Um die Vorgänge und Wechselwirkungen von Umformprozessen zu analysieren, werden

vorzugsweise die Mittel und Möglichkeiten der Finite-Elemente-Methoden (FEM) angewandt. Die Ermittlung und Darstellung der verfahrensrelevanten Kennwerte erfolgt dabei auf der Grundlage einer möglichst exakten Beschreibung als thermisch-mechanisch gekoppelter Prozess sowie unter Berücksichtigung charakteristischer nichtlinearer Effekte. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Beschreibung der prozessbestimmenden Maschinenparameter und die Integration der zu Grunde liegenden Steuerungs- und Regelalgorithmen in die Simulationssoftware. Ebenso spielen die zur Verfügung stehenden Materialmodelle (voll elastisch-plastisch, isotrop, anisotrop, kinematische Verfestigung, Bauschinger Effekt, et cetera), die Leistungsfähigkeit der Kontaktalgorithmen und die Beschreibung von Reibung, Wärmeleitung, dynamischer Effekte, komplexer Werkzeugbewegungen (lastgesteuert oder frei drehbar, federnd gelagert) eine wichtige Rolle für die erzielbare Ergebnisqualität. Das Ziel, eine möglichst hohe Vorhersagegenauigkeit und Qualität der Ergebnisse in möglichst kurzer Zeit zu erreichen, setzt zudem leistungsfähige Solver voraus. Entsprechend den Spezifika der Umformverfahren (zum Beispiel Schmieden, Walzen) stehen verschiedene optimierte Core-technologien (zum Beispiel FEM = Finite-Elemente-Methode, FVM = Finite-Volumen-Methode), auch in Verbindung mit selbststeuernden Optimierungsstrategien, für die Umformprozesssimulation zur Verfügung [5], [6].

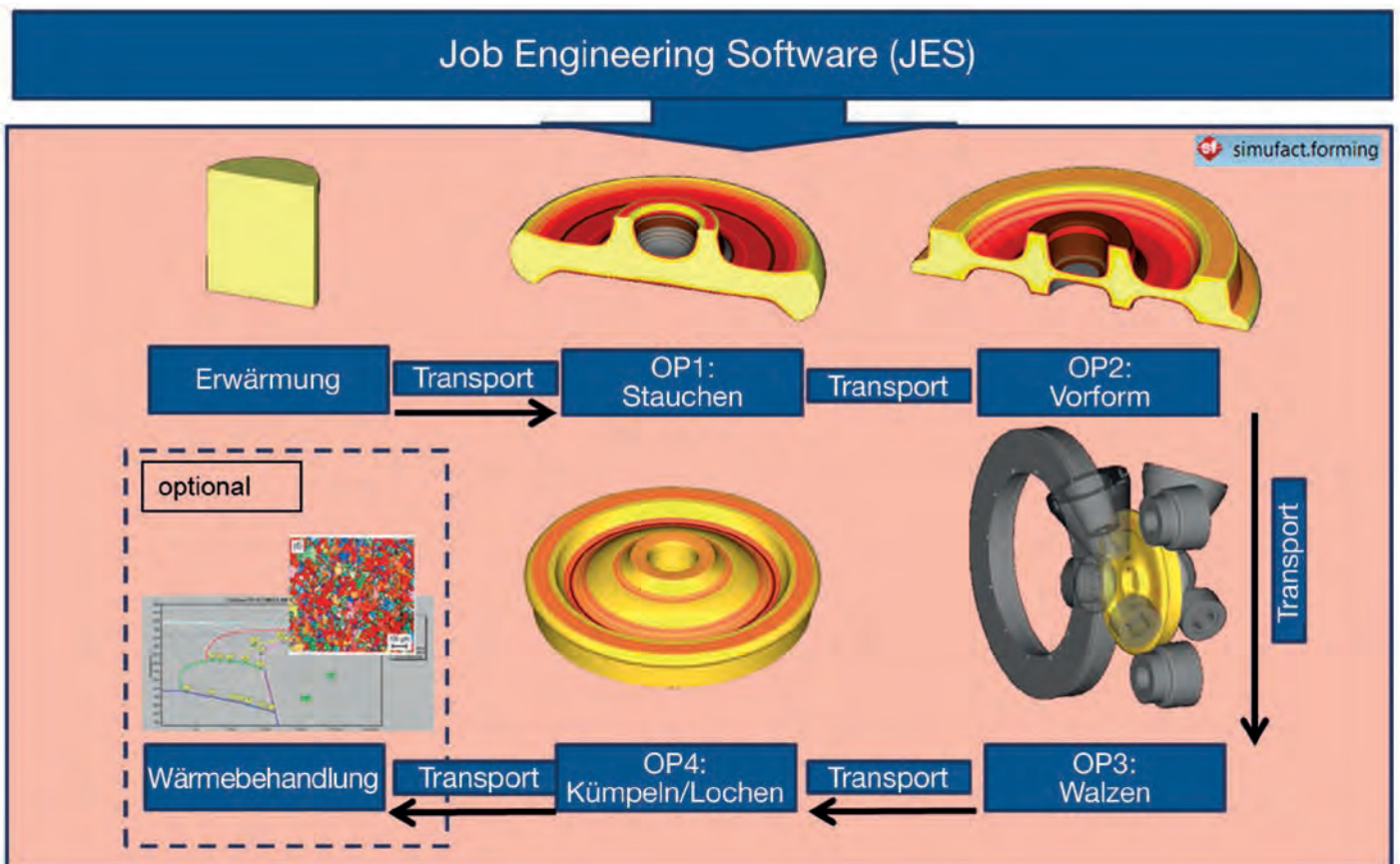


Bild 1: Prozesskettenmodellierung am Beispiel der Herstellung von Eisenbahnrädern.

Die Umformprozesssimulation ist aber nur ein Teilaspekt einer ganzheitlichen Fertigungsprozessanalyse beziehungsweise -gestaltung. Zusätzlich ist notwendig, die Umformhistorie der aufeinanderfolgenden Prozesse mit einzubeziehen. Das gelingt mit der Simulation von mehrstufigen Prozessen im Rahmen einer erweiterten Prozesskettenmodellierung (Bild 1), sodass die Vorgeschichte von Werkstück und Material in den jeweiligen Umformprozesssimulationen Berücksichtigung findet. Eine besondere Herausforderung für die Software zur Simulation der gesamten Prozesskette liegt darin, dass diese fertigungsnah, bedienerfreundlich und interpretierbar sein muss sowie Möglichkeiten zur Kopplung mit dem realen Fertigungssystem und den Verfahren zur Prozesskettenauslegung bietet.

**Engineering-Umgebung**

Die für die Herstellung von Eisenbahnradern entwickelte Engineering-Umgebung beruht auf zwei unabhängig voneinander lauffähigen Softwarelösungen mit adaptiertem Nutzer-Interface, welche über definierte Schnittstellen untereinander sowie mit der Fertigungslinie für Eisenbahnräder Daten austauschen und diese verarbeiten. Kerninhalt beider Softwarelösungen ist die informationstechnische Analyse und Verarbeitung der bei der Fertigung von Eisenbahnradern zu durchlaufenden Umformoperationen. Zum einen beinhalten die Softwarelösungen die als FPS bezeichnete FEM-Prozesskettensimulation der Schmiede- und Walzoperationen auf Basis von simufact.forming und zum anderen das als Job-Engineering-Software (JES) bezeichnete neuentwickelte Tool zur Studienplanung und Generierung der Maschinenparameter beziehungsweise Walzstrategie. Die in JES generierten Prozessparameter sowie Sollgeometrien für Werkstück und Werkzeug werden als Eingangsparameter für die Maschinensteuerung beziehungsweise die Prozesskettensimulation genutzt. Dem Anwender ist es möglich, gezielt sowohl einzelne Prozessstufen als auch die Gesamtprozesskette auszulegen und zu optimieren. Durch die eigenständige Nutzbarkeit der Komponenten der Engineering-Umgebung vereinfacht sich nicht nur die Handhabung, sondern auf Grund der damit verbundenen Robustheit und Störungsunempfindlichkeit wird eine hohe Produktivität und Verfügbarkeit sowohl der Engineering-Umgebung als auch der Fertigungslinie gewährleistet.

**Analytischer Ansatz**

Die Entwicklung des produktspezifischen Studienplans und seiner zugehörigen Zwischenformen ist ein komplexer Prozess, der auf bewährten analytischen Ansätzen beruht und neben zahlreichen Randbedingungen (zum Beispiel Werkstoff, Rohteildurchmesser, Verzug) auch die einzuhaltenden Maschinen- und Prozessparameter berücksichtigt und deren Einhaltung kontrolliert. Ausgehend von der Fertigteilgeometrie des zu fertigenden Rades

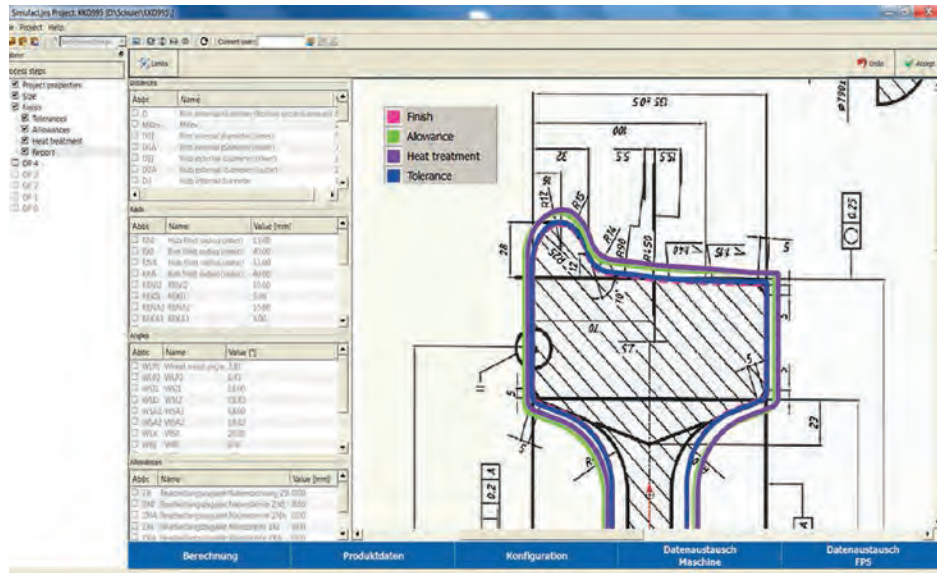


Bild 2: Eingabemaske JES.

werden rückwärts entlang der Prozesskette die jeweiligen Zwischenformen bis hin zur Rohteilgeometrie entwickelt (Bild 2).

Wesentliche Kriterien für die Zwischenformauslegungen sind die Einhaltung von Volumenkonstanz und Volumenverteilung in den maßgeblichen Radbereichen Radkranz, Steg und Nabe. Diese Vorgehensweise wird kurz an der Bestimmung der Zwischenform von OP2 aus OP3 verdeutlicht.

Durch das Walzen in OP3 kommt es im Bereich von Steg-Radkranz, sowohl in axialer als auch in radialer Richtung zu Volumenverschiebungen, deren Bewegungsrichtungen miteinander gekoppelt sind. Im Bereich von Nabe-Steg tritt nur eine geringe Volumenverschiebung in axialer Richtung auf. Die prinzipielle Grundkontur von OP3 ist bereits in OP2 vorhanden, da während des Walzens lediglich die Ausformung der Detailkontur erfolgt (Bild 3).

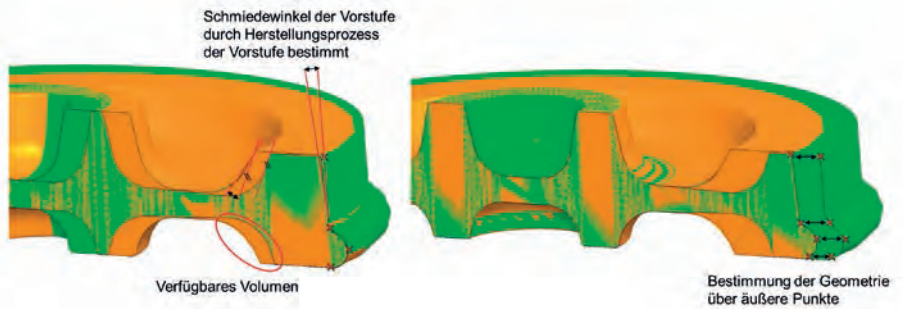


Bild 3: Ableitung Zwischenformprofil.

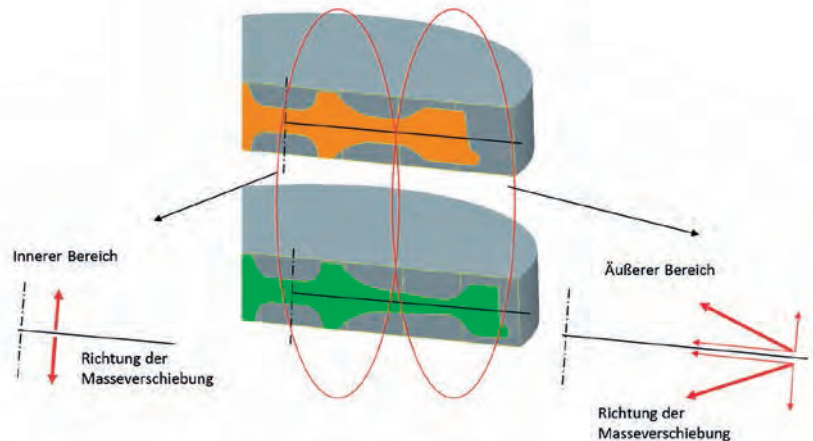


Bild 4: Volumenverschiebung zwischen OP3 (unten) und OP2 (oben).

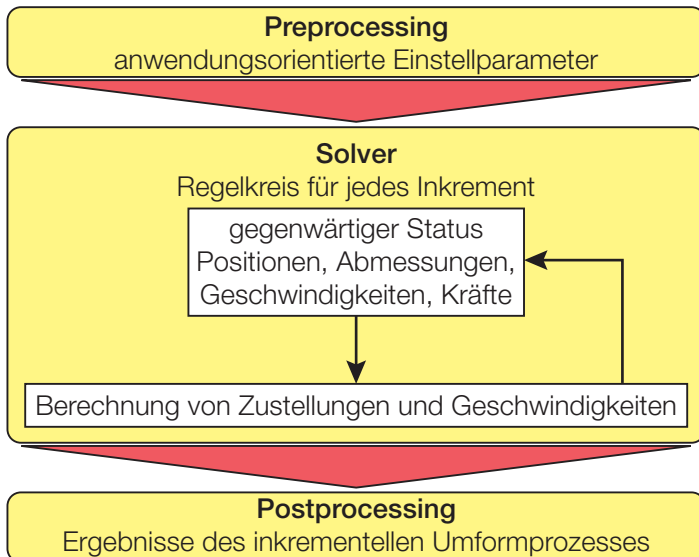


Bild 5: Solverprinzip für inkrementelle Prozesse.

Bilder: Autoren

Wird nun das Gesamtvolumen der Zwischenform in OP3 auf der Grundlage einfacher Kreisringquerschnitte in einzelne Volumenanteile zerlegt und die Querschnitte dieser Volumenanteile entsprechend der zu erwartenden Volumenverschiebung rückgerechnet, so ist die Zwischenform in OP2 bestimmbar (Bild 4).

Nach diesem Prinzip erfolgt unter Berücksichtigung der umformtechnischen Randbedingungen die Auslegung der Zwischenformen für alle Stufen des Stadienplans.

**FEM-Prozesskettensimulation**

Die Erzielung realitätsnaher Simulationsergebnisse setzt nicht nur die Modellierung der gesamten Umformprozesskette der Eisenbahnradfertigung voraus, sondern erfordert eine ebenso hinreichend genaue Modellierung der Werkzeuge und der dem Prozess zu Grunde liegenden Kinematiken. Dem Anwender der Engineering-Umgebung steht für seine Untersuchungen daher ein vorkonfiguriertes und aus JES heraus vorparametrisiertes Prozesskettenmodell zur Verfügung. Neben der Möglichkeit zur Modellverfeinerung (zum Beispiel Werkzeugaufbau) bietet dieses Prozesskettenmodell Voraussetzungen für eine Erweiterung der Prozesskette (durch Wärmebehandlung) oder Vertiefung des Modellierungsgrades (der Gefügestruktur). Grundsätzlich werden im Prozesskettenmodell die Werkstückparameter aus dem vorhergehenden Prozessschritt als Eingangsparameter für die folgende Simulationsrechnung verwendet.

Im betrachteten Fall der Eisenbahnradfertigung sind die Schmiedeprozesse der Prozesskette jeweils als zweidimensionales, rotationssymmetrisches Modell aufgebaut (FEM-Berechnung). Die Handlingzeiten zwischen den einzelnen Umformprozessen, die durch den erfolgenden Temperatenausgleich zu einer Homogenisierung der Werkstücktemperatur führen, werden in der Simulationsrechnung

als Kühlung an der Luft berücksichtigt. Für die Simulation des Radwalzprozesses wird die 2D-Werkstückkontur automatisch in eine rotationssymmetrische 3D-Werkstückkontur umgewandelt. Temperaturen und Umformgrade werden dabei ebenfalls in den 3D-Raum übertragen. Es erfolgt eine kontinuierliche Erfassung von Abmessungen, Geschwindigkeiten und Kräften, um in geschlossenen Regelkreisen aktualisierte Geschwindigkeiten und Zustellungen berechnen zu können.

Diese Regelkreise sind vollständig im Solver integriert, was eine schnelle, stabile und besonders realitätsnahe Berechnung ermöglicht (Bild 5).

Die typische Aufteilung von Finite-Elemente-Simulationen, das heißt die Festlegung der Geschwindigkeiten im Preprocessing und Auswertung im Postprocessing mit anschließender Anpassung der Geschwindigkeiten in einem erneuten Preprocessing, ist dabei aufgehoben.

**Zusammenfassung**

Das am Beispiel der Fertigung von Eisenbahnradern vorgestellte Konzept einer Engineering-Umgebung für Prozessketten der Massivumformung ermöglicht auf der Grundlage von bewährten analytischen Ansätzen eine schnelle Auslegung benötigter Zwischen- und Rohteilformen. Die dabei generierten Daten stehen als Parameter für die Steuerung der an der Prozesskette beteiligten Massivumformmaschinen und als Angangswerte für die Prozessoptimierung mittels numerischer FE-Simulation zur Verfügung. Der Aus-

tausch der (konsistenten) Daten zwischen den Modulen der Engineering-Umgebung und der Systemsteuerung erfolgt über definierte Schnittstellen und Datenformate. Im Sinne einer möglichst einfachen Bedienung sind die Nutzerinterfaces von Auslegungssoftware, Maschinensteuerung und FE-Simulation aufeinander abgestimmt und in wichtigen Bereichen identisch gestaltet. Das zur Verfügung stehende Prozesskettenmodell bietet im Rahmen der FE-Simulation umfangreiche Möglichkeiten sowohl für seine vertikale (Gefüge), als auch horizontale (Prozesskettenerweiterung) Skalierung sowie die Integration in vor- beziehungsweise nachgelagerte Prozesssimulationen. ■

**Literatur**

[1] Kuss, M.; Harrer, O.; Buchmayr, B.: Herausforderungen bei der Simulation von inkrementellen Umformverfahren zur Herstellung von Leichtbauprodukten, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, 2013, ISBN 978-3-88355-395-5, S. 107-115.

[2] Bergmann, M.; et al.: Beitrag zur numerischen Simulation inkrementeller Massivumformverfahren, Schmiede Journal, März 2013, ISSN 0933-8330, S. 28-31.

[3] Lange, K.: Umformtechnik, Bd. 2, Massivumformung, 1988, ISBN 978-3-54017-709-8, S.138-145.

[4] Spur, G.; Neugebauer, R.; Hoffmann, H.: Handbuch Umformen, 2012, ISBN 978-3-44642-778-5, S. 187-194.

[5] Schafstall, H.; et al.: Neueste Entwicklungen in der Simulation von Umformprozessen zur Unterstützung zukünftiger Anforderungen, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, 2011, ISBN 978-3-88355-386-3, S. 173-192.

[6] Bernhardt, R.; et al.: Physikalisch-statistisch basierte Multiskalen-Simulation in Prozessketten der Massivumformung, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, 2013, ISBN 978-3-88355-395-5, pp. 89-106.



Dr.-Ing. Dirk Klug



Dr.-Ing. Hendrik Schafstall



Dipl.-Ing. Markus Bergmann