

Numerische und experimentelle Untersuchung von Strategien für das Profilwalzen

Die Auslegung von Profilwalzprozessen, speziell für Geometrien abseits von Gewinden, kann aufgrund der engen Prozessfenster äußerst herausfordernd sein. Die Gestaltung der Walzbackengeometrie ist dabei für den Prozesserfolg entscheidend. Mithilfe numerischer und experimenteller Untersuchungen können Walzstrategien identifiziert werden, die eine gezielte Steuerung des Werkstoffflusses sowie eine Steigerung der maximal möglichen Hubzahl erlauben.

AUTOREN



Stefan Volz, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Tribologie am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der TU Darmstadt



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

leitet das Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der TU Darmstadt

Profilwalzprozesse mit Flachbackenwerkzeugen besitzen aufgrund etlicher Vorteile eine große industrielle Verbreitung. Nachfolgend beschriebene Untersuchungen zu diesem Verfahren wurden mit dem in Bild 1 und Bild 2 abgebildeten Werkzeug durchgeführt, welches über zwei radiale Rundnuten verfügt, die steigungsfrei in einen M10-Schraubenrohling (Durchmesser: 9,08 Millimeter, Material: 23MnB4) eingewalzt werden. Zu Beginn des Prozesses wird das Werkstück in den Werkzeugspalt eingestoßen und die bewegliche Walzbacke verfährt in z-Richtung, während die stationäre Walzbacke ortsfest bleibt. Das Werkstück wird aufgrund von Reibungskräften mitgenommen und rollt auf den Werkzeugen ab. Durch die Steigung der Walzbacken im Bereich der Einlaufzone (ELZ) verringert sich dabei die Breite des Walzspalts, was dazu führt, dass die Nutgeometrie in das Werkstück eingewalzt wird.

Im Laufe des Abrollvorgangs tritt jeder Punkt über dem Umfang des Werkstücks mehrfach in Kontakt mit dem Werkzeug, wobei der Walzspalt sukzessive kleiner wird, was zu einer allmählichen Ausformung der Nut führt. Durch Variation des Nutradius entlang der Einlaufzone kann die Ausformung der Nut bei gleichbleibendem Zielradius der Kalibrierzone (KLZ), beeinflusst werden. Bild 2 zeigt die drei untersuchten Walzstrategien, die fortan mit den Buchstaben A, B und C bezeichnet werden, sowie mit den entsprechenden Piktogrammen gekennzeichnet sind.

Walzstrategie A, die als „Stand der Technik“ gilt, zeichnet sich durch einen gleichbleibenden Nutradius von 0,5 Millimeter über die gesamte Werkzeuglänge aus, während Walzstrategie B einen zu Beginn kleineren Radius von 0,2 Millimeter und Walzstrategie C einen zu Beginn größeren Radius von 1,3 Millimeter aufweisen.



Bild 1: Versuchswerkzeug, Detailansicht des Rillenprofils sowie i.O.- und n.i.O.-Teil

Die Zielgeometrie des Werkstücks, definiert über den Nutradius in der Kalibrierzone, ist für alle Walzstrategien gleich und beträgt 0,5 Millimeter.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde für alle drei Walzstrategien die Hubzahl sukzessive bis zum Durchrutschen des Werkstücks erhöht. Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss der Hubzahl und der Walzstrategie auf die Prozessgrenze durch Schlupf zu ermitteln. Neben den experimentellen Untersuchungen wurde außerdem der Einfluss der Walzstrategie auf den Werkstofffluss numerisch mittels FEM untersucht.

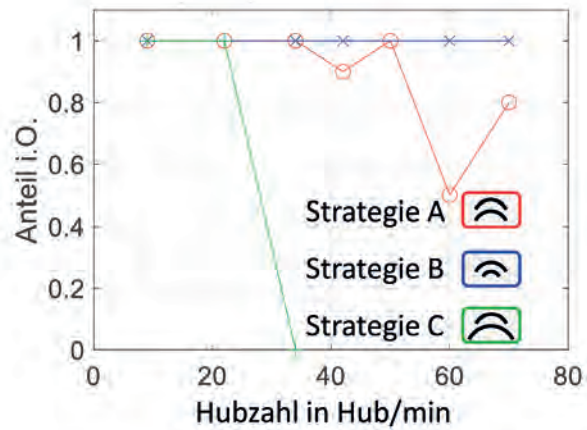
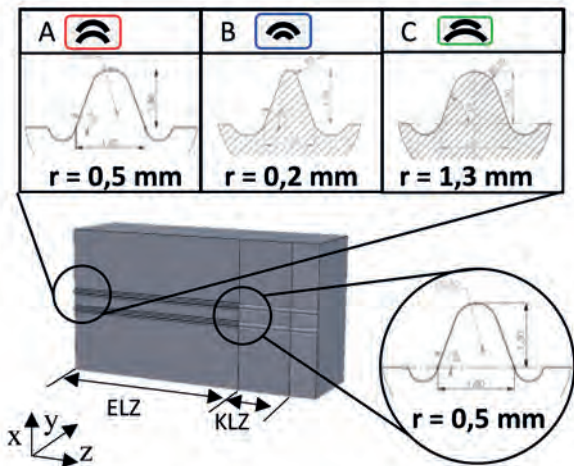


Bild 2: Walzbacke mit Detailansicht der Nutgeometrie zu Beginn und Ende der Einlaufzone (links); i.O.-Anteil in Abhängigkeit von Hubzahl und Walzstrategie (rechts)

ERREICHBARE HUBZAHLEN

Da das aufzubringende Profil keine Steigung besitzt, wird die zur Rotation des Werkstücks notwendige Kraft ausschließlich reibkraftschlüssig übertragen. In Abhängigkeit der Walzstrategie und der Hubzahl kann es während des Abrollvorgangs dazu kommen, dass die übertragene Reibkraft nicht ausreicht, die Werkstückrotation aufrecht zu erhalten. Sofern diese Prozessgrenze auftritt, setzt die Werkstückrotation aus, das Werkstück haftet an einer der Walzbacken an und die Nut wird nicht vollständig ausgewalzt. Bild 1 zeigt zwei Werkstücke, wobei ein Werkstück vollständig ausgewalzt wurde (i.O.-Teil) und ein Werkstück, bei dem die Prozessgrenze erreicht und die Nut nicht vollständig ausgewalzt wurde (n.i.O.-Teil). Für jede Walzstrategie wurde die Hubzahl in sieben Schritten von neun Hub/min bis 70 Hub/min erhöht, wobei pro Einstellung zehn Werkstücke gewalzt wurden.

Bild 2 zeigt den Anteil an i.O.-Teilen in Abhängigkeit der Walzstrategie und der Hubzahl. Die Untersuchungen erlauben die Erfassung der Prozessgrenze durch Schlupf, wobei sowohl die Walzstrategie als auch die Hubzahl einen signifikanten Einfluss auf den Prozesserfolg haben. Die Prozessgrenze durch Schlupf beginnt für Walzstrategie A ab 40 Hub/min, für Walzstrategie C bereits bei 30 Hub/min und Walzstrategie B zeigt kein Prozessversagen innerhalb der untersuchten Hubzahlen.

Durch den sukzessive ansteigenden Nutradius entlang der Einlaufzone kann die maximale Hubzahl bei Walzstrategie B gegenüber Walzstrategie A deutlich erhöht werden. Walzstrategie C zeigt gegenüber A deutliche Nachteile in Hinblick auf die maximal mögliche Hubzahl.

STEUERUNG DES WERKSTOFFFLUSSES

Die FEM-Simulation des Walzprozesses erlaubt es den Einfluss der Walzstrategien auf den Werkstofffluss und somit die Werkstückgeometrie zu erfassen. Da die Zielgeometrie, definiert durch die Kalibrierzone, für alle Walzstrategien gleich ist, unterscheiden sich diese in Hinblick auf das durch das Werkzeug verdrängte Materialvolumen nicht. Die FEM-Simulationen zeigen jedoch, dass durch die Walzstrategie die Richtung des Materialflusses in radiale und axiale Richtung beeinflusst wird. Bild 3 zeigt das Nutprofil, sowie die Werkstücklänge nach der Umformung für alle drei Strategien. Die Ausgangslänge des Werkstücks beträgt 10,01 Millimeter. Walzstrategie C verstärkt den Materialfluss in axiale Richtung, was zu einer größeren finalen Länge des Werkstücks l(C) führt. Strategie B begünstigt den Werkstofffluss in radiale Richtung was an der höheren freien Aufwertung erkennbar ist. Auffällig ist dabei jedoch, dass die Asymmetrie der freien Aufwertung, herbeigeführt durch die Symmetrieebene, bei Walzstrategie B stärker ausgeprägt ist, als bei Strategie A und C.

UMFORMKRAFT UND REIBUNG

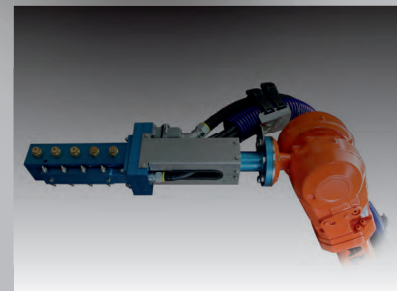
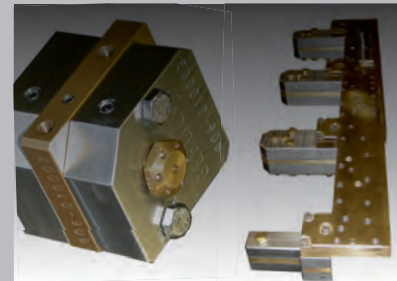
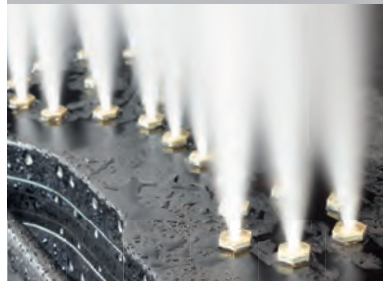
Die höhere maximale Hubzahl von Walzstrategie B wird bei Betrachtung des Momentengleichgewichts um den Werkstückmittelpunkt ersichtlich. Die Gleichung zeigt das vereinfachte Momentengleichgewicht, entsprechend der Darstellung in Bild 4, links

Das Gleichgewicht enthält zwei Drehmomente, deren Verhältnis zueinander für das Auftreten von Schlupf entscheidend ist.

$$2 \cdot F_R \cdot r - 2 \cdot s \cdot F_u = \theta \cdot \ddot{\varphi}$$

Im schlupffreien Zustand stellt sich die Rotationsbeschleunigung $\ddot{\varphi}$ entsprechend durch das Werkzeug vorgegebenen Beschleunigung $\dot{v}_{Werkzeug}$ ein. Dabei wirkt das Umformmoment mit $2 \cdot s \cdot F_u$ entgegen der Rotationsrichtung als Bremsmoment und das Reibmoment mit $2 \cdot r \cdot F_r$ in Rotationsrichtung als Antriebsmoment. Die Höhe des Umformmoments ergibt sich aus der Umformung und steigt im Verlauf der Umformung an. Die Höhe des Reibmoments ergibt sich aus der Summe des Umformmoments und dem Trägheitsmoment $\theta \cdot \ddot{\varphi}$. Aufgrund der geringen Werkstückmasse ist das Trägheitsmoment im Vergleich zum Umform- und Reibmoment vernachlässigbar klein, sodass dieses in der nachfolgenden Betrachtung vernachlässigt wird. Im schlupffreien Zustand herrscht Haftreibung zwischen Werkzeug und Werkstück, weshalb das Reibmoment bis zum Erreichen der Haftbedingung $F_r \leq \mu_h \cdot F_n$ steigen kann. Die Prozessgrenze durch Schlupf tritt demnach dann ein, wenn das Umformmoment das maximale Reibmoment, begrenzt durch die Haftbedingung, überschreitet. Tritt die Prozessgrenze ein, sinkt der Reibwert vom Haftreibwert μ_h zum Gleitreibwert μ_G , während das Umformmoment gleich bleibt. Die Prozessgrenze kann dementsprechend durch den Haftreibwert μ_H und das Umformmoment beeinflusst werden.

Unabhängig von der Walzstrategie ist die Prozessgrenze entsprechend Bild 2, rechts hubzahlabhängig. Es ist demnach davon auszugehen, dass durch Erhöhung der Hubzahl das übertragbare Reibmoment sinkt und/oder das Umformmoment steigt. 3D-Piezo-Kraftsensoren erlauben die Ermittlung der Umformkraft, über den Prozessverlauf. [1] Die Messungen zeigen keinen Einfluss der Hubzahl auf die Umformkraft, weshalb davon auszugehen ist, dass das hubzahlbedingte Durch-



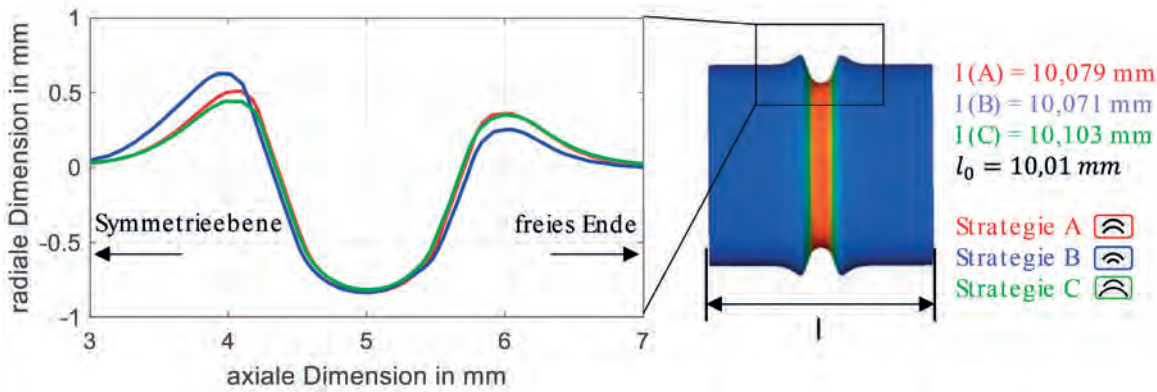


Bild 3: Verlauf der Nutgeometrie für Walzstrategien A, B und C (links); Werkstückgeometrie nach Umformung in FE Simulation und finale Werkstücklängen

rutschen durch eine geschwindigkeitsbedingte Verringerung des Haftreibungswerts hervorgerufen wird. [2]

Analog zur Analyse des Einflusses der Hubzahl auf das Momentengleichgewicht, kann auch der Einfluss der Walzstrategie untersucht werden. Beim Vergleich des benötigten Umformmoments zwischen Walzstrategie A und B wird ersichtlich, warum Walzstrategie B höhere Hubzahlen ermöglicht. Bild 4, rechts zeigt den Vergleich der Umformkraft zwischen Strategie A und B für jeweils fünf Werkstücke, wobei der Verlauf im ersten Drittel des Prozesses vergrößert dargestellt ist. Optische Messungen zeigen, dass Durchrutschen ungefähr nach der ersten Werkstückumdrehung auftritt, weshalb das Gleichgewicht zu diesem Zeitpunkt entscheidend für den Prozesserfolg ist. Die Umformkraft im Bereich der ersten Werkstückrotation (zirka 65 Millimeter Hub) ist für Walzstrategie B um zirka 25 Prozent niedriger als bei Walzstrategie A. Das notwendige Reibmoment ist demnach um 25 Prozent niedriger als bei Walzstrategie A. Sofern das maximal übertragbare Reibmoment bei Walzstrategie B gegenüber A um weniger als 25 Prozent geringer ist, führt dies zu einer Erhöhung der maximal möglichen Hubzahl.

Das notwendige Reibmoment ist demnach um 25 Prozent niedriger als bei Walzstrategie A. Sofern das maximal übertragbare Reibmoment bei Walzstrategie B gegenüber A um weniger als 25 Prozent geringer ist, führt dies zu einer Erhöhung der maximal möglichen Hubzahl.

Bild 5 zeigt den Vergleich der Kontaktfläche nach 30 mm Hub zwischen Walzstrategie A und B. Das Reibmoment errechnet sich nach Coulomb aus $2 \cdot r \cdot \sigma_n \cdot A \cdot \mu_h$. [3] Der Vergleich der Einflussfaktoren zwischen Strategie A und B erlaubt eine Aussage darüber, wie sich die maximal übertragbaren Reibkräfte ändern. Gegenüber Strategie A verringert sich die Kontaktfläche bei Walzstrategie B (A_2/A_1) um ca. 14 Prozent während die Kontaktnormalspannung σ_n im Mittel um 9,8 Prozent steigt. Der Haftreibungskoeffizient μ_h beträgt bei 2.000 MPa Kontaktnormal-

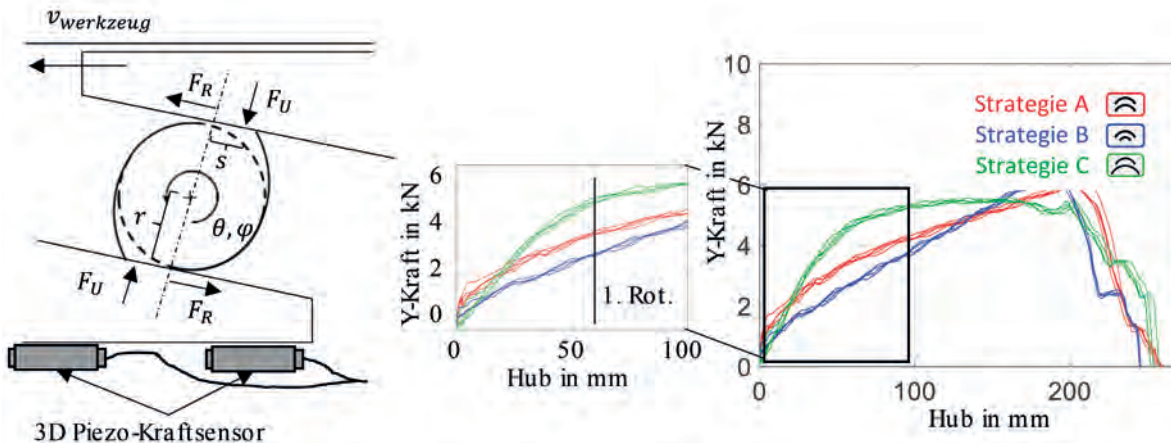


Bild 4: schematische Darstellung der Kräfte im Querschnitt im Nutgrund (links); experimentell ermittelte Umformkräfte für Walzstrategien A, B und C (rechts)

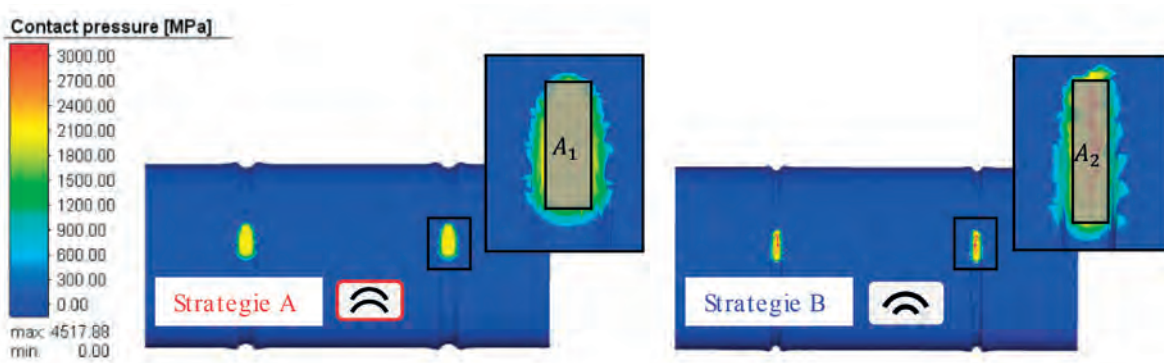


Bild 5: Vergleich der Kontaktnormalspannung und Kontaktfläche zwischen Strategie A und B bei 30 mm Hub, Bilder: Autoren

spannung 0,1505 und bei 1500 MPa 0,1555, was einer Steigerung von etwa 3 Prozent entspricht. Die Veränderungen summieren sich zu einer Reduktion der maximal übertragbaren Reibkräfte bei Strategie B gegenüber Strategie A um 2,8 Prozent.

In Anbetracht der deutlich höheren Reduktion der Umformkräfte um zirka 25 Prozent, gegenüber der Reduktion der maximalen Reibkraft um nur 2,8 Prozent kann die Performancesteigerung von Walzstrategie B auf die Reduktion der Umformkraft in der ersten Prozesshälfte zurückgeführt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Auslegung von Profilwalzprozessen ist aufgrund enger Prozessfenster, besonders für Geometrien abseits von Gewinden herausfordernd. [4] Beim Walzen axialsymmetrischer Geome-

trien, bei denen die für die Werkstückrotation notwendige Kraft reibkraftschlüssig übertragen wird, begrenzt das Auftreten von Schlupf das Prozessfenster erheblich. Im Rahmen der Untersuchungen konnte am Beispiel einer radialen Rundnut gezeigt werden, dass durch Gestaltung der Form der Walzwerkzeuge signifikant Einfluss auf diese Prozessgrenze genommen werden kann. Prozesskraftmessungen zeigen, dass dabei die Form der Walzwerkzeuge den Kraftverlauf signifikant beeinflusst und so verändern kann, dass mit höheren Hubzahlen schlupffrei gewalzt werden kann. Neben der Prozessgrenze durch Schlupf, kann durch die Wahl der Walzstrategie außerdem Einfluss auf den Werkstofffluss genommen werden.



Das IGF-Vorhaben 20722N wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Schlussberichtes kann bei der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V., Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung



[1] Kramer, P.; Groche, P.: Defect detection in thread rolling processes – Experimental study and numerical investigation of driving parameters. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 129 (2018), S. 27 – 36

[2] Volz, S.; Groche, P.: Schlussbericht IGF-Vorhaben Nr. 20722N – Auslegung von Profilwalzprozessen. Teilautomatisierte, numerische Auslegung und Erweiterung der Prozessgrenzen hinsichtlich Ausbringung und Formgebung beim Profilwalzen, Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, TU Darmstadt, Germany

[3] Amontons, G.: De la Resistance cause'e dans les Machines. *Mémoires de l'Académie des Sciences* (1699), S. 206 – 227

[4] Kramer, P.: Die Tribologie von Profilwalzprozessen und deren numerische Abbildung. Dissertation, TU Darmstadt, 2018