

## Kaltumformung hochfester Werkstoffe – Verkürzte Prozesskette bei der Verzahnungsherstellung

Mittels Verzahnungsdrücken lassen sich seit einigen Jahren präzise Verzahnungen effizient und wirtschaftlich herstellen. Im Vergleich zum konventionellen unidirektionalen Hubverlauf kann durch einen oszillierenden Hubverlauf die Umformkraft hierbei um bis zu 40 Prozent reduziert werden. Diese Kraftreduktion basiert auf einer Wiederbeschmierung. Typischerweise werden die Halbzeuge im geglähten Zustand umgeformt. Durch die gezielte Ausnutzung des Wiederbeschmierungseffekts können nun auch hochfeste Werkstoffzustände umgeformt werden, um die Prozesskette zu verkürzen.

## AUTOREN



### Wilhelm Schmidt, M.Sc.

leitet die Abteilung Funktions- und Verbundbauweise am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) an der Technischen Universität Darmstadt



### Dr.-Ing. Grzegorz Korpala

ist Gruppenleiter der Arbeitsgruppe Werkstoffcharakterisierung am Institut für Metallformung (imf) an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg



### Waldemar Saicew, M.Sc., MEM

ist Projektleiter Entwicklung bei der Felss Systems GmbH in Königsbach-Stein



### Dipl.-Ing. Nadezda Missal

ist Entwicklungsingenieurin Verfahrensentwicklung bei der Felss Systems GmbH in Königsbach-Stein



### Prof. Dr.-Ing. Ulrich Prah

ist Institutsdirektor des Instituts für Metallformung (IMF) an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg



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

ist Institutsleiter des Instituts für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) an der Technischen Universität Darmstadt



Bild 1: Etablierte Prozesskette und optimierte Prozesskette

Aktuelle Entwicklungen ermöglichen es, die Prozesskette in der Massivumformung signifikant zu verkürzen. Basierend auf Werkstoffeigenschaften, die während des Walzens gezielt eingestellt werden, lässt sich die Wärmebehandlung in der nachfolgenden Fertigungskette vollständig einsparen. Die benötigte Härte erreicht das Bauteil stattdessen durch die Kaltverfestigung während der Umformung. Obwohl die hohe Festigkeit der Halbzeuge eine erhebliche Werkzeugbelastung darstellt, kann eine ausreichende Prozessrobustheit erreicht werden. Dies erfordert eine präzise Kraft-Weg-Regelung sowie eine Werkzeugvorspannung, deren Höhe während des Prozesses genau gesteuert wird.

Vergleich zum konventionellen unidirektionalen Umformprozess können die Umformkräfte durch den oszillierenden Hubverlauf um bis zu 40 Prozent reduziert werden [2]. Ursache hierfür ist der Wiedereintritt von Schmierstoff in den Kontaktbereich zwischen Werkzeug und Werkstück während des Rückhubs der Oszillation. Die bei der Umformung auftretenden tribologischen Lasten werden hierdurch erheblich vermindert, die Umformkraft wird infolgedessen reduziert [3].

Wie in Bild 1 dargestellt, sieht die etablierte Prozesskette vor, dass Halbzeuge vor der Umformung wärmebehandelt werden, um die Umformlasten zu reduzieren. Trotz Kaltverfestigung

Die umformtechnische Herstellung von Bauteilen zeichnet sich durch hohe Materialausnutzung aus [1]. Während der Umformung bei Raumtemperatur (Kaltumformung) steigt die Fließspannung im Bauteil infolge der Kaltverfestigung an. Bedingt durch hohe Fließspannungen treten dabei hohe Prozesskräfte auf.

Die Herstellung von präzisen Steckverzahnungen bei Raumtemperatur wird durch das Verfahren oszillierende Verzahnungsdrücken realisiert. Hierbei werden Halbzeuge mit einer oszillierenden Bewegung in ein Verzahnungswerkzeug hineinbewegt und dabei umgeformt. Im

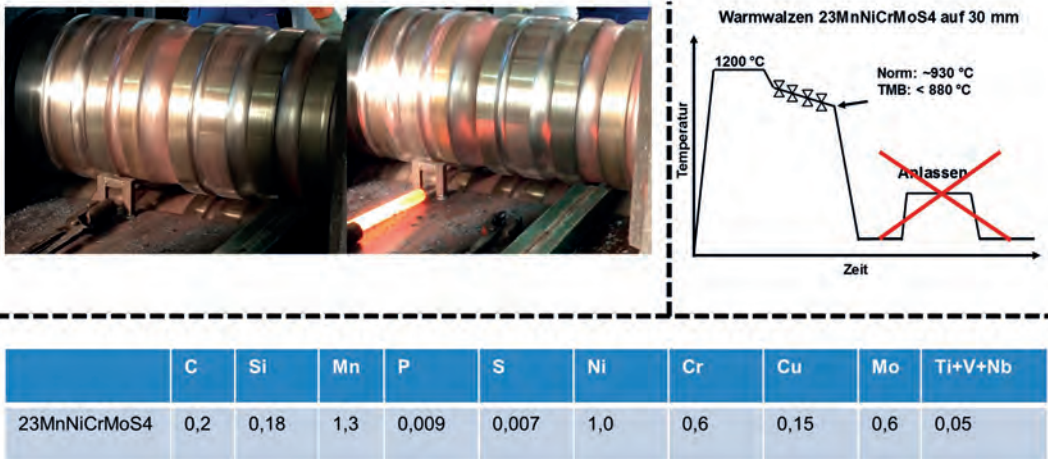


Bild 2: Walzanlage, Analyse des Werkstoffs 23MnNiCrMoS4 und Temperatur-Zeit-Verlauf des Werkstoffeinstellungsprozesses

im Umformprozess reicht die Werkstoffhärte nach der Umformung allerdings häufig nicht aus, um die im Betrieb erforderliche Widerstandsfähigkeit zu erreichen. Daher erfolgt nach der Umformung oft eine Wärmebehandlung zur Steigerung der Bauteilhärte. Diese Wärmebehandlung in der Fertigungskette ist zeitaufwendig und energieintensiv. Zudem geht der Härteprozess sehr oft mit einem schwer beherrschbaren Verzug einher, was eine anschließende Nachbearbeitung erforderlich machen kann.

In der zu demonstrierenden Prozesskette dient die Energie aus dem Walzprozess gezielt dazu, die geforderte Bauteilhärte effizient und ohne nachträgliche Wärmebehandlung zu erreichen. Zur Steigerung der Bauteilhärte werden dabei zwei Faktoren genutzt: eine erhöhte Ausgangshärte des Halbzeugs und die Kaltverfestigung, welche bei der Umformung auftritt.

**WERKSTOFFEINSTELLUNG**

Der Werkstoff 23MnNiCrMoS4 wurde nach einem Austenitisierungsprozess bei 1.200 °C mit 1 m/s Walzgeschwindigkeit in zwei Durchläufen auf einer Pilot-Walzanlage gewalzt. Das Verfestigen des Austenits begünstigt die Entstehung eines Gefüges mit hoher Härte, deswegen kann das Walzen auf den Enddurchmesser nicht bei Temperaturen über 880 °C stattfinden. Der schemati-

sche Ablauf dieses Prozesses und die Zusammensetzung des Werkstoffs sind in Bild 2 dargestellt. Die Halbzeughärte nach Vickers beträgt nach dem Warmwalzprozess etwa 350 HV.

**FERTIGUNG IM INDUSTRIELLEN UMFELD**

Um die Machbarkeit aussagekräftig zu überprüfen, wird eine Geometrie mit dem Verzahnungsmodul 2,5 ausgewählt. Für die Fertigung kommt eine Felss-Verzahnungsanlage (AXIMUS V02) zum Einsatz. Als Schmierstoffe werden sowohl Öl als auch Festschmierstoffe auf Polymer- und Molybdändisulfidbasis verwendet. Als Verschleißschutzschicht wird eine PVD TiN-Schicht auf dem Werkzeug appliziert.

Nach mehr als 100 abgepressten Bauteilen mit Öl-Schmierung zeigt sich kein Verschleiß am Werkzeug. Bild 4 links zeigt die Umformkräfte jeweils bei 7/8 der Gesamtverzahnungslänge. Auffallend ist, dass die Versuche mit Festschmierstoffen praktisch keine Kraftreduktion durch den oszillierenden Hubverlauf erfahren. Dies zeigt, dass der Effekt der Wiederbeschmierung nur bei flüssigen Schmierstoffen auftritt.

Die resultierende Bauteilhärte ist in Bild 4 rechts abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die höchste Härte im Bereich der ausgeformten Verzahnungsgeometrie zu finden ist. Da dies der Funktionsbereich

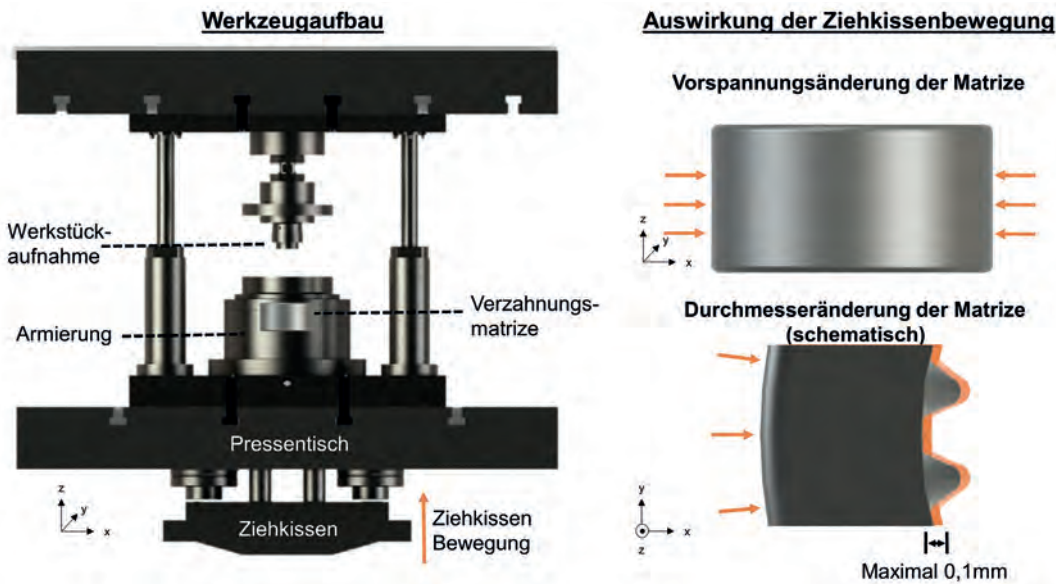


Bild 3: Versuchsaufbau im Labor (CAD Abbildung)

der späteren Steckverzahnung ist, wird die Härte an dieser Stelle benötigt. Im Inneren des Bauteils ist der Werkstoff weiterhin im duktileren Zustand, besitzt also die Härte, die im Warmwalzprozess eingestellt wurde. Durch den Umformprozess wird die Bauteilhärte im Funktionsbereich bis zu 180 HV erhöht. Die hierdurch erzeugte Härte ist für vielfältige Anwendungen ausreichend.

### ERWEITERUNG DER PROZESSGRENZE IM LABOR

Im Labor werden die Verzahnungen auf einer Servomotorpresse (Synchropress SWP 2500) hergestellt. Wie in Bild 3 illustriert, kann die Vorspannung der Matrize im Laboraufbau durch das Ziehkissen variabel eingestellt werden. Hierfür kommt eine Verzahnungsgeometrie mit Modul 1,05 zum Einsatz.

Der Effekt der Wiederbeschmierung ist nur bei Einsatz von Ölschmiermitteln vorzufinden. Es stellt sich die Frage, wie groß der Einfluss des Effekts für die Hartumformung ist und ob die Prozessgrenze unter Anwendung einer optimierten (Wieder-) Beschmierung noch erweitert werden kann. Hierfür wird der in Bild 3 dargestellte Laboraufbau um eine Kraftrückführung erweitert. Der Aufbau der Kraftregelung, welcher von Groche und Heß 2014 [4] vorgeschlagen wurde, konnte innerhalb des Forschungsprojekts in die Synchropress SWP 2500 implementiert werden. Demnach beginnt der Rückhub der Oszillation, so-

bald eine vorgegebene Kraftgrenze überschritten wurde. Durch die anschließende Oszillation findet eine Wiederbeschmierung mit Öl statt, welches in die Umformzone hineingelangt. Als Prozessparameter können bei Einsatz dieser Regelung zusätzlich zum unteren und oberen Totpunkt (UT und OT) die Umformgeschwindigkeit im Vor- und Rückhub, eine minimale und maximale Hublänge der einzelnen Oszillationen sowie die Parameter zur Ziehkissensteuerung vorgegeben werden. Das Ziehkissen kann darüber hinaus mittels eines Keilgetriebes zur Einstellung der Vorspannung der Matrize verwendet werden (Bild 3).

Die Effekte der unterschiedlichen Versuchsabläufe lassen sich anhand von drei Varianten mit identisch vorgegebenen maximalen Umformkräften zeigen:

- In Variante 1 wird der Prozess kraftgesteuert und unidirektional mit konstanter Armierung durchgeführt. Bei Erreichen der definierten Kraftgrenze wird der Hub gestoppt und der Rückhub eingeleitet.
- In Variante 2 wird nach Erreichen der Kraftgrenze ein definierter Rückhub und daraufhin ein erneuter Vorhub eingeleitet. Zusätzlich wird eine Höchstanzahl an Oszillationen vorgegeben.

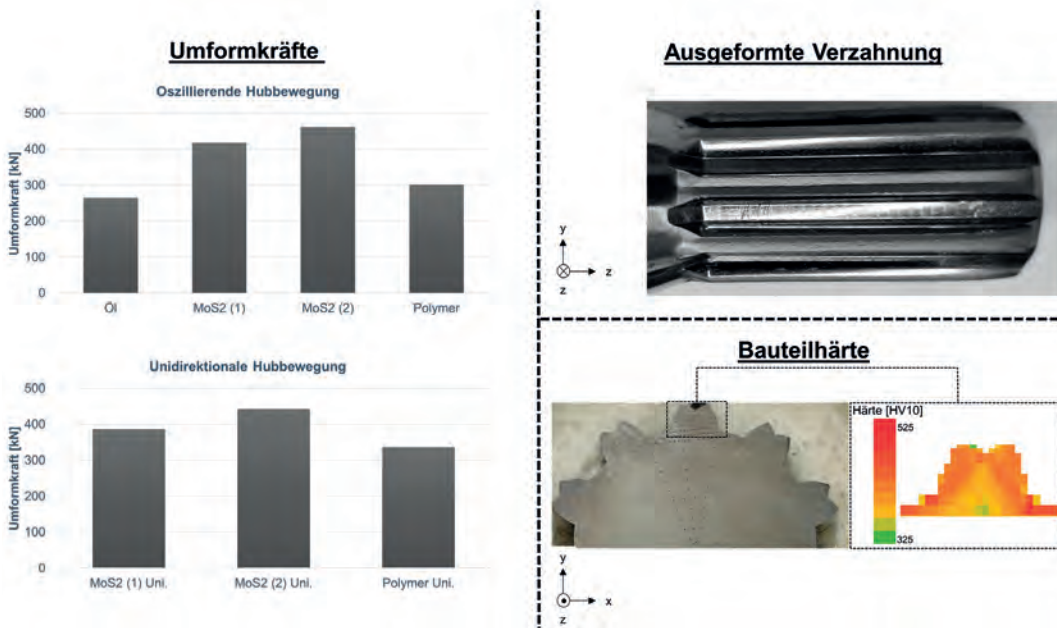


Bild 4: Umformkräfte bei der Umformung der harten Werkstoffe und Messung der resultierenden Härte, Werkstoff: 23MnNiCrMoS4

- Im Rahmen der dritten Variante kommt die flexible Vorspannung der Matrize zum Einsatz. Nach Erreichen der definierten Maximalkraft wird die Vorspannung der Matrize reduziert, bevor der Rückhub erfolgt. Nach Beendigung des Rückhubs wird die Zustellung der Matrize wieder auf ihren Ausgangswert erhöht, damit Zugspannungen während der Umformung vermieden werden. Durch das gezielte Verringern der Vorspannung der Matrize im Rückhub der Oszillation soll neuer Schmierstoff auch in die Kontaktzone zwischen Werkstück und Kalibrierzone des Werkzeugs gelangen.

Bild 5 zeigt die auftretenden Hubwege und Prozessparameter für die drei beschriebenen Varianten im Überblick: Die unidirektionale Umformung (Variante 1) erreicht nach nur wenigen Millimetern Umformung die definierte Maximalkraft von 156 kN. Die Umformung mit oszillierender Bewegung (Variante 2) kann im Gegensatz hierzu einen deutlich längeren Umformweg realisieren. Zwar wird die Kraftgrenze von 156 kN ebenso schnell erreicht wie bei der unidirektionalen Bewegung, doch nach erfolgter Oszillation ist ein weiterer Umformweg als in der vorangegangenen Oszillation möglich. Dies ist dadurch zu begründen, dass bei der Oszillation neuer Schmierstoff in die Umformzone gelangt, sodass die auftretenden Reibkräfte reduziert werden und die Gesamtkraft, welche sich aus der Umformarbeit und der Reibkraft zusammensetzt, geringer wird. Zu erkennen ist zudem, dass der Zugewinn an neuer Umformstrecke bei jedem Vorhub geringer wird – bis schließlich kein absoluter Vorhub mehr erfolgt. Die Umformung stoppt bei

Erreichen der maximalen Anzahl an Oszillationszyklen. Somit wird auch mit Variante 2 der UT nicht erreicht.

Mit Variante 3 gelingt im Gegensatz zu Variante 1 und 2 die Umformung bis zum UT. Der absolute Vorhub bleibt bei jeder Oszillation positiv. Die Umformung einer längeren harten Verzahnung wäre ohne weiteres möglich gewesen. Damit ist der positive Effekt der Wiederbeschmierung der Kalibrierzone nachgewiesen.

Bei der Oszillation mit konstanter Vorspannung wird die Umformzone mit neuem Öl benetzt. Da die Kalibrierzone während der Oszillation in Variante 2 dauerhaft in Kontakt mit dem Bauteil ist, kann kein neuer Schmierstoff in diesen Bereich gelangen. Indem die Armierung in Variante 3 vollständig geöffnet wird (etwa 0,1 mm Änderung des Innendurchmessers der Matrize), kann neuer Schmierstoff in die Kalibrierzone gelangen und das Prozessfenster deutlich vergrößert werden.

### ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Aufbauend auf dem bekannten Wiederbeschmierungseffekt beim oszillierenden Verzahnungsdrücken konnten die hier beschriebenen Untersuchungen unter Zuhilfenahme speziell eingestellter Werkstoffe eine kurze und effiziente Prozesskette zur Herstellung harter Verzahnungen demonstrieren. Zusätzlich wurde im Labor gezeigt, dass neue Armierungskonzepte unter Anwendung von prozessspezifischen Regel- und Steuerungsstrategien das Prozessfenster deutlich erweitern können.

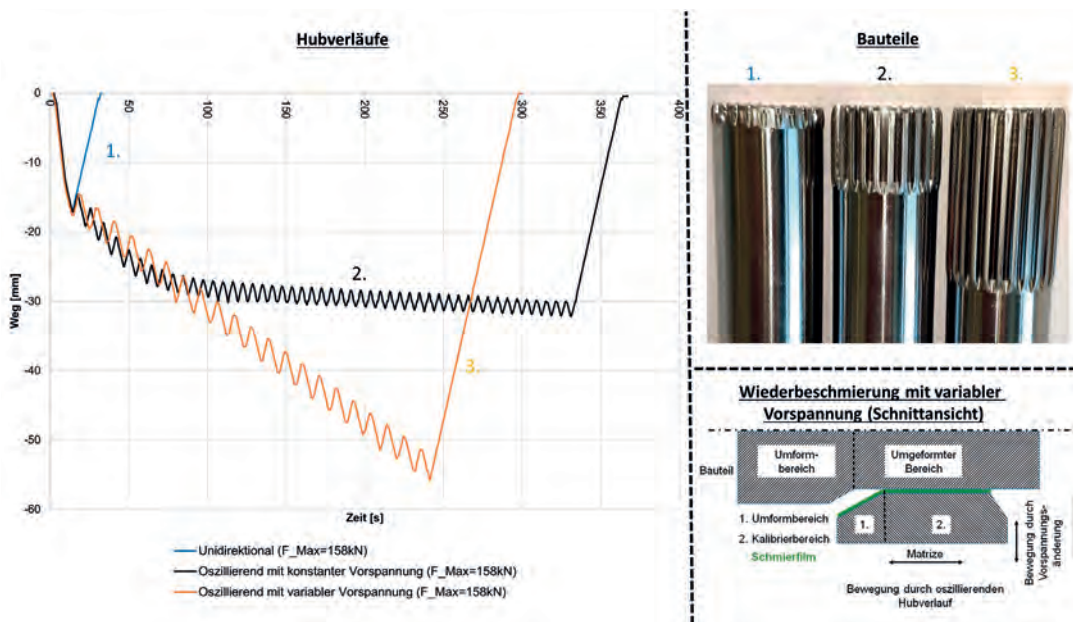


Bild 5: Hubwege mit Kraftregelung: Unidirektionale, oszillierende und Umformung mit variabler Matrizenverspannung  
 Bilder: Autoren

Die Prozesskette wurde zusätzlich zu den hier dargestellten Versuchen (Werkstoff 23MnNiCrMoS4) mit dem verbreiteten und vergleichsweise kostengünstigen Werkstoff 42CrMo4 durchgeführt. Die Fertigungsroute bedarf für diesen Werkstoff im

jetzigen Stand der Entwicklung allerdings noch eines Anlassprozesses, um die Umformung nach dem Walzen zu ermöglichen. Es bestehen Bemühungen, diesen Werkstoff weiterzuentwickeln, um den Wärmebehandlungsprozess einzusparen.



[1] Kappes, B.: Über den Nachweis tribologischer Effekte mit Hilfe von Modellversuchen im Bereich der umweltfreundlichen Kaltmassivumformung, Dissertation PtU Darmstadt, Shaker Verlag, 2005.

[2] Grupp, P.; Richter, W.: Frequenzmoduliertes Axialformen – flexible Fertigung von Innen- und Außenverzahnungen. In: Globalisierung – Treiber für neue Umformtechnologien, 9. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, Bamberg, Verlag Meisenbach GmbH, 2006, ISBN-10 3-87525-229-2, S. 49 – 57

[3] Heß, B.; Groche, P.: Untersuchungen zum oszillierenden Verzahnungsdrücken, Schmiedejournal, S. 38 – 40, Ausgabe 03/2014, 2014

[4] Groche, P.; Heß, B.: Friction control for accurate cold forged parts, pp. 285 – 288, CIRP Annals, Vol 63, 2014



Das IGF-Vorhaben 19557BG der Forschungsvereinigung Stahlverformung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Schlussberichts kann bei der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V., Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden



aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages