



Untersuchung zur Oberflächenmodifikation mittels Laserpolieren für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium

Ingo Roß*¹, André Temmler², Reinhart Poprawe^{1,2}, Marco Teller³, Gerhard Hirt³ und Stephan Prünke⁴

¹Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Deutschland

²Lehrstuhl für Lasertechnik (LLT), RWTH Aachen University, Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Deutschland

³Institut für Bildsame Formgebung (IBF), RWTH Aachen University, Intzestr. 10, 52056 Aachen, Deutschland

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

Abstract

Der dominierende Verschleißmechanismus beim Kaltumformen von Aluminium ist das Kaltverschweißen des Werkstoffs auf der Werkzeugoberfläche aufgrund hoher Adhäsionsneigung. Zur Verschleißminderung werden typischerweise große Mengen von Schmierstoffen eingesetzt, welche jedoch anschließend entfernt werden müssen und häufig umwelt- und gesundheitsschädigend sind. Für die Trockenumformung, d.h. die Umformung unter Verzicht auf Schmierstoffe, besteht daher sowohl aus ökonomischer als auch als ökologischer Sicht großer Bedarf. In dieser Arbeit werden Untersuchungen zum Einfluss der spektralen Rauheitsverteilung von laserpolierten Probenkörpern aus DIN 1.2343 (X37CrMoV5-1) und DIN 1.2379 (X153CrMoV12) auf die adhäsiven Verschleißigenschaften unter Trockenumformbedingungen bei Kontakt mit Reinaluminium vorgestellt. Durch die Modifikation von Oberflächenstrukturen in unterschiedlicher Ortswellenlängenbereichen mittels Makropolitur mit kontinuierlicher Laserstrahlung und Mikropolitur mit gepulster Laserstrahlung werden Oberflächen mit gezielt eingestellten Verteilungen der spektralen Rauheit erzeugt, welche anschließend mit einem Druck-Torsions-Tribometer geprüft werden. Zur Analyse des adhäsiven Verschleißes werden die Kontaktflächen vor und nach dem Tribometertest optisch vermessen. Die Bewertung der Oberflächenmodifikation erfolgt anhand der spektralen Rauheitsverteilung und der Charakterisierung des adhäsiven Verschleißverhaltens.

Keywords: Laserpolieren, Fließpressen, Verschleiß, Adhäsion, Beschichtung, Tribometer

1 Einleitung

Werkzeuge für das Kaltfließpressen unterliegen großen tribologischen Anforderungen. Aufgrund von Kontaktdrücken von bis zum 6,4-fachen der Ausgangsfließspannung des Werkstoffes [1] bei gleichzeitig auftretender Oberflächenvergrößerung besteht insbesondere bei der Verarbeitung von Aluminiumlegierungen ein großes Risiko für Verschleiß durch Adhäsion. Dieser Umstand lässt die Nutzung von Schmierstoffen zur Reduktion der benötigten Prozesskräfte und zur Verbesserung des Verschleißverhaltens eine Schlüsselrolle zukommen. Angepasst an die Applikation existieren unterschiedliche Schmierungskonzepte mit Schmiermitteln auf Basis von z.B. Ölen, Alkali- oder Zinkseifen [2], welche vor der Weiterverarbeitung der Halbzeuge entfernt werden müssen. Diese zusätzlichen Fertigungsschritte (z.B. Aufbringung des Schmierstoffs und Reinigen des Werkstücks

nach der Umformung) führen zu höheren Fertigungskosten und sind aufgrund der verwendeten Reinigungsmittel in vielen Fällen umwelt- und gesundheitsgefährdend.

Die aktuellen Entwicklungen zielen zunehmend auf den Einsatz von ungefährlicheren Schmiermitteln, um diese Risiken zu verringern [3]. Bestandteil der Forschungsarbeiten im Bereich der Trockenumformung [4] ist eine konsequente Fortführung dieser Bestrebungen und ein kompletter Verzicht auf Schmierstoffe.

In dieser Arbeit werden Untersuchungen zum Einfluss der spektralen Rauheitsverteilung von laserpolierten Probenkörpern aus DIN 1.2343 und DIN 1.2379 auf die adhäsiven Verschleißigenschaften unter Trockenumformbedingungen bei Kontakt mit Reinaluminium vorgestellt. Die Verschleißtests werden auf einem Druck-Torsions-Tribometer durchgeführt. Die Prüfbedingungen sind dem Kaltvorwärtsfließpressen entlehnt. Durch die Modifikation von Oberflächenstrukturen in

unterschiedlichen Ortswellenlängenbereichen mittels Makropolitur mit kontinuierlicher Laserstrahlung und Mikropolitur mit gepulster Laserstrahlung werden Oberflächen mit gezielt eingestellten Verteilungen der spektralen Rauheit erzeugt. Als Referenz werden geschliffene Proben getestet. Zur Analyse des adhäsiven Verschleißes werden die Kontaktflächen vor und nach dem Tribometertest optisch vermessen.

2 Laserpolieren

Ein grundlegender Ansatz zur Verringerung des adhäsiven Verschleißverhaltens ist die gezielte Einstellung der Mikrotopographie der Werkzeugoberfläche durch eine Laserpolitur. Dieses 3D-fähige, automatisierbare Polierverfahren für metallische Werkstoffe beruht auf dem Umschmelzen einer dünnen Randschicht mittels Laserstrahlung [5-7]. Dies führt dazu, dass Rauheiten aufgrund der Grenzflächenspannung an der Schmelzbadoberfläche ausgeglichen werden und das Material mit einer geglätteten Oberfläche erstarrt. Hierbei kann zwischen zwei Verfahrensvarianten unterschieden werden: Makropolieren mit kontinuierlicher (cw) Laserstrahlung (Abb. 1 o.) und Mikropolieren mit gepulster Laserstrahlung (Abb. 1 u.).

Mit Umschmelztiefen von typischerweise 20 – 100 μm eignet sich das Makropolieren z.B. zur Bearbeitung von gefrästen, gedrehten oder erodierten Oberflächen. Bei der Mikropolitur dagegen wird eine Randschicht von weniger als 5 μm umgeschmolzen [8,9]. Das Mikropolieren beeinflusst so die Mikrorauheit und den Glanzgrad während konventionelle Rauheitswerte wie der Mittenrauwert R_a unbeeinflusst bleiben [10]. Um Änderungen der Rauheit durch eine Mikropolitur zu messen, wird die Oberfläche mittels Weißlichtinterferometrie digitalisiert und durch Analyse der spektralen Rauheitsanteile (siehe auch Kapitel 3.3) charakterisiert.

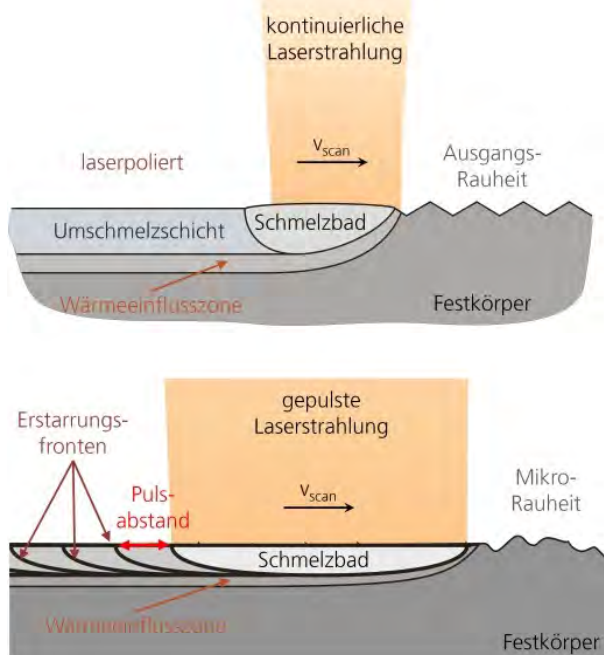


Abb. 1: Schematische Darstellung von Makro- (oben) und Mikropolieren (unten) mittels Laserstrahlung [10]

3 Versuchsaufbau

3.1 Laserpoliermaschine

Die Bearbeitungsversuche werden mit einer am Fraunhofer ILT entwickelten Laserpoliermaschine durchgeführt. Diese nutzt fünf mechanische Achsen (drei linear und zwei rotatorisch) zur Ausrichtung des Werkstücks zur Bearbeitungsoptik sowie ein 3-Achs Galvanometerscanner der Fa. Scanlab zur Ablenkung des fokussierten Laserstrahls auf die Werkstückoberfläche. Der Laserstrahl wird mittels eines F-Theta-Objektivs fokussiert, wobei der Fokusbereich durch ein motorisiertes Zoomteleskop kontinuierlich zwischen 125 – 800 μm angepasst werden kann. Die eingesetzten Strahlquellen sind ein fasergekoppelter Q-Switch Nd:YAG Stabläser „HPQL“ ($\lambda_{\text{em}} = 1064 \text{ nm}$; $P_{\text{L,max}} = 400 \text{ W}$; wahlweise cw oder gepulst mit $t_{\text{Puls}} = 100 - 300 \text{ ns}$) sowie ein ebenfalls fasergekoppelter Q-Switch Yb:YAG Scheibenlaser „TruMikro7050“ ($\lambda_{\text{em}} = 1030 \text{ nm}$; $P_{\text{L,max}} = 500 \text{ W}$; wahlweise cw oder gepulst mit $t_{\text{Puls}} = 1200 - 2200 \text{ ns}$). Zur Verminderung von Oxidation findet die Bearbeitung in einer Prozesskammer mit Schutzgasatmosphäre und kontrolliert geregelt Restsauerstoffgehalt statt.

3.2 Druck-Torsions-Tribometer

Die Experimente zur Verschleißprüfung werden auf einem Druck-Torsions-Tribometer durchgeführt. Eine genaue Beschreibung des Systems wurde in [11,12] veröffentlicht. Bei diesem Versuch wird die Werkzeugprobe (Abb. 2) mit einem pneumatischen Zylinder axial gegen eine rotierende Werkstückprobe aus weichem Reinaluminium (EN AW-1050A) gepresst. Durch eine Kapselung der Werkstückprobe sind die Kontaktdrücke auf ein Vielfaches der Anfangsfließspannung skalierbar. Sowohl das von Werkstück- auf Werkzeugseite übertragene Drehmoment, der Zylinderhub als auch die Axiallast und die Gleitlänge des Versuchs werden gemessen und protokolliert.

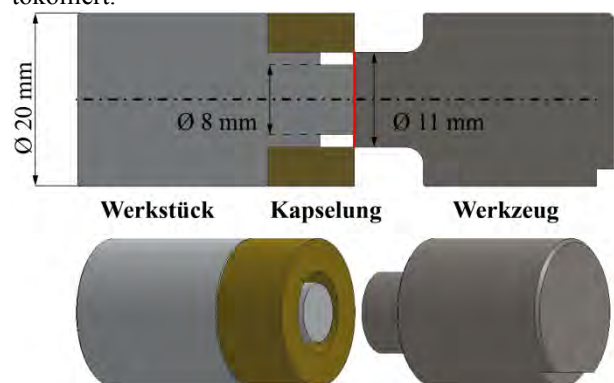


Abb. 2: Probenkörper für das Druck-Torsions-Tribometer in Schnittansicht (mit rot markierter Kontaktzone) und als 3D-Modell [13]

Die tribologischen Experimente wurden mit folgendem Testzyklus und unter den beschriebenen Bedingungen durchgeführt:

- Die Werkstückprobe rotiert mit einer konstanten Geschwindigkeit von 60 U/min.

- Die Werkzeugprobe wird mit einer maximalen Axiallast von 14,5 kN gegen das Werkstück gepresst.
- Die Relativbewegung unter Volllast wird für zwei Umdrehungen aufrechterhalten.
- Die Werkzeugprobe wird entlastet und zurückgezogen.
- Die Rotation der Werkstückprobe stoppt nach der vollständigen Trennung der beiden Probenkörper.

Dadurch ergibt sich eine Gesamtumdrehungszahl von ca. vier Umdrehungen (eine während des Druckaufbaus, zwei bei Volllast und eine während der Entlastung). Der Verlauf von Axialkraft und Umdrehungsanzahl (Auflösung: Eine Achtelumdrehung) ist in Abb. 3 über der Zeit dargestellt.

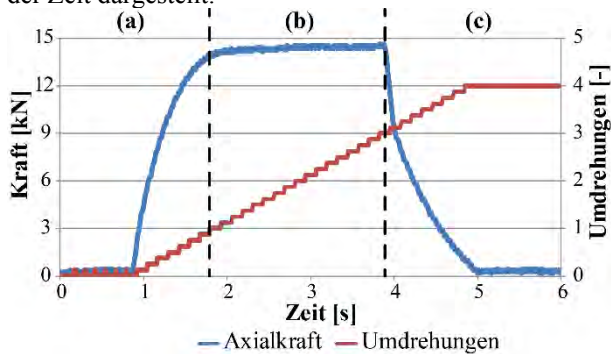


Abb. 3: Testphasen im Druck-Torsions-Tribometer, (a) Einlaufbereich: Kontakt und Druckaufbau zwischen beiden Probenkörpern, (b) Volllastbereich: Zwei Umdrehungen bei voller Last, (c) Auslaufbereich: Druckabbau und Trennung beider Probenkörper

Die lokalen tribologischen Bedingungen in der Kontaktfuge zwischen Werkstück- und Werkzeugprobe sind als variabel über den Probenradius und die Versuchszeit zu erachten. Betroffen sind davon im Wesentlichen die Gleitwege und Gleitgeschwindigkeiten, als auch die Kontaktdrücke und die Oberflächenvergrößerung. Die Gleitgeschwindigkeit wächst linear über den Radius r und lässt sich über $v = 2\pi r n$ (Drehzahl n) bestimmen.

Die Berechnung der lokalen Gleitwege erfolgt über die Messung der Umdrehungsanzahl. Aus der Darstellung der Probenkörper in Abb. 2 ist ersichtlich, dass für die Probenbereiche mit einem Radius größer 4 mm vorerst kein Anstieg des Gleitwegs verzeichnet wird, da zunächst kein Kontakt zum Gegenkörper besteht. Unter Annahme von Volumenkonstanz wird zur Bestimmung der aktuellen Kontaktfläche der gemessene Zylinderhub genutzt und so der Zeitpunkt des ersten Kontakts abgeschätzt.

Die ermittelte aktuelle Kontaktfläche wird zusätzlich zur Bestimmung des globalen Kontaktdrucks genutzt. Für die eingestellte Axiallast von 14,5 kN ergibt sich nach kompletter Umformung der Aluminiumprobe ein Kontaktdruck σ_N von ca. 150 MPa. Dies entspricht für das verwendete Reinaluminium mit einer ermittelten Anfangsfließspannung $k_{f0} = 25$ MPa einem relativen Kontaktdruck σ_N / k_{f0} von sechs und somit in guter Näherung den Bedingungen im Vollvorwärtsfließpressen. Die gemittelte globale Oberflächenvergrößerung A_1 / A_0 liegt bei der genutzten Probengeometrie bei 1,95.

Durch die Umformung des Aluminiums wird die passivierende Oxidschicht durchbrochen und reaktives Aluminium freigelegt. Ein Maß für das Durchbrechen der Oxidschicht ist die Oberflächenvergrößerung. Durch die gewählte Probenkörpergeometrie fließt das Material nach außen. Im Zentrum der Kontaktfläche ist somit grundsätzlich von einer geringeren Oberflächenvergrößerung gegenüber Probenbereichen mit einem größeren Radius auszugehen. Abb. 4 zeigt den Materialfluss in der Wirkfuge der Werkstückprobe. Es ist zu erkennen, dass im Zentrum der Probe (bis ca. $r = 0,5$ mm) noch einzelne, nur gering verformte Körner vorliegen. Mit steigendem Probenradius lässt sich deutlich der rotatorische Materialfluss erkennen.

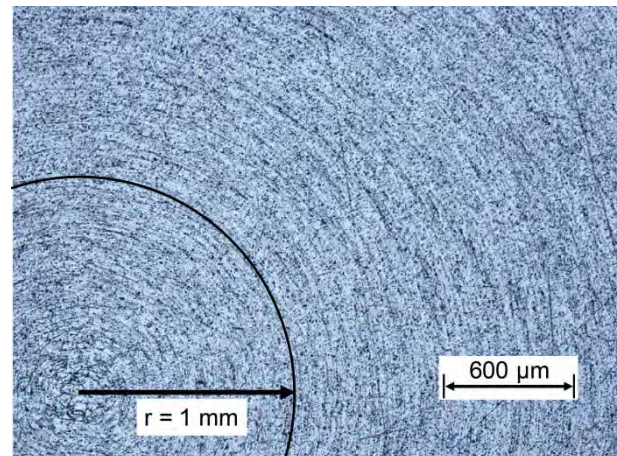


Abb. 4: Schlibbild des ringförmigen Materialflusses in der Kontaktfuge des Aluminiumkörpers. Im Zentrum der Probe sind noch weitgehend unverformte Aluminiumkörner zu erkennen.

Die Verteilung des Kontaktdrucks wird sich, wie im reibungsbehafteten Stauchversuch, von Innen nach Außen verringern [14]. Im Druck-Torsions-Tribometer wird zusätzlich eine rotierende Relativbewegung durchgeführt. Dadurch kommt es über den Radius zusätzlich zu einem variablen Materialfluss in Umfangsrichtung, welcher ebenfalls Einfluss auf den lokalen Kontaktdruck hat. Unklar ist zusätzlich die Wirkung der Kapselung auf den Kontaktdruck. Zur Klärung dieser Fragen sind zusätzlich Simulationen notwendig.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass sich das Risiko für Adhäsionen mit steigendem Probenradius erhöht. Im Wesentlichen sind dafür die steigenden Gleitwege und Gleitgeschwindigkeiten verantwortlich. Zusätzlich ist eine größere Oberflächenvergrößerung und somit ein stärkeres Aufbrechen der Oxidschicht als Einflussfaktor zu nennen.

3.3 Oberflächencharakterisierung

Profil- und Rauheitsparameter wie R_a , R_q , R_z sowie S_a , S_q , S_z werden häufig zur Beurteilung von Oberflächen herangezogen. Ein direkter Vergleich von Flächen, welche mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren bearbeitet wurden (z.B. Fräsen, Schleifen, Laserpolieren) ist mit diesen Parametern nur eingeschränkt möglich, da die verfahrenstypischen Oberflächencharakteristika nicht mit abgebildet werden. Im Gegensatz hierzu erlaubt eine

Analyse der Oberflächenstrukturen hinsichtlich Ortswellenlänge und Ausprägung, d.h. die Untersuchung der spektralen Rauheitsanteile, eine deutlich detailliertere Bewertung von Oberflächen. Zur Erstellung des sogenannten Rauheitsspektrums wird zunächst eine Oberfläche optisch mittels Weißlichtinterferometrie gemessen. Anschließend werden die Daten mit phasenkorrekten Profilfiltern analysiert und Flächenrauheitswerte S_a für diskrete Bereiche der auftretenden Strukturortswellenlängen berechnet [10]. Diese Vorgehensweise ist in Abb. 6 schematisch dargestellt: Die Messungen werden mit unterschiedlichen Vergrößerungen durchgeführt. Diese Daten werden je nach Vergrößerung hinsichtlich unterschiedlicher Ortswellenlängenbereiche analysiert. Das Ergebnis wird in Form des Rauheitsspektrums dargestellt, welches die charakteristischen Merkmale der Oberfläche widerspiegelt. Z.B. zeigt das Rauheitsspektrum von gefrästen oder gedrehten Proben typischerweise ein lokales Maximum im Bereich des Riefenabstandes.

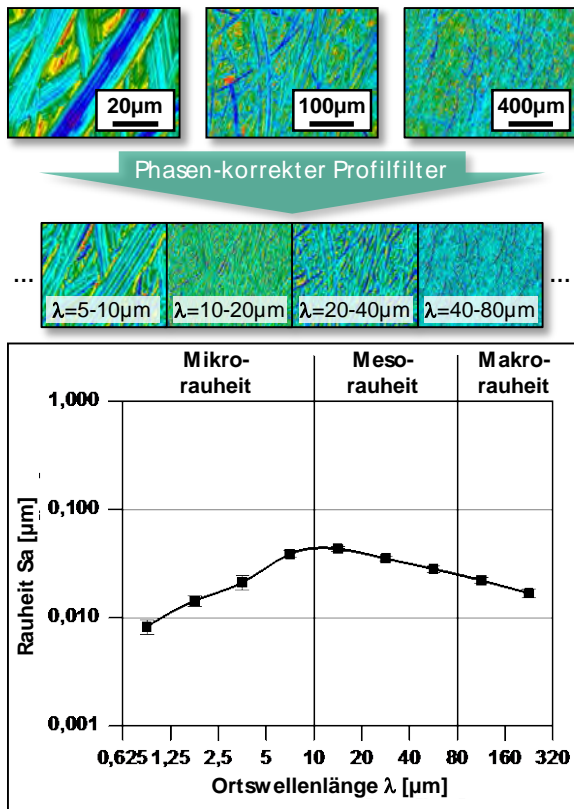


Abb. 5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Analyse der spektralen Rauheit auf Basis von Weißlichtinterferometermessungen in unterschiedlichen Vergrößerungen [10]

4 Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Laserpolitur von Werkzeugproben aus den Werkstoffen DIN 1.2343 ESU und DIN 1.2379 hinsichtlich ihres Einflusses auf den adhäsiven Verschleiß mit Reinaluminium (EN AW-1050A) verglichen. Hierzu wird zunächst die Laserpolitur von geschliffenem Flachmaterial betrachtet. Die Abmessungen des Probenmaterials sind $110 \times 120 \times 25 \text{ mm}^3$. Die Ausgangsrauheit beträgt $R_a \approx 0,5 \text{ µm}$. Der Fokussdurchmesser des Laserstrahls d_L , der Spurversatz dy und der

Restsauerstoffgehalt c_{O_2} sind in diesem Vergleich konstant. Die quadratischen Testflächen haben eine Kantenlänge von 10 mm. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Verfahrensparameter dargestellt. Alle laserpolierten Oberflächen werden, wie in Kap 3.3 dargestellt, hinsichtlich der Verteilung der spektralen Rauheitsanteile untersucht. Die Rauheit der makrolaserpolierten Flächen wird zusätzlich mit einem taktilen Profilometer (Mahr M2) im Tastschnittverfahren nach DIN EN ISO 42288:1998-04 gemessen. Anschließend werden die Ergebnisse der Tribometerverschleißtests analysiert. Die Werkzeugproben sind hierfür mit auf Basis der Tests auf Flachproben gewählten Verfahrensparametern laserpoliert. Alle Werkzeugproben sind Vakuum-wärmebehandelt. Mit 50 – 54 HRC für 1.2343 und 58 – 62 HRC für 1.2379 liegt die Härte der Proben im für den jeweiligen Werkstoff typischen Härtebereich für Fließpresswerkzeuge. Die Proben besitzen eine initiale Kontaktfläche von $A_{\text{Werkzeug}} = 95,03 \text{ mm}^2$. Alle Tribometerversuche werden ohne den Einsatz von Schmierstoffen durchgeführt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der eingesetzten Laserpolierparameter

Laserpolierparameter	
Fokussdurchmesser d_L	250 µm
Laserleistung P_L	30-160 W
Pulsfrequenz PRR	cw /20kHz
Scangeschwindigkeit v_{scan}	100 mm/s (cw) 1000 mm/s (pulsed)
Spurversatz dy	30 µm
Anzahl der Überfahrten n	1-4
Schutzgas	Argon
Restsauerstoffkonzentration c_{O_2}	1000 ppm

Zur Quantifizierung des adhäsiven Verschleißverhaltens werden die Kontaktflächen aller Tribometerproben, wie auch in [15] beschrieben, vor und nach dem Einsatz auf dem Prüfstand optisch vermessen. Hierzu wird ein Zygo NewView7300 Weißlichtinterferometer eingesetzt. Nach dem Tribometerertest wird die Ausgangsoberfläche von der eingesetzten Oberfläche subtrahiert und die Anhaftungen mittels Histogrammen hinsichtlich Quantität und Verteilung untersucht. Eine Beschneidung der Daten entlang des äußersten Radius der Kontaktfläche wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen. Für die Analyse in Kapitel 5.3 wird ein Schwellwert von $h_{\text{Adhäsion,min}} = 0,1 \text{ µm}$ definiert. Messpunkte unterhalb des Schwellwertes werden bei der weiteren Analyse ignoriert. Die daraus resultierende Unsicherheit beträgt bei einer angenommenen 50% Bedeckung der Kontaktfläche mit $0,1 \text{ µm}$ hohen Anhaftungen ungefähr $5 \times 10^6 \text{ µm}^3$.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Laserpolitur auf Flachproben

Die theoretischen Prozessgrenzen des Laserpolierens ergeben sich aus der Anforderung, dass genügend Energie in das Material eingebracht werden muss, um die vorhandenen Oberflächenstrukturen umzuschmelzen,

ohne dabei jedoch die Gesamtrauheit durch prozessinduzierte Strukturen zu vergrößern [9]. Für das Makropolieren (cw) von 1.2379 sind in Abb. 6 die erzielten Rauheiten für eine Variation von Leistung und Anzahl der Überfahrten dargestellt. Mit zunehmender Leistung zeigt sich bei einer Überfahrt zunächst eine Reduzierung der Rauheit bis zu einem lokalen Minimum bei 100 – 120 W. Darüber hinaus vergrößert sich die Rauheit wieder. Die Wiederholung der Bearbeitung führt zu einer weiteren Verbesserung der Rauheit. Bei $P_L = 120\text{ W}$ und $n = 4$ wird eine Rauheit von $Ra_{\text{taktill}} = 0,20 \pm 0,02\ \mu\text{m}$ erreicht. Aufgrund des kleinen Ra-Wertes wird für die folgenden Untersuchungen mit 1.2379 der Parameter $P_{L,cw} = 120\text{ W}$, $n = 4$ als Basis verwendet.

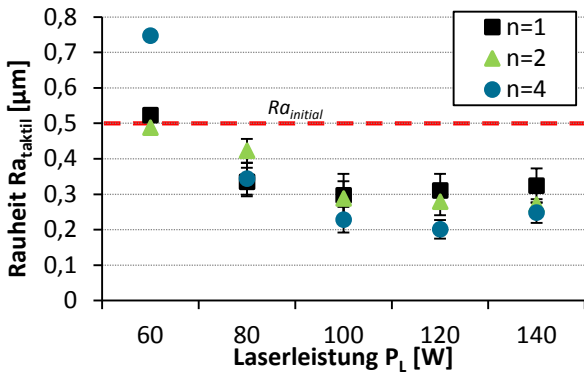


Abb. 6: Rauheit nach Makropolieren (cw) von 1.2379 mit 1-4 Überfahrten [16]

Das Mikropolieren mit gepulster Laserstrahlung beeinflusst in erster Linie die Mikrorauheit während Strukturen mit größeren Ortswellenlängen unbeeinflusst bleiben (s. Kap. 2). Daher wird im Folgenden die Kombination von Makro- und Mikropolitur betrachtet. In Abb. 7 sind die Ergebnisse der Leistungsvariation für die Mikropolitur mit $n = 1$ dargestellt. Alle Testfelder wurden zunächst mit dem oben beschriebenen Parameter makropoliert und anschließend mikropoliert. Bei einer Laserleistung von $P_{L,gepulst} = 30\text{ W}$ wird die Mikrorauheit im Bereich $\lambda < 10\ \mu\text{m}$ im Vergleich zur Makropolierten Oberfläche verkleinert. Der Rest des Spektrums bleibt dabei unberührt. Bei $P_{L,gepulst} = 50\text{ W}$ wird die Mikrorauheit weiter reduziert. Im Bereich $5 < \lambda < 20\ \mu\text{m}$ ist dagegen eine Vergrößerung der Rauheit messbar, welche mit zunehmender Leistung weiter verstärkt wird. Die bei großen Laserleistungen auftretende Aufrauung im Bereich $20 < \lambda < 40\ \mu\text{m}$ ist mit Randaufwürfen des Schmelzbads aufgrund des Dampfdruckes [9] und dem gewählten Spurversatz von $30\ \mu\text{m}$ erklärbar.

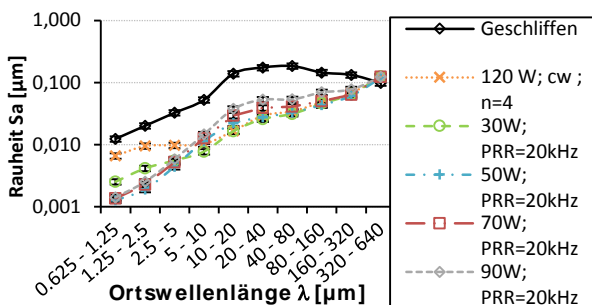


Abb. 7: Rauheitsspektren der Leistungsvariation für die Mikropolitur mit gepulster Laserstrahlung [16]

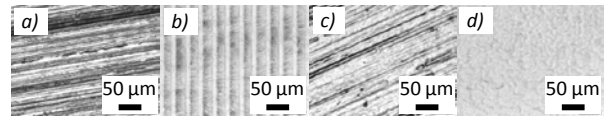


Abb. 8: Übersicht der für den Tribometertest ausgewählten 1.2379 Oberflächen: a) Ausgangsoberfläche (geschliffen); b) makropoliert; c) mikropoliert; d) makro- und mikropoliert.

Ein Vergleich der Oberflächen im Ausgangszustand, mit Makropolitur, kombinierter Makro-/Mikropolitur und reiner Mikropolitur ist in Abb. 8 dargestellt. Bei letzterer wurden die gleichen Parameter wie bei der Kombibearbeitung verwendet. Während nach der Mikropolitur (c) noch Reste der Schleifriefen des Ausgangszustandes (a) erhalten sind, wurden diese durch die Makropolitur (b) vollständig umgeschmolzen. Stattdessen sieht man dort die Umschmelzspuren der Laserpolitur. Bei der Kombination (d) sind weder Schleifriefen noch die Umschmelzspuren erkennbar.

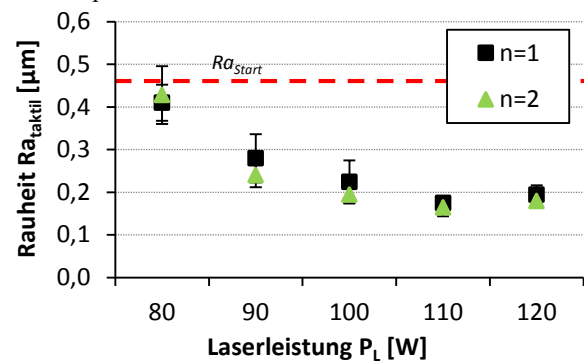


Abb. 9: Rauheit nach Makropolieren (cw) von 1.2343 nach 1-2 Überfahrten

Die Ergebnisse der Leistungsvariation zum Makropolieren von 1.2343 verhalten sich analog zu den oben dargestellten Ergebnissen mit 1.2379. Mit steigender Laserleistung sind zunächst zunehmend kleinere Ra-Werte messbar (siehe Abb. 9). Das lokale Minimum wird hier bei einer Leistung $P_L = 110\text{ W}$ erreicht. Bei größerer Leistung wird die Rauheit wieder vergrößert. Im Gegensatz zu der Makropolitur von 1.2379 führen zusätzliche Überfahrten bei der hier bearbeiteten Oberfläche nur zu kleinen Rauheitsverbesserungen. Bei $P_L = 110\text{ W}$ und $n = 2$ wird eine Rauheit von $Ra_{\text{taktill}} = 0,17 \pm 0,02\ \mu\text{m}$ erreicht. Das zugehörige Ra-Spektrum ist in Abb. 10 dargestellt.

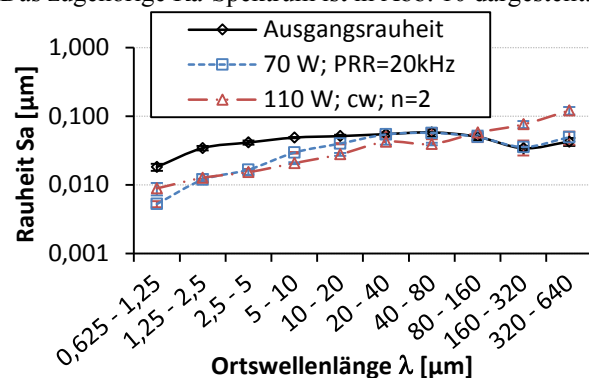


Abb. 10: Rauheitsspektren der für den Tribometertest ausgewählten 1.2343 Oberflächen

Versuche zum Mikropolieren von 1.2343 zeigen, dass im Vergleich zu 1.2379 deutlich größere Strukturen

umgeschmolzen werden können. Dies wird deutlich, wenn man die Rauheitsspektren für die Mikropolitur in Abb. 7 und Abb. 10 vergleicht. Bei 1.2379 kann mit $P_{L,gepulst} = 50$ W eine Rauheitsverkleinerung bis zu Ortswellenlängen von $\lambda = 5 \mu\text{m}$ gemessen werden. Wie bereits beschrieben führen größere Leistungen in diesem Fall zu keiner Verbesserung. Bei 1.2343 dagegen werden mit $P_{L,gepulst} = 70$ W Strukturen bis zu $\lambda = 20 \mu\text{m}$ geglättet.

In Abb. 11 sind die für den Tribometertest ausgewählten 1.2343 Oberflächen dargestellt. Die Schleifriefen der Ausgangsoberfläche (a) werden durch die Makropolitur (b) vollständig umgeschmolzen. Stattdessen sind die Laserumschmelzspuren erkennbar. Durch die Mikropolitur (c) werden die Schleifriefen deutlich geglättet.

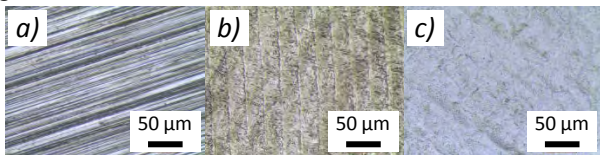


Abb. 11: Übersicht der für den Tribometertest ausgewählten 1.2343 Oberflächen: a) geschliffen; b) makropoliert; c) mikropoliert

Für die folgenden Untersuchungen mit 1.2379 werden die vorgestellten Parametersets für Makro- ($P_{L,cw} = 120$ W, $n = 4$), Mikro- ($P_{L,gepulst} = 50$ W) und kombinierte Makro-/Mikropolitur gewählt. Für die Untersuchungen mit 1.2343 werden die Parametersets für Makro- ($P_{L,cw} = 110$ W, $n = 2$) und Mikropolitur ($P_{L,gepulst} = 70$ W) eingesetzt.

5.2 Bearbeitungsergebnisse auf Tribometerproben

Während die Übertragung der Versuchsergebnisse von Flachproben auf Tribometerproben beim 1.2343 zu keinen Auffälligkeiten führt, zeigen sich bei der Bearbeitung von 1.2379 deutliche Abweichungen der Ergebnisse mit Makropolitur. Bereits während des Prozesses fällt die dunklere Färbung der Tribometerproben auf, begleitet von einem helleren Prozessleuchten und leichtem Nachglühen der Bearbeitungsstelle. Abb. 12 zeigt den Vergleich der Makropolitur und kombinierten Makro-/Mikropolitur sowohl auf den Tribometerproben als auch auf Flachproben. Während die Oberflächen der Flachproben metallisch glänzend erscheinen, sind die Tribometerproben matt und geprägt von Farbschattierungen welche auf Anlaseffekte, bzw. Oxidation schließen lassen. Die makropolierte Tribometerprobe weist die erwarteten Umschmelzspuren auf. Diese sind jedoch überlagert mit einer diffusen Mikrostruktur. Bei der kombiniert bearbeiteten Tribometerprobe sind Umschmelzspuren nicht erkennbar. Dafür bildet sich eine deutliche Struktur mit scharfen Stegen, deren Wellenlänge der auf der Flachprobe erkennbaren Mikrowelligkeit entspricht. Im Gegensatz hierzu, ist beim Vergleich zwischen rein mikropolierten Flach- und Tribometerproben kein signifikanter Unterschied erkennbar.

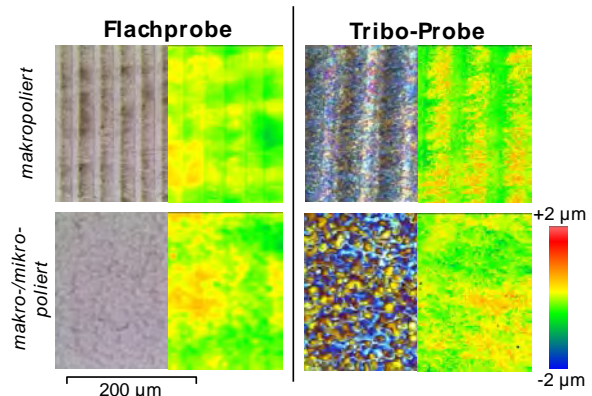


Abb. 12: Vergleich der Bearbeitungsergebnisse auf Flach- und Tribometerproben aus 1.2379

Diese Beobachtungen spiegeln sich auch in den jeweiligen Sa-Spektren wieder. In Abb. 13 sind oben die vier auf Flachproben, unten die auf Tribometerproben erzielten Oberflächen dargestellt. Insbesondere für den Bereich der Mikrorauheit bei $\lambda < 20 \mu\text{m}$ fallen die deutlich schlechteren Rauheitswerte der Tribometerproben auf, welche mit dem visuellen Eindruck korrelieren. Weitere Unterschiede im Spektrum sind dagegen vermutlich auf leichte Unterschiede der Ausgangsoberflächen zurückzuführen.

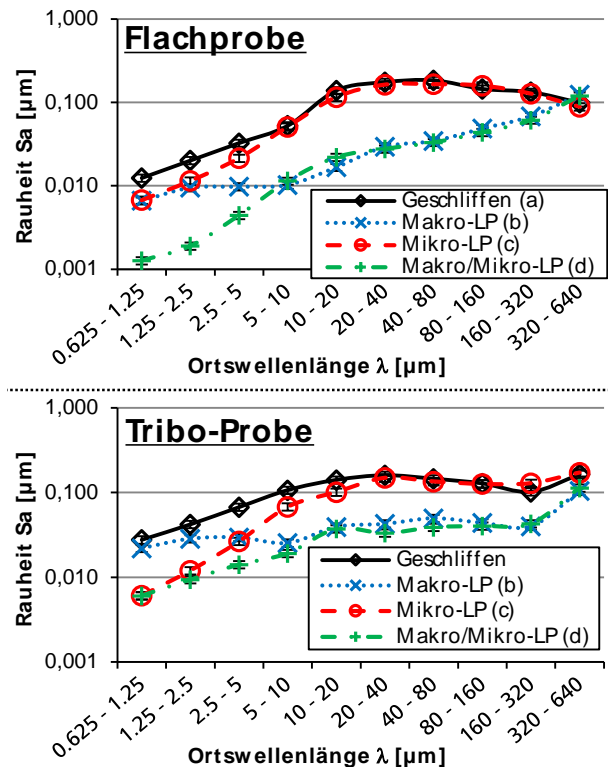


Abb. 13: Vergleich der erzielten Rauheitsspektren auf Flach- (o.) und Tribometerproben (u.) aus 1.2379

Ein Grund für die beobachteten Effekte ist möglicherweise die im Vergleich zur Flachprobenplatte kleine Geometrie der Probenkörper. Das kleinere Volumen und die damit einhergehende kleinere Wärmekapazität und Einschränkung hinsichtlich Wärmeableitung sorgen scheinbar für eine so große Vorwärmung der Probe, dass der Bearbeitungsprozess effektiv mit zu viel Leistung stattfindet. Der Mikropolierprozess, der deutlich weniger

Energie in den Probenkörper einbringt, zeigt dagegen keine abweichenden Ergebnisse.

5.3 Verschleißcharakterisierung

Die Analyse der Anhaftungen nach dem Tribometer-test zeigt den Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf das Adhäsionsverhalten. In Abb. 14 sind die Probenoberflächen in Falschfarben dargestellt. Bei geschliffener Oberfläche (a, b) fallen bei beiden Werkstoffen mehrere große Anhaftungen auf. Insbesondere bei 1.2379 (a) sind diese sowohl im mittleren Bereich als auch außen zu finden. Kleinere Anhaftung orientieren sich bevorzugt entlang der Schleifriefen, was auf eine Kombination von adhäsiven und abrasiven Effekten hindeutet. Die gemessenen Anhaftungsvolumina betragen ungefähr $50 - 200 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ (a) mit 1.2379 und $20 - 80 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ (b) mit 1.2343. Da die makropolierten Proben (c, d) keine Schleifriefen aufweisen sind die Anhaftungen ausschließlich kreisförmig, der Relativbewegung der rotierenden Werkstückprobe folgend, angeordnet. Das Volumen des anhaftenden Materials ist jeweils mit den geschliffenen Proben vergleichbar: ungefähr $120 - 160 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ (c) mit 1.2379 und $30 - 80 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ (d) mit 1.2343. Statt der großen Agglomerationen bei den geschliffenen und makropolierten Flächen weisen die mikropolierten Proben (e, f) mehr kleine, aber flächigere Anhaftungen auf. Das Anhaftungsvolumen der Proben aus 1.2379 beträgt etwa $40 - 85 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ (e), während auf den Proben aus 1.2343 $16 - 35 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ (f) messbar sind. Das mit $5,5 \pm 0,5 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ kleinste Volumen ist auf den kombiniert makro- und mikropolierten Proben aus 1.2379 (g) zu messen.

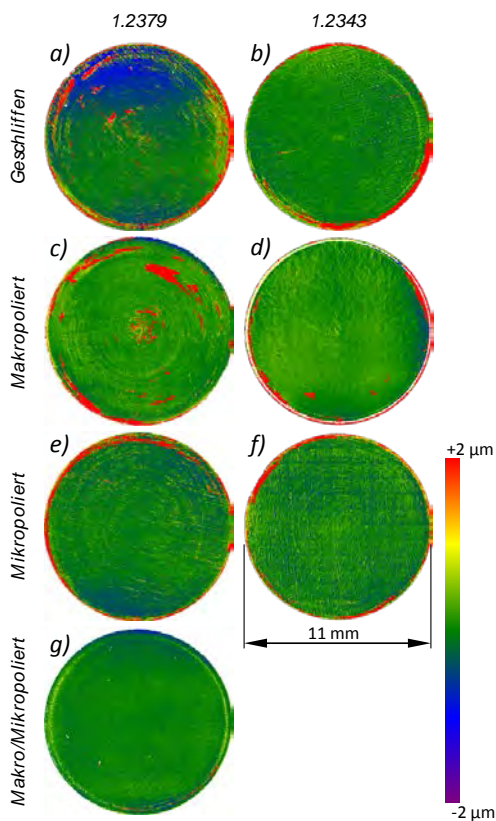


Abb. 14: Topographie der Proben aus 1.2379 und 1.2343 nach Tribometer-test in Falschfarben

Die in Abb. 15 dargestellten Diagramme zeigen die Verteilung des adhärenen Materials entlang der radialen Position auf der Probe. Hierzu sind die Probenoberflächen in Ringsegmente gleichen Flächeninhalts unterteilt. Für jedes Ringsegment wird die Summe der Anhaftungen berechnet und das resultierende Volumen auf den Flächeninhalt normiert. Jeder Datenpunkt entspricht demnach der Summe aller auf einem Ringsegment gemessenen Höheninformationen.

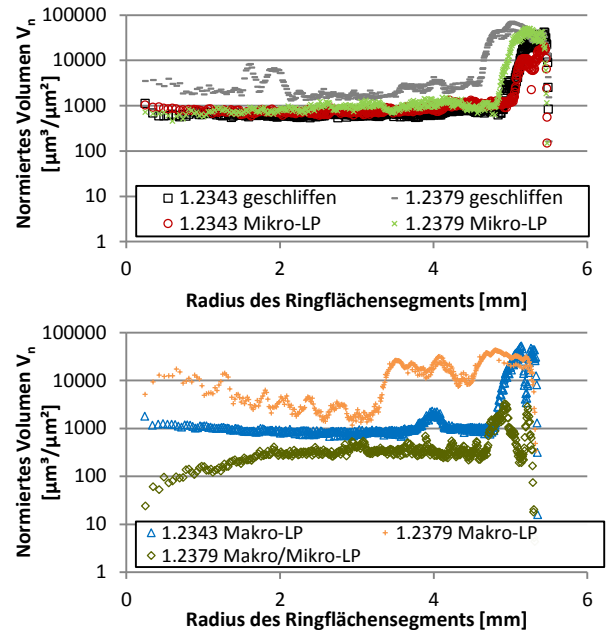


Abb. 15: Verteilung der Anhaftungen nach Tribometer-test
 Oben: geschliffene und mikropolierte Proben aus 1.2343 und 1.2379 (oben)
 Unten: Proben aus 1.2343 (makrolaserpoliert) und 1.2379 (makrolaserpoliert; makro/mikropoliert)

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, nimmt das Risiko für Adhäsion aller Wahrscheinlichkeit nach mit steigendem Probenradius zu. Diese Vermutung wird durch die dargestellten Verläufe für das normierte Anhaftungsvolumen unterstützt. Bei allen dargestellten Oberflächen kann eine Tendenz zu größeren Anhaftungen am Probenäußeren beobachtet werden.

Bei näherer Betrachtung der jeweiligen Rauheitsspektren und unter Berücksichtigung der dargestellten Verschleißtests scheint eine im Vergleich zu den geschliffenen Proben verbesserte Mesorauheit im Bereich $5 < \lambda < 160 \mu\text{m}$ durch Makropolitur zu keiner messbaren Verkleinerung des Anhaftungsvolumens zu führen. Durch das Umschmelzen der Schleifriefen wird jedoch scheinbar die Balance zwischen adhäsiven und abrasiven Verschleißeffekten verschoben.

Die verkleinerte Mikrorauheit für $\lambda < 5 \mu\text{m}$ durch Mikropolitur hat dagegen offenbar bei beiden Werkstoffen einen vorteilhaften Einfluss auf den adhäsiven Verschleiß. Dies wird auch durch den Vergleich der makropolierten Proben miteinander gestützt. Die makropolierte 1.2379-Probe weist das größere Anhaftungsvolumen auf und unterscheidet von der entsprechenden 1.2343-Probe in erster Linie durch eine deutlich größere Mikrorauheit. Diese ist, wie in Kapitel 5.2 thematisiert, auf eine Oxidation der Probenoberfläche zurückzuführen.

Bei Betrachtung der kombiniert makro-/mikropolierten Proben aus 1.2379 (Abb. 14g) fällt auch auf, dass das Rauheitsspektrum zwar sowohl im Mikro- als auch im Mesorauheitsbereich ungefähr dem Spektrum der rein makropolierten 1.2343-Probe (Abb. 14d) entspricht, gleichzeitig jedoch ein deutlich besseres Verschleißergebnis erzielt wird. Dies führt zu der Annahme, dass hier neben dem Zusammenhang zwischen der Verteilung der spektralen Rauheitsanteile und der Adhäsionsneigung auch die Oxidierung der Oberfläche Einfluss auf das Anhaftungsvolumen hat.

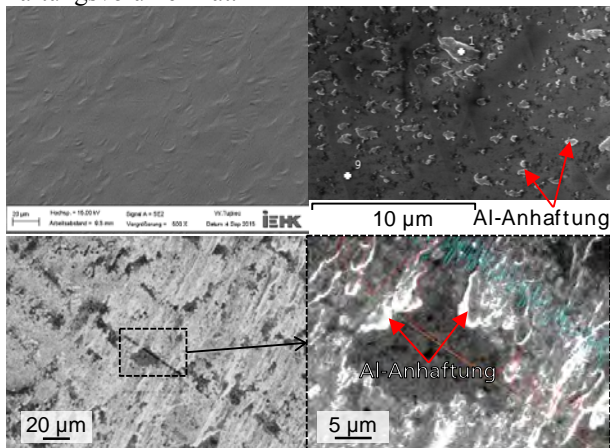


Abb. 16: REM-Aufnahmen der Oberfläche und der Aluminiumanhaftungen einer makro-/mikropolierten 1.2379-Probe (o.) und einer mikropolierten 1.2343-Probe (u.) nach dem Tribometereinsatz

Die Untersuchung einer makro-/mikropolierten 1.2379-Probe nach dem Tribometereinsatz mittels REM (Abb. 16 o.) zeigt die auch unter dem Lichtmikroskop erkennbare Oberflächenstrukturen. Auf der gesamten Probe verstreut können Partikel in der Größenordnung 1 – 3 µm gefunden werden, welche laut EDX-Analyse (Tabelle 2) aus Aluminium bestehen. Die changierenden Anlauffarben der Oberfläche sprechen für eine sehr dünne Oxidschicht. Dementsprechend liegen auch die in der EDX-Messung detektierten Werte für Sauerstoff im Bereich des Grundrauschens.

Tabelle 2: EDX-Analyse der makro-/mikropolierten 1.2379-Probe in Abb. 16 (o.): Aluminiumanhaftung (#1); Grundmaterial (#9)

	C	O	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo	Gesamt
# 1	4,5	3,7	19,3	0,2	1,1	10,7	0,7	59,3	0,4	100,0
# 9	4,9	3,2	0,2	0,2	1,1	12,1	0,8	76,8	0,6	100,0

Dass die Anhaftungen der 1.2379-Probe in Form einzelner Partikel vorliegen, während bei einer mikropolierten 1.2343-Probe ohne sichtbare Oxidation (Abb. 16 u.) flächige Kaltverschweißungen vorherrschen, kann auf einen passivierenden Effekt durch die Oxidschicht deuten, der die Adhäsionsneigung zusätzlich zum eingestellten Rauheitsspektrum reduziert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Laserpolieren ist ein neuartiges Verfahren zur abtragsfreien Glättung oder Modifikation von Oberflächen. Die hierbei entstehenden Oberflächencharakteristika unterscheiden sich grundlegend von Oberflächen,

die mit klassischen zerspanenden oder erosiven Verfahren bearbeitet werden. In der vorliegenden Arbeit wird mit der gezielten Modifikation der spektralen Rauheit von Werkzeugen aus 1.2343 und 1.2379 ein neuer Ansatz zur Beeinflussung des adhäsiven Verschleißes mit Aluminium präsentiert.

Die mit den entwickelten Verfahrensparameter für die Makro-, Mikro- und kombinierte Makro-/Mikropolitur bearbeiteten Testkörper wurden auf einem Druck-Torsions-Tribometer geprüft. Anhand der Analyse hinsichtlich Quantität und Verteilung der Anhaftungen konnte für die untersuchten Werkstoffpaarungen gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen der spektralen Rauheitsverteilung mit Mikro-/Mesorauheit und der Balance von adhäsiven und abrasiven Verschleißeffekten besteht. Hierbei scheint insbesondere eine kleine Mikrorauheit im Ortswellenlängenbereich $\lambda < 5 \mu\text{m}$ vorteilhaft für die Reduktion von adhäsivem Verschleiß zu sein. Jedoch bedarf es für eine genauere Bewertung der wesentlichen Rauheitsanteile weiterführender Tests mit neuen Oberflächencharakteristika.

Die Ergebnisse der makro-/mikropolierten 1.2379-Probe lassen vermuten, dass neben dem Einfluss der spektralen Rauheit auch eine Oxidierung der Oberfläche zu Veränderungen des Adhäsionsverhaltens führt, welche möglicherweise gezielt zur Reduktion von Verschleiß eingesetzt werden können.

In zukünftigen Tests gilt es nun den Einfluss unterschiedlicher Rauheitsspektren durch Entwicklung und Test neuer Verfahrensparameter für das Mikro-/Makropolieren und Laserumschmelzstrukturieren weiter zu untersuchen. Ebenfalls geplant sind Untersuchungen hinsichtlich der gezielten Herstellung der in dieser Arbeit beobachteten Oxidschicht und ihres Einflusses auf die Adhäsionsneigung sowie die Verschleißprüfung ausgewählter Oberflächen mit längeren Gleitwegen.

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. Geiger, T.B. Herlan: Fließpressen, in: G. Spur, H. Hoffmann, R. Neugebauer: Handbuch Umformen: Handbuch der Fertigungstechnik. Hanser Verlag, München (2012) 318-387
- [2] N. Bay: The state of the art in cold forging lubrication. Journal of Materials Processing Technology 46 (1994) 19-40
- [3] 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. Annals of the CIRP 59/2 (2010) 760-780
- [4] F. Vollertsen, F. Schmidt: Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges. Int. J. Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology 1/1 (2014) 59-62
- [5] E. Willenborg, K. Wissenbach, R. Poprawe: Polishing by laser radiation, in: R. Poprawe (Hg.): Proceedings of the 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, AT-Verlag, München (2003) 451-456
- [6] T. Kiedrowski: Oberflächenstrukturbildung beim Laserstrahlpolieren von Stahlwerkstoffen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2009)

- [7] R. Ostholt: Laserpolieren metallischer Freiformflächen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2012)
- [8] E. Bordatchev, A. Hafiz, O. Tutunea-Fatan: Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73 (2014) 35-52
- [9] C. Nüsser, J. Kumstel, T. Kiedrowski, A. Diatlov, E. Willenborg: Process- and Material-Induced Surface Structures During Laser Polishing, *Advanced Engineering Materials* 17 (2015) 268-277
- [10] A. Temmler: Selektives Laserpolieren von metallischen Funktions- und Designoberflächen, Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen (2013)
- [11] 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 Annales – Manufacturing Technology* 64 (2015) 289-292
- [12] M. Teller, S. Seuren, M. Bambach, G. Hirt: A new compression-torsion-tribometer with scalable contact pressure for characterization of tool wear during plastic deformation. *Conference Papers in Science* vol. 2015 (2015)
- [13] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt, I. Ross, A. Temmler, R. Poprawe, H. Bolvardi, S. Prünke, J.M. Schneider: Investigation of the suitability of surface treatments for dry cold extrusion by process-oriented tribological testing. *Key Engineering Materials* Vol. 651-653 (2015) 473-479
- [14] R. Kopp, H. Wiegels: Einführung in der Umformtechnik. Verlag Mainz, Aachen (1999)
- [15] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt, I. Roß, A. Temmler, R. Poprawe, H. Bolvardi, S. Prünke, J. M. Schneider: Methodik zur Entwicklung von interaktionsminimierten Oberflächenschichten für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium. *Dry Met. Forming OAJ FMT 1* (2015) 34-41
- [16] I. Roß, A. Temmler, R. Poprawe, M. Teller: Investigation of the influence of laser surface modifications on the adhesive wear behavior in dry cold extrusion of aluminum. *Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference* (2015)