

Gruppe

**UMFORMPROZESSE**

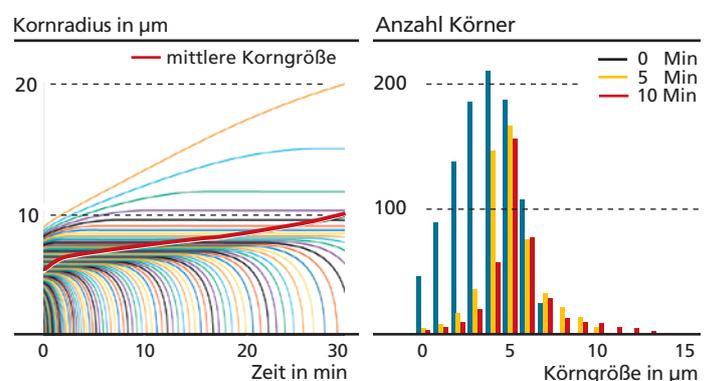
Dr. Dirk Helm | Telefon +49 761 5142-158 | dirk.helm@iwm.fraunhofer.de

## WARMUMFORMUNG UND WÄRMEBEHANDLUNG AUSSCHIEDUNGS- HÄRTBARER LEGIERUNGEN

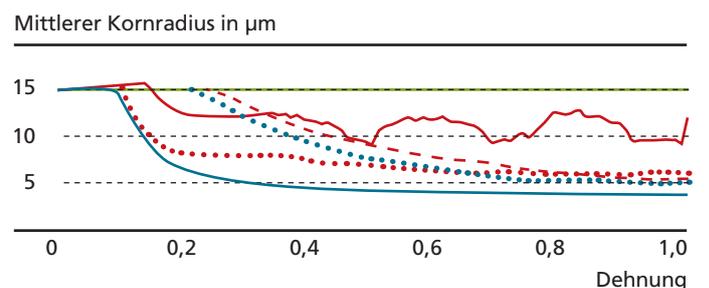
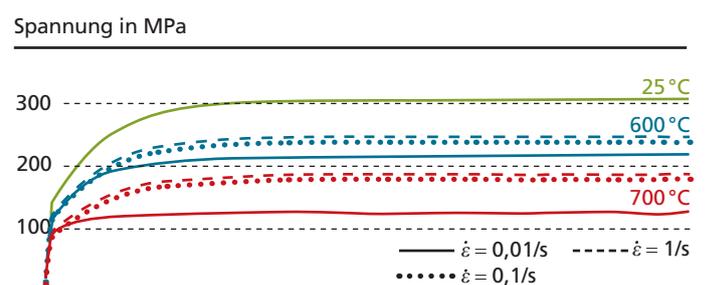
In der Metallverarbeitung umfasst die Prozesskette vom Ausgangsmaterial über die Halbzeuge bis hin zum fertigen Bauteil typischerweise mehrere Umformschritte bei verschiedenen Temperaturen sowie Wärmebehandlungen. Durch eine geeignete Prozessführung können sowohl die finalen Bauteileigenschaften gezielt eingestellt als auch die Effizienz von Prozessen optimiert werden. Dabei bestimmen die Mikrostruktur und ihre Entwicklung maßgeblich die Materialeigenschaften. Beispielsweise kommt es bei erhöhten Temperaturen zur Erholung, Rekristallisation und Kornvergrößerung. Zudem können Ausscheidungen die Festigkeit erhöhen und das Gefüge stabilisieren. Um das Materialverhalten unter Berücksichtigung dieser stark gekoppelten Phänomene zu verstehen und vorherzusagen, werden besondere Modelle benötigt.

### Ein neuartiger Modellierungsansatz

Im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der DFG erarbeiten wir einen neuartigen Modellierungsansatz für metallische Werkstoffe. Er verknüpft die vielfältigen Phänomene, die das effektive Materialverhalten bestimmen, mithilfe einer umfassenden thermodynamischen Betrachtung. So ermöglicht der Ansatz eine physikalisch konsistente Beschreibung und Vorhersage des thermomechanischen Materialverhaltens und der Mikrostrukturentwicklung. In dem Projekt kooperieren wir mit dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf. Wir vereinigen klassische Modelle der Mechanik und Thermodynamik mit einem innovativen Konzept zur Beschreibung der Gefügeentwicklung. Damit können wir elastisches, plastisches und viskoplastisches Materialverhalten, Erholung, Rekristallisation und Kornvergrößerung beschreiben. Zudem berücksichtigen wir den Effekt von Ausscheidungen auf Festigkeit und Beweglichkeit der Korngrenzen und arbeiten daran, in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung Entwicklungen der Ausscheidungen zu simulieren.



1 Simulation der Kornvergrößerung in einer ausscheidungsgehärteten Kupferlegierung: Entwicklung der Größe jedes einzelnen Korns, mittlere Korngröße als rote Linie (links); durch die Entwicklung der Korngrößen verändert sich die Korngrößenverteilung qualitativ (rechts).



2 Simulierte Zugversuche an unlegiertem Stahl bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (oben), Entwicklung der mittleren Korngröße (unten).



3 *Rekristallisation von kaltgewalztem Stahlblech: EBSD-Aufnahmen zu Beginn (links), nach 20 s (Mitte) und nach 120 s (rechts).*

### Simulation mehrstufiger Prozesse ohne Datentransfer

Die Simulationsergebnisse für das Kornwachstum in reinem Kupfer konnten wir bereits anhand experimenteller Daten erfolgreich verifizieren. Abbildung 1 hingegen zeigt, wie das Gefüge einer ausscheidungsgehärteten Kupferlegierung während der Wärmebehandlung vergrößert. Im linken Bild sind die Entwicklung der Größe jedes einzelnen Kornes sowie die Entwicklung der mittleren Größe dargestellt. Kleinere Körner schrumpfen, größere wachsen und insbesondere die mittelgroßen Körner werden durch Ausscheidungen in ihrer Entwicklung gehemmt. Dadurch verändert sich die Korngrößenverteilung deutlich, wie aus den Histogrammen für drei Zeitpunkte ersichtlich wird. Vergleichbar detaillierte Vorhersagen sind mit den meisten bekannten Modellen nicht möglich.

In Abbildung 2 sind die Simulationsergebnisse von Zugversuchen an Stahl bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten dargestellt. Anfangsfließspannung und Verfestigungsvermögen nehmen mit der Temperatur ab. Zudem reduziert bei erhöhten Temperaturen und moderaten Dehnraten dynamische Rekristallisation die Verfestigung weiter. Gleichzeitig verfeinert sich das Gefüge durch Rekristallisation. Abhängig von der Temperatur und Dehnraten können ganz unterschiedliche Prozesse die Gefügeentwicklung dominieren. Dennoch genügt ein einziger Parametersatz, um das thermomechanische Verhalten eines bestimmten Materials unter verschiedenen Versuchsbedingungen vorherzusagen.

Unser Materialmodell eignet sich für die Anwendung auf Kalt- und Warmumformprozesse, Wärmebehandlungen und verschiedene Kombinationen daraus. Somit können wir eine ganze Prozesskette abbilden, ohne zwischen den Teilschritten Daten von einem Modell in ein anderes übertragen zu müssen.

### Experiment, Modellierung und Simulation

Trotz der Komplexität des Materialmodells erfordert die Parameterbestimmung nur einen begrenzten Aufwand. Tatsächlich sind die meisten Parameter physikalische Größen und daher gut bekannt. Um die fehlenden Größen zu bestimmen, führen wir ausgewählte thermomechanische Versuche durch und charakterisieren die Mikrostruktur des Materials. Mit der thermomechanischen Prüfeinrichtung Gleeble 3150 können wir sowohl spezifische Phänomene im Detail untersuchen als auch komplexe anwendungsnahe Belastungssituationen nachstellen. Mithilfe klassischer metallographischer Techniken wie Licht- und Rasterelektronenmikroskopie sowie Elektronenrückstreuung (EBSD) klären wir die mikrostrukturellen Vorgänge im Detail auf. Spezielle Quasi-in situ-Techniken erlauben die Beobachtung des Gefüges auch bei schnellen Veränderungen, beispielsweise während Rekristallisationsvorgängen. In Kombination mit einem umfassenden Verständnis der zugrunde liegenden Vorgänge im Material wird das physikalisch basierte Modell zu einem vorhersagekräftigen Werkzeug.

### Nutzen der Ergebnisse und Einsatzmöglichkeiten

Das numerisch umgesetzte Materialmodell kann aktuell für die Auslegung, Bewertung und Optimierung von Prozessrouten eingesetzt werden, zum Beispiel in der Warm- und Kaltumformung sowie in der Wärmebehandlung. Darüber hinaus sind sogar Anwendungen im Bereich der Prozessregelung denkbar. Aktuell arbeiten wir an einer Überführung in Finite-Elemente-Programme, um das Modell auch für die Auslegung und Bewertung von Halbzeugen und komplexen Bauteilen anwendbar zu machen.

Lukas Kertsch, Dr. Dirk Helm