

During cold forging, high temperatures arise due to the forming and friction energy which is converted into heat. The ensuing stationary temperature of the tools and the influence thereof are largely unknown, however. Likewise, very little is known about temperature development during production ramp-up. The analysis of the influence on the tribological system is possible using a sliding press. Tests show that the friction value decreases

Temperature Development and the Tribological Consequences at the Start of Cold Forging Production

with an increase in temperature until adhesion occurs at a lubricant-specific temperature. Temperature measurements in a multistage tool provide information on temperature development. The observed behaviour can be simulated in a brief calculation time using newly developed software tools.

Temperatureentwicklung und die tribologischen Folgen bei Produktionsbeginn der Kaltmassivumformung

Dipl.-Ing. Christoph Müller, Dr.-Ing. Jan Filzek,
 Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, Darmstadt,
 Dipl.-Ing. (FH) Oliver Oehler,
 M. Sc. Philipp Scherzinger, Gutach und
 Dr.-Ing. Michael Twickler, Herzogenrath

Bei der Kaltmassivumformung entstehen durch die Umform- und Reibenergie, welche in Wärme umgewandelt wird, hohe Temperaturen. Die sich einstellende stationäre Werkzeugtemperatur und deren Einfluss sind bisher jedoch größtenteils unbekannt. Ebenso ist die Entwicklung der Temperatur bei Produktionsanlauf nur unzureichend erforscht. Die Untersuchung des Einflusses auf das tribologische System ist mit einer Gleitstauchanlage möglich. Versuche zeigen, dass mit einer Temperaturerhöhung der Reibwert sinkt, bis bei einer schmierstoffspezifischen Temperatur Adhäsion auftritt. Temperaturmessungen in einem Mehrstufenwerkzeug geben Aufschluss über die Temperaturentwicklung. Das beobachtete Verhalten lässt sich mit neu entwickelten Softwaretools in einer kurzen Rechenzeit simulieren.

Einleitung

Die Kaltmassivumformung eignet sich besonders zur Herstellung von Bauteilen mit großen Stückzahlen [Rae02]. Es treten auf Grund der Umformung ohne Werkstückerwärmung hohe tribologische Lasten auf, die zu Werkzeugverschleiß und Adhäsion führen können. Dies sind Kontaktnormalspannungen bis zu 3.000 N/mm^2 [Ste99a, Hem99a, Rae02a], Ober-

flächenvergrößerungen bis zu 50 [Bay94a, Ste99a], Gleitwege bis zu 100 mm [Mue13b] und Relativgeschwindigkeiten bis zu 500 mm/s [Gro13a]. Darüber hinaus wird ein großer Anteil der Umform- und Reibenergie in Wärme umgewandelt. Dies führt zu Werkzeugtemperaturen von bis zu $200 \text{ }^\circ\text{C}$ [Bay94a, Wib95a] und lokalen Temperaturspitzen im

stationären Zustand bis zu $500 \text{ }^\circ\text{C}$ [Gro04a, Ste99a]. Eine genaue Analyse der auftretenden Temperaturen ist nicht verfügbar. Die Temperaturentwicklung zu Beginn der Produktion, das heißt bis der stationäre Bereich erreicht ist, ist ebenso unbekannt wie die Höhe der sich einstellenden Temperatur. Es ist hingegen untersucht, dass die komplexen tribologischen



DIFFERENT PARTS ONE METAL FORMING MACHINE

Systeme, welche zur Erzielung wirtschaftlicher Prozesse in Anbetracht der hohen tribologischen Lasten notwendig sind, von der Temperatur beeinflusst wird. Für Zinkphosphat mit Seife ist in der Literatur ein Temperaturoptimum bei 130 °C angegeben. Ab 200 °C hingegen kann bereits Adhäsion auftreten [Wib95a]. Bei Polymeren ist zudem die Viskosität stark temperaturabhängig. Sie zeichnet sich einerseits aus durch einen Abfall mit einer Erhöhung der Temperatur, andererseits wiederum durch einen Anstieg ab einem spezifischen Grenzwert [Nit10]. Bei Einschichtschmierstoffsystemen sinkt mit der Zunahme der Temperatur die Reibung bis zu einem kritischen Punkt, ab welchem die Reibung schlagartig ansteigt und Adhäsion auftritt [Zan14a].

Dieser Beitrag geht näher auf die Temperatur bei der Kaltmassivumformung ein und beschreibt deren Entwicklung bei Produktionsanlauf. Zudem zeigen Untersuchungen den Einfluss auf die Reibung. Die Erwärmung der Werkzeuge ist durch die beschriebenen Untersuchungen und Simulationstools bewertbar.

Gleitstauchanlage

Zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Tribologie der Kaltmassivumformung sind geeignete Prüfstände notwendig. Viele Tribometer bilden die tribologischen Lasten der Kaltmassivumformung nur unzureichend ab [Gro13a, Mue14a]. Die Gleitstauch-

anlage des Instituts für Produktionstechnik und Umformmaschinen der Technischen Universität Darmstadt hingegen erlaubt es, die tribologischen Lasten realer Prozesse im Versuch nachzustellen. Bei diesem Versuchsprinzip erfolgt, wie in Bild 1 gezeigt, in einem ersten Schritt ein Stauchen der Probe, wodurch ein Einstellen der Kontaktnormalspannung und der Oberflächenvergrößerung erfolgt. In einem zweiten Schritt schließt sich der Gleitvorgang

an, während dessen die Lasten konstant gehalten werden. Ein Messen aller auftretenden Kräfte erlaubt es, einen Reibkoeffizienten durch die Division der Reibkraft durch die Normalkraft zu berechnen.

Für Temperaturuntersuchungen verfügt die Gleitstauchanlage über die Möglichkeit einer Temperierung der Werkzeuge (Gleitplatten). Diese erweiterte Heizung besitzt eine Leistung

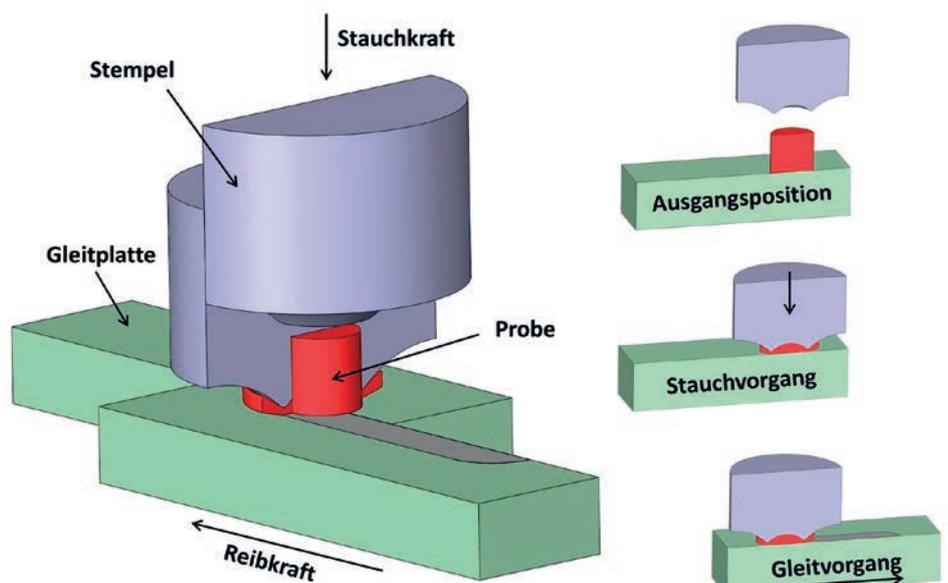


Bild 1: Schema des Gleitstauchversuchs.

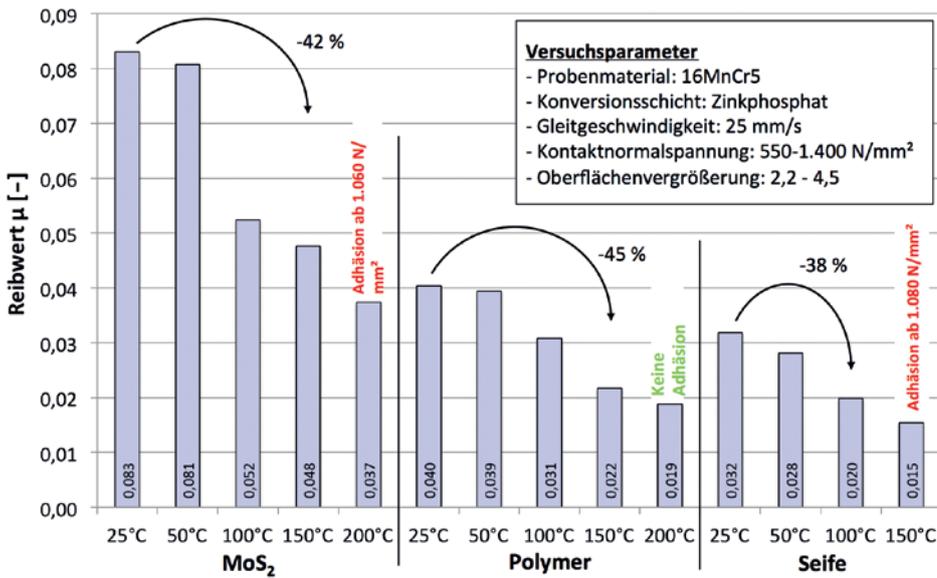


Bild 2: Einfluss der Temperatur auf die Reibung.

von 6 kW und erlaubt es, mit der vorhandenen Isolierung sowie Kühlung der Kraftmesstechnik, Werkzeugtemperaturen bis zu 400 °C zu untersuchen. Zusätzlich ist es möglich, die Proben mit Hilfe eines Ofens oder einer Induktionsanlage vorzuwärmen. Somit ist die Temperatur in der relevanten Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück einzustellen.

Zur Überprüfung sowie Analyse der Temperatur ist die Anlage mit einem Oberflächenthermometer ausgerüstet, welches bei Beginn des Versuchs entfernt werden muss. Die Regelung der Temperatur erfolgt daher über einen Temperaturfühler unter den Gleitplatten. Ein Beobachten der Temperaturentwicklung während des Versuchs ist über ein integriertes Pyrometer oder mit einer externen Thermokamera möglich. Dies erlaubt lediglich eine Vermessung der Mantelfläche der Proben. Ein direktes Messen in der Kontaktzone ist bislang nicht möglich.

Temperatureinfluss auf Schmierstoffe

Eine Untersuchung des Einflusses der Temperatur erfolgt mit Hilfe der zuvor beschriebenen Gleitstauchversuche durch die Firma Filzek TRIBOtech. Betrachtet wurden drei verschiedene Schmierstoffe, die alle auf Proben aus 16MnCr5 mit einer Zinkphosphatschicht aufgebracht wurden. Der Temperaturbereich liegt zwischen der Raumtemperatur (25 °C) und 200 °C. Eine Erwärmung erfolgte von den Werkzeugen (Gleitplatte) und den Proben (im Ofen). Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich um Anfangstemperaturen vor dem Versuch handelt. Durch das Stauchen wird zusätzliche Umformenergie in Wärme umgewandelt, wobei zugleich ein Abkühlen auftritt. Auch die Reibwärme ist nicht berücksichtigt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Werkzeugtemperatur auf Grund der größeren Masse die Temperaturveränderung dominiert. Zusätzlich wurden die Stempelkräfte variiert und es er-

gaben sich über die gesamte Kontaktfläche betrachtet mittlere Kontaktnormalspannungen zwischen 550 N/mm² und 1.400 N/mm² sowie Oberflächenvergrößerungen zwischen 2,2 und 4,5. Die Ergebnisse der Versuche zeigt Bild 2, wobei die angegebenen Reibwerte jeweils Mittelwerte aus den verschiedenen Lasten sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass von den drei betrachteten Schmierstoffsystemen Molybdändisulfid bei Raumtemperatur die höchste Reibung besitzt. Der Reibwert von Seife ist um 61 Prozent geringer. Polymer auf Zinkphosphat ist dazwischen einzuordnen. Diese Reihenfolge verändert sich auch bei einer Erwärmung von Proben oder Werkzeug nicht, wobei für alle drei Schmierstoffsysteme der Reibwert mit einer Erwärmung abfällt. Der Unterschied ist bei Polymer mit 45 Prozent am höchsten, bei Seife ist er mit 38 Prozent am geringsten, und der von Molybdändisulfid ist mit 42 Prozent dazwischen einzuordnen. Diese Reibwertreduzierung ist nicht unbegrenzt. Seife versagt bei 150 °C und Molybdändisulfid bei 200 °C (bei einigen Lastenprofilen). Die Belastungsgrenze des verwendeten Polymers ist hingegen in dieser Versuchsreihe noch nicht erreicht.

Temperaturmessungen im Realversuch

Die vorherigen Versuche zeigen den deutlichen Einfluss der Temperatur auf die Reibung. Folglich ist es von Bedeutung, deren Entwicklung im Prozess zu kennen. Entsprechend erfolgten bei der Firma Schondelmaier GmbH – Presswerk Messungen zur Entwicklung der Temperatur in realen mehrstufigen Prozessen. Das Ergebnis einer dieser Messungen ist exemplarisch in Bild 3 dargestellt. Die Temperaturverläufe sind die des Stempels der zweiten Stufe eines dreistufigen Umformprozesses während des Napfrückwärtsfließpressens. Hierzu ist ein Thermoelement in einer Bohrung in der Mittelachse des Stempels platziert worden. Der Abstand von 10 mm zur Spitze konnte auf Grund der hohen Druckbelastungen nicht weiter reduziert werden.

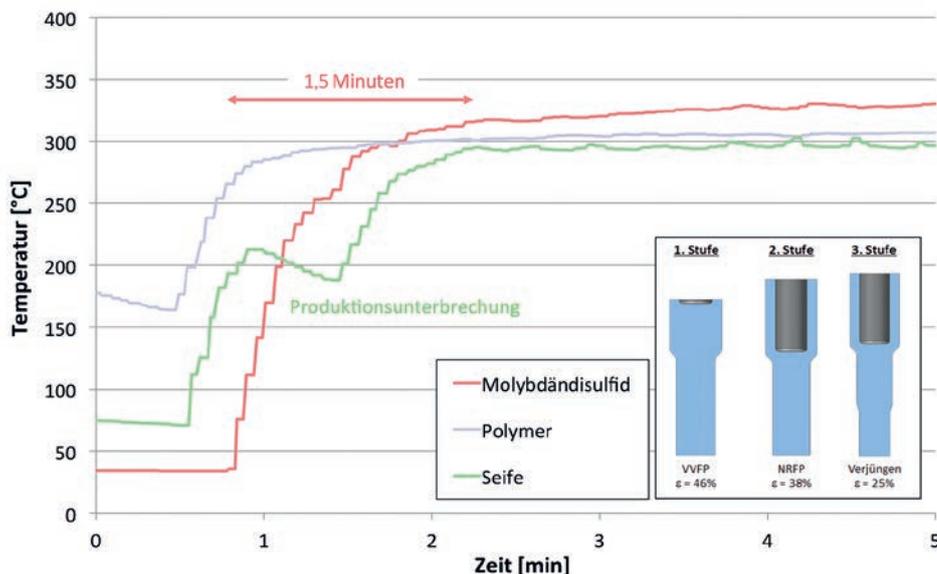
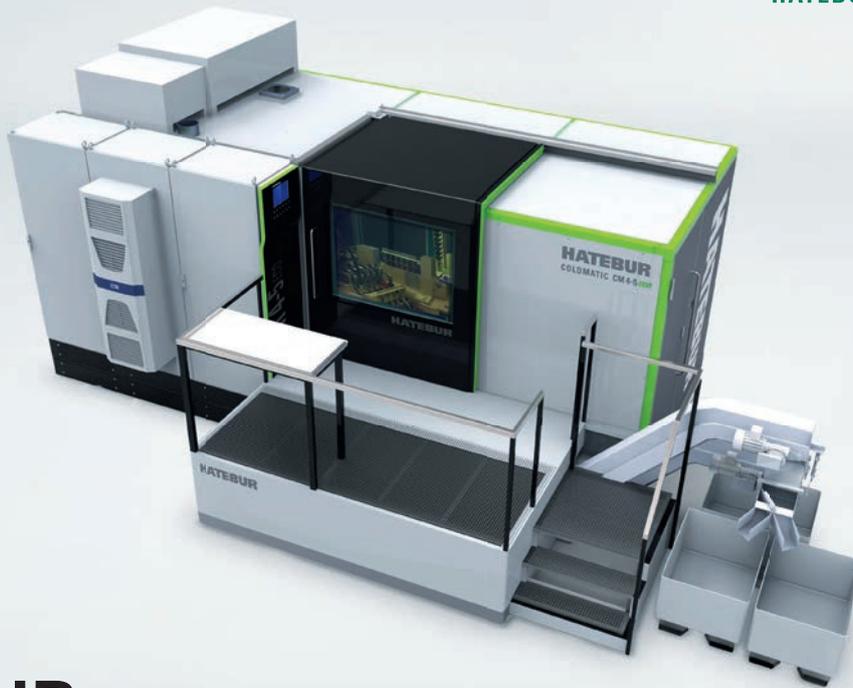


Bild 3: Temperaturentwicklung über die Produktionszeit.

Die Messergebnisse zeigen den kontinuierlichen Anstieg der Temperatur über die Produktionszeit. Hierbei stellen die einzelnen kleinen Zacken in den Verläufen jeweils einen Hub dar. Beim Polymer und beim Molybdändisulfid erfolgte ein kontinuierlicher und fehlerfreier Produktionsanlauf. Bei der Seife trat eine Störung auf, weswegen es zu einer Produktionsunterbrechung von ungefähr einer halben Minute kam. Diese erklärt den Temperaturabfall. Lediglich beim Molybdändisulfid begann wegen der durchgeführten Reihenfolge die Produktion bei Werkzeugtemperaturen unter 50 °C. Bei diesem dauert es bis zum Erreichen der stationären Temperatur 1,5 Minuten. In dieser Zeit sind durch die Hubzahl von 20 Hub/min bereits 30 Bauteile umgeformt. Die sich einstellende stationäre Temperatur im Stempel beim Napfrückwärtsfließpressen beträgt mehr



HATEBUR

COLDMATIC CM 4-5^{ECO}

www.hatebur.com

Basel West

als 300 °C und am höchsten ist diese mit 330 °C bei Molybdändisulfid. Diese Werte für die Werkzeuge liegen deutlich über denen aus der Literatur. Auf Grund des noch vorhandenen Abstands zur eigentlichen Umformzone, in der die Wärme entsteht und verteilt wird, ist davon auszugehen, dass die aus der Literatur bekannten lokalen Temperaturspitzen direkt in der Kontaktzone von 500 °C realistisch sind. Kenntnisse über den Temperatur-Zeit-Verlauf helfen zudem bei der Beurteilung geometrischer Veränderungen der Werkzeuge über die Prozessanlaufzeit und somit bei deren Auslegung.

Simulation der Temperatur

Das Messen der Temperatur ist aufwendig und kann erst nach Konstruktion der Werkzeuge und dem Rüsten der Anlage erfolgen. Aus diesem Grund ist es notwendig, die sich einstellende Temperatur sowie deren Verlauf bis zum Erreichen der stationären Temperatur bereits während der Auslegung der Prozesse zu kennen. Eine vollständige Simulation einer Vielzahl von Umformhüben jeder einzelnen Stufe ist sehr aufwendig und führt zu sehr langen Rechenzeiten. Der TOOLTEMP-Analyser der CPM GmbH hingegen erlaubt es, die Entwicklung der Werkzeugtemperatur in einer vertretbaren Rechenzeit zu ermitteln. Hierzu ist die Simulation der Umformung von der Berechnung der Werkzeugtemperatur entkoppelt. Mit Hilfe der Wärme-

ströme aus der Umformsimulation berechnet der TOOLTEMP-Analyser die kontinuierliche Erwärmung der Werkzeuge für eine beliebige Anzahl von Umformhüben. Diese Vorgehens-

weise geht von der Annahme aus, dass die Wärmeströme vom Bauteil an die Werkzeuge primär durch die während der Umformung generierte Umform- und Reibwärme

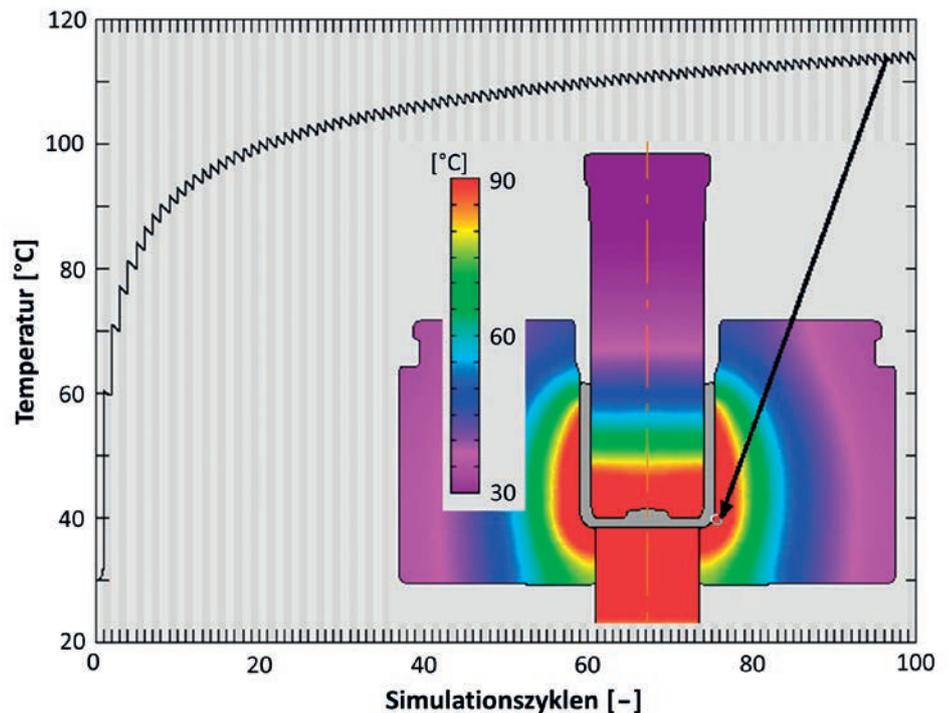


Bild 4: Simulierte Temperaturentwicklung.

Bilder: Autoren

bestimmt sind und nur sekundär durch die aktuelle Oberflächentemperatur der Werkzeuge. Entsprechende Untersuchungen mit einer vollständigen Kopplung von Simulationen einer Vielzahl von Umformhüben mit jeweils zwischengeschalteter Temperaturfeldberechnung in den Werkzeugen belegen die Zulässigkeit dieser Annahme.

Bild 4 zeigt exemplarisch Ergebnisse der Temperaturfeldberechnung in den Umformwerkzeugen der zweiten Umformstufe (Napfrückwärtsfließpressen) einer dreistufigen Umformfolge der Firma Schondelmaier (nicht identisch zum Prozess in Bild 3). Dargestellt sind die inhomogenen Temperaturfelder in den drei beteiligten Werkzeugen nach 100 Umformhüben sowie der Temperaturverlauf für eine Referenzposition in der Matrize. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit 100 Umformhüben (entspricht 5 Minuten) noch kein vollständig stationärer Zustand erreicht ist.

Die Zacken im Temperaturverlauf für die Referenzposition liegen darin begründet, dass der TOOLTEMP-Analyser nicht nur die Wärmeströme vom Bauteil in die Werkzeuge während der eigentlichen Umformphase eines Umformhubs berücksichtigt, sondern auch die Phasen, in denen das (warme) Bauteil vor und nach der Umformphase in den Umformwerkzeugen

verweilt. Betrachtet man die einzelnen Phasen (Liegen im Werkzeug vor der Umformung: zirka 0,5 Sek., Umformung: zirka 0,22 Sek., Liegen im Werkzeug nach der Umformung: zirka 1,5 Sek., Ausstoßen: zirka 0,78 Sek.), so wird deutlich, dass die Verweilzeiten sich erheblich von der eigentlichen Umformphase unterscheiden und damit insbesondere die Bereiche hoher lokaler Temperaturen einen signifikanten Temperatursprung (= Zacken) erfahren. Die lokalen Werkzeugtemperaturen, insbesondere an der Werkzeugoberfläche im Bereich des Werkstück-/Werkzeug-Kontakts, dienen letztendlich als eine Basisinformation, die in einem weiteren Softwaretool der Firma Filzek TRIBOtech herangezogen wird, um die Auswirkungen auf die Tribologie abzuschätzen beziehungsweise für den betrachteten Prozess ein geeignetes tribologisches System zu ermitteln.

Zusammenfassung und Fazit

Erfahrungen zeigen, dass die Temperatur bei Produktionsanlauf von Prozessen der Kaltmassivumformung eine hohe Bedeutung besitzt. Messungen der Reibung mit der Gleitstauchanlage zeigen einen Reibwertabfall von bis zu 45 Prozent mit einer zunehmenden Erhöhung der Temperatur. Bei Schmierstoffsystemen basierend auf Zinkphosphat kann abhängig von der Kontaktnormalspannung und Ober-

flächenvergrößerung bereits ab einer Temperatur von 150 °C bei Versuchsbeginn Adhäsion auftreten. Auf Grund dieser hohen Bedeutung der Temperatur ist es notwendig, diese für den realen Prozess zu ermitteln. Messungen mit in Werkzeuge eingebrachten Temperatursensoren zeigen, dass bei Produktionsbeginn die Temperatur fortlaufend ansteigt und erst nach vielen Hüben einen stationären Wert erreicht. Dieser lag beim Napfen am Stempel in einer Entfernung von 10 mm zur Oberfläche bei über 300 °C. Diese Messungen sind jedoch sehr aufwendig. Entsprechend ist die Vorhersage der Temperatur mit Simulationen sinnvoll. Diese erlaubt der TOOLTEMP-Analyser mit einer akzeptablen Rechenzeit und Genauigkeit. Eine beispielhafte Simulation zeigt dessen Möglichkeiten auf.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Finanzierung der hier vorgestellten Arbeiten aus dem Projekt „Entwicklung einer innovativen Auslegungsmethodik und computergestützter Analyse-Tools zur thermisch-tribologisch gekoppelten Analyse und Optimierung von temperaturabhängigen Prozessen in der Kaltmassivumformung“ durch das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM).

Literatur

[Ste99] Steenberg, T.; Olsen, J. S.; Christensen, E.; Bjerrum, N. (1999): Estimation of temperature in the lubricant film during cold forging of stainless steel based on studies of phase transformations in the film. *Wear*, 232, pp. 140-144.

[Hem99] Hemyari, D. (1999): Methode zur Ermittlung von Konstruktivmodellen für Reibvorgänge in der Massivumformung bei erhöhten Temperaturen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Shaker Verlag, Aachen.

[Rae02] Raedt, H. W. (2002): Grundlagen für das schmiermittelreduzierte Tribosystem bei der Kaltumformung des Einsatzstahles 16MnCr5. Dissertation, Aachen.

[Bay94] Bay, N. (1994): The state of the art in cold forging lubrication. *Journal of Materials Processing Technology*, 46, pp. 19-40.

[Gro13a] Groche, P.; Müller, C.; Stahlmann, J.; Zang, S. (2013): Mechanical Conditions in Bulk Metal Forming Tribometers – Part One. *Tribology International*, 62, pp. 223-231.

[Wib95a] Wibom, O.; Nielsen, J. A.; Bay, N. (1995): Einfluss der Werkzeugtemperatur auf Reibung und Schmierung beim Kaltmassivumformen von Stahl. *Umformtechnik*, 29-2, S. 106-112.

[Gro04a] Groche, P.; Kappes, B. (2004): Tribologie der Massivumformung – Modellprüfstände der Tribologie. *Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik*, S. 1-15.

[Nit10] Nittel, K. D.; Bucci, B.; Hellwig, R.; Schoppe, J.; Ostrowski, J.; Zweg, P. et al. (2010): Surface Treatment – Facts, Trends and Outlook for the Cold Forging Industry. *Proceedings of ICFG Plenary Meeting*, pp. 142-152.

[Zan14a] Zang, S.; Müller, C.; Bodenmüller, D.; Groche, P. (2014): Influence of Temperature on Environmentally Benign Tribological Systems in Cold Forging Operations. In Press. *Proceedings of NAMRI/SME*, 42.

[Mue14a] Müller, C.; Groche, P. (2014): Tribological measurement in cold forging. *Proceedings of the 19th International Colloquium Tribology*.



Dipl.-Ing. Christoph Müller



Dr.-Ing. Jan Filzek



Prof. Dr.-Ing.
Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Peter Groche



Dipl.-Ing. Oliver Oehler



M. Sc. Philipp Scherzinger



Dr.-Ing. Michael Twickler