

## **Tribologische Designparameter von elektrischen Hochstrom-Verbindungen: Ermittlung der Reibwerte und des Relaxationsverhaltens in elektrischen Kontaktverschraubungen**

### **Zusammenfassung:**

Trends zur Elektromobilität und zu erneuerbaren Energien bringen Chancen aber auch Herausforderungen in der Tribologie. Robuste tribologische Kontakte und beherrschte Streuungen sind die Voraussetzungen für belastbare elektrische Verbindungen. Dieser Beitrag erläutert am Beispiel einer elektrischen Kontaktverschraubung die Ermittlung der Reibwerte während des Montageprozesses und die stichprobenweise Ermittlung und Bewertung des Relaxationsverhaltens.

### **Abstract:**

Electro mobility and renewable energy offers new opportunities, as well challenge the area of tribology. Robust tribological contacts and controlled process distributions are requirements for high-current electrical connections. This article explains the determination of the friction values during the assembly process and the analysis and evaluation of relaxation in connections. Design examples help to understand contact mechanism.

### **Einleitung**

Die Elektromobilität erhielt nachhaltigen Aufschwung. Anreize geben bspw. die Gesetzgebung, die Stickoxid- bzw. Feinstaubbelastung in Großstädten, die begrenzten Ressourcen an fossilen Brennstoffen und vor allem auch die zunehmende Attraktivität der Fahrzeuge. 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 ergänzend zu den bereits beschriebenen Auslegungs- und Designhinweisen elektrischer Verbindungen [1] die Ermittlung von Prozessparametern. Einfache Beispiele zeigen die Ermittlung und Verwendung vorhandener Produktionsdaten für die Verbesserung der Produktionsprozesse, sowie für die Weiterentwicklung der Produkte und Prozesse.

### **Zur Entstehung und den Vorteilen der beschriebenen Vorgehensweise**

Daten aus Produktionsprozessen für die Produktionskontrolle, wie auch für die Weiterentwicklung des Designs zu nutzen, das sind Überlegungen, die in der Praxis entstanden. Denn einerseits werden im typischen Entwicklungsablauf Verifikationen und Laboruntersuchungen des Designs durchgeführt wie z.B. Schraubfall-Analysen. Damit erwirbt der Entwickler erste Ergebnisse aber i.d.R. noch keine statistisch relevanten Streuungen. Andererseits helfen die ermittelten Daten, Produktion und Prozesse besser zu kontrollieren, Trends und Änderungen (in der kompletten Produktentstehung und Transportkette, auch bei Lieferanten) werden erkannt, Probleme bei der Montage oder im Feld vermieden.

Als Ergänzung zur Auslegung, Festigkeitsnachweisen (VDI 2230) und entwicklungsbegleitenden Verifikationen durch Schraubfallanalysen liegt der Fokus auf

- a) der serienbegleitenden Auswertung/Verwendung im Montageprozess kostenneutral zu ermittelnder Werte (z.B. Gesamt-Reibwerte) für die Prozesskontrolle, für das Erkennen von Trends, Bewertung von Streuungen (z.B. Einfluss von Oberflächenzuständen und Beschichtungen) und dem Erkennen von Abweichungen. Der Steigerung der Qualität. Zudem helfen die ermittelten

Kennwerte bei weiteren Auslegungen.

Fokus: **Reibwerte**

b) Montagediagramm

Fokus: Erkennen von Abweichungen/Montagefehlern z.B. Steigung und Übergang der Kurven lassen auf Abmessungen und Fügebedingungen schließen (Bauteile liegen nicht spaltfrei und plan aneinander)

c) serienbegleitenden End of line Prüfungen/stichprobenweise Ermittlung der Weiterdrehmomente

Fokus: Materialkennwerte, Werkstoffverhalten, Spannungsrelaxation, Langzeitverhalten der Verbindung.

Die **Potentiale** sind geringere/bekanntere Streuungen und damit geringere erforderliche Überdimensionierung/Sicherheitsfaktor. Zudem ein Rückfluss der Daten in die Entwicklung, als Grundlage für weitere Auslegungen und Verifizierungen.

### **Funktion und Anforderungen an die elektrischen Hochstrom-Verbindungen**

Die primären Funktionen der elektrischen Verbindungen sind es, Strom zu übertragen, bei ausreichender Strombelastbarkeit und geringen Widerständen. Das ermöglicht geringe Verlustleistungen und damit eine geringe Eigenerwärmung.

Daraus ergeben sich die Anforderungen auf Systemebene betrachtet

Elektrisch

- Leitfähigkeit und geringer Übergangswiderstand und geringe Wärmeentwicklung
- Stromtragfähigkeit

Mechanisch

- Festigkeit, Vibrationsbelastbarkeit der Verbindung
- Erhaltung der 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 die Montage

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-Wirkung-Diagramme. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf zwei aus tribologischer Sicht relevanten/wesentlichen Einflussgrößen, das sind

- a) Reibwerte und deren Streuungen

- b) Anpressdruck der Kontaktflächen über Lebenszeit, Ermittlung der Weiterdrehmomente

### **Bedeutung der Reibwerte für das Montageergebnis**

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).

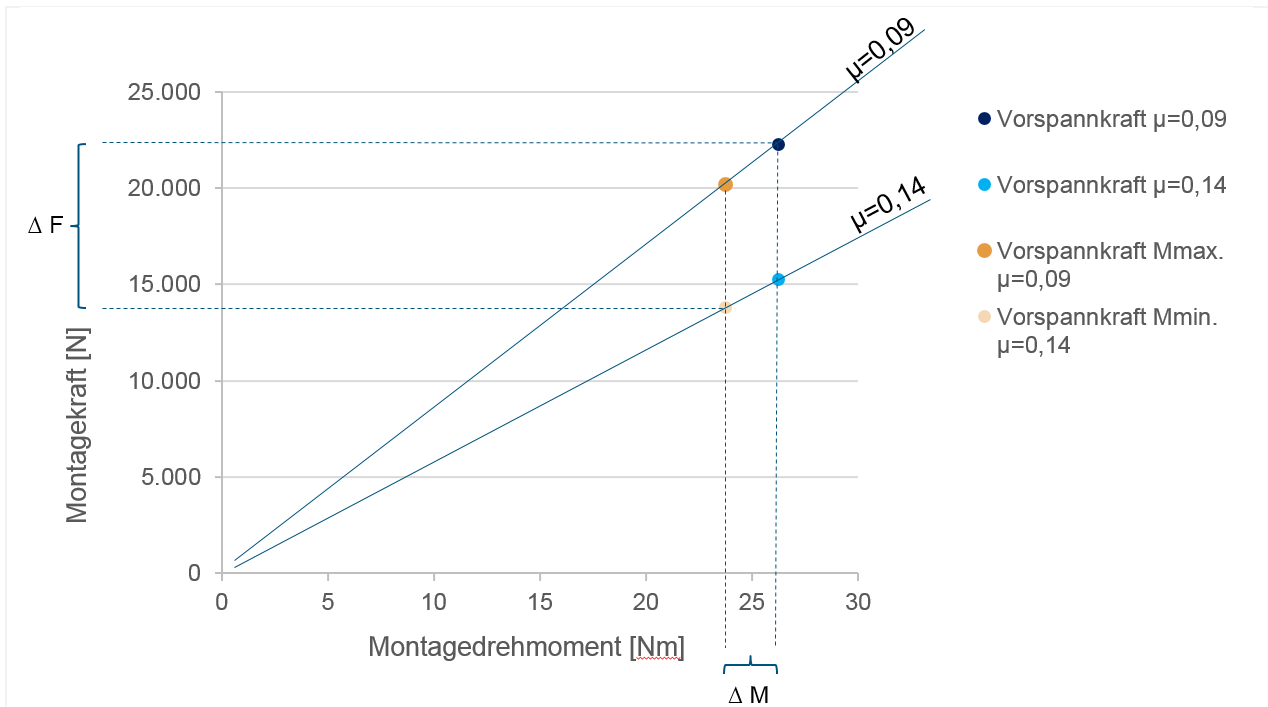
Die Unkenntnis der auftretenden Reibwerte und der Streuungen erschwert die Berechnung und Dimensionierung, sie erfordern eine Überdimensionierung/Sicherheitsabstände und schränken damit die Nutzung der Tragfähigkeit ein. Das Ziel ist deshalb **reproduzierbare Reibungszahlen** bei geringen Streuungen.

Beeinflusst werden diese Reibwerte und deren Streuungen bspw. durch

- die Abmessungen, Bauteilgeometrie, Kopf-Auflagegeometrie
- die im Kontakt stehenden Werkstoffe, Gitterstruktur, Härte
- Bearbeitungsverfahren, Oberflächenhärte, Topografie und Rauigkeit, auch Formabweichungen wie Grate
- Beschichtung, Oberflächenbehandlung, Reinheit ggf. Schmierzustand, auch Abweichungen durch Betauung, Verunreinigungen, Korrosion
- Temperatur Bauteile der Umgebung, auch Erwärmung bei Montage
- Prozessparameter z.B. Umdrehungs-Geschwindigkeit des Schraubwerkzeuges

Die Vielzahl an Einflüssen, die auf Reibungswerte einwirken, erfordern eine Einstellung der Reibwerte durch z.B. Gleitbeschichtungen und ein geeignetes Anzugsverfahren. Die Ermittlung der Reibwerte für die Berechnung, Dimensionierung und die Montagestrategie, Montageparameter erfolgt i.d.R. experimentell (ISO 16047, VDA 235-203).

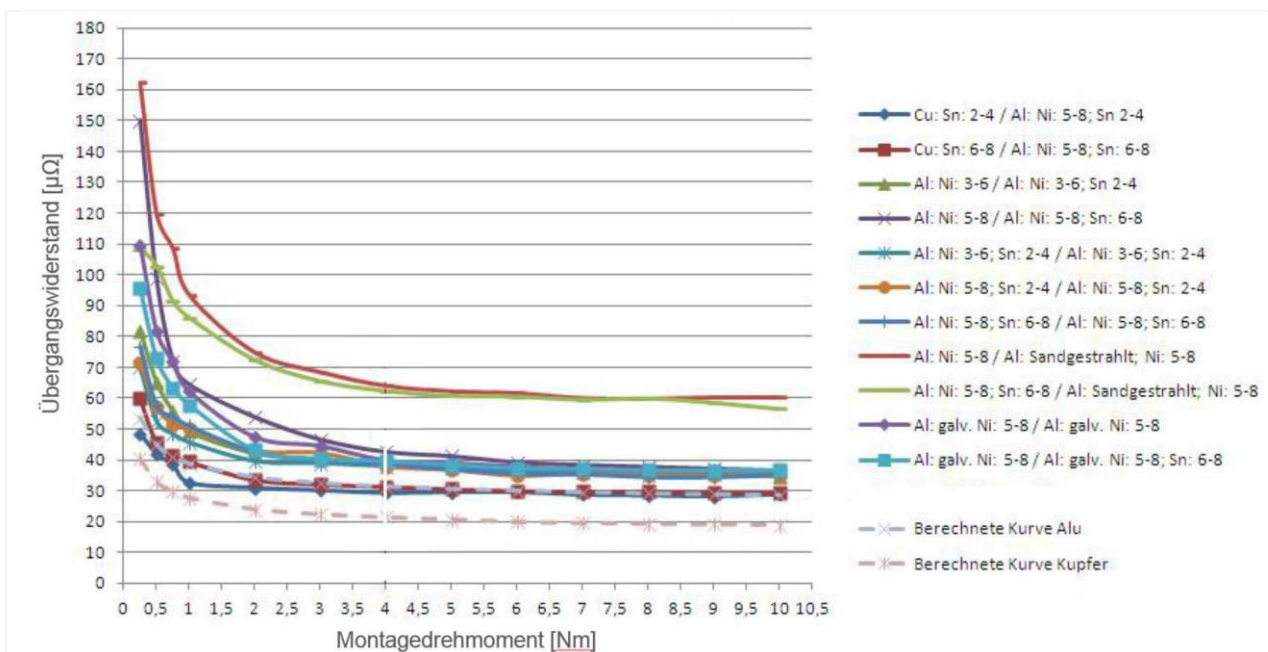
Ein geringe Streuung im Montagedrehmoment/ein definiertes Reibwertfenster sind Voraussetzung für die Herstellung einer zuverlässigen Schraubverbindung. Die Bestimmung der Reibwerte wird in DIN EN ISO 16047 und der VDA 235 beschrieben. Abb. 1 zeigt den Einfluss des Drehmoments bei einer 5% Streuung des Anziehverfahrens und der Reibwerte für ein Reibwertfenster  $\mu=0,09-0,14$ .



**Abb. 1: 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.

Um den Streubereich der Reibwerte zu verkleinern, ein definiertes Reibwertfenster einzustellen, sind **Gleitbeschichtungen** auf den Verbindungselementen gängig. Dadurch verringern sich die Streuungen der erreichten Kontaktkraft und damit auch die Streuungen der Widerstände/der elektrischen Werte der Verbindung (Abb. 2).



**Abb. 2: Versuchsreihe zum Einfluss des Montagedrehmoments der elektrischen Kontaktverschraubung auf den Übergangswiderstand.**

Abb. 2 zeigt den Einfluss des Montagedrehmoments der elektrischen Kontaktverschraubung auf den Widerstand der Verbindung. In Abhängigkeit der gewählten Leitwerkstoffe und Beschichtungen ist eine Mindestklemmkraft über Lebensdauer erforderlich.

### Produktionsbegleitende Bewertung/serienbegleitende Qualitätsbewertung der Reibwerte und der Streuungen

Nachfolgend ist der Fokus auf den Möglichkeiten bei Schraubfallanalysen und **serienbegleitend** Parameter zu ermitteln, um Prozesse zu kontrollieren, Streuungen/Trends/Abweichungen frühzeitig zu erkennen und als statistische Datengrundlage für weitere Auslegungen.

Wesentlicher Vorteil ist, dass alle reibwertbeeinflussenden Einflussfaktoren mit erfasst werden und auch in der Anzugsstrategie „Verschrauben auf konstantes Drehmoment“ bewertet werden. Die Erfahrung in der Praxis zeigt, dass serienbegleitende Ermittlungen vor allem bei gewindeformenden Schrauben zudem für die Prozessbewertung und Qualitätssicherung sehr hilfreich sind.

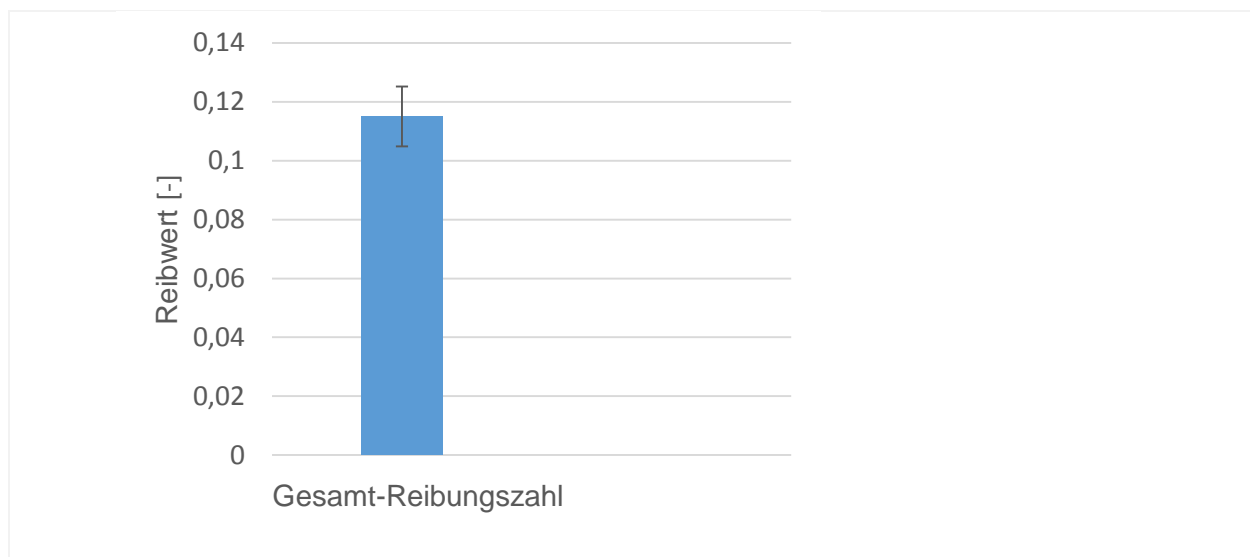


Abb. 3: Nach DIN EN ISO 16047 ermittelte Gesamtreibzahl in einer elektrischer Kontaktverschraubung.

Die Auswertung des Gradienten aus Drehmoment und Drehwinkel zeigt plastische Verformungen, sowohl an den verschraubten Bundmetallen (Überschreitung der zulässigen Grenzflächenpressung) ggf. auch an den Verbindungselementen (vgl. streckgrenzgesteuertes Anzugsverfahren). Für die Auswertung können Drehwinkel- und/oder ein Drehmoment-Bereich/ Drehmomentschwellwerte für die Ermittlung der Reibwerte definiert werden.

### Bedeutung der Setzbeträge und der Relaxation auf das Langzeitverhalten der Verbindung

Die Vorspannkraft ändert sich nach der Montage durch Setzen und Relaxation, zudem

auch temperatur- und belastungsabhängig. Herausfordernd bei den elektrischen Verbindungen sind die in der Regel kurzen Klemmlängen, die nur geringe Setzbeträge erlauben, die relativ geringe Festigkeiten bzw. die Kriechneigung der verspannten Werkstoffe, wie auch Temperaturwechsel durch die Strombelastung, ggf. dynamische Belastungen durch Vibration/Beschleunigungen und Massen/Masseträgheiten. Dies kann zum Vorspannkraftverlust führen.

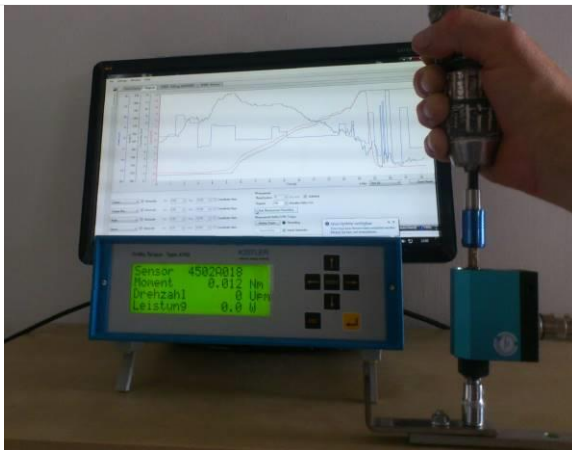
Eine Möglichkeit, sich der Relaxation anzunähern, ist die Messung des Weiterdrehmoments, das auch in der VDA 5.2 als Prüfprozess genannt wird. Zudem kann die Ermittlung des Weiterdrehmoments auch als serienbegleitende Prüfung sinnvoll sein, um Veränderungen und Trends in den Prozessen zu erkennen.

### Serienbegleitende End of line Prüfungen/stichprobenweise Ermittlung der Weiterdrehmomente

Der Fokus liegt nun auf Materialwerten, Werkstoffverhalten und Spannungsrelaxation die das Langzeitverhalten der Verbindung beeinflussen. Der Vorspannkraftverlust kann sich auf die Funktionen der Verbindung auswirken, z.B. zu einem Anstieg des Widerstands führen, die Gasdichtheit der Verbindung gefährden oder kann zum ungewollten Lösen der Verbindung führen.

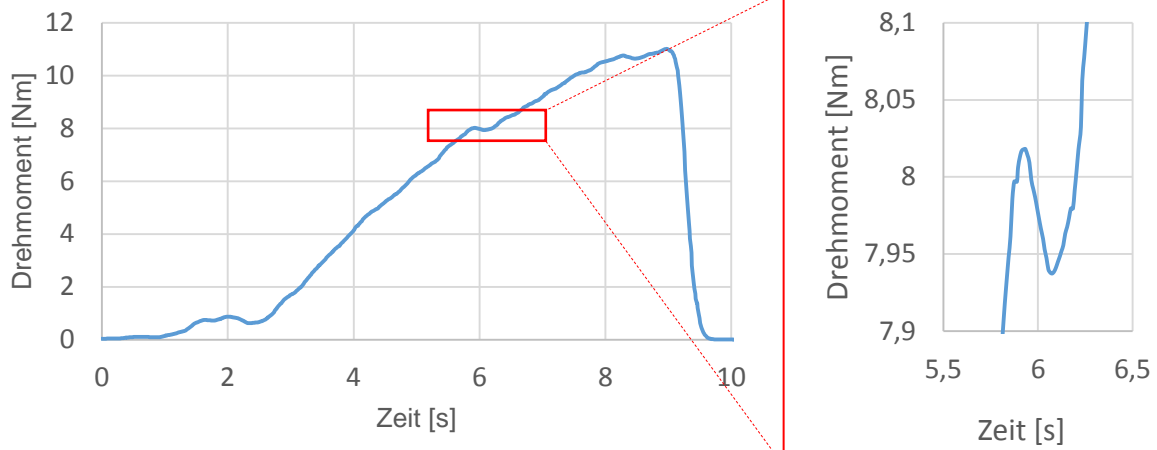
Maßgebende Beiträge für Veränderungen der Vorspannkraft sind

- Setzen (z.B. plastische Verformungen in den Schnittstellen/Interfaces, zwischen den Bauteilen, zwischen Bauteil und Verbindungselement oder in den Gewindeflanken
- die Relaxation der verspannten Bauteile und der Verbindungselemente



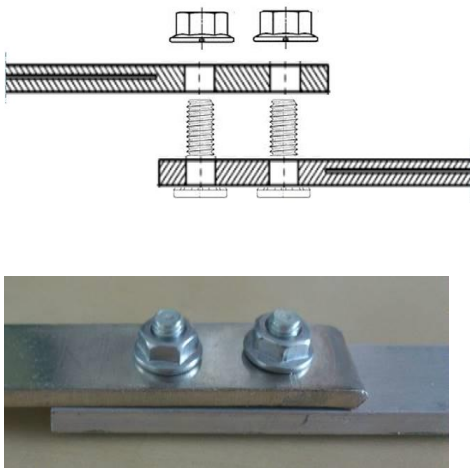
**Abb. 4: Schraubfall-Analyse und Weiterdrehmoment-Ermittlung im Labor**

Messgenauigkeit 0,2%, Messfrequenz bis 10 kHz



**Abb. 5: Drehmoment-Charakteristik und Auswertung einer Weiterdrehmoment-Messung**

Vor allem bei Verbindungen mit Bundmetallen, Verbindungen mit Leichtmetallen oder auch bei Direktverschraubungen in Kunststoff treten hohe Relaxationsfaktoren auf. Einige Beispiele zeigt die Abbildung 7.

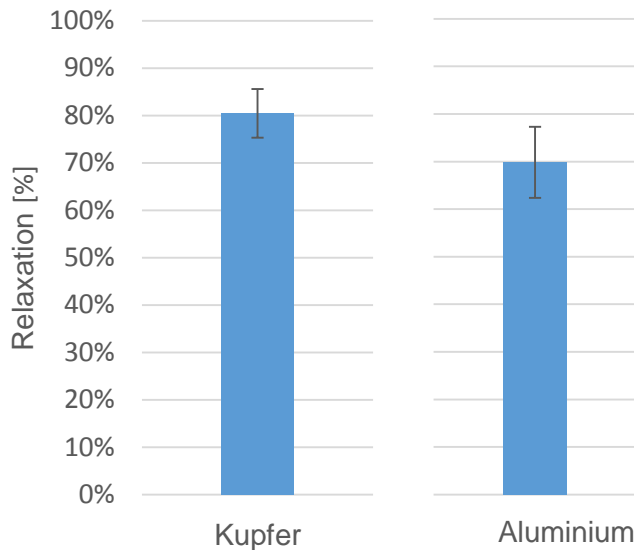


**Abb. 6: Beispiel einer elektrischen Kontaktverschraubung**

Im Fall einer Funktionstrennung leiten die Stromschiene 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 Stromschiene aus Kupfer galvanisch verzinkt.



**Abb. 7: Ermittlung und Vergleich der Relaxation an unterschiedlichen Verbindungen, Leitwerkstoffe Kupfer vs. Aluminium.**

Nach Montage 24 h statisch gelagert: Kupfer-Stromschienen (ETP), Aluminium-Stromschienen (EN AW 1050 A H 14/24)

Abb. 7 zeigt noch relativ moderate Relaxationswerte. Für konstruktiv ungeeignete/ungünstigere Verbindungen z.B. durch eine im Hauptkraftschluss verspannte Dichtung (Frenzelit Novapress 850: Aramidfasern mit Funktionsfüllstoffen, gebunden mit NBR-Kautschuk, Dicke 1,5 mm) wurde innerhalb 24 h Stunden eine Verringerung der Vorspannkraft auf 60% gemessen, ebenso unzulässig hohe Werte in einer Kunststoff-Flansch-Verbindung ohne Metall-Inserts (Stecker aus PA66 GF30).

Die Ermittlung des Weiterdrehmoments ermöglicht

- die Design-Verifikation: Ermittlung des Vorspannkraftverlustes in einer Verbindung zur Absicherung der Auslegung der Schraub-Verbindung insb. des Langzeitverhaltens, der Bewertung von Setzbeträgen/der Kriechneigung.
- als serienbegleitende Stichproben-Prüfung ermöglicht die Ermittlung des Vorspannkraftverlustes und das Erkennen von Trends/Veränderungen im Serienprozess z.B. Veränderung der Reibwerte durch veränderten Herstellprozess, Veränderung der Setzbeträge durch Veränderung der Werkstoffe, der Rauheit, der Abmessungen, der Fügespalte, der tragenden Kontaktfläche, der Geometrie durch Grate, u.ä. Für das Abdecken weiterer Einflüsse/der Belastungen aus dem Feld und im Betrieb können vor der Prüfung Bauteile gealtert/getestet werden.

## Zusammenfassung

Dieser Beitrag erläutert am Beispiel einer elektrischen Hochstromverbindung tribologische Fragestellungen.

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

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 müssen die Klemmkraft und die Reibwerte groß genug sein, um Relativbewegungen zwischen der Schraube und/oder den verspannten Teilen zu vermeiden. Zu geringe Reibwerte können zum ungewollten Lösen von Verbindungen führen.

Eine ausreichende Anpresskraft der leitfähigeren Kontaktpartner über Lebensdauer ist erforderlich, um geringe Kontaktwiderstände zu realisieren. Zudem ermöglicht eine ausreichende Klemmkraft und die geeignete Beschichtung eine gasdichte Verbindung. Die gasdichte Verbindung sichert eine ausreichende Korrosions- und Penetrationsbeständigkeit der Verbindung.

Eine weitere Voraussetzung für das Langzeitverhalten der Verbindung sind geringe Setzbeträge und eine geringe Kriechneigung/Spannungsrelaxation. Es werden Relaxationsbeträge an verschiedenen Verbindungen ermittelt. Die Ermittlung des Weiterdrehmoments ermöglicht zum einen die Verifikation des Designs, zum anderen ermöglicht sie als serienbegleitende Stichproben-Prüfung die Ermittlung des Vorspannkraftverlustes und das Erkennen von Trends/Veränderungen im Serienprozess.

Für das Abdecken weiterer Einflüsse/der Belastungen aus dem Feld und im Betrieb können vor der Prüfung Bauteile gealtert/getestet werden.

Die beschriebene Vorgehensweise eignet sich auch zur Übertragung auf andere Bereiche, in denen Reibwerte entscheidenden Einfluss haben z.B. Einlaufvorgänge.

### **Literatur Quellenangaben**

- [1] Gleß, Michael: Tribologische Designparameter von elektrischen Hochstrom-Verbindungen und deren Einfluss auf die Funktion, GfT-Tagung 2016
- [2] VDI 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen  
Zylindrische Einschraubenverbindungen, VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, 2003
- [3] VDA Band 5.2 Prüfprozesseignung für das Drehmoment von Schraubenverbindungen, 1. Auflage 2013
- [4] DIN EN ISO 16047:2005-10 Verbindungselemente Drehmoment/Vorspannkraft-Versuch