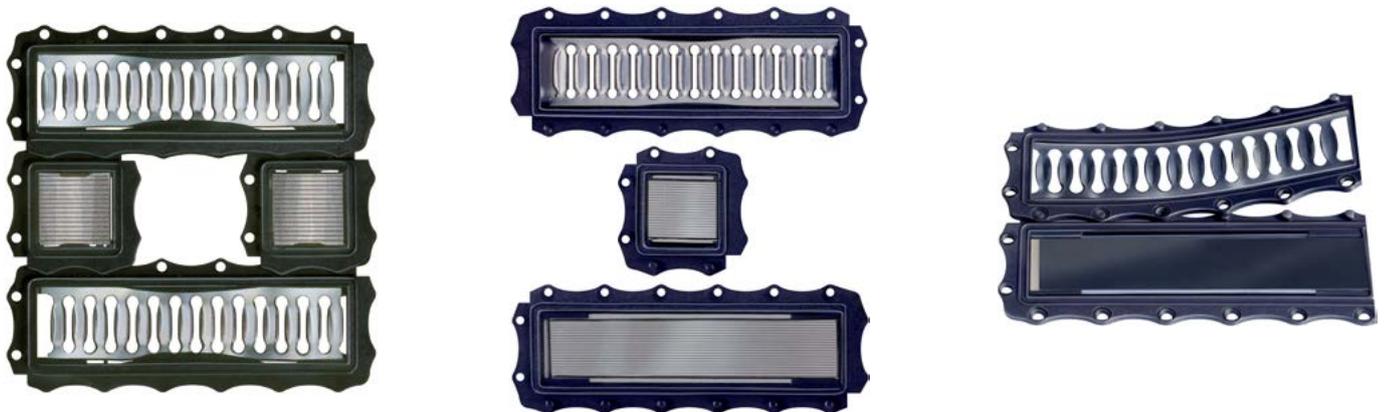


Langzeitverhalten blanker, verschraubter Stromschienenverbindungen

mit beziehungsweise ohne das Verbindungselement MC-SEALconTACT



Reduktion elektrischer Verluste, Verlängerung der Lebensdauer und Erhöhung der Anlagensicherheit durch Einsatz des Verbindungselementes MC-SEALconTACT

Inhaltsverzeichnis

1.	Problemstellung	3
2.	Bewertung und Beschreibung verschraubter Stromschienenverbindungen	3
2.1.	Verbindungswiderstand R_v	3
2.1.1.	Eigenwiderstand R_b	3
2.1.2.	Engewiderstand R_e	3
2.1.3.	Fremdschichtwiderstand R_f	3
2.1.4.	Übergangswiderstand R_u	3
2.2.	Schienenwiderstand R_{Sch}	3
2.3.	Gütefaktor k_u	4
2.3.1.	Kleinstmöglicher Gütefaktor	4
2.4.	Einflussgrößen des Verbindungswiderstands R_v und des Gütefaktors k_u	4
2.4.1.	Engewiderstand R_e und Fremdschichtwiderstand R_f	4
2.4.2.	Fremdschichtbildung	4
2.4.3.	Fremdschichtbildung und Verbindungstemperatur	4
2.4.3.1.	Wärmequellen, innere und äußere Wärme	4
2.4.3.2.	Übertemperatur	4
3.	Wirtschaftliche und ökologische Aspekte	5
3.1.	Technische Zuverlässigkeit und Wartung verschraubter Stromschienenverbindungen	5
3.2.	Stand der Technik verschraubter Stromschienenverbindungen	5
3.3.	Verschraubte Stromschienenverbindungen mit dem Verbindungselement MC-SEALconTACT	5
3.3.1.	Funktionelle Eigenschaften des Verbindungselements MC-SEALconTACT	5
3.3.1.1.	Kontaktmodul mit Drehfedersteglamelle	5
3.3.1.2.	Gerilltes Abstützmodul	6
3.3.1.3.	Dichtrahmen für Kontakt- und Abstützmodule	6
3.4.	Vergleich der Gütefaktoren verschraubter Stromschienenverbindungen mit bzw. ohne Verbindungselement MC-SEALconTACT	6
3.4.1.	Anfangsgütefaktor k_{u0}	6
3.4.2.	Langzeitgütefaktor $k_u(t)$	7
3.4.2.1.	Ohne Verbindungselement	7
3.4.2.2.	Mit Verbindungselement	7
3.5.	Einsparungspotential von Energiekosten an Stromschienenverbindungen mit dem Verbindungselement MC-SEALconTACT bei Innenraumanwendung	8
4.	Zusammenfassung	9
5.	Verwendete Literatur	9
6.	Anhang	
	Versuche zum Langzeitgütefaktor $k_u(t)$ von Stromschienenverbindungen mit MC-SEALconTACT	10

1. Problemstellung

Bei der Übertragung von Strömen im Größenbereich von einigen 100 A bis zu einigen 1000 A, in Ausnahmefällen bis zu einigen 10 000 A, z. B. in Metallschmelzanlagen, besteht im Bereich der Verbindungsstellen das Problem eines überaus hohen Verbindungswiderstands. Dieser wird von mehreren Größen beeinflusst

und nimmt im Laufe der Einsatzzeit durch Alterung zu, was in erhöhten Wärmeverlusten resultiert. Übermäßige Erhitzung kann zu einem Totalausfall der Verbindung führen. Die Lebensdauer hängt von verschiedenen Faktoren und Umgebungsbedingungen ab.

2. Bewertung und Beschreibung verschraubter Stromschienenverbindungen

2.1. Verbindungswiderstand R_V

Der Verbindungswiderstand R_V einer Stromschienenverbindung, Abbildung 1, setzt sich nach [1] aus mehreren Teilwiderständen entsprechend Gleichung 1 zusammen.

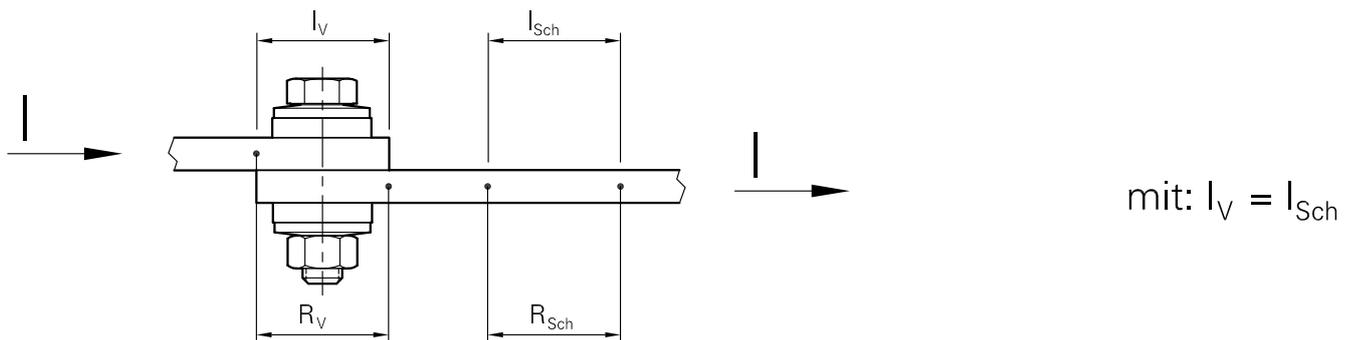


Abbildung 1
Verbindungswiderstand R_V und Gütefaktor k_u verschraubter Stromschienen
 $R_V = R_b + R_e + R_f$ (Gleichung 1)

2.1.1. Eigenwiderstand R_b

R_b ist der Eigenwiderstand beider Stromschienen über der Überlappungslänge l_V , wenn man sich beide Stromschienen als metallisch homogen verbunden denkt. D.h. der Übergangswiderstand $R_{\bar{u}}$ nach Gleichung 2 identisch Null ist.

2.1.2. Engwiderstand R_e

R_e ist der Widerstand, der sich aufgrund der Einengung und Zusammenschnürung der Stromlinien auf die stromübertragungsfähigen Berührungsflächen der beiden Stromschienen, die gleichzeitig undefinierte Kontaktpunkte darstellen, entsteht.

2.1.3. Fremdschichtwiderstand R_f

R_f ist der Widerstand der Fremdschichten auf den Oberflächen der tragenden Berührungsflächen.

2.1.4. Übergangswiderstand $R_{\bar{u}}$

$R_{\bar{u}}$ ist die Summe des Eng- und des Fremdschichtwiderstandes.

$$R_{\bar{u}} = R_e + R_f \quad (\text{Gleichung 2})$$

2.2. Schienenwiderstand R_{Sch}

R_{Sch} ist der Widerstand eines Stromschienenabschnitts mit der Länge l_{Sch} , die gleich der Überlappungslänge l_V ist.

2.3. Gütefaktor k_U

Der Gütefaktor k_U ergibt sich nach Gleichung 3 als das Verhältnis des Widerstands R_V der Verbindung über der Überlappungslänge l_V zum Widerstand R_{Sch} der Stromschiene gleicher Länge l_{Sch} .

$$k_U = \frac{R_V}{R_{Sch}} = \frac{U_V}{U_{Sch}} = \frac{P_V}{P_{Sch}} \quad (\text{Gleichung 3})$$

2.3.1. Kleinstmöglicher Gütefaktor

Unter der Annahme eines vernachlässigbar kleinen Übergangswiderstands $R_{Ü}$, d.h. $R_{Ü} = 0$ ergibt sich nach Gleichung 4 der Verbindungswiderstand zu:

$$R_V = R_b \quad (\text{Gleichung 4})$$

Entsprechend nimmt damit der Gütefaktor k_U den theoretisch kleinstmöglichen Wert nach Gleichung 5 an.

$$k_U = 0,5 \quad (\text{Gleichung 5})$$

2.4. Einflussgrößen des Verbindungswiderstands R_V und des Gütefaktors k_U

2.4.1. Engwiderstand R_e und Fremdschichtwiderstand R_f

Wie aus Gleichung 1 und Gleichung 2 ersichtlich, ist der Verbindungswiderstand R_V am kleinsten, wenn der Übergangswiderstand $R_{Ü}$ den Wert 0 annimmt. Daraus folgt, dass die Güte der Stromschieneverbindung umso besser ist,

- je größer die stromübertragungsfähige Berührungsfläche und damit umso kleiner der Engwiderstand R_e wird
- je kleiner die nicht oder nur schlecht leitende Fremdschicht und desto kleiner damit der Fremdschichtwiderstand R_f wird.

2.4.2. Fremdschichtbildung

An den Kontaktstellen müssen beim Stromfluss die beteiligten Elektronen aus der einen Stromschiene austreten und in die andere Stromschiene eintreten. Hierbei sind die Mikrostruktur der Stromschieneoberflächen und die mehr oder weniger dicken Fremdschichten von großer Bedeutung.

Der Übergangswiderstand $R_{Ü}$ und damit auch der Verbindungswiderstand R_V erhöht sich im Laufe der Zeit durch Fremdschicht-

wachstum aufgrund chemischer Reaktionen, z. B. Oxidation oder Korrosion, zwischen dem Stromschienewerkstoff und der umgebenden Atmosphäre beziehungsweise den darin enthaltenen Verunreinigungen und Schadgasen. Fremdschichtfreie Oberflächen sind nur im Hochvakuum erzielbar.

2.4.3. Fremdschichtbildung und Verbindungstemperatur

Durch die fortlaufende Fremdschichtbildung wird der Verbindungswiderstand R_V , die Wärmeverlustleistung und damit auch die Verbindungstemperatur erhöht, was wiederum den chemischen Vorgang der Fremdschichtbildung beschleunigt. Diese gegenseitige Beeinflussung von Fremdschichtbildung, Wärmeverlusten und Verbindungstemperatur kann bis zum totalen Ausfall der Stromschieneverbindung durch Überhitzung führen.

2.4.3.1. Wärmequellen, innere und äußere Wärme

Quellen der Kontaktwärmung sind die innere und äußere Wärme. Die innere Wärme resultiert aus den Energieverlusten der Stromleitung, vorzugsweise bedingt durch den Eng- und Fremdschichtwiderstand. Die äußere Wärme ergibt sich durch die Umgebungssituation. Bei Innenraumanwendung, z. B. ungenügende Wärmeabfuhr durch Strahlung oder Konvektion oder aber zusätzlicher Wärmeeinstrahlung durch Aufstellung in der Nähe von Metallschmelzanlagen oder in chemischen Anlagen. Bei Freilufteinsatz durch die Sonneneinstrahlung.

2.4.3.2. Übertemperatur

Nach Messungen von [2] liegt die Temperatur der stromübertragungsfähigen Berührungsflächen im Inneren der Verbindung um einiges höher als die an der Stromschieneaußenseite.

Es ist möglich, dass an der äußeren Stromschienseite keine Übertemperatur feststellbar ist, innen aber die Temperatur so hoch ist, dass durch die erhöhte thermische Belastung eine beschleunigte Alterung stattfindet.

3. Wirtschaftliche und ökologische Aspekte

3.1. Technische Zuverlässigkeit und Wartung verschraubter Stromschienenverbindungen

Zwischen der technischen Zuverlässigkeit und dem Wartungsaufwand einer Stromschienenverbindung besteht ein direkter Zusammenhang zum Gütefaktor k_u . Technisch zuverlässig und damit wartungsarm, in Sonderfällen sogar wartungsfrei, ist eine Stromschienenverbindung dann, wenn die Alterung während einer wirtschaftlichen Lebensdauer von 20 bis 40 Jahren bei Freiluft- und Innenraumanwendung nicht so weit voranschreitet, dass eine Selbstzerstörung der Stromschienenverbindung durch Überhitzung eintritt.

Für einen Großteil verschraubter Stromschienenverbindungen kann die Wirtschaftlichkeit weiter verbessert werden, indem über den genannten Zeitraum die Energieverluste in Form der Kontaktwärmung gesenkt werden. Bei identischer elektrischer Belastung setzt dies eine Verbesserung des Gütefaktors k_u voraus, was mit Hilfe des Verbindungselements MC-SEALconTACT erzielt werden kann.

Positiv wirkt sich darüberhinaus die Verlängerung der Einsatzzeit beziehungsweise die Verminderung der Wartungsintervalle und dem damit verbundenen Anstieg der Anlagensicherheit und -verfügbarkeit aus. Diese Vorteile sind unmittelbar gekoppelt an funktionelle Eigenschaften des Verbindungselements MC-SEALconTACT.

Neben den wirtschaftlichen Aspekten ist aus ökologischer Sicht nicht zu übersehen, dass bei der Vielzahl solcher Stromschienenverbindungen, z. B. allein in Westeuropa in Milliardenhöhe, beachtliche Energieverluste vorhanden sind, die zu einem erheblichen Mehrverbrauch an wertvollen fossilen Brennstoffen führen.

Unmittelbar damit verbunden ist der erhöhte Ausstoß an Schadgasen, die ihrerseits zur Umweltzerstörung und globalen Erwärmung beitragen. Auch hier hilft der Einsatz des Verbindungselements MC-SEALconTACT dieses Schadenpotential stark zu reduzieren.

3.2. Stand der Technik verschraubter Stromschienenverbindungen

Größere ebene Kontaktflächen, wie sie überlappende Stromschienen darstellen, gewährleisten keinen sicheren Stromübergang. Es sind nur relativ wenige regellos über der Verbindungsfläche verteilte stromübertragungsfähige Berührungsflächen vorhanden. Diese werden im Laufe der Einsatzzeit infolge des Fremdschichtwachstums so verkleinert oder sogar vollständig beseitigt, dass ein Ausfall der Stromschienenverbindung durch Überhitzung eintritt. Diese katastrophalen Schäden lassen sich nur durch periodische, zeit- und kostenaufwendige Revisionen der Stromschienenverbindungen vermeiden.

3.3. Verschraubte Stromschienenverbindungen mit dem Verbindungselement MC-SEALconTACT

3.3.1. Funktionelle Eigenschaften des Verbindungselements MC-SEALconTACT

3.3.1.1. Kontaktmodul mit Drehfedersteglamelle

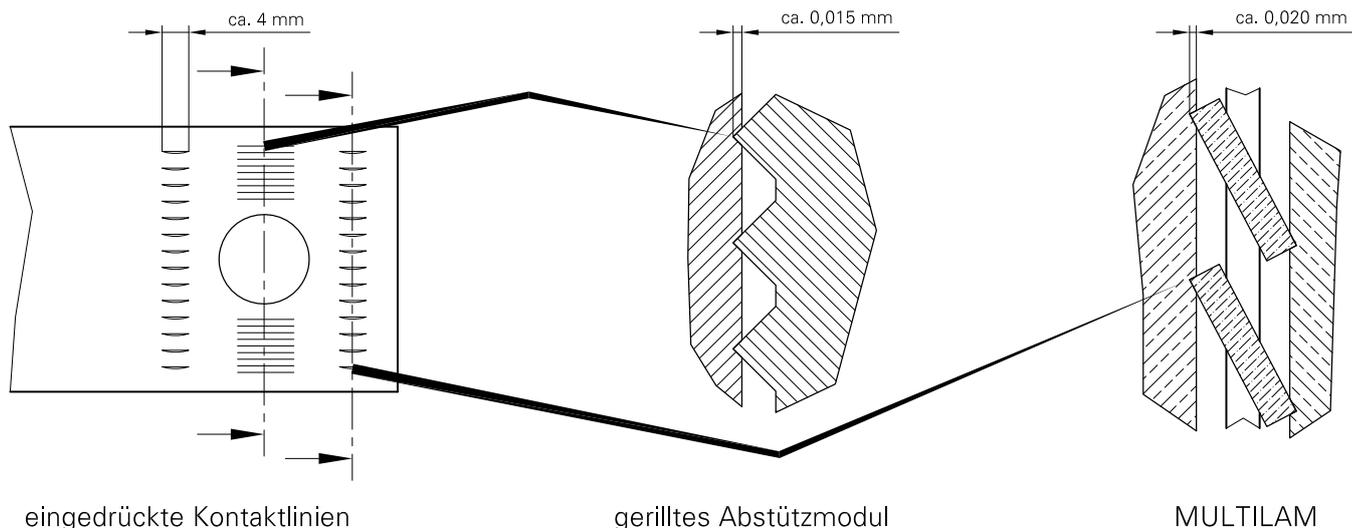
Das Kontaktmodul des Verbindungselements MC-SEALconTACT mit integrierter Drehfedersteglamelle ermöglicht eine Kontaktgabe über eine Vielzahl von definierten stromübertragungsfähigen Berührungsflächen.

Die Drehfedersteglamelle ist durch ihre Formgebung und Wirkungsweise in der Lage Fremdschichten zu durchbrechen, was ein Kontaktieren blanker, ungereinigter Stromschienen ermöglicht. Im Bereich der stromübertragungsfähigen Berührungsflächen, wie sie jeder Drehfedersteg sicherstellt, ist eine erneute Fremdschichtbildung nicht möglich. Infolge der hohen Andruckkraft des Drehfedersteges ist die Verbindung mit der zu kontaktierenden Fläche so homogen, dass ein Fremdschichtwachstum sicher ausgeschlossen ist.

3.3.1.2. Gerilltes Abstützmodul

Die Hauptfunktion des Abstützmoduls ist die MULTILAM in eine optimale Einfederhöhe einzustellen. Durch die Rillung des Moduls entsteht weiter ein ähnlicher Effekt wie bei der MULTILAM, näm-

lich, dass die Fremdschichten durch die Stege durchbrochen werden und sich die Stege in die Schiene eingraben und sich damit in der Schiene eine homogene Kontaktierung beider Flächen bildet.



z.B. Oxydschicht von Aluminiumschienen
2 nm (Mittelwert) = 0,000002 mm

Abbildung 2

Durchbrechen der Fremdschicht durch das gerillte Abstützmodul und durch die MULTILAM

3.3.1.3. Dichtrahmen für Kontakt- und Abstützmodule

Das Kontaktmodul sowie die Abstützmodule des Verbindungselements MC-SEALconTACT sind durch einen Dichtrahmen hermetisch gegen die umgebende Atmosphäre, d.h. Feuchtigkeit und Schadgase, abgeschlossen, sodass ein Fremdschichtwachstum vermieden wird. Ohne Fremdschichtwachstum bleibt der Gütefaktor k_u und damit die Verbindungsgüte sowie die daraus resultierenden Energieverluste über lange Zeit niedrig und konstant.

faktor k_{u0} abhängt. Verbindungen mit hohen Anfangsgütefaktoren werden nach kurzer Zeit instabil. Z. B. kann eine Verbindung mit einem Anfangsgütefaktor von $k_{u0} = 6$ schon nach Monaten total ausfallen.

Abbildung 3 zeigt die Zusammenhänge für die aufgeführten verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen von Stromschienenverbindungen ohne MC-SEALconTACT.

Abbildung 4 zeigt einen nahezu gleichen Anfangsgütefaktor von $k_{u0} = 1,5$ von Stromschienen mit SEALconTACT bei Materialpaarungen Cu-Cu, Al-Al und Cu-Al, gereinigten und ungereinigten Schienen und Einsatz in Innenraum, Freiluft und Regenwasser gelagert.

3.4. Vergleich der Gütefaktoren verschraubter Stromschienenverbindungen mit bzw. ohne Verbindungselement MC-SEALconTACT

3.4.1. Anfangsgütefaktor k_{u0}

Untersuchungen von [2] belegen, dass der Langzeitgütefaktor $k_u(t)$, dargestellt in Abbildung 5, in großem Maße vom Anfangsgüte-

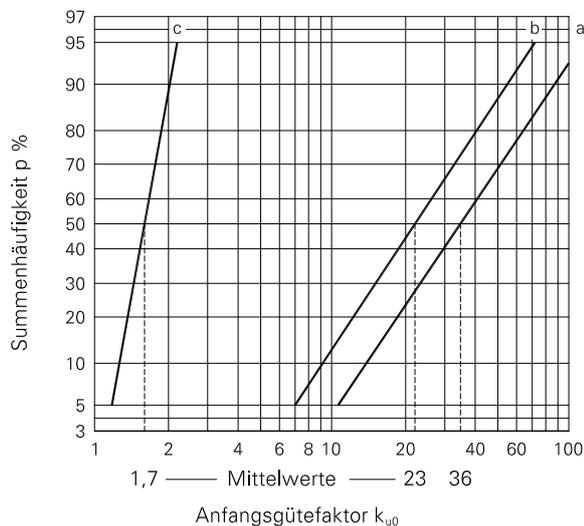


Abbildung 3
Experimentell ermittelte Anfangsgütefaktoren k_{u0} von Verbindungen ohne MC-SEALCONTACT.
Kurve a: ungereinigt
Kurve b: optimal gereinigt und danach mit verschmutzter Hand berührt
Kurve c: optimal gereinigt

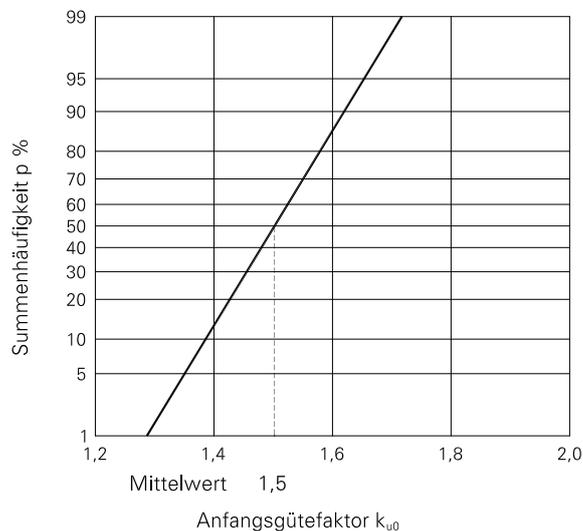


Abbildung 4
Experimentell ermittelte Anfangsgütefaktoren k_{u0} von Verbindungen mit MC-SEALCONTACT.

- von gereinigten und ungereinigten Schienen
- Cu-Cu, Al-Al, Cu-Al
- Indoor, Freiluft und in Regenwasser gelagert

3.4.2. Langzeitgütefaktor $k_u(t)$

Dargestellt in Abbildung 5

3.4.2.1. Ohne Verbindungselement

Die Werte dieses Kurvenbereichs sind experimentell von [2] ermittelt und gelten für Innenraumanwendung. Die Bandbreite dieses Bereichs wird von zwei unterschiedlichen Einflussfaktoren bestimmt:

- unterschiedliche Anfangsgütefaktoren, k_{u0}
- unterschiedliche Temperaturkombinationen

Sollen die Verlustkosten auf ein Minimum bzw. einen ökonomisch noch vertretbaren Wert begrenzt werden, so ist die Verbindung spätestens bei einem Gütefaktor von 3,5 zu revidieren, um nicht in den Bereich des mit größerer Geschwindigkeit exponentiell ansteigender Gütefaktoren und damit in Richtung Totalausfall der Verbindung zu gelangen.

Ermittlung des Gütefaktors in Energieanlagen durch Messung

- Der Gütefaktor kann durch eine einfache Messung des Verbindungswiderstands mit einem für diese Messung speziell entwickelten Mikroohmmeter direkt in der Anlage ermittelt werden.

3.4.2.2. Mit Verbindungselement

Dieser Kurvenbereich gilt für Innenraum- und Freiluftanwendung. Dem prognostizierten Langzeitverhalten liegen umfangreiche zeitraffende Umweltsimulationen, Anhang 1, sowie die durch langjährigen Einsatz belegten funktionellen Eigenschaften der Stäubli-Drehfedersteglamellen zugrunde. Für Freiluftanwendungen kommt dabei dem Dichtrahmen der Kontakt und Abstützmodule eine besondere Bedeutung zu.

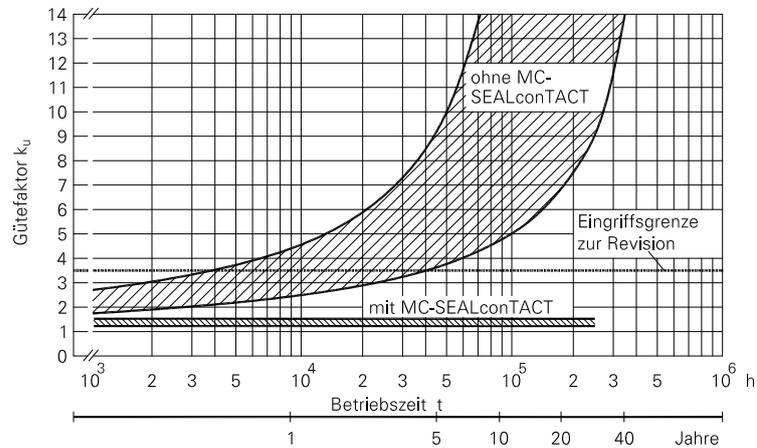


Abbildung 5
Langzeitgütefaktor $k_u(t)$

3.5. Einsparungspotential von Energiekosten an Stromschienenverbindungen mit dem Verbindungselement MC-SEALconTACT bei Innenraumanwendung

In Abbildung 6 sind vergleichend die Kosten der Wärmeverluste dargestellt, die durch den Übergangswiderstand $R_{\dot{u}}$ verursacht werden. Nicht berücksichtigt sind die Wärmeverluste in der Stromschiene, die durch den Eigenwiderstand R_b entstehen. Der Berechnung liegt eine im Bereich der Energieverteilung häufig eingesetzte Stromschienenverbindung zugrunde.

Wärmeverlustkosten einer Stromschienenverbindung

Schienenmaterial:	Aluminium, blank
Dimension:	40 mm x 10 mm
Strombelastung:	600 A, konstant
Anfangsgütefaktor, k_{u0} :	1,5
Langzeitgütefaktoren, $k_u(t)$:	Mittelwerte aus Abbildung 5
Betriebszeit:	bis 10 Jahre
Energiekosten:	€ 0.08/kWh

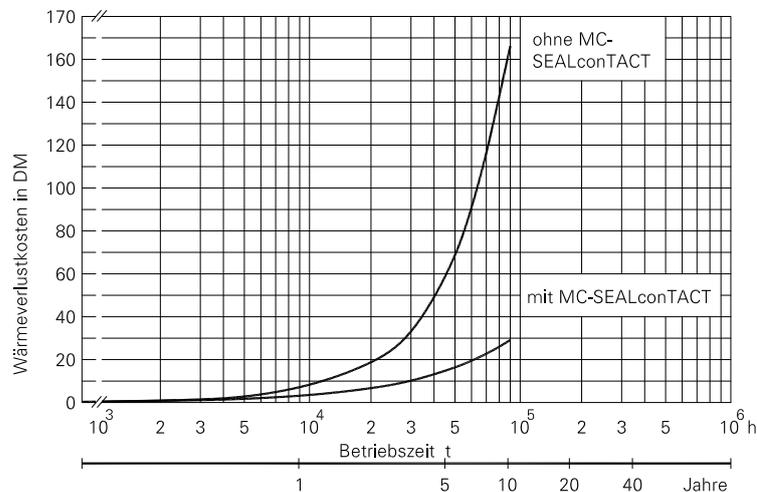


Abbildung 6
Energieeinsparungspotential durch Einsatz des Verbindungselements MC-SEALconTACT

4. Zusammenfassung

Gegenüberstellung verschraubter Stromschienenverbindungen mit bzw. ohne das Verbindungselement MC-SEALconTACT:

Stromschienenverbindungen ohne MC-SEALconTACT	Stromschienenverbindungen mit MC-SEALconTACT
Zeitaufwendige Reinigung der Schienen an oft schlecht zugänglichen Stellen notwendig	Reinigung der Schienen nicht notwendig
Optimale Reinigung wird in der Praxis selten erreicht, d. h. schlechte Anfangsgütefaktoren	Gute Anfangsgütefaktoren, unabhängig von Schienenmaterial und Umgebungsbedingungen
Oberflächenveredelung bei fast allen Anwendungen notwendig	Oberflächenveredelung nicht notwendig
Bereits nach Monaten steigender Gütefaktor und damit Zunahme der Energieverluste	Wirtschaftlichkeit der Anlage: Niedriger Gütefaktor über lange Zeit (stabiles Langzeitverhalten), d. h. minimale Energieverluste
Risiko des Anlagenausfalls oder periodischer Service an den Schienenverschraubungen notwendig	Hohe Anlagensicherheit. Kein Service an den Schienenverschraubungen notwendig
Verkürzte Lebensdauer	Deutliche Verlängerung der Lebensdauer

Deutlich sichtbar werden die Vorteile der Stromschienenverbindungen mit MC-SEALconTACT dann, wenn die Atmosphäre mit chemisch aggressiven Stoffen, insbesondere in Verbindung mit

einer normalen Feuchte, bei Freiluftapplikationen oder in chemischen Anlagen, angereichert ist.

5. Verwendete Literatur

[1] A. Erk/M. Schmelzle
Grundlagen der Schaltgerätetechnik
Springer-Verlag/Berlin/Heidelberg/New York 1974

[2] H. Böhme
Mittelspannungstechnik
Verlag Technik/Berlin/München 1992

6. Anhang

Versuche zum Langzeitgütefaktor $k_u(t)$ von Stromschieneverbindungen mit MC-SEALconTACT

Die Dichtheit und die elektrische Güte wurden bisher durch folgende Versuche zeitraffend bzw. unter besonderen Bedingungen untersucht:

- IEC 68-2-2 bzw. DIN IEC 68 Teil 2-2
Basic environmental testing procedures Part 2,
Test B: Dry heat
- IEC 68-2-3 bzw. DIN IEC 68 Teil 2-3
Electrical engineering, Basic environmental testing procedures, Test: Damp heat, steady state
- DIN VDE 0212 Teil 52
Armaturen für Freileitungen und Schaltanlagen Lastwechselversuche
- Temperaturwechsel in Luft, Innenraum
Temperaturbereich: - 20 °C bis +110 °C
Aufheizzeit: t = 65 min.
Abkühlzeit: t = 130 min.
Dauer: t = 10 Tage
- Test Dichtvermögen in Abhängigkeit der Temperatur und des Flächendrucks
Normalatmosphäre, Innenraum
bei t = 80 °C Dauer t = 72 h
t = 100 °C t = 72 h
t = 120 °C t = 72 h

- Test Dichtvermögen bei extrem rauhen Oberflächen der blanken Stromschiene
Normalatmosphäre, Innenraum Stromschiene mit Oberflächenrauheit N8 bis N10
- IEC 68-2-52 bzw. DIN IEC 68 Teil 2-52
Salznebeltest
Dauer t = 30 Tage
- **Langzeitversuche in Innenraum, Freiluft und in Regenwasser gelagert.**
Sowohl bei Versuchen mit blanken, ungereinigten Cu- und Al-Schiene als auch bei der kritischen Materialkombination Al/Cu ist nach bisheriger Versuchsdauer von 24 000 h keine Verschlechterung des Verbindungswiderstandes bzw. des Gütefaktors gegenüber dem Neuzustand zu erkennen. Der allgemeine Wissensstand der zeitabhängigen Änderung der Kontaktgüte von Hochstromkontakten und insbesondere der von denen mit integrierten MULTILAM, lässt die Extrapolation auf Einsatzzeiten von über 200 000 h (entspr. 20 Jahren) ohne die Überschreitung gültiger Grenzwerte zu. Die Versuche werden weitergeführt, um die im Diagramm „Langzeitgütefaktor“ dargestellten Werte, denen umfangreiche zeitraffende Versuche zugrunde liegen, belegen zu können.



● Staubli Standorte ○ Vertretungen / Agenten

Weltweite Präsenz des Staubli-Konzerns

www.staubli.com