

## Simulation-Supported Wear Analysis for Forging Processes and Experimental Studies on Friction Characteristics

The high thermal and mechanical stress on tools in hot forging processes erode the tool material and can lead to tool failure as a result. The most frequent causes for the malfunctioning of drop forging tools are abrasive wear and the forming of cracks due to the cyclic softening of the tool material. Friction studies

on a rotational forging tribometer serve as the basis to quantify the influence of the parameters relative velocity and temperature as well as the material on forging tool wear. Finite element simulation is the state of the art for process design prior to tool manufacture. The use of a developed and validated model for the calculation of tool wear is described for a simulated-based tool analysis.

# Simulationsgestützte Verschleißanalyse für Schmiedeprozesse und experimentelle Untersuchungen zur Reibcharakterisierung

Dr.-Ing. Anas Bouguecha,  
M. Sc. Tarik Hadifi,  
Dipl.-Ing. Andreas Klassen,  
Dipl.-Ing. Jens Mielke,  
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens, Hannover,  
Dipl.-Ing. Dr. mont. Otto-Karl Harrer, Leoben

Die hohen thermischen und mechanischen Werkzeugbelastungen bei Warmmassivumformprozessen führen zu einem Abtrag des Werkzeugwerkstoffs und in der Folge zum Werkzeugausfall. Die häufigsten Ausfallursachen sind für Gesenkschmiedewerkzeuge der abrasive Verschleiß und die Rissbildung aufgrund

der zyklischen Entfestigung des Werkzeugwerkstoffs. Um den Einfluss der Parameter Relativgeschwindigkeit und Temperatur sowie den Einfluss des Werkstoffs auf den Verschleiß von Schmiedewerkzeugen zu quantifizieren, dienen Reibversuche am Rotationsschmiedetribometer (RST) als Grundlage. Die Finite-Elemente-Simulation ist für die Prozessauslegung vor der Fertigung der Werkzeuge Stand der Technik. Für eine simulationsgestützte Werkzeuganalyse wird der Einsatz eines entwickelten und validierten Modells zur Berechnung des Werkzeugverschleißes beschrieben.

### Einleitung

Während der Warmmassivumformung führen hohe thermische und mechanische Werkzeugbelastungen zu einer Schwächung des Werkzeugwerkstoffs und in der Folge zum Werkzeugausfall. Die Folge ist ein kostenintensiver Werkzeugausbau und -austausch. Ein Ansatz zur Optimierung des Fertigungsprozesses und zur Vorhersage des Verschleißes ist durch Einsatz der Finite-Elemente-Methode (FEM) möglich. So müssen zur Realisierung einer standmengenoptimierten Werkzeugauslegung für die Warmmassivumformung bereits in der

Konstruktionsphase verschiedene Aspekte, wie Verschleiß und Werkzeugschädigung, berücksichtigt werden. Um diese adäquat in der FE-Simulation abbilden zu können, ist unter anderem eine genaue Beschreibung des Reibzustands notwendig. Um den Reibzustand in der Simulation für die Verschleißberechnung realitätsnah zu beschreiben, müssen lokale Einflussgrößen, wie die Relativbewegung sowie der Spannungszustand im Kontaktbereich zwischen Werkzeug und Werkstück, erfasst werden.

### Experimentelle Untersuchungen zur Reibcharakterisierung

Die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück, die Werkstück- und Werkzeugtemperatur sowie die verwendeten Werkstoffpaarungen selbst üben einen großen Einfluss auf den Verschleiß von Schmiedewerkzeugen aus. Um den Zusammenhang dieser Einflussgrößen zu quantifizieren, wurden mit dem am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben entwickelten Rotationsschmiedetribometer Reibversuche bei unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Tem-

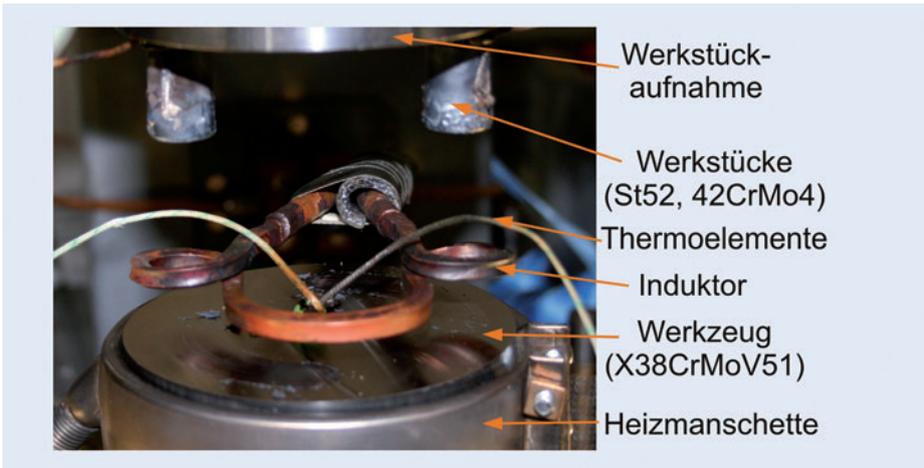


Bild 1: Versuchsvorrichtung des Rotationsschmiedetribometers.



Bild 2: Reibpaarung Werkzeug / Werkstück (links) und digitalisierte Oberfläche (rechts).

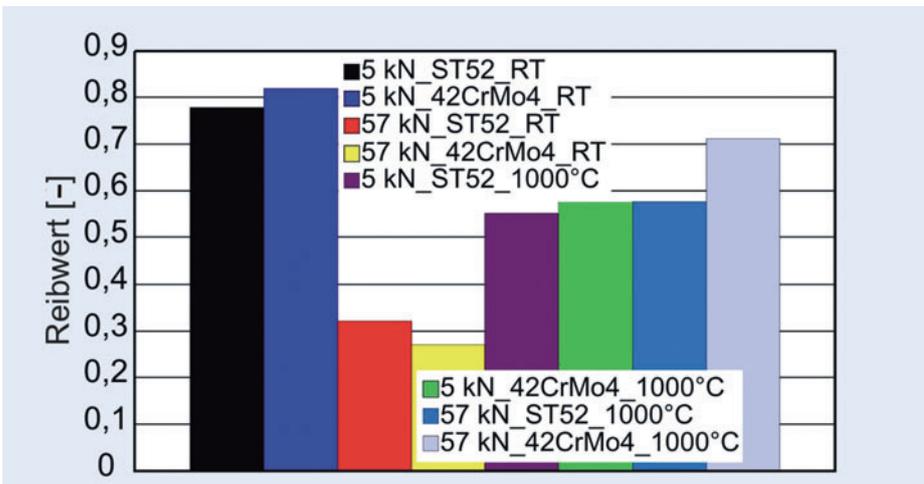


Bild 3: Reibwert als Funktion der Anpresskraft und der Temperatur.

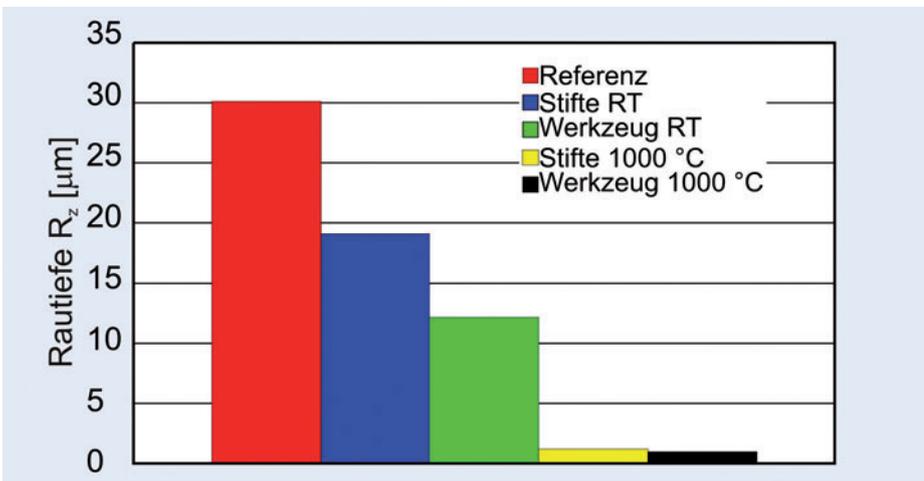


Bild 4: Rautiefe  $R_z$  an Werkzeug und Werkstück bei Raumtemperatur und 1.000°C.

peraturen durchgeführt. Dazu wurden zwei den Schmiedewerkstoff charakterisierende Stifte aus St52 und 42CrMo4 induktiv auf Prüftemperatur erwärmt und auf eine Werkzeugplatte aus Warmarbeitsstahl X38CrMoV51 mit Normkraft beaufschlagt. Anschließend erfolgte eine Drehung dieser Platte um 90°. Die das Schmiedewerkzeug darstellende Platte wurde durch eine Heizmanschette auf 200 °C aufgeheizt. Die Reibspannung und das Reibmoment wurden ausgewertet. Weiterhin wurde mit einem Oberflächenmessgerät der Firma Alicona die Rauigkeit der Platte und der Stifte ermittelt. Es handelt sich hierbei um einen Pinon-Disc Test. In Bild 1 ist der schematische Aufbau der Versuchsvorrichtung gezeigt.

Es wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils zwei Belastungsfällen durchgeführt. Die erste sieht einen Reibversuch bei Raumtemperatur, die zweite bei einer Werkstücktemperatur von 1.000 °C und einer Werkzeugtemperatur von 200 °C vor. Die Belastungsfälle wurden mit den Presskräften von 5 kN und 57 kN realisiert.

Nach dem praktischen Versuch erfolgte eine Rauheitsmessung von Werkzeug und Werkstück (Bild 2), wobei aus einer digitalisierten Oberflächengeometrie die Rauheiten  $R_q$ ,  $R_a$  und  $R_z$  ermittelt wurden.

In Bild 3 sind die Reibwerte beider Versuchsreihen dargestellt. Zu erkennen ist, dass bei höheren Temperaturen sowohl bei einer Anpresskraft von 5 kN als auch 57 kN ein Reibwert, der größer als 0,5 ist, auftritt. Dies kann dadurch passieren, dass beide Kontaktpartner zu verschweißen beginnen. Bei Raumtemperatur wird bei den Versuchen mit niedriger Presskraft von 5 kN ein wesentlich höherer Reibwert ermittelt. Eine Ursache dafür liegt im durch die Oberflächenrauigkeiten entstehenden Formschluss.

Es kann festgestellt werden, dass der Einfluss der Temperatur auf die Reibwerte signifikant ist. Bei Temperaturen von 1.000 °C zeigt sich bei allen Versuchen ein einheitlicher Verlauf der Reibwerte. Im Gegensatz dazu zeigen die Verläufe bei Raumtemperatur eine deutlich auftretende Streuung. Denkbar ist, dass die Messwerte seitens SPS (Speicherprogrammierbarer Steuerung) ab einem gewissen Schwellwert keine zuverlässige Aussage über das Reibverhalten liefern. Die Oberflächenanalyse zeigt, dass bei höheren Temperaturen die mittlere Rautiefe  $R_z$  um rund 93 Prozent gegenüber der unbelasteten Referenzprobe abnimmt (Bild 4). Dies ist deshalb der Fall, da durch die Anpresskraft und die Relativbewegung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück die Oberflächen eingeebnet werden, was vor allem bei der Temperatur von 1.000 °C deutlich zu sehen ist. Es wurde festgestellt, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen

dem Werkzeug und dem Werkstück keinen Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit ausübt. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Oberflächenrauigkeit an beiden Reibpartnern abnimmt, wenn die Stifte auf 1.000 °C erwärmt werden [1].

**FE-gestützte Verschleißberechnung**

Da der Einsatz experimenteller Untersuchungen generell und im Speziellen für die Verschleißvorhersage von Schmiedewerkzeugen sehr material-, kosten- und zeitintensiv ist, stellen numerische Methoden einen kostengünstigen Beitrag für eine optimale Prozessauslegung dar. Eine geeignete Möglichkeit zur Vorhersage des Werkzeugverschleißes bietet daher der Einsatz der FEM. Diese ermöglicht realitätsnahe Aussagen über die auftretenden Werkzeugbeanspruchungen während eines Umformprozesses. Auf Grundlage der berechneten Werkzeugbelastungen, dem Gleitweg und der Werkzeughärte wird durch die Verwendung geeigneter Berechnungsansätze der zu erwartende Werkzeugverschleiß für einen Schmiedezyklus bestimmt.

Die Möglichkeit der Vorhersage der maximalen Schmiedezyklen bis zu einem kritischen Materialabtrag und somit der Einsatzdauer von Schmiedewerkzeugen im Fertigungsprozess erfolgt in Abhängigkeit der Anforderungen an die Maßgenauigkeit der Bauteile. Für die Verschleißberechnung an Schmiedewerkzeugen steht der Ansatz von Archard [2] zur Verfügung. Dieser Ansatz, der nicht die Abhängigkeit der Werkzeughärte von Temperatur und Prozesszeit berücksichtigt, wurde von Behrens et al. weiterentwickelt. Die Werkzeughärte  $H(t,T)$  wird in dem erweiterten Verschleißmodell in Abhängigkeit der Prozesszeit  $t$  und der Werkzeugtemperatur  $T$  bestimmt [3].

$$\Delta w = \frac{k}{H(t,T)} \sum_{inc=1} \sigma_N v_{rel} \Delta t$$

In dieser Gleichung stellt  $k$  eine prozessabhängige Verschleißkonstante,  $v_{rel}$  die Relativgeschwindigkeit,  $\Delta t$  den Zeitschritt des aktuellen Recheninkrements und  $\sigma_N$  die Kontaktnormalspannung dar. Experimentelle Untersuchungen eines Napfherstellungsprozesses dienten der Validierung des Verschleißmodells und der Ermittlung der Verschleißkonstante. Auf Basis des gemessenen und berechneten Dornverschleißes erfolgte die Modellkalibrierung bei 1.000 Schmiedezyklen. Auf dieser Grundlage wurden die Verschleißberechnungen zwischen 1.000 und 2.000 Schmiedezyklen durchgeführt. In Bild 5 ist das Ergebnis der Verschleißberechnungen im Vergleich zu experimentell ermittelten Daten gezeigt. Die Gegenüberstellung der numerischen Be-

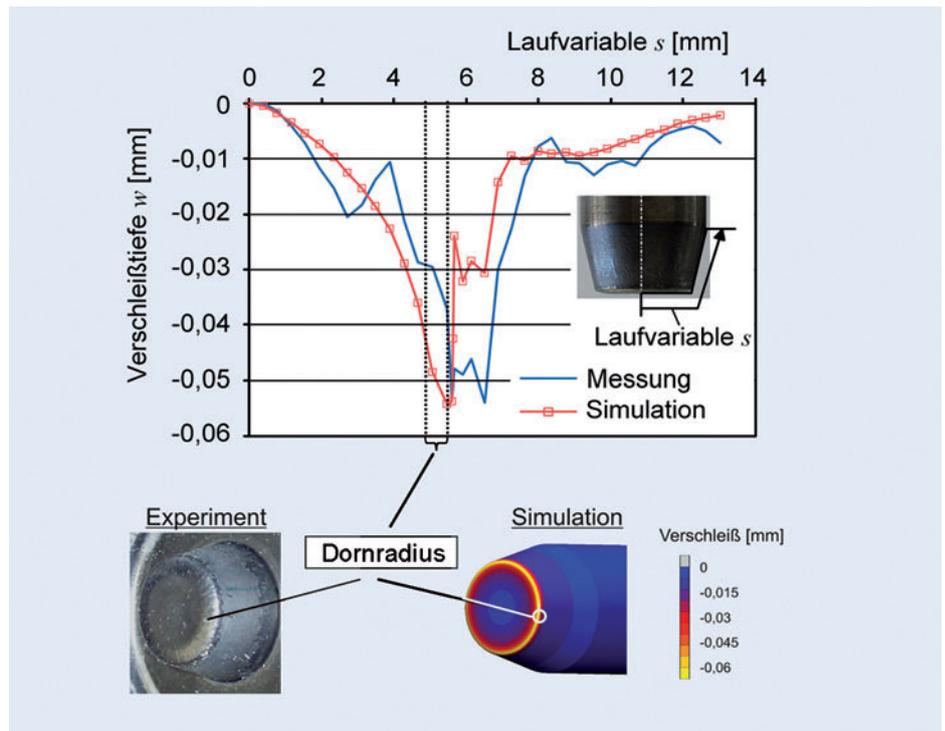


Bild 5: Numerisch berechneter und experimentell ermittelter Verschleiß an einem Dorn nach 2.000 Schmiedezyklen beim Napfherstellungsprozess.

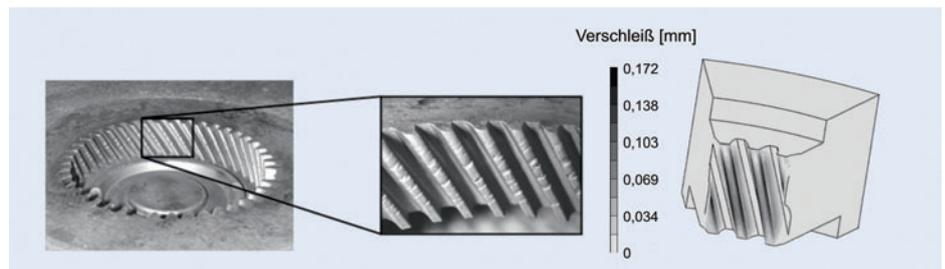


Bild 6: Anwendung des Verschleißmodells auf eine Zahnradmatrize: Verschlissene Zahnmatrize (links); zu erwartender Verschleiß nach 2.000 Schmiedezyklen (rechts). Bilder: Autoren

rechnung und der experimentellen Untersuchung des Verschleißbetrags nach 2.000 Schmiedezyklen zeigt qualitativ und quantitativ annähernde Übereinstimmung. Sowohl die maximale Verschleißtiefe  $w$  als auch der Verschleißverlauf der Dorngeometrie werden durch die Simulation gut abgebildet [4].

Dennoch zeigt sich bei genauer Betrachtung (Bereich direkt hinter dem Dornradius), dass die derzeit vorliegenden Modelle noch weiteren Optimierungsbedarf herausfordern. Ein genaueres Verständnis der Verschleißvorgänge könnte aufdecken, wie dies künftig möglich ist.

Zudem wurden Berechnungen zur Vorhersage des Werkzeugverschleißes an einer Matrize zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten Ritzelwellen durchgeführt [5]. Diese zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung der numerischen Vorhersagen und des experimentellen Verschleißauftritts (Bild 6).

**Zusammenfassung**

Bei experimentellen Untersuchungen mit einem Rotationsschmiedetribo-meter wurde

festgestellt, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück keinen Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit ausübt. Weiterhin wurde herausgestellt, dass die Oberflächenrauigkeit an beiden Reibpartnern abnimmt, wenn die Stifte auf 1.000 °C erwärmt werden.

Die Auslegung von Präzisionsschmiedeprozessen stellt große Anforderungen an die gesamte Prozessauslegung, die Prozesssteuerung und auch die realitätsnahe Vorhersage der Werkzeugstandmenge. Vor dem Hintergrund hoher Genauigkeitsanforderungen an die geschmiedeten Bauteile ist der zu erwartende abrasive Verschleißbetrag in jedem Schmiedezyklus bereits in der Konzeptionsphase realitätsnah zu bestimmen. Dazu eignet sich der Einsatz der FEM.

**Ausblick**

In die numerische Verschleißberechnung unter Beachtung der realitätsnahen Reibbedingungen werden in Zukunft die Ergebnisse der gewonnenen experimentellen Belastungsuntersuchungen mittels Rota-

tionsschmiedetribometer einfließen. Damit kann die Auslegung von Werkzeugen zur umformtechnischen Herstellung von Schmiedebauteilen optimiert werden. ■

#### Danksagung

Die Autoren der Leibniz Universität Hannover bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der vorgestellten Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ (Teilprojekt A2: „Erweiterte Simulationsmodelle für das Präzisionsschmieden“).

#### Literatur

[1] Harrer, O.-K.: Untersuchungen zur Belastung eines Gesenkwerkstoffs.

1. Workshop Schmiedewerkzeuge „Technologien – Entwicklungen – Analysen“, 24.-25.10.2011, Salzburg, Österreich, ISBN 978-3-902078-16-2, S. 97-111

[2] Archard, J.F.: Elastic deformation and the contact of surfaces. *Nature* Vol. 172, November 14, 1957, S. 918-919

[3] Behrens, B.-A.; Schäfer, F.; Hundertmark, A.; Bouguecha, A.: Numerical Analysis of Tool Failure in

Hot Forging Processes. 17th International Scientific Conference: Design and Technology of Drawpieces and Die Stampings, 22.-24.09.2008

[4] Behrens, B.-A.: Finite element analysis of die wear in hot forging processes. In: *CIRP Annals* 57, 2008, S. 305-308

[5] Behrens, B.-A.; Schäfer, F.; Klassen, A.: Numerische Verschleißberechnung für Präzisionsschmiedewerkzeuge; Tagungsband 12. Roundtable „Simulation in der Massivumformung“, Bamberg, 2010, S. 315-322



Dr.-Ing. Anas Bouguecha



M. Sc. Tarik Hadifi



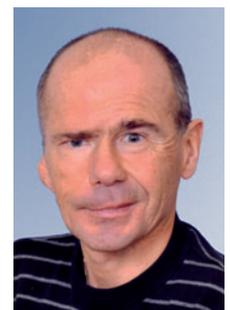
Dipl.-Ing. Andreas Klassen



Dipl.-Ing. Jens Mielke



Prof. Dr.-Ing.  
Bernd-Arno Behrens



Dipl.-Ing. Dr. mont.  
Otto-Karl Harrer