



Bilder: AdobeStock/prentiss40 (Teilbild), Fraunhofer IPA (übrige Bilder)

Abbildung 1: Die Arc-PVD Anlage „Flexicoat 850“ der Firma IHI Hauzer Techno Coating B.V. am IOT der RWTH Aachen.

# Vorteile durch gepulste Verdampfung

Forscher am IOT der RWTH Aachen zeigen Vorteile gepulster Lichtbogenverdampfung

*Prof. Dr. Kirsten Bobzin, Dr. Christian Kalscheuer, Max P. Möbius, RWTH, Institut für Oberflächentechnik; Gerhard Eichenhofer, 4A-Plasma*

Die Arc-PVD-Technologie ist in der Herstellung tribologischer und dekorativer Beschichtungen stark verbreitet. Durch Einsatz gepulster Leistungsversorgung kann die Rauheit und Härte der Beschichtungen verbessert werden. Versuche zeigen, dass die Target-Ausnutzung, die Beschichtungsqualität, aber auch die Verdampfung elektrisch schwerleitender Targetwerkstoffe verbessert wird.

Im Bereich Physical Vapour Deposition (PVD) stellt das Lichtbogenverdampfen (Arc-PVD) eine der am weitesten verbreiteten Technologien dar. Daneben wird hauptsächlich noch die Magnetron Sputtering (MS)-PVD-Technologie eingesetzt. Bei MS-PVD ist der Einsatz gepulster Leistungsversorgungen schon längst Stand der Technik, so für die Herstellung

von Beschichtungen für Zerspanwerkzeuge. Vorteile sind ein dichtere und feinere Struktur der Beschichtung, welche ebenfalls von verringerter Oberflächenrauheit führt. Weiter wird der Ionisationsgrad gesteigert. Bei Arc-PVD ist jedoch noch die direct current (dc)-Technologie der Status Quo, dennoch wird seit geraumer Zeit an gepulster Arc-PVD-Technologie

geforscht. Zunächst bestand der Ansatz darin, den Lichtbogen für jeden Puls neu durch eine Trigger-Einheit [1] zu zünden. Die aktuelle Weiterentwicklung sieht die Überlagerung von Basis- und Pulsstrom vor [2], um die wiederholte Zündung des Lichtbogens zu vermeiden. Dabei stabilisiert der Basisstrom den Lichtbogen und der Pulsstrom erzielt eine positive Beeinflussung von Prozess und Beschichtung.

## Gepulstes Lichtbogenverdampfen am IOT

Am Institut für Oberflächentechnik (IOT) der RWTH Aachen unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin wurde das von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) geförderte Forschungsvorhaben TRISTAN (AiF/ 20431 N) durchgeführt. Ziel war unter anderem die Weiterentwicklung der gepulsten Arc-PVD-Technologie. Dazu wurde am IOT die gepulste Leistungsversorgung Plasmatec der J.Schneider Elektrotechnik GmbH in die industrielle Arc-PVD Anlage Flexicoat 850 der niederländischen Firma IHI Hauzer Techno Coating B.V. eingebaut (siehe Abbildung 1).

Diese gepulste Arc-Stromversorgungstechnologie wurde in der Mitte der 2000er Jahre zum Lichtbogenverdampfen von großflächigen Targets eingeführt, modular für Targetströme von  $I = 200$  A bis 400 A und bei Bedarf hochskalierbar bis  $I = 1600$  A. Später wurde diese Technologie von der Firma J. Schneider Elektrotechnik und 4A Plasma, Holzgerlingen weiterentwickelt. Dabei wurden höhere Frequenzen, ein verbessertes Ansprechverhalten und eine Vielzahl frei wählbarer Parameter ergänzt. Es wurde speziell Wert auf einen geregelten Einschaltvorgang beim Zünden gelegt. Meist wiesen die bis dato eingesetzten Stromversorgungen ein übliches Überschwingverhalten bei der Zündung des Lichtbogens auf, das um ein Vielfaches des eingestellten Stromwertes erhöht ist. Bei einem unkontrollierten Stromanstieg im Zündvorgang entstehen die meisten Droplets und meist tiefe Arc-Explosionsgräben auf der Targetoberfläche, die zur Bildung weiterer Droplets auf dem Substrat beitragen können. Ein weiteres Merkmal

dieser gepulsten Arc-Stromversorgungstechnologie sind die steilen Stromanstiege und das schnelle Abklingverhalten vom maximalen Strom auf den Basis-Strom, Abbildung 2. Dies trägt grundsätzlich zu einer höheren Ionisation bei.

Die Vorteile der gepulsten Arc-Stromversorgungstechnologie können durch gepulste Bias-Spannungen (Uni-Polar sowie auch Bi-Polar) ergänzt und optimiert werden. In Abbildung 3 ist die Zeit-Strom-Charakteristik der Plasmatec-Leistungsversorgung dargestellt, wie sie im Forschungsvorhaben TRISTAN eingesetzt wurde.

**Vorteile gepulster Arc-PVD bei CrAlN-Beschichtungen**

Um den Einfluss der gepulsten Technologie auf die Eigenschaften der Beschichtungen zu untersuchen, wurde eine Versuchsreihe zu CrAlN-Beschichtungen durchgeführt. Dieses Schichtsystem stellt eine Hartstoffbeschichtung dar, welche aus dem Bereich der Werkzeugbeschichtungen stammt und auch vielversprechend für den Einsatz auf hochbeanspruchten Maschinenelementen wie Wälzlagern ist [3]. Zunächst wurden zwei dc-Referenzbeschichtungen unter Verwendung der Plasmatec-Leistungsversorgung im dc-Modus hergestellt. Das heißt, die Pulsparameter wurden so eingestellt, dass ein dc-Muster entsteht und somit keine Pulse vorliegen. Dabei wurde der Basisstrom auf den Stufen  $I_B = 60$  und  $120$  A variiert. Anschließend wurden vier CrAlN-Beschichtung mit gepulster Stromversorgung hergestellt. Dabei wurde der Peakstrom  $I_p$ , die Frequenz  $f_p$  und der Tastgrad  $\tau$  im Vergleich zur Referenzbeschichtung „I<sub>p</sub>120“ variiert. In Tabelle 1 sind alle Pulsparameter der Schichtvarianten aufgeführt.

In Abbildung 4 sind Querbruchaufnahmen der Beschichtungen aus Tabelle 1 zu sehen. Die Aufnahmen wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) aufgenommen. Hervorzuheben ist der

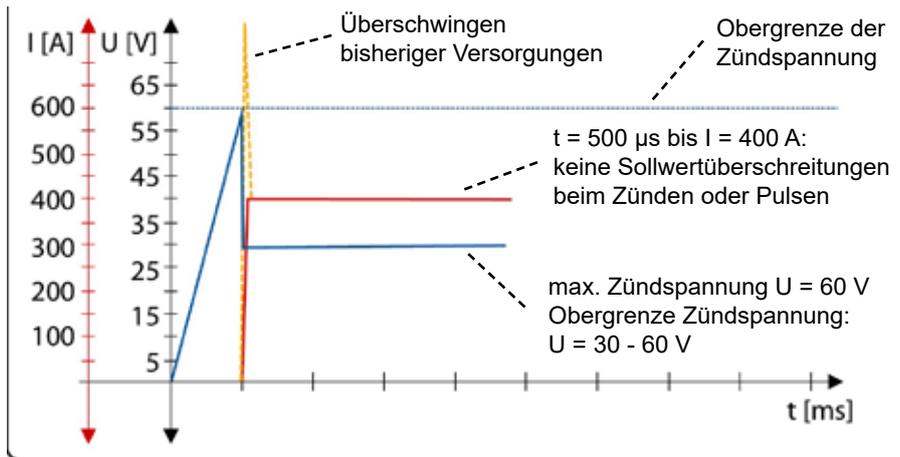
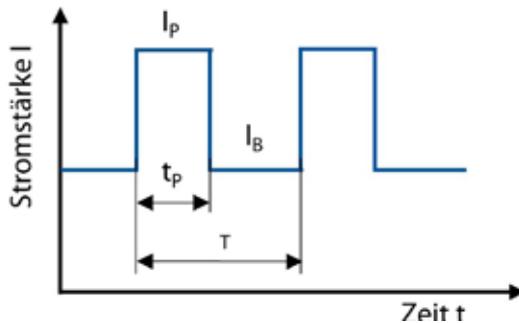


Abb. 2: Einschaltverhalten der Plasmatec beim Zünden des Lichtbogens.



- $I_p$  = Peakstrom
- $I_B$  = Basisstrom
- $t_p$  = Pulsdauer
- $T$  = Periodendauer
- $f_p = 1/T$  = Frequenz
- $\tau = t_p/T$  = Tastverhältnis

Abb. 3: Zeit-Strom-Charakteristik und Pulsparameter der Plasmatec.

Vergleich zwischen der dc60- und der I<sub>p</sub>80-Beschichtung. Durch Überlagerung des Basisstroms von  $I_B = 60$  A mit einem Peakstrom von  $I_p = 80$  A, konnte die Abscheiderate deutlich gesteigert werden. Die Rauheit der Beschichtungen wurde nach DIN EN ISO 25178 mittels konfokalem Laserscanningmikroskop (KLM) ermittelt. Trotz eines höheren Energieeintrages während des Prozesses liegt die gemessene Oberflächenrauheit der I<sub>p</sub>80-Beschichtung bei  $Sa = 0,08 \mu m$  während die dc60-Beschichtung bei  $Sa = 0,13 \mu m$  liegt.

Ein weiterer signifikanter Vorteil durch die gepulste Technologie ergibt sich

bezüglich einer gesteigerten Eindringhärte  $H_{IT}$  der Beschichtungen. In Abbildung 5 sind Eindringhärte  $H_{IT}$  und Eindringmodul  $E_{IT}$  der CrAlN-Beschichtungen dargestellt. Die Kennwerte wurden mittels Nanoindentation ermittelt. Zu erkennen ist, dass alle dc-Beschichtungsvarianten in einem Bereich der Eindringhärte von  $30 \text{ GPa} \leq H_{IT} \leq 40 \text{ GPa}$  liegen, während die gepulst hergestellten Beschichtungen Eindringhärten im Bereich von  $45 \text{ GPa} \leq H_{IT} \leq 50 \text{ GPa}$  aufweisen. Durch die Verwendung der gepulsten Arc-PVD-Technologie kann somit eine deutliche Steigerung der Eindringhärte erzielt werden. Diese Eigenschaft äußert sich beispielsweise positiv in einem gesteigertem Verschleißschutz gegenüber Abrasion.

**Verdampfung elektrisch schwerleitender Targetwerkstoffe**

Im Projekt TRISTAN wurden zudem CrAlN+Mo:S-Beschichtungen mit dem Ziel der Reibungsreduktion im Trockenlauf durch die Bildung des Trockenschmierstoffes MoS<sub>2</sub> entwickelt. Zu Herstellung dieser sogenannten triboaktiven Beschichtungen ist die Abscheidung ▶

PLASMATEC	dc-Prozess		Pulsparameter-Variation			
	dc60	dc120	I <sub>p</sub> 80	I <sub>p</sub> 120	f <sub>p</sub> 200	τ80
Bias-Spannung U <sub>B</sub> [V]	-40	-40	-40	-40	-40	-40
Prozessdruck p [Pa]	4	4	4	4	4	4
Basisstrom I <sub>B</sub> [A]	60	120	60	60	60	60
Peakstrom I <sub>p</sub> [A]	-	-	80	120	120	120
Pulsfrequenz f <sub>p</sub> [Hz]	-	-	100	100	200	100
Tastverhältnis τ [%]	0	0	50	50	50	80

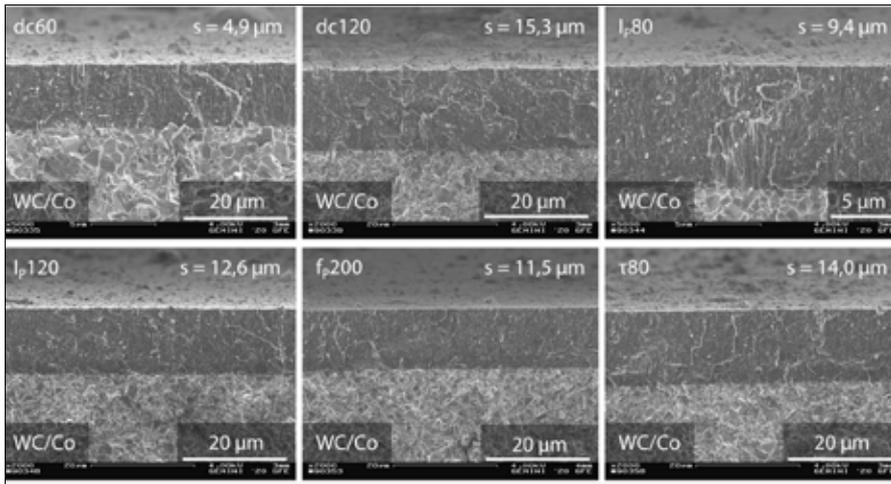


Abb. 4: Vergleich von REM-Querbruchaufnahmen der CrAlN-Beschichtungen.

elektrisch schwer leitender Targetwerkstoffe zwingend erforderlich. Während der Schichtentwicklung wurden ein  $\text{Mo}_{80}:\text{S}_{20}$ - und ein  $\text{Mo}_{90}:\text{S}_{10}$ -Target eingesetzt. Die Angaben beziehen sich auf die chemische Zusammensetzung in Atomprozent (At.-%). Im Verlauf der Entwicklung wurde festgestellt, dass die Ausnutzung der Targets deutlich gleichmäßiger durch gepulste Lichtbogenverdampfung ablief als im Vergleich zum dc-Modus. In Abbildung 6 sind mehrere Targetvarianten vor und nach dem Einsatz im Beschichtungsprozess dargestellt.

Zu erkennen ist, dass nach zwei dc-Prozessen das  $\text{Mo}_{90}:\text{S}_{10}$ -Target bereits eine inhomogene Ausnutzung aufweist. Während dieses Target am Rand weiterhin eine glatte Oberfläche aufweist, zeigt sich im mittleren Bereich eine erhöhte Rauheit. Nach zehn Prozessen im gepulsten Modus, also einer fünffach längeren Einsatzdauer, weist das Target eine ausgeglichene, leicht aufgeraute Oberfläche auf, was für eine deutlich gleichmäßigere Targetausnutzung spricht. Das  $\text{Mo}_{80}:\text{S}_{20}$ -Target erreichte nach drei dc-Prozessen bereits das Ende der Lebensdauer, da einige Krater die kritische Dicke des Targets unterschritten haben. Die Lebensdauer der Targets kann also durch gepulste Lichtbogenverdampfung erhöht werden. In Abbildung 7 ist eine REM-Querbruchaufnahme einer CrAlN+Mo:S-Beschichtung dargestellt, die im gepulsten Modus abgeschieden wurde. Die Beschichtung konnte somit trotz des herausfordernden Targetwerkstoffes erfolgreich hergestellt werden. Zusätzlich konnte durch Parametervariation eine sehr geringe Oberflächenrauheit von  $S_a = 0,03 \mu\text{m}$  erzielt werden, was auf dem Niveau von MS-PVD-Beschichtungen liegt.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und bei der Europäischen Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. (EFDS) für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens TRISTAN (AiF/ 20431 N) und bei allen Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses: 4A-Plasma, Holzgerlingen; Avaluxe International GmbH, Fürth; CemeCon AG, Würselen; Evochem Advanced Materials GmbH, Offenbach am Main; FHR Anlagenbau GmbH, Ottendorf-Okrilla; Plansee Composite Materials GmbH, Lechbruck am See; GKN-Driveline International GmbH, Lohmar; Güdel Group AG, Langenthal; IHI Hauzer Techno Coating B.V., Venlo, Niederlande; J. Schneider Elektrotechnik GmbH, Offenburg; Robeko GmbH & Co. KG, Mehlingen; Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach.

Gefördert durch:



### Literaturverzeichnis

- [1] Boxman, R. L.; Goldsmith, s.; Shalev, s.; et. al.: Fast deposition of metallurgical coatings and production of surface alloys using a pulsed high current vacuum arc, *Thin Solid Films* (1986). [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(86\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(86)90046-5)
- [2] Hettkamp, E.: Magnetische Beeinflussung von Pulsprozessen bei Vakuum-bogenentladungen, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2006)
- [3] Bobzin, K.; Gold, P. W.; Nickel, R.; et. al.: PVD-Beschichtungen für trocken-laufende Hybridwälzlager, *Vakuum in Forschung und Praxis* (2007), <https://doi.org/10.1002/vipr.200700313>

**I** IOT - Institut für Oberflächentechnik  
www.iot.rwth-aachen.de

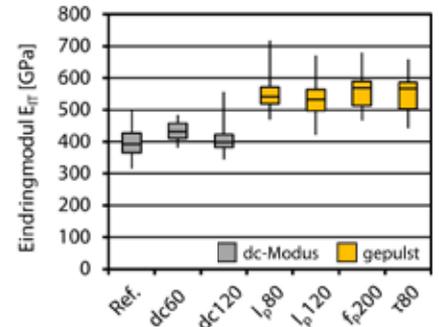
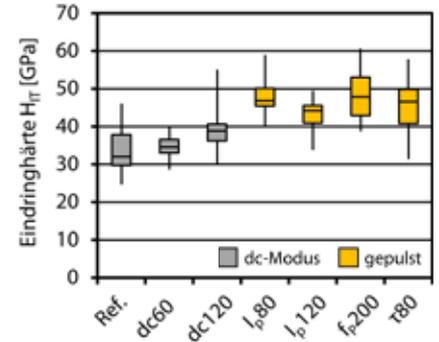


Abb. 5: Eindringhärte  $H_{TT}$  und Eindringmodul  $E_{TT}$ .

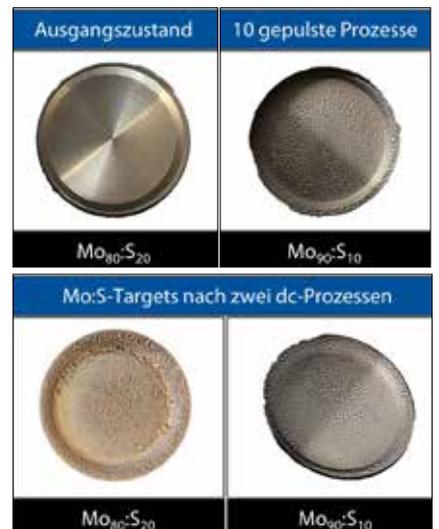


Abb. 6: Analyse von Mo:S-Targets nach Einsatz im Beschichtungsprozess.

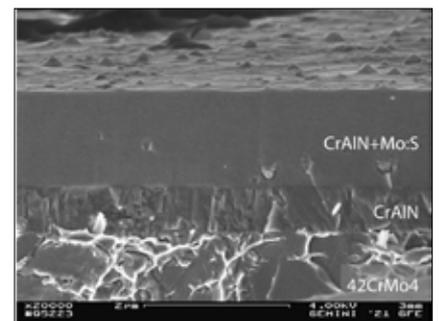


Abb. 7: REM-Querbruchaufnahme einer CrAlN+Mo:S-Beschichtung.