

# Tribologisches Einsatzverhalten von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten (DLC) auf Werkzeugstahl gegenüber Stahl- und Aluminiumblechwerkstoffen für Trockentiefziehprozesse

Rong Zhao, Stephan Tremmel

## Zusammenfassung

Aufgrund des wachsenden Umweltbewusstseins und begrenzter Erdölressourcen wird eine Reduzierung von oder sogar der komplette Verzicht auf Schmieröl bei Umformprozessen angestrebt. Dadurch wird der kostenintensive und teils umweltschädliche Arbeitsschritt zur Entfernung des auf dem Blech verbleibenden Schmieröls eingespart. Im Rahmen dieses Beitrags werden wolframmodifizierte wasserstoffhaltige amorphe Kohlenstoffschichten (a-C:H:W) und tetraedrische wasserstofffreie amorphe Kohlenstoffschichten (ta-C) als zwei potenzielle Kandidaten für die Beschichtung von Tiefziehwerkzeugen für die Trockenumformung untersucht. Hauptziel ist es, adhäsiven Materialübertrag, insbesondere bei Aluminiumlegierungen, auf die Werkzeugoberfläche zu minimieren. Hierzu wurden a-C:H:W- und ta-C-Dünnschichten auf gehärteten Werkzeugstahlflächen (1.2379, 60 HRC) abgeschieden. Anschließend wurden die Schichten hinsichtlich ihrer Schichtdicke, mechanischen Eigenschaften sowie Oberflächentopographie charakterisiert. Das Verschleißverhalten im trockenen Gleitkontakt gegenüber den Blechwerkstoffen DC04 (verzinkt), AA6014 wurde mittels eines Ring-Scheibe-Tribometers geprüft. Während des Laufs wurden unterschiedliche dominierende Verschleißmechanismen beobachtet, die wiederum die Reibungszahlen stark beeinflussen. Eine wesentliche Einflussgröße stellt die Oberflächenrauheit der Werkzeugoberflächen nach dem Beschichtungsprozess und im Weiteren die Verhakung der Rauheitsspitzen im weichen Blechmaterial (Zink, Aluminium) dar.

*Schlagwörter:* Diamantähnlicher amorpher Kohlenstoff, Trockenumformen, Ring-Scheibe-Versuch

## Abstract

Due to growing environmental awareness and global limited oil resources, an innovated forming process with a reduction or even completely abandonment of lubricants in the metal-forming process is desired. The disadvantages of the traditional forming process are, on one side, the cost-intensive and environmental polluted work step to remove the remaining lubricant on the formed workpiece, on the other hand, the requirement of a large amount of lubricant oils. In this work tungsten modified hydrogenated amorphous carbon coatings (a-C:H:W) and tetrahedral hydrogen-free amorphous carbon coatings (ta-C) as two potential candidates for dry forming tools would be tested. Besides the control of material flow, another task of the DLC coatings is to minimize the adhesive wear on the tool surface, especially the severe aluminum adhesion. For this purpose a-C:H:W and ta-C coatings were deposited on tool steel substrate (1.2379, 60 HRC). Both DLC coatings were then characterized concerning their thickness, mechanical properties and surface roughness. Their wear behavior in the dry sliding contact was investigated against sheet materials DC04 (galvanized) and AA6014 using a ring-on-disc tribometer. During the sliding process different wear mechanisms were observed, which in turn affects the coefficient of friction. An important reason for this is the increasing surface asperities during the deposition process and subsequently the sharp tips interlock with soft sheet material, e.g. zinc, aluminum.

*Keywords:* DLC (diamond-like carbon), dry forming, ring-on-disc-test

# 1. Einleitung

Aufgrund der begrenzten natürlichen Ressourcen und des wachsenden Umweltbewusstseins ist heute Nachhaltigkeit in der Produktion einer der wichtigsten Grundsätze. Aus diesem Grund wird stets ein energiesparender Produktionsprozess mit möglichst hoher Effizienz angestrebt. Außerdem soll der kostenintensive und oftmals ökologisch bedenkliche Arbeitsschritt zur Entfernung des auf dem umgeformten Werkstück verbleibenden Schmieröls eingespart werden. Vor diesem Hintergrund werden derzeit innovative Umformprozesse ohne Verwendung traditioneller Schmierstoffe – sogenannte Trockenumformprozesse entsprechend der Definition von VOLLERTSEN [1] – entwickelt. Das Hauptproblem während des trockenen Umformens stellen der direkte Werkzeug-Werkstück-Kontakt und die daraus resultierenden intensiven tribologischen Interaktionen dar, die sich z. B. in hohen Reibungszahlen und starkem adhäsiven Verschleiß äußern. Ein Lösungsansatz stellt die Neuentwicklung eines segmentierten Umformwerkzeugs mit lokal angepassten tribologischen Bedingungen auf den Werkzeugoberflächen dar. Dadurch wird einerseits der Werkstofffluss gezielt gesteuert, andererseits adhäsiver Verschleiß (Kaltaufschweißungen) deutlich vermindert. Durch PVD-/PACVD-Verfahren hergestellte amorphe Kohlenstoffschichten ermöglichen die Erzeugung vielfältiger tribologischer Bedingungen, da sie eine vorteilhafte Kombination von niedriger Reibungszahl und vergleichsweise hohem Verschleißwiderstand unter trockenen Bedingungen aufweisen. So zeigen laut HETZNER [2] wolframmodifizierte wasserstoffhaltige amorphe Kohlenstoffschichtensysteme (a-C:H:W) in Kugel-Scheibe-Tribometer-Versuchen gegen 100Cr6 ohne Schmierstoff Reibungszahlen zwischen 0,1 und 0,3. Tetraedrische wasserstofffreie amorphe Kohlenstoffschichtensysteme (ta-C) weisen nach RONKAINEN [3] gegen Stahl ohne Schmierstoff unter variierten Belastungen und Gleitgeschwindigkeiten Reibungszahlen zwischen 0,1 und 0,2 auf. Zudem gewährleistet dieses Schichtsystem aufgrund seiner extrem hohen Härte einen sehr guten Schutz der Werkzeugoberfläche gegen abrasiven Verschleiß [4].

In dieser Arbeit werden daher verschiedene a-C:H:W- und ta-C-Schichten als zwei potenzielle Kandidaten für die Beschichtung von Werkzeugen für die Trockenblechumformung untersucht. Hierzu wurde eine spezielle Ring-auf-Scheibe-Vorrichtung realisiert, die die Untersuchung des tribologischen Verhaltens im trockenen Fläche-Fläche-Gleitkontakt erlaubt, was dem bei Blechumformprozessen vorliegenden Kontakt eher ähnelt als die weit verbreiteten Kugel-Scheibe-Gleitkontakte.

## 2. Experimentelles

### 2.1 Proben und Beschichtungsprozess

Die für die a-C:H:W-Schichten verwendeten Substrate sind ringförmig, mit Innen- und Außendurchmesser von 10 mm und 20 mm aus Werkzeugstahl 1.2379, welcher auf  $60 \pm 1$  HRC beschichtungsgerecht gehärtet wurde. Anschließend erfolgte in mehreren Stufen ein Flachsleifen und Polieren der Substrate auf eine Oberflächengüte  $R_z = 0,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$  beziehungsweise  $R_{pk} = 0,10 \pm 0,01 \mu\text{m}$ , was einer typischen Werkzeugoberflächengüte bei konventionellen Blechumformprozessen entspricht. Unmittelbar vor der Chargierung in der Beschichtungsanlage wurden die Stahlproben mit Propanon im Ultraschallbad 10 Minuten gereinigt und in einem Vakuumofen getrocknet. Vor der eigentlichen Schichtabscheidung wurden die zu beschichtenden Oberflächen argonplasmageätzt, um feinste Verunreinigungen und Gasmoleküle sowie Oxidschichten an der Oberfläche zu entfernen.

Das hergestellte a-C:H:W-Schichtsystem besteht, der neuen DIN 4855 [5] folgend aus einer Cr-Haftschrift, einer WC-Zwischenschicht und einer a-C:H:W-Funktionsschicht.

Als Beschichtungsverfahren kamen für die Cr-Haftschrift Lichtbogenverdampfen und für die WC-Zwischenschicht Magnetronspütern zum Einsatz. Für die Herstellung der Funktionsschicht wurde reaktives Spütern von binderfreiem Wolframkarbid auf einer mit 40 kHz gepulsten Quelle in C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-Ar-Atmosphäre eingesetzt. Die an die Substrate angelegte negative Vorspannung (Bias) und der Argonfluss wurden jeweils auf einem niedrigen, mittleren und hohen Niveau variiert. Die Abscheidezeit wurde so eingestellt, dass jeweils eine Schichtdicke von 4 bis 5 µm zu erwarten ist. Alle anderen Prozessparameter blieben unverändert. Die Prozessparameter sind im Einzelnen in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1 Prozessparameter der jeweiligen a-C:H:W-Schichtvarianten**

Bezeichnungen der Proben	$U_{\text{bias}}$ in V	$\phi(\text{Ar})$ in sccm	$\phi(\text{C}_2\text{H}_2)$ in sccm	$P_{\text{target}}$ in kW	$\vartheta_{\text{kammer}}$ in °C
C01	57	128			
C02	57	232			
C03	130	180	40	1,4	100
C04	203	128			
C05	203	232			

Das erzeugte ta-C-Schichtsystem besteht aus einer Cr-Haftschrift und einer ta-C-Funktionsschicht. Die Herstellung der Cr-Haftschrift erfolgte durch Spütern eines Cr-Targets. Die ta-C-Schicht wurde in einer mit einem Filter-Laser-Arc Modul [6] ausgestatteten Beschichtungsanlage abgeschieden. Als Target dient dabei eine rotierende Graphitwalze, die mit kurzen, fokussierten Laserpulsen linienhaft abgerastert wird, so dass über die Walzenoberfläche verteilt Lichtbögen gezündet werden können. Zusätzlich ist ein magnetischer Filter vorgesehen, der die Makropartikelbildung weiter reduziert und dadurch die Erzeugung vergleichsweise glatter ta-C-Schichtoberflächen gewährleistet. Nach dem Beschichtungsprozess wurden die ta-C-Proben durch Lappen mit Diamantpaste mit 3 µm Korngröße nachbehandelt.

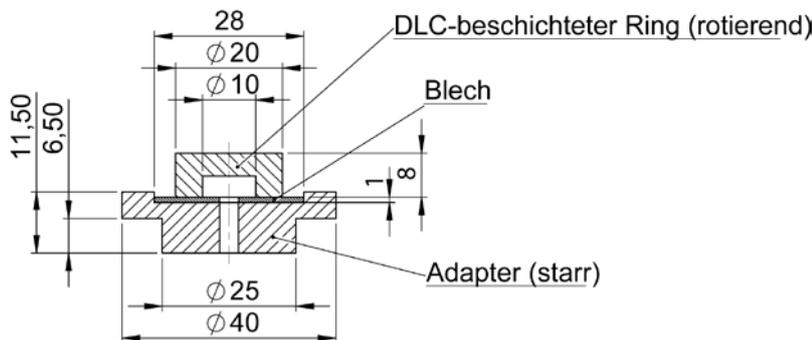
## 2.2 Charakterisierungsverfahren

Nach Durchführung der Beschichtungsprozesse wurden die Proben zunächst bezüglich ihrer Schichtmorphologie und Oberflächentopographie mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Tastschnitts untersucht. Die Haftfestigkeit der Schichten auf dem Substrat wurde qualitativ mit Hilfe des ROCKWELL C-Eindringtests nach DIN EN ISO 56443 [7] bewertet. Die Schichtdicke wurde mittels des Kalottenschleifverfahrens nach DIN EN 1071-2 [8] ermittelt. Die Mikrohärtigkeit und der Eindringmodul der Schichten wurde nach DIN EN ISO 14577 [9] unter Verwendung eines Vickers-Eindringkörpers.

## 2.3 Tribologische Untersuchung

Das tribologische Verhalten der beiden Schichtsysteme gegen Stahl- und Aluminiumblechwerkstoffe im trockenen Kontakt wurde in einem Ring-Scheibe-Tribometer untersucht. Der Blechwerkstoff mit einer Stärke von 1 mm wurde auf einem Adapter fixiert. Der beschichtete Ring wurde oben in einem Halter befestigt und rotiert im Versuch unter definierter Geschwindigkeit. Der gesamte Aufbau ist im Bild 1 dargestellt. Jede Probe wurde unter den in Tabelle 2 aufgeführten Bedingungen getestet. Jeder Versuch

wurde dreimal wiederholt. Als Referenzversuch wird jeweils der blanke Ring gegen die verschiedenen Blechwerkstoffe gefahren.



**Bild 1 Schematischer Aufbau des Ring-Scheibe-Tribometers**

**Tabelle 2 Prüfparameter im Ring-Scheibe-Versuch**

Parameter	Wert
Grundkörper	Quadratisch Bleche (Stärke: 1 mm): DC04 (verzinkt), AA6014
Gegenkörper	Ring (Ø10/20 mm): a-C:H:W, ta-C
Bewegungsmodus	rotatorisch, kontinuierlich
Normalkraft	500 N ( $\cong$ 2,1 MPa)
Gleitgeschwindigkeit	0,1 m/s

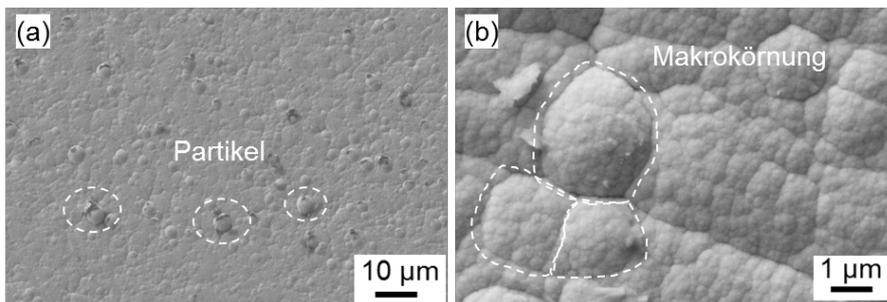
Ausgewählte Verschleißspuren wurden im Anschluss an den Tribometerversuch mittels fokussierten Ionenstrahls (FIB) geschnitten und der Bereich unterhalb der jeweiligen Verschleißspur mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) untersucht.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Schichtmorphologie, Schichtdicke und Oberflächentopographie

Bild 2 zeigt REM-Aufnahmen einer charakteristischen a-C:H:W-beschichteten Oberfläche im Ausgangszustand. Zu beobachten sind in Bild 2 (a) kleinere Unebenheiten infolge der Schichtkörnung und einzelner Partikel. Werden in Bild 2 (b) die Strukturen näher beobachtet, so kann eine fraktale Geometrie der Schichtoberfläche erkannt werden, deren Grundeinheit aus einer mit WC-Nanopartikel eingebetteten amorphen C:H-Matrix besteht. [10] [11]

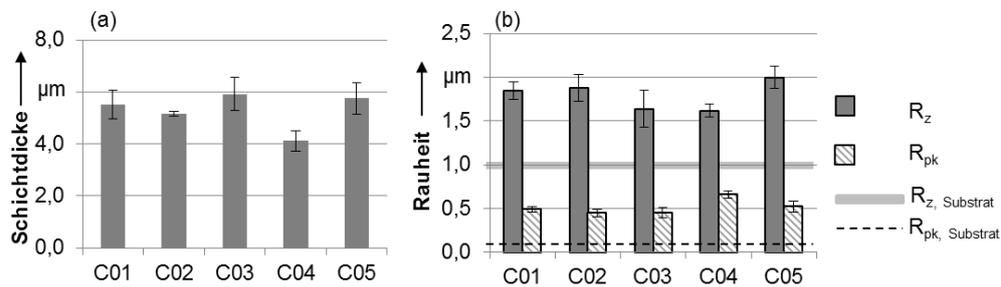
Gründe für die so ausgebildete Schichtoberfläche sind einerseits die raue, ursprüngliche Substratoberfläche, andererseits die prozessbedingte Makropartikelbildung in der Cr-Haftschrift. Die typische kolumnare Struktur der a-C:H:W-Schicht führt zusätzlich zur Bildung von Korngrenzen auf der Oberfläche, was diese Schichtmorphologie erklärt.



**Bild 2 REM-Aufnahme der (a) Morphologie und (b) Oberflächenstruktur der a-C:H:W-Schicht**

Die Rauheit der Schichtoberfläche ohne Nachbehandlung liegt im Bereich von  $R_z = 1,6 \dots 2,0 \mu\text{m}$  und  $R_{pk} = 0,43 \dots 0,66 \mu\text{m}$ , was fast dem doppelten  $R_z$ -Wert und etwa

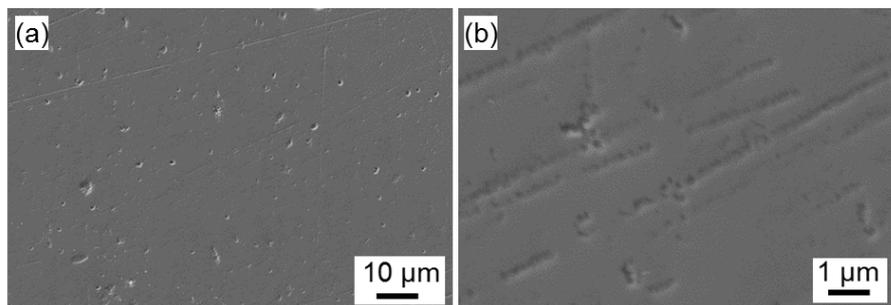
dem vierfachen  $R_{pk}$ -Wert der Ausgangsoberfläche entspricht. Die Schichtdicken der a-C:H:W-Schichtvarianten C01 bis C05 liegen im Bereich von 4,1...5,9  $\mu\text{m}$ . Die einzelnen Messwerte sind in Bild 3 zusammengefasst.



**Bild 3 (a) Schichtdicke und (b) Rauheit der a-C:H:W-Schichtvarianten**

Bild 4 zeigt REM-Aufnahmen einer charakteristischen ta-C-beschichteten Oberfläche. Auf dieser wurden keine deutlichen Strukturen außer geringfügigen Schleif-/Polierspuren infolge des Nachbehandlungsvorgangs detektiert. Die hergestellte ta-C-Schicht enthält über 85 %  $\text{sp}^3$ -hybridisierter Kohlenstoffverbindungen und weniger als 1 % Wasserstoff. Aufgrund ihres hohen Anteils der diamantähnlichen  $\text{sp}^3$ -Verbindungen zeichnet sich die ta-C-Schicht durch eine hohe Härte und Verschleißbeständigkeit aus. [12]

Die gesamte Schichtdicke des ta-C-Schichtsystems beträgt 1,33  $\mu\text{m}$ . Die Rauheit nach der Nachbehandlung betrug  $R_z = 0,26 \pm 0,01 \mu\text{m}$  und  $R_{pk} = 0,045 \pm 0,005 \mu\text{m}$ .



**Bild 4 REM-Aufnahme der (a) Morphologie und (b) Oberflächenstruktur der ta-C-Schicht**

### 3.2 Schichthaftung, Schichthärte und -elastizität

Die Haftfestigkeit aller a-C:H:W-Schichten wurden mit Klasse 2 bewertet. [7] In Tabelle 3 sind Vickershärte und Eindringmodul der Schichtvarianten zusammengefasst. Die a-C:H:W-Schichtvarianten verfügen demnach über eine Vickershärte zwischen 415 HV 0,002 und 652 HV 0,002, welche niedriger ist als die der verwendeten Stahlsubstrate. Im Vergleich zu dünneren Schichtvarianten, die unter ansonsten gleichen Abscheidebedingungen hergestellt wurden [13], nehmen die mechanischen Eigenschaften und die Schichthaftung ab.

Die hergestellte ta-C-Schicht verfügt über eine Vickershärte von 4650 HV 0,002. Die Haftfestigkeit wurde als Klasse 1 bewertet.

Tabelle 3 Mikrohärtigkeit und Eindringmodul der a-C:H:W- und ta-C-Schichtvarianten sowie des Stahlsubstrats

Bezeichnungen der Proben	Vickers Härte HV0,002	Eindringmodul $E_{IT}$ in GPa
C01	528,9 ± 77,6	55,9 ± 2,8
C02	415,8 ± 50,7	47,7 ± 2,4
C03	473,1 ± 89,5	58,4 ± 5,0
C04	652,5 ± 84,8	76,2 ± 5,0
C05	612,1 ± 84,0	65,9 ± 5,2
Stahlsubstrat	816,8 ± 58,4	209,1 ± 9,0
<b>ta-C</b>	<b>4836,8 ± 1140,9</b>	<b>276,2 ± 85,1</b>

### 3.3 Reibung und Verschleiß im Ring-Scheibe-Versuch

#### 3.3.1 Reibung

Wie in Bild 5 (a) dargestellt, liegt die Reibungszahl der a-C:H:W-Schichtvarianten gegen DC04 im Bereich von 0,52 bis 0,9. Davon zeigen die Schichtvarianten C02 und C03 niedrigere Reibungszahlen als der Referenzversuch. In Bild 6 wurde die mittlere Reibungszahl der a-C:H:W-Schichtvarianten gegen DC04 über den Wolframanteil in der jeweiligen Schichtvariante aufgetragen. Es fällt auf, dass die Schichtvariante C03 über den niedrigsten W-Anteil verfügt. Der niedrige W-Anteil in der Schicht führt aufgrund der niedrigeren metallischen Adhäsionsneigung zu geringen Zn/Fe-Anhaftungen auf der Werkzeugoberfläche und resultiert im Weiteren in einem günstigeren Reibungszustand. Betrachtet man die Proben C01 und C02 in Bild 6, die über einen ähnlichen W-Anteil verfügen, wurden jedoch unterschiedliche Reibungszahlen beobachtet. Das impliziert, dass neben der chemischen Zusammensetzung der etwas niedrigere  $R_{pk}$ -Wert der Schichtvariante C02 ebenfalls zu einer geringeren Verhakung mit dem Blechmaterial und somit zu einer niedrigeren Reibungszahl beiträgt.

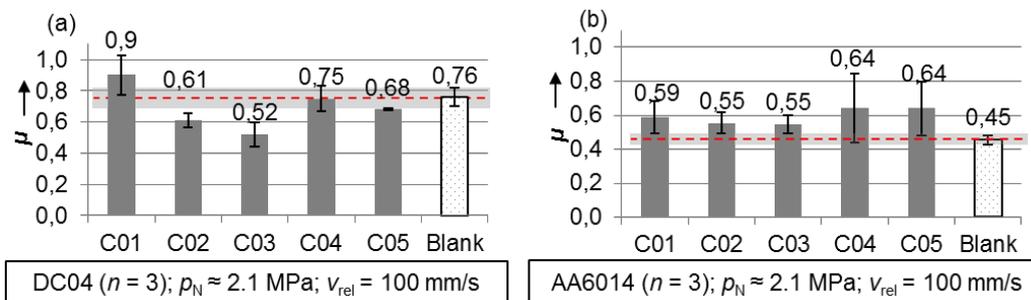


Bild 5 Mittlere Reibungszahlen der a-C:H:W-Schichtvarianten gegen (a) DC04 und (b) AA6014 zwischen 2,5 und 10 m Gleitweg

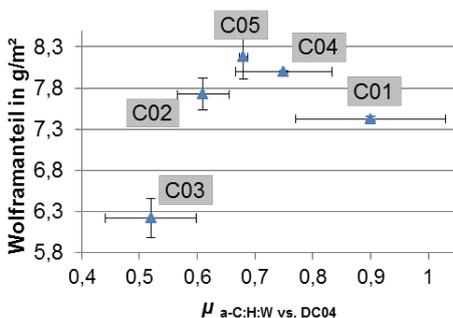
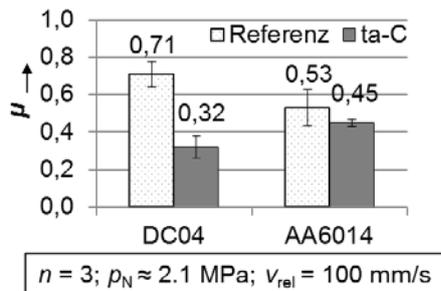


Bild 6 Mittlere Reibungszahlen der a-C:H:W-Schichtvarianten gegen DC04 und Wolframanteil in der jeweiligen Schichtvariante, gemessen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)

Die Reibungszahlen aller a-C:H:W-Schichtvarianten gegen AA6014 liegen im Bereich von 0,55 bis 0,64. (siehe Bild 5 (b)) Trotz variiertes a-C:H:W-Rezepte wurde die Reibung durch den Einsatz der verschiedenen Schichtvarianten kaum beeinflusst, was auf die starke Aluminium-Anhaftung und infolgedessen auf einen Kontakt Aluminium/Aluminium anstatt auf einen Kontakt zwischen dem ursprünglichen Blech und der tatsächlichen Schichtoberfläche zurückzuführen ist.

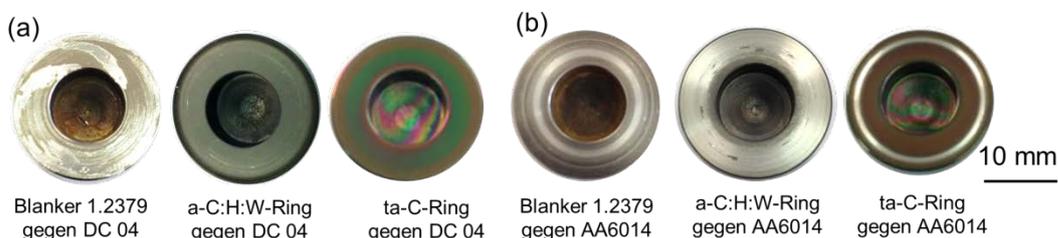
Neben den a-C:H:W-Schichtvarianten wurde das ta-C-Schichtsystem im Ring-Scheibe-Versuch getestet. Hier wurde ein zusätzlicher Referenzversuch mit einem blanken Ring, der auf den gleichen  $R_{pk}$ -Wert wie die nachbehandelte ta-C-Schicht poliert wurde, durchgeführt, um einen Einfluss der Oberflächenrauheit auszuschließen. Die Reibungszahlen im Kontakt mit den zwei Blechwerkstoffen unter trockenen Bedingungen betragen 0,32 für DC04, 0,45 für AA6014. Bei dem Versuch gegen DC04 wurden aufgrund der extrem harten Schichtoberfläche in geringerem Maße lose Verschleißpartikel zwischen Grund- und Gegenkörper erzeugt, wodurch sich eine viel niedrigere Reibungszahl als bei den a-C:H:W-Schichtvarianten einstellt. Bei den Versuchen gegen die Aluminiumlegierungen wurde die Aluminiumanhaftung durch die niedrigere Adhäsionsneigung der ta-C-Schicht reduziert, was infolgedessen zur niedrigeren Reibungszahlen führt.



**Bild 7** Mittlere Reibungszahl  $\mu$  der ta-C-Schicht gegen DC04, AA6014 zwischen 2,5 und 10 m Gleitweg

### 3.3.2 Verschleiß

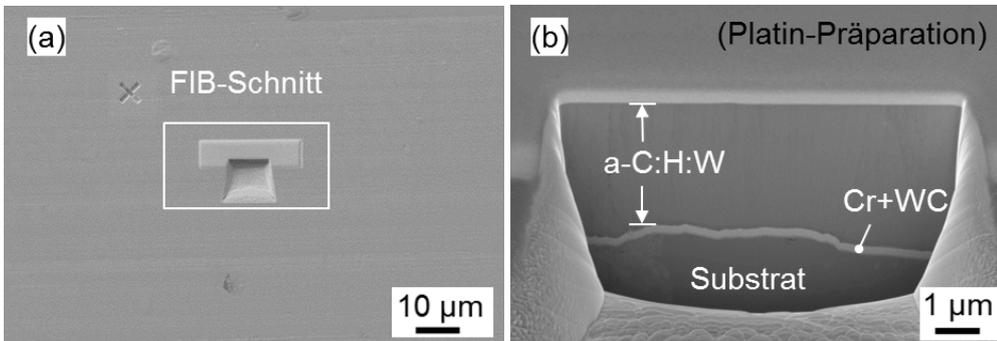
Im Bild 8 sind exemplarisch gegen DC04 und AA6016 getestete Ringflächen dargestellt. Beim Referenzversuch mit den unbeschichteten Ringen gegen DC04 wurden starke, ungleichmäßige und großflächige Zn-Anhaftungen auf der Werkzeugfläche beobachtet, während gegen AA6014 eine gleichmäßige Al-Anhaftung auf der Ringfläche zu sehen ist, die während des Verschleißvorgangs als Festschmierstoff fungierte.



**Bild 8** Getestete Ringfläche gegen (a) DC04- und (b) AA6014-Blechwerkstoffe

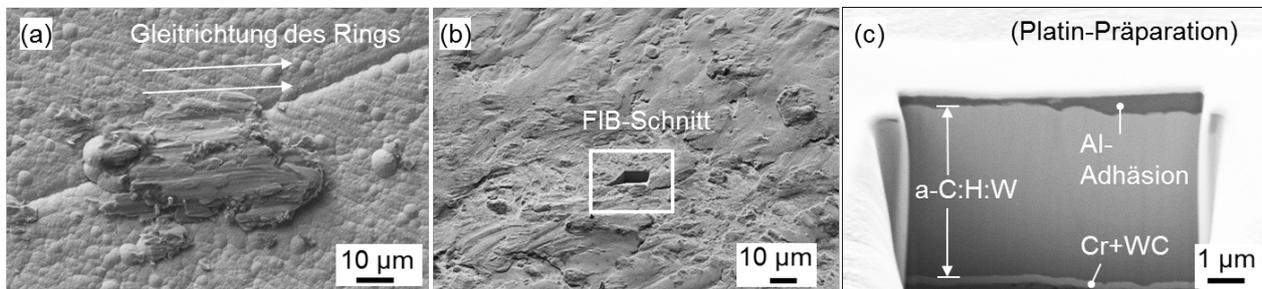
Der mit a-C:H:W beschichtete Ring zeigt gutes, anhaftungshemmendes Verhalten gegen DC04. Nach 1 m Gleitweg wurde nur geringe metallische Adhäsion auf der beschichteten Oberfläche beobachtet. Nach 10 m ist eine klare Grenze zwischen dem inneren und dem äußeren Bereich des Rings erkennbar. Aufgrund der unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten wurde der äußere Ringbereich eingeglättet, wohingegen am

inneren Ringbereich kaum Verschleißspuren zu sehen sind. Im Bild 9 (a) ist eine REM-Aufnahme der eingeglätteten, äußeren Ringfläche dargestellt. Bild 9 (b) stellt einen FIB-Schnitt am äußeren Ringbereich dar. Die durch das Substrat verursachte Schichtrauheit ist noch zu beobachten. Die Schicht im äußeren Bereich wurde durch den Verschleißvorgang im Kontakt mit dem Blech abgetragen, wodurch hier eine geringere Schichtdicke beobachtet werden kann.



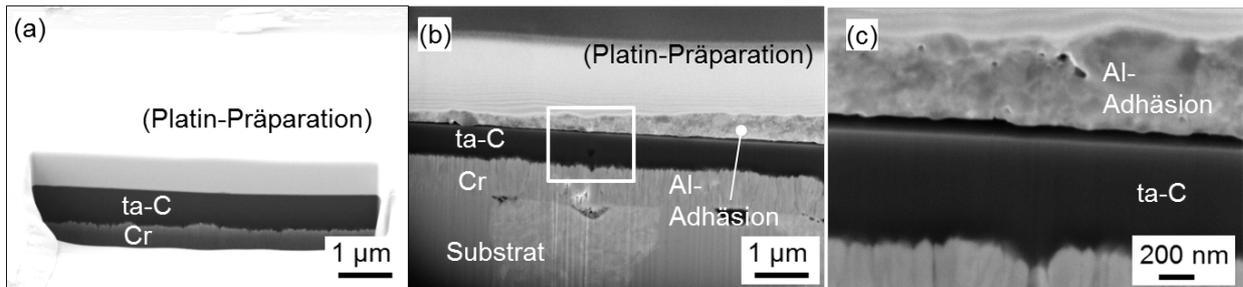
**Bild 9** REM-Aufnahmen des eingeglätteten Außenringbereichs der a-C:H:W-Schichtvariante C03 gegen DC04 und der FIB-Querschnitt in diesem Bereich

Die gegen die Aluminiumlegierung AA6014 getestete Ringfläche wurde durch eine starke Aluminium-Anhaftung bedeckt. Bereits nach 1,5 m Gleitweg sind mehr als 70 % der Oberfläche durch Aluminium bedeckt. Nach 3 m hat sich der adhäsive Materialübertrag auf die gesamte Fläche ausgedehnt. Wie Bild 10 (a) zeigt, sind Partikel/Rauheitsspitzen auf der a-C:H:W-beschichteten Oberfläche bevorzugte Ausgangspunkte für Adhäsion. In Bild 10 (b) und Bild 10 (c) ist zu sehen, dass die Schicht aufgrund der Bedeckung durch Aluminium in ihrem ursprünglichen Zustand verbleibt.



**Bild 10** REM-Aufnahme einer Aluminium-Anhaftung auf der a-C:H:W-Schichtoberfläche und FIB-Querschnitt an dieser Stelle

Auf der gesamten ta-C-Schicht ist dagegen kaum sichtbare Adhäsion gegen DC04 und nur geringflächige Aluminium-Anhaftungen im Vergleich zu den anderen Oberflächen zu beobachten (Bild 8). Die Ursachen sind einerseits in den mechanisch feinpolierten Schichtoberflächen sowie andererseits in der vergleichsweise niedrigeren Adhäsionsneigung gegenüber Metallen zu sehen. In Bild 11 werden FIB-Querschnitte gezeigt, die aus den geprüften ta-C-Schichten geschnitten wurden. In Bild 11 (a) lassen sich kaum metallische Anhaftungen zwischen der Platin-Präparation und der ta-C-Schicht erkennen. Im Vergleich dazu hat sich in Bild 11 (b) Aluminium mit einer Dicke von 258 bis 816 nm auf der ta-C-Schichtfläche aufgetragen. Zusätzlich konnte zwischen der Aluminium-Anhaftung und der ta-C-Schicht ein enger Spalt entdeckt werden (siehe Bild 11 (c)), was die getroffene Aussage bezüglich der niedrigen Bindungsneigung der ta-C-Schicht gegen Aluminium stützt.



**Bild 11 FIB-Querschnitte an den gegen (a) DC04, (b) AA6014 getesteten Ringflächen und (c) des Spalts zwischen Aluminium und ta-C-Schicht**

Die vorgestellten, in Ring-Scheibe-Tribometer-Versuchen gewonnenen Erkenntnisse besitzen jedoch Einschränkungen. Aufgrund des geschlossenen Tribosystems können die ermittelten Reibungszahlen nur bedingt auf einen realen Tiefziehprozess übertragen werden. Der permanente Kontakt zwischen den bereits verschlissenen Blechoberflächen stimmt nicht mit dem Kontakt im Umformprozess überein, bei dem stets neuer Blechwerkstoff zugeführt wird (offenes Tribosystem). Außerdem wird die durch den ständigen Kontakt der gleichen scheinbaren Flächen erzeugte Wärme nicht in gleichem Maße abtransportiert.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden a-C:H:W-Schichtvarianten und eine ta-C-Schicht auf einer werkzeugähnlichen Oberfläche eines Werkzeugstahls abgeschieden. Mittels eines Ring-Scheibe-Tribometers wurden die genannten Schichtsysteme gegenüber industriellen Blechwerkstoffen aus Stahl und Aluminiumlegierungen ohne Schmierstoff getestet. a-C:H:W-Schichten stellen demnach einen potentiellen Lösungsansatz für Trockenblechumformwerkzeuge gegen DC04 dar, da durch sie die Zn-/Fe-Anhaftungen deutlich reduziert wurden. Die Versuchsergebnisse gegen Aluminiumlegierungen zeigen, dass die starke Aluminiumadhäsion im trockenen Kontakt durch den Einsatz des ta-C-Schichtsystems erheblich vermindert wird. Durch Untersuchung verschleißbehaffeter Stellen mittels FIB-Schnitte konnten verschiedene wirksame Verschleißmechanismen identifiziert und zugeordnet werden. Während des Tests der a-C:H:W-Schichtvarianten gegen DC04 führen harte Verschleißpartikel zum abrasiven Verschleiß und Schichtabtrag. Beim Test gegen Aluminiumblech konnten nach kurzer Zeit großflächige adhäsive Anhaftungen auf der a-C:H:W-Schichtoberfläche festgestellt werden. Dies verhinderte den direkten Kontakt zwischen dem ursprünglichen Blech und der Schichtoberfläche.

In einem nächsten Schritt sind Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenrauheit der Schicht auf die tribologischen Kenngrößen vorgesehen. Weitere Modifikationen der amorphen Kohlenstoffschichten werden ebenfalls gegenüber verschiedenen Blechwerkstoffen getestet, um die Reibungszahl im trockenen Gleitkontakt weiter herabzusetzen und die identifizierten Verschleißursachen zu minimieren. Darüber hinaus soll die tribologische Prüfung zukünftig in einem offenen Tribosystem durchgeführt werden, was der realen Anwendung näher kommt.

#### 5. Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der vorgestellten Arbeiten innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1676 „Trockenumformen“. Für die Unterstützung bei den FIB-Untersuchungen sowie der Probencharakterisierung danken die Autoren Herren C. Schunk, M.Sc. vom Lehrstuhl für Allgemeine Werkstoffeigenschaften der FAU Erlangen-Nürnberg sowie an unserem Lehrstuhl Frau Dipl.-Ing. U. Wolf und den Herren S. Frühwald, B.Sc. und J. Riedel, B.Sc..

## 6. Literatur

- [1] VOLLERTSEN, F., SCHMIDT, F.: Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges. Int. J. Precis. Eng. Manuf. Bd. 1 (2014) Nr. 1, S. 59–62.
- [2] HETZNER, H.: Systematische Entwicklung amorpher Kohlenstoffschichten unter Berücksichtigung der Anforderungen der Blechmassivumformung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014.
- [3] DONNET, C., ERDEMIR, A.: Tribology of Diamond-Like Carbon Films. Fundamentals and Applications. New York: Springer, 2008.
- [4] VDI 2840: Kohlenstoffschichten. Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften. Berlin: Beuth, 2012.
- [5] DIN 4855: Kohlenstoffschichten - DLC-Schichten - Beschreibung der Schichtarchitektur. Berlin: Beuth, 2015.
- [6] Stucky, T., Baier, U., Meyer, C.-F., Scheibe, H.-J., Schultrich, B.: Großflächenbeschichtung mit superhartem Kohlenstoff. Vak. Forsch. Prax. Bd. 15 (2003) Nr. 6, S. 299–304.
- [7] DIN EN ISO 26443: Hochleistungskeramik – Rockwell-Eindringprüfung zur Bewertung der Haftung von keramischen Schichten. Berlin: Beuth, 2015.
- [8] DIN EN 1071-2: Hochleistungskeramik - Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten - Teil 2: Bestimmung der Schichtdicke mit dem Kalottenschleifverfahren. Berlin: Beuth, 2003.
- [9] DIN EN ISO 14577: Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter. Berlin: Beuth, 2003.
- [10] MA, G., GONG, S., LIN, G., ZHANG, L., SUN, G.: A study of structure and properties of Ti-doped DLC film by reactive magnetron sputtering with ion implantation. Appl. Surf. Sci. Bd. 258 (2012) Nr. 7, S. 3045–3050.
- [11] BEWLOGUA, K., WITTORF, R., THOMSEN, H., WEBER, M.: DLC based coatings prepared by reactive d.c. magnetron sputtering. Thin Solid Films Bd. 447–448 (2004) S. 142–147.
- [12] MABUCHI, Y., HIGUCHI, T., WEIHNACHT, V.: Effect of  $sp^2/sp^3$  bonding ratio and nitrogen content on friction properties of hydrogen-free DLC coatings. Tribol. Int. Bd. 62 (2013) S. 130–140.
- [13] MERKLEIN, M., SCHMIDT, M., TREMMEL, S., WARTZACK, S., ANDREAS, K., HÄFNER, T., ZHAO, R., STEINER, J.: Investigation of Tribological Systems for Dry Deep Drawing by Tailored Surfaces. Dry Met. Forming OAJ FMT. Bd. 1 (2015) S. 57–62.

### Autorenanschrift:

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)  
Martensstraße 9  
91058 Erlangen  
Telefon: +49 (0) 9131 85 25427  
Telefax: +49 (0) 9131 85 27988  
E-Mail: zhao@mfk.fau.de  
Web: www.mfk.fau.de