

## Studies into Oscillating Interlocking Presses

In the case of interlocking presses, the use of lifting paths that have oscillating movements, instead of those with only a lower turning point, leads to a reduction of the forming force of up to 40 per cent. In industry, these oscillating movement sequences are used above all to form high precision plug-in toothings. The reason for the force reduction has not yet been clarified and therefore

a design of the processes was only empirically possible. Two theories for the force reduction are encountered in the literature. These are, on the one hand, the friction theory and, on the other hand, the softening theory. The identification of the principal reason would enable an expansion of the process limits and an efficient optimisation of the process parameters.

# Untersuchungen zum oszillierenden Verzahnungsdrücken

Dipl.-Ing. Benjamin Heß und  
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, Darmstadt

Der Einsatz von Hubverläufen mit oszillierenden Bewegungen anstelle von solchen mit nur einem unteren Umkehrpunkt führt beim Verzahnungsdrücken zu einer Reduktion der Umformkräfte um bis zu 40 Prozent. Industriell werden mit Hilfe der oszillierenden Bewegungsabläufe vor allem hochgenaue Steckverzahnungen hergestellt. Die Ursache für die Kraftreduktion war bislang ungeklärt und ein

Auslegen der Prozesse daher ausschließlich empirisch möglich. In der Literatur finden sich zwei Erklärungsansätze für die Kraftreduktion. Dies sind zum einen die Reibungstheorie und zum anderen die Entfestigungstheorie. Die Identifikation der maßgeblichen Ursache würde daher ein gezieltes Erweitern der Prozessgrenzen und eine effiziente Optimierung der Prozessparameter ermöglichen.

### Einleitung

In diesem Beitrag werden die für die beiden Theorien maßgeblichen Effekte experimentell separiert und die Reibungstheorie als maßgeblicher Effekt für die Kraftreduktion identifiziert. Des Weiteren werden die Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die Kraftreduktion herausgestellt und somit Potenziale für eine Produktivitätssteigerung aufgezeigt.

Das oszillierende Verzahnungsdrücken zeichnet sich wie andere Verfahren der Kaltmassivumformung durch vielfältige Vorteile gegenüber anderen Fertigungsverfahren, wie beispielsweise der Zerspanung, aus. Ein solcher Vorteil ist die deutlich bessere Werkstoffausnutzung [KAP05]. Allerdings bedingen die Verfahren der Kaltmassivumformung einen hohen Kraft- und Arbeitsbedarf und ein Haushalten mit dem begrenzten Formänderungsvermögen der Werkstoffe [DOE10]. Weiterentwicklungen der Verfahren zielen auf eine Verschiebung

derartiger Grenzen und leisten damit einen Beitrag, den Trends in der Produktionstechnik wie der Steigerung und Dynamisierung der Innovationsfähigkeit zu begegnen [Bul10].

Das oszillierende Verzahnungsdrücken wird häufig für die Herstellung von hochgenauen Steckverzahnungen wie beispielsweise Antriebs- oder Getriebewellen verwendet. Bei konventionellem Verzahnungsdrücken werden Umformkräfte je nach Geometrie von bis zu 250 kN benötigt. Diese können durch eine oszillierende Werkzeugbewegung um bis zu 40 Prozent reduziert werden [Gru06]. Dadurch gelingt die Fertigung dünnwandiger Bauteile, deren Umformung bei konventioneller Prozessführung aufgrund des Versagens durch zum Beispiel Überschreiten der Knickstabilität nicht möglich ist. Die Ursache für die Kraftreduktion war bislang unklar und ein Auslegen der Prozesse ausschließlich empirisch möglich. In

der Literatur finden sich zwei mögliche Theorien, deren Effekte die Ursache für die Kraftreduktion sein können [Schu07]. Dies ist zum einen die Reibungstheorie, welche die Reduktion auf den Wiederaufbau des Schmierstofffilms im Rückhub zurückführt. Zum anderen kann der Reduktion die Entfestigungstheorie zu Grunde liegen, welche entfestigende Materialeffekte, wie den Bauschinger-Effekt, aufgrund der zyklischen Belastung der Bauteile als Ursache beschreibt. Die Identifikation der Ursache für die Kraftreduktion ermöglicht ein Erweitern der Prozessgrenzen und eine Optimierung der Prozessparameter. In diesem Beitrag werden beide Theorien experimentell getrennt voneinander untersucht und die Ursache für die Kraftreduktion identifiziert. Weiterhin werden Möglichkeiten der Produktivitätssteigerung bei Einsatz dieser Prozesse aufgezeigt. Die beschriebenen Ergebnisse wurden im Rahmen eines durch die AiF geförderten Forschungsprojekts erarbeitet.

### Werkzeug und Versuchsparameter

Für die experimentelle Trennung der Effekte, die die Kraftreduktion verursachen können, wird das in Bild 1 dargestellte Werkzeugsystem für die Herstellung einer Referenzgeometrie eingesetzt (Bild 3, links). Das Werkzeug besteht aus einem Oberwerkzeug, an welchem die Probe befestigt und eine Zug-Druck-Kraftmessdose zur Aufzeichnung der Umformkräfte integriert wird. Das Unterwerkzeug enthält die aktive Matrize als Armierung der Verzahnungsmatrize. Diese ermöglicht die Einstellung der radialen Vorspannung auf die Verzahnungsmatrize, indem sich im Inneren der Matrize Keile gegeneinander verschieben. Das Verschieben des Keilsystems wird über das Ziehkissen realisiert. Mit Hilfe dieses Werkzeugsystems gelingt die Trennung der möglichen kraftreduzierenden Effekte. Im Rückhub kann die Vorspannung auf die Verzahnungsmatrize gelöst werden und somit ein Wiederaufbauen der Schmierstoffschicht bei gleichzeitiger Vermeidung zyklischer Beanspruchung der Probe ermöglichen. Zu diesem Zweck muss das Ziehkissen ebenfalls eine oszillierende Bewegung durchführen. Die eigentliche Umformbewegung vollführt der Stößel, welcher die in Bild 2 dargestellten Hubverläufe abfährt. Als Werkstoff kommt C45 zum Einsatz, und der Prozess wird wie im industriellen Einsatz mit Öl geflutet. Das Werkzeug bildet die Grundlage für die folgenden experimentellen Untersuchungen.

### Experimentelle Untersuchungen

Bild 2 zeigt die Auswertung der Umformkräfte für den konventionellen sowie den oszillierenden Hubverlauf mit konstanter und variierender Matrizevorspannung. Die Umformkräfte bei oszillierender im Vergleich zur konventionellen Umformung reduzieren sich um zirka 50 Prozent. Die Rückzugskräfte verringern sich deutlicher von 90 kN auf 21 kN. Dies bestätigt die Kraftreduktion, die im indu-

striellen Einsatz erzielt wird. Der Einsatz einer oszillierenden Vorspannung der Verzahnungsmatrize reduziert die Rückzugskräfte auf zirka 3 kN und vermeidet somit eine zyklische Belastung der Probe, die für die Effekte der Entfestigungstheorie als Ursache für die Kraftreduktion notwendig sind. Gleichzeitig wird ein Wiederaufbauen des Schmierstofffilms zugelassen. Die Umformkräfte im Vorhub ändern sich im Vergleich zum Experiment mit konstanter Vorspannung nicht und somit können die Reibverhältnisse als maßgebender Einflussfaktor auf die Kraftreduktion identifiziert werden.

Zur Absicherung dieser Erkenntnisse wurden Versuche „trocken“, das heißt ohne den Einsatz von Schmierstoff, durchgeführt. Hierbei ist ein Wiederaufbauen des Schmierstofffilms nicht möglich und somit wird ausschließlich die Probe zyklisch belastet. Bei dieser Auswertung zeigten der konventionelle und der oszillierende Hubverlauf ähnliche Umformkräfte und bestätigen damit die Reibungstheorie. Weiterhin be-

stätigten numerische Simulationen des Prozesses den maßgebenden Einfluss der Reibungsverhältnisse auf die Kraftreduktion. Zu diesem Zweck wurden sowohl Reibwerte und -modelle sowie Materialmodelle innerhalb der Prozesssimulation variiert. Der Anteil der Reibkräfte an der Umformkraft beträgt bei einer Variation der Reibwerte im Bereich  $\mu = 0 - 0,15$  bis zu

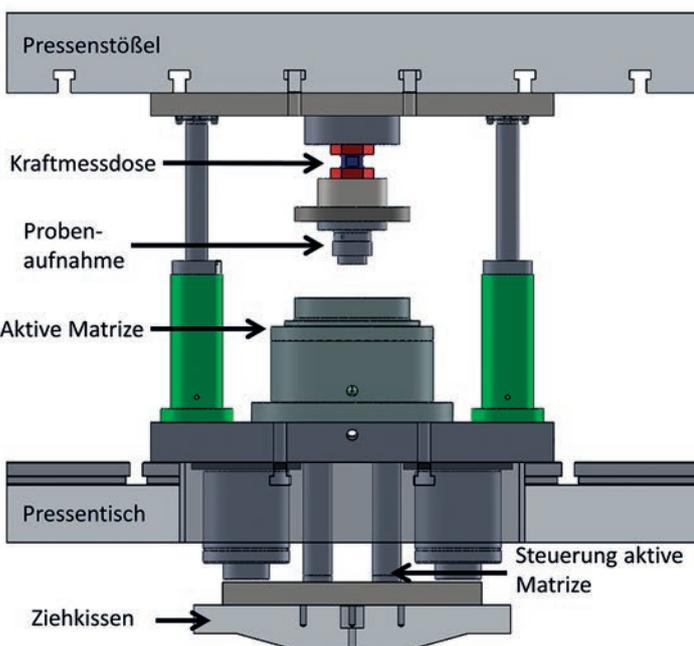


Bild 1: Versuchsaufbau als CAD-Darstellung.

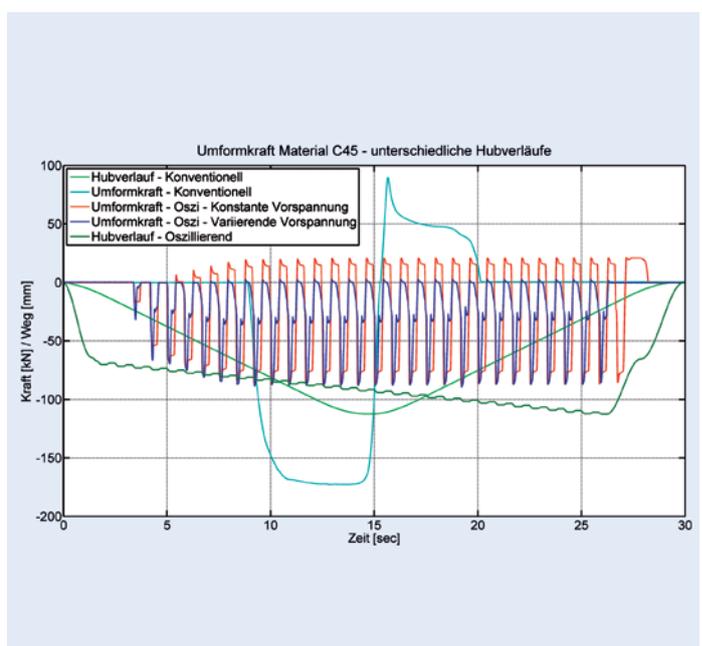


Bild 2: Umformkräfte bei Variation des Hubverlaufs und der Vorspannung.

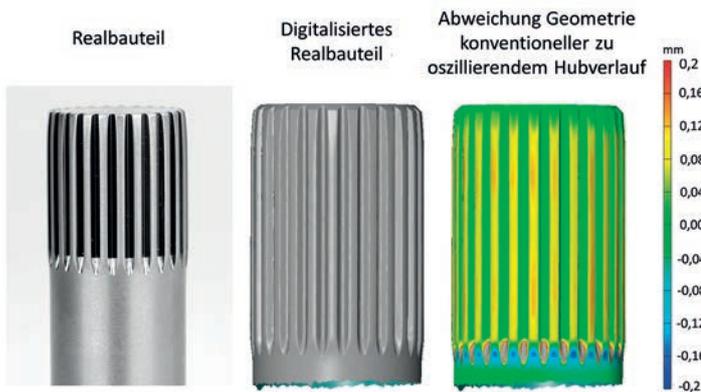


Bild 3: links: Realbauteil, mitte: Mit GOM Atos digitalisiertes Bauteil, rechts: Abweichung der Verzahnungsgeometrie bei Einsatz unterschiedlicher Hubverläufe.

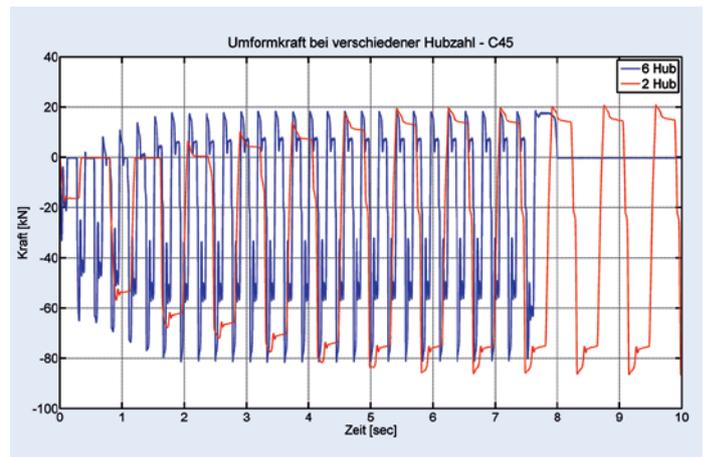


Bild 4: Umformkräfte bei Erhöhung der Hubzahl von 2 Hub/min auf 6 Hub/min.

Bilder: Autoren

50 Prozent, wohingegen die Veränderung der Materialmodelle einen untergeordneten Einfluss auf die Umformkräfte lieferte.

Die Betrachtung der Geometrie mittels des Messsystems GOM Atos bei Einsatz der unterschiedlichen Hubverläufe (Bild 3) zeigt einen Einfluss der Verläufe auf die Zahnfüllung der Probe. Dargestellt ist die Abweichung der Probengeometrie, umgeformt mit konventionellem beziehungsweise oszillierendem Hubverlauf. Die positive Abweichung mit maximal 0,14 mm im Bereich der Zähne beschreibt eine deutlich größere Zahnfüllung bei konventionellem Hubverlauf. Dies ist auf die höheren Umformkräfte und den damit verbundenen größeren Materialfluss zurückzuführen. Des Weiteren zeigt sich eine größere Stauchung der Probe bei konventionellem Hubverlauf.

#### Experimentelle Untersuchung mit veränderten Prozessparametern

Weitere experimentelle Untersuchungen befassen sich mit der Identifikation des Einflusses der Prozessparameter Geschwindigkeit, Hublänge sowie Oszillationsfrequenz auf die Umformkräfte. Exemplarisch stellt Bild 4 die Umformkräfte bei Veränderung der Hubzahl von 2 Hub/min auf 6 Hub/min dar. Diese Änderung zeigt keinen nennenswerten Einfluss auf die Umformkraft. Die höhere Dynamik aufgrund der gesteigerten Hubzahl äußert sich allerdings in einem deutlichen Schwingen der Maschine. Der Einfluss der Hublänge auf die Umformkräfte ist ebenfalls gering. Die Variation der Prozessparameter und deren geringer Einfluss auf die Umformkräfte zeigten zum einen die Prozessrobustheit und zum anderen das Potenzial auf, die Produktivität zu steigern. Weiteres Potenzial zur Steigerung der Produktivität zeigte sich beim Einsatz von alternativen Schmierstoffsystemen. Hierbei konnten trotz konventionellem Hubverlauf ähnliche Umformkräfte wie bei oszillierender Umformung erzielt werden. Die Optimierung der Prozessparameter und des Schmierstoffsystems kann somit die Fertigung neuer Bau-

teilgeometrien erschließen und deutliche Produktivitätssteigerungen realisieren. Allerdings sind hierbei weitere Untersuchungen bezüglich Werkzeugstandzeiten und Verzahnungseigenschaften notwendig.

#### Zusammenfassung und Fazit

Die Untersuchungen zum Verzahnungsdrücken identifizieren die Effekte der Reibungstheorie als Ursache für die Kraftreduktion bei der Umformung mit oszillierenden Hubverläufen. So können durch Einsatz des speziell konzipierten Werkzeugsystems die beiden in Frage kommenden Theorien experimentell voneinander getrennt werden. Die Auswertung der Geometrie zeigt einen Einfluss des Hubverlaufs auf die Zahnfüllung, welcher auf die unterschiedlichen Umformkräfte und somit den unterschiedlichen Materialfluss zurückzuführen ist. Der Einfluss der Prozessparameter auf die Umformkräfte ist jedoch vernachlässigbar und birgt somit das Potenzial, die Produktivität bei gleich bleibenden Umformkräften zu steigern. Gleiches gelingt ebenfalls durch Verändern des Schmierstoffsystems. Die Tatsache, dass die Reibungsverhältnisse die Umformkraft, aber auch die Geometrie maßgeblich beeinflussen, bietet Optimierungsansätze für das Verzahnungsdrücken. Diese können auf die Fertigung neuer Bauteilgeometrien oder die Steigerung der Produktivität zielen. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten auf diese Aspekte fokussieren. ■



Dipl.-Ing. Benjamin Heß



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

#### Literatur

[BUL10] Bullinger, H.-J.: Mechanische und hydraulische Pressen – Energiebilanz und Wirkungsgrad, In: Tagungsband 10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2010, Karlsruhe, 2010.

[DOE10] Doege E.; Behrens B.-A.: Handbuch Umformtechnik, 2. bearbeitete Auflage, Springer Verlag, 2010, ISBN-10 3-540-23441-1.

[GRU06] 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.

[KAP05] Kappes, B.: Über den Nachweis tribologischer Effekte mit Hilfe von Modellversuchen im Bereich der umweltfreundlichen Kaltmassivumformung, Dissertation PtU Darmstadt, Shaker Verlag, 2005.

[SCHU07] Schultheis, V.: Oszillierendes Umformen mit direkt angetriebenen Umformmaschinen. Dissertation PtU Darmstadt, Shaker Verlag, 2007.

#### Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17330 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.