

Ruhende stromführende Verbindungen für langfristig zuverlässige stationäre und mobile Betriebsmittel

Steffen Großmann, Stephan Schlegel

Steffen Großmann, TU Dresden, Institut für elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Mommsenstraße 10, 01062 Dresden, DEUTSCHLAND, +49 351 463 33428, steffen.grossmann@tu-dresden.de, www.tu-dresden.de/etieeh

¹Stephan Schlegel, dt. +49 351 463 32746, stephan.schlegel@tu-dresden.de

Kurzfassung: In Komponenten, Betriebsmitteln und Anlagen der ~~elektrischen-ElektroE~~energie-technik ist eine Vielzahl ruhender, nicht schaltender, stromführender Verbindungen enthalten, deren zuverlässige Funktion über Jahrzehnte langfristig sichergestellt sein muss, um Verfügbarkeit, Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Sicherheit ganzer Systeme zu gewährleisten. Der Ausfall einer einzigen Verbindung kann gravierende Folgen für Systeme von Infrastruktur, Industrie, Verkehr, Gesundheitswesen und Haushalte haben. Eine durchgängige Überwachung ist aufgrund der großen Anzahl derartiger Verbindungen unmöglich. Daher werden hohe Anforderungen an die Gestaltung, Herstellung und Montage gestellt, denen sich Hersteller und Betreiber stellen müssen. Wissenschaftliche Forschung unterstützt diese mit Untersuchungsergebnissen zum ~~angepasstem-angepassten~~ Design, geeigneten Werkstoffen und zum Alterungsverhalten derartiger Verbindungen.

Keywords: stromführende Verbindungen, elektrische Kontakte, Langzeitverhalten, Betriebsmittel Elektroenergietechnik **Keyword4**

1 Einführung

Die zunehmende Einspeisung regenerativer Energien mit veränderten Lastprofilen, höherer Auslastung bestehender Anlagen und Systeme, der Einsatz hoch belasteter Betriebsmittel unter extremen Klimata und in der Elektromobilität, sowie das Bestreben nach immer größerer Kompaktheit und dem steigenden Kostendruck bedingen ein stark wachsendes Interesse an diesen, meist weniger beachteten Komponenten in der Elektroenergie-technik. Am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik der TU Dresden, IEEH, wird dazu seit über vierzig Jahren Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung betrieben. Die Ergebnisse finden bei der Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, Montage und beim Betrieb von stationären und mobilen Betriebsmitteln in der Praxis Anwendung und stellen einen Beitrag zu Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und zum bewussten Schutz von Ressourcen, Umwelt und Klima dar.

1.1 Elektrischer Kontakt und stromführende Verbindung

Als **elektrischer Kontakt** wird die Berührung zweier stromführender Leiter verstanden [1]. Eine **stromführende Verbindung** ist die technische Realisierung eines Kontakts mittels eines den Anforderungen entsprechenden, geeigneten Fügeverfahrens. Daraus ergeben sich unterschiedliche **Verbindungstechnologien** und teilweise die Verwendung von **Verbindern** als

spezielle Bauelemente (z. B. Klemmen, Press- oder Schraubverbinder, Kabelschuhe). Verbindungen lassen sich hinsichtlich ihrer elektrischen Funktion unterteilen (Abbildung 1). In diesem Beitrag werden ruhende Verbindungen betrachtet, deren Verhalten sich analog auf Verbindungen mit Trenn- und Schaltfunktion übertragen lässt.

Elektrische Funktion	Strom (I, k) leiten	Potenziale (φ_1, φ_2) trennen	Strom (I, k) unterbrechen
technische Realisierung	Ruhende und bewegte Verbindungen (z.B. Schrauben-, Press-, Klemmverbindungen, gleitende Verbindungen)	Trennschalter, Trennstellen, Steckverbinder (ohne Lichtbogen)	Lastschalter, Leistungsschalter (mit Lichtbogen)
technische Aufgabe	Elektrische Energie verlustarm, zuverlässig und langfristig stabil übertragen und verteilen		
Belastungen	- Strombelastung $I \rightarrow$ Verlustleistung $P_V = I^2 R_V(\vartheta_V)$ Gl.(1) \rightarrow Übertemperatur der Verbindung $\Delta\vartheta_V \uparrow$ wobei P_V ... Verlustleistung I ... Strom R_V ... Verbindungswiderstand ϑ_V ... Temperatur der Verbindung - mechanische Belastungen (z. B. Kurzschlusskräfte, Reibung, Schwingungen, Wärmedehnung) - Belastung durch Umgebung (z. B. Umgebungstemperatur, Sonnenstrahlung, Feuchtigkeit, Umgebungsmedium)		

Abbildung 1: Elektrische Funktion und Belastungen stromführender Verbindungen

1.2 Belastung und Beanspruchung

Das elektrische Betriebs- und Langzeitverhalten von Verbindungen kann von einer Vielzahl von Belastungsgrößen beeinflusst werden (Abbildung 1), die zur Beanspruchung der Verbindung (elektrisch, thermisch, mechanisch, umgebungsbedingt) und damit zu deren Alterung und schließlich zum Ausfall führen. Üblicherweise treten verschiedene Belastungen zeitgleich jedoch mit zeitlich verschiedenem Lastprofil (z. B. Dauerlast, Wechsellast, Fehlerfall) und mit unterschiedlicher Wirkung auf. Abhängig von den Einsatzbedingungen und den zu erwartenden Belastungen sind die Verbindungen geeignet auszulegen und zu montieren, um die geforderte Lebensdauer (bei Elektroenergieanlagen meist über vierzig Jahre) zu gewährleisten. Bei Bedarf sind Berechnungen und experimentelle Untersuchungen erforderlich, um der Verbindung die erforderliche Festigkeit gegenüber den Belastungen zu verleihen.

2 Grundlagen und Gestaltung

2.1 Kontaktfläche, Kontaktwiderstand und Verlustleistung

Bei stromführenden Verbindungen ist die scheinbare Kontaktfläche A_s (Flachkontakt, Linienkontakt, Punktkontakt) tatsächlich nur zu einem geringen Teil an der Kontaktierung und damit an der Stromleitung beteiligt. Vielmehr sind es einzelne, kleine, mechanisch tragende, quasimetallische Kontaktflächen A_q und darin enthalten wahre metallische Kontaktflächen A_m , die sich elektrisch leitend berühren und für den Stromfluss / Engstellen darstellen (Engwiderstand R_E). Die dazwischen befindlichen Flächen A_i berühren sich nicht oder sind mit nichtleitenden Fremdschichten überzogen und sind somit damit elektrisch isolierend (Abbildung 2)

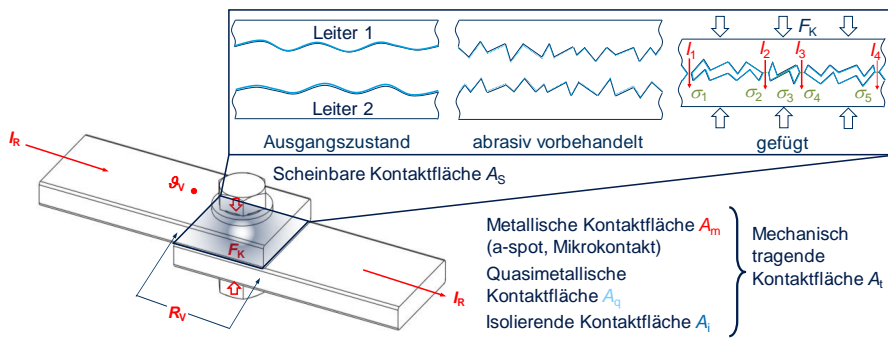
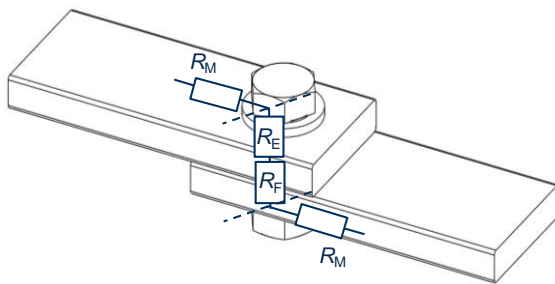


Abbildung 2: Kontaktflächen in einer Schraubenverbindung

Damit befinden sich in der Strombahn zusätzlich zum ohmschen Widerstand R_M der metallischen Leiter noch der im Kontaktwiderstand R_K zusammengefasste Engwiderstand R_E und der Fremdschichtwiderstand R_F , die beide temperaturabhängig sind. Außerdem können sie sich durch Alterung (z. B. chemische Reaktionen, Kraftabbau) belastungsabhängig mit der Zeit vergrößern/erhöhen (Abbildung 3).



Kontaktwiderstand R_K

$$R_K = R_E + R_F \quad \text{Gl (2)}$$

Verbindungswiderstand R_V

$$R_V = R_{M1} + R_K + R_{M2} \quad \text{Gl (3)}$$

wobei

R_K ... Kontaktwiderstand

R_E ... Engwiderstand

R_F ... Fremdschichtwiderstand

$R_{M1,2}$... Widerstand der metallischen Leiter 1 und 2

Abbildung 3: Elektrische Widerstände in einer stromführenden Verbindung

Der Kontaktwiderstand R_k ist maßgeblich vom spezifischen elektrischen Widerstand des Kontakmaterials-Kontaktwerkstoffes und dessen Härte sowie der Verbindungskraft-Kontaktkraft F_{yk} abhängig, mit der die Strombahnen-Leiter gefügt werden (kraftschlüssige Verbindung). Die in der Verbindung entstehende Verlustleistung P_V (Gl. 1) und die damit verbundene Erwärmung in der Verbindung $\Delta \vartheta$ werden ~~semit-~~ neben der quadratisch eingehenden Strombelastung I vom Wert des Kontaktwiderstands R_k maßgeblich bestimmt den Eigenschaften des Kontakmaterials und der Verbindungskraft F_{yk} in der Verbindung bestimmt.

Formatiert: Tiefgestellt

Formatiert: Schriftart: Kursiv

Formatiert: Tiefgestellt

Formatiert: Tiefgestellt

2.2 Gestaltung und Montage stromführender Verbindungen

Ein langfristig stabiler und möglichst geringer Kontakt- und damit Verbindungswiderstand R_V wird unter Beachtung aller Belastungen durch eine geschickte Kombination der Kontaktgrundmaterialien-Leiter- und Beschichtungswerkstoffe, deren Beschichtung und der Konstruktion sowie einer sorgfältigen Montage erreicht (Abbildung 4).

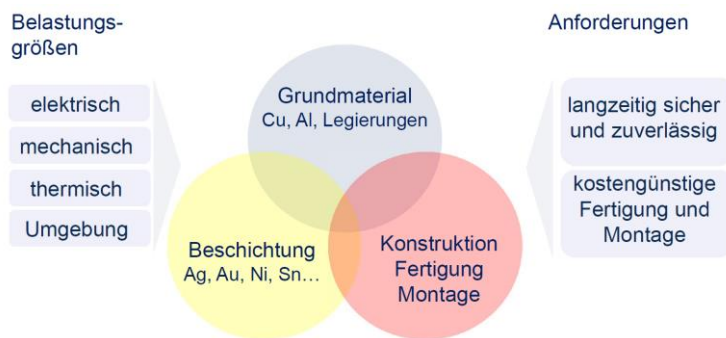


Abbildung 4: Elemente bei der Gestaltung, Fertigung und Montage elektrischer Verbindungen

Beim Fügen der zu verbindenden Strombahnen-Leiter kommen verschiedene Bindemechanismen und Verbindungstechnologien-Fügetechnologien zum Einsatz:

- Stoffschluss - z.B. nichtlösbare Schweiß- oder Lötverbindungen
- Kraftschluss - z.B. lösbare Schraubenverbindungen oder Steckverbindungen
- Formschluss (in Verbindung mit Kraftschluss) – z.B. nichtlösbare Press- der Kerbverbindungen, Clinchen, Stanznieten

Diese finden entsprechend der vorgesehenen Applikation bei der funktionalen Gestaltung von Verbindungen Anwendung (Abbildung 5).

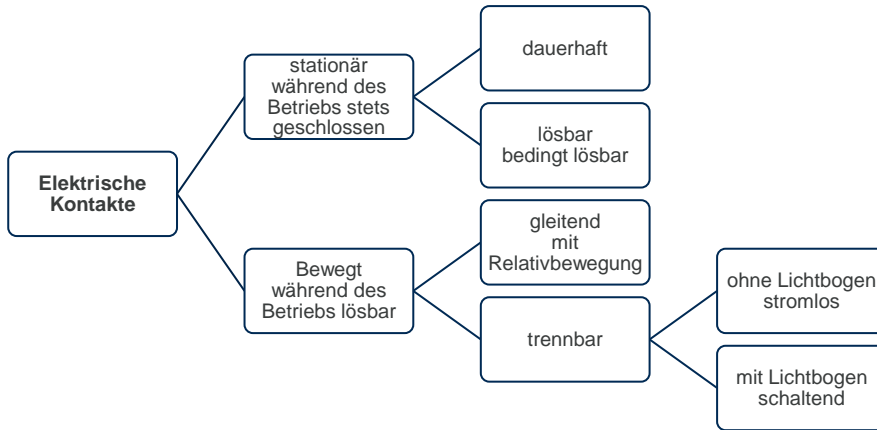
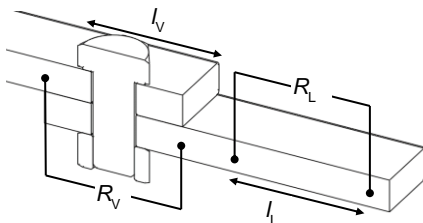


Abbildung 5: Gestaltung von Kontakten und damit Verbindungen entsprechend der Funktion

Für die Bewertung um ruhender ruhende stromführender stromführende Verbindungen bewerten zu können, hat sich für Schrauben- und Klemmverbindungen mit getrockneten getrockneten Leitern der Gütefaktor k_u bewährt. Er ist unabhängig von den Abmessungen der Verbindung und ein Maß dafür, wie groß die in der Verbindung entstandene Verlustleistung P_V bezogen auf die Verlustleistung P_L in einem gleichlangen Leiterstück ist. Dazu werden der Spannungsfall ΔU bzw. der Widerstand R jeweils von der Verbindung (V) als auch von dem Leiter (L) gemessen und anschließend ins Verhältnis gesetzt (Abbildung 6).



Voraussetzung $l_V = l_L$ Gl. (4)

Gütefaktor k_u

$$k_u = \frac{\Delta U_V}{\Delta U_L} = \frac{R_V}{R_L} = \frac{P_V}{P_L} \quad \text{Gl. (5)}$$

Abbildung 6: Gütefaktor einer stromführenden Verbindung

Dabei gilt

$k_u < 1$ - sehr gute Verbindung, hohe Zuverlässigkeit, Verbindung hat eine niedrigere Temperatur als der Leiter.

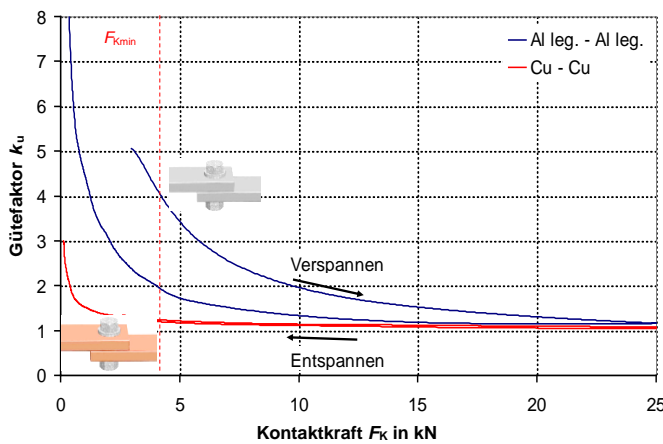
$k_u = 1$ - Leistungsgleichheit, (praktisch ist für neu montierte Schraubenverbindungen $k_u \leq 1,5$ akzeptabel).

Kommentiert [SS1]: Ist für Armaturen von Freileitungsseilen und Kabeln nicht ausreichend und gilt eigentlich nur für Schraubenverbindungen mit Stromschienen

Kommentiert [SG2]: geändert

$k_u \gg 1,5$ - von einer Verbindung mit großem Gütefaktor kann kein langfristig zuverlässiger Betrieb erwartet werden. Die Verbindung wird zum Hotspot.

Um möglichst viele und großflächige metallische Kontaktstellen-Mikrokontakte zu schaffen und damit den Engewiderstand R_E so gering wie möglich klein zu halten (Gl. 2), ist eine entsprechend große Verbindungskraft-Kontaktkraft F_{VK} erforderlich, die durch das richtige Anziehdrehmoment beim Verspannen der Schraube entsteht.



Kommentiert [SG3]: x-Achse → Kontaktkraft F_K

Abbildung 7: Der Gütefaktor abhängig von der Verbindungskraft-Kontaktkraft bei Schraubenverbindungen aus Aluminium (blau) und Kupfer (rot) beim Verspannen (Montage) und beim Entspannen (Kraftabbau)

Ein niedriger Gütefaktor k_u erfordert weiterhin auch einen sehr kleinen Fremdschichtwiderstand R_F (Gl. 2), der durch das Beseitigen der Aufbrechen Fremdschicht und Mikrostrukturieren der Kontaktflächen mittels einer sauberen Stahldrahtbürste bei Leitern aus Aluminiumleitern bzw. oder mit Scheifvlies bei Leitern aus Kupferleitern erfolgt. Umfangreiche Untersuchungen zeigen, dass die Montage ungereinigter Leitern aus Aluminiumleitern Gütefaktoren von $k_u = 10 \dots 100$, also die zehnfache bis hundertfache Verlustleistung gegenüber dem Leiter (Hotspots) bedingen. Sorgfältig gereinigte Kontaktflächen, eventuell ergänzt durch eine gerillte Oberflächenstruktur, ermöglichen bei der Montage problemlos Gütefaktoren um $k_u = 1$ als notwendige Voraussetzung für einen langfristig sicheren Betrieb.

Alterung und Langzeitverhalten

Stromführende elektrische Verbindungen unterliegen, abhängig von den Belastungen (Abbildung 1), der Konstruktion und den verwendeten Materialien-Werkstoffen sowie der Qualität

der Montage (Abbildung 4) einer Alterung, bei sich der Kontaktwiderstand R_K (Gl. 2) und damit der Gütefaktor k_u (Gl. 5) mit der Zeit t erhöhen und schließlich zum Ausfall der Verbindung (Aufschmelzen von Kontaktstellen, Grenzgütefaktor $k_{u, \text{grenz}}$) führen.

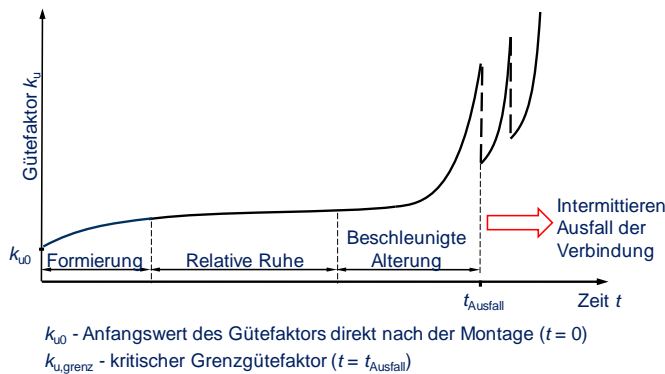


Abbildung 8: Prinzipieller Verlauf des Gütefaktors

Die Lebensdauer lässt sich dabei in eine Phase der Formierungsphase nach der Montage (Tage, Wochen), die Phase der relativen Ruhe (die eigentliche Betriebszeit über einige Jahrzehnte) und die Phase der beschleunigten Alterung (Verbindung wird zum Heißpunkt) unterteilen.

Insbesondere die Höhe der Strombelastung $I(t)$ und die Qualität der Montage (Anfangsgütefaktor k_{u0}) bestimmen maßgeblich die Alterungsgeschwindigkeit und damit die Lebensdauer bis zum Ausfall t_{Ausfall} .

3.1 Alterungsmechanismen

Für die Alterung sind verschiedene physikalische Prozesse verantwortlich, die je nach Design der Verbindung, Art und Höhe der Belastungen auch zeitgleich wirksam sein können. Die Vielzahl der Einflussgrößen und die Überlagerung der Alterungsprozesse stellt an deren wissenschaftliche Erforschung hohe Ansprüche. Dennoch lassen sich folgende Zusammenhänge erklären, bei denen allen die Temperatur einen wichtigen Einfluss hat [2], [3], [4], [5], :

- **Chemische Alterung** ist die Reaktion von metallischen Kontaktstückoberflächen mit der Umgebung z.B. durch Oxydation, elektrochemische Korrosion u.a. bei der sich die metallisch wirksame Kontaktfläche A_m (Abbildung 2b) durch Einwachsen von Fremdschichten (Reaktionsprodukte) verringert und somit den Engwiderstand R_E vergrößert.
- **Kraftabbau** entsteht durch das Setzen beim Fügen der Kontaktstücke und durch Spannungsrelaxation (Änderung der Dehnung im Kontaktwerkstoff unter Wirkung einer Verbindungskraft/Kontaktkraft F_{VK}). Über einen größeren Kraftbereich kann die Verbindung diesen Effekt kompensieren (Hystereseverhalten, Abbildung 7), beim Unterschreiten einer kritischen Kraft $F_{VK, \text{krit}}$ brechen jedoch die mikroskopisch kleinen Kontaktstellen

auf und der Gütefaktor vergrößert sich signifikant, was zum Ausfall der Verbindung führt.

- **Interdiffusion** zwischen unterschiedlichen Kontaktwerkstoffen, die miteinander gefügt sind, ~~kann-können sich zu~~ intermetallischen Phasen (Legierungen) bilden führen, die außerordentlich spröde sind und einen deutlich ~~größerer-höheren~~ spezifischen elektrischen Widerstand ~~besitzen-haben~~ als die reinen Kontaktwerkstoffe ~~slbst~~. Diese Schichten befinden sich unmittelbar in den Engstellen und führen zur deutlichen Vergrößerung des ~~Fremdschichtwiderstandes R_f~~ Kontaktwiderstands R_k .
- Weitere Alterungsprozesse können durch **Elektromigration** (Leerstellenwanderung im Metallgitter durch besonders hohe Stromdichte) oder durch **Reibverschleiß** bei sich relativ zueinander beweglichen Kontaktstücken (z.B. Abrieb in Steckverbindern) wirksam werden.

In umfangreichen Untersuchungen seit über vierzig Jahren Kontaktforschung an der TU Dresden konnten viele Erfahrungen gesammelt und in Modellen abgebildet werden, die eine mathematische Abschätzung des Alterungsverhaltens für bestimmte Anwendungen ermöglichen.

3.2 -Beispiele zum Langzeitverhalten

In Langzeitversuchen über mehrere Jahre können Erkenntnisse über die Alterung stromführender Verbindungen abhängig von verschiedenen Einflussgrößen gewonnen werden.

Beispiel 1:

Stromschienen-Schraubenverbindungen (40 mm x 10 mm; Al 99,5; mit Strombelastung, ~~XX~~ bei konstanter Vergleichsleitertemperatur von 100 °C) über zehn Jahre beobachtet (Abbildung 9), zeigen deutlich den großen Einfluss der Montagequalität durch sorgfältige Vorbehandlung der Kontaktflächen und ~~die das Einhalten~~ Einhalten vorgegebener Schraubenanziehdrehmomente Anziehdrehmomente der Schrauben. Schraubenverbindungen, die nach der Montage einen Anfangsgütefaktor $k_{u0} < 1,0$ aufweisen ~~hatten~~, sind auch nach zehn Jahren noch nahezu unverändert, während die mit Anfangsgütefaktoren $k_{u0} > 2,0$ von Anfang an eine größere Alterungsgeschwindigkeit erkennen lassen und nach wenigen Jahren einen bis zu 24,5-mal so hohen Widerstand besitzen, wie ein gleich langer Leiter und ~~semit-damit~~ zum Hotspot in der Anlage geworden sind. Ungereinigte Kontaktflächen von Verbindungen ~~besitzen-haben~~ wegen der harten und schlecht leitenden Al_2O_3 -Aluminiumoxidschicht sogar Anfangswerte von $10 \leq k_{u0} \leq 100$, bei denen der Ausfall der Verbindung bei hoher Strombelastung unvermeidlich ist.

Formatiert: Schriftart: Kursiv

Formatiert: Tiefgestellt

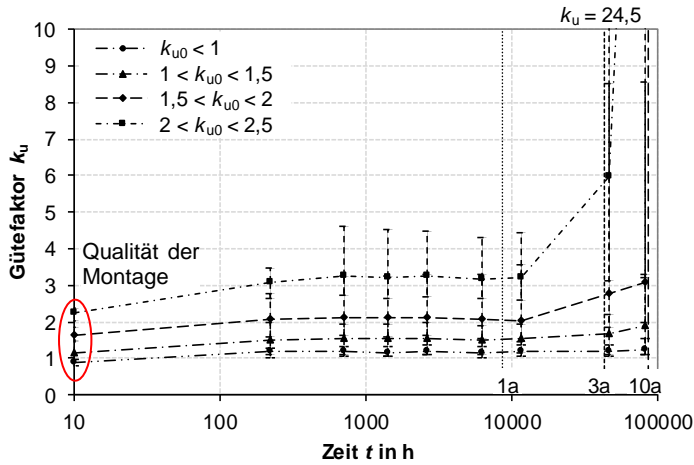
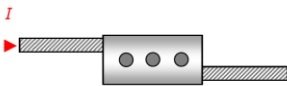


Abbildung 9: Gütefaktor von Aluminium-Schraubverbindungen abhängig von der Qualität der Montage (Anfangsgütefaktor k_{u0})

Beispiel 2:

Schraubklemmenverbindung von Freileitungsseilen (Al/St 185/30) wurden über drei Jahre experimentell untersucht und der weitere Alterungsverlauf mit Rechenmodellen extrapoliert [5] (Abbildung 10).

Freileitungsseil Al/St 185/30 mit Verbindungsklemme (Schalenstromklemme)



Anfangsgütefaktoren k_{u0} nach der Montage:

- min 0,76
- mittel 0,94
- max 1,40

Strombelastung I :

- $I = 0,6 I_n$ (entspricht weitgehend der bisher üblichen Praxis)
- $I = 1,0 I_n$ (entspricht dem Bemessungsstrom)
- $I = 1,3 I_n$ (entspricht einer Überlastung der Verbindung)

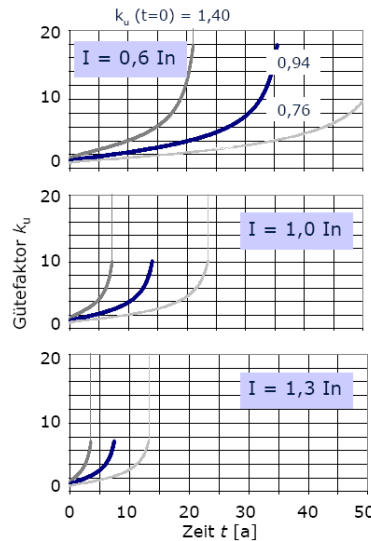


Abbildung 10: zeitlicher Verlauf des Gütefaktors k_u abhängig von der Qualität der Montage (Anfangsgütefaktor k_{u0}) und der dauernden Strombelastung I

Die mit den Untersuchungen möglichen Trendabschätzungen zeigen deutlich, dass ordnungsgemäß installierte Verbindungen bei Belastung mit 60% des Bemessungsstromes eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten ermöglichen, was praktischen Erfahrungen entspricht. Eine dauernde Strombelastung mit dem Bemessungsstrom oder gar eine Überlastung sind möglich, verkürzen aber die Lebensdauer ganz erheblich. Je höher die Strombelastung der Verbindung ist, desto bedeutsamer wird die Qualität der Verbindung und deren Montage.

Beispiel 3:

Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen unter „extremen“ Klimaten sollen Aufschluss über den Einfluss der Umgebung auf die chemische Alterung geben [3] [4]. Dazu wurden Proben teilweise strombelastet in verschiedenen Klimazonen ausgelagert:

Subtropisches Wüstenklima (Ismailia, Ägypten)

Tropischer Regenwald (Belém, Brasilien)

Gemäßigt mediterranes Küstenklima (Port Said, Ägypten)

Botanischer Garten (Tropenhaus) Dresden, Deutschland

Subpolares, sibirisches Tiefland, 300 km nördlich des Polarkreises (Norilsk, Russland)

- a Kupferstromschienen, galvanisch versilbert, im Neuzustand und nach zwei Jahren in verschiedenen Umgebungen



- b Kupferstromschienen, blank und mit galvanischer Beschichtung mit Zinn und Nickel, im Neuzustand und nach drei Jahren im Regenwald (Belém, Brasilien),



- c Aluminiumstromschienen, blank aus Aluminium Al 99,5 und AlMgSi, nach drei Jahren im Regenwald (Belém, Brasilien),

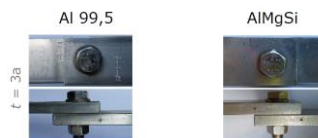


Abbildung 11: Ausgewählte visuelle Beobachtungen zum Langzeitverhalten von Kupfer- und Aluminiumstromschienen 40 mm x 10 mm unter verschiedenen Umgebungsbedingungen, a – versilberte Oberflächen nach zwei Jahren, b – Kupferstromschienen blank und galvanisch beschichtet, strombelastet, nach drei Jahren, c- Aluminiumstromschienen, strombelastet, nach drei Jahren im tropischen Regenwald

Kommentiert [SS4]: Eventuelle Verläufe des Gütefaktors ergänzen?
Kommentiert [SG5]: Diese habe extra herausgenommen, da wenig aussagekräftig, aber relativ großer Platzbedarf

Der äußere Zustand und der Gütefaktor $k_v(t)$ werden seit mehreren Jahren beobachtet. Während sich der Gütefaktor bei diesen Proben nicht signifikant geändert hat, sind insbe-

sondere bei ~~blanken-unbeschichteten~~ und galvanisch beschichteten Stromschienen Schraubenverbindungen optisch deutliche Veränderungen an den Schraubenverbindungen erkennbar (Abbildungen 11 a und b), während die transparente und harte Aluminiumoxidschicht ~~das~~ den Leitermaterial-Leiterwerkstoff bestens abschirmt-schützt und nahezu keine Veränderungen erkennbar sind (Abbildung 11 c). Aus den bisherigen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass bei sachgerecht montierten, stromführenden Schraubenverbindungen mit gleichartigen Kontaktoberflächen trotz teilweise optischer Veränderungen ein stabiles Langzeitverhalten auch unter (aus europäischer Sicht) extremen ~~Klimaten-Klimata~~ gewährleistet ist. Bei Bimetall-~~ver-~~bindungen-Verbindungen (hier nicht dargestellt) kann dies nicht bestätigt werden.

4 Schlussfolgerungen

Stromführende Verbindungen sind ein Beispiel dafür, wie oftmals wenig beachtete Komponenten in Systemen der ~~Energietechnik-Elektroenergietechnik~~ den höheren Belastungen durch notwendige Veränderungen in der Wandlung, dem Transport, der Verteilung und Speicherung sowie Anwendung von elektrischer Energie anzupassen sind. -Es sind ein tiefes Verständnis derselben und umfangreiche Forschungen erforderlich, um neue Technologien, z. B. bei Verbindungen für Hochspannungsleitungen und -kabeln für sehr große Leistungen oder in Bordnetzen mobiler Systeme zu ermöglichen und deren Zuverlässigkeit sicher zu stellen. Andererseits sind langfristig zuverlässige Betriebsmittel ein Beitrag zur Nachhaltigkeit und ~~sonit-damit~~ zum Schutz von Umwelt und Klima.

5 Literaturverzeichnis

- [1] E. Vinaricky, Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen, Heidelberg: Springer-Vieweg, 2016.
- [2] S. Schlegel, Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit Stromschienen aus Reinkupfer in der Elektroenergietechnik unter besonderer Berücksichtigung der Temperatur, Dresden: Dissertation TU Dresden, 2011.
- [3] S. Schlegel, Stromführende verbindungen und Leiterwerkstoffe der Elektroenergietechnik - Theorie zum Kontakt- und Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit Flächenkontakten, Dresden: Habilitataionsschrift TU Dresden, 2019.
- [4] S. Dreier, The Impact of Films on the Long-term Behavior of Stationary Electrical Connections in Electric Power Systems, Dresden: TUpres2016 - Dissertation TU Dresden, 2016.
- [5] S. Großmann, H. Iöbl, D. Bölke und U. Schäfer, Erhöhung der Strombelastbarkeit von Freileitungen und Schaltanlagen - Möglichkeiten und Risiken, Graz: 11. Symposium Energieinnovation, 10.-12.02.2010, 2010.

- [6] S. Großmann, H. Löbl und S. Schlegel, Erfahrungen zum Langzeitverhalten von Aluminium-Verbindungen in Starkstromanlagen, Karlsruhe: VDE Albert-Keil-Kontaktseminar, 2011.