

# Kennwertaufnahme von Kupferlegierungen und deren Übertragbarkeit auf die Schmiedeprozessauslegung

Behrens, B.-A.; Bougecha, A.; Mileke, J.; Prüß, T. (1)

**Die Kenntnis der Materialeigenschaften ist bei allen technisch genutzten Metallen unabdingbar, um Bauteile für den optimalen Einsatz auszulegen und eine bestmögliche Bearbeitung zu gewährleisten. Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens während der Umformung ist eine exakte Ermittlung der Materialkennwerte notwendig. Bei der Auslegung von Umformprozessen werden die Umformeigenschaften üblicherweise durch eine Fließkurve abgebildet, die das plastische Werkstoffverhalten beschreibt. Diese dient als Eingangsgröße für die numerische Simulation. Die Qualität der FE-Berechnungen hängt im Wesentlichen von der Genauigkeit des Modells und damit u. a. von seinen Randbedingungen ab. Beispielhaft werden hier neben der Kennwertaufnahme die Ergebnisse der FE-Simulation mit realen Schmiedergebnissen dargestellt und analysiert.**

Die allgemeine Entwicklung zur stetigen Erweiterung des bestehenden Bauteilspektrums umformtechnisch hergestellter Produkte setzt kürzere Entwicklungszeiträume bis zur Serienreife bei gleichzeitig höchster Produktqualität zu wettbewerbsfähigen Produktionsstückkosten voraus. Dafür ist der Einsatz modernster Techniken erforderlich. Mittels der numerischen Simulation von Schmiedeprozessen ist es möglich bereits vor der praktischen Umsetzung den Materialfluss, die zu erwartende Formfüllung, die erforderlichen Umformkräfte sowie die resultierenden Temperatur- und Spannungsverläufe werkstück- und werkzeugseitig zu ermitteln.

Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover (LUH) werden alle relevanten Bereiche der Umformtechnik untersucht. Zum einen ermöglicht es die Prozesssimulation neue Umformprozesse a priori zu analysieren und potentielle Schwachstellen im Prozess aufzuzeigen. Zum anderen ist es durch eine umfangreiche Anlagentechnik möglich, ein großes Teilespektrum mit einer großen Werkstoffauswahl zu realisieren. Dies reicht von der Werkstoffkennwertaufnahme bis zur Umsetzung von Realbauteilen unter industrienahen Bedingungen.

## Kupfer, ein Werkstoff mit Tradition und Zukunft

Kupfer wurde bereits vor etwa 10.000 Jahren in der Steinzeit genutzt und ist damit das erste vom Menschen verwendete Metall. Seine Verarbeitung durch Schmelzen erfolgte ab ca. 4.500 v.Chr. Um 3.500 v.Chr. begann die Legierungsbildung in Form der Herstellung von Bronzen. [Deu97]

Auch heute ergibt sich für Kupfer und seine Legierungen, zu denen Messing, Bronze, Kupfer-Nickel, Kupfer-Aluminium und Neusilber zählen, ein breites Anwendungsspektrum. So wird Kupfer aufgrund seiner günstigen Eigenschaften im Bauwesen, in der Elektrotechnik oder dem Maschinenbau eingesetzt. Ein großer Teil

des weltweiten Kupferbedarfs entfällt auf den Verkehrssektor. Hier ist Kupfer nach Stahl und Aluminium ein häufig verwendeter Konstruktionswerkstoff und wird aufgrund seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit beispielsweise im Kabelbaum von Automobilen eingesetzt. Bei der Verwendung des Werkstoffes für Synchronringe in Schaltgetrieben oder für Gleitlager sind seine hervorragenden Verschleiß- und Gleiteigenschaften ausschlaggebend. Ein großes Potential birgt der Einsatz von Kupfer aufgrund seiner antimikrobiellen Wirkung im Hinblick auf eine immer weiter zunehmende Antibiotika-Resistenz. [Deu97, Hoo08, Kla07, Lad08]

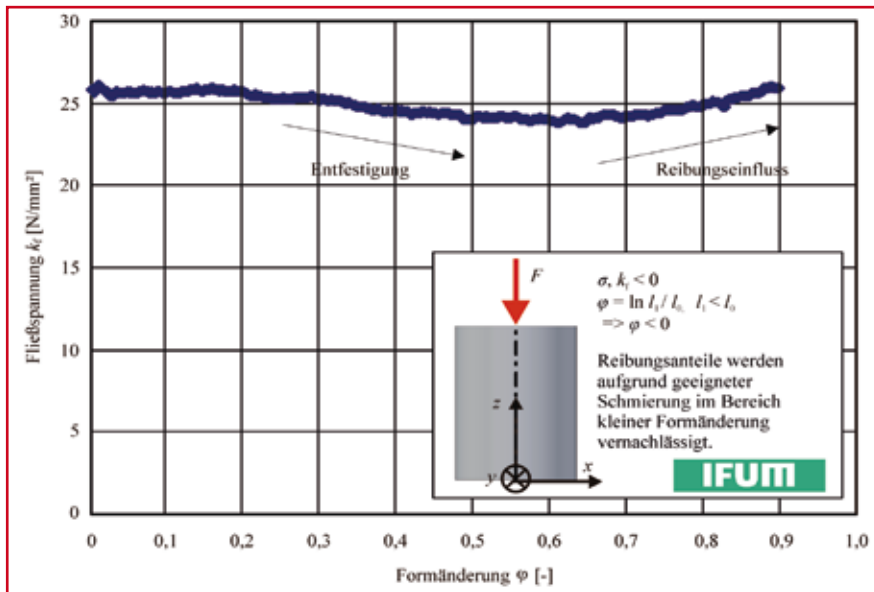
In vielen Bereichen ist und bleibt Kupfer trotz des hohen Preises (ca. 9 TUS-\$/t [Lme11]) ein konkurrenzloser Werkstoff. Vor diesem Hintergrund ist es aufgrund der Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit notwendig, Einsparpotentiale durch Legierungsbildung und optimierter Bearbeitungsverfahren aufzuzeigen. Gerade in Zeiten der globalen Energie- und Rohstoffverknappung und der gesellschaftspolitischen Forderung nach einem sparsamen Umgang mit den natürlichen Ressourcen gewinnen umformende Fertigungsverfahren durch die sehr gute Energie- und Materialeffizienz stetig an Bedeutung. Darüber hinaus bietet die umformende Bauteilherstellung vielfältige technologische, ökonomische, und ökologische Vorteile.

## Fließkurvenaufnahme von CuZn39Pb3

Die Fließspannung  $k_f$  eines Werkstoffs ist von der Formänderung  $\phi$ , sowie der Umformtemperatur  $T_U$  und der Formänderungsgeschwindigkeit  $\dot{\phi}$  abhängig [Doe10]. Am IFUM werden im Bereich der Massivumformung Fließkurven  $k_f(\phi)$  mit einem servohydraulischen Umformsimulator aufgenommen. Dabei wird über



Bild 1: Proben der Fließkurvenaufnahme



**Bild 2:** Fließkurve von CuZn39Pb3 bei  $T_u = 700\text{ °C}$

eine geregelte Wegvorgabe eine Zylinderstauchprobe mit konstanter Formänderungsgeschwindigkeit  $\dot{\phi}$  verformt. Die Proben der Ausgangshöhe  $h_0 = 18\text{ mm}$  werden isotherm auf eine Endhöhe von  $h_1 = 7,2\text{ mm}$  gestaucht. Daraus errechnet sich eine logarithmische Formänderung von  $\phi = 0,9$ . Die in Bild 1 exemplarisch dargestellten Stauchproben aus dem Messingwerkstoff CuZn39Pb3 wurden bei den Umformtemperaturen  $T_u = 700\text{ °C}$ ,  $750\text{ °C}$  und  $800\text{ °C}$  umgeformt. Als Formänderungsgeschwindigkeiten wurden  $\dot{\phi} = 0,1\text{ /s}$ ;  $1\text{ /s}$  und  $10\text{ /s}$  gewählt.

Die visuelle Gegenüberstellung verdeutlicht die Unterschiede der gestauchten Proben. So sind an den Proben bei einer Umformtemperatur von  $T_u = 700\text{ °C}$  leichte Anrisse an der Mantelfläche zu erkennen. Dies deutet auf das Erreichen des Formänderungsvermögens hin. Bei einer Umformtemperatur von  $T_u = 800\text{ °C}$  hingegen werden starke Ausbuchtungen sichtbar. Erklärbar ist dies durch lokal unterschiedliche Fließspannungen resultierend aus einem lokalen Anschmelzen der Phasen. Während der Verformung wird Umformarbeit in Wärme umgewandelt. Dies führt teilweise zum Erreichen der Solidus-Liquidus-Umwandlungstemperatur von ca.  $T_s = 900\text{ °C}$ .

Die Ergebnisse der Fließkurven sind ausgeprägt geschwindigkeits- und temperaturabhängig. Eine Abhängigkeit der Fließspannung vom Umformgrad konnte nicht oder nur in geringem Maße festgestellt werden. Eine Verfestigung im untersuchten Temperaturbereich ist nicht erkennbar. Exemplarisch ist in Bild 2 die Fließ-

kurve in Abhängigkeit der Formänderung  $\phi$  bei einer Temperatur von  $T_u = 700\text{ °C}$  dargestellt.

### Zahnradschmiedeprozess

Zur Umsetzung eines umformtechnisch hergestellten Kupferbauteils wurde eine präzisionsgeschmiedete Zahnradgeometrie gewählt (Bild 3). Die komplexe Bauteilgeometrie ist besonders gut geeignet, um Formfüllungsvorgänge zu analysieren und den Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter auf den Umformprozess und die daraus resultierende Bauteilqualität zu vergleichen.

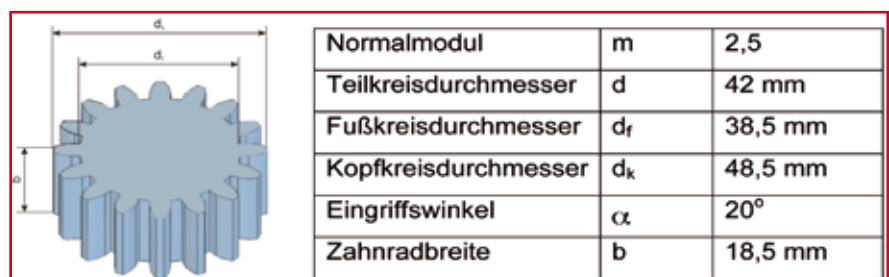
### Numerische Berechnung

Zunächst erfolgt die Prozessauslegung zur umformtechnischen Herstellung des Zahnrads (Bild 3). Die Finite-Element-Methode (FEM) ist dabei ein wichtiges Hilfsmittel bei der Prozessanalyse von Warmmassivumformprozessen. FE-Simulationen sind kosten- und zeitsparend, da die Anzahl an kostenintensiven Praxisversuchen auf ein Minimum reduziert werden kann. In der

Umformtechnik besteht dabei ein großes Interesse an der exakten und realitätsnahen prozessabbildenden Beschreibung der Kontakt- und Reibbedingungen zwischen Werkstück und Werkzeug sowie der Fließkurve und der hieraus resultierenden Wärmeübergänge. Dadurch ist eine große Simulationsgenauigkeit erzielbar. [Beh11] Unter Ausnutzung der Symmetrie erfolgt ausgehend von einem Rohteil (Höhe =  $39,4\text{ mm}$ ,  $\varnothing = 30\text{ mm}$ ) des Werkstoffs Cu99 die numerische Berechnung der Umformung. Am IFUM wird dafür das Programm Forge 2009, Transvalor S.A. verwendet. Zur Reduzierung der Rechenzeit erfolgt die Berechnung eines Zahns. Matrize, Stempel und Gegenstempel werden dabei Industrie-Standardkonform idealstarr modelliert (Bild 4).

Um die FE-Simulation für das Einsatzgebiet der Kupferumformung in sinnvoller Weise zu nutzen, wird zunächst die Formfüllung des Zahnrads mit der Berechnung abgebildet. Damit kann bereits zum Zeitpunkt der Prozessauslegung und im Vorfeld experimenteller Versuche eine Aussage über das zu erwartende Umformergebnis gemacht werden. Zudem werden die zu erwartenden Formänderungen anhand des Umformgrads und die Temperaturen im Bauteil sichtbar [Tek07]. Es erfolgt die Berechnung unter Angabe der Randbedingungen wie Reibung, Temperatur und Wärmeübergang sowie der Fließeigenschaften des Materials. Bild 5 zeigt die Gegenüberstellung der berechneten Temperaturverteilung des Bauteils bei einer Ausgangstemperatur von  $T_u = 800\text{ °C}$  (links) und von  $T_u = 900\text{ °C}$  (rechts). Die Temperatursensibilität des Werkstoffs Kupfer wird mit diesen numerischen Berechnungen belegt. Deutliche Unterschiede sind in der Formfüllung zu erkennen.

In Bild 6 ist die Verteilung des Umformgrads im Bauteil jeweils für die Ausgangstemperaturen von  $T_u = 800\text{ °C}$  und  $T_u = 900\text{ °C}$  gezeigt. Die höchsten Umformgrade zeigen sich jeweils in den Zahngründen.



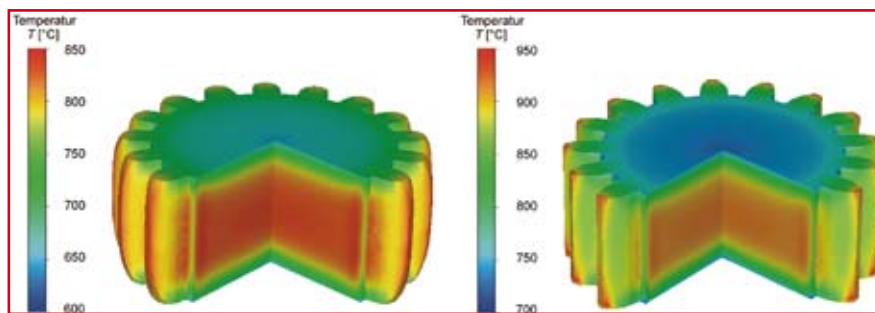
**Bild 3:** Zahnradgeometrie

**Validierung der Simulationsergebnisse**

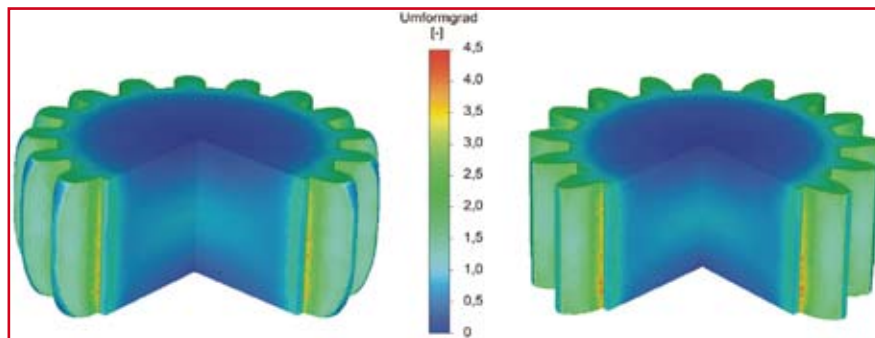
Für die praktischen Schmiedeversuche wird ein für den Werkstoff schmiedetypischer Umformtemperaturbereich von  $T_U = 700\text{ °C}$ ,  $750\text{ °C}$ ,  $800\text{ °C}$ ,  $850\text{ °C}$  und  $900\text{ °C}$  gewählt. Wie in Bild 7 dargestellt ist die Abhängigkeit der Formfüllung (FF) von der Umformtemperatur  $T_U$  deutlich erkennbar. Zur Bestimmung der Formfüllung wird die ausgeformte Flankenhöhe auf die gesamte Zahnradschneidhöhe bezogen. So wurde bei einer Temperatur von  $T_U = 900\text{ °C}$  eine Formfüllung von 85 % erzielt, während der Werkstoff bei Tempe-

**Ergebnis und Schlussfolgerung**

Die Prozesssimulation stellt ein geeignetes Werkzeug dar, um das Potential des Konstruktionswerkstoffs Kupfer durch werkstoffgerechte Umformverfahren auszuschöpfen. Dieses wird am Beispiel der umformtechnischen Herstellung eines Zahnrads dargestellt. Die für die numerische Simulation unabdingbare Materialcharakterisierung wird exemplarisch anhand der Kennwertaufnahme für den Werkstoff CuZn39Pb3 beschrieben. Es ist festzustellen, dass die Umformung von Kupferwerkstoffen eine exakte Temperaturführung des Prozesses erfordert.



**Bild 5: Temperaturverteilung im Zahnrad, links  $T_U = 800\text{ °C}$ , rechts  $T_U = 900\text{ °C}$**



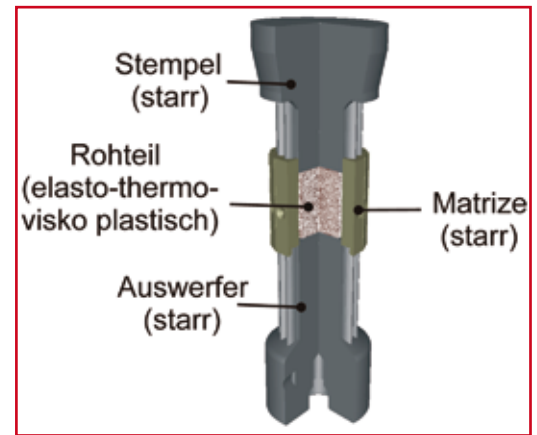
**Bild 6: Verteilung des Umformgrades im Zahnrad, links  $T_U = 800\text{ °C}$ , rechts  $T_U = 900\text{ °C}$**

raturen von  $T_U = 750\text{ °C}$  und  $T_U = 700\text{ °C}$  nicht in Kontakt mit der Pressmatrize im Zahnkopfbereich kam. Die Steigerung der Umformtemperatur von  $T_U = 800\text{ °C}$  auf  $T_U = 850\text{ °C}$  und schließlich auf  $T_U = 900\text{ °C}$  hat eine deutliche Steigerung der Formfüllung zur Folge. Das temperatursensible Umformverhalten des Werkstoffs Kupfer wird dabei auch im praktischen Versuch deutlich.

Hierdurch sind die Oberflächenqualität und die Ausformung aller Bauteilpartien in starkem Maße beeinflussbar. Die Kenntnis über das erreichbare Formänderungsvermögen ermöglicht eine material-effiziente Prozessgestaltung der umformtechnischen Herstellung von Kupferbauteilen. Zur Erweiterung des Werkstoff- und Bauteilspektrums für umformende Fertigungsverfahren ist eine detaillierte



**Bild 7: Geschmiedete Zahnräder aus Cu99 im Temperaturbereich  $700\text{ °C} \leq T_U \leq 900\text{ °C}$**



**Bild 4: FE-Modell zum Zahnradschmieden**

Untersuchung des temperaturabhängigen Fließverhaltens von Kupferlegierungen erforderlich.

**Literatur**

[Bar08] Bargel, H.-J.: Werkstoffe, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008  
 [Beh11] Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Hadifi, T.; Mielke, J.: Advanced Friction Modeling for Bulk Metal Forming Processes. Production Engineering – Research and Development (DOI 10.1007/s11740-011-0344-8), 09.09.2011  
 [Deu90] Deutsches Kupferinstitut: Kupfer-Zink-Legierungen (Messing für die Herstellung von Warmpressteilen), Düsseldorf, 1990  
 [Deu97] Deutsches Kupferinstitut: Kupfer – Vorkommen Gewinnung Eigenschaften Verarbeitung Verwendung, Düsseldorf, 1997  
 [Deu07] Deutsches Kupferinstitut: Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und Sondermessing), Düsseldorf, 2007  
 [Doe10] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik, 2. Aufl., Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2010  
 [Hoo08] Hooock, R.: Kupfer im Automobilbau – Anwendungen und Randbedingungen, in: METALL, 62. Jahrgang 10/2008  
 [Kla07] Klassert, A.: Wege zu den Produkten der Zukunft – Paradigmenwechsel in der Kupferhalbzeugindustrie, in: METALL, 61. Jahrgang 11/2007  
 [Lad08] Ladewig, B.: Kupfer im Automobilbau – Potentiale bis 2020, in: METALL, 62. Jahrgang 10/2008  
 [Lme11] <http://www.lme.com/copper.asp> (Stand 31.08.2011)  
 [Tek07] Tekkaya, A.; Brosius, A.: Simulation in der Umformtechnik: Das Werkzeug für Innovationen. 14. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Freiberg  
 [Wei10] Weißbach, W.: Werkstoffkunde Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010  
 [Wie86] Wieland-Werke: Wieland-Buch Kupferwerkstoffe, Wieland-Werke AG, Ulm, 1986

(1) Prof. Dr.-Ing. B.-A. Behrens, Dr.-Ing. A. Bouguecha, Dipl.-Ing. J. Mielke, Dipl.-Ing. T. Prüß, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover