

Friction-Spinning – Ein neuer thermo- mechanischer Umformprozess für gradierte Werkstückeigenschaften

Homberg, W.; Hornjak, D.; Beerwald, C.

Abstract

Um den ökonomischen und ökologischen Anforderungen hinsichtlich Ressourcenschonung und Effizienzsteigerung im Maschinenbau Rechnung zu tragen, bietet der Einsatz von gradierten Bauteilen ein großes Potential. Allerdings stehen entsprechende Fertigungsverfahren, die für die effiziente Produktion solcher Bauteile erforderlich sind, noch nicht im ausreichenden Maße zur Verfügung. Hier setzt eine derzeit am Lehrstuhl für Umformende und Spanende Fertigungstechnik der Universität Paderborn (LUF) laufende Entwicklung eines neuen Umformverfahrens an. Mit der Motivation, gradierte Bauteile herzustellen und gleichzeitig die Formgebungsgrenzen zu erweitern, wird daher am LUF im Rahmen des DFG SFB/TRR30 das sogenannte Reib-Drücken entwickelt. Das Verfahren basiert auf der Kombination des Drückens mit Prozesselementen aus dem Bereich des Reibschweißens. Dabei werden zur partiellen, prozessintegrierten Erwärmung, die weitgehend ohne externe Wärmequellen (selbstinduziert) erfolgt, lokal wirkende thermo-mechanische Teilprozesse in den Ablauf von Drückverfahren integriert. Dies geschieht typischerweise durch einen lokalen (zusätzlichen) Kontakt des in Rotation versetzten Werkstückes mit einem Reibwerkzeug. Durch die Relativbewegung und den Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug wird der, das Umformvermögen des eingesetzten Werkstoffes steigernde, Wärmeeintrag erzeugt. Der Wärmeeintrag kann dabei unter anderem über die Wahl der Prozessparameter gezielt beeinflusst werden. Ziel der am LUF durchgeführten Arbeiten ist es, neuartige blech- und rohrförmige Werkstücke mit verbesserten, gradierten Eigenschaften herzustellen, sowie Ablauf und Ergebnis von Drückprozessen zu optimieren und die Formgebungsgrenzen zu erweitern. Dies konnte durch erste entsprechende grundlegende Untersuchungen an rohrförmigen Aluminiumbauteilen

erfolgreich nachgewiesen werden. So wurden beispielsweise erfolgreich anspruchsvolle Flanschgeometrien und Aufdickungen mit einem feinkörnigen duktilen Gefüge erzeugt, die mit konventionellen Druckverfahren nicht herstellbar sind. Daraus ergeben sich vielfältige Anwendungen z.B. im Anlagen- und Fahrzeugbau.

1 Einleitung

Das Drücken ist ein inkrementelles Umformverfahren mit dem zumeist aus Blech oder rohrförmigen Werkstücken durch stufenweise Umformung rotationssymmetrische Hohlkörper mit nahezu beliebiger Mantellinienkontur hergestellt werden. Typische Produkte sind Halbzeuge und Teile die in kleinen bis mittleren Stückzahlen hergestellt werden [1].

Beim konventionellen Drücken ist, aufgrund der während der Umformung zwangsläufig auftretenden Kaltverfestigung, das Formänderungsvermögen des Werkstoffs schnell erreicht. Dadurch kann nicht nur der Prozessablauf und das Umformergebnis negativ beeinflusst werden, sondern es kann u.a. zu einer ungünstigen, inhomogenen Bauteileigenschaftsverteilung zum Beispiel bezüglich der Härte führen [2;3]. Durch eine lokale oder globale Erhöhung der Umformtemperatur oder durch zwischengeschaltete Wärmebehandlungsschritte, kann ein ausreichendes Formänderungsvermögen aufrecht erhalten bzw. wieder erreicht werden. Gängige Praxis ist z.B. das zwischengeschaltete Glühen der Werkstücke in separaten Öfen. Eine andere Möglichkeit ist die prozessintegrierte Erwärmung der Werkstücke zum Beispiel durch Gasbrenner- oder Lasersysteme. Beide Ansätze erhöhen aber sowohl den apparativen Aufwand und als auch die Kosten für Energie, Investitionen und Instandhaltung. Speziell bei dem Einsatz von Brennersystemen kann zwar vielfach das Formänderungsvermögen erhöht werden, aber die meist geringe Fokussierbarkeit und der vorwiegend großflächige Wärmeeintrag bringen neben einer Gefährdung für den Bediener und einer hohen thermischen Belastung für die Maschine selbst, auch einen inhomogenen Wärmeeintrag in das umzuformende Bauteil mit sich [4]. Die inhomogene Wärmeverteilung und die schwierige Handhabung können die Qualität des Produkts negativ beeinflussen. Eine zeitliche und räumliche Steuerung des Wärmeeintrags erfolgt im industriellen Einsatz in der Regel nur basierend auf Erfahrungswerten, so dass eine gezielte Einstellung von Bauteileigenschaften, wie zum Beispiel Härteverteilung oder Gefügestände, oft nicht oder nur sehr schwer erreicht

werden kann. Eine neue vielversprechende Methode um die Werkstücktemperatur während des Drückprozesses zu erhöhen, ist die Ausnutzung bzw. Erzeugung von Reibungswärme durch den Einsatz von Reib- und Umform- bzw. kombinierten Reib-Umformwerkzeugen. Dieses sogenannte Reib-Drücken wird im Rahmen eines Teilprojektes des DFG Sonderforschungsbereichs TRR30 am Lehrstuhl für Umformende und Spanende Fertigungstechnik der Universität Paderborn (LUF) entwickelt, mit dem Ziel die Formgebungsgrenzen und Anwendungsbereiche von konventionellen Drückverfahren zu erweitern. Dazu werden zur partiellen, prozessintegrierten Erwärmung lokal wirkende thermo-mechanische Teilprozesse in den Ablauf von Drückverfahren integriert. Das Prozessprinzip des Reib-Drückens für die Bearbeitung von rohr- und blechförmigen Bauteilen ist in Bild 1 dargestellt. Bei der Bearbeitung von z.B. rohrförmigen Bauteilen wird das Werkstück in Rotation versetzt (Bild 1a) und mit einer definierten Axialkraft in Kontakt mit einem feststehenden Reibplattenwerkzeug gebracht (Bild 1b). In der Kontaktzone entsteht durch die Reibung die für den Prozess benötigte Temperatur, die wirkende Vorschubkraft kann gleichzeitig für die Formgebung des erwärmten Materials genutzt werden (Bild 1c). Zusätzliche Werkzeuge können definiert die Formgebung und den Temperatureintrag unterstützen (Bild 1c).

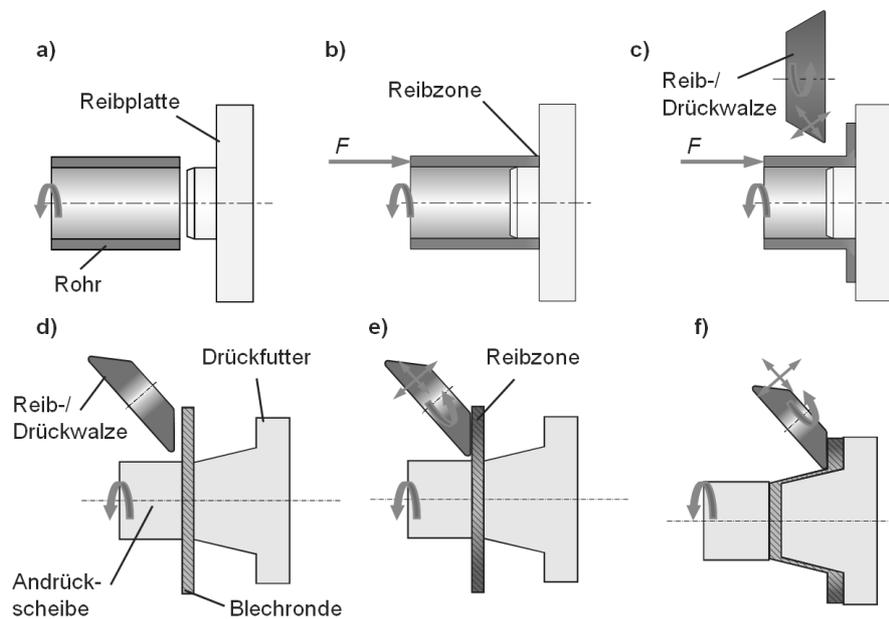


Bild 1: Verfahrensprinzip des Reib-Drückens bei der Rohr- und Blechbearbeitung

Ebenso ist das Verfahrensprinzip auch auf die Bearbeitung von blechförmigen Bauteilen übertragbar (Bild 1d). Durch ein Reibwerkzeug wird z.B. auf der Fläche einer rotierenden Ronde die Temperatur erzeugt (Bild 1e) und kann prozessbegleitend, parallel zur Umformung aufrecht erhalten oder bei Bedarf, z.B. durch Drehzahlvariation, anforderungsangepasst eingestellt werden (Bild 1f). Dadurch können eine größere Formänderung erreicht, komplexere Geometrien hergestellt und Bauteileigenschaften gezielt eingestellt werden.

2 Prozess des Reib-Drückens

Im Rahmen von grundlegenden Untersuchungen wurde zunächst die freie Umformung von Rohrenden betrachtet. Dazu wurden rohrförmige Bauteile nach dem oben beschriebenen Prinzip mit Hilfe eines ebenen Reibplattenwerkzeugs frontseitig aufgestaucht. Bei der sich ausbildenden pilzförmigen Aufdickung kann eine starke Kornfeinung aufgrund der hohen Umformung (in Analogie zu Severe Plastic Deformation Verfahren) beobachtet werden. In den umgeformten Bauteilbereichen konnte so, ausgehend von einem stark texturierten Gefüge mit Korngrößen von 100 μm bis 200 μm , durch die Umformung ein sehr homogenes Gefüge mit Korngrößen von 8 μm bis 14 μm erzeugt werden (Bild 2). Durch entsprechende Ausnutzung der Kaltverfestigung bzw. der wirkenden Erholungseffekte besteht hier die Möglichkeit, die Härte in der Umformzone im Bereich von 60% bis 125% im Bezug zur Härte des Ausgangswerkstoffs (85HV5) zu beeinflussen. Darüber hinaus kann Länge und Lage der Härteübergangszone

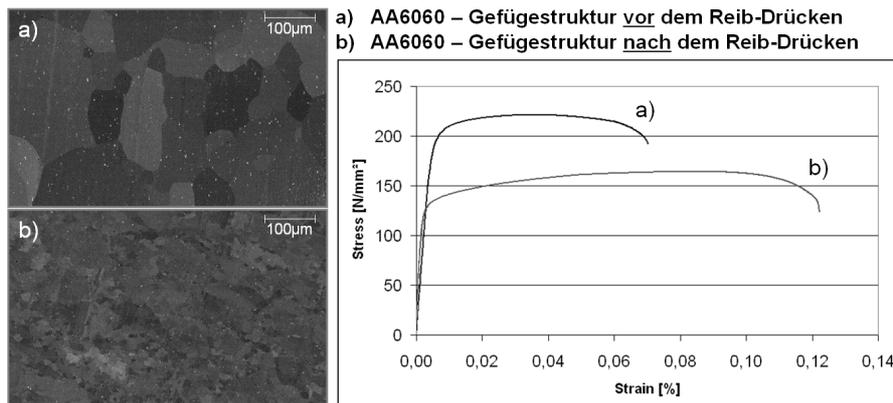


Bild 2: Reib-Drücken: Einflüsse auf Gefügestruktur und σ - ϵ -Diagramm

variiert werden und es ist ebenso möglich sehr scharfe Gradierungsübergänge von z.B. 10% Härteunterschied pro mm zu erzeugen [7]. Dabei haben Werkstoffprüfungen gezeigt, dass die Härte in der Umformzone bzw. in den Härtebereichen sehr homogene Verteilungen aufweisen, besonders im Vergleich zu der Härteverteilung im Ausgangswerkstoff (Bild 3). Darüber hinaus zeigt der Werkstoff im umgeformten Bereich des Bauteils ein verbessertes Formänderungsvermögen und bietet somit gute Voraussetzungen für die Umformung und Weiterverarbeitung, sowie das Erreichen großer Umformgrade bzw. die Möglichkeit zur Herstellung komplexer Geometrien (Bild 2).

Werkstoff	: AA6060	Ausgangs-Wandstärke	: $s_0 = 2$ mm
Reibplattenmaterial	: TOOLOX 33	Rohrausgangslänge	: $l_0 = 60$ mm
Anpressdruck	: $p_{An} = 30$ bar	Bauteillänge	: $l_1 = 48$ mm
Drehzahl	: $n = 710$ U/min	Aufdickung-Wandstärke	: $s_A = 5$ mm
Rohrdurchmesser	: $d_0 = 40$ mm	Aufdickung-Länge	: $l_A = 8$ mm

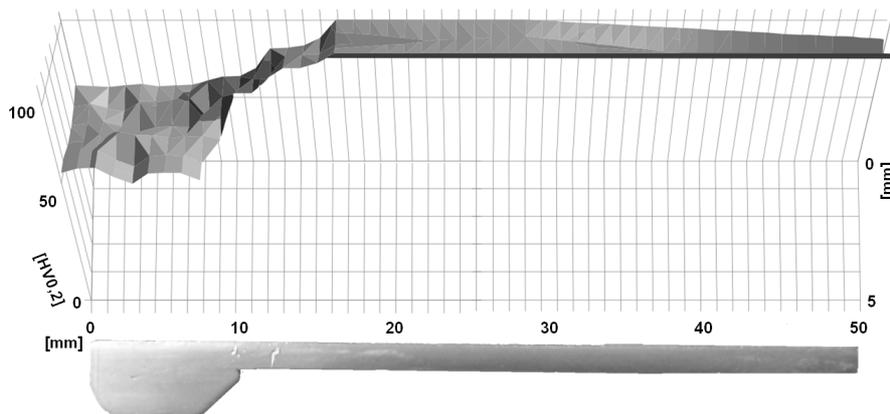
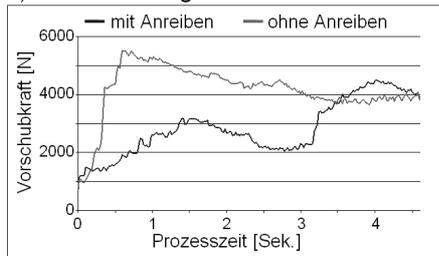


Bild 3: Reib-Drücken: Einflüsse auf die Härteverteilung an einem rohrförmigen Bauteil

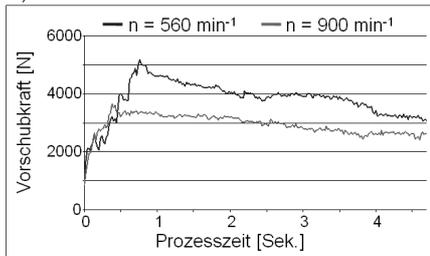
Im Rahmen von umfangreichen technologischen Untersuchungen konnte ein deutlicher Einfluss der Drehzahl auf den Temperatureintrag in das Bauteil festgestellt werden. Mit steigender Drehzahl sinkt die für die Umformung benötigte Stauchkraft deutlich ab, dies zeigt die Korrelation zwischen hoher Drehzahl und erhöhter Werkstücktemperatur und damit der Reduzierung der für die Umformung benötigten Axialkraft (Bild 3b). Daneben kann die benötigte durchschnittliche Stauchkraft auch durch die Verringerung der Umform- bzw. Vorschubgeschwindigkeit reduziert werden (Bild 3c). Zur Absenkung des, für den Reib-Drück-Prozess, benötigten Kraftmaximums bietet sich somit auch eine zeitlich begrenzte Anreibphase (hier 3Sek.) mit deutlich reduziertem Vorschub an (Bild 3a).

a) Prozessstrategie



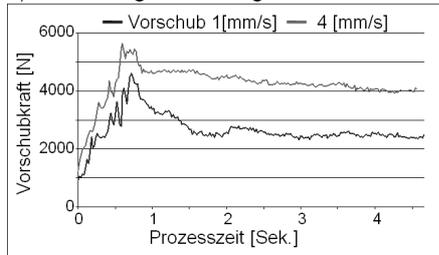
Vorschub : $f_{st} = 4 \text{ mm/s}$
Drehzahl : $n = 560 \text{ Umin}^{-1}$

b) Drehzahl



Vorschub : $f_{st} = 2,5 \text{ mm/s}$
Ohne Anreibphase

c) Vorschubgeschwindigkeit



Drehzahl : $n = 560 \text{ Umin}^{-1}$
Ohne Anreibphase

Werkstoff (Werkstück) : AlMgSi0.5
Werkstoff (Reibwerkzeug) : 1.2714
Durchmesser : $d_0 = 40 \text{ mm}$
Wandstärke : $s_0 = 2 \text{ mm}$
Rohrausgangslänge : $l_0 = 60 \text{ mm}$
Bauteillänge : $l = 45 \text{ mm}$

Bild 4: Einfluss signifikanter Prozessparameter auf die Vorschubkraft beim Reib-Drücken

Im Bereich der Prozessführung kann bereits im Sinne einer angepassten Prozessführung auf verschiedene implementierte Regelungsansätze (z.B. Vorschub- oder Stauchkraftregelung) zurückgegriffen werden. Ein neuartiger vielversprechender Ansatz ist in diesem Zusammenhang die Nutzung prozessinterner, zustandsabhängiger akustischer Emissionen für Steuerungs- bzw. Regelungszwecke (z.B. im Hinblick auf die Detektion bestimmter Prozess- oder Erwärmungszustände). Die im Rahmen der technischen Untersuchungen durchgeführten Messungen dieser Geräuschemissionen zeigen, dass sich für bestimmte Prozesszustände/-zeitpunkte typische Verläufe respektive Hüllkurven im Frequenzband ergeben (vgl. Bild 5). Detektierbar sind dabei u.a. nicht nur die zu Beginn jedes Reib-Drück-Prozesses liegende Anreib- bzw. Einlaufphase (Bild 5a) und der stabile Prozessbereich während der simultanen Reib-Drück-Umformung (Bild 5b), sondern auch signifikante Veränderungen im emittierten Frequenzspektrum beim Beginn von instabilen Prozesszuständen (Bild 5c). Damit besteht die Möglichkeit den Prozess zu stabilisieren indem regelnd eingegriffen wird. Zum Beispiel können beim Auftreten einer „kritischen“ Frequenzverteilung

Gegenmaßnahmen wie die Variation des Vorschubes oder der Drehzahl ergriffen werden. Eine genaue Charakterisierung der akustischen Emissionen und die Ableitung angepasster Regelungsstrategien ist Gegenstand von laufenden Forschungsarbeiten.

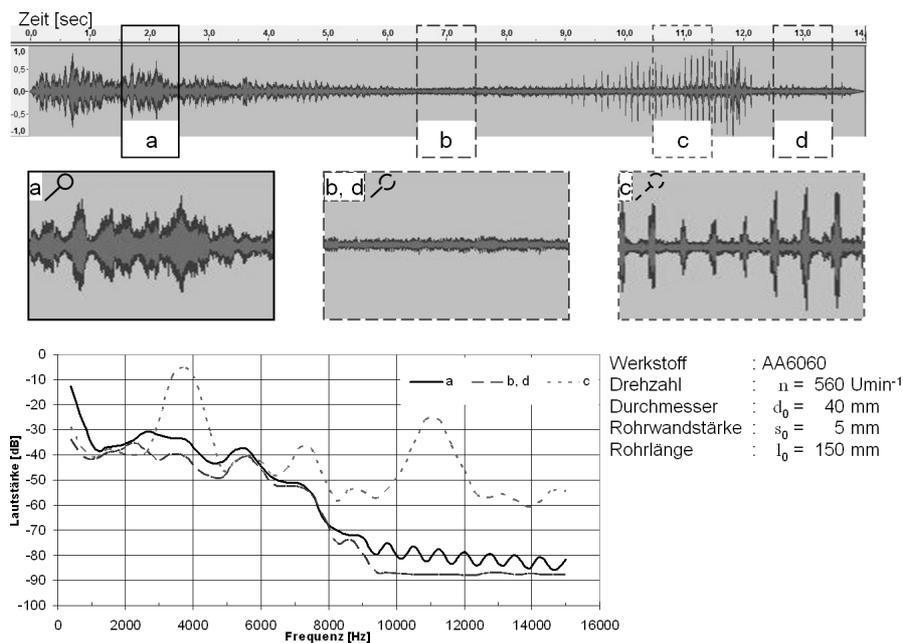


Bild 5: Charakteristische akustische Emissionen bei der Konturbearbeitung eines Rohrabschnitts aus dem Werkstoff AA6060

3 Herstellung rotations-symmetrischer Musterwerkstücke

Neben den grundlegenden technologischen Untersuchungen zur Prozessführung bzw. den erreichbaren Werkstoffeigenschaften, wurden umfangreiche Untersuchungen zu Werkzeugsystemen bzw. den damit herstellbaren Werkstücken durchgeführt. Als ein erstes wichtiges Ergebnis hat sich gezeigt, dass die Parameter Material-Reib-Paarung und die Prozesstemperatur einen besonders großen Einfluss auf das Umformergebnis und die Reproduzierbarkeit haben. Während für das Reib-Drücken von Aluminium- und Messinghalbzeugen, aufgrund

ihrer geringen Affinität und sehr geringen Aufschweißneigung sowie ihrer guten Verarbeitbarkeit, besonders warmfeste Werkzeugstähle, wie zum Beispiel Toolox33, oder Gusseisen mit Kugelgraphit, sich als geeignet herausstellten; zeigten bei der Umformung von Stahlwerkstoffen, beschichtete Reibwerkzeuge ein vielversprechendes Potential [5;6]. Die Prozesstemperatur wird neben der genannten Material-Reib-Paarung hauptsächlich durch die Reib- und die axiale Vorschubgeschwindigkeit, sowie den Anteil respektive die Größe der Reibflächen bestimmt. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die für die Rohrendenbearbeitung benötigte Temperatur, bereits durch einen Teil der berührenden Werkzeuge erreicht werden kann, und somit alle weiteren Werkzeugelemente nur noch rein umformtechnische Funktion übernehmen [s. 7]. Bei dem dargestellten Werkzeugaufbau übernehmen die entlang des Bauteilumfangs verteilten rollenförmigen Werkzeuge nur die Begrenzung des Werkstoffflusses nach Außen (Bild 6).

Werkstoff	: Al99.5	Ausgangs-Wandstärke	: $s_0 = 2 \text{ mm}$
Schmierung	: OKS-240	Rohrausgangslänge	: $l_0 = 60 \text{ mm}$
Reibplattenmaterial	: TOOLOX 33	Bauteillänge	: $l_1 = 48 \text{ mm}$
Anpressdruck	: $p_{An} = 30 \text{ bar}$	Aufdickung-Wandstärke	: $s_A = 5 \text{ mm}$
Drehzahl	: $n = 710 \text{ U/min}$	Aufdickung-Länge	: $l_A = 8 \text{ mm}$
Rohrdurchmesser	: $d_0 = 40 \text{ mm}$		

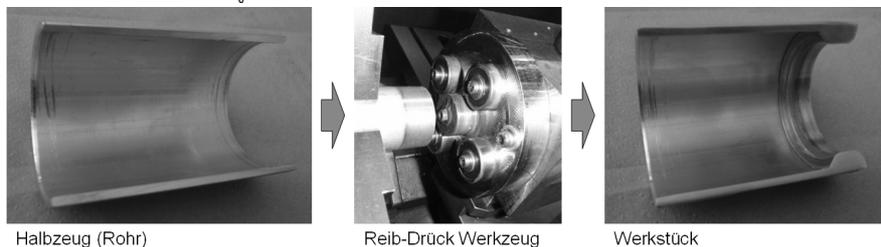


Bild 6: *Werkzeugsystem zur Erzeugung von Wanddickenzunahmen im Rohrendenrandbereich*

Mit diesem Werkzeugaufbau lassen sich so z.B. an dünnwandige rohrförmige Bauteile Aufdickungen bis zu 250% der Ausgangswandstärke anformen, die so bis dahin mit konventionellen Druckverfahren nicht oder nur sehr schwer hergestellt werden konnten. Aufbauend auf den Erkenntnissen wurde ein weiterführendes Werkzeugsystem zur Anformung von großflächigen Flanschgeometrien an Rohrenden entwickelt (Bild 7). Mit diesem konnten bereits Durchmesser-zu-Flansch-Verhältnisse von über 80% bei $d_0 = 40 \text{ mm}$ und $s_0 = 2 \text{ mm}$ und für $d_0 = 40 \text{ mm}$ und $s_0 = 5 \text{ mm}$ von über 90%[7] realisiert werden.

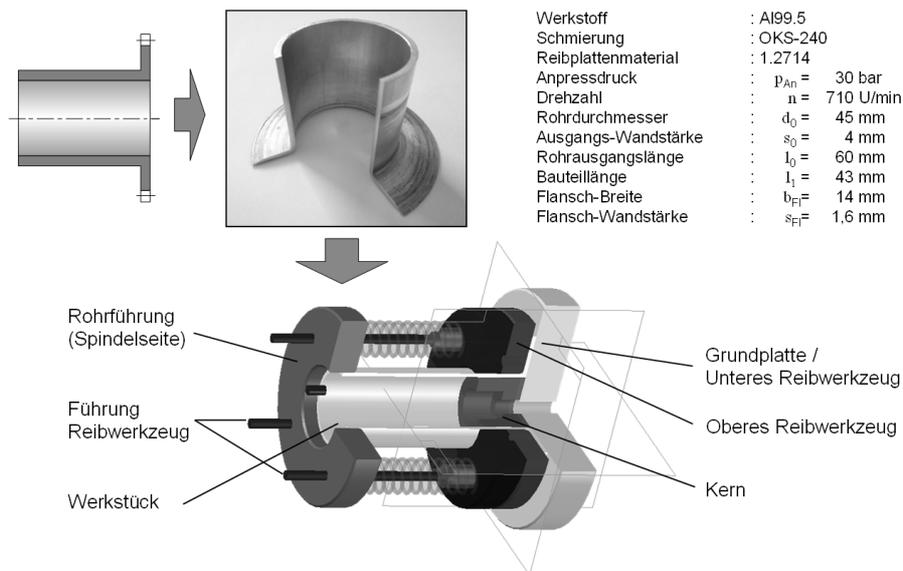
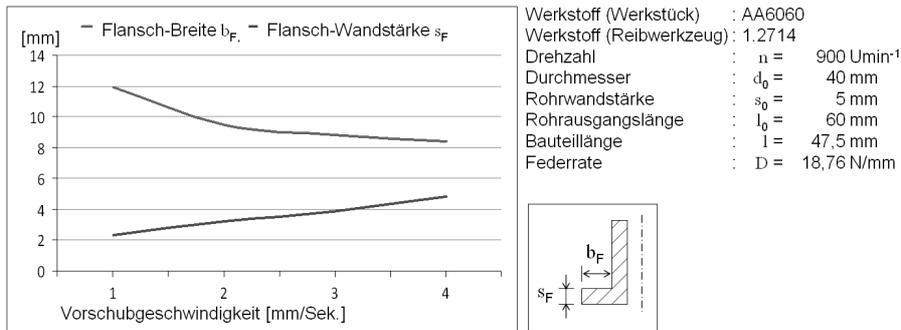


Bild 7: *Werkzeugsystem zur Erzeugung von Flanschgeometrien im Rohrendenrandbereich*

Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass nicht nur die Reibplatten-Gegenhalterkraft (vgl. Bild 7) die sich ausbildende Flanschdicke beeinflusst, sondern auch die axiale Vorschubgeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf den Materialfluss und damit auf die Materialverteilung zwischen Flanschdurchmesser und -dicke hat (Bild 8). Obwohl speziell bei diesem Werkzeug ein großflächiger Reibkontakt zwischen Werkzeug und Werkstück herrscht, können damit trotzdem gute Oberflächen hergestellt werden. Bei einer Reibgeschwindigkeit von 70m/min und einer Prozesszeit von ca. 7 Sekunden können Rauheiten im Bereich von $R_z = 5,2\mu\text{m}$ und $R_{\text{max}} = 11,1\mu\text{m}$ auf der Flanschoberfläche erzeugt werden [5;6]. Aufgrund der durch die Reibvorgänge erreichbaren guten Oberflächen, kann das Reib-Drücken nicht nur zur Herstellung von Halbzeugen oder Vorformen, sondern auch für die Herstellung von Fertigbauteilen genutzt werden.



Werkstoff (Werkstück) : AA6060
 Werkstoff (Reibwerkzeug): 1.2714
 Drehzahl : $n = 900 \text{ Umin}^{-1}$
 Durchmesser : $d_0 = 40 \text{ mm}$
 Rohrwandstärke : $s_0 = 5 \text{ mm}$
 Rohrausgangslänge : $l_0 = 60 \text{ mm}$
 Bauteillänge : $l = 47,5 \text{ mm}$
 Federrate : $D = 18,76 \text{ N/mm}$

Bild 8: Wechselwirkungen zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Werkstofffluss bei der Erzeugung der Flanschgeometrie

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Bereich der Rohrendenbearbeitung wurden technologische Untersuchungen zur Konturbearbeitung erfolgreich durchgeführt.

Ein Ergebnis dieser Arbeiten ist beispielsweise die Entwicklung und Untersuchung einer Prozess-Strategie zur Herstellung von Doppelflanschgeometrien wie sie z.B. für Riemenscheiben, Umlenkrollen, Spulen u.ä. benötigt wird. So zeigt Bild 9 die Stadienfolge zur Herstellung einer solchen Doppelflanschgeometrie mit einem Flanschdurchmesser von 83 mm aus einem rohrförmigen Halbzeug aus dem Werkstoff AA6060 mit einem Ausgangsdurchmesser von $d_0 = 40 \text{ mm}$ und einer Ausgangswandstärke von $s_0 = 5 \text{ mm}$. Ein typischer Prozessablauf für die Herstellung der Doppelflanschgeometrie lässt sich dabei wie folgt skizzieren: Zunächst wird ein Reibwerkzeug dessen Außenkontur der Innenkontur der zu erzeugenden Flanschgeometrie entspricht an der gewünschten Stelle mit der Mantelfläche des Halbzeugs in Kontakt gebracht. Nach Erreichen der Prozesstemperatur wird die gewünschte Geometrie durch ein aufeinander abgestimmtes und folgendes Verfahren in radialer und axialer Richtung (s. Bild 9) hergestellt.

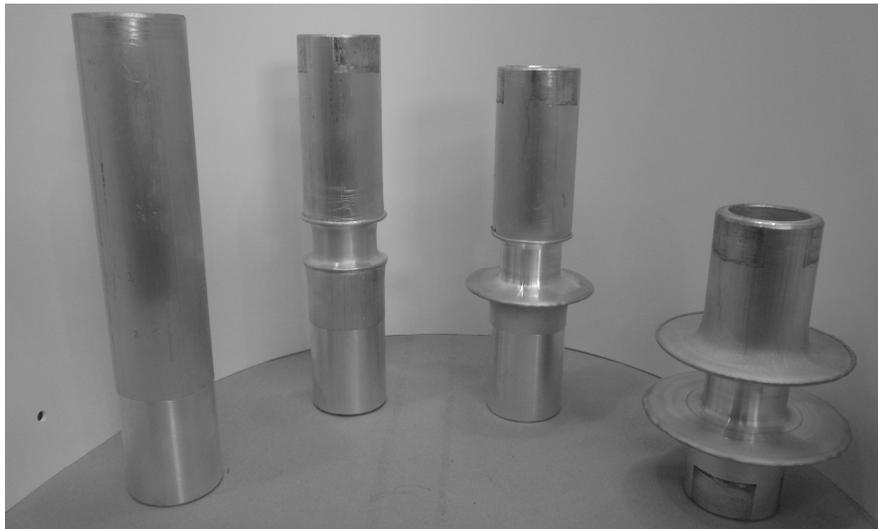


Bild 9: *Reib-Drücken: Stadienfolge bei der Erzeugung der Doppel-Flanschgeometrie*

Neben der Erzeugung einfacher oder doppelter Flanschgeometrien auf der Mantelfläche von rohrförmigen Bauteilen, können mit dem Reib-Drücken unter anderem auch lokale innenliegende Aufdickungen (Bild 10) erzeugt werden. Dies und die Möglichkeit die erzeugten Geometrien direkt weiterzuverarbeiten, erlaubt die Herstellung einer neuen Gruppe von Geometrie- und Formelementen, wie z.B. eine T-förmige Flanschgeometrie, die so bis jetzt mit konventionellen Druckverfahren nicht herstellbar war (Bild 10).



Bild 10: Formenvielfalt beim Reib-Drücken

Die derzeitigen Arbeiten konzentrieren sich zum einen auf die Erweiterung des herstellbaren Geometriespektrums bzw. die Übertragung der Erkenntnisse auch auf andere Halbzeuge (Bleche) und weitere Werkstoffe, wie beispielsweise NE-Metalle und insbesondere auch auf Stähle.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Wie die dargestellten Ergebnisse zeigen, ist die Verfahrenskombination des Reib-Drückens nicht nur dazu geeignet, lokal definiert die Bauteileigenschaften anforderungsangepasst einzustellen, sondern sie bietet das Potential die Verfahrensgrenzen konventioneller Druckverfahren deutlich zu erweitern und Geometrielemente sowohl an Halbzeugenden als auch auf deren Mantelfläche anzuformen, die so bis jetzt nur fügetechnisch herstellbar waren (vgl. Bild 10). Neben der möglichen Formenvielfalt können auch die Geometrie- und die Gradierungsübergänge besonders scharfkantig erzeugt werden. Denkbar sind beispielsweise flansch- oder scheibenförmige Geometrielemente für Bauteile aus dem Leichtbau- oder Powertrainbereich, wie beispielsweise Befestigungselemente,

Starterkränze oder Ausgangsformen für die Fertigung von Verzahnungen oder Nutenprofilen [7]. Das Reib-Drücken bietet das Potential und die Technologie die Anforderungen der Bauteile von morgen zu erfüllen und diese wirtschaftlich herzustellen.

Literaturangaben

- [1] Runge M.: *Drücken und Drückwalzen*. Verlag Moderne Industrie AG, Landsberg/Lech, 1993
- [2] Awiszus, B.; Meyer, F.; Meyer, L.W.; Hahn, F.: *Erweiterung der Formgebungsgrenzen durch inkrementelle zyklische Umformung am Beispiel des Drückwalzens (Abstreckdrücken)*. Tagungsband zum Abschlusskolloquium des DFG Schwerpunktprogramms 1074 „Erweiterung der Formgebungsgrenzen bei Umformprozessen“, 3. Mai 2005, Aachen, 2005.
- [3] Filice, L.; Fratini, L.; Micari, F.: *Analysis of Material Formability in Incremental Forming*, *Annals of the CIRP*, 51/1, 199; 2002
- [4] Wehrmeister, T.: *Laserunterstütztes Drücken von Hochleistungswerkstoffen*; in *Schweizer Maschinenmarkt (SMM)* 36-2003; Aachen, 2003
- [5] Homberg, W.; Beerwald, C.; Hornjak, D.: *Manufacturing of graded workpieces with a special incremental forming process*. MFPT2009, TU Dortmund, 2009
- [6] Kunert, J.; Wilk, A., Homberg, W., Hornjak, D.: *A screening experiment for a forming process: randomization of run orders to protect against a possible time trend*; “International Conference on the Interface between Statistics and Engineering”, Peking, 2009
- [7] Homberg, W.; Hornjak, D.; Beerwald, C.: *Reib-Drücken - ein innovativer Ansatz zur Herstellung gradiertter Bauteile*; in *wt Werkstattstechnik online* 10-2009; Düsseldorf, 2009