

Tribologische Designparameter von elektrischen Hochstrom-Verbindungen und deren Einfluss auf die Funktion

Zusammenfassung:

Trends zur Elektromobilität und zu erneuerbaren Energien bringen Chancen aber auch Herausforderungen in der Tribologie. Dieser Beitrag erläutert an einem einfachen Beispiel die wesentlichen Anforderungen an die elektrischen Verbindungen, es werden Verbindungsmöglichkeiten und Designmerkmale von elektrischen Hochstrom-Verbindungen betrachtet, Einflüsse auf die Funktion theoretisch bzw. experimentell bewertet.

Abstract:

Electro mobility and renewable energy offers new opportunities, as well challenge the area of tribology. This paper shows important requirements on electrical connection. An easy design example helps to understand contact mechanism. Focus is on electrical connection and design, influences are theoretical and experimental evaluated

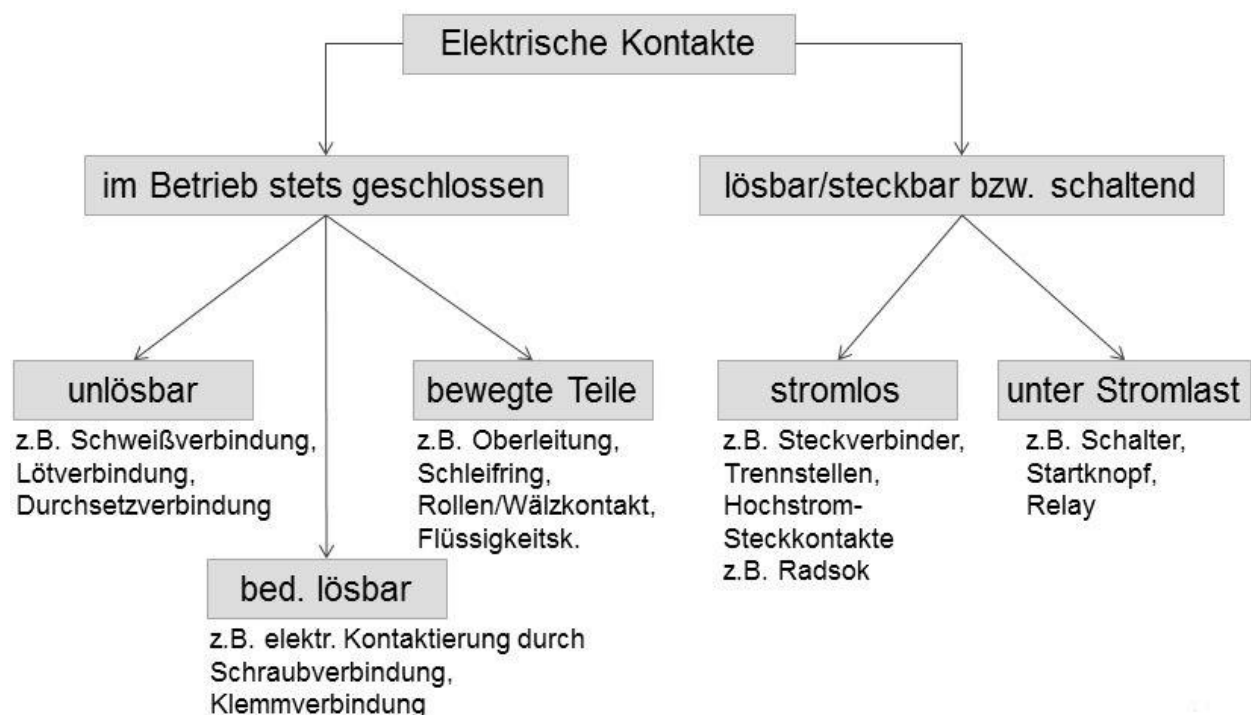
Einleitung

Die Elektromobilität erhielt nachhaltigen Aufschwung. Anreize geben bspw. die Gesetzgebung, die Feinstaubbelastung in Großstädten, die begrenzten Ressourcen an fossilen Brennstoffen und vor allem auch die zunehmende Attraktivität der Fahrzeuge von Tesla, BMW oder Porsche. Mit der neuen Technologie, der Elektrifizierung ergeben sich auch neue Herausforderungen und Bedarfe an technischen Lösungen, auch in den Bereichen der Tribologie.

Dieser Beitrag erläutert an einem einfachen Beispiel einer elektrischen Verbindung einige dieser Fragestellungen. Es zeigen sich viele Parallelen zur klassischen Tribologie.

Funktion und Anforderungen an die elektrischen Hochstrom-Verbindungen

Die elektrischen Kontakte in der Übersicht



Die primären Funktionen der elektrischen Verbindungen sind Strom übertragen, die ausreichende Strombelastbarkeit bei geringem Übergangswiderstand und damit einer geringen Verlustleistung und Eigenerwärmung.

Daraus ergeben sich die Anforderungen aus Systemebene betrachtet

Elektrisch

- Leitfähigkeit und geringer Übergangswiderstand und geringe Wärmeentwicklung
- Stromtragfähigkeit

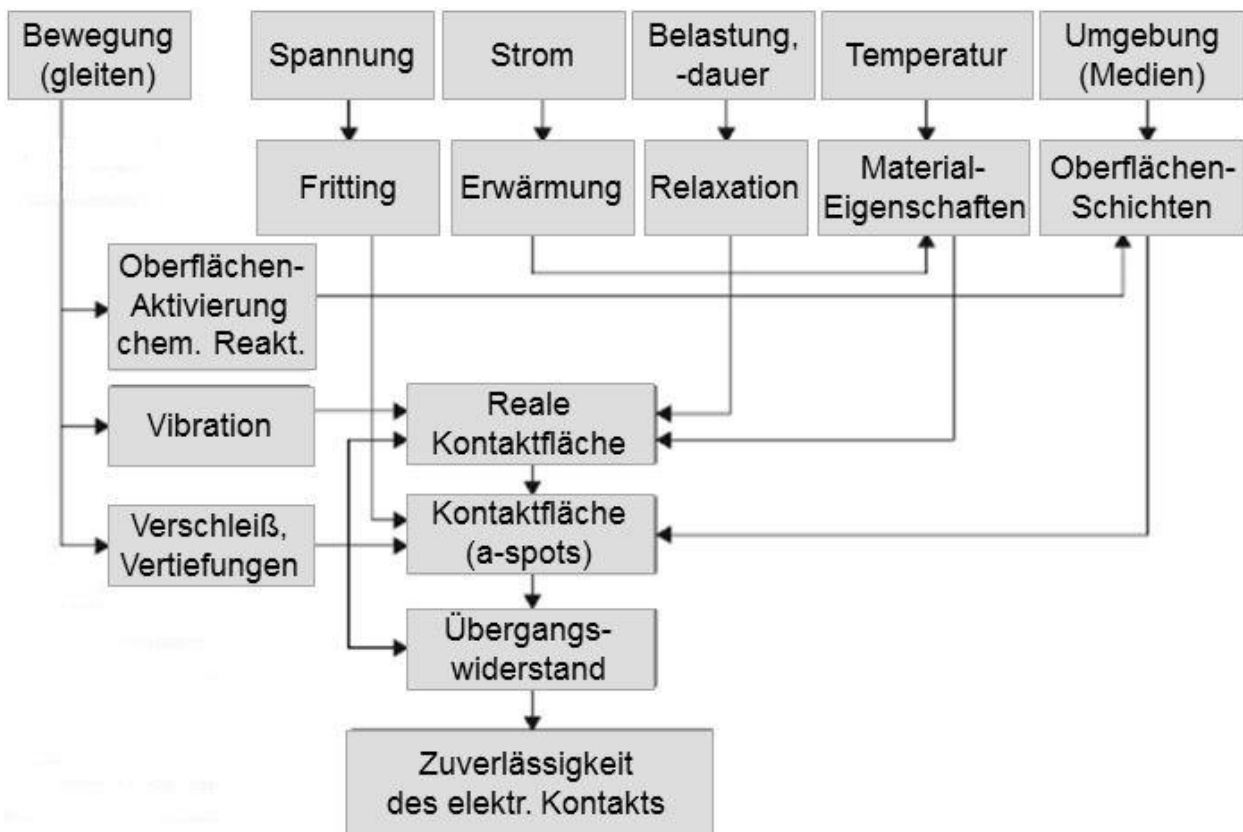
Mechanisch

- Festigkeit, Vibrationsbelastbarkeit der Verbindung
- Erhaltung Klemmkraft über Lebensdauer/keine Relativbewegung/Mikrobewegungen in der Kontaktfläche

Korrosionsbeständigkeit

- Umwelt- und Medienverträglichkeit
- elektr.-chem. Stabilität der eingesetzten/kombinierten Werkstoffe
- Gasdichtheit der elektrischen Verbindungen (beinhaltet weitere Anforderungen an die Beschichtung, sowie Anforderungen an die Verbindung und die Verbindungselemente und Montage [weitere Details folgen in den nachfolgenden Kapiteln])

Einflussgrößen und Wechselwirkungen auf die Zuverlässigkeit eines elektrischen Kontakts



Die Definition und Berücksichtigung der Anforderungen hilft bei der Auswahl bzw. dem Design einer Verbindung. Zudem liefern die Anforderungen gleichzeitig auch Verifizierungsmerkmale und helfen dabei die Einflüsse auf die Funktion zu bewerten.

Einflussgrößen und deren Bewertung

Werden alle bekannten Einflussgrößen betrachtet ergeben sich umfangreiche Ursache-Wirkungs-Diagramme. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf einigen aus tribologischer Sicht relevanten/wesentlichen Einflussgrößen, das sind

- a) Elektrisch leitende Werkstoffe, Werkstoffpaarungen und elektro-chemisches Potential (Kontaktkorrosion)
- b) Oberfläche/Oberflächenbeschichtungen als Korrosionsschutz und zur Ausbildung einer gasdichten Verbindung
- c) Anpressdruck der Kontaktflächen über Lebenszeit und Reibwerte/Topografie in der Verbindung um eine gasdichte Kontakte zu erreichen

Elektrisch leitende Werkstoffe, Stromtragfähigkeit, Werkstoffpaarungen

Silber hat die besten Eigenschaften aller Metalle hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit. Die nachfolgende Tab. 1 vergleicht Silber mit anderen Werkstoffen guter elektrischer Leitfähigkeit.

Kupfer vs. Aluminium? Leitfähigkeit vs. Festigkeit? elektrische vs. mechanische Eigenschaft?



Der klassische elektrische Leitwerkstoff ist Kupfer. Auf Grund der ansteigenden Nachfragen und der relativ hohen Dichte bei relativ geringer mechanischer Festigkeit

wird jedoch nach Alternativen gesucht. Zum Beispiel werden Erdkabel inzwischen aus Aluminium eingesetzt. Die Verbindung von Aluminium zu den Kupferkabeln ist Stand der Technik und wird beherrscht. Auf Grund des elektrochemischen Potentials zwischen Aluminium und Kupfer ist eine Abdichtung gegen Feuchtigkeit erforderlich.

Herausfordernd bei elektrischen Verbindungen mit Aluminium ist die Bildung von Aluminiumoxid (Beschichtung bzw. Abdichtung gegen Luftsauerstoff) und bei Schraubverbindungen die geringe Festigkeit und Fließneigung/geringe zulässige Flächenpressung des reinen Aluminiums. Die gilt es z.B. bei der Schraubenberechnung zu berücksichtigen. So kommen auch höherfeste Legierungen, aushärtbare Aluminiumlegierungen zum Einsatz.

Außer Aluminium werden auch zunehmend **Kupferlegierungen** (z.B. für elektrisch leitende, stromtragende Verbindungselemente) eingesetzt. Wesentlicher Vorteil im Vergleich zum reinen Kupfer ist die höhere Festigkeit, bei immer noch guter Leitfähigkeit.

	Silber	Kupfer C11000 CW004A (E-Cu)	Kupfer- Leit- legierung CuCrZr warm- ausgehärtet	Messing CuZn 5	Aluminium EN AW - 1350 (Al99,5 E)	Aluminium EN AW - 6082 (AlMgSi1),T6
Elektrische Leitfähigkeit @ 20°C [MS/m]	62	57	43	33	37	24-32
Spez. Dichte [kg/dm³]	10,5	8,9	8,9	8,9	2,7	2,7
Festigkeit	~	~	+	+	-	++
Materialpreis	--	~	~	~	++	+

Tab. 1: Werkstoffe mit guter elektrischer Leitfähigkeit. Vergleich der Leitfähigkeit, Dichte, Festigkeitskennwerte und Preise.

Die Entscheidung ob Aluminiumlegierung oder Kupferlegierung, hängt auch von den anderen benachbarten Werkstoffen ab. Hardwarebauteile und deren Anschluss/Power-Terminals sind i.d.R. noch immer aus Kupferwerkstoffen, ebenso die Kabel und Crimp-Verbindungen etc. Mit Blick auf das elektrochemische Potential und Kontaktkorrosion zwischen den Kontaktpartnern Aluminium und Kupfer gestaltet sich jeder Übergang aufwändig.

Kontaktkorrosion

Abb.1 zeigt eine einfache elektrische Kontaktverschraubung, die Tab. 2 bewertet die Werkstoffkombinationen dieser elektrischen Schraubverbindung und die durch diese Kombinationen auftretenden elektrischen Potentiale.

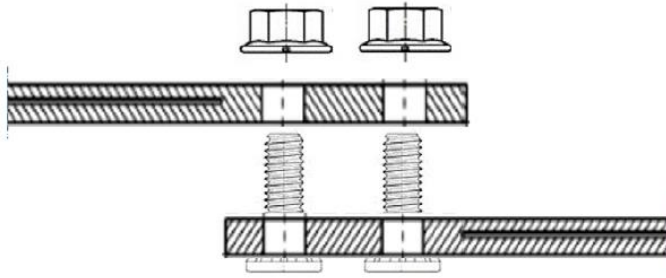


Abb.1: Beispiel einer elektrischen Kontaktverschraubung

Im Fall einer Funktionstrennung leiten die Stromschienen den elektrischen Strom. Die Funktion der Schraubenverbindung ist eine ausreichende Flächenpressung der leitfähigeren Kontaktpartner über Lebensdauer sicherzustellen. Das Verbindungselement selbst trägt keine nennenswerte Stromlast.

Die verwendeten/kombinierten Werkstoffe sind: Verbindungselemente aus Stahl mit Korrosionsschutz-Beschichtung, die Stromschienen aus Kupfer galvanisch verzinkt.

	elektr.-chem. Spg. gg. H [V]	praktisches Potential gg. belüftetes, künstliches Meerwasser [V] [1]	Kupfer	Zinn	Aluminium 99,5	Zink
Kupfer	0,34	0,01	-	0,2	0,7	0,8
Zinn	-0,14	-0,19		-	0,5	0,6
Aluminium 99,5	-1,66	-0,67			-	0,1
Zink als Korrosionsschutz auf Stahl	-0,76	-0,8				-

Tab. 2: Werkstoffe und elektrochemische Spannungen

Die Tabelle zeigt die elektrochemischen Spannungen nach der elektrochemischen. Um zumindest bedingte Aussagen zur Korrosionsneigung machen zu können werden auch die Werte nach dem praktischen Potential gegen Standardwasserstoffelektrode gezeigt (Verwendung eines für das Kraftfahrzeug relevanteren Mediums: belüftetes, künstliches Meerwasser) [1]. Daraus lassen sich Potentialdifferenz der auftretenden Werkstoffkombinationen berechnen, die Korrosionsneigung für die Praxis abschätzen. Ist ein Elektrolyt vorhanden ist Zink als Korrosionsschutz auf Stahl in der Verbindung mit Kupfer ungeeignet.

Im Kontakt treffen unterschiedliche Werkstoffe aufeinander. Tab. 2 zeigt die aufeinandertreffenden Werkstoffe einer einfachen elektrischen Verbindung z.B. auch das Zink als Korrosionsschutz auf dem Stahl-Verbindungselement mit dem Kupfer der Stromschiene. Die elektrochemische Spannungsreihe zeigt

Potential Kupfer-Zink

nach elektr.-chem. Spannungsreihe 0,34 V vs. - 0,76 V = 1,1 V

nach praktischer Spannungsreihe 0,01 V vs. - 0,8 V = 0,81 V

Voraussetzung für die elektrochemische Korrosion ist das Vorhandensein eines Elektrolyten. Bei der Bildung von Kondenswasser (Taupunkt unterschritten), bei einer Befeuchtung der Materialkombination Kupfer-Zink, wird die Zinkbeschichtung in wenigen Stunden metallisch aufgelöst. In Kombination mit Kupfer und Feuchtigkeit ist Zink als Korrosionsschutz von Verbindungselementen ungeeignet.

In einem einfachen Versuchsaufbau wurden verzinkte Verbindungselemente in Kupfer

hinsichtlich potentieller galvanischer Korrosion/Kontaktkorrosion bewertet.

Abb. 2 zeigt den Aufbau von Stromschienen aus Kupfer, verschraubt mit einer verzinkten Stahlschraube. Die Probe wurde partiell in 10%-ige Salzwasser-Lösung (Elektrolyt) eingetaucht, von Luftsauerstoff zugänglich.

Abb. 2a zeigt die Probe bei Versuchsbeginn, Abb. 2b dieselbe Probe nach 24 h in Salzwasser. Das Zink wurde vollständig aufgelöst, flächige Rotrostbildung setzt ein.



Abb. 2a: Probe bei Versuchsbeginn



Abb. 2b: Probe nach 24 h in 10%-iger Salzwasser-Lösung, anschließend getrocknet.

Ist ein Elektrolyt vorhanden ist Zink als Korrosionsschutz auf Stahl in der Verbindung mit Kupfer ungeeignet. Als Alternative eignet sich bspw. die Zink-Nickel Beschichtung. Auch Zinn-Zink-Beschichtung (elektrisch leitfähig) erscheint geeignet. Zudem ist Kupfer mit Edelstahl X5CrNi18.8 sehr gut verträglich (jedoch bei relativ hohen Materialkosten für die Verbindungselemente).

Für die Flächenanteile gilt die Regel Kathodenfläche \ll Anodenfläche, d.h. die Kathodenfläche mit dem edleren Metall sollte deutlich kleiner als die Anodenfläche sein.

Beschichtungen und Fremdschichten der elektr. Kontaktflächen

Primäre Funktion der Beschichtung ist der Schutz der Bauteile vor Korrosion und die Herstellung und Erhalt einer leitfähigen metallischen (oxidschichtfreien) Verbindung. D.h. die Abdichtung der Kontaktstelle, die Ausbildung einer gasdichten Verbindung (als Schutz der Kontaktflächen vor Oxidation, Kontamination).

Die wesentlichen Funktionen der Beschichtung sind

- a) Oxidations-/Korrosionsschutz
- b) Ermöglichung der mechanischen und elektrischen Funktionen der Verbindung und Herstellung einer gasdichten Verbindung

Im konkreten Beispiel der einfachen elektrischen Kontaktverschraubung (Abb.1) verhindert die Beschichtung auf dem elektrischen Leitwerkstoff Kupfer die Oxidation der Kontaktflächen. Kupfer ist in typischer Umgebung korrosionsanfällig (das oxidierte Kupfer ist spröde, kann Verschleifen, Aluminium bildet sogar eine isolierende Oxidschicht deren Entstehung durch die Beschichtung verhindert wird).

Bei der Kontaktierung wird das Zinnoxid verdrängt und es entstehen zahlreiche metallische Kontaktstellen (sog. A-spots) und eine gasdichte Verbindung. Die Verbindung ist vor erneuter Oxidation und vor in den Kontaktbereich eindringenden

Medien/vor Kontamination geschützt. Die gasdichte Verbindung sichert eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit.

Bedeutung der Reibwerte in Kontakten und Verbindungselementen

a) Einfluss der Reibung auf das Montageergebnis beim Schrauben

Auf Grund der Geometrien der Schraube hat die **Reibung** an der Kopfauflagefläche und im Gewinde einen wesentlichen Einfluss auf die Kontaktkraft (Modell/Wirkprinzip schiefe Ebene).

Es gibt Möglichkeiten sowohl die Reibwerte in der Verbindung wie auch die erreichte Kontaktkraft messtechnisch zu ermitteln. An der Montagelinie ist jedoch das aufgebrachte Drehmoment und deren Überwachung ein wichtiges Kriterium (Ausnahme streckgrenzgesteuertes Anzugsverfahren).

Ein geringe Streuung im Montagedrehmoment, geringe Streuung/ein definiertes Reibwertfenster sind Voraussetzung für Herstellung einer zuverlässigen Schraubverbindung. Die Bestimmung der Reibwerte wird in DIN EN ISO 16047 und der VDA 235 beschrieben. Abb. 3 zeigt den Einfluss des Drehmoments bei einer 5 % Streuung des Anziehverfahrens und der Reibwerte für ein Reibwertfenster $\mu=0,09-0,14$.

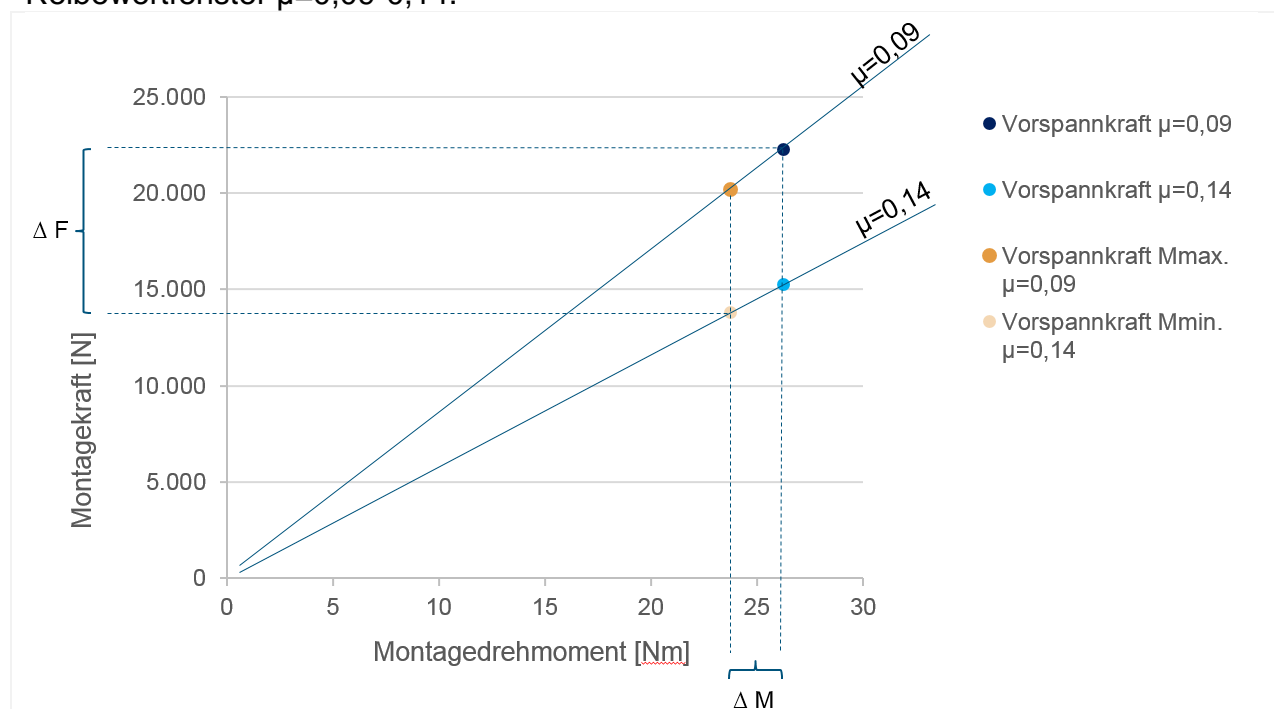


Abb. 3: Vorspannkraft als Funktion des Drehmoments bei 5 % Streuung des Anziehverfahrens und eingestellte Reibwerte, ein Reibwertfenster von $\mu=0,09$ bis $0,14$.

Die Reibwerte haben einen wesentlichen Einfluss auf die Montagekraft in der Verbindung, diese wiederum einen wesentlichen Einfluss auf den Widerstand der Verbindung.

Gängig sind **Gleitbeschichtungen** auf den Verbindungselementen um den Streubereich der Reibwerte zu verkleinern, ein definiertes Reibwertfenster einzustellen. Dadurch verringern sich die Streuungen der erreichten Kontaktkraft und damit auch die Streuungen der Übergangswiderstände/der elektrischen Werte der Verbindung.

Den Einfluss des Montagedrehmoments auf die erreichbaren Übergangswiderstände zeigt Abb. 4:

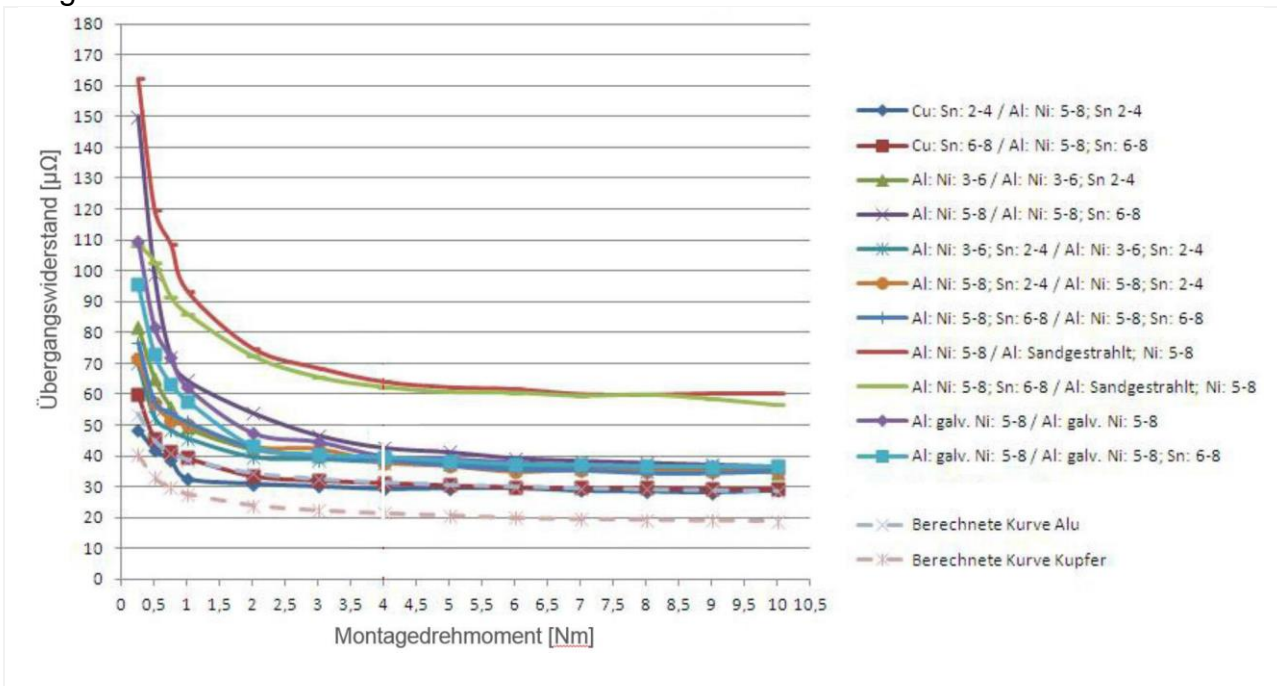


Abb. 4: Versuchsreihe zum Einfluss des Montagedrehmoments der elektrischen Kontaktverschraubung auf den Übergangswiderstand.

Die Vorspannkraft ändert sich nach der Montage durch Setzen und Relaxation und auch temperaturabhängig. Herausfordernd bei den elektrischen Verbindungen sind die in der Regel kurze Klemmlängen die nur geringe Setzbeträge erlauben, die relativ geringe Festigkeiten bzw. die Kriechneigung der verspannten Werkstoffe, wie auch Temperaturwechsel durch die Strombelastung. Dies kann zum Vorspannkraftverlust führen.

Eine Möglichkeit sich der Relaxation anzunähern ist die Messung des Weiterdrehmoments die auch in der VDA 5.2 als Prüfprozess genannt wird. Zudem kann die Ermittlung des Weiterdrehmoments auch als serienbegleitende Prüfung sinnvoll sein, um Veränderungen der Reibwerte und Trends in den Prozessen zu erkennen.

b) Einfluss der Reibung auf die Gleitbewegungen bzw. Mikrobewegungen

Ursachen für die Scherbelastung der Verbindung sind bspw. Wärmedehnung der Bauteile oder dynamische Belastung/die Massenträgheit der Bauteile, ggf. überlagert mit Vibrationen/Schwingungen in der Verbindung.

Der elektrische Kontakt kann in verschiedene Kontaktgebiete aufgeteilt werden, in einen Haft- und Gleit-Anteil (Abb. 6). Hoppe [4] untersucht in seiner Dissertation die tribologischen Eigenschaften von elektrischen Kontakten. Unter anderem untersucht er auch den Schwingverschleiß von elektrischen Steckkontakten sowie den Einfluss der Schwingweite auf die Lebensdauer. Mit steigender Schwingweite fällt das Tribosystem früher elektrisch aus. Im Bereich sehr kleinen Schwingweiten (1 μm) beobachtete er keine Ausfälle mehr.

Nach VDI 2230 [2] erfolgt auch ein Festigkeitsnachweis der Schraubverbindungen auf Scherbelastung. Es besteht die Forderung, dass es nicht zu Relativbewegungen zwischen der Schraube und/oder den verspannten Teilen kommen darf. Diese Anforderung kann auch auf den statischen elektrischen Kontakt übertragen werden.

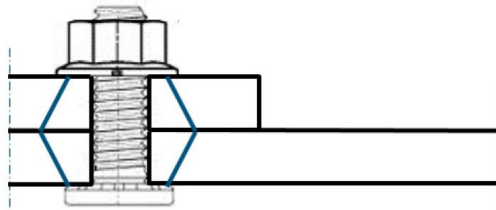


Abb. 6: Verformungskegel in einer elektrischen Kontaktverschraubung (schematisch) und dadurch erzeugte Flächenpressung im Kontakt (visualisiert durch eine Druckmessfolie, Druckbereich 10-50 MPa). Das Kontaktgebiet teilt sich in ein Haft- und Gleitgebiet. Ein Haftgebiet ist entscheidend für den langfristigen Erhalt der Funktion der Verbindung.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag erläutert an einem einfachen Beispiel einer elektrischen Hochstromverbindung tribologische Fragestellungen. Dabei zeigen sich Parallelen zur klassischen Tribologie.

Zunächst erfolgt eine Betrachtung der Funktion und der Anforderungen an die elektrische Verbindung. Ausgehend von diesen Betrachtungen werden wichtige Einflussgrößen genauer betrachtet.

Verschiedene Werkstoffe werden verglichen. Die Gegenüberstellung der wichtigsten Merkmale wie Leitfähigkeit, Dichte, Festigkeitskennwerte und Preis helfen bei der Auswahl.

Das Beispiel einer elektrischen Kontaktverschraubung zeigt eine Funktionstrennung, die elektrisch leitfähigen Stromschienen leiten den elektrischen Strom. Das härteste Verbindungselement selbst trägt keine nennenswerte Stromlast stellt jedoch eine ausreichende Anpresskraft der leitfähigeren Kontaktpartner über Lebensdauer sicher.

Nachteil dieser Funktionstrennung ist die Verwendung/Kombination verschiedener Werkstoffe. Dies erfordert eine Bewertung hinsichtlich Kontaktkorrosion.

Die Reibwerte haben einen großen Einfluss auf die Verbindung. Die Reibung in der

Kopfaufklage und im Gewinde bestimmt die erreichbare Klemmkraft. Bei der querkräftbelasteten Verbindung muss die Klemmkraft und die Reibwerte groß genug sein um Relativbewegungen zwischen der Schraube und/oder den verspannten Teilen zu vermeiden.

Zudem ermöglicht eine ausreichende Klemmkraft und die geeignete Beschichtung eine gasdichte Verbindung. Die gasdichte Verbindung sichert eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit der Verbindung.

Literatur Quellenangaben

[1] Prof. Dr. Bertram Reinhold: Elektrochemische Prüfmethode zur Korrosionsprognose, www.manosdresden.de/ehemalige/netzwerk/reinhold_em.pdf, 2008

[2] VDI 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen, VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, 2003

[3] Slade, P. G.: Electrical Contacts Principles and Applications, Kap. 7: Tribology of Electronic Connectors, 2014

[4] Hoppe, T.: Die tribologischen Eigenschaften von vergoldeten elektrischen Kontakten, Dissertation am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013