

Chemische Werkzeugbeschichtungen für die Aluminiumblechumformung

Reibungsreduzierende Werkzeuge

S. Ceto, U. Holländer, A. Schnettger, S. Hübner, B. Behrens

ZUSAMMENFASSUNG Zur Reduktion von Reibung und Verschleiß bei der Umformung von Aluminiumblechen wurden Werkzeugoberflächen aus einem Gusswerkstoff (EN-GJS-700-2) chemisch oxidiert und elektrochemisch phosphatiert. Die phosphatierten Schichten reduzierten den Reibwert um bis zu 47,62 % im Vergleich zu unbeschichteten Oberflächen. Allerdings wurde eine hohe Adhäsion des Aluminiums an der Werkzeugoberfläche festgestellt.

STICHWÖRTER

Reibwertreduzierung, Verschleiß, Werkzeugbeschichtung

Friction-reducing tools – Chemical tool coatings for aluminum sheet metal forming

ABSTRACT To reduce friction and wear during the forming of aluminum sheet, tool surfaces made of a cast material (EN-GJS-700-2) were chemically oxidized and electrochemically phosphated. The phosphated coatings reduced the coefficient of friction by up to 47,62 % compared to uncoated surfaces. However, high adhesion of the aluminum to the tool surface was observed.

1 Einführung

Das Tiefziehen zählt innerhalb der Umformtechnik zu den zentralen Verfahren zur Herstellung von Blechbauteilen [1]. Während dieses Prozesses sind die eingesetzten Werkzeuge komplexen Beanspruchungen ausgesetzt, die sowohl mechanische als auch thermische Einflüsse umfassen können [2]. Zur Reduktion von Reibung und zum Schutz der Werkzeugoberflächen und Blechmaterialien vor Verschleiß werden üblicherweise Schmieröle eingesetzt [3–5]. Der Einsatz solcher Schmierstoffe ist jedoch mit verschiedenen Nachteilen verbunden: Sie sind häufig nur schwer biologisch abbaubar und können Maschinenkomponenten verunreinigen, was zusätzliche Reinigungsmaßnahmen erfordert und die Prozesskette verlängert [6].

Ein vielversprechender Ansatz zur Überwindung der Herausforderungen besteht in der Entwicklung von Umformprozessen, die vollständig ohne Schmiermittel auskommen [7]. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „SPP 1676 – Trockenumformung in der Umformtechnik“ wurde die trockene Blechumformung mittels selektiver Oxidation von Werkzeugoberflächen grundlegend untersucht. Dazu wurde ein Verfahren zur thermischen Erzeugung einer Oxidschicht im submikrometrischen Bereich unter Schutzgas entwickelt. Verschleißuntersuchungen konnten zeigen, dass Eisenoxidsysteme reibungsmindernd wirken und zugleich verschleißbeständig sind [8]. Eine Reibungsreduzierung durch den Einsatz geeigneter Werkzeugbeschichtungen zeigt einerseits Vorteile bei der Adhäsionsreduzierung, andererseits zeigt das Aufbringen von Oberflächenstrukturen auf ein Umformwerkzeug auch eine Erhöhung der Werkzeugstandzeiten [9].

Der folgende Beitrag umfasst reibungsreduzierende Oberflächenbeschichtungen auf flachen und zylindrischen Werkzeugen

aus dem Gusswerkstoff EN-GJS-700-2. Die Herstellung von Konversionsschichten auf Stahl kann durch chemische oder durch elektrochemische Oxidation des Eisens und Bildung stabiler Oxide erfolgen. Anschließend wird der Einfluss der Beschichtungen auf den Verschleiß im Umformprozess analysiert. Zur Bewertung des Reibverhaltens kommen Streifenziehversuche mit und ohne Umlenkung zum Einsatz. Im Fokus stehen Aluminiumlegierungen der 5000er- und 6000er-Reihe, die typischerweise in Strukturkomponenten von Fahrzeugkarosserien verwendet werden. Untersucht wurden insbesondere die Legierung EN AW-5182, wie sie bei PKW-Heckdeckeln eingesetzt wird, sowie EN AW-6016, die bei PKW-Hecktüren Anwendung findet [10].

Ziel der Arbeit ist es, die Leistungsfähigkeit der Beschichtungen unter praxisnahen Bedingungen zu bewerten. Dazu werden die Versuche unter Variation relevanter Prozessparameter wie Ziehgeschwindigkeit und Flächenpressung durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Reib- und Verschleißuntersuchungen sollen die Oberflächenbeschichtungen weiter optimiert werden. Dabei wird besonderes Augenmerk auf deren Einfluss auf die Adhäsionsneigung der eingesetzten Aluminiumlegierungen gelegt. Aus den Ergebnissen sollen zudem gezielte Gegenmaßnahmen zur Reduzierung von Verschleiß und Reibung abgeleitet werden. Die Charakterisierung der Schichteigenschaften erfolgt mittels rasterelektronenmikroskopischen (REM) und lichtmikroskopischen Untersuchungen.

2 Methodik

2.1 Werkstoffe und Prüfkörper

Für die Versuche wurden Umlenkrollen sowie Flachbacken aus dem Gusswerkstoff mit Kugelgraphit (EN-GJS-700-2) her-



Bild 1 Chemisch oxidierte (links) und elektrochemisch phosphatierte (rechts) Reibbacken und Umlenkrollen. Foto: IW

gestellt. Die Umlenkrolle besitzt eine Gesamtlänge von 153 mm und einen Durchmesser von 16 mm. Die Flachbacke ist 6 mm hoch und verfügt über eine Aktivfläche von 30 mm x 25 mm. Der verwendete Gusswerkstoff zeichnet sich durch eine Kombination aus hoher Festigkeit und guter Verschleißbeständigkeit [11] aus und weist eine Härte von 54 ± 2 HRC auf. Der Gusswerkstoff wird typischerweise in verschleißbeanspruchten Gleitpaarungen eingesetzt, etwa in Schiebern, Treibern sowie in Ziehwerkzeugen für Bauteile mit geringer Ziehtiefe, vor allem in Klein- und Mittelserienfertigungen [12]. Die geschliffene Oberflächenrauheit der Gusswerkzeuge beträgt im Mittel circa $R_a = 0,8 \mu\text{m}$.

Für die Streifenziehversuche wurden vier Aluminiumblechwerkstoffe verwendet, die jeweils mit einer Walzwerksbebildung versehen waren. Diese dient gemäß VDA 230-213 [13] dem Korrosionsschutz sowie der Stabilisierung während der Lagerung und des Transports in der Fertigungshalle. Untersucht wurden Blechwerkstoffe der Aluminiumlegierung EN AW-6016 mit unterschiedlichen Korrosionsschutzölen sowie je eine Variante der Werkstoffe EN AW-6016 und EN AW-5182 mit Trockenschmierstoff mit einer Blechdicke von jeweils 1 mm. Um Beschädigungen an den Werkzeugaktivflächen zu vermeiden und eine erhöhte Reibung aufgrund von scharfen Kanten oder Graten auszuschließen, wurden die Blechstreifen zuvor entgratet.

2.2 Herstellung oxidischer Beschichtungen

Die chemische Oxidschicht, welche für die Entwicklung einer reibungsreduzierten Werkzeugoberfläche sorgt, wurde durch anodische Oxidation erzeugt. Die Erzeugung der $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -Schicht erfolgte in einer elektrochemischen Zelle bestehend aus einer Zwei-Elektrodenanordnung, in der die Umlenkrolle beziehungsweise die Flachbacke als Arbeitselektrode diente und als Anode geschaltet wurde, und einer Edelstahlelektrode, welche als Gegenelektrode diente und die Anode vollständig umschloss und gleichzeitig die Referenzelektrode darstellte. Die anodische Oxidation wurde bei einem Potential von 0,5 V gegen die Edelstahlelektrode für vier Minuten in einer 23-molaren-NaOH-Lösung durchgeführt, die auf eine Reaktionstemperatur von 80 °C erhitzt wurde. Die erhaltenen Eisenoxidschichten zeigten einen hohen Abrieb, wodurch der abriebfeste Anteil der Oxidschicht lediglich $< 0,5 \mu\text{m}$ betrug.

Eine weitere, grundsätzlich geeignete Beschichtung zur Reibwertminderung ist die elektrochemisch hergestellte Phosphatschicht. Für die elektrochemische Phosphatierung wurde der gleiche Zellaufbau, wie zuvor beschrieben, verwendet. Als Elektrolyt dienten eine wässrige 0,72-mol/l-NaH₂PO₄-Lösung und eine

0,025-mol/l-ZnO-Lösung mit einem pH-Wert von 2, welche auf eine Reaktionstemperatur von 65 °C erhitzt wurde. Die anodische Phosphatierung erfolgte bei einem Potential von 1 V, gegen die Edelstahlelektrode gemessen, und in einer Versuchszeit von 20 Minuten. Die erhaltenen Phosphatschichten zeigten abriebfestes Verhalten mit Schichtdicken von 2–4 μm abhängig von der Versuchszeit. Die elektrochemisch synthetisierte Phosphatschicht wurde zur Minderung der Rauheit der Oberfläche bei einem Teil der Proben manuell auf einem gewebten Seidentuch mit einer 3 μm -Poliersuspension poliert. **Bild 1** zeigt die erzeugten Schichten, die auf das Gusswerkzeug aufgetragen wurden.

2.3 Versuchsdurchführung

Zur Quantifizierung der tribologischen Bedingungen während eines Umformprozesses werden Modellversuche zur Reibwertermittlung eingesetzt. In der Blechumformung kommen dabei Versuche zum Einsatz, welche die charakteristischen Beanspruchungszustände eines Tiefziehvorgangs nachbilden. **Bild 2** zeigt links die Streifenziehanlage sowie in der Mitte und rechts die schematische Darstellung des Streifenziehversuchs ohne beziehungsweise mit Umlenkung.

Zur Charakterisierung der Reibbedingungen an der Ziehkante eines Tiefziehwerkzeugs wurde die Versuchsvariante mit Umlenkung herangezogen. Dabei wird ein Blechstreifen über eine zylindrische Umlenkrolle um 90° umgelenkt und unter Einleitung der Ziehkraft F_{SZ} gezogen. Gleichzeitig wird der Streifen mit einer Gegenhaltekraft F_G gehalten. Der Reibwert wird anhand des Verhältnisses von Gegenhaltekraft zu Ziehkraft bestimmt, unter Anwendung der Eytelwein'schen Seilreibungsgleichung [14]. Wie in **Bild 3** dargestellt, wurde die Umlenkrolle in vier Kontaktzonen ($n = 1$ bis 4) eingeteilt.

Für jede Messreihe wurde jeweils nur eine der Aktivfläche belastet. Die Umlenkrolle wurde dazu nach jedem Versuchsdurchgang um 90° gedreht, sodass alle vier Bereiche einmal unter identischen Bedingungen beansprucht wurden. Diese Vorgehensweise gewährleistet, dass für die Reibwertbestimmung vergleichbare Ergebnisse aus unvorbelasteten Kontaktstellen gewonnen werden können.

Zur Nachbildung der Reibverhältnisse im Flanschbereich eines Tiefziehprozesses wurde der Streifenziehversuch ohne Umlenkung mit flachem Werkzeugkörper (Reibbacke) eingesetzt. Dabei wird ein Blechstreifen mit einer definierten Normalkraft F_N gegen die Reibbacke gedrückt und gleichzeitig mit einer Ziehkraft F_{SZ} gezogen. Der Reibwert μ ergibt sich aus dem Verhältnis von F_{SZ} zu F_N im Kontaktbereich zwischen Reibbacke und Blech. Im Gegensatz zur Umlenkrolle wurden die beschichteten Reibbacken jeweils nur einmal verwendet, wenn die Beschichtung nach einem Versuch nicht verschlissen war. Bei unbeschichteten Reibbacken konnten bis zu vier Wiederholungen durchgeführt werden, vorausgesetzt, es traten keine Adhäsionseffekte auf. Nach jedem Versuch wurde die Oberfläche der unbeschichteten Reibbacken mit einem Tuch gereinigt, um möglichst konstante Versuchsbedingungen sicherzustellen.

Die Ermittlung der Oberflächenrauheit erfolgte mit dem konfokalen LED-Mikroskop „Smartproof 5“ der Firma Carl Zeiss AG. Das berührungslose Messverfahren erlaubt eine hochauflösende, dreidimensionale Erfassung fein strukturierter Oberflächen. Die vertikale Messunsicherheit liegt bei $\pm 0,1 \mu\text{m}$, was eine verlässliche Quantifizierung selbst kleinsten Rauheitsmerkmale ermöglicht.

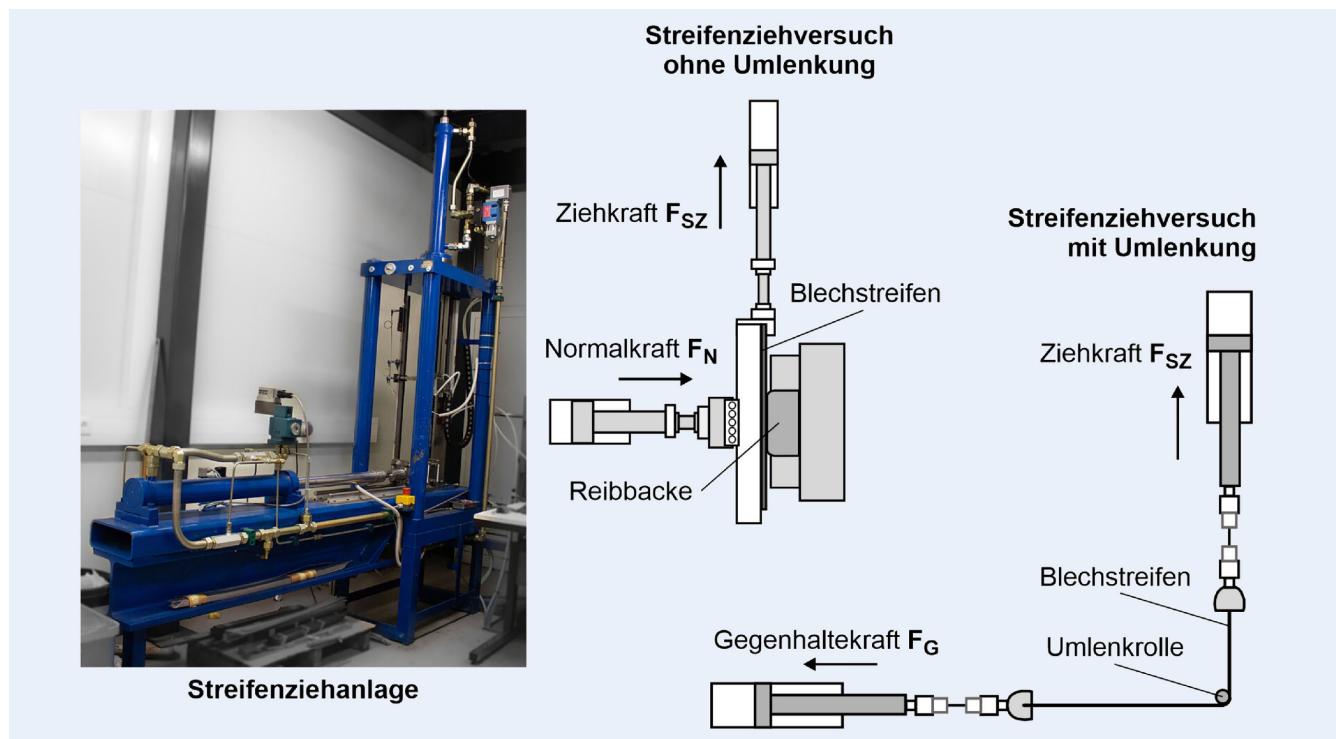


Bild 2 Streifenziehanlage mit schematischer Darstellung der Versuche. Grafik: IFUM

Für eine detaillierte Analyse des Verschleißverhaltens an tribologisch beanspruchten Werkzeugkomponenten wurden lichtmikroskopische Aufnahmen mit dem digitalen 3D-Lichtmikroskop „VR-3200“ (Keyence) angefertigt. Dabei kamen zwei Vergrößerungsstufen zum Einsatz. Mit einer 12-fachen Vergrößerung wurden Makroaufnahmen der gesamten Verschleißzone erstellt. Ergänzend erfolgten Mikroaufnahmen bei 40-facher Vergrößerung zur Identifikation lokaler Oberflächenschäden wie Riefen, Abrieb oder Materialübertragungen. Hochauflösende Analysen der Oberflächentopografie sowie der chemischen Zusammensetzung erfolgten mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit dem Zeiss „Supra 55VP“. Durch die Kombination mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) konnten Materialübertragungen und mikrostrukturelle Veränderungen infolge tribologischer Belastungen präzise identifiziert werden.

3 Ergebnisse

3.1 Reibwertermittlung und Verschleiß

3.1.1 Streifenziehversuch mit Umlenkung in Versuchsreihe 1

Um möglichst praxisnahe Bedingungen eines Tiefziehprozesses zu simulieren, wurde die Versuchsreihe 1 mit Umlenkrollen bei einer Werkzeugtemperatur von $T = 80^\circ\text{C}$ durchgeführt. Diese Temperatur tritt während des Tiefziehens auf. Die Versuche erfolgten zudem mit zwei unterschiedlichen Ziehgeschwindigkeiten ($v_1 = 5 \text{ mm/s}$ und $v_2 = 20 \text{ mm/s}$) sowie unter einer konstanten Flächenpressung von $p = 8,75 \text{ MPa}$. Zur Begrenzung des Versuchsaufwands wurde die erste Versuchsreihe ausschließlich mit Aluminiumblechstreifen der Legierung EN AW-6016 durchgeführt. Diese waren mit der werkseitig aufgebrachten Walzwerksbeölung Ferrocoat N 6130 versehen. Bild 4 zeigt die gemittelten Reibwerte der Umlenkrollen im Streifenziehversuch

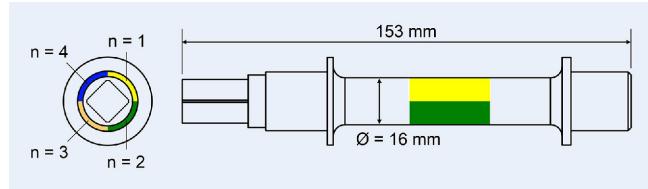


Bild 3 Einteilung der Umlenkrolle in vier Kontaktzonen (n=1 bis 4) zur Reibwertbestimmung. Grafik: IFUM

für Versuchsreihe 1 zusammen mit den dazugehörigen Versuchsparametern.

Die unbeschichtete Umlenkrolle wies die höchsten Reibwerte auf. Bei einer Geschwindigkeit von $v_1 = 5 \text{ mm/s}$ wurde ein Reibwert von 0,22 ermittelt, der bei einer Erhöhung auf $v_2 = 20 \text{ mm/s}$ auf 0,20 sank. Dies zeigt, dass höhere Geschwindigkeiten zu einer moderaten Verringerung des Reibwertes führen können. Deutlich bessere Ergebnisse erzielten die beschichteten Umlenkrollen. Die chemisch oxidierte Umlenkrolle erreichte bei $v_1 = 5 \text{ mm/s}$ einen Reibwert von 0,17, der sich bei $v_2 = 20 \text{ mm/s}$ auf 0,14 reduzierte. Die elektrochemische phosphatierte Umlenkrolle erzielte mit Reibwerten von 0,16 ($v_1 = 5 \text{ mm/s}$) und 0,13 ($v_2 = 20 \text{ mm/s}$) die niedrigsten Werte im gesamten Versuch. Durch den Einsatz reibungsreduzierender Beschichtungen konnte der Reibwert im Vergleich zur unbeschichteten Umlenkrolle bei einer Ziehgeschwindigkeit von 5 mm/s um bis zu 27 % und bei 20 mm/s um bis zu 35 % gesenkt werden. Bild 5 zeigt die Verschleißaufnahmen der Umlenkrollen für Versuchsreihe 1.

Bei der unbeschichteten Umlenkrolle sind auf der Oberfläche zahlreiche dunkle Punkte erkennbar. Dabei handelt es sich um Graphitausscheidungen. Diese tragen zur Schmierung bei und zeigen nach den Versuchen bei den Ziehgeschwindigkeiten v_1 und v_2 keine signifikanten Veränderungen der Oberfläche. Im Gegen-

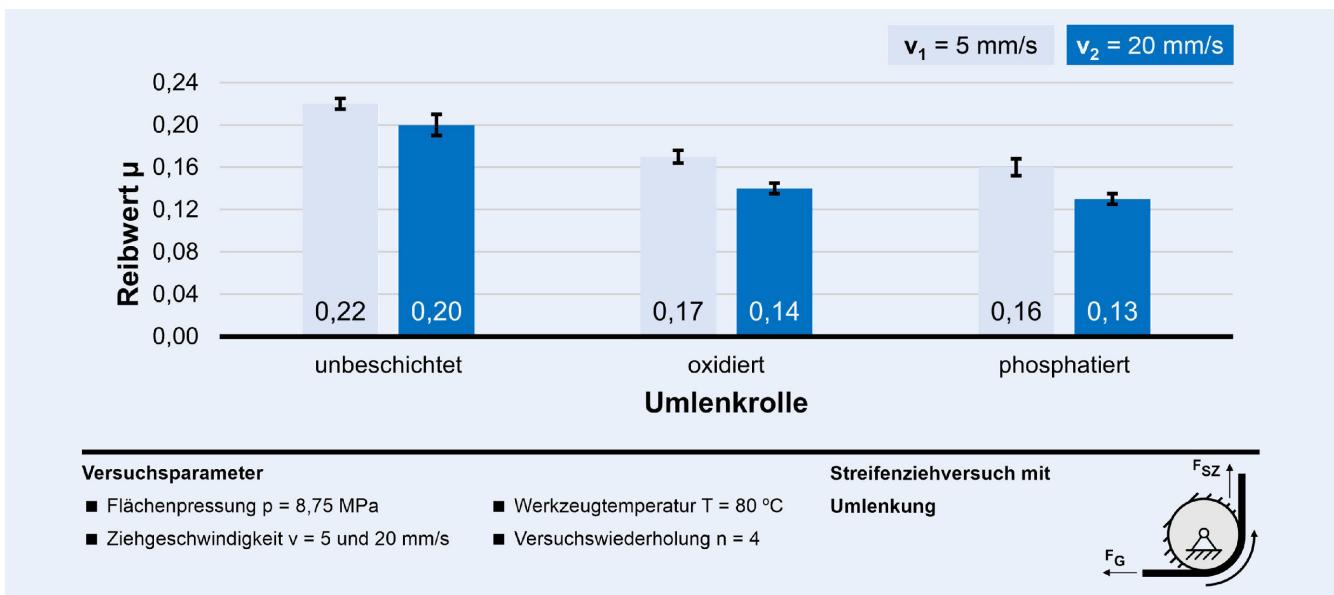


Bild 4 Reibwerte der Umlenkrollen für Versuchsreihe 1. Grafik: IFUM

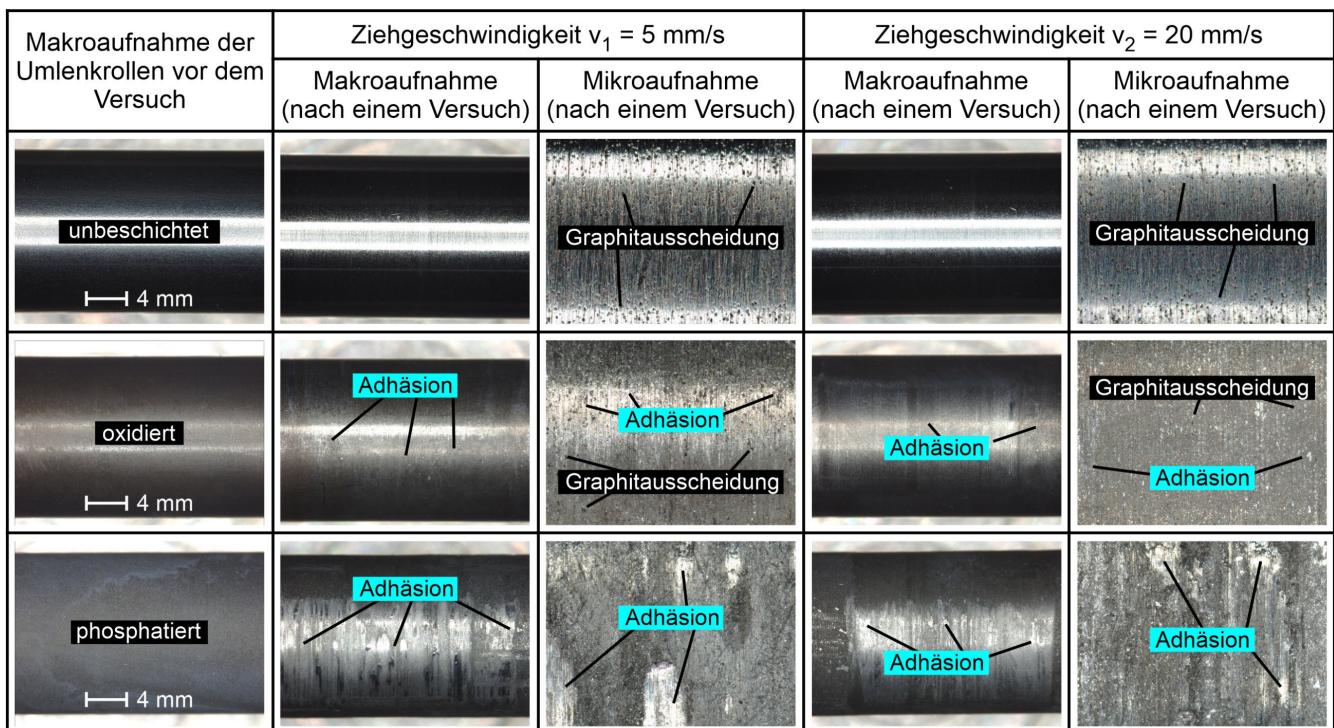


Bild 5 Verschleißaufnahmen von Umlenkrollen aus der ersten Versuchsreihe. Foto: IFUM

satz dazu weist die chemisch oxidierte Umlenkrolle nach einem Versuch bei einer Ziehgeschwindigkeit von $v_1 = 5 \text{ mm/s}$ Spuren von Adhäsion sowie einen Abtrag der Oxidschicht auf. Die Graphitausscheidungen sind auf der verschlissenen oxidierten Umlenkrolle sichtbar. Dazu wurde auf die oxidierte Umlenkrolle eine feinkörnige Polierpaste aufgebracht und die Oberfläche anschließend auf einer Drehmaschine bearbeitet. Innerhalb von etwa zehn Sekunden ließ sich die Oxidschicht vollständig abtragen, sodass der darunterliegende Gusswerkstoff mit seinen Graphitausscheidungen freigelegt wurde (Bild 6).

Bei einer erhöhten Ziehgeschwindigkeit von $v_2 = 20 \text{ mm/s}$ nimmt die Adhäsion ab und es sind weniger Graphitausscheidungen vorhanden. Die elektrochemisch phosphatierte Umlenkrolle zeigt im Vergleich zur chemisch oxidierten Variante eine deutlich ausgeprägtere Adhäsion. Das Verschleißbild verbessert sich mit erhöhter Ziehgeschwindigkeit (v_2) in einem geringeren Maß als bei der oxidierten Variante. Die mechanische Belastbarkeit der Beschichtung ist bei der elektrochemisch phosphatierten Umlenkrolle höher als bei der oxidierten.

3.1.2 Streifenziehversuch mit Umlenkung in Versuchsreihe 2

Nach Abschluss der ersten Versuchsreihe wurde die chemisch oxidierte Beschichtung aufgrund ihrer geringeren mechanischen Belastbarkeit und höheren Reibwerte im Vergleich zu der elektrochemischen Beschichtung nicht weiter betrachtet. Zu diesem Zweck wurde eine neue elektrochemische Phosphatschicht mit einer Schichtdicke von 4–6 µm auf die Umlenkrolle und Flachbacken aufgebracht und anschließend oberflächlich glattpoliert. Dieser Bearbeitungsschritt führte jedoch zur Rissbildung sowie zum teilweisen Ausbrechen von Eisenphosphat-Kristalliten, wobei die resultierende Oberflächenrauheit Ra bei den Umlenkrollen im Bereich von 1–2 µm und bei den Flachbacken im Bereich von 1,7–3,9 µm lag.

Ziel der zweiten Versuchsreihe war es, die Adhäsion auf dem Werkzeug zu reduzieren. Dafür wurden die Versuchsparameter angepasst. So wurde die höhere Ziehgeschwindigkeit von $v_2 = 20 \text{ mm/s}$ gewählt. Diese Entscheidung basierte auf den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe, in der höhere Geschwindigkeiten zu geringeren Reibwerten und gleichzeitig zu einer reduzierten Adhäsion an der Materialoberfläche führten. Um thermische Einflüsse auszuschließen, wurden die Werkzeuge in dieser Reihe nicht aufgeheizt. Zudem wurde die Flächenpressung von $p = 8,75 \text{ MPa}$ auf $p = 5,83 \text{ MPa}$ verringert, um die Adhäsionsneigung weiter zu minimieren. Bild 7 zeigt die Reibwerte der Umlenkrollen mit unterschiedlichen Aluminiumblechwerkstoffen für die zweite Versuchsreihe sowie die dazugehörigen Versuchsparameter.

Die Reibwertergebnisse der zweiten Versuchsreihe sind aufgrund geänderter Versuchsbedingungen nicht mit denen der ersten Versuchsreihe vergleichbar. Es zeigt sich insgesamt, dass sowohl die Walzwerksbeölzung als auch der verwendete Blechwerkstoff einen deutlichen Einfluss auf den Reibwert haben. Die Kombination aus EN AW-6016 und dem Korrosionsschutzmittel Ferrocoat N 6130 wies mit $\mu = 0,16$ den höchsten Reibwert auf. Etwas niedrigere, jedoch identische Reibwerte von $\mu = 0,14$

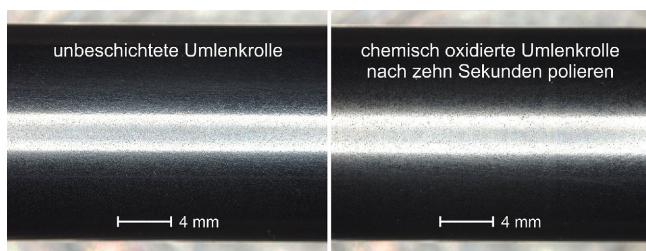


Bild 6 Unbeschichtete Umlenkrolle (links) und oxidierte polierte Umlenkrolle nach zehn Sekunden polieren. Foto: IFUM

wurden sowohl für EN AW-6016 mit Korrosionsschutzmittel als auch für EN AW-5182 mit Trockenschmierstoff gemessen. Der niedrigste Reibwert von $\mu = 0,11$ wurde bei der Kombination aus EN AW-6016 und Trockenschmierstoff erreicht. Im Vergleich zum Referenzwert bei Verwendung unbeschichteter Umlenkrollen ($\mu = 0,21$) konnte der Reibwert somit um bis zu 48 % reduziert werden. Bild 8 zeigt die Verschleißaufnahmen von phosphatierten Umlenkrollen aus der zweiten Versuchsreihe.

Nach nur einem Versuch weisen alle phosphatierten Umlenkrollen weiterhin eine hohe Adhäsion auf. Das Verschleißbild auf den Rollenoberflächen ist uneinheitlich und variiert je nach verwendetem Blechwerkstoff. Besonders auffällig ist die Umlenkrolle, die mit dem Blechwerkstoff EN AW-6016 Ferrocoat N 6130 (Korrosionsschutz) getestet wurde: sie zeigt die ausgeprägtesten Verschleißspuren. Deutlich sind Kaltaufschweißungen vom Aluminiumblechmaterial erkennbar. Dieses Ergebnis korreliert mit dem höchsten gemessenen Reibwert von $\mu = 0,16$. Im Gegensatz dazu weist die Umlenkrolle, welche mit dem Blechwerkstoff EN AW-6016 Anticorit PL 39 SX (Trockenschmierstoff) untersucht wurde, den niedrigsten Reibwert von $\mu = 0,11$ auf. Die Umlenkrollen, die mit EN AW-6016 Anticorit RP 4107 LV (Korrosionsschutz) sowie EN AW-5182 Anticorit PL 39 SX (Trockenschmierstoff) getestet wurden, zeigen jeweils identische Reibwerte von $\mu = 0,16$, jedoch deutliche Unterschiede im Verschleißbild.

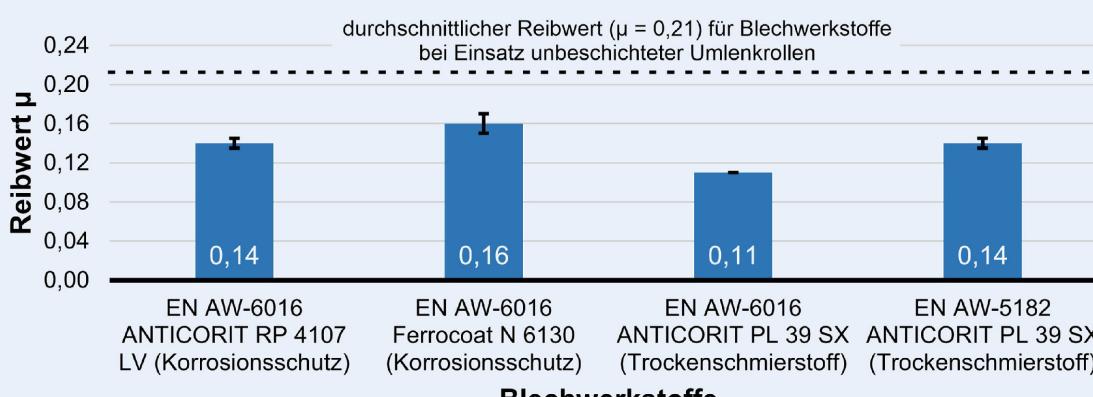


Bild 7 Reibwerte im Streifenziehversuch mit Umlenkung für Versuchsreihe 2. Grafik: IFUM

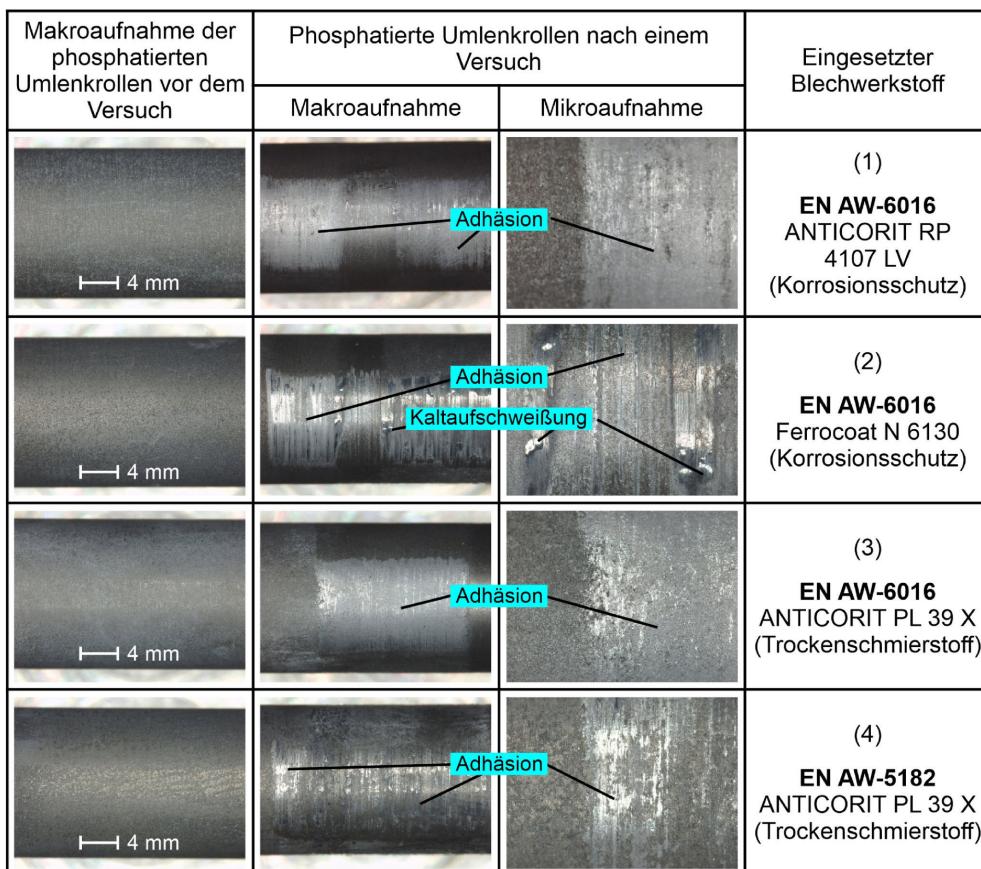


Bild 8 Verschleißaufnahmen von phosphatiertem Umlenkrollen aus der zweiten Versuchsreihe. Foto: IFUM

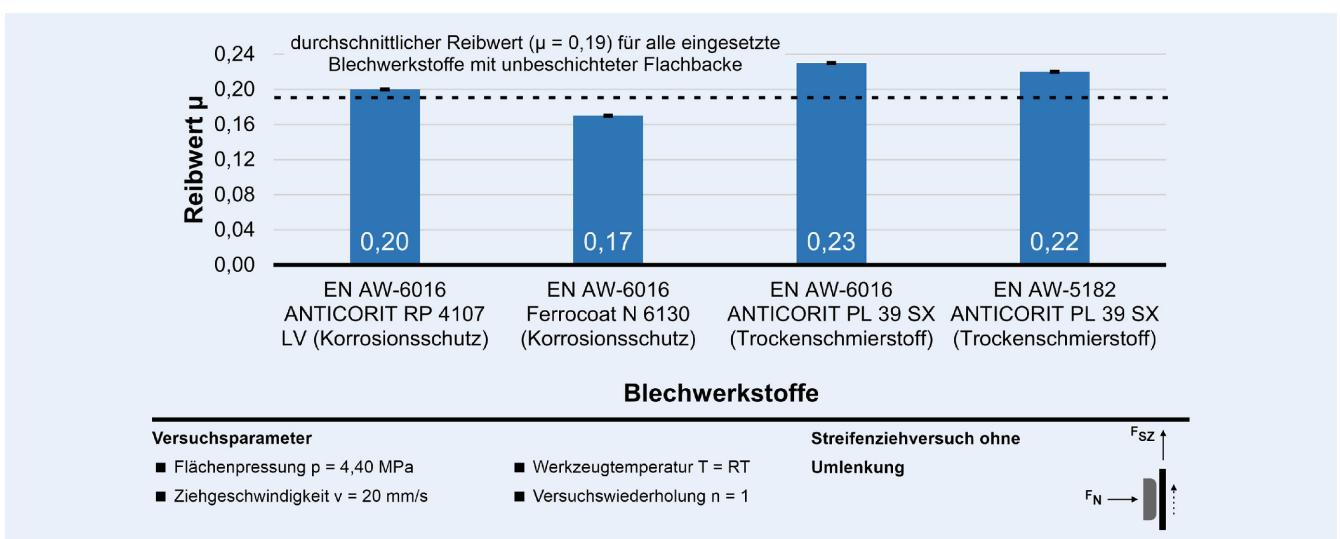


Bild 9 Reibwerte im Streifenziehversuch ohne Umlenkung für Versuchsreihe 2. Grafik: IFUM

3.1.3 Streifenziehversuch ohne Umlenkung in Versuchsreihe 2

Die Reibbacken weisen mit einer Oberflächenrauheit von $R_a = 1,7$ bis $3,9 \mu\text{m}$ im Vergleich zu den Umlenkrollen ($R_a = 1-2 \mu\text{m}$) eine deutlich höhere Rauheit auf. Eine wesentliche Ursache liegt wohl in der Benetzungskaracteristik der Phosphatlösung auf der ebenen Fläche der Reibbacken, die ein größeres Kristallwachstum begünstigt. Zusätzlich tragen lokale Graphitausscheidungen im

eingesetzten Gusswerkstoff zur Erhöhung der Oberflächenrauheit bei, da sie eine gleichmäßige Schichtbildung behindern. Da trotz niedrigerer Rauheit eine hohe Adhäsion an den Umlenkrollen festgestellt wurde, wurde in Versuchsreihe 2 die Flächenpressung leicht reduziert. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sowie die zugehörigen Versuchspараметer sind in **Bild 9** dargestellt.

In diesem Versuch konnte für jede phosphatierte Reibbacke der Versuch lediglich einmal wiederholt werden. Grund dafür war der schnelle Verschleiß der Phosphatschicht an den Reibbacken

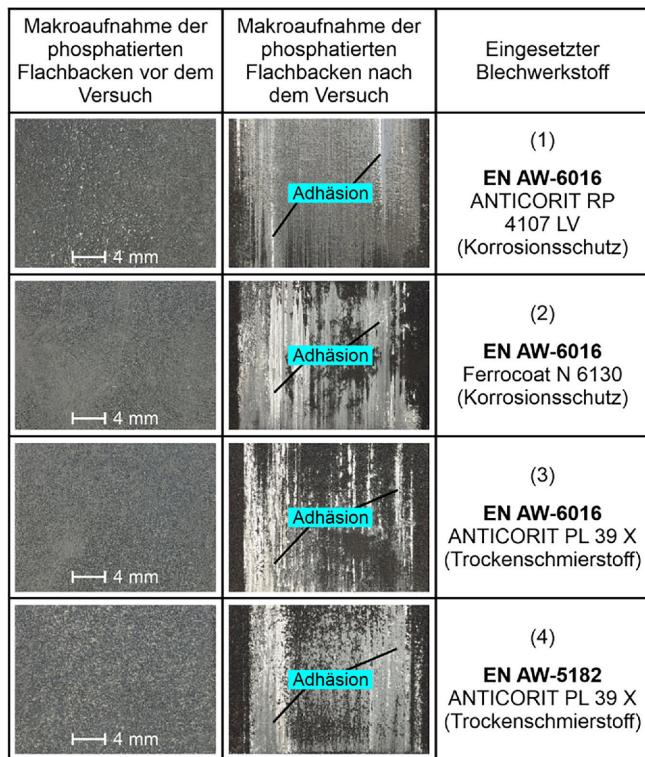


Bild 10 Verschleißaufnahmen von phosphatierten Flachbacken aus der zweiten Versuchsreihe. Foto: IFUM

bereits nach einem einzelnen Versuch (siehe unten Bild 10). Der durchschnittliche Reibwert aller getesteten Kombinationen mit unbeschichteten Reibbacken beträgt $\mu = 0,19$ (gestrichelte Linie in Bild 9). Mit phosphatierten Reibbacken konnte der niedrigste Reibwert bei der Kombination EN AW-6016 mit dem Korrosionsschutzmittel Ferrocoat N 6130 erzielt werden ($\mu = 0,17$). Dieser Wert liegt leicht unter dem durchschnittlichen Reibwert und deutet auf ein günstiges Reibverhalten hin. Für die übrigen Blechwerkstoffe wurden höhere Reibwerte gemessen, wobei die Kombination EN AW-6016 mit dem Trockenschmierstoff den höchsten Wert ($\mu = 0,23$) aufwies. **Bild 10** zeigt die Verschleißaufnahmen der phosphatierten Flachbacken aus der zweiten Versuchsreihe.

Die makroskopischen Aufnahmen der phosphatierten Flachbacken nach dem Versuch zeigen deutliche Unterschiede im Verschleißbild, wobei die Intensität der Aluminiumübertragung und die Homogenität des Verschleißbilds je nach Blechmaterial und Schmierstoff stark variieren. Im Fall von EN AW-6016 mit Anticorit RP 4107 LV (1) ist das Verschleißbild durch gleichmäßig flächige Adhäsion geprägt. Deutlich intensiver wirkt das Bild bei EN AW-6016 mit Ferrocoat N 6130 (2). Hier ist eine starke, teilweise flächendeckende Ablagerung von Aluminium sichtbar. Diese Kombination weist den höchsten Verschleiß aller gezeigten Aufnahmen auf, jedoch wurde in diesem Versuch der geringste Reibwert von $\mu = 0,17$ ermittelt. Das deutet darauf hin, dass ein niedriger Reibwert nicht zwangsläufig mit geringem Verschleiß einhergeht. Die Flachbacke, nach dem Versuch mit dem Blechwerkstoff EN AW-6016 Anticorit PL 39 SX (3), zeigt ein raues, kontrastreiches Verschleißbild mit stark ausgeprägten Abriebstreifen im linken Bereich, was auf eine intensive Wechselwirkung zwischen Blech und Werkzeug hinweist. Bei der Kombi-

nation EN AW-5182 mit Anticorit PL 39 SX (4) zeigt sich ein ähnlich intensives Verschleißmuster wie zuvor, jedoch wirken die Aluminiumübertragungen feinkörniger und sind im äußeren Bereich (links und rechts) stärker ausgeprägt.

3.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Dieses Kapitel stellt die REM-Aufnahmen der Reibbacken mit Phosphatschicht (**Bild 11** und **Bild 12**) aus Versuchsreihe 2 dar.

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen der Oberfläche des Gusswerkstoffs EN-GJS-700-2 zeigen, dass die Substratoberfläche vollständig mit unregelmäßig geformten Phosphatkristallen bedeckt ist (Bild 11 a). Aufgrund von Graphitausscheidungen auf der Metalloberfläche, welche die elektrochemische Phosphatierung lokal beeinflussen, entstehen Fehlstellen, an denen das Grundmaterial sichtbar wird (Bild 11 b). Die mechanische Belastung der phosphatierten Oberfläche (Bild 11 c und d), führt zu einer Abtragung der oberen Kristallschichten. Durch die Reibung zwischen dem phosphatierten Werkzeug und dem bearbeiteten Material während des Tiefziehvorgangs kommt es regional zu einem Verschmieren entlang der Bewegungsrichtung durch die Abtragung von Aluminium, welches auf der Oberfläche verbleibt.

In Bild 12 a ist eine Übersichtsaufnahme mit 50-facher Vergrößerung einer elektrochemisch phosphatierten und anschließend polierten Oberfläche dargestellt.

Das Polieren führt zu einer sichtbaren Abtragung der Spitzen der Zink-Eisen-Phosphat-Kristalle, wodurch die Oberflächenmorphologie teilweise homogenisiert wird (Bild 12 b). Die tieferen Täler zwischen den Phosphatkristallen bleiben von dem Polieren unberührt. Bedingt durch die Täler zwischen den Kristallen sowie der unterschiedlichen Größe und Form der Phosphatkristalle und den vorhandenen Fehlstellen, bedingt durch Graphitausscheidungen des Grundmaterials, bleiben die Rauheiten der Oberflächen auf dem Niveau der ungeschliffenen Proben. Durch den Verschleiß wurden die oberen Schichten der Phosphatkristalle ungleichmäßig auf der gesamten Oberfläche abgetragen (Bild 12 c). Teilweise wurde die Phosphatschicht streifenförmig vollständig abgetragen, wodurch der Grundwerkstoff in Erscheinung tritt. Die Ergebnisse des Element-Mappings (Bild 12 d) zeigen, dass Aluminium durch den mechanischen Abrieb in den Tälern zwischen den Phosphatkristallen haften bleibt, hingegen bleiben die geschliffenen Plateaus frei von einem Aluminiumübertrag.

4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde das Potenzial von reibungsrreduzierenden Werkzeugoberflächen für das Tiefziehen der Aluminiumlegierungen EN AW-5182 und EN AW-6016 untersucht. Es kamen chemisch oxidierte und elektrochemisch phosphatierte Beschichtungen zum Einsatz, die auf einen Gusswerkstoff (EN-GJS-700-2) aufgebracht wurden. Ziel war, die Reibungscharakteristik der Beschichtungen zu analysieren und die optimalen Prozessparameter zu ermitteln, um die Schichtentwicklung zu verbessern. Zur Bewertung wurden Streifenziehversuche mit und ohne Umlenkung unter Variation der Versuchsparameter durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass unbeschichtete Werkzeuge die höchsten Reibwerte aufweisen. Chemisch oxidierte Werkzeuge boten eine moderate Verbesserung, zeigten jedoch eine geringere

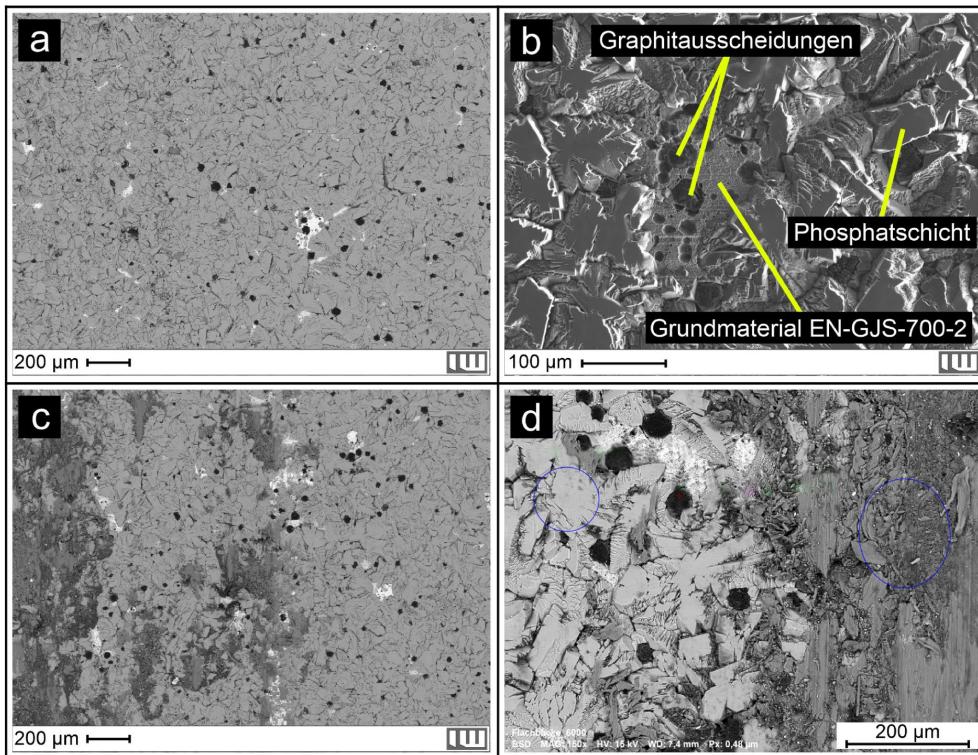


Bild 11 REM (rasterelektronenmikroskopische)-Aufnahmen der elektrochemisch erzeugten Phosphatschicht vor der Reibuntersuchung (a und b) sowie nach der durchgeföhrten Reibuntersuchung (c und d). Foto: IW

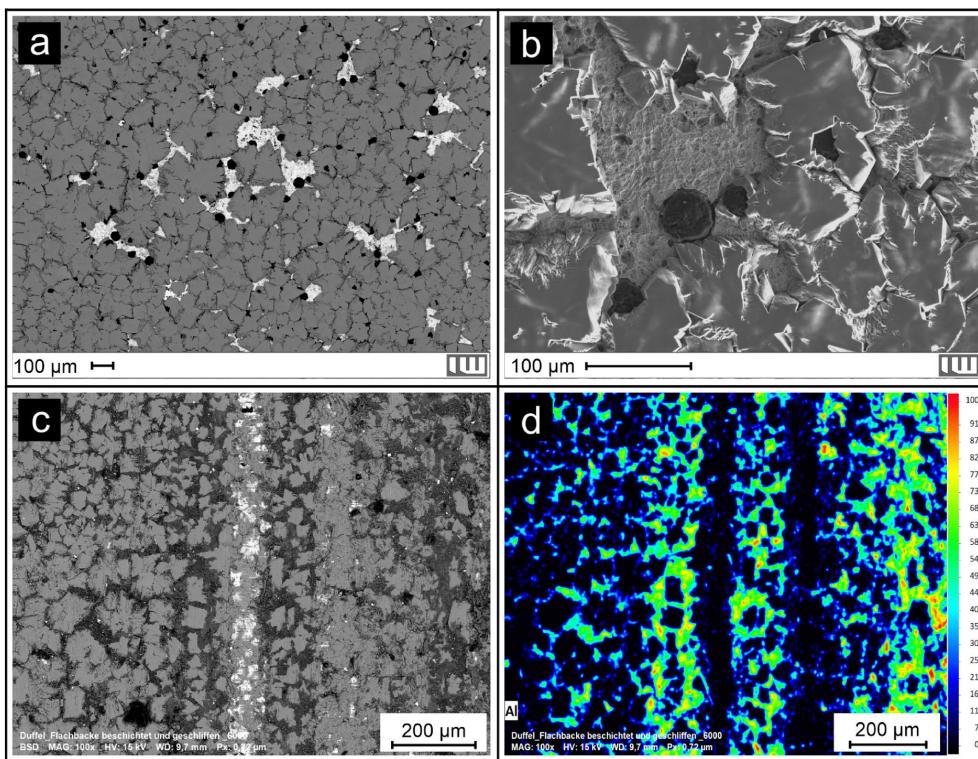


Bild 12 REM-Aufnahmen der elektrochemisch phosphatierten und polierten Oberfläche vor der mechanischen Belastung (a und b) und die phosphatierte Oberfläche nach der Belastung (c) sowie das Element Mapping der Oberfläche für das Element Aluminium (d). Foto: IW

mechanische Belastbarkeit. Deutlich bessere Ergebnisse wurden mit elektrochemisch phosphatierten Werkzeugen erzielt: In der ersten und zweiten Versuchsreihe wurden Streifenziehviersuche mit Umlenkung durchgeführt, wobei in der zweiten Versuchsreihe zudem Versuche ohne Umlenkung erfolgten. Die phosphatierten Beschichtungen ermöglichten in der ersten Versuchsreihe

eine Reibwertreduzierung von 35 % im Vergleich zu unbeschichteten Werkzeugen. In der zweiten Versuchsreihe konnte der Reibwert bis zu 48 % gesenkt werden. In der zweiten Versuchsreihe des Streifenziehviersuchs ohne Umlenkung wurde die Flächenpressung von 8,75 auf 5,83 MPa reduziert. Zusätzlich erfolgte die Versuchsdurchführung bei Raumtemperatur, um die Adhäsions-

neigung zu minimieren. Diese Modifikationen führten zu einer Reduktion der Reibwerte, minderten aber die Prozessnähe, da in industriellen Umformprozessen üblicherweise höhere Flächenpressungen auftreten. Bei den Versuchen ohne Umlenkung wurden jedoch erhöhte Reibwerte festgestellt, was auf die höhere Oberflächenrauheit der verwendeten Reibbacken zurückgeführt werden konnte.

Trotz der signifikanten Reibwertreduktion ist die Adhäsion von Aluminium an den reibungsreduzierenden Werkzeugoberflächen weiterhin eine Herausforderung. Durch REM- und lichtmikroskopische Analysen konnte festgestellt werden, dass Aluminiumrückstände vornehmlich in Bereichen mit unvollständig ausgebildeter Phosphatschicht vorhanden waren. Diese Anreicherung wurde durch lokale Inhomogenitäten begünstigt, die ihrerseits auf Graphitausscheidungen im Gusswerkstoff zurückzuführen sind. Die Studie zeigt das Potenzial phosphatisierter Werkzeugoberflächen zur Reduktion von Reibung in der Blechumformung. Gleichzeitig besteht Optimierungsbedarf hinsichtlich Schichtgleichmäßigkeit, Adhäsionsverhalten und Verschleißfestigkeit.

Langfristig können solche Ansätze zur Entwicklung umweltfreundlicherer und wirtschaftlicherer Tiefziehprozesse beitragen. Zur Minimierung der Adhäsion wird ein Ansatz verfolgt, bei dem die Werkzeugrauigkeit signifikant reduziert, die Oberfläche poliert und eine dünnerne Phosphatschicht appliziert wird. Aufgrund der Graphitausscheidungen im Gusswerkstoff ist eine vollständige Konversionsschicht nicht realisierbar. Daher werden Aluminiumüberträge durch Streifenziehversuche an diese Fehlstellen erzeugt und im Anschluss eine feinkristalline Nachbeschichtung aufgebracht.

FÖRDERHINWEIS

Das IGF (Industrielle Gemeinschaftsforschung)-Vorhaben „Erzeugung und Charakterisierung von reibungsreduzierten oxidischen Werkzeugbeschichtungen für die trockene Aluminiumblechumformung“ der Forschungsvereinigung EFB (Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V.) wurde unter der Fördernummer 01IF22659N über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- [1] Li, S.: Sheet Metal Deep Drawing for Making Metallic Parts and Structures. Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys 4 (2022), pp. 182–196
- [2] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2020
- [3] Weihnacht, V.; Brückner, A.; Bräunling, S.: ta-C beschichtete Werkzeuge für die Trockenumformung von Aluminiumblechen. Vakuum in Forschung und Praxis 20 (2008) 3, S. 6–10
- [4] Flegler, F.; Groche, P.; Abraham, T. et al.: Dry Deep Drawing of Aluminum and the Influence of Sheet Metal Roughness. JOM 72 (2020) 7, pp. 2511–2516, doi.org/10.1007/s11837-020-04173-w
- [5] Groche, P.; Resch, F.: Dry forming of aluminum alloys – Wear mechanisms and influencing factors. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 46 (2015) 8, pp. 813–828
- [6] Adamus, J.; Więckowski, W.; Lacki, P.: Analysis of the Effectiveness of Technological Lubricants with the Addition of Boric Acid in Sheet Metal Forming. Materials (Basel, Switzerland) 16 (2023) 14, #5125, doi.org/10.3390/ma16145125
- [7] Henneberg, J.; Merklein, M.: Investigation on the Wear Behavior of Coatings for Lubricant-Free Deep Drawing Processes with a Novel Application-Oriented Test Rig. Defect and Diffusion Forum 404 (2020), pp. 11–18
- [8] Yilmaz, D.; Almohallami, A.; Wulff, D. et al.: New Specimen Design for Wear Investigations in Dry Sheet Metal Forming. Dry Metal Forming Open Access Journal FMT 2 (2016), pp. 62–66
- [9] Müller, P.; Holländer, U.; Lendiel, I. et al.: Lubricant savings in sheet metal forming through thermally oxidized wear protection layers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1307 (2024) 1, #12003
- [10] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Berlin, Heidelberg: Springer 1998
- [11] Giesserei Hegi AG: Technisches Merkblatt. Gusseisen mit Kugelgraphit nach DIN EN 156. Internet: heg.ch/media/1019/gjs-400_700.pdf. Zugriff am 09.09.2025
- [12] Römhild & Mölle: Gusseisen mit Kugelgraphit. Internet: www.roemheld-moelle.de/wp-content/uploads/2020/10/Sphaeroguss-EN1563.pdf. Zugriff am 09.09.2025
- [13] VDA 230–213: Prüfverfahren für die Produktklassen Prelube, Prelube 2, Hotmelt, Spot Lubricant. Deutsche Fassung, Ausgabe 08/ 2022
- [14] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Heidelberg: Springer 2016

Sipan Ceto, M.Sc.  ceto@ifum.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Sven Hübner 

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens 

Leibniz Universität Hannover
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.ifum.uni-hannover.de

Dr. rer. nat. Ulrich Holländer 
hollaender@iw.uni-hannover.de

Alexander Schnettger, M.Sc. 

Leibniz Universität Hannover
Institut für Werkstoffkunde
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.iw.uni-hannover.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)