

KURZBERICHT

## Kontakt- und Langzeitverhalten selbstschmierender Beschichtungen in stromtragenden Verbindungen der Elektroenergietechnik

Durch die Energiewende und die Elektrifizierung des Individualverkehrs werden die Anforderungen an den sicheren und zuverlässigen Transport von Elektroenergie gesellschaftlich noch wichtiger. Ein stabiles Stromnetz erfordert ein hohes Maß an Zuverlässigkeit aller beteiligten Komponenten. Gerade Verbindungsstellen, an denen elektrische Energie von einem Leiter auf einen anderen übertragen wird, stellen dabei häufig kritische Punkte dar. Beschichtungen der einzelnen Kontaktpartner sind dabei bereits seit Jahren Stand der Technik. Die steigenden Ansprüche und Herausforderungen erfordern den Einsatz neuer Materialien, mit denen bestehende Betriebsmittel weiterentwickelt werden können. Die Anforderungen an Beschichtungen im Bereich stromführender Steckverbindungen in Stromnetzen sind in den letzten Jahren stark gestiegen. Durch die kompaktere Bauweise der Geräte und eine steigende Leistungsdichte erhöhen sich die Temperaturen im Einsatz. Wird zusätzlich noch eine hohe Anzahl an Steckzyklen gefordert, sind die konstruktiven und montagetechnischen Herausforderungen hoch. Steckverbindungen mit hoher Steckzyklenzahl werden derzeit mit einem Kontaktschmiermittel vorbehandelt, um den Reibverschleiß im Betrieb zu minimieren.

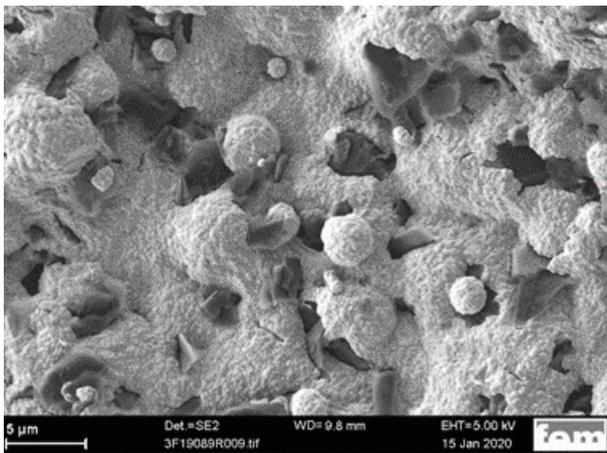


Abb. 1: REM-Aufnahme der Oberfläche einer Silber-Dispersionsschicht mit eingelagerten Festschmierstoffpartikeln (Graphit)

Das Kontaktschmiermittel muss langzeitstabil und temperaturbeständig sein, damit die geforderten Einsatzzeiten von zum Teil mehreren Jahrzehnten erreicht werden können. Bei der Montage muss auf eine exakte Dosierung des Kontaktschmiermittels geachtet werden, sodass der Kontaktwiderstand nur moderat erhöht, gleichzeitig aber der Reibwert zuverlässig verringert wird. Zudem enthalten die eingesetzten Materialien meist Fluorchemikalien, deren Beschaffung teuer und deren Herstellung bzw. Entsorgung problematisch ist.

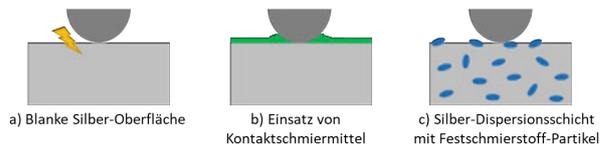


Abb. 2: Silber-Beschichtungen für elektrische Verbindungen: a) unbehandelt, b) gefettet, c) mit Festschmierstoffpartikeln in der Silber-Matrix

Eine Alternative zu den üblicherweise eingesetzten Reinsilberbeschichtungen, die mit Kontaktschmiermittel behandelt werden, stellen Silberdispersionsschichten mit eingelagerten Trockenschmierstoffen dar. Ziel des Projektes war die Entwicklung und Untersuchung galvanisch abgeschiedener Silber-Dispersionsschichten mit selbstschmierenden Eigenschaften. Die einzulagernden Partikel wurden hierbei in Form von Pulvern zum Metallmatrixelektrolyten gegeben und durch eine entsprechende Elektrolytumwälzung in Schwebelage gehalten. Durch eine geeignete Wahl der Prozess- und Elektrolytparameter konnte der Partikeleinbau in die Schicht gesteuert werden.

Das Arbeitsprogramm wurde zwischen den Verbundpartnern Technische Universität Dresden (TUD), Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie (fem), CCT Composite Coating Services GmbH (CCT) und Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG (RB) aufgeteilt. Am fem erfolgten Beschichtungsversuche im Labormaßstab, metallografische Untersuchungen sowie die Bestimmung der Reib- und Verschleißeigenschaften. Das Upscaling der Beschichtungsprozesse sowie die Beschichtung von industriellen Probekörpern wurde von den Industriepartnern CCT und RB übernommen. Elektrische Charakterisierungen, Untersuchungen zum Kontaktverhalten und weitere tribologische Untersuchungen an realen Probegerometrien wurden an der TUD durchgeführt. Am fem wurde im Labormaßstab die Mitabscheidung folgender Partikeltypen untersucht: Graphit (als Referenz), hexagonales Bornitrid hBN, Wolframdisulfid WS<sub>2</sub>, Molybdändisulfid MoS<sub>2</sub>, Zinnsulfid SnS und Bismutsulfid Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. Dabei konnten je nach Partikeltyp folgende Einbauraten (in Volumenprozent) erzielt werden:

| Partikeltyp                    | Partikelgröße D <sub>50</sub> [μm] | Partikelkonzentration in der Schicht, Vol.% |
|--------------------------------|------------------------------------|---|
| Graphit                        | 4,5                                | 6,6   |
| hBN                            | 3,5                                | 5,6   |
| hBN                            | 1,0                                | 2,6–9                                       |
| WS <sub>2</sub>                | 3,0                                | 2,5   |
| MoS <sub>2</sub>               | 8,5                                | 3,0   |
| Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> | 2,0                                | 4,6   |
| SnS                            | 3,0                                | 2,8   |

Tabelle 1: Partikelgrößen und Einbauraten in Silber-Beschichtungen der untersuchten Partikeltypen

Für die Bestimmung der tribologischen Eigenschaften der Silberdispersionsschichten wurden am fem Messungen mit dem Stift-Scheibe-Tribometer durchgeführt. Als Gegenkörper dienten versilberte 100Cr<sub>6</sub>- bzw. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Kugeln. Als Referenz dienten reine Silberschichten, für die mittlere Reibkoeffizienten von  $\bar{\mu}$  0,8 gemessen wurden. Bei den Dispersionsschichten mit hBN, Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> und SnS konnte der Reibkoeffizient gegenüber Reinsilber nicht signifikant reduziert werden, wogegen die Systeme mit Graphit, WS<sub>2</sub> und MoS<sub>2</sub> deutlich niedrigere Werte ( $\bar{\mu} \ll 0,4$ ) lieferten. Aufgrund der positiven tribologischen Eigenschaften dieser Systeme wurden diese nach einem entsprechenden Upscaling des Prozesses auf industriellen Probenkörpergeometrien abgeschieden und untersucht.

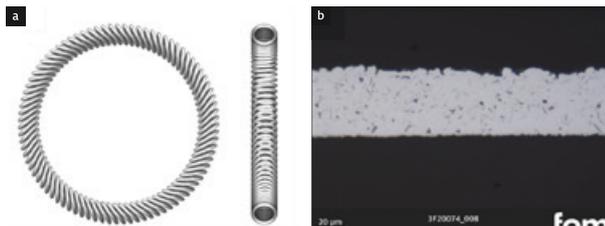


Abb. 3: a) Industrielle Steck- und Gleitverbindung: Axial belastete Schraubenfedern; b) Querschliffaufnahme einer Silberdispersionsschicht mit eingelagerten WS<sub>2</sub>-Partikeln

Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse des Projektes, dass bei der Beschichtung von Modellgeometrien alle untersuchten Partikeltypen in Silberschichten eingebaut werden können. Die Systeme Silber-Graphit, Silber-MoS<sub>2</sub> und Silber-WS<sub>2</sub> heben sich dabei durch ihre guten tribologischen Eigenschaften hervor. Es werden Werte für die mittleren Reibkoeffizienten um 0,2 erreicht, die auch nach einer thermischen Auslagerung von 2000h bei 180°C stabil bleiben. Zudem verlangsamt der Einbau der Dispersoide den Härteabfall infolge der Wärmebehandlung im Vergleich zu reinen Silberschichten.

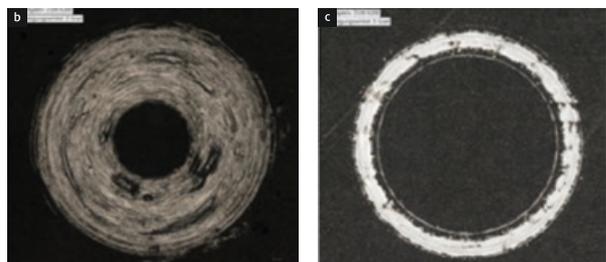
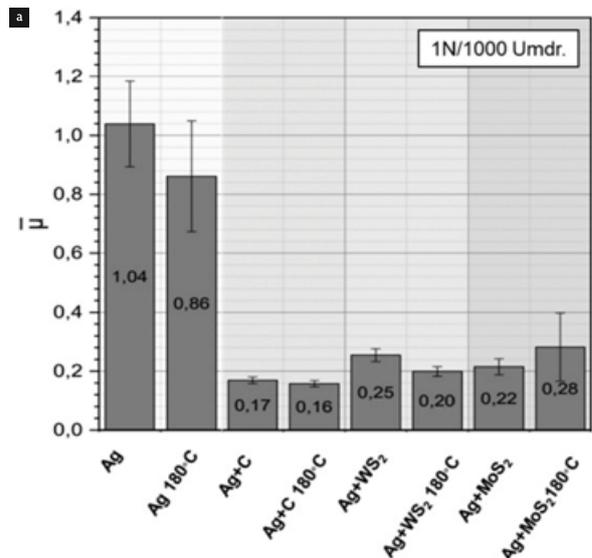


Abb. 4: a) Reibkoeffizient der jeweiligen Silber-Dispersionsschicht im Vergleich vor und nach der Auslagerung bei 180°C für 2000 h b) Reibverschleißspur einer Reinsilber-Oberfläche c) Reibverschleißspur einer Silberdispersionsschicht mit eingelagerten MoS<sub>2</sub>-Partikeln

Auch an den industriellen Probekörpern können diese Ergebnisse im Prinzip bestätigt werden. Der maximale Reibweg einer Silberdispersionsschicht bis zum Ausfall vergrößert sich gegenüber einer Reinsilberschicht um den Faktor 3–6 (WS<sub>2</sub>), 5–10 (MoS<sub>2</sub>) bzw. 10–18 (Graphit). Dabei werden jedoch noch nicht die Werte einer mit Kontaktschmiermittel behandelten Silberoberfläche erreicht. Dies könnte ein Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

### Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Forschungsprojekts mit dem Förderkennzeichen 03EI6011.

Geördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

BMW-Verbundprojekt 03EI6011

1.9.2019 – 30.8.2022

#### VERBUNDPARTNER

IEEH | Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik an der TU Dresden  
CCT Composite Coatings Services GmbH | Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG

#### INDUSTRIEPARTNER

Henze BNP AG | Dr.-Ing. Max Schlötter GmbH & Co. KG | Siemens AG | Stäubli Electrical Connectors GmbH

#### ANSPRECHPARTNER

fem | Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie | Katharinenstraße 17 | 73525 Schwäbisch Gmünd  
Dr. Heidi Willing, willing@fem-online.de | Dr. Ann-Kathrin Egetenmeyer, egetenmeyer@fem-online.de, T +49 7171 1006-314