

Untersuchungen zum Gleitverschleiß an Rundsteckverbindern mit Kontaktlamellen

Lücke, N. (1); Löbl, H. (1); Großmann, S. (1); Ledermann, T. (2); Freudiger, G. (2)

Elektrische Verbindungen im Industriebereich sind häufig als Steckverbindungen ausgeführt, um einfach auf Produktionsumstellungen reagieren zu können und um bessere Wartungsmöglichkeiten zu haben. Steckverbinder werden häufig mit hochwertigen Metallen beschichtet, wobei Silber im Bereich der Hochstromanwendungen am häufigsten eingesetzt wird. Elektrische Steckverbindungen altern während ihrer Lebensdauer durch verschiedene Mechanismen. Dadurch erhöht sich der Verbindungswiderstand, was zu höheren Verlustleistungen an den Verbindungsstellen führt [1]. Ein wichtiger Alterungsmechanismus bei Hochstromsteckverbindungen ist der Gleitverschleiß, der durch Versatzbewegungen zwischen den Kontaktpartnern, z. B. durch Wechselströme (magnetisches Feld) oder Zugkräfte, die von außen auf die Steckverbindung wirken, hervorgerufen wird. In diesem Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse zum Gleitverschleiß an Hochstromsteckverbindungen mit silberbeschichteten Kupfer-Beryllium-Kontaktlamellen vorgestellt.

Gegenstand der Untersuchungen

Die untersuchten Hochstromsteckverbinder bestehen aus einem Messingstecker und einer Messingbuchse, die beide mit Silber beschichtet sind (Bild 1). Die mechanische und elektrische Verbindung zwischen Buchse und Stecker wird über eine Kontaktlamelle hergestellt. Diese besteht aus Kupfer-Beryllium (CuBe₂) und ist ebenfalls silberbeschichtet. Die Lamellen sind in einer Nut in der Buchse eingelassen, so dass nur minimale Relativbewegungen zwischen Buchse und Lamelle möglich sind. Beim Einbau der Lamelle in die Buchse ergeben sich 11 Lamellenstege, die gleichmäßig auf dem Umfang verteilt sind. Die Verbindungskraft zwischen Stecker und Lamellen wird durch deren Federwirkung (Drehfe-

derprinzip) erzeugt [2], [3]. Um ein kontinuierliches Messen des Verbindungswiderstandes während der Versatzbewegungen zu ermöglichen, sind an Buchse und Stecker jeweils an den stromlosen Enden Potentialabgriffe befestigt. Die Spannung über der Steckverbindung wird deshalb so gemessen, damit Inhomogenitäten im elektrischen Strömungsfeld die Messung nicht wesentlich beeinflussen. Die Verbindungstemperatur wird mit einem Thermoelement gemessen, das auf die Buchse in Höhe der eingebrachten Kontaktlamelle aufgeklebt ist.

Ausgewählte Gleitverschleißmechanismen

Abrasiver Verschleiß, auch Abrasion genannt, ist nach ASTM G40-10a [4] definiert als Verschleiß, der durch harte Partikel oder harte Oberflächenausbuchtungen an einem weicheren Material hervorgerufen wird. Die harten Partikel können hierbei sowohl im Oberflächenmaterial eingebettet (Zwei-Körper-Abrasion) als auch lose zwischen den Kontaktflächen eingeschlossen sein (Drei-Körper-Abrasion). Während bei der Zwei-Körper-Abrasion nur einer der Reibpartner verschleißt, werden bei der Drei-Körper-Abrasion beide Kontaktflächen

beschädigt. Einen wesentlichen Einfluss auf die Abrasion hat der Druck der Kontaktpartner aufeinander. Bei großem Druck können die harten Partikel zerdrückt und die weicheren Oberflächen signifikant zerschnitten oder zerpflegt werden. Beim Zerpflegen wird ein Wulst aus Oberflächenmaterial vor dem harten Partikel hergeschoben und Oberflächenmaterial zu beiden Seiten der entstehenden Furche weggedrückt. Das Material verbleibt aber in der Kontaktoberfläche. Beim Zerschneiden wird das Material aus der entstehenden Furche in Form von Spänen aus der Oberfläche herausgeschnitten. Auch kann es zu einem Abhobeln kommen; dabei wird durch große harte „Klumpen“ Material aus der Oberfläche entfernt. Bei geringem Druck werden die harten Partikel nicht wesentlich beschädigt. Auf der Oberfläche des weicheren Materials bilden sich durch das Reiben an den harten Partikeln in Bewegungsrichtung feine Kratzer. Das Material wird als feine Späne aus der Oberfläche entfernt. Ob bei der Zwei-Körper-Abrasion ein Zerflügen oder ein Zerschneiden der Oberfläche auftritt, ist vom Angriffswinkel des eingebetteten harten Partikels abhängig. Dieser hängt vom Verhältnis des Elastizitätsmoduls E und der Materialhärte H des weicheren Reibpartners ab. Je größer E/H wird, desto größer muss auch der Angriffswinkel gewählt werden, um ein Zerschneiden des Oberflächenmaterials zu erreichen. Bei den meisten Metallen liegt dieser Winkel zwischen 30° und 90° [5].

Adhäsiver Verschleiß beginnt mit dem Bilden von Haftbrücken zwischen den Kontaktoberflächen; es kommt zu lokalen Mikrokaltschweißungen. Aufgrund von Kaltverfestigung reißen diese Verbindungen anschließend nicht wieder im Bereich der Fusionsstellen sondern in Nebenbereichen

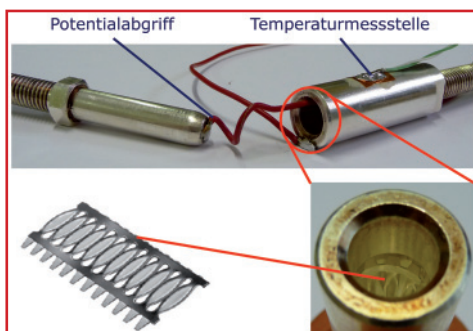


Bild 1: Rundsteckverbinder mit Kontaktlamelle

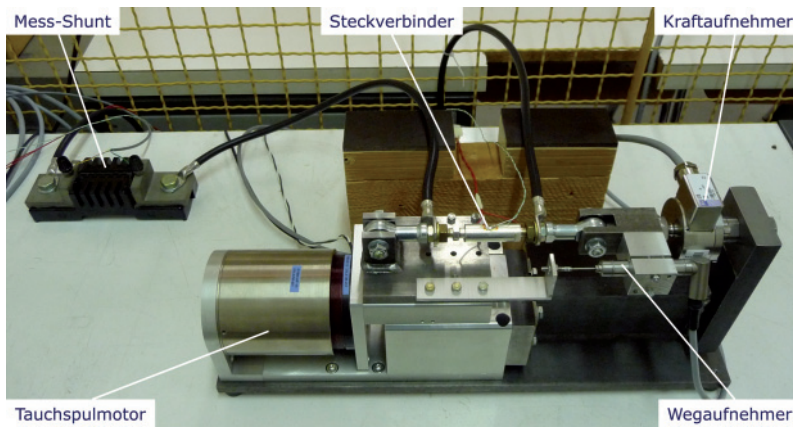


Bild 2: Versuchsanordnung

auf. Dadurch bilden sich mit der Zeit „Körnchen“, deren Härte aufgrund der Kaltverfestigung größer ist als die des Oberflächenmaterials, aus dem sie entstanden sind. Kaltverfestigung findet bei plastischen Umformungen unterhalb der Rekristallisationstemperatur des Materials statt. Durch die plastische Umformung kommt es zu Gitterfehlern im Metall. Diese erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Atome gegenseitig in ihrer Bewegung behindern und dadurch die Härte zunimmt [5].

Durch Korrosion der Kontaktflächen entstehen Fremdschichten (**Tribochemischer Verschleiß**). Diese schützen das Oberflächenmaterial vor weiterer Korrosion. Durch die Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern werden diese abgerieben, so dass das Oberflächenmaterial wieder durch Korrosion angegriffen werden kann. Durch diesen Mechanismus verlieren die Kontakte immer mehr an Material. Die Korrosionsschichten können in der Regel sehr leicht abgerieben werden, da Oxide zwar deutlich härter aber auch deutlich spröder als ihr Ausgangsmaterial sind, und Verbindungen, wie z. B. Silbersulfid, wesentlich weicher

sind als das ursprüngliche Silber. Hohe Temperaturen erhöhen die chemische Reaktionsfähigkeit des Oberflächenmaterials und damit die Korrosion. Chemische Verbindungen des Metalls (Beschichtungs- oder Grundmaterial) an der Oberfläche mit Sauerstoff sind meist deutlich härter als ihr Ausgangsmaterial. Dies führt zu Abrasion und erhöht den Verschleiß deutlich. [5] Beim Gleitverschleiß mit Versatzamplituden im μm -Bereich, auch als Fretting bezeichnet, werden vorstehende Spitzen und Korrosionsschichten durch Adhäsion abgerieben. Aufgrund der geringen Relativbewegung verbleiben diese zwischen den Kontaktflächen. Durch Kaltverfestigung sind die abgeriebenen Silberpartikel härter als das Oberflächenmaterial der Kontakte, so dass es durch Abrasion zu erhöhtem Verschleiß kommt. Wächst die Schicht aus Abriebpartikeln in der Kontaktzone, so wird der Verschleiß geringer, da ein Teil der Relativbewegung nun zwischen den Partikeln stattfindet. Hierdurch wird der Verschleiß auf einen festen Wert reduziert. Treten Partikel im Randbereich der Kontaktzone aus, verteilt sich der Druck ungleichmäßig und nimmt im Zentrum zu, wodurch sich ein ungleichmäßiger Verschleiß einstellt.

Durch Relativbewegungen mit größeren Amplituden ($> 100 \mu\text{m}$) kann es dazu kommen, dass die Kontaktbereiche blank gerieben werden. Bei gleicher Frequenz der Versatzbewegungen entstehen dabei höhere Relativgeschwindigkeiten zwischen den Reibpartnern. Dies führt dazu, dass die Abriebpartikel aus dem Kontaktbe-

reich herausgeschleudert werden und somit der Verschleiß hauptsächlich durch Adhäsion bestimmt wird. Da die Kontakte nicht durch Fremdschichten aus Abriebpartikeln vor weiterer Korrosion geschützt sind, bildet sich z. B. bei versilberten Kontakten immer wieder neues Silbersulfid, das dann erneut abgerieben wird, wodurch die Silberschicht mit der Zeit immer dünner wird (tribochemischer Verschleiß). Durch Fetten mit besonderen Schmierstoffen kann der Reibverschleiß deutlich reduziert werden. Die Schmierstoffe schützen die blanken Metalloberflächen vor Korrosion und verringern die Reibung zwischen den Kontakten wesentlich [6].

Versuchsanordnung

Für die Untersuchungen zum Gleitverschleiß mit Rundsteckverbindern (Bild 1) wurde eine Versuchsanordnung aufgebaut (Bild 2), mit der definierte Versatzbewegungen bis in den mm-Bereich möglich sind. Dazu wird ein geregelter Tauchspulmotor verwendet, der mit einem reibungsarm gelagerten Schlitten verbunden ist. Über einen digitalen Regler werden die Randbedingungen der Bewegungen vorgegeben und die Position des Schlittens entsprechend geregelt. Die Relativbewegung zwischen Stecker und Buchse des untersuchten Rundsteckverbinders wird mittels Wegaufnehmer gemessen. Dies ist nötig, da ein Teil der vom Tauchspulmotor erzeugten Amplitude abhängig von der Reibkraft zwischen den Kontakten durch den Kraftaufnehmer oder die Versuchsanordnung an sich kompensiert wird. Der Kraftaufnehmer erfasst die Schiebekraft durch Verformung von

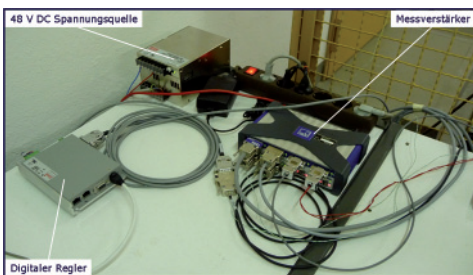


Bild 3: Mess- und Regelungstechnik

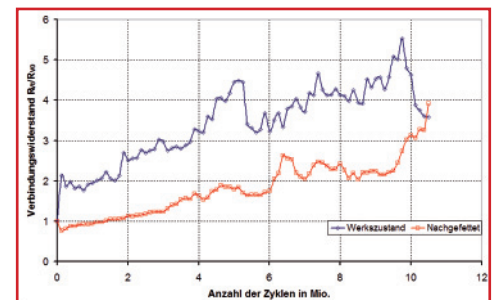


Bild 4: Mittelwerte des Verbindungswiderstandes während der Bewegung

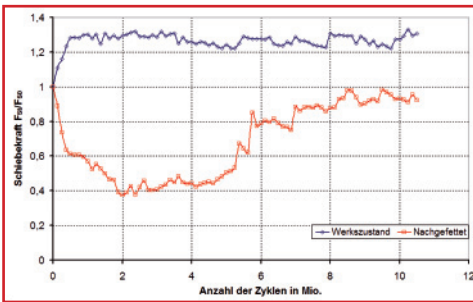


Bild 5: Mittelwerte der Schiebekraft während der Bewegung

Dehnmessstreifen (DMS), die zu einer Vollbrücke verschaltet sind. In den Steckverbinder wird ein elektrischer Gleichstrom von 130 A (Nennstrom der Steckverbindung) eingespeist und mit einem Messshunt (RSh = 200 µΩ) erfasst. Die zu messenden Größen werden von einem Messverstärker (HBM QuantumX) verarbeitet und mit einer geeigneten Software aufgezeichnet. Die Untersuchungen in diesem Beitrag wurden mit einer Versatzamplitude von 200 µm und einer Frequenz von 62,5 Hz (Periodendauer 16 ms) durchgeführt. Die Messwerte wurden im Ruhezustand und während der Bewegung nach jeweils 125.000 Versatzzyklen eine Sekunde lang aufgezeichnet.

Messergebnisse

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse für zwei ausgewählte Randbedingungen in Bezug auf die Schmierung der Steckverbinder vorgestellt. Im Weiteren wird unterschieden zwischen den Randbedingungen Werkzustand (WZ), bei dem insbesondere die Kontaktlamelle mit einem dünnen Schmierfilm versehen ist, und dem nachgefetteten Zustand (NZ), bei dem der Stecker zusätzlich mit einem Schmierfilm aus Kontaktfett überzogen ist. Vor der eigentlichen Reibbelastung werden die Steckverbinder zunächst für eine bestimmte Anzahl von Zyklen um den anfänglich definierten Positionsnullpunkt mit einem Verfahrensweg von ± 500 µm konditioniert. Danach wird der Belastungsstrom von 130 A DC eingeschaltet und dadurch der Steckverbinder auf eine Betriebstemperatur von ca. 65 °C erwärmt. Im stationären Zustand nach der Erwärmungsphase wird der Stecker zum

definierten Positionsnullpunkt verfahren und im Anschluss daran die oszillierenden Versatzbewegungen mit der Amplitude von 200 µm und der Frequenz von 62,5 Hz gestartet. Bei beiden Steckverbindern steigt der Mittelwert des Verbindungswiderstandes während der Bewegung ausgehend vom Anfangswiderstand kontinuierlich an (Bild 4).

Allerdings können Unterschiede im Anstiegsverhalten festgestellt werden. Bei dem nachgefetteten Steckverbinder (NZ) zeigen sich anfänglich, vermutlich solange der Schmierfilm wirksam ist, praktisch keine Sprünge im Verbindungswiderstand. Erst dann, wenn die Silberbeschichtungen direkt aufeinander reiben, können sprunghafte Widerstandsänderungen festgestellt werden, die sich im WZ schon deutlich vorher zeigen. Während der Reibbelastung kommt es nach einer gewissen Zeit zum Einreiben der Lamellenstege in das Steckermaterial. Zwar nimmt mit dem Einreiben die Verbindungskraft ab, was zu einer Verringerung der a-spots) und damit zu einem höheren Verbindungswiderstand führen würde. Da aber die Lamellenstege aufgrund ihrer Form zu Beginn der Zyklen nur mit einem kleinen Teil ihrer Oberfläche Kontakt zum Stecker haben, vergrößert sich die Kontaktfläche mit steigender Einreibtiefe. Hierdurch erhöht sich die Anzahl der a-spots zunächst, bis durch das tiefere Einreiben die Verbindungskraft abnimmt und es wieder zu einem Anstieg des Verbindungswiderstandes kommt.

Die gemessenen Schiebekräfte während der Bewegung deuten auf ein unterschiedliches Verschleißverhalten der beiden Steckverbinder hin (Bild 5). Während sich beim WZ nach einer relativ kurzen Einlaufphase ein nahezu konstanter Kraftverlauf einstellt, was für einen unveränderten Verschleißmechanismus spricht, kommt es beim NZ zunächst zu einer Abnahme der Schiebekraft und erst wesentlich später zu einem Kraftanstieg. Anfänglich wird beim NZ das nachträglich aufgebraachte Fett im Kontaktbereich verteilt (Abnahme der Schiebekraft), im Anschluss daran stellt sich zunächst eine konstant niedrige Kraft ein, ehe auch hier der Schmierfilm unterbro-

chen wird und es zu einem deutlichen Kraftanstieg kommt. Allerdings werden im NZ die hohen Kräfte des WZ nicht erreicht.

Verschleißbewertung

Nach einer Reibbelastung von 10,5 Mio. Zyklen wurden die in diesem Beitrag vorgestellten Versuche abgebrochen und mikroskopisch untersucht. Während sich beim NZ am Stecker ein anhaftender Belag aus Kontaktfett und Abriebpartikeln gebildet hat (Bild 6), ist beim WZ überwiegend feiner und trockener Abrieb feststellbar. Wie bereits erwähnt, kam es bei beiden Steckern zur Furchenbildung, die am Umfang unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Auch die dem Stecker zugewandten Kontaktbereiche der Lamelle sind deutlich verschlissen, allerdings erwartungsgemäß nicht so stark wie beim weicheren Messingstecker.

Insbesondere die Unterschiede bei den gemessenen Schiebekräften deuten auf unterschiedliche Verschleißmechanismen bei den zwei untersuchten Randbedingungen hin. Um diesen Sachverhalt näher zu betrachten, wurden die Kontaktbereiche der Steckverbinder mit einem optischen 3D-Mikroskop untersucht. Dabei zeigten sich signifikante Unterschiede im Oberflächenabrieb, wie in Bild 7 am Beispiel jeweils eines Lamellensteiges erkennbar ist. Beim WZ sind im mittleren Bereich, also dort wo die Stege mit maximaler Kraft auf dem Stecker aufliegen, keine Kratzspuren durch Abrasion zu erkennen (Bild 7b). Dagegen können in den Randbereichen zusätzlich deutliche

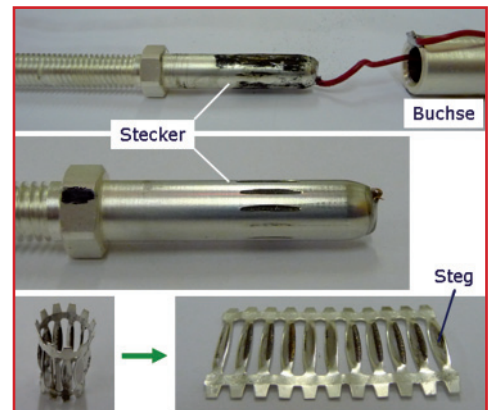


Bild 6: Untersucher Steckverbinder (NZ) nach 10,5 Mio. Reibzyklen

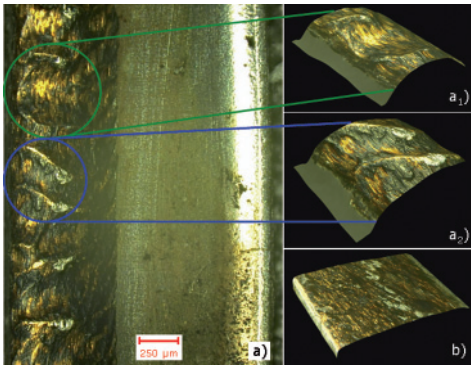


Bild 7: Verschleiß an den Stegen der Kontaktlamelle nach 10,5 Mio. Reibzyklen (optisches Mikroskop); a) NZ; b) WZ

Abrasionsspuren festgestellt werden. Das hängt damit zusammen, dass sich dort die Lamelle leicht vom Stecker abhebt und sich so einzelne Abriebpartikel unter die Lamelle schieben können. Ab einem noch nicht näher bestimmten Kontaktdruck von der Lamelle auf den Stecker ist es den einzelnen Abriebpartikeln, abhängig von der Relativgeschwindigkeit zwischen den Reibpartnern, nicht mehr möglich, sich weiter zwischen die Auflagefläche von Lamelle und Stecker zu schieben. Im Gegensatz zum WZ sind beim NZ die Riefen am Stecker und auch die Beschädigungen an den Lamellenstegen nicht an allen Stellen gleich tief sondern weisen, besonders im mittleren Bereich, eine stark wellige Struktur auf. Diese lässt sich an den Mikroskopbildern der Lamelle sehr gut erkennen (Bild 7a). Die wellenförmige Struktur spricht für eine Form der Drei-Körper-Abrasion. Dies sollte eigentlich nur bei kleinen Amplituden auftreten ($< 100 \mu\text{m}$), da sonst die zur Abrasion benötigten Partikel aus dem Reibbereich entfernt werden. In diesen Fall ist es aber nicht so, dass die haftende Wirkung des nachträglich aufgebracht Kontaktfetts dazu führt, dass diese Partikel dennoch im Reibbereich verbleiben und nur in den Randbereichen herausgedrückt wurden (Muldenbil-

dung, Bild 7a). Die erkennbare Form der Beschädigung spricht dafür, dass härtere Partikel am Kupferberyllium gerieben haben müssen. Das weichere Messing des Steckers kann diese Beschädigungen nicht verursacht haben. Die wenig beschädigten Randbereiche der Mulden beim NZ (Bild 7) führten dazu, dass diese Bereiche während der Versatzbewegungen direkte metallische Kontakte ohne dazwischen befindliche Abriebpartikel bilden konnten. Dadurch war der Verbindungswiderstand beim NZ, trotz des höheren Oberflächenverschleißes, praktisch bis zum Ende der Versuche kleiner als beim WZ.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Untersuchungen zum Gleitverschleiß an Rundsteckverbindern bei zwei verschiedenen Randbedingungen vorgestellt. Die Relativbewegungen mit einer Amplitude von $200 \mu\text{m}$ und einer Frequenz von $62,5 \text{ Hz}$ wurden mit einer speziellen Versuchsanordnung erzeugt. Es hat sich gezeigt, dass im WZ nur wenige Partikel zwischen den Kontaktflächen eingeschlossen werden, da Abrasionsverschleiß nur im äußeren Randbereich der Kontaktpartner zu erkennen war. Beim NZ war die Schiebekraft der Steckverbindung, verglichen mit der beim WZ, deutlich kleiner. Das zusätzlich aufgetragene Kontaktfett hat die Abriebpartikel gebunden, so dass es, nachdem die Silberbeschichtung soweit beschädigt war, dass erste Kupferpartikel zwischen den Kontakten eingeschlossen wurden, zu starkem abrasivem Verschleiß kam. Bis zu diesem Zeitpunkt zeigte der NZ einen kleinen Verbindungswiderstand und einen deutlich geringeren Verschleiß gegenüber dem WZ. Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die nachgebildeten Reibbelastungen in diesem

Beitrag für die meisten Anwendungen der untersuchten Steckverbinder deutlich zu groß sind. Vielmehr handelt es sich um beschleunigte Alterungsversuche, deren Ergebnisse für konkrete Anwendungen entsprechend bewertet müssen. Zukünftige Untersuchungen zum Gleitverschleiß an Rundsteckverbindern werden mit unterschiedlichen Versatzamplituden durchgeführt, um den Übergangsbereich zwischen den Verschleißmechanismen Adhäsion und Abrasion bestimmen zu können.

Literatur

- [1] Böhme, H.: Mittelspannungstechnik. Schaltanlagen berechnen und entwerfen. 2.Aufl. Berlin: Verlag Technik, 2005. – ISBN 3-34101-495-0
- [2] Lücke, N., Großmann, S., Löbl, H., Lederemann, T., Freudiger, G.: Long-term behaviour of plug-in connectors with copper beryllium contact lamellas depending on stress relaxation. 25th ICEC and 56th IEEE Holm Conference, Charleston, South Carolina, USA, 2010
- [3] Blumenroth, F., Lücke, N., Schlegel, S., Großmann, S., Löbl, H.: Untersuchungen zum Langzeitverhalten von ruhenden Verbindungen in der Elektroenergie-technik. 20. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe 2009, VDE-Fachbericht 65, pp. 187-197
- [4] ASTM G40-10a - Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, ASTM International, 01-Jul-2010
- [5] Braunovic, M.; Konchits V.; Myshkin N.: Electrical Contacts. Fundamentals, Applications and Technology. London. New York: CRC Press, 2007. – ISBN 1-57444-727-0
- [6] Kassman Rudolphi, A.: Tribology of Electrical Contacts. Deterioration of Silver Coated Copper. Dissertation. Uppsala: Uppsala University, 1996. – ISBN 9-15543-691-9
- [7] Ragnar Holm: Electric Contacts. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Fourth Edition 1967 (Reprint 2000), ISBN 3-540-03875-2

- (1) Nils Lücke, Helmut Löbl, Steffen Großmann, Technische Universität Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik
- (2) Tom Lederemann, George Freudiger, Multi-Contact AG, Basel, Schweiz