

Optimierungspotenzial von FEM-Simulationsergebnissen durch den Einsatz exakter Werkstoffdaten und -modelle

FEM-Simulationen sind heute bei der Abbildung von Umform- und Wärmebehandlungsprozessen ein weitverbreitetes Werkzeug. Die realitätsnahe Abbildung wurde in den letzten Jahren fortlaufend optimiert. Beim Einsatz der Materialdaten werden dabei – häufig auch unbewusst – Abstriche gemacht. Dabei können exakte, experimentell ermittelte und auf die Beanspruchung beim vorliegenden Umformverfahren abgestimmte Werkstoffdaten und -modelle die Genauigkeit der FEM-Simulationsergebnisse wesentlich erhöhen.

AUTORINNEN



Dr.-Ing. Kristin Helas

ist Leiterin Forschung & Entwicklung bei der GMT Gesellschaft für metallurgische Technologie- und Softwareentwicklung mbH in Bernau bei Berlin



Dipl.-Ing. Doris Wehage

ist Projektingenieurin Werkstoffberatung bei der GMT Gesellschaft für metallurgische Technologie- und Softwareentwicklung mbH in Bernau bei Berlin

Gezielte Eigenschaftsverbesserungen und eine Erhöhung der Ressourceneffizienz treiben Optimierungsvorhaben verschiedenster Verarbeitungsprozesse voran. Ein hohes, noch nicht ausgeschöpftes Potenzial wird in der Anwendung von realitätsnahen Materialdaten und -modellen gesehen. In der Praxis weichen Unternehmen/Anwender jedoch häufig auf ähnliche Legierungen aus oder setzen Standardwerte und -funktionen ohne Kenntnis des Gültigkeitsbereiches ein. Dabei sollten der Umformprozess und das Materialverhalten als eine Einheit verstanden werden.

EXAKTE WERKSTOFFDATEN UND -MODELLE FÜR DIE UMFORMSIMULATION

Der Einsatz validierter Materialdatensätze in einer FEM-Simulationssoftware ermöglicht die Ausschöpfung dieses offenen Potenzials. Exakte, in praktischen Werkstoffuntersuchungen ermittelte und auf die Beanspruchung beim jeweiligen Umformverfahren (Zug, Druck, Torsion) abgestimmte Werkstoffdaten können die Genauigkeit von Simulationsergebnissen wesentlich erhöhen. So konnten die Auswirkungen großer Formänderungen auf das dynamische und statische Rekristallisationsverhalten am Beispiel eines Inconel 718 durch den Einsatz von Fließkurvendaten aus Torsionsexperimenten untersucht werden [1]. Auch bei der Berechnung der Temperaturverteilung, der Wärmeausdehnung, des Kraft- und Arbeitsbedarfs, der Mikrostruktur sowie der Phasenanteile und der resultierenden Endeigenschaften lassen sich mit exakten Materialdaten signifikante Verbesserungen in der Genauigkeit der Simulationsergebnisse erzielen. Zur Ausnutzung dieses Potenzials können verschiedenste Werkstoffdaten und -modelle in die FEM-Simulation einfließen (Bild 1).

<p>Temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften (bis zu 1200 °C)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dichte • Wärmeleitfähigkeit • Wärmekapazität • Elastizitätsmodul • Querkontraktionszahl • Wärmeausdehnungskoeffizient 	<p>Fließkurvendaten</p> <p>Warm- und Kaltfließkurven als Funktion oder in Tabellenform</p> <p>Angabe der Aufnahmetechnik und des Gültigkeitsbereiches (weitere Hinweise zum Einsatz von Fließkurven siehe [2])</p>
<p>Mikrostrukturmodell</p> <p>Berechnung der Korngrößenverteilung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kritischer Umformgrad • Dynamische Rekristallisation DRX • Mittlere Korngröße DRX • Statische Rekristallisation SRX • Mittlere Korngröße SRX • Metadynamische Rekristallisation MDRX • Mittlere Korngröße MDRX • Kornwachstum 	<p>Umwandlungsmodell</p> <p>Basierend auf experimentell ermittelten ZTU-Diagrammen oder neuronalen Netze</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gefügebestandteile (Ferrit, Perlit, Bainit, Martensit, Restaustenit) • Mengenanteile der Phasen • Mechanische Eigenschaften des Werkstücks <ul style="list-style-type: none"> ◦ Härte ◦ Zugfestigkeit ◦ Streckgrenze

Bild 1: Umfang einer für Umform- und Wärmebehandlungsprozesse gängigen Materialdatenbank

Experimentell ermittelte Werkstoffdaten lassen sich vereinzelt für gängige Werkstoffe auch in der Literatur finden. Die in Werkstoffdatenbanken hinterlegten Modelle sind meist komplexerer Natur: So werden verschiedenste, meist semiempirische Ansätze im Vergleich zur Realität getestet und bei hoher Übereinstimmung in die Werkstoffdatenbank aufgenommen. Diese Modelle lassen sich entweder als Datensatz oder als Funktion in FEM-Programme importieren. Während der FEM-Simulation wird dann zum Beispiel bei den Fließeigenschaften in jedem Knoten entsprechend der vorherrschenden Temperatur, dem

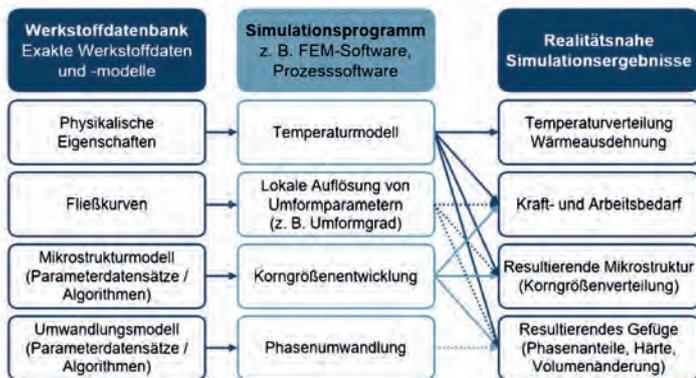


Bild 2: Nutzung der Materialdatensätze im Simulationsprogramm

Umformgrad und der Umformgeschwindigkeit die dazugehörige Fließspannung aus den Datensätzen ermittelt. Ebenso gilt dieses Vorgehen für die temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von der im jeweiligen Knoten ermittelten Temperatur. Auch im Fall des Mikrostrukturmodells werden entsprechend den Bedingungen an den einzelnen Knoten die Rekristallisations- und Kornwachstumsvorgänge und daraus resultierend die Korngrößenentwicklung berechnet. Dieses Vorgehen ist auch auf die Phasenumwandlung übertragbar.

EINSATZ DER WERKSTOFFDATENSÄTZE IN DER ARBEITSPRAXIS

Die Implementierung dieser Werkstoffdaten und -modelle in FEM-Programmen oder individueller Prozesssoftware erfolgt im besten Fall über eine direkte Schnittstelle. Der Anwender wählt in der Simulationssoftware nur noch die gewünschte Legierung für Werkstück und Werkzeug, und die Werkstoffdatensätze werden im Hintergrund aus dem Datenbestand der Materialdatenbank geladen. Materialdaten einzelner Werkstoffe können zumeist auch aus der Materialdatenbank in vordefiniertem Dateiformat exportiert und dann in die entsprechende Simulationssoftware importiert werden.

Die Anwendung wird im Folgenden am Beispiel der Simulation der Temperaturverteilung beschrieben: Werkstoffdaten werden aus der Materialdatenbank in die Software importiert. Die Randbedingungen des Umformprozesses werden in der Simulationssoftware definiert. In dieser sind für die Simulation verschiedene Modelle hinterlegt, zum Beispiel ein Temperaturmodell zur Simulation des Zeit-Temperatur-Verlaufs während der Umformung. Die Werkstoffdatenbank liefert nun die dafür benötigten physikalischen Eigenschaften des Umformwerkstoffs automatisch im Hintergrund. Daraus resultiert schlussendlich die Temperaturverteilung im Bauteil oder im Werkzeug. Weitere Anwendungsbeispiele wie die Verteilung des Umformgrads und der Umformgeschwindigkeit sowie die Korngrößenverteilung sind in Bild 2 zusammengefasst.

Beim täglichen Umgang mit Simulationsprojekten treten Fälle auf, in denen die Datensätze für den geforderten Werkstoff nicht vorliegen, es existieren jedoch Daten zu einer ähnlichen

Legierung. In einem solchen Fall kann in Abhängigkeit der Funktionalität der Werkstoffdatenbank eine Approximation bei ähnlicher Zusammensetzung erfolgen. Hierfür können die Parametersätze verschiedener Werkstoffe untereinander kombiniert werden [2]. Es sollte dabei beachtet werden, dass definierte Gültigkeitsbereiche eingehalten werden.

Im Folgenden werden Anwendungsbeispiele benannt, bei denen bereits die Vorteile exakter Werkstoffdaten und -modelle für die Abbildung von realen Umformprozessen und Prozessketten in Simulationsprogrammen gezeigt wurden:

- Gefüge- und Eigenschaftsberechnung beim Freiformschmiedeprozess zur Optimierung der Prozessabfolge [3]
- Gefügesimulation einer Stabstahlstraße zur Optimierung der Temperaturführung und zur Einsparung einer nachfolgenden Glühbehandlung bei ausgewählten Werkstoffen [3]
- Temperatur- und Mikrostruktursimulation sowie Verteilung der Umformintensität für einen KOCKS-3-Walzen RSB®-Block [4]
- Gesenkschmieden eines Inconel 718 in einem 3-stufigen Herstellungsverfahren zur Voraussage der Korngröße im Schmiedestück [5]
- Abbildung realer Prozessketten zur Ermittlung des Zusammenspiels von technologischen Parametern und Gefügeausbildung am Beispiel einer Turbinenscheibe aus Inconel 718 durch vierzylindrische Stauchoperationen und eine finale Formgebung mit anschließendem Besäumen [6]

Grundsätzlich können Werkstoffdaten und -modelle bei der Simulation jeglicher Umform- und Wärmebehandlungsprozesse genutzt werden.

KOSTEN UND NUTZEN EXAKTER WERKSTOFFDATENSÄTZE

Eine große Anzahl dieser Werkstoffdaten und -modelle existieren und sollten genutzt werden. Natürlich steht hinter der Entscheidung für den Erwerb von Werkstoffdaten auch immer eine Kosten-Nutzen-Analyse. Für eine bessere Einschätzung werden die Erfahrungen der Autoren zusammengefasst.

Für bekannte Legierungen lassen sich Werkstoffdaten aus der Literatur zusammensuchen. Dies ist zeitaufwendig und die Einbindung dieser Daten erfordert spezielles Knowhow. Die Neuaufnahme des kompletten Spektrums von Materialeigenschaften im Rahmen von Werkstoffuntersuchungen sowie die Erstellung der Werkstoffmodelle (beispielsweise Mikrostruktur- und Umwandlungsmodell) ist mit erheblichen Kosten verbunden: Für eine Stahllegierung ist mit ca. 70.000 Euro zu rechnen. Der Erwerb von bestehendem Wissen ist hier eine echte Alternative. Dies wird in Bild 3 verdeutlicht, in welchem die Kosten für die Aufnahme eines neuen Werkstoffdatensatzes für eine Stahllegierung dem Erwerb entsprechender Werkstoffdaten und -modelle sowie die Lizenzgebühr für eine Materialdatenbank mit einer großen Anzahl an Stahllegierungen gegenübergestellt werden.

Die Abschätzung des finanziellen Vorteils ist abhängig von den eingesetzten Werkstoffen und vom jeweiligen Verarbeitungsprozess. Für Produktionsprozesse kristallisieren sich

die folgenden Optimierungsfelder für den Einsatz von Simulationssoftware in Kombination mit exakten Materialdaten heraus:

- **Bei der Prozessauslegung:** Die sehr präzise Vorhersage der benötigten Kräfte und resultierenden Spannungen sowie der mechanischen Grundeigenschaften in einem Verarbeitungsprozess können zur Einsparung von Ressourcen und Personal durch den Wegfall kostspieliger Versuchskampagnen führen. So lassen sich beispielsweise die Belastungen durch die Optimierung bei konstruktiven Veränderungen an Werkzeugen zuverlässig einschätzen.
- **Bei der Verarbeitung neuer Werkstofflegierungen in bestehenden Prozessen:** Prozesse lassen sich anhand einer präzisen Simulation genauer auf die neuen Bedingungen einstellen, das gilt auch für Personal- und Ressourceneinsparungen aufgrund von unnötigen Versuchsserien. Dies gilt beispielsweise bei der Auswahl der geeigneten Temperaturführung für eine neue Legierung.
- **Bei der Identifikation von Produktfehlern:** Bei der Analyse von Fehlern am Produkt kann eine realitätsnahe Simulation Hinweise auf deren Entstehungsort geben. Dies erfolgt zum Beispiel beim Gesenkschmieden durch die Überprüfung der Formfüllung oder der erzielbaren Mikrostruktur.

Wer sich einmal von der höheren Genauigkeit der Simulationsergebnisse durch die Nutzung der exakten und validierten Werkstoffdatensätze überzeugt hat, wird den Einsatz realitätsnaher Materialdaten und -modelle als Standard in der Simulation etablieren. Daher lohnt sich für Anwender aus der Industrie, welche regelmäßig mit der Umformsimulation in Berührung kommen, die Nutzung einer dafür vorgesehenen Werkstoffdatenbank.

ZUSAMMENFASSUNG

Nahezu jeder Umform- und Wärmebehandlungsprozess kann heutzutage in einer Simulation abgebildet werden. Die Ansprüche an die Genauigkeit der Simulationsergebnisse sind dabei sehr hoch, wobei ein erhebliches Verbesserungspotenzial in der Nutzung von exakten, experimentell ermittelten und auf die Beanspruchung beim vorliegenden Umformverfahren abgestimmten Werkstoffdaten und -modelle gesehen wird. Bei der Suche und Nutzung der geeigneten Werkstoffdatensätze für die Simulation von Umform- und Wärmebehandlungsprozessen sollten die folgenden Aspekte beachtet werden:

- Die Materialdaten und -modelle sollten standardmäßig in FEM-Simulationsprogramme einfließen können. Dies kann über eine Schnittstelle oder einen Datenimport erfolgen.
- Der Gültigkeitsbereich der Werkstoffdatensätze sollte die im Industrieprozess vorliegenden Prozessfenster abbilden (Temperatur, Umformgrad, Umformgeschwindigkeit, ...).
- Das Versuchssetting aus Werkstoffuntersuchungen sollte den Werkstoffdatensätzen zugeordnet sein. Optimal ist es, wenn die Hauptbeanspruchung im Umformverfahren der Beanspruchung des Versuchssettings entspricht.
- Im besten Fall stehen hinter den Werkstoffdaten auch kompetente Ansprechpartner mit sehr guter Werkstoff-Expertise, welche die Eignung der Werkstoffdatensätze zu den jeweiligen Anforderungen einschätzen können.

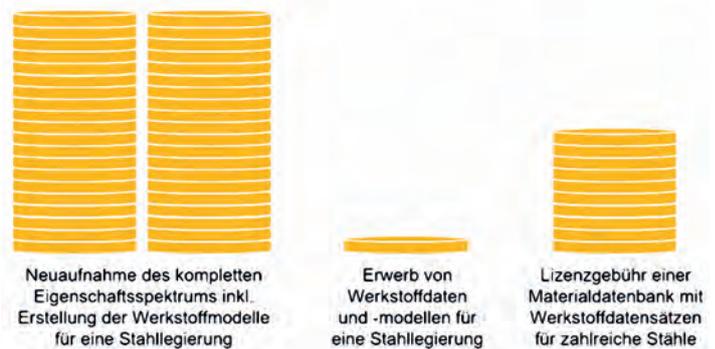


Bild 3: Überschlägige Kosten für Materialdaten, Bilder: GMT



[1] Borowikow, A.; Schafstall, H.; Blei, H.; Wehage, D.; Borowikow, M.: Integrierte Gefügemodellierung bei der FEM-Simulation mit Hilfe der Werkstoffdatenbank "MatILDa®", Numerische Simulation Verarbeitungsprozesse und prozessgerechte Bauteilgestaltung 2. – 3. November 2004, Kompetenzzentrum Neue Materialien Bayreuth (2004)

[2] Borowikow, A.; Wehage, D.; Bambach, M. D.: Einfluss von Fließkurven auf die Berechnung des Kraft- und Arbeitsbedarfs bei der Simulation von Warmumformprozessen. *massivUMFORMUNG* (März 2021), S. 24 – 29

[3] Borowikow, A.; Wehage, D.; Blei, H.: Modell zur Gefüge- und Eigenschaftsberechnung für online und offline Anwendungen. XXVI. Verformungskundliches Kolloquium, Plannersalm, AT (März 2007), S. 123 – 137

[4] Kruse, M.; Schuck, M.; Borowikow, A.: Innovations in simulation of microstructure developments. *Materials Science Forum* Vols. 706 – 709 (2012), S. 2170 – 2175

[5] Biba, N.; Borowikow, A.; Wehage, D.: Simulation of Recrystallisation and Grain Size Evolution in Hot Metal Forming. *AIP Conference Proceedings* Vol. 1353, No. 1, American Institute of Physics (2011), S. 127 – 132

[6] Biba, N.; Borowikow, A.; Wehage, D.: Möglichkeiten und Grenzen der simulationsbasierten Prozesskettenoptimierung. Internationale Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Massivumformung“. Fellbach bei Stuttgart (Mai 2015)



GMT Gesellschaft für metallurgische Technologie- und Softwareentwicklung mbH
Börnicker Chaussee 1 – 2 | 16321 Bernau
Telefon: +49 174 160 9069
E-Mail: kristin.helas@gmt-berlin.com
Internet: www.gmt-stahl.de/matilda