



Einfluss des Handpolierens von Probenkörpern auf Gestaltabweichungen erster Ordnung und das Verschleißverhalten in Tribometerversuchen

Marco Teller^{*1}, Gerhard Hirt¹, Ingo Roß², Moritz Küpper³, André Temmler³, Reinhart Poprawe^{2,3} und Stephan Prünfte⁴

¹Institut für Bildsame Formgebung (IBF), RWTH Aachen University, Intzestr. 10, 52056 Aachen, Deutschland

²Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Deutschland

³Lehrstuhl für Lasertechnik (LLT), RWTH Aachen University, Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Deutschland

⁴Lehrstuhl für Werkstoffchemie (MCh), RWTH Aachen University, Kopernikusstr. 10, 52074 Aachen, Deutschland

Abstract

Tribometerversuche werden zur Untersuchung von tribologischen Eigenschaften verschiedener neuartiger Oberflächen eingesetzt. Häufig werden handpolierte Referenzflächen getestet, da diese eine geringe Welligkeit (Gestaltabweichung 2. Ordnung) und Rauheit (Gestaltabweichungen 3. und 4. Ordnung) aufweisen. Bei der Bearbeitung kleiner Probenkörper besteht allerdings die Gefahr, durch Handpolieren auch Formabweichungen (Gestaltabweichung 1. Ordnung), zum Beispiel eine schiefe Kontaktebene, zu erzeugen. Inwieweit eine Vergleichbarkeit mit weiteren tribologischen Untersuchungen dadurch noch gegeben ist, ist unklar. In diesem Manuskript werden daher Stahlprobenkörper für ein Druck-Torsions-Tribometer handpoliert, die Oberflächengestalt vermessen und anschließend Triboveruche gegen Reinaluminium durchgeführt. Im Folgenden wird gezeigt, dass eine Verkippung der Kontaktfläche auch die tribologischen Messgrößen, wie die Anhaftungen am Probenkörper und den Verlauf des übertragenen Drehmoments, beeinflussen kann. Hingegen ist der Einfluss einer Abrundung des Probenkörpers durch Handpolieren auf die genannten Größen gering.

Keywords: Handpolieren, Gestaltabweichung 1. Ordnung, Tribometer, Verschleiß, Adhäsion

1 Einleitung

In der Umformtechnik beeinflusst die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück maßgeblich den Materialfluss [1]. Darüber hinaus sind die in Kontakt befindlichen Werkzeugbereiche einem stetigen Verschleiß unterworfen. Geringere Reibung bzw. ein optimierter Reibzustand und die Minimierung von Verschleiß motivieren die tribologische Erforschung neuartiger Oberflächenmodifikationen. Hierzu werden vor dem Einsatz im Produktionsprozess, verschiedene Vorversuche im Labormaßstab durchgeführt [2].

Zur Erforschung des trockenen Fließpressens von Aluminium wird beispielsweise ein Druck-Torsions-Tribometer genutzt, um die Lastbedingungen des Fertigungsprozesses nachzubilden und die neuartigen Oberflächenmodifikationen auf einer vergleichsweise einfachen Probenkörpergeometrie testen zu können [3]. Die unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen setzen sich häufig aus Bearbeitungsschritten zur Einstellung

der Oberflächenrauheit und Beschichtungs- bzw. Funktionalisierungsschritten zusammen [4].

Insbesondere das Verhalten nahezu idealglatter Oberflächen, welche beispielsweise durch Handpolieren erzeugt werden können, wird oft als Referenz herangezogen, da bereits kleinste lokale Inhomogenitäten der Oberfläche zu veränderten Kontaktbedingungen führen [5,6]. Zur abschließenden Analyse des tribologischen Verhaltens einer Oberflächenmodifikation muss jedoch der Einfluss von Unsicherheiten in der Probenherstellung bekannt und kontrollierbar sein. Handpolierte Oberflächen können nur dann als Referenz herangezogen werden, wenn ausschließlich dieselben Ordnungsgrade der Gestaltabweichung modifiziert wurden, wie in der zu vergleichenden Oberflächenmodifikation.

Zur qualitativen Bewertung des Einflusses des Handpolierens von Tribometerproben wird in diesem Manuskript die Gestaltabweichung erster Ordnung (Formabweichung) analysiert und anschließend mit dem Verschleißbild der Probenkörper korreliert.

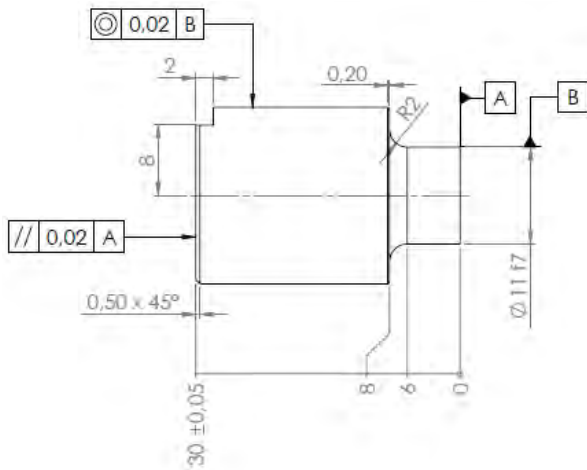


Abb. 1: Sollgeometrie des Probenkörpers aus Stahl

2 Herstellung der Probenkörper

Die Probenkörper wurden zunächst entsprechend der technischen Zeichnung aus Abb. 1 hergestellt. Insbesondere der Parallelität der beiden Stirnflächen kommt bei einer rotierenden Prüfung gegen einen Gegenkörper eine hohe Bedeutung zu. Dadurch können ein gleichmäßiges Eingreifen des Probenkörpers und somit homogene Bedingungen entlang des Kontaktfugenradius gewährleistet werden.

Nach der Fertigung des Rohlings wird zunächst eine Wärmebehandlung durchgeführt und anschließend mittels CNC-Flachschleifen eine Ausgangsrauheit von $R_a = 0,20 \pm 0,02 \mu\text{m}$ auf der Stirnfläche eingestellt. Auf diese Vorbereitung folgt die dreistufige manuelle Politur der Stirnfläche. Die ersten beiden Polierstufen erfolgen im Nassschleifverfahren mit Schleifpapier der Körnung 800 und 1200. Die dritte Polierstufe erfolgt mit einer Diamantsuspension mit einer Korngröße von $1 \mu\text{m}$.

Das Handpolieren ermöglicht die Herstellung von Oberflächen mit geringer Welligkeit und einer Minimierung der Rauheit hinsichtlich Rillen und Riefen. Gestaltabweichungen zweiter bis vierter Ordnung werden hiermit effektiv verringert. Allerdings kann es bei der manuellen Bearbeitung und insbesondere bei kleinen Werkstückdimensionen zu einem ungleichförmigen Aufpressen und somit zu Formabweichungen kommen. Die Stirnflächen sind dann nicht mehr parallel zueinander. Um diesen Effekt zu vermindern werden jeweils fünf Probenkörper in eine Halteapparatur mit Passbohrungen eingespannt und gemeinsam bearbeitet.

Bei der Analyse der erzeugten Probenkörper mittels Weißlichtinterferometrie (WLI) wurden zwei wesentliche Ausprägungen der Formabweichung identifiziert, welche in Abb. 2 dargestellt sind: Die Verkippung sowie die Verrundung der Stirnfläche. Die Verkippung entsteht durch das nicht-senkrechte Anpressen des Probenkörpers während des Polierens. Die Steigung der verkipperten Ebene kann über das Verhältnis der Höhenabweichung h der verkipperten Ebene zum Solldurchmesser d bemessen werden.

Die Verrundung des Probenkörpers ist einerseits auf das elastische Anschmiegen des Poliermediums an der Stirnfläche sowie andererseits auf eine wechselnde

Verkippungsrichtung während des Polierens zurückzuführen. Die Probenkörper weisen somit ein erhöhtes Zentrum der Stirnfläche auf, welches zu den Rändern hin abfällt. Die Ausprägung der Abrundung kann durch die, ebenfalls in Abb. 2 dargestellten, angenäherten Krümmungsradien der Hauptachsen R_1 und R_2 bzw. durch das Verhältnis dieser zueinander beschrieben werden.

Im Folgenden werden die Steigung der verkipperten Ebene sowie das Verhältnis der Krümmungsradien R_1/R_2 betrachtet, da diese bei einer rotierenden Prüfung zu Walkbewegungen und somit zu heterogenen Bedingungen entlang der Kontaktfuge führen. Im Vergleich hierzu wird der Einfluss der Absolutwerte der Krümmungsradien auf die Kontaktfuge von den Autoren als gering eingestuft.

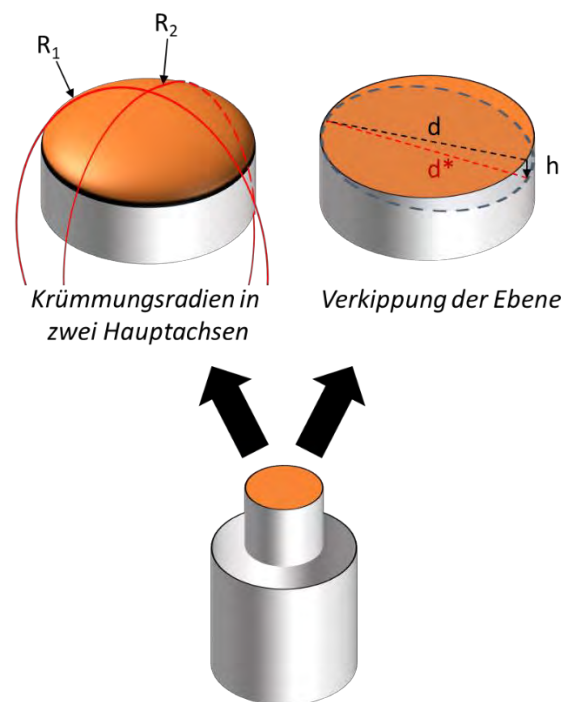


Abb. 2: Typische Formabweichungen durch Handpolieren kleiner Probenkörper. R_1 , R_2 : Krümmungsradien der Hauptachsen, d : Solldurchmesser, d^* : maximaler Durchmesser der verkipperten Ebene, h : Höhe der verkipperten Ebene

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der WLI-Messungen für acht Probenkörper zusammen. Für das Verhältnis der Krümmungsradien und die Steigung der verkipperten Ebene wurde ein Grenzwert von zwei festgelegt. Verhältnisse größer als dieser Grenzwert werden als große Gestaltabweichung definiert und sind in Tab. 1 rot markiert. Es ergeben sich insgesamt vier Probenpaare mit ähnlichen Formabweichungen. Die Proben A und B zeigen keine signifikante Abweichung von der Sollgeometrie. Hingegen sind die Proben C und D durch eine Abrundung der Kontaktfläche gekennzeichnet. Eine Verkippung der Ebene ohne Abrundung ist für die Proben E und F festzustellen. Die Proben G und H sind sowohl abgerundet, als auch in der Kontaktebene verkippert. Hierfür sind somit die größten Abweichungen von der Sollgeometrie festzustellen. Alle Proben weisen eine Rauheit von $R_a = 9 \pm 4 \text{ nm}$ auf.

Tab. 1: Verhältnis der Krümmungsradien der Hauptachsen R_1/R_2 und Steigung der verkippten Ebene h/d für unterschiedliche Probenkörper

Probe	R_1/R_2 [-]	h/d [$\mu\text{m} / \text{mm}$]
A	1,65	0,97
B	1,43	0,6
C	7,94	0,39
D	3,31	1,17
E	1,45	2,81
F	1,49	4,48
G	9,7	3,7
H	8,23	4,46
Kleine Abweichung		
Große Abweichung		

3 Ergebnisse

Die hergestellten Stahlprobenkörper wurden gegen Reinaluminium im Druck-Torsions-Tribometer getestet. Die Normalspannung wurde auf das Dreifache der Anfangsfließspannung des verwendeten Reinaluminiums eingestellt und es wurden zwei Umdrehungen unter Vollast mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 1/s durchgeführt [3].

Abbildung 3 zeigt Fotos der Kontaktflächen der Stahl- und der Aluminiumprobenkörper nach dem Versuch. Es ist zu erkennen, dass die Proben ohne Verkipfung der Kontaktfläche (A bis D) eine gleichmäßige Anhaftung auf dem Stahlprobenkörper zeigen. Die Aluminiumprobenkörper sind gleichmäßig verschlissen, wobei an verschiedenen Radien lokale Furchungen, vermutlich durch einzelne Anhaftungen auf dem Stahlprobenkörper verursacht, auftreten. Insgesamt sprechen die Ergebnisse für homogene Bedingungen entlang des Kontaktfugenradius. Die für die Proben C und D vorliegende Abrundung der Probenkörper hat scheinbar keinen Einfluss auf das Verschleißverhalten.

Die ebenfalls in Abb. 3 dargestellten Probenkörper E bis H weisen ein anderes Verschleißbild auf. Die Stahlprobenkörper zeigen lokale Anhaftungen, welche nicht gleichmäßig entlang eines Radius verteilt auftreten. Auf den zugehörigen Aluminiumprobenkörpern sind lokale Ausbrüche zu identifizieren. Die optische Bewertung deutet an, dass für die Probenpaare E bis H heterogene Bedingungen entlang des Kontaktfugenradius vorherrschen. Der Einfluss der verkippten Kontaktebene scheint hier zu dominieren.

Abbildung 4 stellt die Drehmomentkurven der Proben A (repräsentativ für die Proben B, C, D) und H (repräsentativ für die Proben E, F, G) dar. Die Probe A zeigt nach Erreichen der Vollast (nach ca. 2 s) ein nahezu konstantes Drehmoment. Hingegen weist Probe H periodische Schwankungen in der Drehmomentkurve auf. Die Frequenz entspricht in etwa der getesteten Umdrehungsgeschwindigkeit von 1/s. Der unterschiedliche Verlauf der Kurven spricht ebenfalls für heterogene Bedingungen entlang des Kontaktfugenradius bei einer vorliegenden Verkipfung der Kontaktebene.

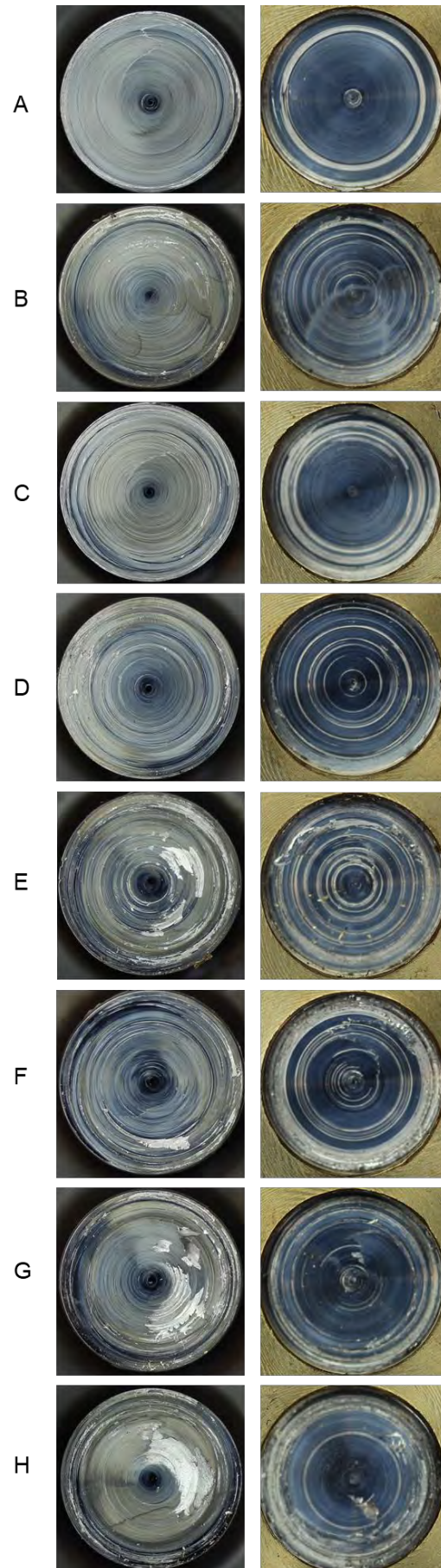


Abb. 3: Oberflächen der Stahlprobenkörper (links) und der Aluminiumprobenkörper (rechts) nach den Versuchen im Druck-Torsions-Tribometer

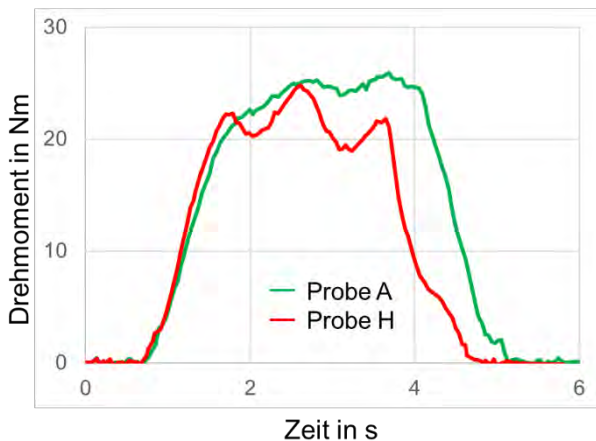


Abb. 4: Drehmomentkurven für die Proben A und H – durch die Verkipfung der Ebene der Probe H kommt es zu einem an- und abschwellen des Drehmoments

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Handpolieren kann genutzt werden um effektiv Welligkeit und Rauheit von Oberflächen zu reduzieren und Gestaltabweichungen zweiter bis vierter Ordnung zu korrigieren. Insbesondere bei kleinen Probenkörperdimensionen kann es zu einem ungleichmäßigen Materialabtrag kommen, welcher letztlich zu einer Gestaltabweichung erster Ordnung führt. Innerhalb dieses Manuskripts wurde der Einfluss des Handpolierens von Tribometerproben auf die Gestaltabweichung und auf das Verschleißbild der jeweiligen Probe im Druck-Torsions-Tribometer Versuch untersucht. Die Ergebnisse deuten an, dass eine Abrundung der Kontaktfläche nur einen geringen Einfluss hat. Hingegen erzeugt eine große Verkipfung der Kontaktebene ein ungleichmäßiges Verschleißbild und eine schwingende Drehmomentkurve. Bei der Erzeugung handpolierter Oberflächen genügt es somit nicht, ausschließlich die erzeugte Rauheit zu benennen, sondern es muss ebenfalls gewährleistet werden, dass keine anderweitigen Abweichungen von der Sollgeometrie aufgetreten sind.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1676: „Trockenumformen – Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik“.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Kopp, H. Wiegels, Einführung in die Umformtechnik, Verlag Mainz, Aachen, 1999.
- [2] P. Groche, B. Kappes, Tribologie der Massivumformung - Modellprüfstände der Tribologie: Kapitel 1, in: W.J. Bartz (Ed.), Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik, Expert Verlag, 2004, pp. 1-14.
- [3] 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, CIRP Annals - Manufacturing Technology 64 (2015) 289-292.
- [4] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt, I. Ross, A. Temmler, R. Poprawe, H. Bolvardi et al., Methodik zur Entwicklung von interaktionsminimierten Oberflächenschichten für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium, Dry Metal Forming Open Access Journal 1 (2015) 34-41.
- [5] J. Heinrichs, M. Olsson, S. Jacobson, New understanding of the initiation of material transfer and transfer layer build-up in metal forming – In situ studies in the SEM, Wear 2012, 292-293, 61-73.
- [6] J. Heinrichs, M. Olsson, S. Jacobson, Initiation of Galling in Metal Forming: Differences Between Aluminium and Austenitic Stainless Steel Studied In Situ in the SEM, Tribol. Lett. 2013, 50 (3), 431-438.