

Improved numerical process simulation by means of an innovative friction law for hot forging

A more precise description of the friction and the heat transmission in the FE simulation, already during the simulation-assisted process design, enables more accurate observations to be made in regard to the material flow and the temperature distribution than those possible with the models implemented in the standard manner in FE systems. Moreover, the forming force requirement is more accurately predictable, thus enabling a more

economical selection of presses. In the framework of the projects presented, funded by joint industrial research, friction models were developed, validated on model processes and applied in practical processes. Furthermore, for validation purposes, a basic experiment was developed with which it is possible to examine the friction under forging conditions.

Verbesserte numerische Prozesssimulation mittels eines innovativen Reibgesetzes für die Warmmassivumformung

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens,
Dr.-Ing. Anas Bouguecha und
Dipl.-Ing. Jens Mielke,
Hannover

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt,
Dr.-Ing. Markus Bambach,
Dr.-Ing. Mohammed Al Baouni und
Dipl. Phys. Andreas Demant, Aachen

Eine genauere Beschreibung der Reibung und des Wärmeübergangs in der FE-Simulation lässt bereits während der simulati- onsgestützten Prozessauslegung präzisere Aussagen bezüglich des Stoffflusses und der Temperaturverteilung zu als es mit standardmäßig in FE-Systemen implemen- tierten Modellen möglich ist. Darüber hin- aus ist der Umformkraftbedarf exakter vor- hersagbar und somit eine wirtschaftlichere

Pressenauswahl möglich. Im Rahmen des vorgestellten, von der Industriellen Ge- meinschaftsforschung geförderten, Pro- jekts wurden Reibmodelle entwickelt, an Modellprozessen validiert und auf Praxis- prozesse angewendet. Zur Validierung wurde zudem ein Grundlagenversuch ent- wickelt, mit dem die Reibung unter Schmiedebedingungen untersucht werden kann.

Einleitung

Die Finite-Element-Methode (FEM) ist ein leistungsfähiges Werkzeug zur Auslegung und Optimierung von Warmmassivumform- prozessen. Die genaue Kenntnis der Prozess- randbedingungen ist dabei Voraussetzung für eine hohe Genauigkeit der Simulationser- gebnisse. Da die Reibung in der Kontakt- fläche und der Wärmeübergang vom Werk- stück ins Werkzeug einen wesentlichen Ein- fluss auf den gesamten Umformprozess ha- ben, ist die Beschreibung dieser beiden Randbedingungen in der FE-Simulation ent- scheidend für die Verwertbarkeit der Simu- lationsergebnisse in der Praxis. Dabei sind u. a. der Kontaktdruck, die Temperatur an der Randschicht, die Rauheiten der Kontakt- oberflächen, die Gleitgeschwindigkeit und das

Fließverhalten des Werkstoffs die wesent- lichen Einflussgrößen. In den meisten zur Ver- fügung stehenden FEM-Programmen basiert die Modellierung des Reib- und Wärmeüber- gangphänomens auf der Annahme konstanter Koeffizienten für die Modellgleichungen. Hierdurch werden lokale Einflussgrößen nicht mit der erforderlichen Genauigkeit er- fasst und in der FE-Simulation berücksich- tigt.

Eine Verbesserung der Simulationsgenau- igkeit ist für die Umformindustrie von grund- legender Bedeutung, wobei die als Industrie- standard geltende starre Modellierung der Werkzeuge nicht außer Acht bleiben sollte. Das Forschungsziel des Projekts war die Ent- wicklung jeweils eines Gesetzes zur nu-

merischen Abbildung der Reibung und des Wärmeübergangs für schmiedeähnliche Be- dingungen, um die Genauigkeit der Prozess- simulation von Warmmassivumformvorgän- gen mithilfe von kommerziellen FE-Pro- grammen zu erhöhen.

In einem weiterentwickelten Grundlagen- versuch wurden zunächst die Einflüsse ver- schiedener Prozessbedingungen auf die Rei- bung untersucht. Diese Einflüsse muss das Reibmodell zur verbesserten Beschreibung berücksichtigen.

Es wurden hierzu sowohl Modellprozesse als auch Praxisprozesse experimentell un- tersucht. Nach der FE-Modellbildung erfolgte die numerische Berechnung der Prozesse mit unterschiedlichen Modellen. Die Ergebnisse

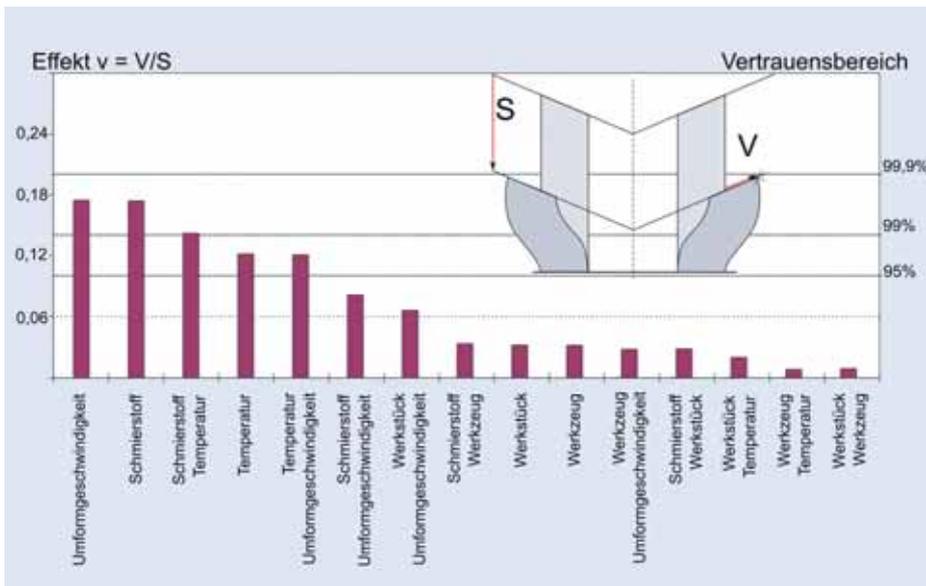


Bild 1: Einflussfaktoren auf die Reibung. Prinzip des Stauchversuchs anhand der Probengeometrie.

wurden den experimentellen Daten gegenübergestellt und das neu entwickelte Modell wurde anhand von realen Prozessen validiert.

Ermittlung der Einflussgrößen auf die Reibung

Zur grundlegenden Untersuchung der Einflüsse verschiedener Prozessgrößen auf die Reibung wurde ein Grundlagenversuch weiterentwickelt, in dem die Prozessbedingungen der Warmmassivumformung realisiert werden können.

Der Kegelstauchversuch an Rohrproben (Rohrkegelstauchversuch; Prinzipbild in Bild 1) [KOP98] wurde dem bekannten Ringstauchversuch vorgezogen, da die Relativgeschwindigkeit der Kontaktflächen deutlich homogener ist und hierdurch besser untersucht werden kann. Zudem bietet der Rohrkegelstauchversuch den Vorteil, dass nur eine Wirkfuge vorhanden ist, woraus sich verschiedene apparative Vorzüge ergeben. Unter anderem erlaubt die Vernachlässigung der unteren Kontaktfläche eine induktive Erwärmung der Probe in der Apparatur bis 1250 °C, wodurch die erwärmte Probe nicht umgesetzt werden muss und die Zeit zwischen Erwärmung und Stauchen deutlich reduziert werden kann.

Durch Variation des unteren Außendurchmessers kann der Kontaktdruckbereich im Bereich von 500 bis 900 N/mm² variiert werden. In einer Messreihe wurde über diesen Kontaktdruckbereich eine deutliche Abhängigkeit der Reibung vom Kontaktdruck

ermittelt [ALB09].

Die Einflüsse von Schmierung, Werkstück- und Werkzeugmaterial (Fließspannung), Temperatur und Umformgeschwindigkeit wurden mit einer Effektanalyse nach

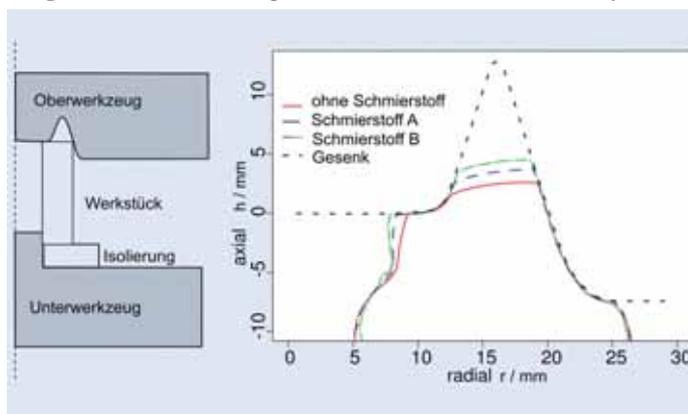


Bild 2: Aufbau des Gesenkstauchversuchs und Konturvergleich unterschiedlicher Reibsysteme (Temperatur 850 °C und Umformgeschwindigkeit 0,1/s).

[KLE08] untersucht. Sie erlaubt die Einflüsse dieser Parameter auf die Reibung untereinander zu vergleichen und Wechselwirkungen zu identifizieren. Die genannten Faktoren wurden in einer statistischen Versuchsplanung einbezogen und in einer gemeinsamen Messreihe mit 54 Einzelmessungen untersucht. Zur Charakterisierung der Reibung wird als Zielgröße der Quotient aus Verschiebung und Stempelweg $v = V/S$ verwendet. Äußere Störgrößen wurden durch zufällige Abfolge der Messungen reduziert.

Zur Identifikation signifikanter Einflüsse auf die Zielgröße und damit die Reibung wurden die Effekte für die Einflussfaktoren und Wechselwirkungen untersucht, die in Bild 1 dargestellt sind. Aus der Messgenauigkeit in der Bestimmung der Zielgröße wurden die Vertrauensbereiche über die Student'sche Verteilung für einseitige Tests ermittelt.

Ausgehend von der Zielgröße v sind die größten Einflussfaktoren auf die Reibung die Umformgeschwindigkeit und die Schmierstoffe. Als weitere Einflussgröße wird die Temperatur identifiziert, die in Simulationen unter anderem über eine temperaturabhängige Fließspannung berücksichtigt wird. Zudem sind die Wechselwirkungen aus Schmierstoff und Temperatur sowie Temperatur und Umformgeschwindigkeit signifikant.

Die Materialien für Werkstücke und Werkzeuge (Fließspannung) zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Reibung.

Die Reibmodellierung muss die Umformgeschwindigkeit und Kontaktdrücke berücksichtigen und benötigt einen Freiheitsgrad, um unterschiedliche Schmierstoffe abbilden zu können.

Entwicklung eines Reibungsversuchs mit realitätsnaher Gesenkgeometrie

Um die bei Warmmassivumformprozessen auftretenden Stempelkräfte und Werkstücktemperaturen untersuchen zu können, wurde am IBF ein axialsymmetrisches Schmiedegesenk entwickelt [ALB09]. Mit einer möglichst einfachen Versuchsgeometrie wird ein Schmiedeprozess (Bild 2 links) nachgebildet, in dem ähnliche Kontaktdrücke und Materialflüsse realisiert werden wie beim Schmieden. Im Gegensatz zu realen Schmiedeprozessen wird ein zusätzlicher Freiheitsgrad, die Formfüllung des oberen Gesenks, verwendet. In diesem Versuch werden sowohl die Umformkraft, der Stempelweg und die Werkstücktemperatur kontinuierlich aufgezeichnet. Die Erwärmung der Probe erfolgt induktiv in der Versuchsapparatur, sodass die Probe ohne Umsetzen innerhalb von 2 s nach Erwärmen gestaucht werden kann. Störeinflüsse durch Umsetzen werden hierdurch vermieden. Zwischen Werkstück und Unterstempel erfolgt eine thermische Isolierung.

Mit dieser Geometrie wurden 18 Stauchversuche bei unterschiedlichen Werkstücktemperaturen (800 °C bis 1250 °C), Umformgeschwindigkeiten (0,1/s bis 10/s) und Schmierstoffsystemen durchgeführt. In Bild 2/rechts sind die Konturen dreier Messungen bei einer Werkstücktemperatur von 850 °C und einer Umformgeschwindigkeit von 0,1/s dargestellt. Die drei verwendeten Schmierstoffsysteme erzeugen deutlich unterscheidbare Konturen, was bestätigt, dass die gewählte Kontur sehr reibungssensitiv ist.

Durch die kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Prozessgrößen (Stempelweg, Umformkraft und Werkstücktemperatur) kann jede Messung in FEM-Systemen nachgebildet werden. Die Ergebnisse der Simulation können direkt mit den realen Messungen verglichen und hierdurch Reibungsmodelle besser evaluiert werden als mit Industrieprozessen.

Bisherige Reibmodellierung

Die in kommerziellen FE-Systemen verfügbaren Reibmodelle basieren überwiegend auf den vereinfachten Annahmen nach Tresca und Coulomb. Bei Coulomb [Sch79] ist die Reibschubspannung abhängig von der Kontaktspannung und einem konstanten Reibbeiwert μ , während Tresca die Reibschubspannung für plastifizierte Reibpartner in Abhängigkeit der Schubfließgrenze formuliert. Weitere Reibmodelle beziehen die lokale Änderung der Kontaktbedingungen mit ein und wurden u. a. von Bederna [BED97], Bernhardt [BER98] und Neumaier [NEU03] entwickelt. Jedoch haben diese Autoren in ihren Forschungsarbeiten nicht die veränderten Kontaktbedingungen infolge elastischer Werkzeugdeformationen bei der Entwicklung der Reibmodelle einbezogen. Dieses verfolgte Alasti mit der Entwicklung seines Modells [ALA08].

Innovative Reibmodellierung

Im Gegensatz zu bislang verwendeten Reibgesetzen mit konstanten Parametern sind aufbauend auf den Modellentwicklungen von Alasti und Neumaier in dem neuen Modell sowohl die Starrkörperbewegung, die Plastifizierung, als auch die Relativgeschwindigkeit in einem Maße eingebunden, wie es den realen Verhältnissen entspricht.

Da das Alasti-Reibmodell mittels elastischer Werkzeugmodellierung kalibriert wurde und es darüber hinaus viele Konstanten zur Kalibrierung enthält, wurde ein neues Reibmodell am IFUM entwickelt. Ziel war es hierbei, die starre Werkzeugmodellierung als Grundlage für das Reibmodell zu nehmen, da die elastische Werkzeugmodellierung nicht dem Industriestandard entspricht. Das neu entwickelte Reibmodell hat folgende Form (Gl. 1):

$$\tau_R = \left[\underbrace{0,3 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_v}{k_f}\right) \cdot |\sigma_N|}_{A_1} + \underbrace{m \cdot k \cdot \frac{\sigma_v}{k_f} \cdot \left\{1 - \exp\left(-\left|\frac{\sigma_N}{k_f}\right|\right)\right\}}_{A_2} \right] \cdot \underbrace{\exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{v_{rel}}{C}\right)^2\right]}_{A_3} \quad (Gl. 1)$$

- A₁: Starrkörperbewegung
- A₂: Plastifizierung
- A₃: Gleitgeschwindigkeitseinfluss

Die Reibschubspannung hängt von zeitlich und örtlich veränderlichen Zustandgrößen, wie der Vergleichsspannung nach von Mises σ_v , der Fließspannung k_f des Werkstückstoffs, der Kontaktnormalspannung σ_N und zudem von der Gleitgeschwindigkeit v_{rel} sowie der Schubfließgrenze k ab.

Dieses Reibmodell ist sowohl für Kontaktbereiche mit geringen Kontaktdrücken und vorwiegender Starrkörperreibung als auch für hohe Kontaktdrücke mit plastifiziertem Kontaktpartner geeignet. Diese beiden Formen der Reibung werden in geeigneter Weise in dem Reibmodell mit Hilfe des Quotienten σ_v/k_f gewichtet. Dadurch ergeben sich

für das neu entwickelte Reibgesetz gemäß Gl. 1 folgende Fallunterscheidungen:

- Grenzfall Starrkörperreibung mit nicht plastifizierten Rauigkeitsspitzen: Gl. 2

$$\frac{\sigma_v}{k_f} \approx 0 \Rightarrow \tau_R = 0,3 \cdot \sigma_N \cdot f(v_{rel}) \quad (Gl. 2)$$

- Elastische Verformung; Mischfall als Summe beider Faktoren: Gl. 3

$$0 < \frac{\sigma_v}{k_f} < 1 \Rightarrow \tau_R = \left[0,3 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_v}{k_f}\right) \cdot |\sigma_N| + m \cdot k \cdot \frac{\sigma_v}{k_f} \cdot \left\{1 - \exp\left(-\left|\frac{\sigma_N}{k_f}\right|\right)\right\} \right] \cdot f(v_{rel}) \quad (Gl. 3)$$

- Grenzfall Werkstückoberfläche plastifiziert: Gl. 4

$$\frac{\sigma_v}{k_f} = 1 \Rightarrow \tau_R = m \cdot k \cdot \left\{1 - \exp\left(-\left|\frac{\sigma_N}{k_f}\right|\right)\right\} \cdot f(v_{rel}) \quad (Gl. 4)$$

Für Vergleichsspannungen $0 < \sigma_v < k_f$ liegt eine Mischung der beiden Reibungsformen vor. Dabei wird angenommen, dass Starrkörperreibung vorliegt, da die Fließspannung k_f an der Werkstückoberfläche nicht erreicht ist, jedoch mit zunehmender Vergleichsspannung σ_v die Rauheitsspitzen zunehmend plastifizieren.

Darüber hinaus berücksichtigt das entwickelte Reibmodell den Einfluss des lokalen Kontaktdrucks σ_N , der lokalen Fließspannung k_f an der Werkstückoberfläche und der lokalen Relativgeschwindigkeit v_{rel} zwischen den Werkstück- und den Werkzeugoberflächen. Damit wird durch den zweiten Term die wahre Kontaktfläche zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug als Einflussgröße eingebunden.

Zur realitätsnahen Beschreibung der Gleitgeschwindigkeit wurde, alternativ zu den Modellen von Neumaier und Alasti, ein neuer funktionaler Zusammenhang entwickelt. Durch Variationsrechnungen mit dem Programm Maple zur Ermittlung einer passenden Funktion entstand die in Gl. 5 zu sehende Formulierung für $f(v_{rel})$, die den Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf die Reibschubspannung realitätsnah widerspiegelt: Gl. 5

$$f(v_{rel}) = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{v_{rel}}{C}\right)^2\right] \quad (Gl. 5)$$

Bild 3 zeigt hierbei grafisch den funktionalen Zusammenhang für verschiedene Werte der Variable C.

Diese Funktion beschreibt die Abnahme der Reibung mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit. Sie besitzt einen Übergangsbereich, der die Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Reibeffekten ermöglicht. Der Haftfall, d. h. wenn die Funktion $f(v_{rel}) = 1$ ist, wird durch diese Funktion realitätsnah wiedergegeben. Mit steigendem Wert des Faktors C sinkt der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf die Reibschubspannung.

Innerhalb der hier vorgestellten Untersuchungen erfolgte die Implementierung und Anwendung des Reibmodells zunächst exemplarisch in das FEM Programmsystem Forge 2007. Die Einbindung des Berechnungsansatzes für die Reibung wird mit Hilfe der im verwendeten Simulationssystem verfügbaren Programmierschnittstelle realisiert. Diese erlaubt den Zugriff auf die für die Reibberechnung relevanten Parameter wie u. a. Kontaktnormalspannung σ_N , Relativgeschwindigkeit v_{rel} und Vergleichsspannung σ_v .

Validierung des IFUM-Reibmodells

Die Validierung des neu entwickelten Reibmodells erfolgte anhand von experimentell aufgenommenen Umformkraftverläufen. Diese wurden mit den numerisch berechneten Verläufen verglichen, um so die Güte des Reibmodells zu quantifizieren. Zunächst erfolgte die Validierung anhand des IBF-Modellversuchs.

Dieser Prozess wurde unter Verwendung verschiedener Reibmodelle sowie mit dem IFUM-Reibmodell simuliert. Die auf Basis dieser Berechnungen ermittelten Kraft-Weg-Verläufe sind in Bild 4 dem experimentell bestimmten Verlauf gegenübergestellt.

Die Charakteristik des realen Kraft-Weg-Verlaufs unter Verwendung des IFUM-Reibmodells wird für große Bereiche qualitativ und quantitativ sehr gut abgebildet.

Anwendung auf Praxisprozesse

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden als Industrieprozesse die dreistufige Umformung eines Vierlochgabelstücks, das Schmieden einer Statorschaufel und eine Vorformoperation zur Fertigung eines Querlenkers betrachtet. Das IFUM-Reibmodell wurde auf diese Praxisprozesse angewendet und seine Berechnungsergebnisse mit denen von standardmäßig verfügbaren und weiterentwickelten Reibmodellen verglichen. Nachfol-

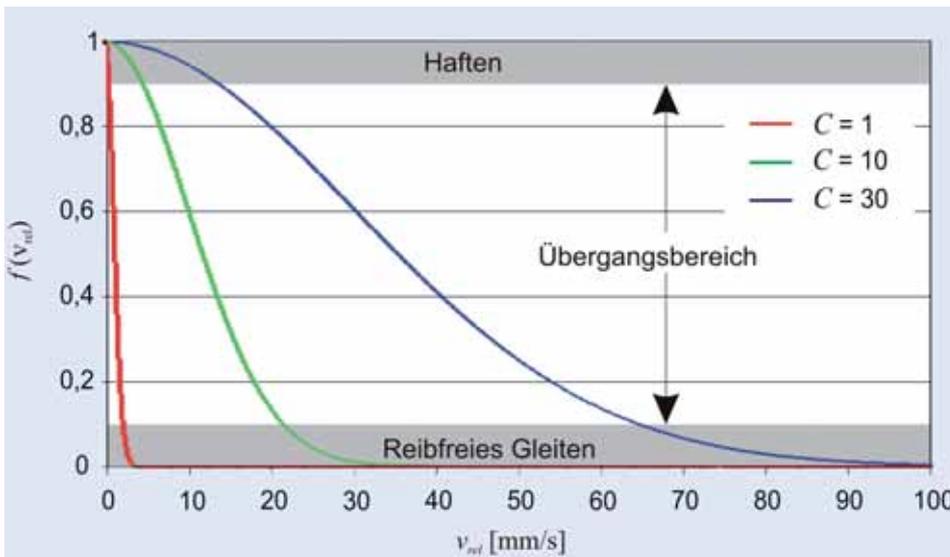


Bild 3: Verlauf des $f(v_{rel})$ -Funktionsterms des IFUM-Reibmodells.

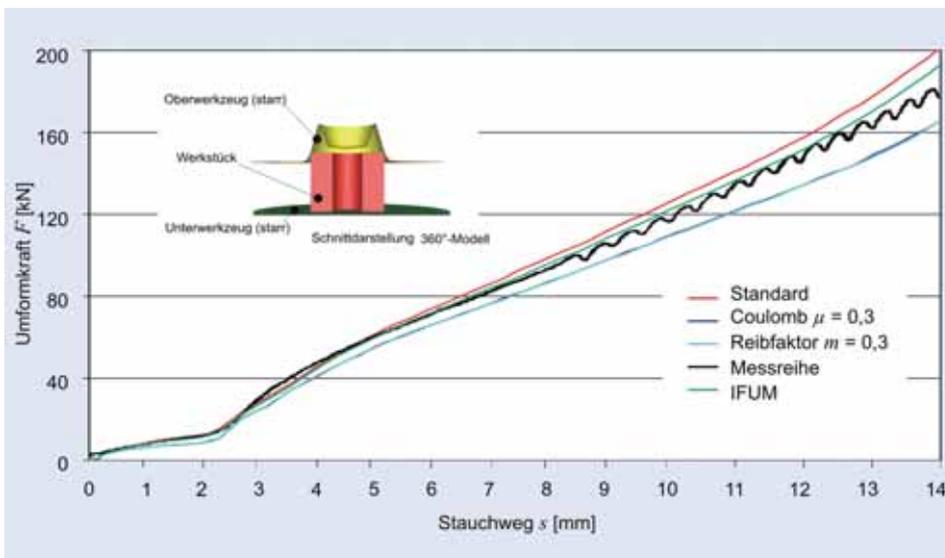


Bild 4: Umformkraftverlauf des IBF-Modellversuchs.



Bild 5: Dreistufiger Schmiedeprozess zur Fertigung eines Vierlochgabelstücks.

gend ist die Anwendung auf den Vierlochgabelstück-Prozess gezeigt (Bild 5), bei dem als Vergleichskriterium der Konturzug der Vorformgeometrie herangezogen wurde.

Die größte Übereinstimmung von berechneter und gemessener Kontur ergibt sich unter Verwendung des neu entwickelten IFUM-Reibmodells. Dieses wird anhand von Konturzugvergleichen deutlich, bei denen die mit dem optischen Messsystem aufgenommenen und ausgewerteten Realgeometrien der berechneten Bauteilgeometrie gegenübergestellt wurden. Die Abweichungen des simulierten zum realen Konturzug bewegen sich in weiten Teilen deutlich unterhalb eines Millimeters, wobei im Bereich der fehlenden Formfüllung eine sehr gute Übereinstimmung vorliegt (Bild 6).

Die Umformkraftberechnung zeigt anhand von Bild 7 eindeutig eine realitätsnahe Abbildung mit dem IFUM-Reibmodell. Die Ergebnisse der Berechnung des Vierlochgabelstücks mit dem Alasti-Reibmodell unter Nutzung einer elastischen Werkzeugmodellierung sind hier zum Vergleich ebenfalls dargestellt.

Die Berechnung mit dem IFUM-Modell entspricht trotz starrer Werkzeugmodellierung den Ergebnissen der Umformkraftberechnung mit dem Alasti-Modell bei elastischer Modellierung der Werkzeuge. Die Berechnung mit dem Alasti-Modell unter Verwendung starrer Werkzeuge zeigt für die Umformkraft jedoch einen viel zu hohen Wert.

Die Anwendung des Programms Transvalor Forge 2007 mit dem IFUM-Reibmodell führt zu guten Berechnungsergebnissen sowohl der Umformkraft als auch der berechneten Geometrie. Eine Integrierung ins kommerzielle Programmsystem ist derzeit noch in Arbeit. Mit dem Programmsystem simufact.forming 9.0, in das das IFUM-Reibmodell implementiert wurde, sind zudem sehr positive Berechnungsergebnisse, auch über die im Projekt betrachteten Industrieprozess hinaus, erzielt worden.

Zusammenfassung

Die Entwicklung eines neuen, für ein breites Spektrum von Schmiedeprozessen anwendbaren Reibmodells, bildet die Grundlage für die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Schmiedeunternehmen. Das neue Reibmodell entspricht dem Industriestandard der Prozessberechnung mit starrer Modellierung der Werkzeuge.

Das neu entwickelte Reibmodell ist in der Lage, die Reibung bei der Starrkörperbewegung sowie bei plastifiziertem Werkstück zu berücksichtigen. Darüber hinaus wird die wahre Kontaktfläche nach Neumaier beim Schmieden einbezogen. Zudem wurden über eine geeignete Funktion statische und dynamische Effekte über den Einfluss der Gleitgeschwindigkeit realitätsnah berücksichtigt. Somit werden die Haupteinflussgrößen, wie sie mit dem Grundlagenversuch ermittelt wurden, in der Formulierung berücksichtigt.

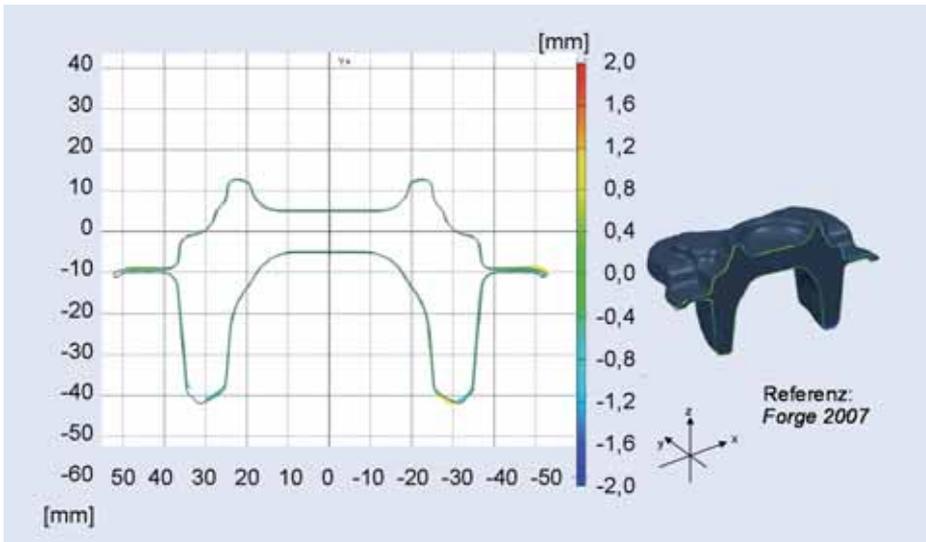


Bild 6: Konturvergleich der Realgeometrie des Vierlochgabelstücks mit berechneter Geometrie.

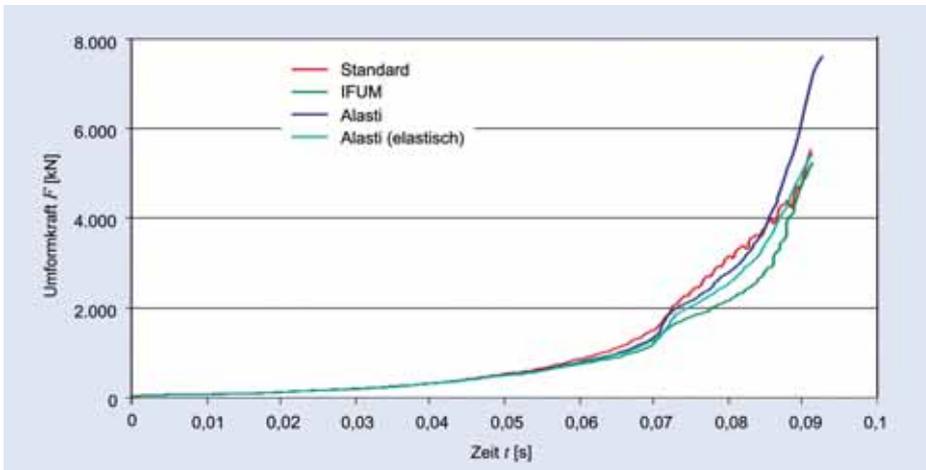


Bild 7: Umformkraft-Zeit-Verlauf vom Prozess Vierlochgabelstück bei Verwendung unterschiedlicher Reibmodelle. Bilder: Autoren

Zur Validierung des neuen Reibmodells dienten u. a. ein entwickelter Modellversuch und darüber hinaus ein Industrieprozess zur Herstellung eines Vierlochgabelstücks. Für diese Prozesse wurden Daten aus experimentellen Untersuchungen den Berechnungsergebnissen gegenübergestellt. FE-Berechnungen erfolgten sowohl mit standardmäßig in FE-Systemen verfügbaren als auch mit eigens implementierten Modellen.

Die Verbesserung der FE-Systeme durch Implementierung des neu entwickelten Reibmodells dieses Projekts kommt gerade den kleinen Unternehmen der Schmiedeindustrie

zu gute und sorgt damit für die erweiterte Nutzung dieser etablierten Werkzeuge bei der Prozesssimulation.

Eine bislang erfolgte Validierung des IFUM-Reibmodells wird in naher Zukunft auf eine breite Basis gestellt. Das neu entwickelte Reibmodell wurde zum Projektabschluss in das Simulationsprogramm simufact.forming 9.0 integriert und steht allen Anwendern dieses Programmes standardmäßig zur Verfügung. Hiermit konnten bereits sehr gute Berechnungsergebnisse bzgl. Formfüllung und Fehlerdetektion erzielt werden. ■

Das Forschungsvorhaben Nr. IGF 15204 N der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) und der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV) wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die AiF finanziert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FOSTA, Sohnstr. 65, 40237 Düsseldorf und bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Literatur

[ALA08] Alasti, M.: Modellierung von Reibung und Wärmeübergang in der FEM-Simulation von Warmmassivumformprozessen. Diss., Leibniz Universität Hannover, Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen 2008

[ALB09] Al Baouni, M.: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Prozessbedingungen auf die Reibung bei Umformprozessen. Dissertation RWTH Aachen, 2009

[BED97] Bederna, C.: Bestimmung des lokalen Zwischenschichtzustandes in der Massivumformung. Diss., Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 416, VDI Verlag Düsseldorf 1997

[BER98] Bernhardt, R.: Ein Beitrag zur experimentellen und numerischen Analyse lokaler Kontaktspannungen und Kontakttemperaturen in der Wirkfuge von Gesenkgravuren unter besonderer Beachtung des Randeibungsproblems. Diss., TU Bergakademie Freiberg, Freiburger Forschungshefte, Band 286, Freiberg 1998

[KLE08] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. Hanser Verlag, 2008

[KOP98] Kopp, R.; Wiegels, H.: Einführung in die Umformtechnik. Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1998

[NEU03] Neumaier, T.: Zur Optimierung der Verfahrensauswahl von Kalt-, Halbwarm- und Warmmassivumformverfahren. Diss., Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 637, VDI Verlag 2003

[SCH79] Schey, J.: Metal deformation processes: Friction and Lubrication. New York, Pergamon 1979



Dr.-Ing. Markus Bambach Dr.-Ing. Mohammed Al Baouni Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens Dr.-Ing. Anas Bouguecha Dipl. Phys. Andreas Demant Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt Dipl.-Ing. Jens Mielke