

Genauere Kenntnis der Fließspannung ist Voraussetzung für die Simulation von Präzisionsumformverfahren

ECKART DOEGE, JENS-AREND FEINDT UND ROLAND SEIDEL

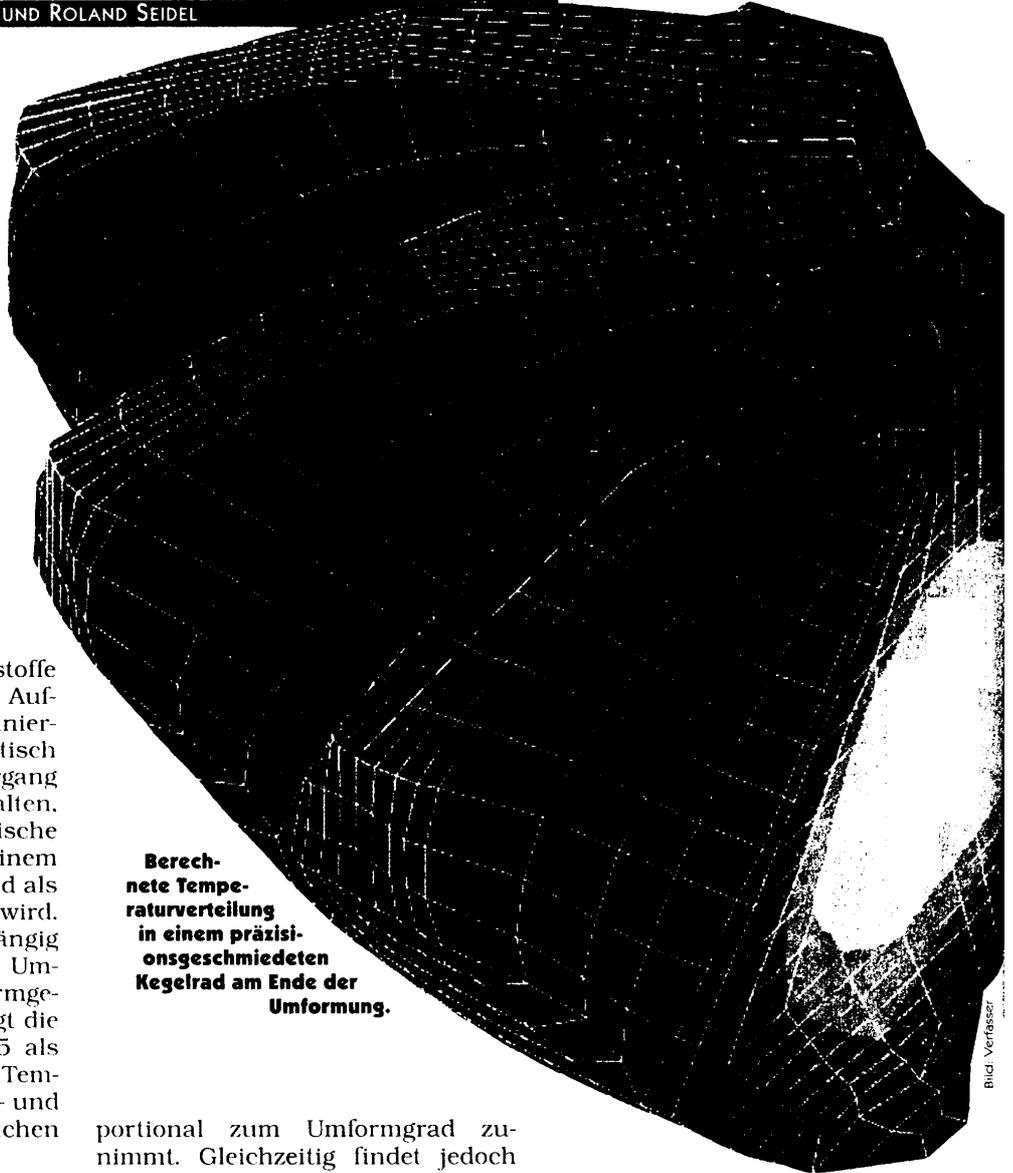
Für die Auslegung von Umformprozessen werden zunehmend rechnergestützte Simulations- und Berechnungsverfahren angewendet. Die wichtigste Grundlage für die Anwendung der Programme ist die Kenntnis der Material- und Prozeßkenngrößen. Endkonturnahe Umformverfahren stellen dabei wegen der ständig wechselnden, inhomogenen Verteilung von Formänderungen und Temperaturen im Werkstück hohe Anforderungen an die Qualität der Werkstoffdaten.

MM
Maschinenmarkt

Metallische Werkstoffe lassen sich durch Aufbringen eines definierten Spannungszustands plastisch verformen. Um den Umformvorgang einzuleiten und aufrechtzuerhalten, wird eine bestimmte mechanische Spannung benötigt, die bei einem einachsigen Spannungszustand als Fließspannung k_f bezeichnet wird. Die Fließspannung k_f ist abhängig von Werkstoff, Umformgrad ϕ , Umformtemperatur T_u und Umformgeschwindigkeit $\dot{\phi}$ [1]. Bild 1 zeigt die Fließkurve für den Stahl C45 als Beispiel für drei ausgewählte Temperaturen der Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung in der üblichen Darstellung.

Weil die Parameter der Fließspannung von anderen Faktoren mitbestimmt werden, gibt es zahlreiche sekundäre Einflußgrößen. Die Umformtemperatur ist beispielsweise nicht konstant, weil durch die Umwandlung von Umformarbeit in Wärme die Proben temperatur pro-

Prof. Dr.-Ing. Eckart Doege ist Leiter des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM), Universität Hannover. Dipl.-Ing. Jens-Arend Feindt und Dipl.-Ing. Roland Seidel sind wissenschaftliche Mitarbeiter am IFUM.



Berechnete Temperaturverteilung in einem präzisionsgeschmiedeten Kegelrad am Ende der Umformung.

portional zum Umformgrad zunimmt. Gleichzeitig findet jedoch insbesondere bei Warmumformvorgängen eine Abkühlung des Werkstücks durch Wärmeleitung in das kalte Werkzeug statt, die sehr stark von der Dauer des Umformvorgangs abhängt [2].

Wegen der Bedeutung der Fließspannung sind zu ihrem Bestimmen eine Vielzahl von Verfahren eingeführt worden. Alle diese Verfahren zeigen eine starke Abhängigkeit der Fließkurven von werkstoff-, verfahrens- und prüfbedingten Einflußgrößen. Grundsätzlich sollte das

Prüfverfahren daher so gewählt werden, daß die besonderen Verhältnisse des jeweiligen Umformvorgangs berücksichtigt werden, das heißt, das Prüfverfahren sollte dem tatsächlichen Umformvorgang möglichst nahekommen [3].

Prinzipiell vorzuziehen sind Umformvorgänge mit einachsigen Spannungszustand und einer homogenen Formänderung, weil die

Fließspannung ohne Anwendung einer Fließhypothese bestimmt werden kann. Für den Bereich der Massivumformung ist der einachsige Zylinderstauchversuch diejenige Prüfmethode, die dem realen Umformprozeß am nächsten kommt. Eine weitgehend homogene Formänderung läßt sich dabei mit entsprechender Schmierung bis zu Umformgraden von $\phi = 0,8$ erreichen.

Beim Kaltumformen ist der Einfluß der Umformgeschwindigkeit auf die Fließspannung relativ klein. Beim Warmumformen ist er wegen der zeitgleich mit der Umformung werkstoff- und temperaturabhängig ablaufenden Rekristallisationsvorgänge unterschiedlich groß. Um den Einfluß der Umformgeschwindigkeit auf die Fließspannung genau zu erfassen, ist es daher notwendig, die Umformgeschwindigkeit während der Versuchsdurchführung konstant zu halten. Neben entsprechend gesteuerten hydraulischen Prüfmaschinen, welche für niedrigere Umformgeschwindigkeiten geeignet sind, ist dies mit speziellen nockengetriebenen Pressen (Plastometern) möglich. Wenn die Umformgeschwindigkeit konstant bleiben soll, ist ein Antrieb notwendig, der den Stößel mit einer Geschwindigkeit $\dot{\phi}$ bewegt, die mit der Höhe abnimmt und folgendem Gesetz genügt:

$$\dot{\phi} = v/h = \text{konstant}$$

Die dafür erforderliche Kurve bildet eine logarithmische Spirale. Ein nach dieser Kurve geformter Nocken beschleunigt den Schlitten aus der Ruhe sehr rasch auf die erforderliche Geschwindigkeit. In **Bild 2** wird das entsprechende Prinzip der Fließkurvenaufnahme gezeigt. Mit der am IFUM vorhandenen Prüfmaschine (Plastometer) lassen sich prinzipiell Umformgeschwindigkeiten von $\dot{\phi}$ gleich 0,25 bis 100 s^{-1} realisieren.

Der absolute Wert der Umformgeschwindigkeit kann durch die Auftreffgeschwindigkeit und die Anfangshöhe beeinflusst werden. Da der Antrieb durch eine Kurvenscheibe erfolgt, ist der Umformweg Δh und bei einer bestimmten Anfangshöhe

h_0 der Umformgrad festgelegt. Für die vorgegebene Kurvenscheibe sollte die Auftreffgeschwindigkeit v_0 daher in möglichst weiten Grenzen zu verändern sein. Gewählt wurden Geschwindigkeitsgrenzen von 6 und 2400 mm/s ; mit einer Probenanfangshöhe von 24 mm erhält man auf diese Weise Umformgeschwindigkeiten von 0,25 bis 100 s^{-1} .

Die Maschine wurde so ausgelegt, daß auch bei der kleinsten Stößelgeschwindigkeit noch die erforderliche Energie aus dem Schwungrad entnommen werden kann. Eine Erweiterung der Umformgeschwindigkeitsgrenze nach unten auf 0,001 s^{-1} wurde mit einem hydraulischen Motor realisiert; das dabei nötige Drehmoment zum Stauchen wird vom Hydromotor ohne nennenswerte Abweichungen in der Drehzahl während des Prüfvorgangs geliefert.

Die Maschine wurde für eine Preßkraft von 5000 kN ausgelegt. Diese Kraft erlaubt es, Stahlproben mit 16 mm Durchmesser bei einem Umformwiderstand von 1250 N/mm^2 auf halbe Höhe zu stauchen.

Zylindrische Werkstoffproben kommen in Stauchvorrichtung

Bei Temperaturen bis zu 700 $^{\circ}\text{C}$ werden die zylindrischen Werkstoffproben in einer Stauchvorrichtung gestaucht, die aus einem Schutzbehälter, der bei erhöhten Temperaturen als Wärmeschutzbehälter dient, und zwei Stauchbahnen besteht. Bei Versuchen oberhalb Raumtemperatur werden die Stauchproben im Wärmeschutzbehälter zusammen mit den Stauchbahnen in einem Luftumwälzofen auf die Prüftemperatur aufgeheizt und anschließend im Plastometer gestaucht.

Diese Art von Erwärmung ist nur bis zu einer Temperatur von 700 $^{\circ}\text{C}$ zulässig, da bei höheren Temperaturen mit einer Oxidation der Proben gerechnet werden muß. Bei höheren Temperaturen werden die Proben daher unter Schutzgas oder induktiv in einer Vakuumkammer erwärmt.

Eine einwandfreie Ermittlung der Fließspannung in einem Stauchversuch ist nur dann gewährleistet, wenn die getroffenen Annahmen hierfür (einachsiger Spannungszustand) eingehalten werden. Eine gute Schmierung der Wirkflächen ermöglicht eine weitgehende Annäherung an diesen Spannungszustand. Bei den Stauchversuchen werden daher den jeweiligen Prüftemperaturen angepaßte Schmierstoffe verwendet.

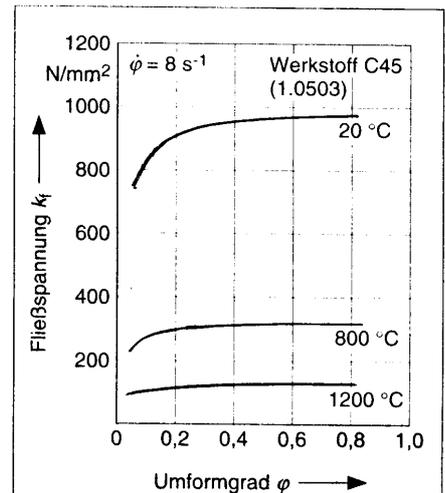


Bild 1: Fließkurve für drei ausgewählte Temperaturen der Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung (Werkstoff C45, Umformgeschwindigkeit 8 s^{-1}).

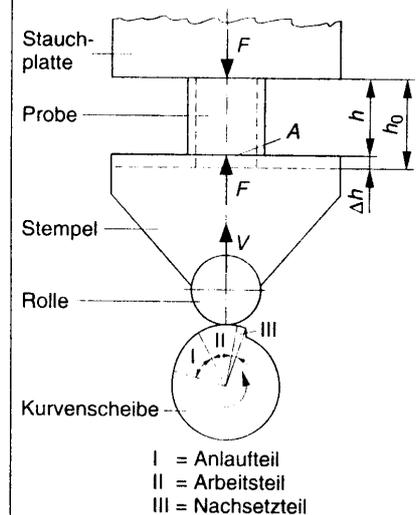


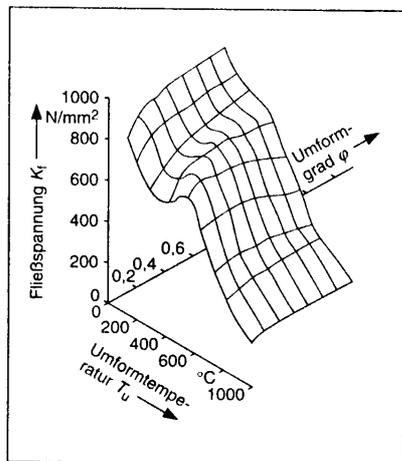
Bild 2: Prinzip der Fließkurvenaufnahme mit konstanter Umformgeschwindigkeit im Plastometer.

F Umformkraft, A Probenfläche, Δh Umformweg, h Probenhöhe, h_0 Probenanfangshöhe, v Stempelgeschwindigkeit

Bei Raumtemperatur und bei 200 $^{\circ}\text{C}$ eignen sich Teflonfolien mit einer Dicke von 0,1 bis 0,2 mm am besten, um die Reibung gering zu halten. Für Stauchversuche bei 400 $^{\circ}\text{C}$ werden 0,1 bis 0,2 mm dicke Zinkfolien verwendet. Bei Prüftemperaturen ab 600 $^{\circ}\text{C}$ werden in Methanol aufgeschwemmte Glaspulver auf die Stauchbahnen aufgetragen. Die Zusammensetzung der Glaspul-

Fließkurven-Informationssystem

Das Fließkurven-Informationssystem PC-FIS ist ein Programm für Personalcomputer, mit dem Fließspannungsverläufe in verschiedenen Abhängigkeiten grafisch dargestellt und diskrete Fließspannungen berechnet werden können. Dabei werden die in einem Versuch aufgenommenen Werkstoffdaten auf einfache Weise in das Programm eingegeben. Benötigt werden für eine Fließkurve nur etwa vier bis sechs Datenpaare (φ, k_f) , die durch das System automatisch zu einer Fließkurve verknüpft werden.



Fließkurvenschar in Abhängigkeit von Umformgrad und Probestemperatur bei konstanter Umformgeschwindigkeit.

Bild: Verfasser

PC-FIS bietet dabei die Möglichkeit, auf vier verschiedene Arten die Fließspannungsverläufe darzustellen. Bei vorgegebener Umformgeschwindigkeit bestehen folgende Möglichkeiten:

- ▶ Fließspannung als Temperaturkurven in Abhängigkeit vom Umformgrad – $k_f(\varphi)$,
- ▶ Fließspannung als Kurven konstanten Umformgrades in Abhängigkeit von der Temperatur – $k_f(T_u)$,
- ▶ Fließspannung in Abhängigkeit von Temperatur und Umformgrad – $k_f(T_u, \varphi)$,
- ▶ Fließspannung in Abhängigkeit von Umformgrad und -temperatur – $k_f(\varphi, T_u)$ (Bild).

Sind unterschiedliche Fließkurven für einen Werkstoff in das System aufgenommen, können die Fließspannungen für verschiedene Arbeitspunkte ermittelt werden. Ein integriertes Programmmodul dient dabei zur Berechnung von Fließspannungen für beliebige Temperaturen und Umformgrade eines gespeicherten Werkstoffes. Die Daten können zudem als Wertetabelle in einer ASCII-Datei gespeichert werden und stehen damit auch Anwenderprogrammen, zum Beispiel Simulationsprogrammen, für einen direkten Zugriff zur Verfügung. Dem Anwender des Programms steht eine benutzerfreundliche Oberfläche mit einem umfangreichen Hilfesystem zur Verfügung.

ver wird so gewählt, daß sie bei jeweiliger Prüftemperatur einen teigigen Zustand besitzen und somit eine gute Schmierung bewirken.

Die Kraftmessung geschieht mittels im Eigenbau hergestellter Kraftmeßkörper, die zugleich als Pressenstempel verwendet werden. Eine Beeinflussung der Kraftmessung durch Trägheitskräfte ist im untersuchten Geschwindigkeitsbereich nicht zu erwarten, da sie erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten auftreten. Für die Wegmessung wird ein induktiver Weggeber verwendet, der im Plastometer so angebracht wird, daß keine federnden Maschinenteile die Messung verfälschen.

Die Aufnahme der Meßwerte (Kraft F und Weg s) geschieht wie folgt: Während des Stauchvorganges wer-

den die Meßsignale von dem DMS-bestückten Kraftmeßkörper und dem induktiven Weggeber über den Meßverstärker und einen A/D-Wandler in einen PC transferiert. Die Meßdaten stehen als Datei für die weitere Bearbeitung zur Verfügung, beispielsweise im Fließkurven-Informationssystem PC-FIS (siehe Kastentext).

Literatur

- [1] Doege, E., H. Meyer-Nolkemper, und I Saeed: Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1986.
- [2] Luig, H.: Einfluß von Probengröße und Umformgeschwindigkeit auf die Aufnahme von Fließkurven. Steel Research 61 (1990) 1. S. 21-25.
- [3] Doege, E.; H. Luig, und R. Seidel: Messen der Fließspannung zum Prüfen der Umformigenschaften von metallischen Werkstoffen. Maschinenmarkt 99 (1993) 18. S. 46-50.