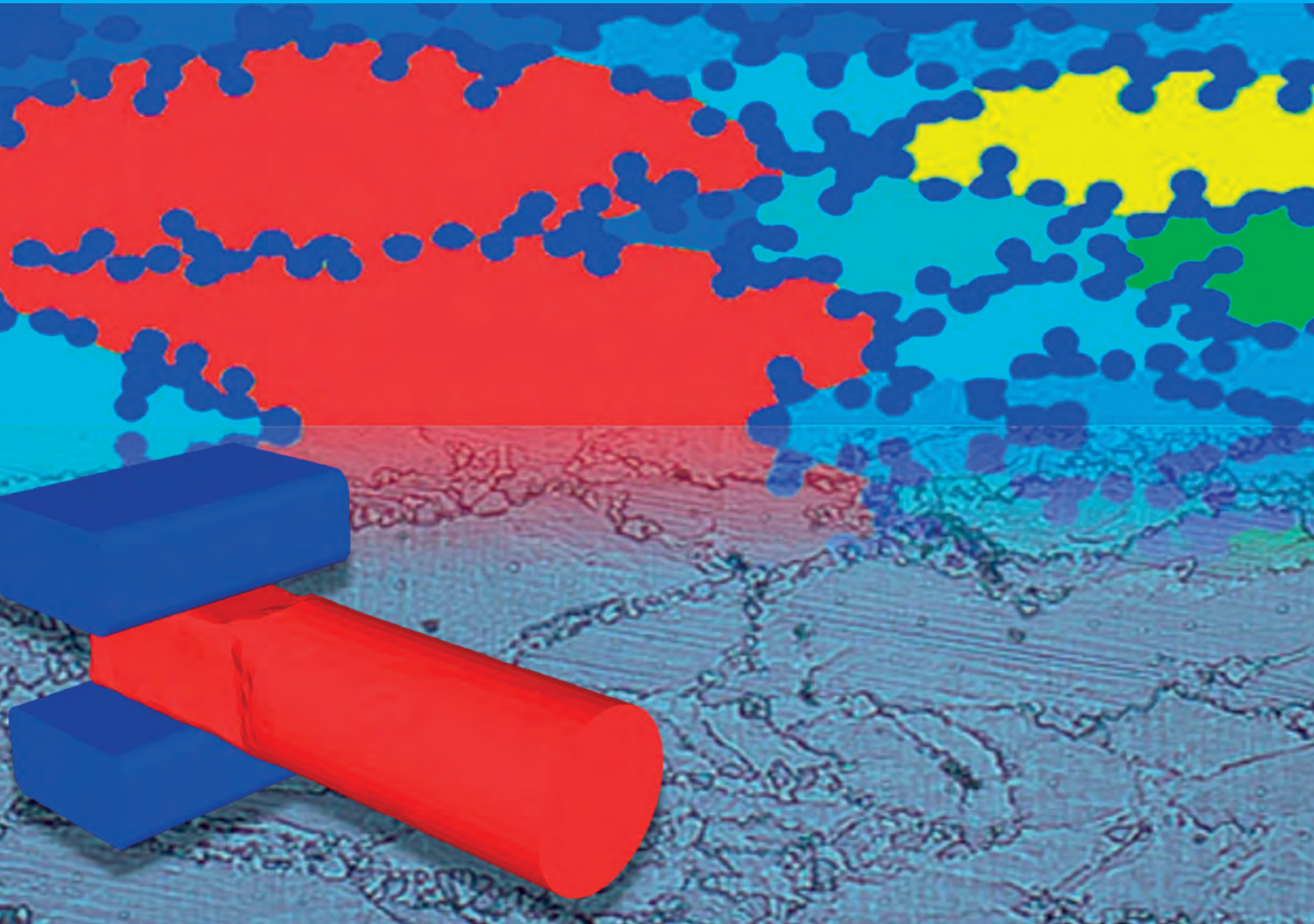


Korngrößenvorhersage beim Freiformschmieden von Inconel 718 mit DIGIMU®



Die Vorhersage der Mikrostrukturentwicklung während der Warmumformung ist eine herausfordernde Aufgabe, da sie über die gesamte Prozesskette von verschiedenen komplexen metallphysikalischen Mechanismen bestimmt wird. Die Einstellung einer gezielten Mikrostruktur bleibt dennoch von höchster Bedeutung, weil sie für die mechanischen Eigenschaften der finalen Produkte maßgeblich verantwortlich ist. Mikrostrukturmodelle können hierbei eine wichtige Rolle spielen, da sie bei reduziertem Versuchsaufwand für unterschiedliche Prozessbedingungen angewandt werden können und Aussagen über die jeweilige Korngrößenentwicklung ermöglichen.

AUTOREN



Holger Brüggemann, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Institut für Bildsame Formgebung (IBF)
der RWTH Aachen University



Angela Quadfasel, M.Sc.

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und
Gruppenleiterin der Werkstoffmodellierung I
am Institut für Bildsame Formgebung (IBF)
der RWTH Aachen University



Dipl.-Ing. (FH) Jürgen A. Nietsch, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Institut für Bildsame Formgebung (IBF) der
RWTH Aachen University



Dr.-Ing. Marco Teller

ist Oberingenieur
am Institut für Bildsame Formgebung (IBF)
der RWTH Aachen University



Dr. Pascal de Micheli

ist Entwickler und Produktmanager
von DIGIMU® bei TRANSVALOR S.A. in Biot,
Frankreich



Dr. Baptiste Flipon

ist Forschungsingenieur
am CEMEF MINES ParisTech
für den industriellen Lehrstuhl DIGIMU®



Prof. Marc Bernacki

ist Lehrstuhlinhaber
am CEMEF MINES ParisTech
für den industriellen Lehrstuhl DIGIMU®.

Die Herausforderung in der Industrie liegt aktuell darin, für den jeweils individuellen Prozess ein geeignetes Mikrostrukturmodell auf dem Markt zu identifizieren und eine zuverlässige Parametrisierung des Materialmodells zu erreichen. Ein solches Vorgehen ist erforderlich, um verlässliche Ergebnisse für variable Prozessrandbedingungen mit dem Mikrostrukturmodell zu erzeugen. Im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Institut für Bildsame Formgebung (IBF) der RWTH Aachen University, dem französischen Softwarehersteller TRANSVALOR S.A. und dem CEMEF MINES ParisTech ist ein erstes Materialmodell für den Werkstoff Inconel 718 für die neue Simulationssoftware DIGIMU® entstanden. Dabei erfolgte die Charakterisierung des Materials mithilfe von Warmstauchversuchen, Spannungsrelaxationsversuchen und Lichtmikroskopie, sodass ein breites Fenster von Prozessrandbedingungen mit verhältnismäßig geringem Versuchsaufwand durch die Charakterisierung abgedeckt werden konnte.

MOTIVATION

Mikrostruktursimulationen können ein effizientes Tool sein, um ein tieferes Verständnis von industriellen Umformprozessen zu ermöglichen und eine Korrelation zwischen den Prozessbedingungen, der Mikrostruktur und den finalen mechanischen Eigenschaften herzustellen. Die oft in der Industrie angewandten JMAK-(Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov-)Mikrostrukturmodelle bieten zwar eine leichte Handhabung, haben

aber den Nachteil, dass sie durch den rein empirischen Ansatz einen engen Gültigkeitsbereich bezüglich der Ausgangsmikrostruktur oder Änderungen des Ausscheidungszustands während des Prozesses haben. DIGIMU® wiederum ist eine FE-(Finite-Elemente-)Software zur Modellierung der Mikrostrukturentwicklung, die der französische Softwarehersteller TRANSVALOR S.A. in Zusammenarbeit mit dem CEMEF Mines ParisTech für die Problemstellungen der Industrie entwickelt hat. Sie basiert auf einem Vollfeldansatz und bietet die Möglichkeit, auf der Polykristallskala mithilfe eines repräsentativen Volumenelements mit zahlreichen Körnern die Korngrößenentwicklung zu simulieren. So lässt sich während der Simulation unter anderem die Entwicklung der Kornmorphologie oder auch der Versetzungsdichte orts aufgelöst verfolgen. Der Parametersatz eines Materialmodells ist für eine Vielzahl von Mikrostrukturzuständen – inklusive Ausscheidungen – verwendbar, sodass ein weiter Gültigkeitsbereich vorliegt und die Möglichkeit besteht, auch mehrstufige Industrieprozesse abzubilden.

In einer Kooperation des IBF mit TRANSVALOR und dem CEMEF entstand ein erstes Materialmodell für Inconel 718 für einen weiten Bereich an Kombinationen der Prozessrandbedingungen in DIGIMU®. Dies ermöglicht die Vorhersage der Mikrostruktur im relevanten Temperatur- und Dehnratenbereich für Schmiedeprozesse und wurde anhand eines Freiformschmiedeversuchs im Industriemaßstab am IBF validiert.

MODELLBESCHREIBUNG DIGIMU®

Die Mikrostruktursimulation mit DIGIMU® erfordert eine gute Repräsentation der initialen Mikrostruktur. Hierfür ist der Anwender nicht auf eine mittlere Korngröße beschränkt, sondern kann eine Korngrößenverteilung, Zweitphasenpartikel und Vorverformung in Form einer höheren Versetzungsdichte vorgeben. Dabei ist es möglich, die Mikrostrukturdaten statistisch aus Gefügebildern zu gewinnen oder die Kornstruktur direkt aus einer EBSD-Aufnahme einzulesen [1]. Das initiale FE-Netz sowie die Netzanpassung während der Simulation sind automatisiert, dadurch muss der Nutzer keine spezifischen numerischen Parameter vorgeben. Bild 1 zeigt eine beispielhafte Mikrostruktur aus DIGIMU® mit Aufteilung der Körner nach einer Level-Set-Methode [2] sowie die Vernetzung der Korngrenzen innerhalb eines Volumenelements mit der Vorgabe von Zweitphasenpartikeln [3].

Die Kinetik der Korngrenzen ist definiert durch zwei physikalische Mechanismen: den Druck aufgrund von Kapillarität der Korngrenzenschnittstellen, das heißt die Reduzierung der Korngrenzenergie durch Verkleinerung der Grenzflächen, sowie die gespeicherten Energiegradienten an den Korngrenzenschnittstellen zwischen benachbarten Körnern. Die Mobilität einer Korngrenze wird über eine temperaturabhängige Arrheniusbeziehung beschrieben. Eine durch Zweitphasenpartikel hervorgerufene Krümmung der Korngrenzen ändert die Geschwindigkeit automatisch, sodass ein zusätzlicher Term für eine Zenerspannung aufgrund von Partikeln in DIGIMU® nicht berücksichtigt werden muss [2].

Physikalisch basierte Modelle sind in DIGIMU® implementiert, um die Entwicklung der Versetzungsdichte während der Ver-

und Entfestigung sowie die Keimbildung der Rekristallisation (RX) zu beschreiben. Die Keimbildung erfolgt an den Grenzen verformter Körner, und sobald ein Keim für ein rekristallisiertes Korn entsteht, folgt das Wachstum denselben Gesetzen der Korngrenzenbewegung, die für alle Körner in der Mikrostruktur gelten [2].

PARAMETRISIERUNG EINES MATERIALMODELLS

Prinzipiell müssen in der vorgestellten Software vier metallphysikalische Mechanismen für ein vollständiges Materialmodell parametrisiert werden: das Kornwachstum, die dynamische Ver- und Entfestigung, die dynamische Rekristallisation (DRX) und die statische Rekristallisation (SRX). Die von TRANSVALOR vorgeschlagene Vorgehensweise (Bild 2, links) besteht dabei in einer möglichst klaren Trennung der verschiedenen Mechanismen während der Charakterisierung. Um das Kornwachstum charakterisieren zu können, müssen Glühversuche bei verschiedenen Temperaturen und Haltezeiten durchgeführt werden. Die Parameterermittlung für das Kornwachstumsmodell in der Software erfolgt dann auf Basis der experimentellen Ergebnisse iterativ mithilfe mehrerer Simulationen.

Die dynamische Ver- und Entfestigung wird mittels Fließkurven aus Stauchversuchen bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten charakterisiert. Für DIGIMU® werden dann die Parameter für ein Verfestigungsmodell nach der Yoshie-Laasraoui-Jonas-Methode [4,5] für die Fließkurven bis zum Start der DRX bestimmt (Bild 3, links). Für die Charakterisierung der DRX wird ebenfalls die Durchführung von Stauchversuchen empfohlen, die bei unterschiedlichen Umformgraden unterbrochen werden, um die RX-Anteile für den entsprechenden Umformgrad per

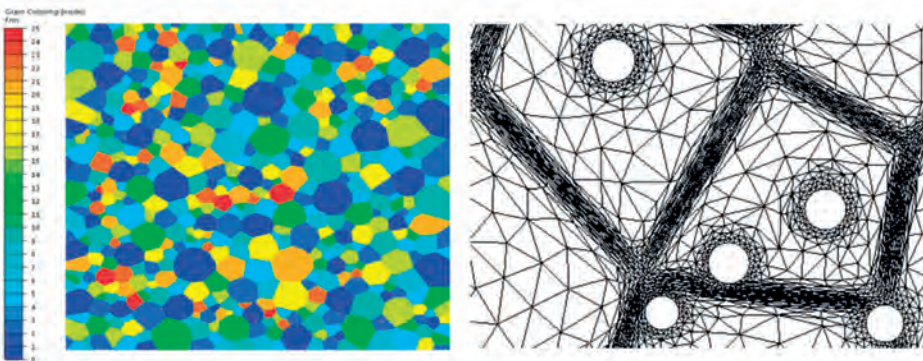
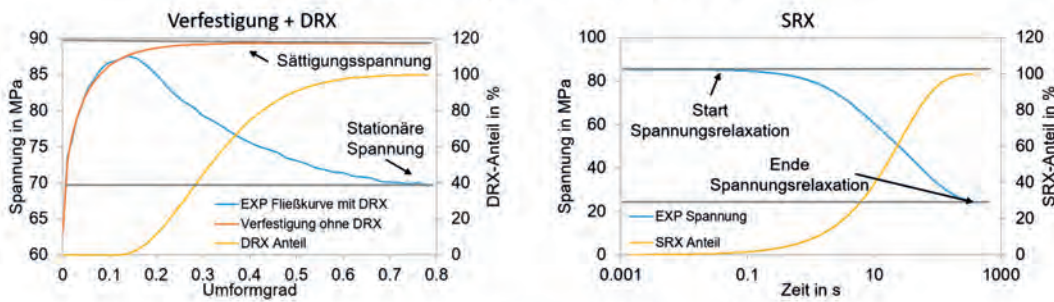


Bild 1: Beispielhafte Mikrostruktur aus DIGIMU® mit Aufteilung der Körner nach einer Level-Set-Methode [2] (links) und Übersicht der automatischen Netzgenerierung entlang Korngrenzen und Zweitphasenpartikeln [2] (rechts)



Bild 2: Charakterisierungs- und Parametrisierungsprozess in DIGIMU® (links) und angepasst durch das IBF (rechts)

Charakterisierung des Materialverhaltens



Gültigkeitsbereich des Materialmodells

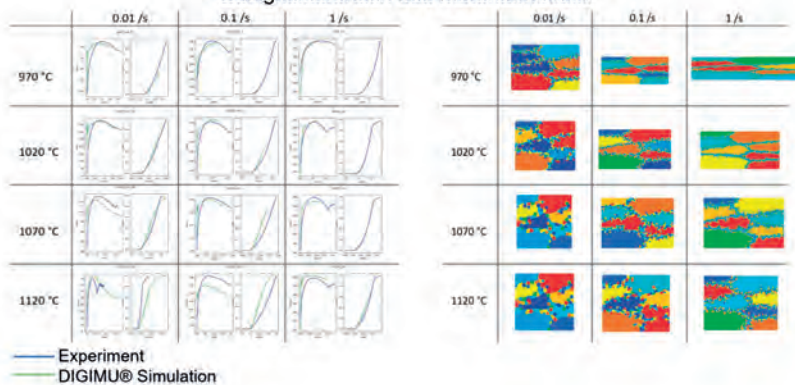


Bild 3: Darstellung der verwendeten Charakterisierungsmethode und Ergebnisse des Parametrisierungsprozesses

EBSD-Messung zu bestimmen. Für die SRX werden Stauchversuche bei einem niedrigen Umformgrad abgebrochen, wenn etwa 5 bis 20 Prozent DRX vorliegen, und die Probe wird bei der entsprechenden Versuchstemperatur für unterschiedliche Haltezeiten weitergeglüht. Der RX-Anteil wird wiederum mittels EBSD bestimmt. Insbesondere die letzten beiden Schritte erfordern einen hohen Versuchs- und Kostenaufwand, da viele abgebrochene Versuche und EBSD-Messungen benötigt werden, um einen ausreichenden Datensatz für die Parametrisierung der Modelle zur Verfügung zu haben. Dies kann für die Industrie durchaus unattraktiv sein, da es hinsichtlich der Kosten und des Aufwands keinen wesentlichen Vorteil zur herkömmlichen Trial-and-Error-Methodik für einzelne Problemstellungen darstellt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeitete das IBF einen Parametrisierungsprozess mit reduziertem Versuchsaufwand für die DRX und SRX (Bild 2, rechts). Beim Ausgangsmaterial handelt es sich um einen lösungsgeglühten Halbzeugstab aus Inconel 718 mit einem initialen Kornradius von 45 μm . Lichtmikroskopisch waren keine Zweitphasenpartikel feststellbar. Anhand der für die Parametrisierung der Verfestigung bereits vorliegenden Fließkurven wurde aus den Stauchversuchen ein DRX-Modell auf Basis einer JMAK-Gleichung nach den Methoden von Sellars [5] und Laasraoui und Jonas [6] abgeleitet. Daraus konnte der RX-Anteil in Abhängigkeit des Umformgrads aus der Differenz von experimenteller Fließkurve mit Entfestigung durch DRX und berechneter Verfestigungskurve abgeleitet werden (Bild 3, links oben). Die Charakterisierung der SRX erfolgte auf Basis von Spannungsrelaxationsversuchen. Hierbei wurden die RX-Anteile aus der Spannungsrelaxationskurve nach der Karjalainen-Methode [7] berechnet (Bild 3, rechts oben). Validiert wurden die beiden verwendeten Ansätze zur Ermittlung der RX-Anteile anhand lichtmikroskopischer Untersuchungen ausgewählter Prozessrandbedingungen sowie einer EBSD-Messung.

Die Vorgehensweise spart sowohl zusätzliche Stauchversuche zur Parametrisierung der DRX und SRX als auch die EBSD-Messungen ein.

Der reduzierte Versuchsaufwand bei der vom IBF vorgeschlagenen Charakterisierungsmethode ermöglicht die Abdeckung eines weiten Felds an Kombinationen von Umformgeschwindigkeit und Temperatur für die Parametrisierung der Verfestigung und DRX (Bild 3, unten). Mit dem daraus entstandenen Materialmodell lassen sich die Fließkurven und RX-Anteile für ein weites Prozessfenster verlässlich mit der Software abbilden. Neben dem mechanischen Verhalten wird auch die Mikrostruktur, hier am Beispiel der Anzahl und Größe der DRX-Keime, für verschiedene Prozessrandbedingungen physikalisch sinnvoll abgebildet.

SIMULATION DER FINALEN KORNGRÖSSE BEIM FREIFORMSCHMIEDEN

Das zuvor parametrisierte Materialmodell für Inconel 718 wurde in einem nächsten Schritt anhand eines Freiformschmiederversuchs validiert. Um ein Endmaß von 108 x 102 mm zu erreichen, erfolgte das Schmieden des \varnothing 160 x 550 mm Halbzeugstabs in sechs Stichen. Die Schmiedestarttemperatur betrug 1.020 °C und erforderte eine Rückerwärmung nach dem vierten Stich.

Zur Validierung wurde zunächst der Schmiederversuch in einem FORGE®-Modell nachgebildet, und es wurden sechs Stiche simuliert (Bild 4, oben). Innerhalb der FE-Simulation wurden drei Sensoren über den Querschnitt definiert (im Kern, Übergang und Rand), anhand derer die lokalen Prozessrandbedingungen (Temperatur $T(t)$ und Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}(t)$) für jeden Sensor für eine eigene Simulation mit DIGIMU® extrahiert wurden. Die Randbedingungen sind für die erste Hitze (Stich 1 bis 4) beispielhaft in Bild 4 dargestellt.

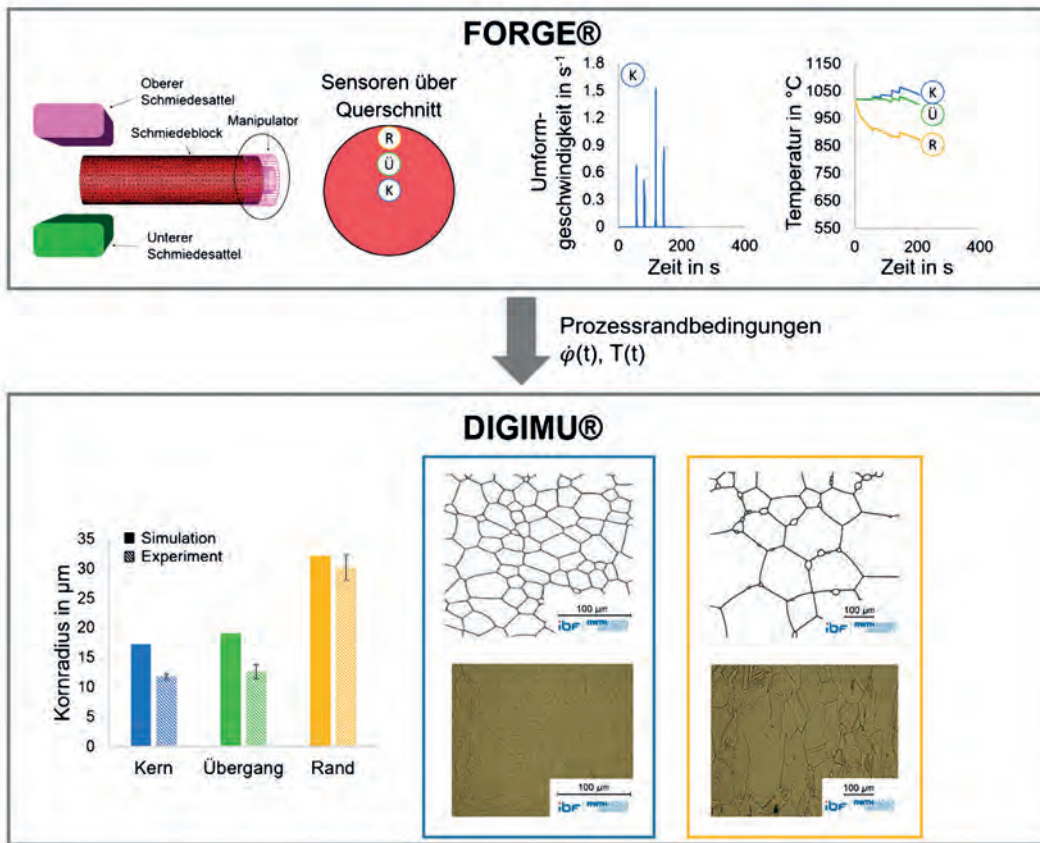


Bild 4: Abbildung des Schmiedemodells in FORGE® (oben) und der Simulationsergebnisse der Mikrostrukturentwicklung in DIGIMU® (unten)
Bilder: Autoren

Zwischen Experiment und DIGIMU®-Simulation zeigte sich eine gute Übereinstimmung des mittleren Kornradius nach sechs Stichen (Bild 4, unten). Die Simulationen im Kern und im Übergang liegen dabei etwa 4 bis 5 µm über den experimentellen Kornradien, im Randgebiet liegt die Abweichung bei 2 µm. Der qualitative Vergleich der Mikrostrukturbilder zeigt ebenfalls gut übereinstimmende Ergebnisse. Im blauen Rahmen in Bild 4 sind die Ergebnisse des Kerns zu sehen, wobei in beiden Fällen eine vollständig rekristallisierte Mikrostruktur zu erkennen ist. Für den Randbereich im gelben Rahmen zeigt sich für Experiment und Simulation jeweils ein teilrekristallisiertes Gefüge mit wenigen rekristallisierten Körnern an den Korngrenzen der verformten Körner.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bei DIGIMU® handelt es sich um ein nützliches Tool, um lokal die Mikrostrukturentwicklung während komplexer Warmumformprozesse zu verfolgen. Mithilfe der Software lassen sich zum Beispiel abnormales Kornwachstum nachvollziehen und verschiedene Prozesswege und deren Einfluss auf die Mikrostruktur untersuchen. Eine effiziente Verwendung als Tool zur Prozessoptimierung in der Industrie scheint somit möglich.

Bei der geplanten Fortführung dieser Kooperation soll das Materialmodell für Materialzustände mit Zweitphasenpartikeln erprobt werden. Ebenso soll die Übertragung des vorge-

stellten Charakterisierungs- und Parametrisierungsprozesses für weitere Werkstoffe, wie beispielsweise Stahl, untersucht werden. Hierbei soll der Fokus auf hohen Umformgeschwindigkeiten und mehrstufigen Umformprozessen liegen.



[1] Micheli, P. O. de; Maire, L; Cardinaux, D; Moussa, C; Bozzolo, N; Bernacki, M: DIGIMU®: Full field recrystallization simulations for optimization of multi-pass processes, in: Proceedings of the 22nd International ESAFORM Conference on Material Forming, ESAFORM 2019, Vitoria-Gasteiz, Spain, AIP Publishing, 2019, p. 40014

[2] TRANSVALOR S.A.: Manual: Reference Documentation DIGIMU V3.0, 2018

[3] Hitti, K; Laure, P; Coupez, T; Silva, L; Bernacki, M: Precise generation of complex statistical Representative Volume Elements (RVEs) in a finite element context, Computational Materials Science 61 (2012), pp. 224 – 238

[4] Yoshie, A; Morikawa, H; Onoe, Y; Itoh, K: Formulation of static recrystallization of austenite in hot rolling process of steel plate, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan 27 (1987), Nr. 6, pp. 42 – 431

[5] Sellars, C. M: The kinetics of softening processes during hot working of austenite, Czechoslovak Journal of Physics B 35 (1985), Nr. 3, S. 239 – 248

[6] Laasraoui, A; Jonas, J. J.: Prediction of steel flow stresses at high temperatures and strain rates, Metallurgical transactions A 22 (1991), Nr. 7, pp. 1545 – 1558

[7] Karjalainen, L. P: Stress relaxation method for investigation of softening kinetics in hot deformed steels, Materials science and technology 11 (1995), Nr. 6, pp. 557 – 565



Dieses Forschungsprojekt wurde im Rahmen einer Masterarbeit mit einem Stipendium der Stiftung Industrieforschung gefördert. Die Stiftung Industrieforschung vergibt Stipendien für Master- und Diplomarbeiten, die eine hohe Relevanz für kleine und mittlere Unternehmen des industriellen Mittelstands in Deutschland aufweisen. Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle vielmals für die finanzielle Unterstützung.