

Investigation of Alternative Polymer Composite Materials for Forming Applications

Christina Guilleaume*, Ali Mousavi, Alexander Brosius

¹ TU Dresden, Institute of Manufacturing Technology, Chair of Forming and Machining Processes, D-01062 Dresden,

E-Mail: christina.guilleaume@tu-dresden.de

Abstract

In diesem Paper werden Untersuchungen eines Tiefziehwerkzeugs aus Mineralguss vorgestellt. Der Grund für die Verwendung von Mineralguss als alternativen Werkstoff für schnelle Werkzeuge liegt in den relativ geringen Initialkosten zur Herstellung und seiner Eignung für Kleinserien und Prototypenversuche. Ähnliche Konzepte mit Werkzeugen aus Mineralguss haben gezeigt, dass eine entscheidende Grenze in der Tribologie und dem bei diesem Werkstoff großen Oberflächenverschleiß liegt. Daher fokussiert das vorliegende Paper auf die Ergebnisse der Analyse verschiedener Mineralgussmischungen unter Anwendung von Streifenzugbiegeversuchen. Die Reibzahl wurde hierbei berechnet und vergleichend einem Stahlwerkzeug gegenübergestellt.

This paper presents the investigation of polymer concrete drawing tools for deep drawing operations. The goal of using polymer concrete as an alternative material is a rapid tooling process at relatively low initial tools costs that is suitable for small batch production. Similar concepts based on hydraulic concrete and polymer composites have shown that the surface tribology and consequently wear is the main limiting factor. Therefore, this paper focusses on the results of strip draw-bending tests with different polymer concrete mixtures. The friction coefficient is calculated and compared to a steel tool.

Einleitung

Die kostengünstige und schnelle Herstellung von Werkzeugen für die Umformtechnik ist bereits seit längerer Zeit von wiederkehrendem Interesse, da sich auf diese Weise auch Kleinserien oder Prototypen durch Umformverfahren wirtschaftlich fertigen lassen. Durch den Einsatz von kostengünstigen Werkzeugen, die mittels sogenannter Rapid Tooling Verfahren erzeugt werden und die über eine ausreichende - aber stark begrenzte - Standzeit verfügen, erweitert sich der Einsatzbereich von Umformverfahren in großem Maße. Beispielsweise ermöglichen kostengünstige Werkzeuge eine höhere Variantenvielfalt und Individualisierung, sowie eine schnellen und günstigen Prototypen- und Kleinserienbau.

Einer der Nachteile, der derzeit diskutierten alternativen Werkstoffe und Herstellungsverfahren für schnelle Werkzeuge, ist in der Regel eine deutlich erhöhte Reibung zwischen Werkzeug und Bauteil als bei konventionellen Stahl- oder Aluminiumwerkzeugen [1]. Dies führt meist direkt zu höheren Umformkräften, einem erhöhten Werkzeugverschleiß und einer schlechteren Qualität der erzeugten Bauteiloberflächen. Die auftretende Reibung in Umformprozessen wie beispielsweise dem Tiefziehen wird durch geeignete Schmiermittel reduziert, die das Prozessfenster erweitern, Umformkräfte reduzieren und einem vorzeitigen Werkzeugverschleiß entgegen wirken. Der Einsatz von Schmiermitteln ist aber mit wirtschaftlichen Nachteilen und einer Belastung für die Umwelt verbunden und sollte daher im Idealfall reduziert bzw. komplett vermieden werden [2]. Eine weitere Methode, den Einfluss der Reibung in einem Tiefziehprozess auch ohne Schmiermittel deutlich zu verringern haben Brosius und Mousavi entwickelt [3]. Hier kommen makrostrukturierte Tiefziehwerkzeuge zum Einsatz, die einen vollständig schmiermittelfreien Tiefziehprozess mit hoher Bauteilqualität ermöglichen. Dieses Konzept wurde in [4] auf ein hybrides Tiefziehwerkzeug aus Mineralguss übertragen und die prinzipielle Machbarkeit nachgewiesen. Im Folgenden werden die weiterführenden Arbeiten zur Untersuchung der Tribologie verschiedener Mineralgussmischungen und deren Eignung für das Tiefziehen von Kleinserien vorgestellt.

Stand der Technik

Bereits seit den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts gibt es immer wieder Bestrebungen durch den Einsatz alternativer Werkstoffe schnell und kostengünstig Umformwerkzeuge herzustellen, die auch für Prototypen oder Kleinserien wirtschaftlich einsetzbar sind [5]. Die Motivation ist für die verschiedenen Ansätze ist meistens eine Kombination von wirtschaftlichen Faktoren wie Fertigungszeiten und -kosten sowie eine angestrebte Erweiterung des Einsatzspektrums. Für den Einsatz in der Automobilindustrie stellen beispielsweise Schwartzentruher et al. [6] Werkzeuge aus wassergebundenem hochdichtem hydraulischen Beton mit einem Gelcoat zur Reduktion der Reibung für die Prototypenherstellung vor, mit denen die Herstellung von über 16.000 Kleinteilen möglich war.

Für die Innenhochdruckumformung entwickelten Kleiner et al. [7] Matrizen aus Ultrahochfestem Beton (UHPC) mit einer Druckfestigkeit von etwa 250 MPa und einem E-Modul von etwa 50 GPa. Bei den Umformversuchen wurde eine gute geometrische Genauigkeit erreicht, jedoch war aufgrund der kritischen tribologischen Eigenschaften die Oberflächenqualität der gefertigten Bauteile eher gering, was sich durch den zusätzlichen Einsatz von Ziehfolien aber verbessern ließ. Ritter [8] untersuchte weiterhin ausführlich den Einsatz von UHPC für diese Anwendung und fokussierte dabei vor allem auf das Deformationsverhalten und die Eigenschaften der Kontaktflächen.

Mit dem Ziel einer verkürzten und schnellen Prozesskette entwickelten Witulski et. al [9] ein hybrides Tiefziehwerkzeug unter Verwendung von durch thermisches Spritzen hergestellten Werkzeugoberflächen. Eine Negativform eines Werkzeugs wird hierbei mittels thermischem Spritzen kopiert und die so entstandene Schale wird in einem zweiten Schritt mit einem geeigneten Werkstoff wie Epoxidharz zur Stabilisierung ausgegossen. Es konnte gezeigt werden, dass mit auf diese Weise hergestellten Werkzeugen basierend auf harten metallischen Schalen auch hochfeste Stähle umgeformt werden können [9].

Ein ähnliches Werkzeugkonzept nutzt auch Kolbe [10] indem hier eine thermische gespritzte metallische Deckschale mit kurzfaserverstärktem Polymer abgestützt wird. Die so erzeugten Werkzeuge ermöglichen das Tiefziehen komplexer Bauteile. Frank [1] untersuchte den Einsatz von Polymer-basierten Werkzeugen und konnte nachweisen, dass bestimmte polymere Oberflächen einen positiven Effekt auf die tribologischen Eigenschaften beim Tiefziehen haben. Den Verschleiß alternativer Matrizenwerkstoffe wie Araldit und Zamak in Tiefziehenanwendungen betrachteten Neubauer et al. [11] und geben generelle Empfehlungen für den Einsatz in Kombination mit bestimmten Blechwerkstoffen.



a) Betonwerkzeug [10] b) IHU Werkzeug [10] c) Mineralgusswerkzeug [4]

Abb. 1: Beispiele für Umformwerkzeuge aus alternativen Werkstoffen

Versuchsdurchführung und geprüfte Werkzeuge

Zur Untersuchung der Reibverhältnisse beim Einsatz der alternativen Werkzeugwerkstoffe auf Polymerbasis wird ein Streifenbiegezugversuch eingesetzt, der die Belastungen am Ziehkantenradius eines Tiefziehwerkzeugs in guter Näherung abbildet. Dabei wird ein Blechstreifen – für die hier vorgestellten Versuche aus dem weichen verzinkten Tiefziehstahl DC04 mit einer Blechdicke von 1 mm – mittels eines Hydraulikzylinders über den Prüfkörper gezogen (Abb. 2 a) und dabei um 90 Grad umgelenkt. Die aufgezeichnete Zugkraft F_Z und resultierende Gegenkraft F_G werden über eine erweiterte Euler-Eytelwein-Formel, die von Fox et al. [12] für die Ermittlung von Reibzahlen aufgestellt wurde, ausgewertet. Die Versuche erfolgten mit dem Ziel der Extremfallbetrachtung für alle Varianten ohne Schmiermitteleinsatz.

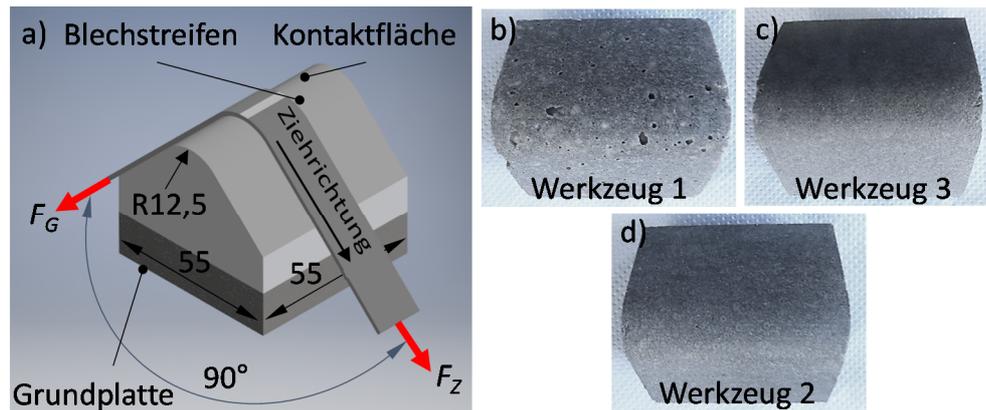


Abb. 2: Versuchsaufbau und Werkzeuge im Ausgangszustand

Insgesamt wurden drei unterschiedliche Werkzeuge aus verschiedenen polymerbasierten Verbundwerkstoffen untersucht, siehe Abb. 2 b. Dabei entspricht Werkzeug 1 dem für das makrostrukturierte Tiefziehwerkzeug [4] verwendeten Mineralgusswerkstoff, Werkzeug 2 wurde mit metallischem Strahlmittel (Ferosad) und Flugasche als Füllstoff gefertigt und Werkzeug 3 zeichnet sich durch einen stark erhöhten Anteil an Flugasche im Mineralguss aus, siehe auch Tab. 1. Die Erhöhung des Anteils der Flugasche hat vornehmlich einen positiven Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften der Gussmassen und führt zu qualitativ besseren Werkzeugoberflächen mit geringer Porenzahl.

Tab. 1: Übersicht der geprüften Werkzeuge

	Füllstoff	Bindemittel	Bindemittelanteil in Gew.-%	Anteil Flugasche in Gew.-%
Werkzeug 1	Mineral	Epoxid	11	4,5
Werkzeug 2	Ferosad	Epoxid	8,5	14
Werkzeug 3	Mineral	Epoxid	20	21

Auswertung und Ergebnisse

Auffällig bei der qualitativen Auswertung der Versuche hinsichtlich des auftretenden Oberflächenverschleißes war der deutliche Unterschied im Verlauf der Oberflächenentwicklung am Ziehradius bei dem metallischen Werkzeug 2 im Vergleich zu den beiden mineralischen Werkzeugen 1 und 3. Das Werkzeug 2 weist schon nach einer sehr kurzen akkumulierten Ziehlänge starke Zerrüttungserscheinungen auf (vgl. Abb. 3 a), was zu einer kritischen Beeinträchtigung der Oberflächenqualität am gezogenen Blechstreifen (vgl. Abb. 3 b) und dem Abbruch der Versuchsreihe führt. Bei den Werkzeugen 1 und 3 hingegen bildet sich eine metallische Schicht aus, die durch Abrieb der Zinkschicht von den Blechstreifen entsteht. Diese Schicht wirkt für die folgenden Versuche schützend für den Grundwerkstoff des Werkzeugs und führt zu einer Verbesserung der tribologischen Eigenschaften, siehe Abb. 3 c.

Offenbar unterscheidet sich der ablaufende Schädigungsmechanismus grundlegend in Abhängigkeit der verwendeten Füllstoffe. Während es bei den metallischen Füllstoffen nach dem Abtrag der zunächst vorhandenen Epoxidschicht zu Anhaftungen gefolgt von Ausrissen und einer starken Zerrüttung kommt, stabilisiert sich die Gleitoberfläche der mineralischen Werkzeuge nach einer sehr kurzen Einlaufphase (vgl. Abb. 4) und behält auch über längere Ziehwege konstante und gute Gleiteigenschaften bei.

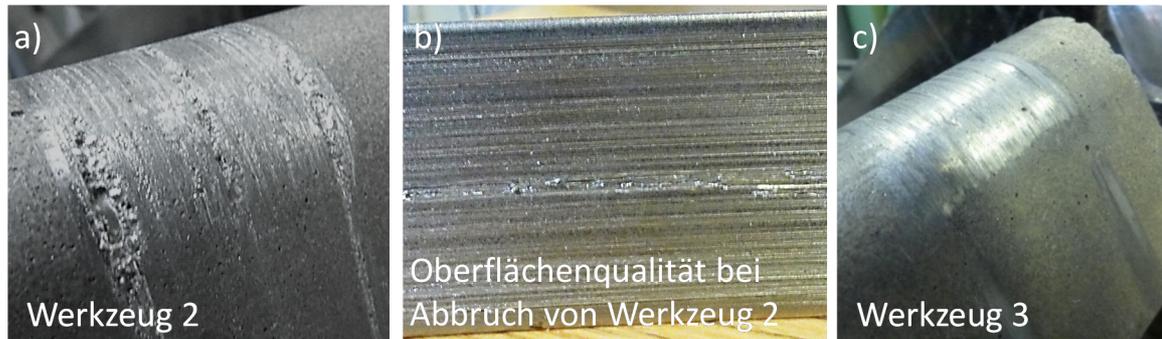


Abb. 3: Werkzeugverschleiß und Oberflächenqualität des Blechs

Diese unterschiedliche Entwicklung der Oberflächen lässt sich auch quantitativ an der Entwicklung der Reibzahl über die Ziehlänge ablesen, siehe Abb. 4. Bei allen Werkzeugen steigt zunächst die Reibzahl an, wobei die Messwerte relativ starken Schwankungen unterliegen. Nach einer gewissen Ziehlänge stabilisiert sich die Reibzahl für die mineralischen Werkzeuge jedoch, während für Werkzeug 2 die Werte weiter ansteigen und die Versuchsreihe aufgrund der Zerrüttung abgebrochen werden musste. Die anfänglich niedrigen Werte für alle Werkzeuge und der ähnlich verlaufende Anstieg der Reibzahl in den ersten Versuchen sind durch die zunächst vorhandene polymere Oberfläche begründet, die für alle Werkzeuge gleichermaßen wirksam ist. Nach einer Ziehlänge von etwa 2-3 m ist diese Schicht dann aber weitgehend abgetragen, sodass der Blechstreifen in direkten Kontakt zu den Füllstoffen kommt. Zu diesem Zeitpunkt werden die bereits beschriebenen unterschiedlichen Schädigungsmechanismen wirksam, und die Reibzahl entwickelt sich entsprechend unterschiedlich.

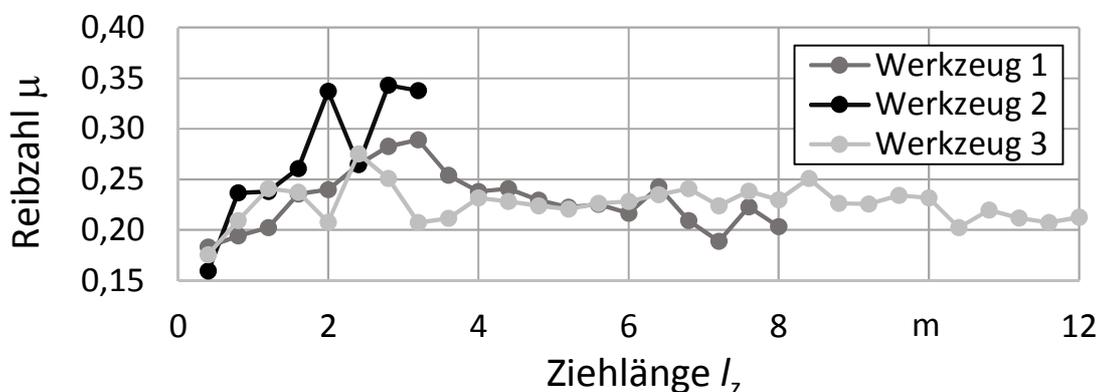


Abb. 4: Entwicklung der Reibzahl über die Ziehlänge

Der Endzustand aller Werkzeuge nach der jeweiligen erreichten Ziehlänge l_z und einer manuellen Entfernung der lösbaren Anteile der aufgetragenen Schicht ist in Abb. 5 dokumentiert. Die breite der Verschleißmarken entspricht der Breite der gezogenen Blechstreifen von 15 mm. Gut erkennbar ist die weiterhin intakte Oberfläche von Werkzeug 3, welches auch nach 12 m Ziehlänge noch nicht das Ende der Standzeit erreicht hat.

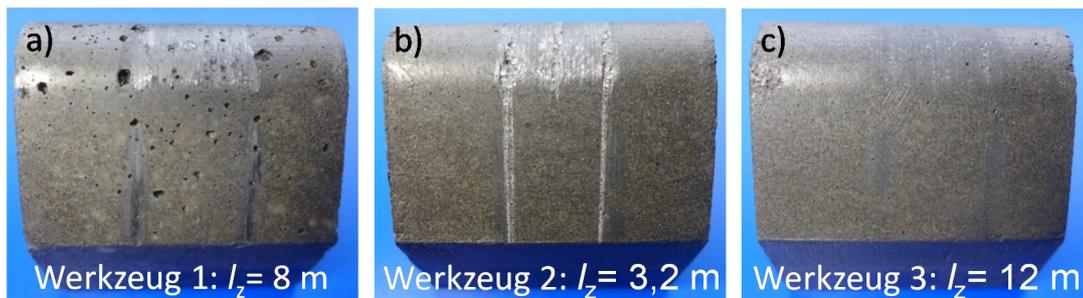


Abb. 5: Endzustand der Werkzeuge nach Reinigung

Frühere Messungen an unstrukturierten Probekörpern aus Stahl unter den gleichen Prüfbedingungen und unter Verwendung desselben Blechwerkstoffs erlauben es, einen Vergleich zu konventionellen Stahlwerkzeugen zu ziehen, siehe Abb. 6. Die Reibzahlen für alle untersuchten Werkzeuge liegen deutlich über dem Ergebnis der Vergleichsmessung von $\mu_{\text{Stahl}} = 0,18$, sind aber für die mineralischen Werkzeuge 1 und 3 noch in einem technisch einsetzbaren Bereich, insbesondere bei Berücksichtigung der ungünstigen tribologischen Bedingung ohne Schmiermittel.

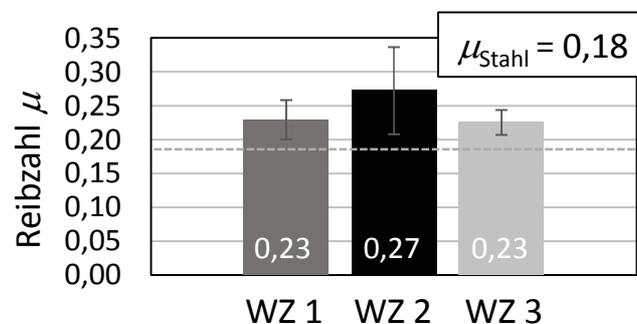


Abb. 6: Vergleich der Reibzahlen

Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Untersuchung der Reibzahl und des Werkzeugverschleißes für die hier vorgestellten alternativen Mineralgusswerkstoffe sind als positiv zu bewerten. Da die Versuche ohne Schmiermittelauftrag erfolgten, ist davon auszugehen, dass eine weitere Verbesserung der tribologischen Eigenschaften und damit der Standzeit sehr leicht erreichbar ist. Weiterführende Untersuchungen sollen zeigen, wann das Standzeitende für die mineralischen Werkzeuge erreicht wird und ob weitere Verbesserungen der Gleiteigenschaften ohne Schmierung beispielsweise durch Zusatz von Grafit in den Werkzeugwerkstoffen erreichbar sind.

Literatur

- [1] C. Frank: Kunststoff als Werkzeugwerkstoff für das Tiefziehen von Feinblechen, Dissertation, Universität Hannover, 1999.
- [2] S. Kataoka, M. Murakawab, T. Aizawac, H. Iked: Tribology of dry deep drawing of various metal sheets with use of ceramics, *Surface and Coatings Technology*, 177-178 (2004), 582-590.
- [3] A. Brosius, A. Mousavi: Lubricant free deep drawing process by macro structured tools, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65 (2016), 253-256.
- [4] C. Guillaume, A. Mousavi, A. Brosius: Hybrid deep drawing tool for lubricant free deep drawing, *Esaform 2017 Dublin*, In: *AIP Conference Proceedings* 1896, 140003 (2017).
- [5] W. Kurth: Wirtschaftliche Kaltumformung von dünnen Blechen in kleinen Serien, in *Fertigungstechnik*, 6 (2) (1956), 64.
- [6] A. Schwartzentruber, J.-P. Bournazel, J.-N. Gacel: Hydraulic concrete as a deep drawing tool of sheet steel, in *Cement and Concrete Research* 29 (1999), 267-271.
- [7] M. Kleiner, M. Curbach, A. E. Tekkaya, R. Ritter, K. Speck, M. Trompeter: Development of ultra high performance concrete dies for sheet metal hydroforming, in *Production Engineering Research and Development*, 2 (2) (2008), 201-208.
- [8] R. Ritter: Verformungsverhalten und Grenzflächen von Ultrahochleistungs-beton unter mehraxialer Beanspruchung, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2014.
- [9] J. Witulski, M. Trompeter, A. E. Tekkaya, M. Kleiner: High wear resistant deep drawing tools made of coated polymers, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60 (2011), 311-314.
- [10] J. Kolbe: Thermisch beschichtete, faserverstärkte Polymerwerkzeuge für die Umformung höherfester Blechwerkstoffe, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2012.
- [11] A. Neubauer, P. J. Bolt, P. J. C. M. Rozier: Untersuchungen zum Verschleißverhalten alternativer Matrizenwerkstoffe beim Tiefziehen, in *Bänder Bleche Rohre*, 5 (1997), 34-40.
- [12] R. T. Fox, A. M. Maniatty, D. Lee: Determination of friction coefficient for sheet materials under stretch-forming conditions, in *Metallurgical Transactions A*, 20 (1989), 2179-2182.