Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125

Etablierung einer durchgehenden Simulationsprozesskette in der Schwerindustrie

BMWK-Projekt SiPro

*K. Kittner, Konsortium des SiPro-Projektes**

ZUSAMMENFASSUNG Das Projekt „SiPro“, Etablierung einer durchgängigen Simulationsprozesskette in der Schwerindustrie, ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms gefördertes Projekt. Das Ziel ist es, eine montane Prozesskette zu analysieren und daraus Optimierungen abzuleiten. Solch eine Prozesskette ist exemplarisch: Blockguss-Freiformen-Wärmebehandlung. Wesentliche Basis ist die Aufnahme von Kennwerten, Materialkennwerten (beispielsweise Fließkurven) und andererseits Prozesskennwerten (zum Beispiel Aufheizkurven). In letzter Konsequenz steht die Reduzierung der eingesetzten Energie, und damit des CO_2 im Fokus.

STICHWÖRTER

Simulation, Energieeffizienz, Schmieden

The SiPro project – Establishment of a continuous simulation process chain in heavy industry

ABSTRACT The SiPro project, establishment of a continuous simulation process chain in heavy industry, is a project funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Protection (BMWK) as part of the 7th Energy Research Program. The aim is to build up corresponding numerical model chains to analyze and optimize industrial process chains. An exemplary process chain is: ingot casting, open die forging, and heat treatment. Important base are material properties (e.g. flow curves) and process values (e.g. heating curves) from conducted tests and industrial trials. The primary focus is on reducing the consumption of energy, and thus CO_2.

1 Einleitung

Wir befinden uns in einer Phase, in der die herausfordernde politische Rahmensituation auf starke globale Veränderungen trifft. Das heißt, zu den Vorgaben und Zielen zur Reduzierung des CO_2-Austoßes durch die Bundesregierung kommen Veränderungen am Energiemarkt hinzu, beispielsweise durch den Russland-Ukraine-Krieg, sowie konkurrierende Industriekapazitäten in den asiatischen Staaten. Vor allem die Montanindustrie hat in dieser Marktsituation einen erheblichen Transformationsprozess zu beschreiten, um global wettbewerbsfähig zu bleiben.

Ausgehend von den Prozessen in der Schwerindustrie wird ein wesentliches Optimierungspotenzial in diesen selbst gesehen. Auch ausgehend von einer Zunahme des Digitalisierungsgrades in der Prozesskette können Energie- und Ressourcen eingespart werden. Der Schlüssel zur Optimierung wird in der „Etablierung einer durchgehenden Simulationsprozesskette in der Schwerindustrie“ (kurz: SiPro) gesehen.

Daher wurde das BMWK-Projekt „SiPro“ im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung im Förderbereich „Energieeffizienz in der Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD)“ als Verbundprojekt von wissenschaftlichen Einrichtungen und Industriepartnern initiiert.

Das BMWK-Projekt wurde am 01. Januar 2022 unter der Trägerschaft des Projektträgers Jülich (PtJ) gestartet. Das Projekt befindet sich im letzten Projektjahr und wird am 31.12.2024 abgeschlossen sein. Im Folgenden werden wesentliche Inhalte und bisherige Teilergebnisse auszugsweise dargelegt.

2 Ausgangssituation

Mit der Digitalisierung einer Prozesskette werden einheitliche Methodiken in der Handhabung, fundierte Materialdaten als Basis und eine durchgehende Übergabe und Weitergabe von Daten erwartet. Die blechverarbeitende Industrie konnte, maßgeblich getrieben durch die Automobilhersteller, unter dem Schlagwort Industrie 4.0, einen sehr hohen Durchdringungsgrad und ein gesteigertes Technologiereifegrad-Level erreichen. Jedoch bleibt der generelle Durchdringungsgrad der unterstützenden Software einerseits und die Einbindung in Prozessketten andererseits im Rahmen der montanen Prozesskette noch auf einem deutlich geringeren Niveau [1–4]. Die Analyse und die Gründe für diese Situation führen zu den Lösungsansätzen im Projekt, zeigen aber weiterhin die aktuellen technologischen und methodischen Grenzen.

Der erste wesentliche Unterschied sind die Skalierungsebenen. Für die korrekte gesamtheitliche Betrachtung innerhalb der montanen Prozesskette ist es notwendig, von der makromechanischen (geometrische Dimension: Meterbereich, 1 m) bis zur mikromechanischen Ebene (geometrische Dimension: Mikrometer-

* Konsortium des SiPro-Projektes:
T. Bergelt (Professur Werkstoffe und Oberflächentechnik, Technische Universität Chemnitz), Dr. *A. Franke* (Stahlzentrum Freiberg e.V.), *F. Hoffmann* (Institut für Metallformung, Technische Universität Bergakademie Freiberg), *C. Klameth* (Rosswag GmbH), *S. Koldorf* (Magma Gießereitechnologie mbH), Dr. *A. Kovalev* (Schmiedewerke Gröditz GmbH), *N. Lehnert* (Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik), Dr. *G. Mittler* (Karl Diederichs GmbH & Co.KG), Dr. *I. Neubauer* (Simufact Engineering GmbH), *R. Omri* (Georgsmarienhütte GmbH)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

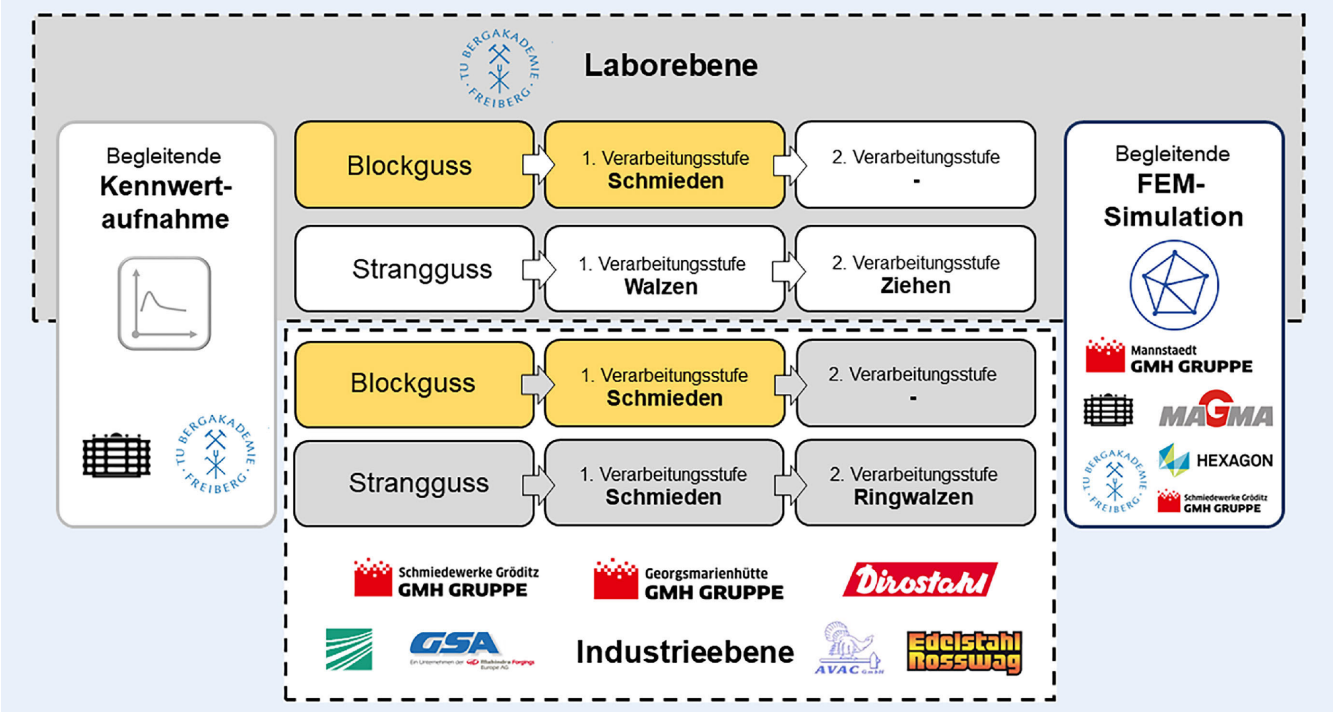

Bild 1. Strukturierung des SiPro-Projektes hinsichtlich Projektpartner und durchgeführter Arbeiten (orange: ausgewählte Prozesskette).
Grafik: SiPro, Professur Umformtechnik (TU Chemnitz)

bereich, 10–6 m) geometrische und werkstoffspezifische Analysen durchzuführen und Eigenschaften zu erfassen. Demgegenüber befindet sich die Blechumformung nahezu komplett und konsistent über die Prozesskette hinweg im mesomechanischen Bereich (geometrische Dimension: Millimeterbereich, 10–3 m).

Zweitens muss durch den Spannungs- und Verformungszustand beim Freiformen stets auf Volumenelemente innerhalb der FEM (Finite-Elemente-Methode)-Modellbildung zurückgegriffen werden, im Gegensatz zu den reduzierten Elementformulierungen von Membran- oder Schalenelementen in der Blechumformung. Dies bedeutet einen deutlich höheren Berechnungsaufwand und letztlich einen erheblichen zeitlichen Mehraufwand [2, 4, 5]. In Verbindung mit der Problematik der Skalierungsebenen stellen einerseits die gesamtheitliche numerische Analyse als auch andererseits die Integration in eine zeit-deterministische Entwicklungsprozesskette augenblicklich nicht realisierbare Aufgaben dar.

Der dritte Aspekt ist die Handhabung der im Fokus stehenden Untersuchungsobjekte. Ohne zusätzliche mechanische Manipulatoren sind die Probekörper nicht zu bewegen. Zudem erfordert es immer ein Zerteilen und Auftrennen der Probekörper, um an Segmenten ausgewählte Untersuchungen durchführen zu können. Während der Prozesse selbst schränkt die Prozesstemperatur (in der Regel oberhalb von 900 °C) die Analysemöglichkeiten weiter ein.

Der letzte Punkt im Vergleich der montanen Prozessketten und der Blechprozesskette sind die unterschiedlichen Halbzeug- und Bauteildimensionen. Damit ist gemeint, dass es oft nach dem Blockguss und dem Freiformen zu einem Auftrennen des Ausgangsblockes hin zu kleineren Halbzeugblöcken kommt. Dieser Schritt wird in der Simulation häufig nicht abgebildet. Die Historie an Geometrie- und Materialeigenschaften wird dadurch nur in wenigen Fällen zum nächsten Prozessschritt weitergegeben und geht somit verloren. Die genannten Aspekte galt es im Projekt zu berücksichtigen, aufzugreifen und zu überbrücken.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Partner

Das SiPro-Projekt ist so aufgebaut, dass die akademischen Partner die Untersuchungen auf der Laborebene durchführen. Dabei sind die Vorgänge und Prozessschritte korrespondierend zu den Industrieprozessen auf der mittleren und großen Skalierungsebene. Jedoch sind die Kennwertbestimmungen, Modellbildung, das allgemeine Handling und die Untersuchungen deutlich einfacher als auf der Skalierungsebene der Industrie.

Im akademischen Bereich erfolgt die Bearbeitung der Projektinhalte durch das Stahlzentrum Freiberg e.V. (SZF), das Institut für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg (IMF), die Professur Werkstoffe und Oberflächentechnik der TU Chemnitz (WOT), der Professur Virtuelle Fertigungstechnik (jetzt Umformtechnik) der TU Chemnitz (ViF) sowie durch das Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWU).

Im industriellen Kontext erfolgen die Arbeitsinhalte bei GMH Georgsmarienhütte in Osnabrück, Schmiedewerke Gröditz in Riesa (SWG), Rosswag Edelstahl in Pfinztal, Dirostahl in Remscheid und GMH Mannstaedt (MWT). Auf Softwareebene sind die Magma Gießereitechnik aus Aachen im Projekt beteiligt sowie die Hexagon Gruppe aus Hamburg, vormals Simufact. Unterstützend als assoziierte Partner wurden Arbeiten durch die Firma Gesenkschmiede Schneider in Aalen (GSA) und die Auerhammer Vacuumgießerei (AVAC) durchgeführt.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 1. Übersicht über die im Projekt untersuchten Werkstoffe.

Benennung Werkstoff	Werkstoffnummer	Verwendung
C45	1.0503	Unlegierter Baustahl, Handwerkzeuge, Aufbauplatten, Wellen, Bolzen, Zahnräder
X3CrNiMo13–4	1.4313	Rost- und säurebeständiger Edelstahl, Erdölindustrie, Kraftwerksbau
18CrNiMo7–6	1.6587	Vergütungsstahl, Höchstbelastete Bauteile, Zahlräder, Zahnwellen, Zahnstangen
42CrMo5	1.7225	Vergütungsstahl, Kurbelwellen, Pleuelstangen

Bild 2. Aufgebautes Doppelgespann (links), exothermische Blockkopfabdeckung (rechts). *Foto: SiPro, SWG*

3.2 Allgemein

Wie bereits erwähnt, erfolgten die Experimente in drei Skalierungsebenen. Die erste Ebene bestand aus den Laborversuchen. Exemplarisch ist hier der Blockguss am Stahlzentrum Freiberg genannt, mit einem Abgussgewicht von circa 25 kg. Der nächste Bereich befand sich in der Größenordnung von 400 kg pro Gussblock. Die abschließende Skalierungsgröße waren Vierkantblöcke mit Abgussgewichten im Bereich von 5,6 t und 12 t, die bei SWG in Gröditz und bei GMH in Osnabrück abgegossen wurden.

Mit dem Fokus auf die Prozesskette stellt der Guss immer den Anfang dar, auf den die Weiterverarbeitungen der ersten und zweiten Stufe aufbauen. Begleitend wurden die Kennwertaufnahmen durchgeführt, maßgeblich durch die akademischen Partner, beispielsweise das WOT. Basierend auf den ermittelten Kennwerten und den Prozessdaten der Industriepartner folgte der Aufbau der numerischen Modelle. Dieses Gesamtkonzept ist in **Bild 1** dargestellt.

Im Weiteren sollen exemplarisch wesentliche Arbeiten anhand der Eingangsprozesskette Blockguss-Freiformschmieden (Bild 1, orangefarbene Hervorhebung) dargelegt werden, da das Projekt nicht vollumfänglich in diesem Beitrag beschrieben werden kann. Zusätzlich erfolgt eine inhaltliche Unterteilung in die Schwerpunkte „Experimentelle Untersuchungen“, „Methoden“ und „Modelle“. Für jeden Schwerpunkt werden ausgewählte Arbeitsinhalte aus dem Projekt anhand der genannten Prozesskette vorgestellt.

3.3 Werkstoffe

Im Projekt wurden vier Werkstoffe ausgewählt, **Tabelle 1**.

Die Auswahl erfolgte beispielsweise für den C45 als einen allgemein gut erforschten Werkstoff, an dem Untersuchungsmethoden und Handhabungstechniken ausprobiert wurden. Die anderen Werkstoffe entsprachen tonnagemäßig den am meisten verarbeiteten Werkstoffen im Lieferportfolio der im Projekt beteiligten Industriepartner. Ausgehend von den Erfahrungen bei den Untersuchungen von C45 erfolgt die Übertragung auf die anderen Werkstoffe.

3.4 Blockguss

Der Blockguss stellt den ersten Prozessschritt der montanen Prozesskette dar. Im Labormaßstab erfolgten die Blockabgüsse im Stahlzentrum Freiberg. Dort wurden im Vakuumofen „VIM 12“ alle untersuchten Werkstoffe als Umschmelzungen steigend im Blockguss bei einem Druck von 30 mbar vergossen. Vor dem Abguss erfolgten die Bestimmung und Abstimmung der Legierungsbestandteile der jeweiligen Werkstoffe. Der Abguss erfolgte bei 300 mbar und unter Argon-Atmosphäre. Zusätzlich wurden an

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Bild 3. Freiformschmiedeversuch am IMF mit 25-kg-Block (links), Freiformschmiedeversuche mit 5,6- t- Block bei SWG (rechts).
Foto: SiPro, IMF (Technische Universität Bergakademie Freiberg), SWG

drei definierten Messpunkten die Temperaturen während des Abgusses und der Abkühlung aufgezeichnet. Alle in Tabelle 1 genannten Werkstoffe wurden auf diese Art zweifach abgegossen.

Bei den Schmiedewerken Gröditz erfolgte ein Blockabguss im großen Skalierungsmaßstab unter Industriebedingungen. Dabei wurde der Werkstoff X3CrNiMo13–4 (1.4313) in zwei Blöcken zu je 5,6 t in einem Doppelgespann abgegossen, **Bild 2**.

Bei Lunker- und Porenanalyse, Mikrostruktur und Seigerungsuntersuchungen erfolgten viele Experimente als Tandemversuche, bei denen mindestens zwei gleiche Blöcke je Versuch erzeugt wurden. Somit war es möglich, den ersten Block zu Analysezwecken aufzusägen, während der Schwesternblock weiter in der Prozesskette bearbeitet werden konnte. Damit konnten generell Vergleichbarkeiten gewährleistet werden. Zusätzlich wurden bei SWG während des Abgusses die Temperaturverläufe mittels in und an der Kokille angebrachter Thermoelemente aufgenommen. Die Abgüsse erfolgten mit einer exothermen Blockkopfabdeckung, die eingesetzt wird, um die Lunkerbildung im Block zu reduzieren. Ferner wurden relevante Prozessparameter protokolliert (wie etwa Gießtemperatur, Gießgeschwindigkeit, eingesetzte Materialien).

3.5 Freiformschmiedeversuche

In analoger Art und Weise zu den Gießversuchen wurde als wesentlicher Folgeprozessschritt der ersten Weiterverarbeitungsstufe das Freiformen durchgeführt. In der Laborebene wurden die Gussblöcke vom SZF (25 kg) am IMF in Freiberg umgeformt. Die Erwärmung erfolgte in einem Wärmekammerofen auf 1250 °C. Die Umformung erfolgte mit der hydraulischen 10-MN-Presse des Instituts nach einem abgestimmten Stichplan in zwei Stichen ohne Zwischenerwärmen. Dabei betrug die Querschnittsreduzierung circa 70 % von einem Durchmesser 170 mm des Gussblockes auf einen Querschnitt von 85 mm quadratisch mit einem Hubversatz von 0,5. Thermografie-Aufnahmen dienten der Erfassung der Temperatur während des Prozesses.

Im industriellen Maßstab erfolgte im Anschluss an den Blockguss auch das Freiformen bei SWG für einen der beiden 5,6-t-Blöcke. Für die Erwärmung im Ofen wurde der Block mit einer Reihe von Thermoelementen präpariert, so dass die Daten für das Aufheizen erfasst und im Folgenden für die numerische Simulation zur Verfügung gestellt wurden. Nach dem Erreichen der Aufheiztemperatur von 1230 °C wurde das Schmieden des Blockes durchgeführt. Dabei wurde ein Stichplan umgesetzt, der den etablierten Stichplänen im industriellen Alltag entspricht. Für diesen Block bestand der Stichplan aus zwei Stufen mit Zwischenerwärmen. In jeder Hitze wurden zwei Pässe mit einer zunehmenden Anzahl an Stichen absolviert, die sich wiederum aus einer Anzahl an Hüben zusammensetzten. Die Querschnittsabnahme betrug circa 65 % von einem 650 x 550 mm Rechteckquerschnitt auf einen 325 mm quadratischen Querschnitt. Der Hubversatz betrug durchschnittlich 0,5. In **Bild 3** sind die Freiformschmiedeversuche auf Laborebene beim IMF und auf industrieller Ebene bei SWG dargestellt.

4 Methoden: Untersuchungen, Analysen und Vorgehensweisen

4.1 Prozessgrößenerfassung

Generell wurden die Versuche auf Prozessebene so durchgeführt, dass parallel zum Prozessschritt selbst Prozessdaten und insbesondere Messdaten aufgezeichnet wurden. Im Bereich der montanen Prozesskette ist die wichtigste Größe die Temperatur. Diese spielt die wesentliche Rolle im Gießprozess, beginnend mit der Starttemperatur beim Abguss bis hin zum Erreichen des Solidus-Punktes der Schmelze. Die Bedeutung der Temperatur kann fortgeführt werden bei den Aufheizprozessen in den Öfen zum Erreichen der Schmiedetemperatur, der Prozesstemperatur beim Schmieden, die maßgeblich die Fließspannung und damit die Umformkraft beeinflusst, bis hin zu der Wärmebehandlung deren Temperaturführung letztendlich die Gefügeausbildung bestimmt.

Da im Gegensatz zur Blechumformung deutlich weniger Abgleichmöglichkeiten zwischen der Simulation und der Praxis bestehen, kommt der korrekten Aufnahme der Temperaturverläufe eine Schlüsselfunktion zu. Exemplarisch zeigt **Bild 4** die Abkühlkurven beim Abguss des 25-kg-Blockes beim SZF mit dem Werkstoff 42CrMo4, 1.7225. Während des Abgusses wurden die Temperaturen an drei Positionen aufgezeichnet.

4.2 Porenmessung

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal für geschmiedete Bauteile ist die Freiheit von Poren und Lunkern. Dafür werden nahezu alle Bauteile in der industriellen Praxis mittels Ultraschallprüfung un-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

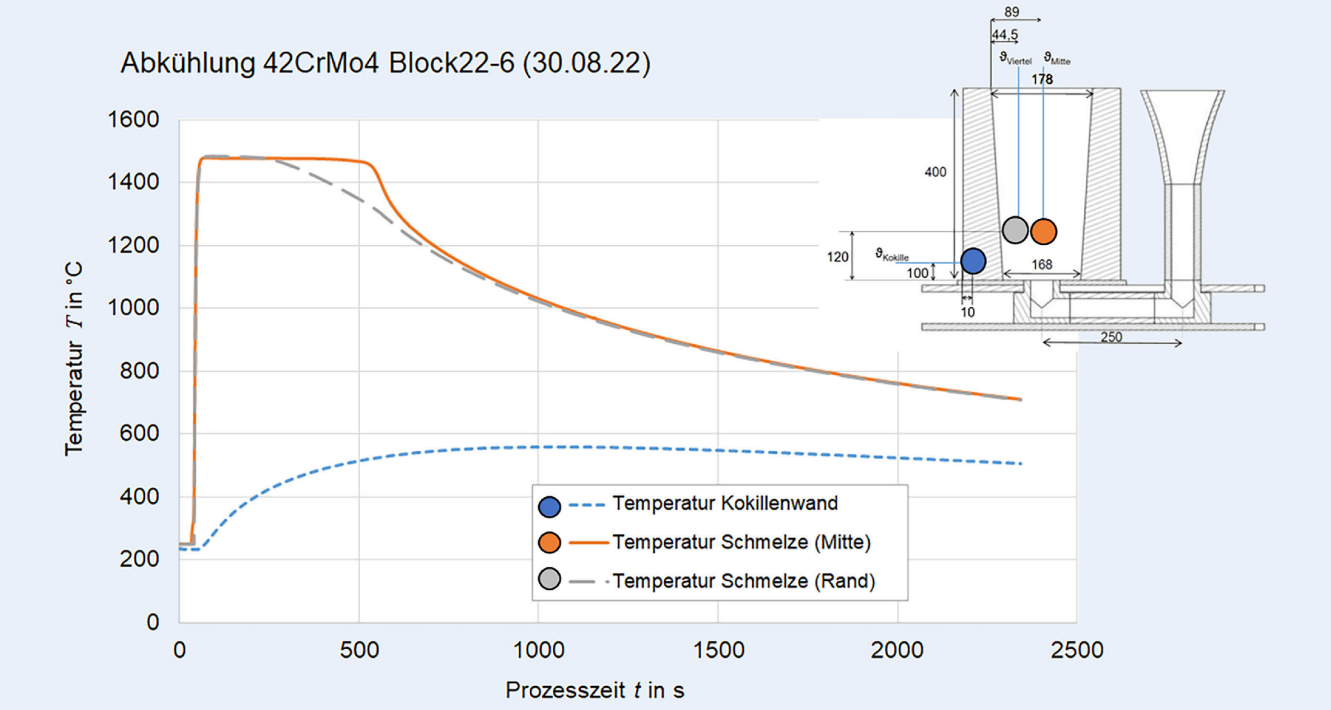

Bild 4. Abkühlkurven beim Blockguss am SZF und Positionen der Thermoelemente im Gusssystem. *Grafik: SiPro, Professur Umformtechnik (TU Chemnitz)*

tersucht. Das Ergebnis solcher Untersuchungen ist ein KSR-Wert (Kreisscheibenreflektor), der die Größe erkannter Poren wiedergibt. Dabei korrespondiert der angezeigte KSR-Wert mit der Größe gemessener Poren im Millimeterbereich. Gerade die Messung der Poren ist ein wichtiger Aspekt, um Prozessketten effektiver zu gestalten. Ist die Größe der Poren bekannt, ist es deutlich einfacher anhand von Modellen eine Prozessanpassung abzuleiten, die einen Porenschluss zur Folge haben.

Es hat sich gezeigt, dass das Messen der Poren nach wie vor eine Schwachstelle ist. Bei Messungen mittels Ultraschallmessung kam es teilweise zu Fehlanzeigen, sowohl was die Lage als auch die Porengröße anbelangt. Die Fehlerhäufigkeit war bei Gussgefügen mit dendritischem Gefüge höher als bei umgeformten Blöcken mit globularen Gefügeausbildungen. Als zweiter Weg wurde versucht über Computertomografie sowohl bei industriellen Anbietern als auch am Fraunhofer Anwendungszentrum CT in der Messtechnik in Deggendorf (CTMT) die Laborblöcke mittels Röntgenstrahlung zu durchdringen. Dabei konnten keine verwertbaren Auswertungen erreicht werden, so dass diese Analyse für die montane Prozesskette nicht weiterverfolgt wurde. Mithilfe der visuellen Analyse konnten die Größen und Häufigkeiten von Poren und Lunkern sehr gut erfasst werden. Allerdings bleibt einerseits die Analyse auf den entsprechenden (aufgesägten) Querschnitt beschränkt und andererseits scheidet die visuelle Porenanalyse als zerstörende Werkstoffprüfung innerhalb der Prozesskette in der industriellen Praxis aus.

Hohe Priorität für die Verlässlichkeit hinsichtlich der sich ausbildenden Poren- und Lunkerbildung ist aus prozesstechnischer Sicht in mittelbarer Zukunft der Simulation und der damit verbundenen Aussage der Porosität beziehungsweise Mikroporosität einzuräumen und den daraus abzuleitenden Maßnahmen im Folgeprozess. **Bild 5** zeigt die Porenanalyse an einem 25-kg-Block des SZF. Dabei sind die Ergebnisse der Ultraschallmessung denen der Gießsimulation und der visuellen Porenanalyse gegenübergestellt.

Position und Ausprägung kann mit der Simulation sehr gut vorhergesagt werden. Nur die genaue Diskretisierung der Poren im Kopfbereich, wie sie der visuellen Analyse entnommen werden können, sind der Simulation nicht zu entnehmen. Für diese Abweichung gibt es im Moment keine Lösung. Es bleibt eine Abweichung in dieser Ergebnisgröße parallel zu den Messabweichungen der Ultraschallmessung. Im Zuge der Modellbildung in der Simulation relativiert sich diese Problematik, da in der Modellbildung der Simulation die diskrete Ausbildung einzelner Poren nicht verfolgt wird.

4.3 Fließkurvenermittlung

Fließkurvendaten sind die wichtigste Größe in der Umformtechnik überhaupt. Sie ermöglichen die Auslegung des Umformprozesses und valide Praxisabgleiche zwischen der Realität und der FEM-Simulation, besonders bei Fragen der Kraftberechnung. Das Erzeugen von Fließkurvendaten insbesondere in der Warmumformung ist ein komplexer und aufwendiger Prozess. Wesentliches Element sind Warmstauchversuche unter möglichst idealen Bedingungen, bei denen ein isothermes Temperaturfeld die wichtigste Randbedingung ist. Die Versuche werden bei verschiedenen Temperaturen und Umformgeschwindigkeiten durchgeführt. Aus diesen Versuchen werden die Kraft-Weg-Kurven als wesentliche Größen ermittelt. Aus diesen sind wiederum die Fließkurvendaten ableitbar.

Um die Menge an ermittelten Daten sinnvoll zusammenzuführen, erfolgt danach die Übertragung in ein Fließkurvenmodell. Im SiPro-Projekt stellt das IMF in Freiberg die Fließkurvenmodelle auf, da es über eine langjährige Expertise bei der Erstellung von Materialdaten und Materialmodellen verfügt. Es hat sich in der Warmmassivumformung der Fließkurven-Modellansatz nach

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 2. Parameter des Hensel-Spittel-Fließkurvenansatzes Version 10 für den gegossenen C45.

Parameter	Wert
A	0,00334805
m_1	-0,00532803
m_2	0,194313
m_3	-0,199595
m_4	0,000079782
m_5	-0,000227636
m_7	-0,260199
m_8	-0,199595
m_9	2,37467
Standardabweichung (σ)	5,887559
Bestimmtheitswert (R^2)	0,992959

Hensel und *Spittel* [6, 7] für die analytische Beschreibung der Fließspannung durchgesetzt und findet Anwendung in kommerziellen FEM-Systemen wie „Simufact Forming“ oder „Forge“.

Die folgende Gleichung (1) zeigt den etablierten Freiberger Fließkurvenansatz nach *Hensel und Spittel* mit Berücksichtigung des dynamischen Rekristallisationsverhaltens im Material, sowie die Parameter (**Tabelle 2**), die das IMF für den Werkstoff C45 bestimmt hat. Die Formulierung nach *Hensel/Spittel* mit den folgend dargestellten Parametern bilden die Fließkurvenbasis für die Simulation des Freiformens der Gussblöcke am IMF.

$$k_{f\text{-}Ansatz\ 10}=A\cdot e^{m_1\cdot\vartheta}\cdot\vartheta^{m_9}\cdot\varphi^{m_2}\cdot e^{m_4/\varphi}\cdot(1+\varphi)^{m_5\cdot\vartheta}\cdot e^{m_7\cdot\varphi}\cdot\dot{\varphi}^{m_3}\cdot\dot{\varphi}^{m_8\cdot\vartheta} \quad (1)$$

4.4 Erstellung von Makro- und Mikroschliffbildern

Schliffbilder sind ein wichtiges Element, um in der montanen Prozesskette die Gefügeausprägungen dezidiert erfassen zu können. Sie bilden, analog zu anderen genannten Methoden, die Basis für die Gefügemodelle, um das Umwandlungsverhalten in den verschiedenen Prozessschritten abzugleichen, vor allem für den finalen Schritt der Wärmebehandlung. **Bild 6** zeigt einen Makroschliff am aufgesägten Gussblock von SWG. Sehr gut sind die Ausbildung der dendritischen Gefügebereiche in den Randzonen zu erkennen. Demgegenüber hat die Zone im Kernbereich bereits ein globulares Gefüge (orange markiert).

4.5 Praxisabgleiche mit der numerischen Simulation

Praxisabgleiche stellen seit dem Auftreten der numerischen Simulation die wichtigste Methode dar, um die Qualität des Berechnungsergebnisses zu prüfen. Gerade mit dem Auftreten verschiedener kommerzieller Lösungen erfordert der Abgleich ein standardisiertes Vorgehen, um eine qualifizierte Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Dabei unterteilt sich der Prozess des Abgleichs in zwei Schritte: Erstens die (Modell-) Kalibrierung der Simulation und zweitens der eigentliche Abgleich beziehungsweise Vergleich zwischen Praxis und Simulation. Die Kalibrierung stellt dabei eine wesentliche Herausforderung dar. Grundlegend hat es sich durchgesetzt, dass die Geometrie im weitesten Sinne zwischen der Simulation und der Praxis übereinstimmen sollte. Ebenso ist es a priori klar, dass die zugrunde gelegten Materialdaten in der Simulation jenen genau entsprechen sollten, die dem Praxisprozess zugrundeliegen. Um eine Kalibrierung zu erreichen, sollten nur technologische Parameter, beispielsweise Stichpläne, in der Variation benutzt werden, um den vergleichbaren Zustand einzustellen.

Die Art des Vorgehens bei einem Praxisabgleich findet sich in dem Standard VDI-3418 [8] wieder. Diese Richtlinie wurde zwar

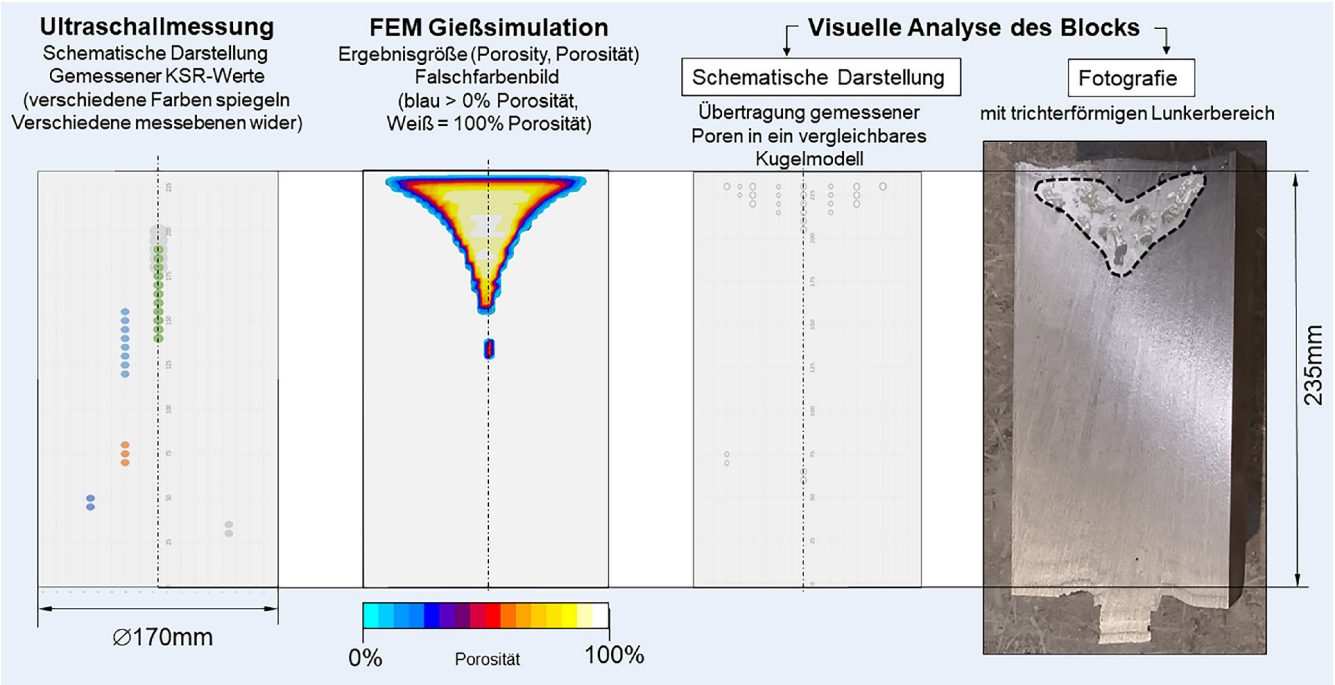

Bild 5. Poren- und Lunkeranalyse am Laborblock mit dem Werkstoff C45. *Grafik: SiPro, Professur Umformtechnik (TU Chemnitz)*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -

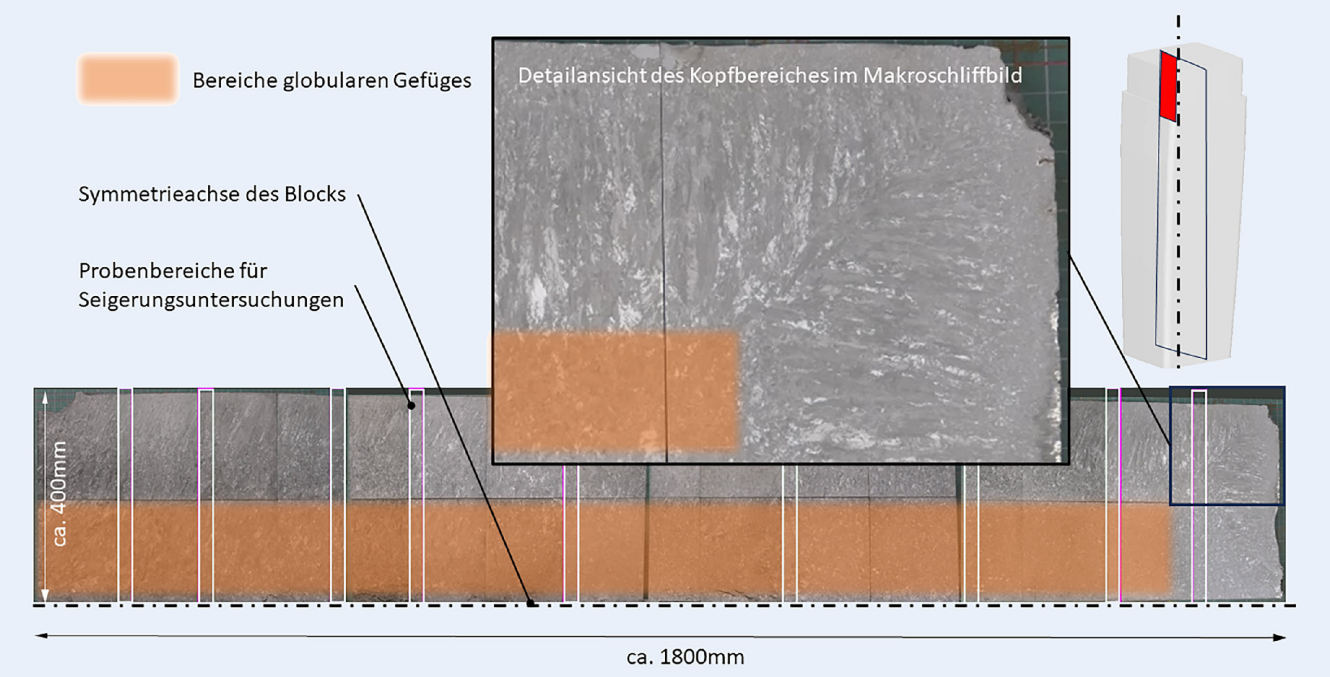

Bild 6. Makroschliff am 5,6-t-Block von SWG (Gusszustand). *Foto: SiPro, SWG*

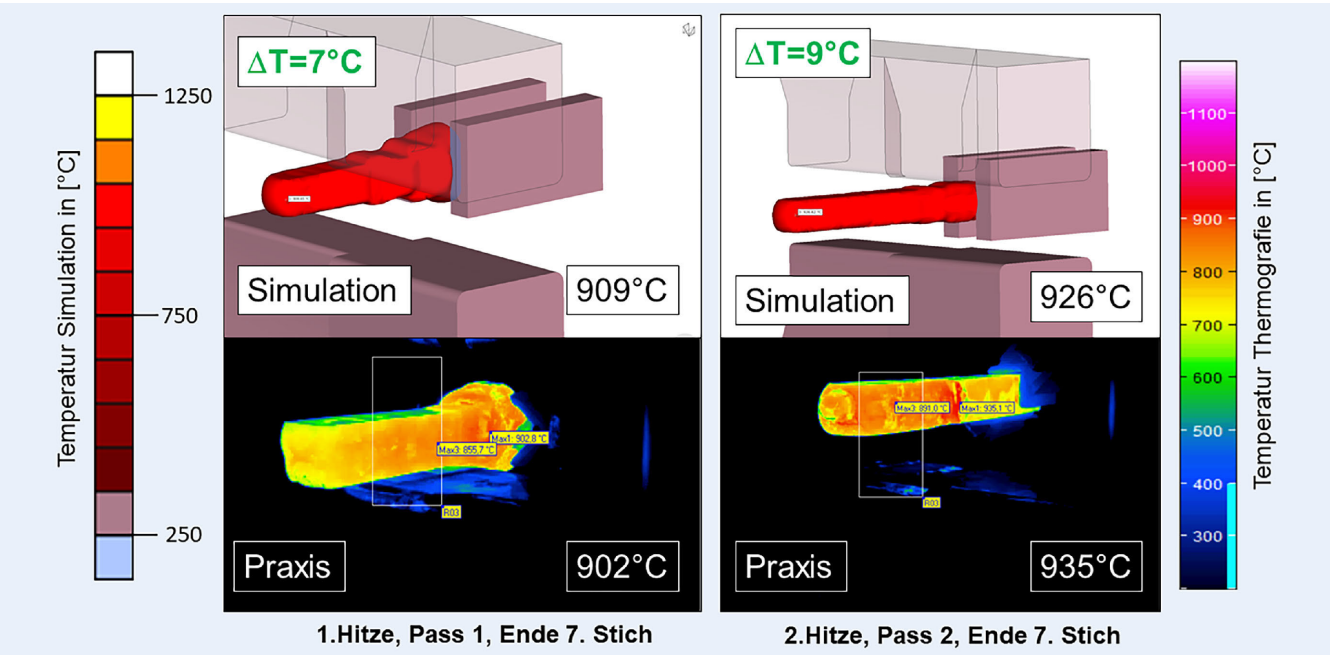

Bild 7. Temperaturkalibrierung des Freiformschmiedens im Labormaßstab am IMF in Freiberg. *Grafik: SiPro, IMF (Technische Universität Bergakademie Freiberg), Professur Umformtechnik (TU Chemnitz)*

für die Blechumformung erstellt, die Methodik kann jedoch auf die Massivumformung übertragen werden. Allerdings ist die Kalibrierung in der Massivumformung deutlich schwieriger, da es kaum Kalibriergrößen gibt. Die wichtigsten Größen für die Einstellung eines kalibrierten Zustands sind die Temperatur, die Werkzeuggeometrie und die allgemeine Kinematik im Umformprozess. Die häufigste Vergleichsgröße ist die Umformkraft. Stimmt die Umformkraft zwischen Simulation und Praxisprozess, kann daraus gefolgert werden, dass sowohl die Kinematik als auch die Materialdaten übereinstimmen und in der Folge Aussagen in Bezug zu abstrakten Größen wie dem Umformgrad plausibel sind. **Bild** 7 zeigt den partiellen Praxisabgleich hinsichtlich der Temperatur beim Freiformen am IMF. Im Bild werden am Ende des ersten und zweiten Stiches die Temperaturen zwischen der Simulation und der Thermografie-Kamera verglichen. Der Vergleich zeigt äußerst geringe Abweichungen. Generell sind Abweichungen von +/- 50 °C für einen kalibrierten Zustand tolerierbar.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

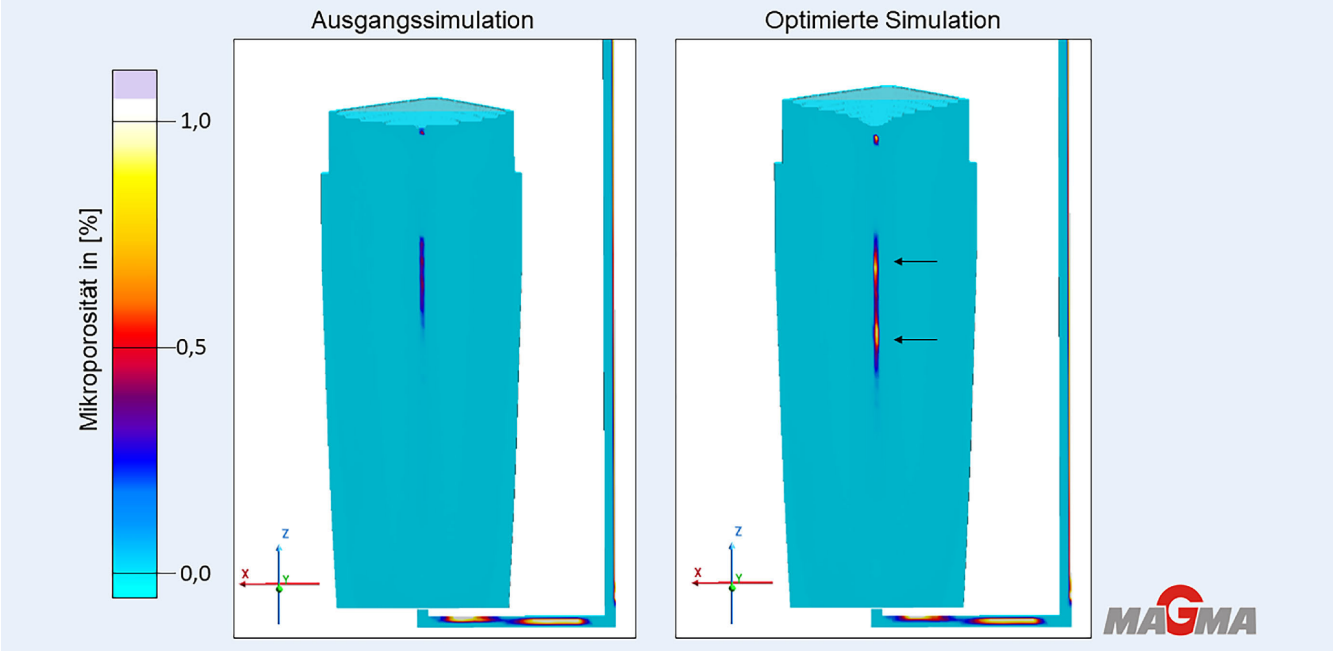

Bild 8. Vergleich des Ergebnisses Mikroporosität aus „Magmasoft"für den Standard (links) und den invers optimierten (rechts) HTC (Wärmeübergangskoeffizienten). *Grafik: SiPro, Magma Gießereitechnologie mbH*

4.6 Optimierung

Ausgehend von den Simulationsergebnissen und den Messungen beim Abkühlen im Blockguss bei SWG wurde, wie im vorigen Absatz beschrieben, ein Praxisabgleich mit einer Modellkalibrierung vorgenommen. Diese wurde ausgewählt, da eine sehr gute Datenlage bei der finalen Blockqualität vorhanden war, die einen Abgleich mit dem Ziel der Kalibrierung der Simulation mit dem realen Abguss durch einen Optimierungsansatz überhaupt erst möglich machte.

In der Gießsimulation war die ausschließliche Nutzung eines einheitlichen Wärmeübergangskoeffizienten (HTC, englisch: Heat Transfer Coefficient) nicht zielführend [9], um eine hinreichende Ergebnisübereinstimmung beim Abkühlprozess während des Blockgusses zu erreichen. So wurde ausgehend von der Modellkalibrierung eine Optimierung mit einem Reverse Engineering Ansatz, im Speziellen einer inversen Optimierung, in „Magmasoft" durchgeführt. Die Herangehensweise entspricht der Nutzung von Messdaten aus dem realen Prozess als Zielgröße und der Vorgabe von Simulationsparametern, die innerhalb physikalisch geeigneter Grenzen automatisch variiert werden. Die so gewonnenen Informationen bilden die realen Gießereibedingungen besser ab. Die ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten dienen einer verbesserten Modellbildung in der Simulation und sind auch auf andere, analoge Prozesse übertragbar.

Der Wärmeübergangskoeffizient wurde als variabler Simulationsparameter zwischen dem Block und der Kokille definiert. Dieser bestimmt die Temperaturverteilung während des Abgusses und Abkühlens des Blocks. Dazu wurden bei SWG Temperaturkurven in der Kokillenwand gemessen, siehe Abschnitt 3.4. Im Rahmen der inversen Optimierung wurden in Magmasoft korrespondierende, virtuelle Messpunkte gesetzt. Durch diesen Input und den Abgleich in der Simulation wurde dann ein temperaturabhängiger HTC ermittelt, der die Spaltbildung durch die Dichteänderung des erstarrenden und abkühlenden Blockes mitberücksichtigt. Zu diesem Zweck wurde die Methodik eines autonom arbeitenden genetischen Algorithmus über zwölf Generationen gewählt. Während des Optimierungslaufes wurden über den Verlauf von zwölf Generationen, ausgehend von einer Grundmenge, die simulierten Temperaturkurven mit den gemessenen Temperaturkurven über Annäherung des kleinsten Differenzintegrals approximiert. Insgesamt wurden drei aufeinander aufbauende Optimierungsläufe mit insgesamt 1024 Simulationen durchgeführt.

Der optimierte HTC führte zu einem veränderten Wärmeaustausch von Kokille und dem Gussblock während der Abkühlung, was auch zu anderen Ergebnissen in den qualitätsbeschreibenden Kriterien führte. Die invers angepassten Temperaturverläufe entsprachen den Messungen in den Industrieversuchen. Der Qualitätsabgleich mit den experimentell gegossenen Blöcken erfolgte anhand der Ergebnisgröße Mikroporosität in Magmasoft. Das Kriterium Mikroporosität liefert eine qualitative Abschätzung des Porositätsanteils, der unter der Modellannahme einer gerichteten Erstarrung zu erwarten ist. Zur Kalkulation werden Viskosität und Dichte der Legierung sowie thermischer Gradient als auch Abkühlgeschwindigkeit verwendet. Seine Berechnung basiert auf einer dimensionslosen Niyama-Zahl. Es ist eine deutliche Verbesserung der Modellkalibrierung in der Gießprozesssimulation durch die inverse Optimierung erkennbar, siehe **Bild 8**. Gerade die Ausprägung der Mikroporosität ist deutlich stärker als ohne den optimierten Ansatz. Die Mikroporosität ist auch gut in **Bild 9** am Gussblock von SWG direkt zu erkennen.

5 Modelle

5.1 Seigerungsmodelle

Ein weiterer wesentlicher Arbeitsschwerpunkt innerhalb des SiPro-Projekts liegt auf der Weiterentwicklung und Implementierung der Seigerungsmodelle für die Simulation mittels Magmasoft im Strangguss und Blockguss. Für die Seigerungsberechnung des Stranggusses ist noch die Berücksichtigung des elektromagneti-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

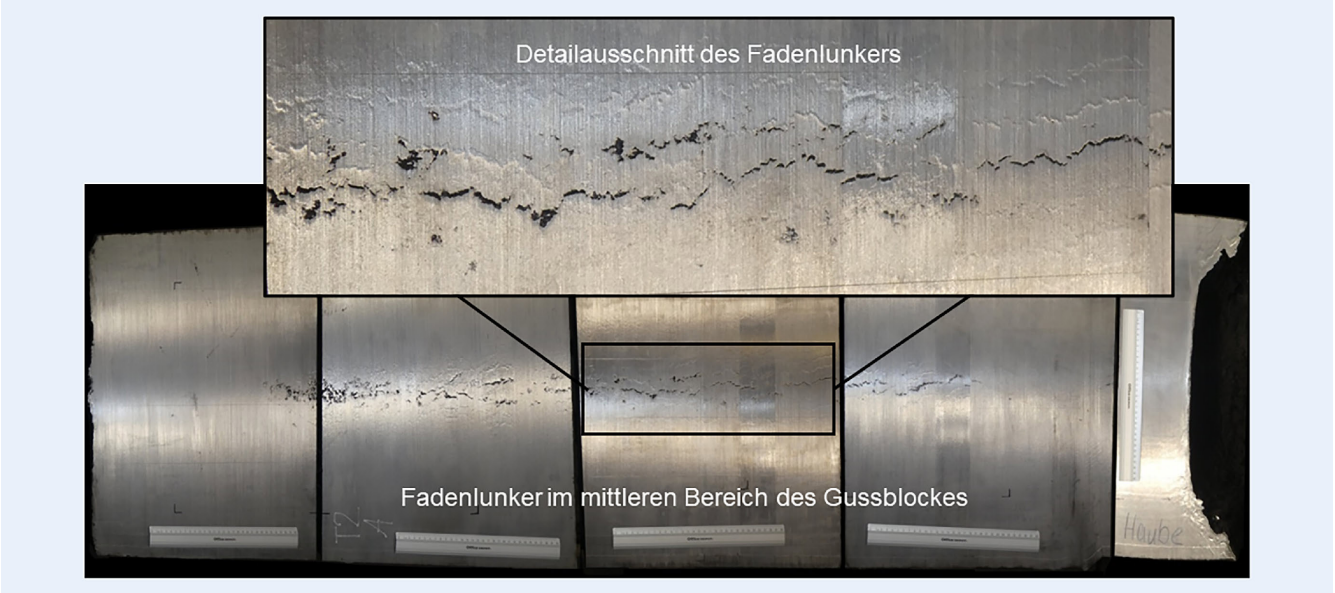

Bild 9. Ausbildung des Fadenlunkers im Gussblock von SWG korrespondierend zu den Simulationsergebnissen auf Basis der inversen Optimierung in Magmasoft. *Grafik: SiPro, SWG*

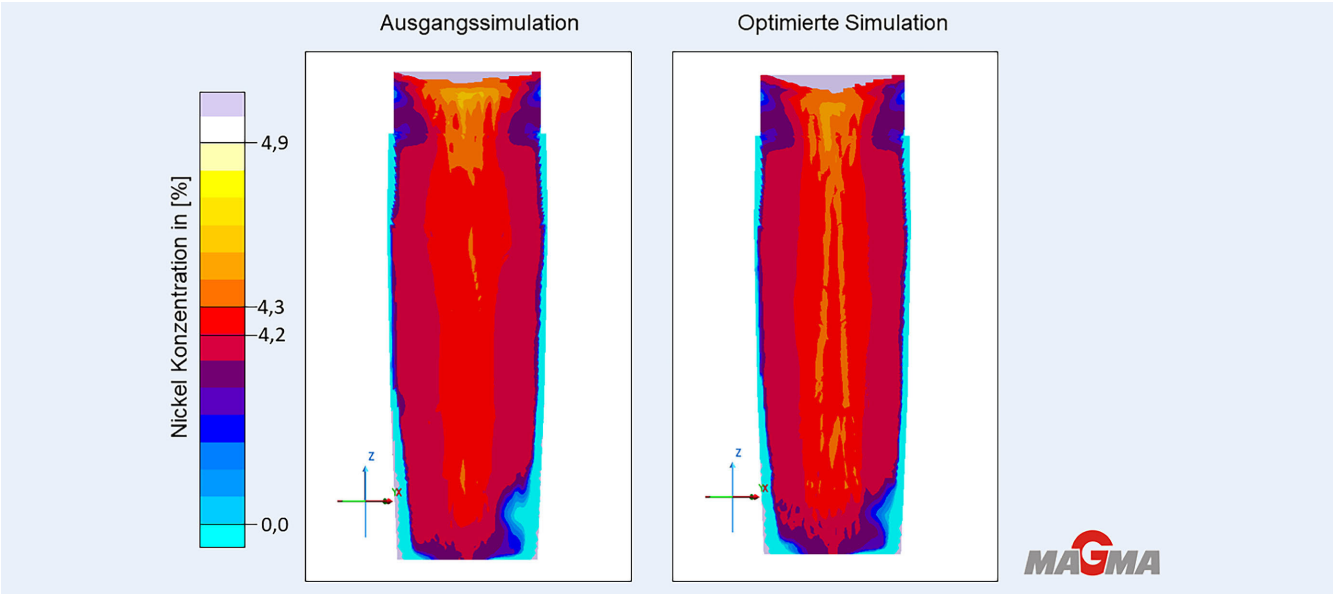

Bild 10. Ergebnisse der Seigerungsberechnung für den Legierungsbestandteil Nickel im Gussblock von SWG und dessen Veränderung zwischen der Ausgangssimualtion (links) und der Simulation mit verbesserten HTC auf Basis der inversen Optimierung (rechts). *Grafik: SiPro, Magma Gießereitechnologie mbH*

schen Rührens und der Abzugsgeschwindigkeit notwendig. Für die Seigerungsanalyse selbst ist der Materialtransport mit Entmischung für eine beliebige Anzahl von chemischen Elementen möglich und wird in der schmelzflüssigen wie auch der erstarrten Phase berechnet. Für jedes chemische Element werden dabei zwei Transportgleichungen gelöst [10, 11]:

$$g_s\rho_s\frac{\partial C_s}{\partial t}+g_s\rho_s V_s\nabla C_s=\Gamma_{sl}(\kappa C_l-C_s)+S_v\rho_s D_s\frac{\kappa C_l-C_s}{l_{sl}}$$

$$g_l\rho_l\frac{\partial C_l}{\partial t}+g_l\rho_s V_l\nabla C_l=\nabla(g_l\rho_l D_l\nabla C_l)-\Gamma_{sl}(\kappa C_l-C_l)-S_v\rho_s D_s\frac{\kappa C_l-C_s}{l_{sl}} \quad (2)$$

Die volumengemittelten Elementkonzentrationen in der flüssigen und festen Phase werden als C_l und C_s bezeichnet, die Volumenanteile der flüssigen und festen Phase entsprechend mit g_l und g_s.

Der Index des betrachteten chemischen Elements wird in obigen Gleichungen der Einfachheit halber weggelassen. Die Strömungsgeschwindigkeiten in der flüssigen und festen Phase sind V_l und V_s. Der temperaturabhängige Verteilungskoeffizient wird als κ und die temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten in den beiden Phasen als D_l und D_s bezeichnet. Γ_{sl} ist die lokale Erstarrungsrate, die über die gesamte Zeitableitung wie folgt berechnet wird

$$\Gamma_{sl}=\frac{\partial}{\partial t}(g_l\rho_s)+\nabla(g_s\rho_s V_s) \quad (3)$$

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

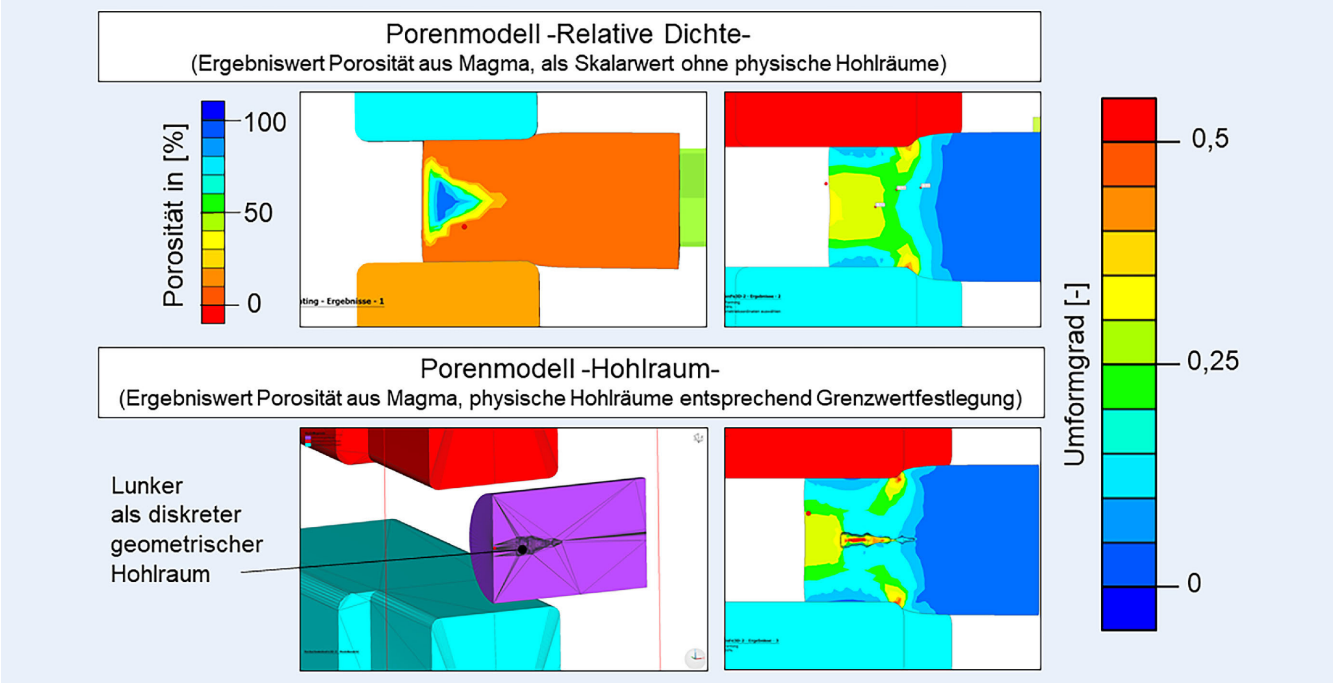

Bild 11. Gegenüberstellung der Modellbildung der Poren als konsistentes FEM-Netz mit der skalaren Ergebnisgröße „Porosität" (oben) und als diskretes Modell mit der physischen Abbildung der Poren als Hohlraum. *Grafik: SiPro, Professur Umformtechnik (TU Chemnitz)*

Das Verhältnis zwischen der Diffusionsfläche und der Diffusionslänge im Rückdiffusionsterm ist angenähert als

$$\frac{S_v}{l_{sl}} = \frac{12}{d_2^2 g_s} \tag{4}$$

mit d_2^2 als Quadrat des Abstandes der sekundären Dendritenarme. Das Ergebnis der Seigerungsberechnung kann in **Bild 10** anhand der Seigerung für das Element Nickel aus der numerischen Berechnung nachvollzogen werden.

Zusätzlich wird die Wechselwirkung zwischen optimierter Modellbildung und Seigerungsberechnung deutlich. Die Verbesserung des HTC durch die inverse Optimierung verändert auch die Ergebnisse der Seigerungsberechnung.

5.2 Porenmodellierung (Porenabbildung in der numerischen Simulation)

Neben den grundlegenden Modellen, wie dem Seigerungsmodell, ist eine weitere Frage, wie eine generelle Modellbildung in der Simulation, beispielsweise eines Freiformschmiedeprozesses, zukünftig effizient ausgeführt werden kann. Diese Fragen stellen sich vor allem hinsichtlich der einführend vorgestellten Problematik, dass eine konsistente Modellbildung von der makromechanischen bis zur mikromechanischen Modellebene hinweg in der industriellen Praxis nicht experimentierfähig ist und damit nicht effizient eingesetzt werden kann, siehe Kapitel 2.

Diese Frage ist unmittelbar mit der Modellierung von Poren und Lunkern verbunden und der Berücksichtigung des Schließverhaltens in der Umformsimulation. Aus den Porenmessungen hat sich zusätzlich gezeigt, dass es eine gewisse Unschärfe bei der Feststellung von Poren und Lunkern gibt, siehe Abschnitt 4.2, und die Messung nur im ausgekühlten Block stattfinden kann. Gerade für das Ziel der Energieeinsparung ist es zielführend, die Resthitze des gegossenen Blockes zu nutzen. Die Simulation des Gussprozesses bietet eine sehr gute Qualität bei der Berechnung von Bereichen mit Poren und Lunkern und ist im Moment die beste Möglichkeit zur Feststellung von Lunkern aus dem Gießprozess.

Um die Daten der Gießsimulation nutzen zu können, wurde die Datenschnittstelle „M2S" zwischen Magmasoft und Simufact weiterentwickelt. Mithilfe des physischen Datenaustauschformates können die Ergebnisse zwischen den beiden Programmen übergeben werden. Die Entwicklung der Schnittstelle stellt somit einen wesentlichen Punkt dar, um eine durchgehende digitale montane Prozesskette zu erreichen. In Bezug zur Porenmodellierung ist das Ergebnis „Porosity" die wesentliche Größe, die nach Simufact als Anfangsbedingung für die Schmiedesimulation weitergegeben wird. Aus der Übertragung der Schnittstelle heraus ist es möglich, die Lunker als ein diskretes physisches Porenvolumen zu übertragen. Ebenso kann die Ergebnisgröße Porosity als eine skalare Größe an den Netzknoten an Simufact innerhalb eines konsistenten FEM-Netzes, ohne physische Hohlräume, übergeben werden.

Laut der Arbeiten im Projekt stellt ein konsistentes FEM-Netz die beste Modellierungsvariante dar. Dies ergibt sich maßgeblich durch das Remeshing im Bereich von physischen Poren, welches anfällig ist für Vernetzungsfehler. Gleichzeitig kann die Kontaktfindung zwischen gegenüberliegenden Porenseiten beim Porenschluss ebenso zu Kontaktfehlern führen. Die Fehler führen zu Instabilitäten im Simulationsprozess und somit zu häufigen Simulationsabbrüchen. Im Sinne der Integrierbarkeit in eine Entwicklungsprozesskette und einer experimentierfähigen Simulation ist diese Art der Modellbildung aktuell keine adäquate Lösung. Die Unterschiede in der beschriebenen Modellbildung sind in **Bild 11** dargestellt.

In der Literatur finden sich eine Reihe von Modellansätzen [12–16], die die Vorhersage des Porenschlusses im Fokus haben. Sehr viele Ansätze gehen von einer mikromechanischen Betrachtung der Poren aus. Das heißt, die Poren werden als physikali-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

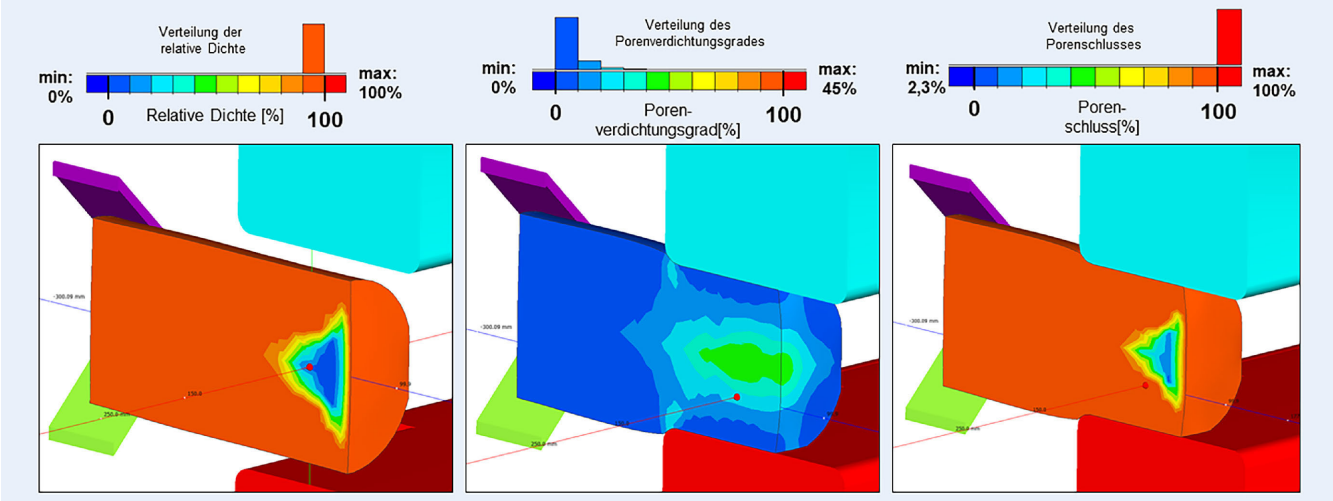

Bild 12. Kombination der Größe „relative Dichte" auf Basis der Berechnung in Magmasoft mit der Größe Porenverdichtungsgrad zum Ergebnis Porenschluss. *Grafik: SiPro, Professur Umformtechnik (TU Chemnitz)*

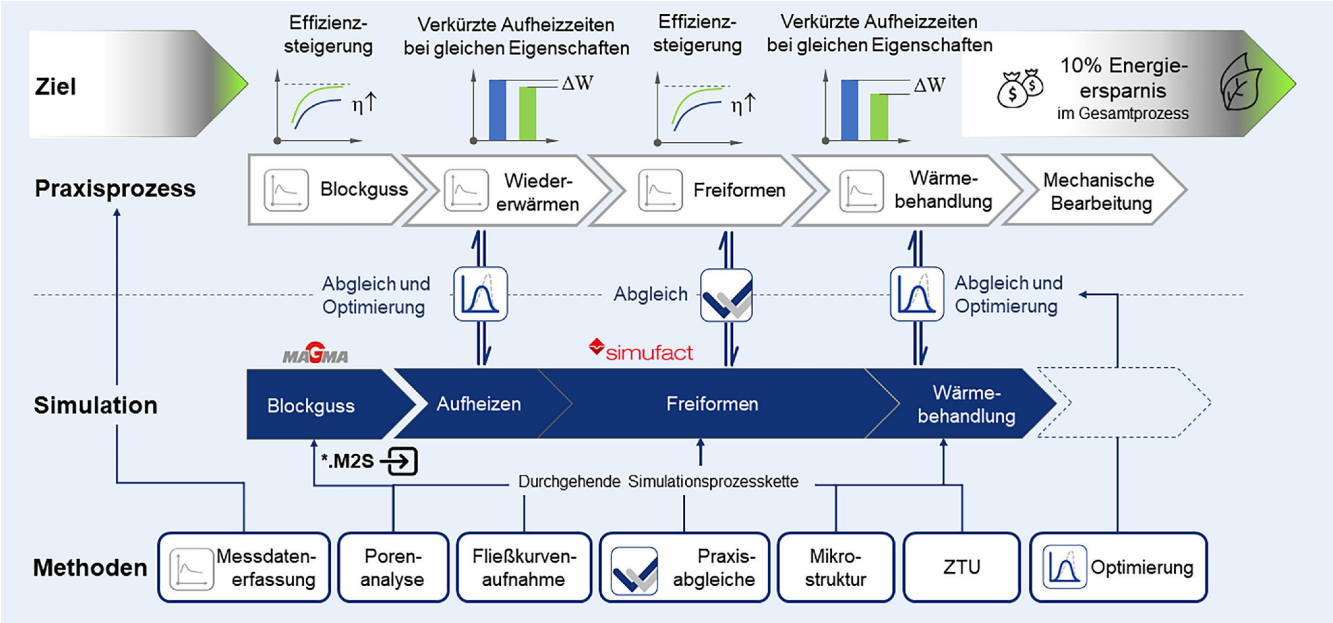

Bild 13. Verknüpfung der Projektbestandteile zum Gesamtziel des Projektes - Reduzierung der eingesetzten Energie.
Grafik: SiPro, Professur Umformtechnik (TU Chemnitz)

scher Hohlraum gesehen mit dem Ziel, eine korrekte Feststellung des Spannungsfeldes im Bereich der Porengeometrie zu berechnen. Obwohl nicht im SiPro-Arbeitsplan vorgesehen, erfolgten aus den dargelegten Betrachtungen und für eine entsprechende Berechnung des Porenschlusses im Projekt Untersuchungen zum rheologischen Schließverhalten von Poren in Volumenkörpern.

Es wurde ein makromechanischer Ansatz als Porenschließmodell gewählt, der im Wesentlichen einer einfachen, verständlichen, anpassbaren und implementierbaren Beschreibung folgen sollte. Für dieses Modell wurden die Größen Porenverdichtungsgrad (PVG) und Porenschluss (PS) definiert. Beide Größen werden mittels Subroutine im Postprozessing der Simulation integriert und liefern eine visuelle Darstellung wie die „nicht physischen" Poren, die skalare Größe „relative Dichte", während der Umformung geschlossen wird. Die relative Dichte ergibt sich als Anfangsbedingung aus der Übertragung der M2S-Schnittstelle aus Magmasoft mit der Größe Porosity. Als bestimmende Größe für den Porenschluss wurde der Umformgrad festgestellt. Weitere Parameter, welche das Modell kompliziert werden lassen, konnten weitestgehend vermieden werden. Ausgangspunkt ist der definierte Porenverdichtungsgrad, wie er in der folgenden Gleichung (5) dargestellt ist:

$$PVG(\varphi) = \frac{V_{p0} - V_p(\varphi)}{V_{p0}} \times 100\% \qquad (5)$$

Diese Gleichung wurde weiterentwickelt. Für das Porenvolumen $V_p\ \varphi$ und dessen Abhängigkeit vom Umformgrad wurde eine Schließfunktion auf Basis eines Avrami-Gleichungsansatzes entwicklet. Die Basis für die Bestimmung der Koeffizienten bildete dabei eine Parameterstudie im Projekt. Der finale PVG ist wie folgt definiert:

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -

$$PVG(\varphi) = 100 \cdot \frac{1}{1+e^{(-5{,}0(2{,}0\cdot\varphi-0{,}75))}} \quad (6)$$

Ähnliche Ansätze finden sich bereits in der Literatur [12]. Der dargestellte Zugang erlaubt eine schnelle Variation des PVGs um verschiedene Modelle, indem die Gleichungen ausgetauscht oder adaptiert werden. Wichtig ist in der Herangehensweise, dass der Porenverdichtungsgrad nur als Potenzial definiert ist, nach welchem sich die Poren in Abhängigkeit des Umformgrads verhalten. Die Größe selbst ist unabhängig von der Ausgangsgröße der relativen Dichte. Erst die finale Größe Porenschluss verknüpft beide Ergebnisgrößen miteinander, so dass das Ergebnis der Umformung auf die Ausgangsporen dargestellt werden kann. **Bild 12** zeigt die geschilderte Umsetzung der Modellbildung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einzelaspekte aus den Kapiteln „Experimentelle Untersuchungen“, „Methoden“ und „Modelle“ sind entsprechend **Bild 13** miteinander durch die Eingangsprozesskette (vergleiche Bild 1) verbunden, schlussendlich aber mit allen Bestandteilen innerhalb der betrachteten Prozessketten.

Mit dem erfolgreichen Abschluss des SiPro-Projektes Ende 2024 sollen aus den gewonnenen Erkenntnissen bis zu 10 % Einsparungen an elektrischer Energie in den Prozessketten möglich werden. Diese ergeben sich beispielsweise durch eine Verkürzung von Ofenhaltezeiten beziehungsweise einer Absenkung der Temperaturen während des Aufheizens, dem Zwischenerwärmen oder der Wärmebehandlung. Die konsequente, durchgehende Abbildung des realen Prozesses in der numerischen Simulation gewährleistet, dass mit der Veränderung im Prozess die qualitativen Merkmale des Halbzeugs hinsichtlich der Korngröße, der Phasenbestandteile und somit die finalen mechanischen Eigenschaften weiterhin gewährleistet werden.

Weitere Potenziale ergeben sich aus der Optimierung in den Umformschritten und die generelle Reduzierung von Ausschuss, beispielsweise bei den erlaubten Restporengrößen. Es werden aber auch Wege und Ansatzpunkte gezeigt, wie aus den Erkenntnissen des Projektes Empfehlungen für neue Forschungs- und Handlungsaspekte abgeleitet werden.

Ein Fokus, der sich aus den Arbeiten innerhalb des Projektes ergab, ist die Handhabung der Materialdaten. Die permanente Kopplung der Materialeigenschaften an die Geometrie, im Speziellen an das FE-Netz aus der Simulation, ist ein Aspekt, der grundlegend aufgebrochen werden sollte. Das Ziel, insbesondere für durchgehende Prozessketten, sollte sein, Materialdaten in der Simulation zu entkoppeln und exportieren zu können, so dass die Übergabe an andere FE-Programme möglich ist. Ein Weg kann dabei ein unabhängiges Materialdatenformat sein.

DANKSAGUNG

Der Autor bedankt sich an dieser Stelle bei allen Projektpartnern für die kooperative Zusammenarbeit insbesondere für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Veröffentlichung. Ferner gilt der Dank der Projektleiterin Frau Prof. *Awiszus*, allen Projektbeteiligten, dem Projektträger Jülich sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die finanziellen Unterstützung im Rahmen dieses Projektes.

Literatur

[1] Hatzenbichler, T.; Harrer, O.; Buchmayr, B.: Entwicklungsstand und Nutzen der FEM-Simulation von Massivumformprozessen. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 151 (2006), S. 469–474, doi.org/10.1007/BF03165209
[2] Banabic, D.: Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation. Berlin: Springer Verlag 2010
[3] Yanagimoto, J.; Banabic, D.; Banu, M. et al.: Simulation of metal forming - Visualization of invisible phenomena in the digital era. CIRP Annals 71 (2022) 2, pp. 599–622, doi.org/10.1016/j.cirp.2022.05.007
[4] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen. Berlin: Springer Vieweg Verlag 2013
[5] Tekkaya, A. E.: State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology 103 (2000), 1, pp. 14–22, ISSN 0924–0136, doi.org/10.1016/S0924–0136(00)00413–1.
[6] Hensel, A.; Spittel, T.: Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren. Leipzig: VEB Verlag für Grundstoffindustrie 1978
[7] Spittel, T.; Spittel, M.: Ferrous alloys. Landolt-Börnstein, Materials. Berlin: Springer Verlag 2007, pp. 34ff
[8] VDI Gesellschaft: VDI 3418:2013–04: Durchführung von Benchmarks der FE-Simulation in der Blechumformung Planung, Durchführung, Auswertung, Interpretation und Dokumentation von Praxisversuchen. Berlin: Beuth Verlag
[9] VDI Gesellschaft:VDI Wärmeatlas. Heidelberg: Springer Verlag 2005
[10] Schneider, M. C.; Beckermann, C.: Formation of macrosegregation by multicomponent thermosolutal convection during the solidification of steel. Metallurgical and Materials Transactions A26 (1995), pp. 2373–2388, doi.org/10.1007/bf02671251
[11] Pickering, E. J.: Macrosegregation in Steel Ingots: The Applicability of Modelling and Characterisation Techniques. ISIJ International 53 (2013) 6, pp. 935–949
[12] Kittner, K.; Wiesner, J.; Kawalla, R.: A New Approach for Void Closure in Bulk Metal Forming. Key Engineering Materials 716 (2016), pp. 595–604
[13] Zhang, X.; Ma, F.; Ma, K. et al.: Multi-scale Analysis of Void Closure for Heavy Ingot Hot Forging. Modern Applied Science 6 (2012)10, pp. 15–25, doi.org/10.5539/mas.v6n10p15
[14] Chao, F.; Zhenshan, C.; Xiaoqing, S.; Xinjia, L.: Mesoscale Modeling of 3-d Voids Evolution in Large Ingot during Multi-Hit Deformation. Proceedings of the 3rd World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME 2015), pp. 237–244
[15] Xu, B.; Sun, M.; Li, D.: The void close behavior of large ingots during hot forging. Acta Metallurgica Sinica 48 (2012) 10, pp. 1194–1200, dx.doi.org/10.3724/SP.J.1037.2012.00339
[16] Hibbe, P.; Wolfgarten, M.; Hirt, G.; Investigation of void closure in open-die forging considering changing load directions. Production Engineering 13 (2019) 6, pp. 703–711, doi.org/10.1007/s11740–019–00924–0

Dr.-Ing. Kai Kittner
kai.kittner@mb.tu-chemnitz.de
Tel. +49 371 / 531-35839
Foto: Professur Umformtechnik (TU Chemnitz)
Professur Umformtechnik
Technische Universität Chemnitz
Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz
www.tu-chemnitz.de/mb/uff

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-125 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -