



## Trockenumformung von 42CrS4 mittels Vollvorwärtsfließpressen durch strukturierte Halbzeugoberflächen und selbstschmierende Werkzeugbeschichtungen

Fritz Klocke<sup>1</sup>, Rafael Hild<sup>\*1</sup>, Daniel Trauth<sup>1</sup>, Kirsten Bobzin<sup>2</sup>, Tobias Brögelmann<sup>2</sup>, Nathan Kruppe<sup>2</sup>, Mostafa Arghavani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL), RWTH Aachen University, Steinbachstr. 19, 52074 Aachen, Germany

<sup>2</sup>Surface Engineering Institute (IOT), RWTH Aachen University, Kackertstr. 15, 52072 Aachen, Germany

### Abstract

Innerhalb der ersten Projektphase des Schwerpunktprogramms (SPP) 1676 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wurden erste Schritte in Richtung eines geeigneten Tribosystems zur trockenen Kaltmassivumformung niedrig legierter Stähle mittels Vollvorwärtsfließpressen (VVFP) erforscht. Am Institut für Oberflächentechnik (IOT) der RWTH Aachen wurde eine selbstschmierende (Cr, Al) N+XS2 (X=Wo, M)-Werkzeugbeschichtung entwickelt, die an das Belastungskollektiv der Kaltmassivumformung ausgelegt wurde. Ein Stift-auf-Zylinder Tribometer mit axialem Vorschub wurde am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen entwickelt, um die Einfluss von strukturierten Halbzeugoberflächen auf die Reibschubspannung und Verschleiß untersuchen zu können. Experimentelle Analysen wurden durch numerische FE-Prozessmodelle zur Untersuchung der Interaktion von beschichteten Werkzeugen und strukturierten Halbzeugoberflächen auf Mikroebene erweitert. Basierend auf diesen Ergebnissen behandelt dieser Beitrag erstmals eine Trockenumformung eines niedriglegierten Stahls (42CrS4) mittels VVFP. Die umgeformten Halbzeuge wurden anhand ihrer Geometrie und der benötigten Umformkraft verglichen. Dadurch wurde die Effektivität und Machbarkeit der Trockenumformung mittels VVFP bewertet. Somit wurde ein weiterer Schritt hin zur Realisierung einer trockenen Kaltmassivumformung unter industriellen Bedingungen von niedriglegierten Stählen vollzogen.

**Keywords:** Trockenumformung, Oberflächenstrukturen, Beschichtungen, (Cr, Al)N, Vollvorwärtsfließpressen

### 1 Einleitung

Kaltmassivumformprozesse zeichnen sich durch ein hohes Maß an Werkstoffausnutzung, hoher Produktqualität und kurzen Produktionszyklen aus. Kaltmassivumformprozesse sind hoch reproduzierbar und eignen sich für die Massenproduktion [1]. Um eine Kaltmassivumformung zu realisieren zu können, müssen Schmierstoffe eingesetzt werden [2]. Schmierstoffe reduzieren mechanische Prozesslasten und verhindern einen Werkstück-Werkzeug-Kontakt, somit auch Verschleiß [3].

Eine Kaltmassivumformung ohne Schmiermittel könnte aber die übergeordnete Prozessproduktivität aufgrund wegfallender Arbeitsschritte, wie das Aufbringen und Entfernen von Schmiermitteln, erhöhen, wenn es gelingen würde, das resultierende und erhöhte Belastungskollektiv einer Trockenumformung auf Werkzeug und

Halbzeug zu verteilen [4]. Durch den Wegfall eines Schmierstoffs steigen vor allem die mechanischen Prozesslasten erheblich an und führen zum frühzeitigen adhänsiven oder abrasiven Versagen [5].

Im Bereich der Blechumformung wurde eine Trockenumformung bereits von Murakawa et al. mittels DLC-Beschichtungen auf Tiefziehwerkzeugen nachgewiesen [6]. Murakawa et al. erweiterten ihre eigene Forschung durch eine tribologische Überprüfung von verschiedenen Beschichtungen und zeigten dabei, dass siliziumfreie Beschichtungen am effektivsten für die trockene Blechumformung von Aluminium A1100 sind [7]. Osakada et al. untersuchte den Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Reibungskoeffizienten, ebenfalls in der trockenen Blechumformung und bestätigten, dass eine größere Rauheit zu einem größeren Reibkoeffizienten

führt [8]. Kataoka et al. führte Untersuchungen zu keramischen Blechumformwerkzeugen in Kombination mit dem kaltgewalzten Stahl DC01 durch und erzielte vergleichbare Tiefziehverhältnisse wie bei der geschmierten Blechumformung [9]. Tamaoki et al. entwickelten elektrisch leitfähige keramische Blechumformwerkzeuge für das Tiefziehen [10] und erreichte damit auch vergleichbare Tiefziehverhältnisse wie es unter der Verwendung von Schmierstoffen möglich ist [11].

Durch etwa 3,7-fach höhere Kontaktnormalspannungen, 2,1-fach höhere Relativgeschwindigkeiten, 6,4-fach höhere Umformtemperaturen und 7,5-fach höhere Oberflächenausdehnungen [1] ist eine Übertragung von der Blech- auf die Kaltmassivumformung nicht direkt möglich [12]. Ziel dieses Beitrags ist daher die Erforschung eines Tribosystems, welches den erhöhten Randbedingungen der trockenen Kaltmassivumformung standhalten kann, siehe Abbildung 1 [13]. Dies soll einerseits durch eine selbstschmierende Werkzeugbeschichtung und andererseits durch strukturierte Halbzeugoberflächen mittels Kugelstrahlen und Rändeln erreicht werden. In diesem Beitrag werden aufbauend auf ehemaligen Experimenten und numerischen FE-Untersuchungen die gewonnenen Ergebnisse auf einen industriellen Vollvorwärtsfließpressprozess überführt und die resultierenden Ergebnisse untereinander verglichen.

Der Beitrag demonstriert, wie eine trockene Kaltmassivumformung unter Verwendung von strukturierten Halbzeugoberflächen und selbstschmierenden Werkzeugbeschichtungen am Beispiel eines Vollvorwärtsfließpressprozesses realisiert werden kann. In Kapitel 2 werden die hierfür notwendigen Vorarbeiten dargestellt. In Kapitel 3 wird der Versuchsaufbau für den Vollvorwärtsfließpressprozess beschrieben und deren Komponenten aufgezeigt. In Kapitel 4 wird die Auswertung des Vollvorwärtsfließpressprozesses detailliert dargestellt und diskutiert. Abschließend werden in Kapitel 5 Schlussfolgerungen der Untersuchungen aufgeführt und ein Ausblick auf weitere Arbeiten gegeben.

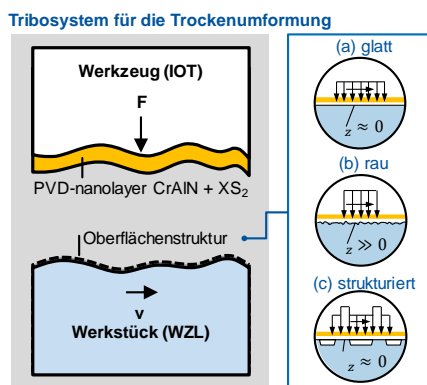


Abbildung 1: Abbildung des untersuchten Tribosystems zur Realisierung einer Trockenumformung mit der Oberflächenstrukturierung als Schwerpunkt des WZL

## 2 Vorarbeiten

In der ersten Forschungsphase des SPP1676 wurden originäre Ansätze zur Realisierung der trockenen Kaltmassivumformung unter zeitlich und örtlich **unabhängigen** tribologische Randbedingungen, d. h. konstante

Kontaktnormalspannung, Relativgeschwindigkeit und Kontakttemperatur, untersucht. In diesem Abschnitt wird zunächst das entwickelte Stift-auf-Zylinder-Tribometers vorgestellt, mit welchem der Einfluss von strukturierten Halbzeugoberflächen auf die Reibschubspannungen analysiert wurde. Zu diesem Zweck ist es notwendig, einen relativ langen Reibweg zu analysieren und sicherzustellen, dass unbehandelte Halbzeugoberflächen mit dem Stift entlang des Reibweges in Kontakt stehen. Die experimentellen Ergebnisse wurden durch die Entwicklung eines numerischen FE-Modells unterstützt, um die Einebnungseffekte der Oberflächenstruktur zu analysieren und kritische Prozessparameter zu identifizieren. Diese Ergebnisse wurden mit experimentellen Ergebnissen korreliert.

### 2.1 Entwicklung des Stift-auf-Zylinder-Tribometers

Für eine experimentelle Untersuchung des Einflusses der strukturierten Halbzeugoberflächen auf die Reibschubspannung können herkömmliche Tribometer, wie ein Stift-auf-Scheibe-Tribometer, nicht verwendet werden, da die Oberflächenstrukturen nach der ersten Umdrehung einglättet sind und somit eine kontinuierliche Untersuchung nicht möglich ist. Um Oberflächenstrukturen kontinuierlich zu analysieren, muss der Ausgangszustand der Oberfläche bei jeder Umdrehung analysiert werden. Um dies zu gewährleisten, wurde ein Stift-auf-Zylinder (SAZ)-Tribometer auf einer Drehmaschine realisiert, siehe Abbildung 2 [13]. Die Untersuchungen zeigten die Einflüsse von strukturierten Halbzeugoberflächen auf die Reibschubspannung auf. Rändeln ist innerhalb der Untersuchung das effektivste Oberflächenstrukturierungsverfahren, weil es zu den niedrigsten Reibschubspannungen geführt hat.

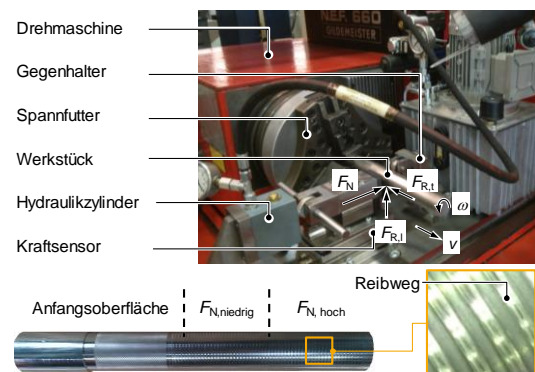


Abbildung 2: Aufbau des Stift-auf-Zylinder Tribometers

### 2.2 Entwicklung eines numerischen FE-Modells zur Analyse der Einglättung von strukturierten Halbzeugoberflächen

Die experimentelle Analyse von Oberflächenstrukturen ist zeit- und kostenintensiver als eine numerische Analyse. Darüber hinaus sind in Experimenten Parameter, wie Spannungen oder Dehnungen, schwer zu messen. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurde ein numerisches FE-Modell entwickelt, um verschiedene Oberflächenstrukturen hinsichtlich Einebnung und Kontaktnormalspannung zu analysieren [13]. Das FE-Modell basiert auf stochastisch kugelgestrahlten Oberflächenstrukturen, die durch eine definierte synthetische Geometrie angenähert wurden.

Die FE-Simulationsdaten wurden mit den Tribometerexperimenten validiert [14]. Die validierte FE-Simulation ermöglichte dann die Analyse unterschiedlicher Oberflächenstrukturen bzw. eine optimierte Oberflächenstruktur zur Reduzierung der Reibschubspannung. Das Ergebnis der Untersuchungen war die Determinierung der optimalen Oberflächenstruktur zur Reduktion der Kontaktnormalspannung und der Reibschubspannung.

### 3 Versuchsaufbau für das VVFP

Kapitel 3 beschreibt sowohl die Strukturierung der VVFP-Halbzeuge als auch die Charakterisierung der strukturierten Halbzeugoberflächen anhand von Rauheits- und Härtemessungen. Als Werkstoffmaterial wurde der gehärtete Vergütungsstahl 42CrS4 (DIN: 1.7035, AISI: 5140) verwendet. 42CrS4 wird für hochbelastete Teile in der Automobil- oder Flugzeugindustrie verwendet, z. B. Zahnräder, Spindeln und Kolbenstangen [14]. Aus diesem Grund ist der Werkstoff für die Umformindustrie von hoher Bedeutung. Als Werkzeugwerkstoff wurde der Kaltarbeitsstahl X155CrMoV12 (DIN: 1.2379, AISI D2) für das Reduktionswerkzeug und den Stempel sowie der Hartmetallwerkstoff G52 für die Stempel und das Reduktionswerkzeug verwendet. Beide Werkstoffe werden in der Kaltmassivumformung für VVFP-Werkzeuge verwendet [14]. X155CrMoV12 wurde auf 62 HRC gehärtet und die Werkzeugoberflächen nach Industriestandard poliert ( $R_z = 1$ ).

Das VVFP-Werkzeug ist in einen Stempel und drei verschiedene Matrizenanteile aufgebaut, vgl. Abbildung 3.

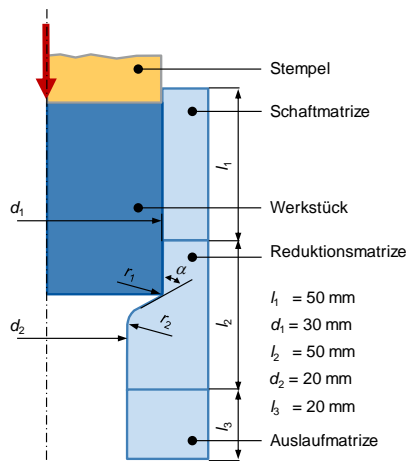


Abbildung 3: Aufbau und Maße des Vollvorwärtsfließpresswerkzeugs

Der Stempel hat eine Länge von  $l_s = 120 \text{ mm}$  und einen Durchmesser von  $d_s = 30 \text{ mm}$ . Die Schaftmatrize dient als Führung für das Halbzeug und hat einen Durchmesser von  $d_1 = 30 \text{ mm}$  und eine Länge von  $l_1 = 50 \text{ mm}$ . Die Reduktionsmatrize hat eine Gesamtlänge von  $l_2 = 50 \text{ mm}$ . Der obere Teil der Reduktionsschulter hat eine Länge von  $20 \text{ mm}$ . Der Reduktionswinkel beträgt  $\alpha = 45^\circ$  und beginnt mit einem Radius von  $r_1 = 5 \text{ mm}$ . Der untere Teil der Reduktionsmatrize hat eine Länge von  $30 \text{ mm}$ , gefolgt von einer  $l_2 = 20 \text{ mm}$  langen Auslaufmatrize. Das Halbzeug hat eine Anfangslänge von  $d_H = 60 \text{ mm}$  und einen Durchmesser von  $d_H = 29,8 \text{ mm}$ .

Die Stempelkraft, die Oberflächenrauheit und die Härte der Halbzeuge wurden zu Charakterisierungszwecke analysiert. Aufgrund der Werkzeuggeometrie und der daraus resultierenden Werkzeugbereiche wurde die Oberflächenrauheit und die Härte der gepressten Halbzeuge an vier verschiedenen Punkten analysiert, siehe Abbildung 4. Die Aufteilung ergibt sich aufgrund von sichtbaren Linien, an denen die Halbzeuge in Kontakt mit den verschiedenen Werkzeuelelementen stehen. An diesen spezifischen Punkten wurden 16 Härtemessungen entlang des Umfangs durchgeführt.

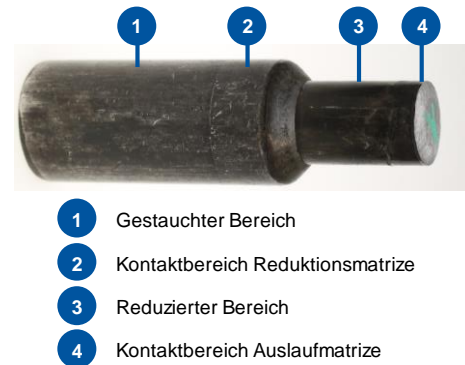


Abbildung 4: Untersuchte Halbzeugbereiche

Die Oberflächenhärte wurde mittels Vickers-Härte nach DIN EN ISO 6507 und ASTM E384 unter Verwendung eines Wilson Universalhärteprüfgerätes UH 250 quantifiziert. 16 Messungen mit einer Testbelastung von  $30 \text{ N}$  wurden auf polierten Querschnitten jedes Halbzeugs durchgeführt. Die 16 Messungen wurden anschließend gemittelt.

Die Oberflächenrauheit wurde unter Verwendung eines kombinierten Rauheits- und Konturmesssystems Hommel Etamic nanoscan 855 der Jenoptik AG, Deutschland, gemessen. Nach den Vorarbeiten wurden die Oberflächenparameter  $S_a$  und  $S_z$  auf Basis der Norm DIN ISO 25178 und EUR 15178N in einem Messraster von  $5 \times 5 \text{ mm}$  ausgewertet. Es wurde eine Kontaktspitze mit einem Spitzenwinkel von  $60^\circ$  und einem Spitzenradius von  $2 \mu\text{m}$  verwendet.  $S_a$  beschreibt die gemittelte Rauheit einer Oberfläche,  $S_z$  ihre maximale Höhe.

Für die Versuche wurde eine Hydraulikpresse von Sack & Kiesselbach verwendet, die eine maximale Kraft von  $F_{\text{max}} = 4.000 \text{ kN}$  aufweist. Es wurde eine konstante Stempelgeschwindigkeit von  $v_s = 4 \text{ mm/s}$  gewählt. Die Kraftmessung erfolgte analog mit einem integrierten Maschinenmesssystem.

### 4 Ergebnisauswertung und Diskussion

Das Referenzhalbzeug stellt den Anfangszustand des Werkstücks vor dem Vollvorwärtsfließpressen dar, siehe Abbildung 5. Es wurde nach Industriestandards mittels Drahtziehen hergestellt. Der Draht wurde dabei vom Coil abgewickelt, gerichtet und dann geschert. Nach Industriestandard werden Halbzeuge einseitig (oben) angestaucht, um ein Fließpressen zu begünstigen. Das andere Ende besitzt weiterhin eine gescherte Kontur. In Tabelle 1 sind die Halbzeugmerkmale sowohl im Ausgangszustand als auch nach der Formgebung dargestellt.

Referenz (Ref) und gepresste Halbzeuge (1-7)



Abbildung 5: Referenzhalbzeug und gepresste Halbzeuge

Das Referenz-Tribosystem während des Vollvorwärtsfließpressens wird durch den Oberflächenzustand und die Verwendung eines Schmiermittels definiert. Ein gestrahltes und phosphatiertes Werkstück ist die herkömmliche industrielle Behandlung und wird ohne weitere Schmiermittel eingesetzt, siehe Tabelle 1. Das Referenzhalbzeug (Ref) bildet den Anfangszustand. Es wurde kugelgestrahlt und phosphatiert. Es resultierten Rauheiten von  $S_{a, Ref} = 50,9 \mu\text{m}$  und  $S_{z, Ref} = 209 \mu\text{m}$  und eine Härte von 159 HV30. Halbzeug 1 hat eine Rauheit von  $S_{a, 1} = 12,5 \mu\text{m}$  und  $S_{z, 1} = 48,5 \mu\text{m}$  und eine Härte von 292 HV30 nach der Extrusion. Die benötigte Prozesskraft zur Umformung betrug  $F_{N, 1} = 1300 \text{ kN}$ . Diese Ergebnisse stellen den industriellen Standard dar. Der Ausgangszustand des Halbzeugs 2 unterscheidet sich zu Halbzeug 1 durch eine nicht angestauchte obere Scherkannte. Es ergab sich eine Rauheit von  $S_{a, 2} = 12,8 \mu\text{m}$  und  $S_{z, 2} = 36,8 \mu\text{m}$  und eine Härte von 309 HV30 nach der Extrusion. Die benötigte Kraft betrug  $F_{N, 2} = 1400 \text{ kN}$ . Die Ergebnisse zeigen, dass ein Anstauchen der Halbzeuge die Prozesskraft um 100 kN verringert. Die Oberfläche des Halbzeugs 3 wurde vor dem Vollvorwärtsfließpressen zusätzlich geätzt, was aber zu einer um 50 kN höheren benötigten Prozesskraft von führte  $F_{N, 3} = 1450 \text{ kN}$ . An Halbzeug 3 ergab sich eine Rauheit von  $S_{a, 3} = 12,3 \mu\text{m}$  und  $S_{z, 3} = 60,0 \mu\text{m}$ . Die Verwendung des Referenzschmiermittels 1 reduzierte die Prozesskraft

auf  $F_{N, 4} = 1000 \text{ kN}$ . Das Halbzeug hat eine Rauheit von  $S_{a, 4} = 12,8 \mu\text{m}$  und  $S_{z, 4} = 63,1 \mu\text{m}$ . Das Vollvorwärtsfließpressen mit dem Referenzschmiermittel 2 führte zu einer Prozesskraft von  $F_{N, 5} = 1090 \text{ kN}$  und einer Rauheit von  $S_{a, 5} = 12,2 \mu\text{m}$  und  $S_{z, 5} = 57,7 \mu\text{m}$  für Halbzeug 5. Zum Vergleich eines geätzten Halbzeugs mit einem phosphatierten Halbzeug wurde Halbzeug 6 mit einer phosphatierten Oberfläche und dem Referenzschmiermittel 1 fließgepresst. Dabei wurde eine Prozesskraft von  $F_{N, 6} = 1100 \text{ kN}$  benötigt und es ergab sich eine Rauheit  $S_{a, 6} = 41,5 \mu\text{m}$  und  $S_{z, 6} = 170 \mu\text{m}$ . Die höhere Rauheit war das Ergebnis eines Werkzeugschadens. Schließlich wurden die höchsten Kräfte erreicht, indem das abgedrehte Halbzeug 7 ohne die Verwendung von Schmiermitteln gepresst wurde. Nach Abschluss des Vollvorwärtsfließpressens wurden die Halbzeuge zur Entformung aus dem VVFP-Werkzeug ausgedrückt. Während des Ausdrückens erhöhte sich die Reibung zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug weiter, was zu einer Schädigung der Halbzeugoberfläche führte. Nachdem das Halbzeug den unteren Teil des Werkzeuges verlassen hatte, konnte der Werkzeughohlraum das Halbzeug nicht weiter unterstützen. Der fehlende Werkzeugkontakt führte zu einer Schädigung des Zapfens, siehe Abbildung 5 (7).

Alle Halbzeuge zeigten eine starke Verminderung der Rauheit und eine Erhöhung der Härte im extrudierten Teil. Das Halbzeug 3 zeigte die höchste Rauheitsreduktion in Form von 75 %. Die Rauheit und Härte des Halbzeugs 7 konnte aufgrund der Beschädigung im extrudierten Teil nicht gemessen werden.

Zusätzlich wurden zur Analyse der Oberflächen eine optische Untersuchung mittels Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen durchgeführt, siehe Abbildung 6. Die Oberfläche des Referenzhalbzeugs hat augenscheinlich die raueste Oberfläche, neben dem beschädigten Halbzeug 7. Die REM-Aufnahmen zeigen optisch eine ähnliche Entwicklung der Rauheit auf, wie es die Messungen getan haben. Die Halbzeuge 1 und 2 erscheinen nahezu identisch. Das Halbzeug 3 hat eine ebene Oberfläche, die den niedrigsten Rauheiten entspricht. Die Halbzeuge 4, 5 und 6 sind rauer als das Halbzeug 3. Die Rauheitszunahme hängt von der Beschädigung des Werkzeuges ab. Die Beschädigung des Werkzeuges war

Tabelle 1: Charakterisierung der Halbzeuge anhand der Oberflächenstruktur, Rauheit und Härte vor und nach der Umformung, sowie eingestellte Randbedingungen und resultierten Kräfte

Nr.	Material	Oberfläche	Rauheit $S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Rauheit $S_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Härte [HV 30]	Schmierung	Max. Stempelkraft [kN]
Ref.	41CrS4	Gestrahlt und phosphatiert	50,9	209	159	Ohne	x
1	41CrS4	Gestrahlt und phosphatiert	12,5	48,5	292	Ohne	1300
2	41CrS4	Phosphatiert und blanke Scherfläche	12,8	36,8	309	Ohne	1400
3	41CrS4	angeätzt	12,3	60,0	309	Ohne	1450
4	41CrS4	angeätzt	12,8	63,1	314	WISURA 3080	1000
5	41CrS4	angeätzt	12,2	57,7	313	WISURA 3368	1090
6	41CrS4	phosphatiert	41,5	170	317	WISURA 3368	1100
7	41CrS4	Angeätzt, glasgestrahlt und gereinigt	54,5	306	246 (Oberfläche ohne Schädigung)	Ohne	1500

nicht umlaufend, so dass sich die Rauheit geringfügig ändert. Das Halbzeug 7 hat aufgrund der im Prozess vorangeschrittenen Beschädigung des Werkzeuges eine zerklüftete Oberfläche.

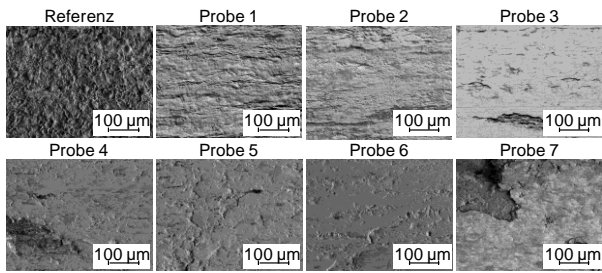


Abbildung 6: REM-Aufnahmen der Halbzeugoebenen nach dem VVFP

Die Härtemessungen aller Halbzeuge wurden entlang des Halbzeugumfangs durchgeführt. Die Positionen I, III und IV, siehe Abbildung 7, hatten kontinuierliche Ergebnisse über den Umfang. An der Stelle II wurde eine Diskontinuität bei allen Halbzeugen gemessen. Das aufgeführte Beispiel ist von Halbzeug 6, siehe Abbildung 5. Die Härteerhöhung ist einseitig. Diese Ergebnisse werden durch das Anstauchen bei der Halbzeugvorbereitung erklärt. Der Scherprozess führt zu einer schrägen Scherkante, die den Druck zu einer Seite anhebt. Dies führt zu einer höheren einseitigen Kaltverfestigung. An der Position I ist die Kontaktnormalspannung nicht so hoch wie an der Position II direkt vor der Reduktion. Position III und IV befinden sich nach der Reduktionsschulter. Die plastische Verformung ist hoch genug, so dass die vorherigen Härteerhöhungen eliminiert wurden.

Härteprüfung über den Radius an der Oberfläche

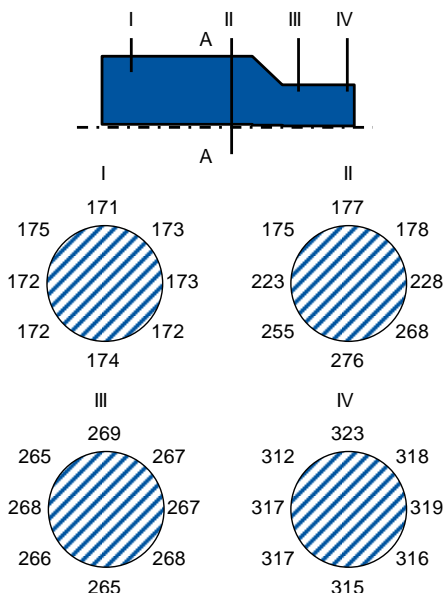


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Härtemessungen und resultierende Ergebnisse

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein weiterer Schritt in Richtung eines trockenen Vollvorwärtsfließpressens vorgestellt. Der Vergleich zwischen Industriestandards, wie der Halbzeugstrukturierung durch Kugelstrahlen mit

Stahl und Phosphatieren mit abgedrehten Halbzeugen, zeigte, dass die Prozesskräfte aufgrund des Fehlens von Schmierstoffen wachen und das VVFP-Werkzeug beschädigen. Das beschädigte Werkzeug führte zu einem weiteren Anstieg der Prozesskräfte und letztlich zu einer Beschädigung des Werkstücks. Dieses Problem wurde beim Auswerfen des Werkstücks am deutlichsten. Da die verwendeten Werkzeuge noch nicht beschichtet und die Halbzeuge noch nicht wissenschaftlich und definiert strukturiert waren, besteht weiterhin ein hohes Potential zur Durchführung einer trockenen Kaltmassivumformung. In weiteren Untersuchungen wird das trockene VVFP mit beschichteten Werkzeugen und strukturierten Halbzeugoebenen durchgeführt. Weitere experimentelle Ergebnisse werden durch numerische FE-Simulationen unterstützt, mithilfe derer die Reibkoeffizienten für verschiedene Reduktionsschultern beim Vollvorwärtsfließpressen ermittelt werden können.

## Danksagung

Die Forschung wurde gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms *Trockenumformen - Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik* (SPP 1676). Die Autoren danken insbesondere der Presswerk Krefeld GmbH für ihre Unterstützung bei der Bereitstellung von Werkzeugen und Werkstücken sowie bei der Durchführung der Versuche.

## Literatur

- [1] N. Bay, A. Azushima, P. Groche, I. Ishibashi, M. Merklein, M. Morishita, T. Nakamura, S. Schmid, M. Yoshida: Environmentally benign tribo-systems for metal forming. In: *Annals of the CIRP* 59/2 (2010) 760-780
- [2] F. Vollertsen, F. Schmidt: Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges. In: *Int. J. Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* 1/1 (2014) 59-62
- [3] Vollertsen, F. and Schmidt, F. (2014). Dry metal forming: Definition, Chances and Challenges. *Int J Precis Eng Man - Green Technology* 1(1):59-62
- [4] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt: A compression-torsion-wear-test achieving contact pressures of up to eight times the initial flow stress of soft aluminium. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (2015) 280-292
- [5] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt, I. Ross, A. Temmler, R. Poprawe, H. Bolvardi, S. Prünte, J. M. Schneider: Investigation of the suitability of surface treatments for dry cold extrusion process-oriented tribological testing. In: *Key Engineering Materials* Vols. 651-653 (2015) 473-479
- [6] M. Murakawa, N. Koga, T. Kumagai: Deep-drawing of aluminum sheets without lubricant by use of diamond-like carbon coated dies. *Surf Coat Tech* 76 (1995) 553-558
- [7] M. Murakawa, S. Takeuchi: Evaluation of tribological properties of DLC films used in sheet forming of aluminum sheet. *Surf Coat Tech* 163 (2003) 561-565.
- [8] K. Osakada R. Matsumoto: Fundamental Study of Dry Metal Forming with Coated Tools. *CIRP Ann. Manuf. Technol* 49/1 (2000) 161-164.
- [9] S. Kataoka, A. Motoi. Improvement in DLC thin film adhesion and its application to dry deep drawing. *J. Jpn. Soc. Technol. Plast* 46/532 (2005) 412-416.
- [10] K. Tamaoki, S. Kataoka: Study of deep drawing using diamond coated tools. *Journal of Material Testing Research Assoc. of Japan* 53/4 (2008) 247-253.
- [11] K. Tamaoki, S. Kataoka, K. Minamoto: Dry deep-drawing with use of electroconductive ceramic tools. *Proc. Int. Conf. Trib. Manuf. Pro* (2007) 175-179.
- [12] Klocke, F., Trauth, D., Schongen F. and Shirobokov, A. (2014). "Analysis of friction between stainless steel sheets and machined

hammer peened structured tool surfaces." *Prod. Eng. Res. Devel.* 8: 263-272.

- [13] Bobzin, K., Brögelmann, T., Bastürk, S., Klocke, F., Mattfeld, P., Trauth, D. (2015). "Development of an insitu Plasma Treatment of X155CrMoV12 for a (Cr,Al)N PVD Tool Coating for Dry Metal Forming in Cold Forging." *Dry Metal Forming Open Access Journal* 1(1): 57-62.
- [14] Bobzin, K., Brögelmann, N.C., Bastürk, S., Klocke, F., Mattfeld, P., Trauth, D. (2015). "Tribological Behavior of (Cr1-xAlx)N/WSy PVD Tool Coatings for the Application in Dry Cold Forging of Steel." *Dry Metal Forming Open Access Journal* (1):152-158.