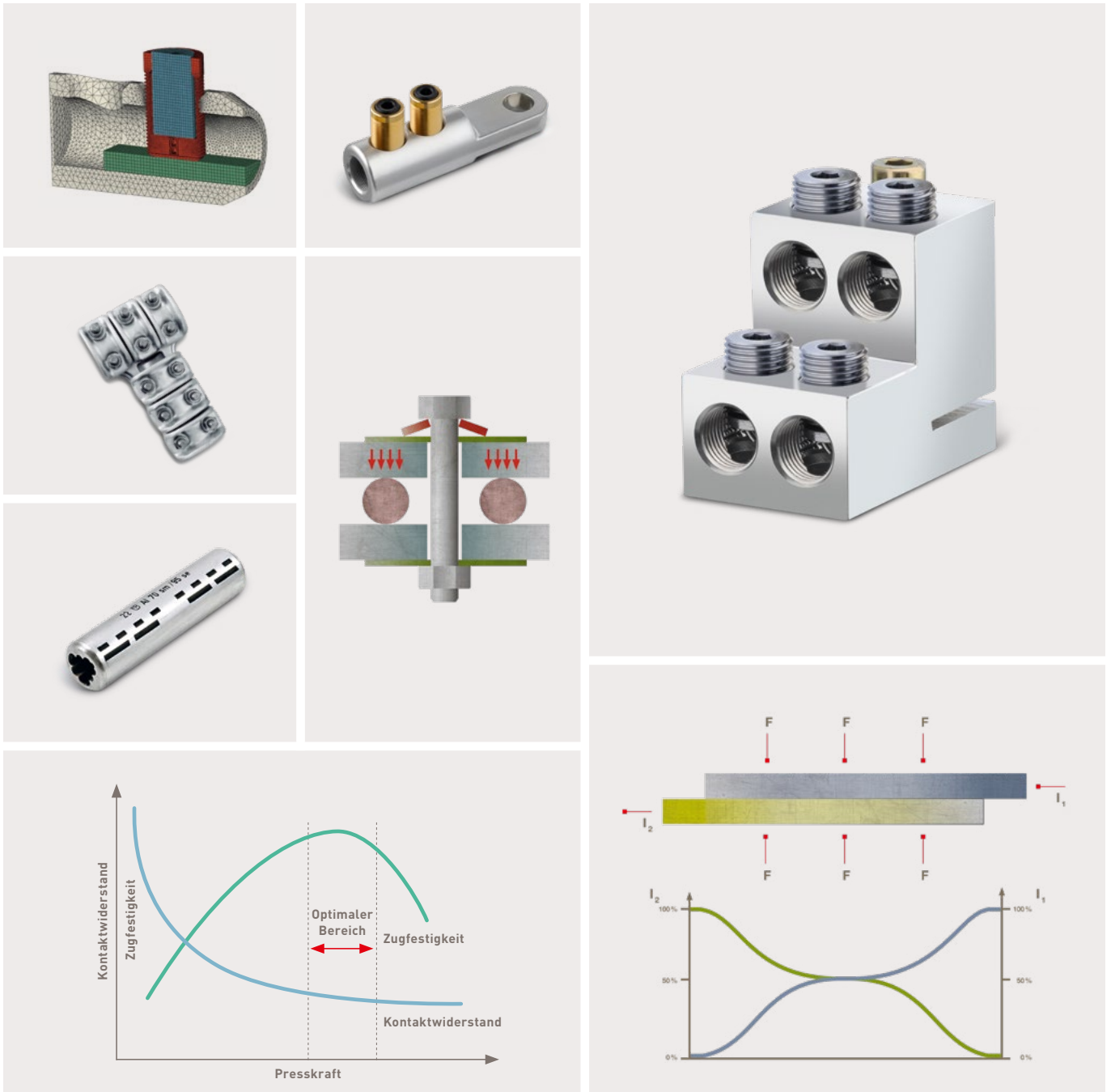


# Brennpunkt Kontakt

Grundlagen der Kontakttechnik



- Teil 1:** 4 Die Bedeutung der Kontaktgüte für die Versorgungssicherheit und Erfahrungswerte mit Kontakten verschiedenster Güte aus den Energiemärkten weltweit
- Teil 2:** 6 Das Wechselspiel von Kontaktkraft und Übergangswiderstand, der Schritt von scheinbaren Kontaktflächen zu definierten Kontaktstellen
- Teil 3:** 12 Alterungsmechanismen von Kontakten und wirksame Gegenmittel
- Teil 4:** 14 Mehrere Jahrzehnte Lebensdauer trotz natürlicher Kontaktalterung: Die prinzipiengerechte Konstruktion
- Teil 5:** 16 Ein Überblick über die klassischen Verbindungstechniken Pressen, Stecken, Schrauben gefolgt von Einblicken in das Design fortschrittlicher Klemmen, die mehr können als der Kontaktalterung zu widerstehen
- Teil 6:** 18 Vor- und Nachteile von Vor-Ort-Prüfungen von im Einsatz befindlichen Kontakten gefolgt von den wichtigsten Typprüfungen, um die Eignung neuer Verbinder für den jahrzehntelangen Einsatz festzustellen– beides mit Fokus auf Alterungseffekte bei Kontakten



Dipl.-Ing. Martin Schuster war langjähriger Geschäftsführer der PFISTERER Kontakt-systeme GmbH und ist mittlerweile als Senior Advisor für die PFISTERER Holding AG mit Sitz im süddeutschen Winterbach tätig.

## Brennpunkt Kontakt Grundlagen der Kontakttechnik

Kontakte werden oft als die Schwachpunkte in elektrischen Übertragungs- und Verteilnetzen wahrgenommen. Zu Unrecht. Die meisten Ausfälle lassen sich entweder auf eine fehlerhafte Montage zurückführen oder den Einsatz qualitativ minderwertiger Verbinder. Beides lässt sich vermeiden – mit Wissen zu den Grundlagen der Kontakttechnik. Dieses vermittelt der Autor in dieser praxisorientierten Publikation mit Einblicken in Zeilenschaltung, Funktionsweisen und Designkriterien von Kontakten, diverse mechanische Verbindungstechnologien, die Mechanismen von Kontaktalterung und -ausfall sowie zu Möglichkeiten der Prüfung der Kontaktqualität. Wertvolles Wissen für alle, die mit Kontakten zu tun haben und einen Beitrag leisten wollen zu höherer Versorgungssicherheit, sei es als Netz-Planer, System-Verantwortlicher, Instandhalter, Monteur oder Einkäufer.

# Qualität contra Netzausfall

Zahlen belegen: Qualitativ hochwertige Kontakte begründen Versorgungssicherheit, ihre mangelhafte Ausführung verursacht die meisten Ausfälle im Netz. Im Fokus des ersten Teils stehen Erfahrungswerte mit Kontakten verschiedenster Güte aus den Energiemärkten weltweit.

Ein kanadischer Energieversorger wollte es genau wissen und ging den Ursachen für Netzausfälle auf den Grund. Ergebnis seiner Erhebung aus dem Jahr 2009: Knapp 40 % aller Versorgungsunterbrechungen lassen sich direkt auf mangelhafte Kontakte zurückführen, weitere 9,7% hängen indirekt mit dem Kontaktdesign zusammen. Kein Wunder: Kontakte gibt es, seit Strom in Haushalte und Unternehmen fließt. Seit Jahrzehnten tun sie ihren Dienst. Seit Jahren schwindet aber auch das Wissen um die technischen Grundlagen und ihre Bedeutung. Gründe gibt es mehrere: Früher dominierten Einheitskabel die Netze, für jeden Kabeltyp gab es Verbindungsspezialisten. In den letzten Jahren wandelten sich die Energiemärkte rasant, mit ihnen die Energieversorgungsunternehmen (EVU). Versorgungsgebiete wuchsen zusammen, neue Kabelmaterialien setzten sich durch, dem steigenden Energiebedarf folgen immer größere Kabelquerschnitte. Bis zu sieben verschiedene Kabeltypen in einem Verteilungsnetz sind keine Seltenheit. Gleichzeitig ist der Monteur von heute als Allrounder für die Grundversorgungsbereiche Strom, Wasser und Gas im Einsatz. Was jetzt gebraucht wird, sind flexibel einsetzbare und zuverlässige Kontakte, die sich einfach und sicher montieren lassen.



Kleine Ursache, großer Schaden: Unsachgemäße Kontaktierung setzt teure Betriebsmittel außer Gefecht.

### Technik im Wandel

Für viele Hersteller von Kontakttechnik sind derartige Umbrüche keine neue Erfahrung. Als in den 1950er bis 1970er Jahren das Aluminiumkabel das Kupferkabel weitflächig verdrängte, beschritten sie neue Wege in der Kontakttechnik. Ein Ergebnis dessen ist zum Beispiel der patentierte Schraubverbinder SICON von PFISTERER – eine überzeugende Alternative für alle Anwendungen, die den Umstieg von Press- auf Schraubverbindungen erlauben. Zwar funktioniert die Pressetechnik hervorragend. Dennoch lassen sich Netzausfälle auf sie zurückführen. Ursache: Das Prinzip der Presstechnik basiert auf festen Größen. Jedem Leiterquerschnitt sind Hülsenquerschnitt und Werkzeug zugeordnet. Diesen definierten Rahmen sprengen Kabeltechnik und Markt. Kabelkosten steigen mit jedem Kilometer Länge, also werden Kabel immer effizienter produziert. Die Einzeldrähte werden stärker zusammengepresst, Kabel damit kompakter, es wird weniger Isolationsmaterial gebraucht. Folge: Was als 95-mm<sup>2</sup>-Kupferkabel bezeichnet wird, kennt in der Praxis verschiedene Ausprägungen. Zu den diversen Kabelbauformen kommen neue Kabelquerschnitte. Gleich geblieben sind Hülsen und Werkzeug. Ist Passendes nicht bei der Hand, wird Anderes genommen. Bei Arbeiten am Netz drängt die Zeit.

## Ursachen für Netzausfälle

**Ein kanadischer Energieversorger untersuchte die Ursachen für Netzausfälle. Hier die Ergebnisse seiner Erhebung aus dem Jahr 2009:**

■ Lose Kontakte oder Kontaktteile	38,3 %
■ Feuchtigkeit	17,4 %
■ Leitungsstörungen (alle außer Blitzschlag)	10,4 %
■ Defekte oder unzureichende Isolation	9,9 %
■ Fremdkörper/Kurzschlussverhalten	7,3 %
■ Überlastung/inadäquate Leistungskapazität	2,4 %
■ Ablagerung von Staub, Sand und Öl	2,2 %
■ Alle anderen Ursachen	12,0 %

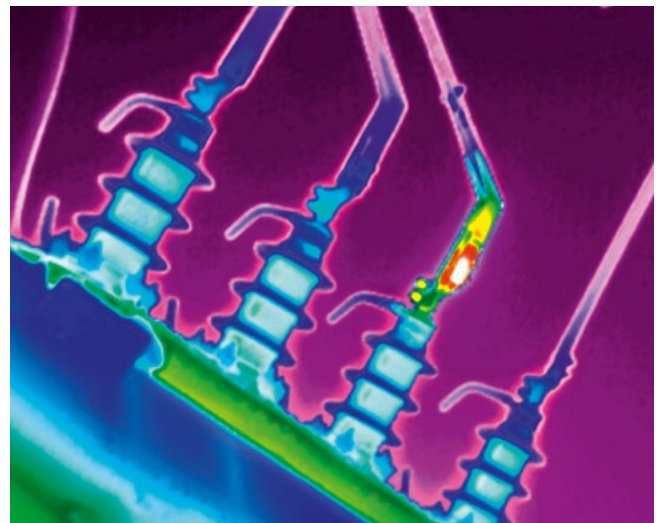
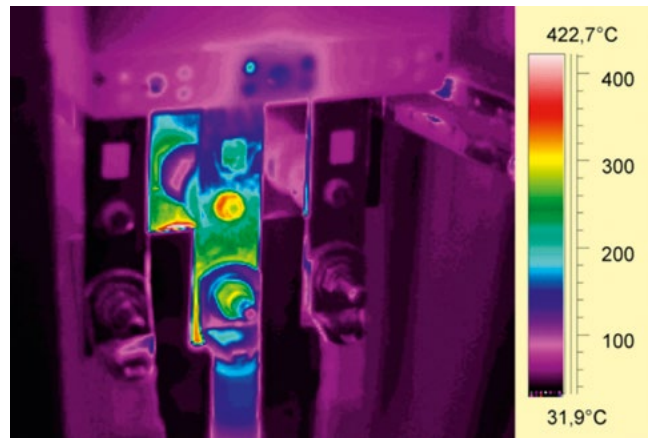
### Kein Netz ohne Kontakt

Inzwischen ist der Energiebedarf hoch wie nie, Tendenz steigend. Netze, die dreißig, vierzig Jahre alt sind, werden heute voll ausgelastet. Und damit erreicht man den springenden Punkt: die Bedeutung der Kontakttechnik für die Versorgungssicherheit. Mit Stromnetzen ist es wie mit Gemeinwesen – sie funktionieren so gut oder so schlecht wie ihre elektrotechnischen respektive sozialen Kontakte. Dabei sind trotz hoher Netzbelastungen die Ansprüche an Kontaktqualität von Land zu Land verschieden, wie die weltweit erfassten Ausfallraten zeigen. Sieben Minuten pro Jahr und Endkunde versiegt der Stromfluss in Deutschland, in den USA sind es schon neun Stunden. Thailand bringt es gar auf 14 Stunden, allein in Bangkok gab es ca. 1500 MV-Muffen-Ausfälle in einem Jahr. Im Juli 2012 brachen an zwei Tagen nacheinander mehrere indische Stromnetze infolge Überlastung zusammen, laut Presseberichten waren zwischen 600 und 700 Mio. Menschen ohne Strom. Auch wenn man solche gigantischen Ausfälle als Ausnahme beiseite lässt, hochwertige Kontakte lohnen sich – und das bereits mittelfristig, wie die Vereinigung europäischer Kabelgarniturenhersteller anhand der »Total Cost of Ownership«-Methode vorrechnet.



### Billig oder den Preis wert?

Bei der Ermittlung der »Gesamtkosten über die gesamte Lebensdauer« ist der Produktpreis nur ein Posten. Dazu kommen Installation, Wartung und Logistik sowie Ausfall- und Kompensationskosten. Ein anfangs günstig erscheinendes 50-Euro Produkt mit einer Ausfallquote von 1 % und einer Montagezeit von einer Stunde erreicht 115.000,- Euro Jahreskosten. Ein Produkt in höherwertiger Ausführung für siebzig Euro mit einer Ausfallrate von 0,5 % und einer Montagezeit von einer Stunde kostet bereits nur 97.000,- Euro. Am günstigsten kommt weg, wer sich das Produkt für neunzig Euro mit einer Ausfallrate von 0,5 % und einer Montagezeit von einer halben Stunde leistet: 85.000,- Euro. Keine Peanuts, bedenkt man außerdem, dass an 10-Euro-Kontakten manchmal Betriebsmittel im Wert von mehreren Millionen Euro hängen. Nicht umsonst setzen EVU und Industriekonzerne bei der Auswahl von Kontakttechnik-Technologien wieder zunehmend auf Qualität – die Kriterien hierfür sind vielfach: angefangen bei den verwendeten Materialien über die Verbindungstechnik bis hin zum Kontakt-design.



Was das menschliche Auge nicht sieht, offenbaren thermografische Bilder: Mangelhafte Anschlüsse als Ursache für stark erhöhte Übergangswiderstände (Quelle: www.ITK-Messtechnik.de)

Brennpunkt Kontakt – Teil 2:

# Kraft contra Widerstand. Scheinbarer und definierter Kontakt

Wie der bestmögliche Stromfluss durch Kontakte erreicht wird, zeigt der zweite Teil: Das Wechselspiel von Kontaktkraft und Übergangswiderstand, der Schritt von scheinbaren Kontaktflächen zu definierten Kontaktstellen.

Ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis der Kontakttechnik findet sich beispielhaft an der Verbindungsstelle zweier metallischer Stromschienen: Damit der Strom von einer Schiene auf die andere fließen kann, werden ihre Enden übereinander gelegt. Auf den ersten Blick eine ideale Kontaktstelle: zwei glatte Oberflächen liegen plan aufeinander, über die gesamte Überlappungsfläche kann elektrische Energie fließen. Unter dem Mikroskop entpuppt sich der Augenschein als trügerisch.

Eine zerklüftete Landschaft offenbart sich, voller Spitzen und Täler. Diese Unebenheiten in den Materialoberflächen, in der Oberflächenphysik als Rauheit bezeichnet, haben Konsequenzen für die Kontaktierung: Scheinbar hundert Prozent Kontaktfläche, so die Ergebnisse zahlreicher Messungen, schrumpfen effektiv auf wenige metallische und damit elektrische Kontaktpunkte zusammen, die nur durchschnittlich fünf Prozent der gesamten Überlappungsfläche ausmachen.

## **Den Widerstand überwinden. Mit Kraft.**

Wie Wasser durch ein von Geröll verstopftes Flussbett muss sich der Strom durch diese engen Durchlässe seinen Weg bahnen. Die Folge: extrem hohe Übergangswiderstände, die im schlimmsten Fall zur punktuellen Schmelze führen und die Kontaktstellen zerstören. Um die Widerstände zu senken, wird durch Verpressen oder Verschrauben Kraft auf die Kontaktstelle eingeleitet. Diese treibt die Spitzen der Materialoberflächen ineinander, ebnet Verwerfungen weitflächig ein und stellt so den wichtigen galvanischen Kontakt her.

Dabei gilt: Je mehr Kraft einwirkt, umso weiter sinkt der Übergangswiderstand – allerdings nur bis zum Erreichen eines typischen Sättigungswertes. Dann bleibt selbst bei weiterem Kraftanstieg der Widerstand konstant.

Gleichzeitig steigt der Übergangswiderstand nicht sofort wieder an, wenn nach der Kontaktherstellung die Krafteinwirkung wieder nachlässt. Erst wenn die Kontaktkraft unter einen Grenzwert fällt – so unter  $10 \text{ N/mm}^2$  bei Aluminium – steigt der Übergangswiderstand erneut an.

Daraus folgt, was im Fachjargon als Kontakt-Hysterese bezeichnet wird: Man braucht mehr Kraft, um einen Kontakt herzustellen als einen Kontakt aufrechtzuerhalten.

### **Das richtige Maß. Freier Stromfluss.**

Aus dieser Erkenntnis folgt zum einen die Notwendigkeit, beim Kontaktieren diesen Sättigungswert der Kontaktkraft zu erreichen. Anderenfalls führt im Betrieb jede noch so kleine Veränderung der Kraft, so zum Beispiel durch Fließvorgänge im Leitermaterial, zu einem exponentiellen Anstieg des Übergangswiderstandes. Typische Ursachen hierfür in der Praxis: Beim Pressen werden falsche Hülsen oder falsches Werkzeug verwendet. Ist beim Verschrauben einer Verbindung die Schraube nicht gefettet, wird das aufgebrachte Drehmoment nicht in ausreichendem Maße in die benötigte Spannkraft umgewandelt. Ist der Drehmomentschlüssel nicht korrekt eingestellt, ist das Drehmoment zu klein.

Zum anderen ergeben sich Anforderungen an die Konstruktion von Kontaktklemmen. Ist ein Kontakt mit maximal wirksamer Kontaktkraft hergestellt, muss das Klemmen-Design sicherstellen, dass eine Mindestkontaktkraft von ca. 20 % der Anfangskraft über einen Zeitraum von drei bis vier Jahrzehnten hinweg erhalten bleibt. Dabei liegt es in der Natur der Sache, dass die Kontaktkraft infolge verschiedener physikalischer Einflüsse mit der Zeit sinkt.

Dieses Nachlassen der Kontaktkraft, auch Kontakalterung genannt, muss kompensiert werden, indem Elastizität in die Verbindung integriert wird – entweder durch das Design der Klemme oder aber durch zusätzliche Spannscheiben.

### **Punkt verdrängt Fläche**

Folgt man der Spur von scheinbarer Kontaktfläche bis hin zum metallischen und damit leitfähigen Kontakt stößt man auf weitere Hindernisse für den Stromfluss: Wird Aluminium als Leitermaterial eingesetzt, bleibt von der mechanischen Kontaktfläche nur ein Bruchteil übrig, der tatsächlich leitfähig ist. Grund hierfür: kommt Aluminium mit Luftsauerstoff in Berührung, überzieht es sich spontan mit einer nicht leitenden Oxidschicht. So kam es seit Beginn der 1960er Jahre, als die weitflächige Verbreitung von Aluminium als Leitermaterial einsetzte, immer wieder zu Ausfällen – zum einen aufgrund sich lösender Kontakte infolge starker Fließ- und Setzvorgänge und mangelnder Elastizität, zum anderen aufgrund der dem Aluminium anhaftenden Oxidschicht; geeignete Klemmen für Aluminium waren damals noch nicht vorhanden.

Heute begegnet man der Selbstpassivierung des beliebten, da leichten und kostengünstigen Werkstoffes mit angepassten Kontaktklemmen-Designs: Dort, wo Aluminiumleiter zu kontaktieren sind, werden die Oxidschichten durchbrochen. So beißen sich beispielsweise die Zähne von manchen Abzweigklemmen nicht nur durch die Isolation sondern auch durch die Leiteroberfläche. Bei fortschrittlichen Schraubverbindern dringen in den Klemmkörper integrierte Schneiden hindurch. Beide Produkte stehen beispielhaft für einen vergleichsweise jungen Paradigmenwechsel in der Kontakttechnik: weg von großen scheinbaren Kontaktflächen, hin zu definierten Kontaktpunkten oder -linien.

# PRAXIS-TIPP: Das Nachziehen der Schrauben stärkt nur den Glauben

Manche Irrtümer halten sich hartnäckig. So auch die verbreitete Annahme, das Nachziehen von Schrauben fördere die Langlebigkeit von Kontakten. Klemmen mit Abreißschrauben beweisen das Gegenteil: Sie schließen das Nachziehen konstruktiv aus, gleichzeitig werden sie immer häufiger eingesetzt. Worauf es bei der Montage eines Schraubverbinders tatsächlich ankommt, damit der Kontakt über die gesamte Lebensdauer hinweg zuverlässig funktioniert, zeigt dieser Praxis-Tipp.

**1.** Neben der Auswahl der passenden Klemme und ihrer richtigen Zuordnung zum Leiter (Details siehe Kontakttechnik-Bericht ab Seite 14) ist die Sauberkeit der Kontaktfläche entscheidend. Diese reinigt man am besten mit einer Stahlbürste.



**2.** Um die Oberfläche vor erneuter Oxidation zu schützen, behandelt man sie mit einer Kontaktschutzpaste – so insbesondere bei leicht oxidierenden Aluminiumverbindungen. Auch die Schraube muss für einen dauerhaft zuverlässigen Kontakt sauber sein.



**3.** Für die optimale Umsetzung des aufgetragenen Drehmoments in Kontaktkraft wird sie außerdem eingefettet. Da dieser wichtige Schritt gerne vergessen wird, liefert PFISTERER die Schrauben bereits vorgefettet oder mit einer speziellen Beschichtung versehen, die statt des Fettes für die notwendige Gleitwirkung sorgt.



Zuletzt muss beim Anziehen der Schrauben das vorgegebene Drehmoment aufgebracht werden – dieses findet man in der Montageanleitung oder aufgedruckt auf der Klemme.



# Warum Kontakte altern. Und wie sie trotzdem Jahr- zehnte halten.

Kontakte altern. Und sie sollen über Jahrzehnte hinweg den zuverlässigen Stromfluss an den zahlreichen Schnittstellen von Energienetzen gewährleisten. Wie man Tatsache und Anspruch vereinbart, zeigt dieser dritte Teil zu den Grundlagen der Kontakttechnik mit den Schwerpunkten Alterungsmechanismen von Kontakten und wirksame Gegenmittel.

Den Anfang jeder Kontaktalterung markiert der Anfangswiderstand. Je höher dieser bei der Herstellung eines mechanischen Kontaktes ist, umso kürzer währt die Lebensdauer der Verbindung. Denn mit steigendem Widerstand wächst auch die thermische Belastung. Da nahezu alle physikalischen und chemischen Eigenschaften von Stoffen zumindest schwach temperaturabhängig sind, fördert Wärme die Alterung der meisten Materialien.

Die Wirkung des Anfangswiderstandes untersuchten J. A. Greenwood und J. B. P. Williamson bereits 1958 in ihrer Veröffentlichung zu temperaturabhängigen Leitern („Electrical Conduction in Solids. II. Theory of Temperature-Dependent Conductors“, Royal Society Publishing): Bei einem Anfangswiderstand von 10 Mikro-Ohm ( $\mu\Omega$ ) kann eine mechanisch hergestellte Verbindung eine Lebensdauer von bis zu einem Jahrhundert erreichen, bei 100  $\mu\Omega$  sind es maximal fünfzig Jahre.

## **Eine Verbindung. Zwei Materialien.**

Dabei braucht es nicht viel, um den Anfangswiderstand massiv ansteigen zu lassen: Bei Arbeiten im engen Kabelgraben beispielsweise können Erde oder sonstige Partikel den Kontakt verunreinigen, beim Pressverbinden reicht die falsche Kombination von Hülsmaterial und Leitermaterial. Entscheidend also bei der Herstellung einer Verbindung ist neben der absolut sauberen und fachgerechten Arbeitsweise die Beherrschung der verschiedenen Leiter- und Verbinder-Materialien – ein weiterer wichtiger Aspekt, dessen Wirkung weit über die Eingrenzung des Anfangswiderstandes hinausreicht.

Die wichtigsten Materialien in der Stromversorgung sind bis heute Kupfer und Aluminium, wobei in jüngster Zeit die Teuerung von Kupfer sowie der Trend zu immer größeren Kabelquerschnitten den Einsatz des günstigeren und leichteren Aluminiums befeuern. So treffen weltweit verschiedene Leiter- und Verbindermaterialien aufeinander, beispielsweise wenn Kupferleiter-Netze mit Aluminiumleitern erweitert werden. Daraus resultiert für Hersteller von Kontakttechnik die Herausforderung, mit einer Komponente Kupfer- und Aluminiumleitern gleichermaßen gerecht zu werden.



PFISTERER-Kontaktscheiben für definierte Kontaktflächen

## Tücken der Thermik

Wie verschieden die beiden Materialien thermisch reagieren, demonstriert ein klassischer Montagefehler: Wird ein Aluminiumleiter in einer Kupferhülse verpresst, ist der vorzeitige Kontaktausfall selbst bei richtig gewählter Hülseingröße vorprogrammiert. Sobald die Verbindung von Strom durchflossen und dadurch erwärmt wird, dehnt sich der Aluminiumleiter mehr aus als die Kupferhülse nachgibt. Mit höherer Last steigt die mechanische Spannung zwischen Leiter und Hülse weiter an, bis die niedrigere Fließgrenze des Aluminiums überschritten ist – der Leiter überdehnt sich und kehrt selbst bei Abkühlung nicht mehr in seine ursprüngliche Form zurück.

Die unerwünschte Folge nach mehreren Erwärmungs- und Abkühlungszyklen: die Minimalkontaktkraft wird unterschritten, der elektrische Kontakt löst sich bis zum Totalausfall. Einziges Gegenmittel in der Presstechnik: die richtige Kombination von Hülse- und Leitermaterial, wie sie die Tabelle unten zeigt. Auch beim Einsatz von Klemmen zeigen die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Aluminium ihre Wirkung. Häufig werden Aluminiumkabel mit Kupferklemmen verbunden. Bei Erwärmung dehnt sich der Leiter aus und kehrt bei Abkühlung wieder zurück. Dieser Vorgang – auch thermisches Atmen genannt – lässt sich mit einer Mikrobewegung des Leiters gleichsetzen. Der dabei entstehende Aluminium-Abrieb oxidiert umgehend und bildet eine nichtleitende Schicht über den Kontaktstellen, was den vorzeitigen Kontaktausfall bewirkt.

Intelligente Klemmendesigns wie Durelast-Klemmen mit Bügelschrauben unterbinden diese Bewegung durch entsprechend hohe Kontaktkraft am Leiter – ein technischer Kunstgriff, den auch die Bahntechnik nutzt: Bahnschienen streben infolge der Erwärmung in Längsrichtung. Die dabei entstehenden Kräfte werden durch die starken Haltekräfte der in kurzen Abständen montierten Schwellen in den Boden abgeleitet und so kompensiert.



Schutz vor Korrosion: Al-Elastkontaktscheibe von PFISTERER schließt Kontaktstellen hermetisch ab

## Fließen. Setzen. Kraft.

Die richtige Dosierung der Kontaktkraft wird von Fließ- und Setzvorgängen in den Materialien bestimmt, die einen natürlichen Schwund der Spannkraft zur Folge haben. So lässt auch die Kontaktkraft jeder mechanisch verbundenen Materialpaarung mit der Zeit nach, genauer: bereits wenige Minuten nach der Erstinstallation um zwanzig bis dreißig Prozent. Dennoch lassen sich Kontakte mit einer Lebensdauer von zehn bis zu fünfzig Jahren herstellen.

Einen Lösungsansatz bietet eine Erkenntnis der Kontakt-Hysterese. Demnach braucht man mehr Kraft, um einen Kontakt herzustellen als einen Kontakt aufrecht zu erhalten. So ist die Funktionsfähigkeit eines Kontaktes erst dann gefährdet, wenn die verbleibende Kontaktkraft unter einen Minimalwert von zum Beispiel dreißig Prozent der Initialkraft fällt.

Damit dies über die gesamte Lebensdauer hinweg trotz Fließens, Setzens und thermischen Atmens nicht geschieht, wird Elastizität in den Klemmkörper konstruktiv integriert, beispielsweise in Form federnd und dauerelastisch gestalteter Kontaktelemente. Ein weiteres Gegenmittel: zusätzlich eingebrachte Elastizität mittels federnder Spannscheiben. Diese werden zum Beispiel bei einer Schraubverbindung zwischen dem Schraubenkopf und der Unterlagscheibe positioniert, die wiederum auf der zu verbindenden Schiene liegt.

## Presstechnik: Richtig kombiniert. Dauerhaft kontaktiert

Beim Pressverbinden entscheidet auch die richtige Material-Kombination über die lange oder kurze Lebensdauer des Kontaktes. Die richtige Zuordnung von Hülse- und Leitermaterial erkennen Sie am Pluszeichen. Das Minuszeichen kennzeichnet einen klassischen Montagefehler.

	Aluminium-Hülse	Kupfer-Hülse
Aluminium-Leiter	+	-
Kupfer-Leiter	+	+

## Wasser. Strom. Korrosion.

Ein weiterer Effekt, der beim Zusammentreffen von Kupfer und Aluminium die Kontaktalterung vorantreibt, ist die elektrolytische Korrosion. Aufgrund ihres molekularen Aufbaus haben die beiden Metalle unterschiedliche Potentiale im Verhältnis zum neutralen Zustand: Aluminium ist mit  $-1,66$  Volt (V) deutlich elektro-negativ, Kupfer dagegen mit  $+0,34$  V leicht elektro-positiv.

Berühren sich die Metalle und ist an den Berührungspunkten ein leitfähiges Medium wie Wasser vorhanden, wirken sie als Kathode und Anode: Die Potentialdifferenz der beiden Metalle in Höhe von  $2$  V treibt abhängig von der Leitfähigkeit des Elektrolyten einen schwachen Strom, der das elektro-negativere Metall korrodieren lässt. Das Aluminium wird löchrig, Kontaktstellen schwinden, die verbleibende Kontaktfläche wird unterwandert. Um dies zu verhindern, müssen unterschiedliche Metalle überall dort konstruktiv voneinander getrennt werden, wo sie mit einem Elektrolyt in Berührung kommen können.

Hierfür kann bereits ein wenige Millimeter breiter Pinselstrich mit einem isolierenden Harz an der Verbindungsstelle der beiden Materialien ausreichen –  $2$  V Spannung können selbst über diese kurze Isolationsstrecke hinweg keinen Strom generieren. Eine weitere Möglichkeit der Isolierung bietet das Einpressen kleiner Kunststoffteile. Für die Verbindung planer Anschlussflächen aus Aluminium mit solchen aus Aluminium, Kupfer oder Bronze hat PFISTERER die Al-Elastkontaktscheiben entwickelt.

## Drei Alterungseffekte. Eine Lösung.

Diese werden zwischen den Anschlussflächen auf der Kontaktschraube angeordnet. Bei der Montage dringen ihre konzentrischen Ringschneiden durch die Oxidschichten in die Anschlussflächen ein und schaffen metallisch reine Kontaktflächen. Gleichzeitig schließt der äußere Polyure-

than-Elastomer-Dichtring unter dem Schraubendruck die Kontaktstelle hermetisch ab, Elektrolyte können nicht mehr eindringen.

Da auch hier nach Abschluss der Montage die Kontaktkraft infolge von Fließ- und Setzvorgängen abfällt, bringt die Kontaktscheibe durch die gegeneinander versetzte Anordnung ihrer Ringschneiden mehr als ausreichend Elastizität in die Schraubverbindung ein. Damit folgt die Konzeption der Kontaktscheiben der Erkenntnis, dass möglichst viele Alterungsmechanismen gleichzeitig kontrolliert und abgewehrt werden sollten, da sie einander auslösen können oder sich in ihrer Wirkung gegenseitig potenzieren.

Jede thermische Ausdehnung kann Setz- und Fließvorgänge beschleunigen. Diese Vorgänge, aber auch Vibrationen, lösen mechanische Bewegungen aus, die den Materialverschleiß ebenso begünstigen wie Oxidation und Korrosion. Und das ist nur ein Ausschnitt aus dem Spektrum negativer Synergien, in dem noch weitere Alterungsmechanismen wirken. So komplex ihr Zusammenspiel ist, so deutlich äußern sich ihre negativen Auswirkungen: hohe Temperaturen, steigender Widerstand, nachlassende Kontaktkraft – allesamt Vorboten des Kontaktausfalls.

## Zuverlässig unter Volllast

Nicht zuletzt muss jede Klemme entsprechend ihrer erwarteten Belastung ausgelegt und eingesetzt werden. Denn je höher die permanente Stromlast umso schneller altert die Komponente. Immer häufiger kommt es vor, dass Verbindungen sich seit 30 Jahren in Betrieb befinden, also bereits gealtert sind, jetzt aber infolge der höheren Auslastung der Netze mit steigenden Strömen belastet werden. Dies gilt insbesondere in Gebieten mit hohem Einspeiseanteil an regenerativen Energien, hier stehen Netze oft bereits unter Volllast.



2DIREKT-Schraube mit Federwirkung dank Tellerscheibe im Einsatz am Transformator

# Langlebige Kontakte dank richtiger Konstruktion und Montage

Wissen nutzt nur, so weit seine Umsetzung reicht. Dieser vierte Teil zu den Grundlagen der Kontakttechnik zeigt anhand seit langem eingesetzten Klemmen, wie die Lebenserwartung von Leiterverbindungen verbessert werden kann und dadurch bis zu vier Jahrzehnte und länger erreicht – trotz natürlicher Kontaktalterung. Die Voraussetzungen hierfür: die prinzipien- gerechte Konstruktion der Verbinder und deren richtige Montage.

Die Grundregeln für die Konstruktion eines Verbinders sind zahlreich, ihre Abstimmung ist komplex, wie folgende Konstruktionsgrundsätze demonstrieren. Einerseits muss sein Design unter allen Betriebsbedingungen bestimmte Kontakteigenschaften sicherstellen, andererseits müssen die Herstellkosten akzeptabel sein. Die Erfüllung beider Regeln konfrontiert Hersteller bereits bei der Materialauswahl mit divergierenden Anforderungen:

Stahl beispielsweise ist günstiger als Aluminium. Zudem kann mit einer festeren Stahlklemme die notwendige Initialkraft beim Kontaktieren der Leiter leichter hergestellt werden als mit einer Aluminiumklemme. Mit Blick auf die erwünschte lange Lebensdauer einer Verbindung verliert das Material jedoch an Strahlkraft: Stahlverbinder bieten dem Strom einen höheren Widerstand beim Durchfließen der Kontaktstellen. Die Folge: Höhere Temperaturen, die die Kontaktalterung forcieren (Details siehe Teil 3).

Die Materialauswahl folgt zudem der Notwendigkeit, eine bleibende mechanische Deformation des Verbinderkörpers durch das Kontaktieren soweit als möglich zu verhindern. Anderenfalls würden die mechanischen Funktionen der Klemme beeinträchtigt sowie kontaktschwächende Kriech-, Fließ- und Setzvorgänge gesteigert werden (Details siehe Teil 3). Ein weiterer wichtiger Hebel sind Länge, Dicke und Breite der Verbinderbauteile – richtig gewählt, kann die notwendige Kontaktkraft erreicht werden, ohne den Verbinderkörper dauerhaft plastisch zu verformen. Und auch bei metallischen Überzügen gilt es, das richtige Maß zu finden: Schichtdicke und Material müssen so gewählt sein, dass die elektrischen Eigenschaften wie zum Beispiel niedriger Kontaktwiderstand erreicht werden, der Korrosionsschutz wirkt und die Kosten vertretbar bleiben.

## **Spielraum ohne Spielraum**

Das anspruchsvolle Zusammenspiel von Material und Konstruktion manifestiert sich am deutlichsten in den zentralen Faktoren Kontaktkraft und Elastizität. Die Kontaktkraft muss groß genug sein, um den bei der Kontaktherstellung vorhandenen Anfangswiderstand zu minimieren. Zudem muss über die gesamte Lebensdauer der Verbindung hinweg ausreichend Kontaktkraft erhalten bleiben sowie die temperaturbedingte Längsdehnung der Leiter in Schach gehalten werden, die ansonsten als Mikrobewegung zwischen Leiter und Kontaktteilen zu mechanischem Abrieb und Reibkorrosion führt und damit langfristig zum Kontaktausfall (siehe Teil 3).

Gleichzeitig müssen Material und Design so ausgelegt sein, dass das System „thermisch atmen“ kann. Bei Erwärmung dehnt sich Aluminium stärker aus als andere Metalle. Folge: Werden Aluminiumleiter mit einer „starren“ Kupfer- oder Stahlklemme verbunden, haben sie nicht genügend Platz sich auszudehnen, der Leiter fließt weg und kehrt bei Abkühlung nicht mehr in seine ursprüngliche Form zurück. Im Laufe mehrerer Erwärmungs- und Abkühlungszyklen löst sich der elektrische Kontakt nach und nach bis zum Totalausfall.

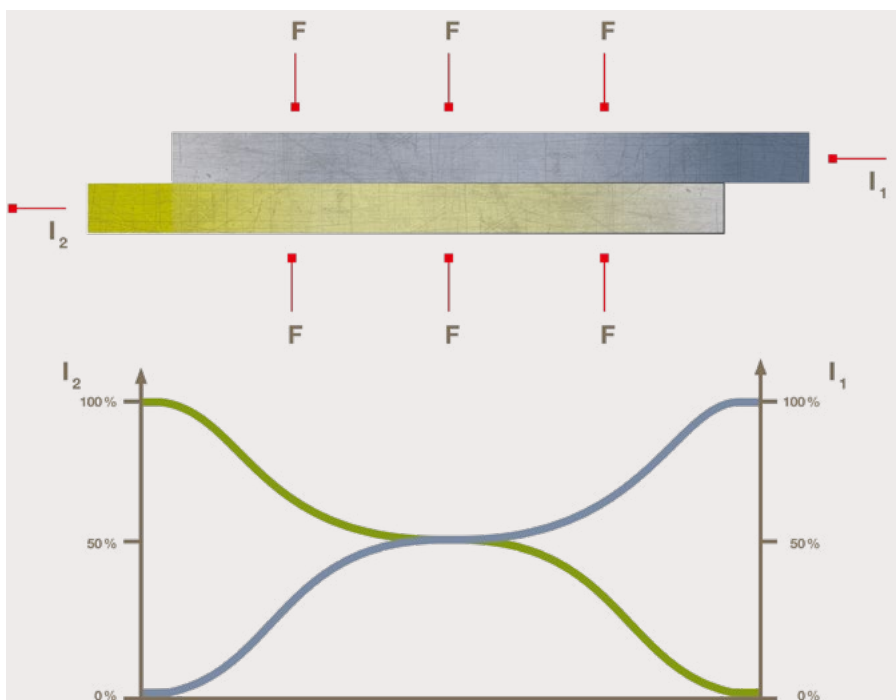
Diesen Spagat zwischen Kraft und Dehn-Spielraum mussten Kontakttechnik-Hersteller zu beherrschen lernen, als der Aluminiumleiter den Kupferleiter weitflächig verdrängte. In dieser Umbruchszeit entwickelte beispielsweise PFISTERER die V-Klemme mit integrierter Elastizität – damals ein Novum, heute ein Standardprodukt. Sie ermöglicht das thermische Atmen zum einen durch den Einsatz von Aluminium für den Klemmenkörper, womit Aluminiumleiter und Klemmenkörper dasselbe thermisch bedingte Dehnungsverhalten aufweisen (Eigenelastizität). Zum anderen verformt sich der Klemmenkörper beim Anziehen der Schraube an definierten Stellen so, dass eine elastische Verformung eintritt, die gleich einer vorgespannten Feder wirkt (Designelastizität). Für ausreichend Kontaktkraft sorgt wiederum die entsprechend ausgelegte Kontaktierung per Schraubtechnik, die zugleich eine Längsbewegung des Leiters in der Klemme verhindert.

### Optimale Kraft. Suboptimales Ergebnis?

Weitere Erkenntnis: Ausreichend Kontaktkraft reicht allein nicht. So beim Einsatz von leicht oxidierendem Aluminium. Hier muss die Kontaktzone so gestaltet werden, dass die nichtleitenden Oxidschichten von Kontaktschneiden oder

-zähnen durchdrungen werden. Erst dadurch entsteht ein rein metallischer Kontakt, der den ungehinderten Stromfluss von einem Leiter zum anderen gewährleistet (siehe Teil 2). Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Anordnung der Kontaktschneiden oder -zähne im Klemmbereich. Die Regel von Donati zur Strom-Kommutierung zeigt, dass diese idealerweise dort anzuordnen sind, wo die natürliche Kommutierung am höchsten ist (siehe Bild 1).

Und manchmal ist optimale Kraft zuviel Kraft. Zum Beispiel wenn Spannscheiben zwischen Schraube und Verbinderkörper eingesetzt werden, um Elastizität einzubringen. Bei Verbindern aus Aluminium oder Kunststoff wird diese Wirkung bei unsachgemäßer Montage jedoch verfehlt: Beim Anziehen der Schraube entsteht eine hohe Druckbelastung einer relativ kleinen Zone, die hier befindliche Spannscheibe gräbt sich unter dem Anziehdruk in den „weichen“ Verbinderkörper, womit ihre gewünschte Federfunktion verloren geht. Einzige Lösung in dieser Konstellation: man legt zwischen Verbinderkörper und Spannscheibe eine plane Stahlscheibe. Diese verteilt die eingeleitete Kraft über die gesamte Kontaktzone und verhindert das Einsinken der Spannscheibe (siehe Bild 2, Seite 15).



**Bild 1:** Ideale Anordnung der Kontaktelemente: Die Regel von Donati zur Strom-Kommutierung zeigt, dass die Stromdichte einer Verbindung nicht an allen Stellen gleich ist: Die Kommutierung erfolgt zum großen Teil am Beginn und am Ende der Überlappungsfläche der Leiter. Ergo: Die Kontaktbereiche (Zonen, Linien, Punkte) werden möglichst nah an den Anfang bzw. das Ende der Klemme platziert.

### Richtige Montage – geringere Risiken

Und auch wenn die lebensnotwendige Elastizität konstruktiv vorhanden ist, gefährden Montagefehler die Langzeitstabilität des Kontaktes. Eine Montagerregel lautet: Verschmutzungen und Oxidschichten an den Kontaktzonen sind durch Reinigen und Bürsten zu entfernen. Zudem müssen Kontaktschutzfette oder -pasten eingesetzt werden – vor allem unter kritischen Umgebungsbedingungen. Sie schützen die eigentlichen Kontaktzonen gegen das Eindringen von Luft, Wasser und Salz und damit vor Oxidation und Korrosion. Hinzukommt: Bei Schraubverbindern gewährleistet erst das richtige Einfetten der Schraube die optimale Umsetzung des aufgebracht Drehmoments in die notwendige Kontaktkraft. Wie enorm die Kraftverluste sein können, wenn das Fettes vergessen oder falsch ausgeführt wird, zeigt Tabelle 1 auf Seite 17.

Da die Montage oft genug unter schwierigen Bedingungen und Zeitdruck erfolgt, sind Hersteller von Kontakttechnik bestrebt, durch entsprechende Verbindersdesigns Montagefehler auszuschließen oder zumindest deren Folgen zu minimieren. So liefern manche Hersteller Schraubverbinder nur mit vorgefetteten Schrauben aus. Ein weiteres Mittel ist die metallische Beschichtung der Klemmen oder Kontaktzonen. Zinn-Auflagen bieten eine wirtschaftlich gute Lösung für zusätzliche Sicherheit, wenn nur unzureichend gereinigt und gefettet wurde. Das wachsartige Zinn weicht beim Eindringen der Kontaktzähne zurück und schließt sich nach dem Kontaktieren wieder um die Kontaktpunkte. Durch den Galvanisierungsprozess wird außerdem eine auf Aluminiumflächen eventuell vorhandene Oxid-Schicht automatisch entfernt.

### Viele Erkenntnisse – eine Klemme

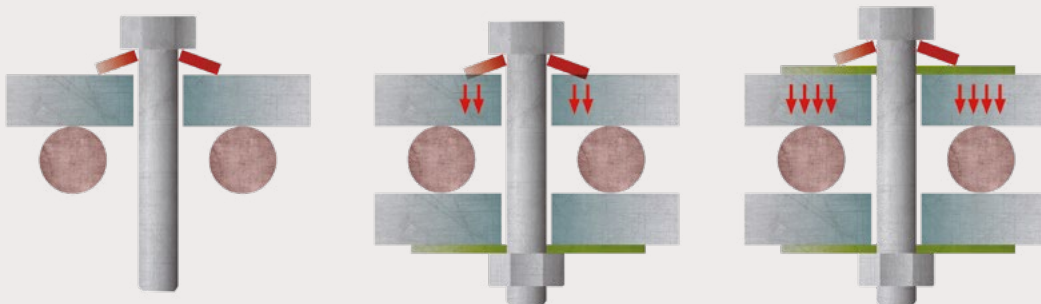
Die Umsetzung dieser und weiterer Erkenntnisse erfolgte bereits in den 1960er Jahren mit den ISO-Abzweigklemmen von PFISTERER (Bild 3): Für das Erreichen der notwendigen Initialkraft sorgt die anwendungsgerechte Abstimmung von Schraube, Schraubenfettung und Anziehdrehmoment. Beim Anziehen der Schraube beißen sich Kontaktzähne durch die Leiterisolierung hindurch und in die Leiter hinein, wodurch definierte, blanke Kontaktpunkte hergestellt werden. Die Formgebung der metallischen Kontaktplatten (Elastizität) gewährleistet die dauerhafte Kontaktkraft. Für eine verbesserte und zuverlässige Kontaktierung leicht oxidierender Aluminiumleiter werden die Kontaktplatten verzinkt.

Die Kontaktplatten sind berührungssicher in einen Verbinderkörper aus Kunststoff eingebettet, womit Materialkosten gesenkt und gleichzeitig die Arbeitssicherheit erhöht wird. Direkt unterhalb der Schraubenköpfe ist zusätzlich eine Stahlplatte in den Verbinderkörper integriert. Ohne diese würde der Kunststoffkörper unter der kleinen Fläche des Schraubenkopfes zu hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Dieses Design bildet bis heute die Basis für inzwischen fortschrittlichere Abzweigklemmen wie zum Beispiel die ISICOMPACT von PFISTERER, bei der die Druckplatte zugleich als Federelement ausgebildet ist.

### Eine Spezifikation – viele Parameter

Die anhand der ISO-Abzweigklemme dargestellten Konstruktionsgrundsätze bilden sich in vielerlei Designregeln ab, die sich in den Spezifikationen von Herstellern und Anwendern spiegeln. Die Langzeitübertragungsfähigkeit ei-

Bild 2 zeigt einen klassischen Montagefehler:



1. Eine Spannscheibe wird zwischen Schraubenkopf und einem Verbinderkörper aus Aluminium oder Kunststoff eingeleitet.

2. Unter dem Anziehdruck der Schraube versinkt sie im „weichen“ Verbinderkörper und verliert so ihre Federwirkung.

3. Lösung: Eine plane Stahlscheibe wird dazwischen gelegt. Sie verteilt die eingeleitete Initialkraft über eine größere Fläche und verhindert das Einsinken.

nes Kontaktes beispielsweise wird häufig definiert über die Initialkraft, die bei der Herstellung der Verbindung einzuleiten ist, oder über die Länge der vorhandenen Kontaktlinien beziehungsweise die Fläche der realisierten Kontaktpunkte.

Eine Anwender-Spezifikation zum Beispiel fordert für eine Freiluftschaltanlagenklemme 120 N Initialkraft pro zu übertragendes Ampere bei einer Leiterkapazität von 1.000 A. Um diese zu erfüllen, muss der Hersteller diverse Einflussgrößen aufeinander abstimmen: die Schraubengröße, die für Schraube, Mutter und Unterlegscheibe verwendeten Werkstoffe, ihre Oberflächenbeschaffenheit (blank, galvanisiert, gefettet), die Steigung des Schraubengewindes, die Anzahl der Schrauben sowie das Anziehdrehmoment.

### Vom Ausgangswert zur Auslegung

Diese Abstimmung erfolgt mit Hilfe tabellarisch erfasster Erfahrungswerte: Ausgehend von einer Standard-Schraube aus feuerverzinktem Stahl der Größe M12 und der Festigkeitsklasse 8,8 ergibt sich ein Nenn-Anziehdrehmoment von 80 Nm (siehe Seite 17, Tabelle 2), das als neutraler Faktor 8,0 in die Berechnung der Schraubverbinder-Auslegung einfließt.

Wählt man eine Aluminium-Mutter und eine A-2-Scheibe, ergibt sich für diese Materialkombination eine notwendige

Initialkraft gleich Verspannkraft von 3,8 kN pro 10 Nm Anziehdrehmoment bei einem mit Vaseline gefetteten Gewinde (siehe Seite 17, Tabelle 3). Multipliziert man diese beiden Werte, ergeben sich 30,4 kN Initialkraft pro Schraube. Um die geforderten 120 kN zu erreichen, werden vier Schrauben eingesetzt, woraus sich 121,6 kN ergeben und womit die Spezifikation erfüllt ist.

### Feintuning und Innovation

Anders, wenn der Anwender die Verwendung von Schrauben der Stahlgruppe A2 oder A4 und der Festigkeitsklasse 80 fordert. Diesen wird ein durchschnittliches Anziehdrehmoment von 75 Nm zugeordnet (Seite 17, Tabelle 2). Damit würden vier Schrauben bei gleichem Mutter- und Scheiben-Material, also bei gleicher Verspannkraft von 3,8 kN pro 10 Nm Anzugsdrehmoment (Tabelle 3), „nur“ 114 kN erreichen.

Für einen erfahrenen Konstrukteur kein Problem, denn jede Einflussgröße birgt Spielraum. In diesem Fall ließen sich die fehlenden 6 kN beispielsweise über eine andere Fettung realisieren, die das Anziehdrehmoment noch effizienter als Vaseline in die benötigte Verspannkraft umwandelt. Der Anspruch von innovativen Herstellern geht jedoch darüber hinaus: Ihre Verbinder der jüngeren Generationen realisieren neben den hier genannten Grundsätzen noch mehr Wirtschaftlichkeit bei höherer Arbeitssicherheit und größerer Flexibilität in der Anwendung.



- Integrierte Stahlplatten für optimale Kraftverteilung
- Elastizität durch Formgebung der Kontaktplatten
- Kontaktzähne für definierte Kontaktstellen
- Verbinderkörper aus Kunststoff für Berührungssicherheit
- Schraubenfettung unterstützt Umsetzung des Drehmoments in Kontaktkraft

**Bild 3:** Bereits bei der ISO-Abzweigungsklemme aus den 1960er Jahren wurden die Designkriterien moderner Klemmen berücksichtigt.

## Kontaktkräfte durch Schrauben

Schraube	Fettung	Kraft in kN bei Drehmoment	
		56 Nm	80 Nm
A2 F70	ohne	21,8	28,6
A2 F70	Vaseline	19,8	27,4
A2 F70	M 50 G	29,3	39,6
8.8 tzn	ohne	17,1	25,7
8.8 tzn	Vaseline	24,8	31,7
8.8 tzn	M 50 G	21,9	32,1
8.8 gal, verz.	ohne	18,9	22,9
8.8 gal, verz.	Vaseline	32,5	47,0
8.8 gal, verz.	M 50 G	29,4	43,0

**Tabelle 1** offenbart Details mit großer Wirkung: Wird bei einer Schraubverbindung das Einfetten der Schraube unterlassen oder falsch ausgeführt, kann das eingeleitete Drehmoment nicht in ausreichendem Maße in die notwendige Kontaktkraft umgesetzt werden. Folge: Kraftverluste um bis zu mehr als 50%.

## Anziehdrehmomente

Gewinde	Anziehdrehmomente für Schrauben-Werkstoff in Nm	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Unlegierte oder legierte Stähle feuerverzinkt (tZn)</li> <li>■ Festigkeitsklasse 8.8</li> <li>■ <math>R_{P0.2\text{MIN.}} = 640 \text{ N/mm}^2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Rost- und säurebeständige Stähle, Stahlgruppe A2 oder A4</li> <li>■ Festigkeitsklasse 80</li> <li>■ <math>R_{P0.2\text{MIN.}} = 600 \text{ N/mm}^2</math></li> </ul>
M 6	9,5	9
M 8	23	22
M 10	46	43
M 12	80	75
M 14	125	120
M 16	195	180
M 18	280	260
M 20	390	370

**Tabelle 2** erfasst Anziehdrehmomente für verschiedene Schrauben-Werkstoffe.

## Verspannkkräfte in kN für je 10 Nm Anzugsmoment, Gewinde mit Vaseline gefettet

Schraube	Mutter	Scheibe	M8	M10	M12	M16
St tzn	St	St tzn	4,5	3,6	3,0	2,3
St tzn	Al	St tzn	4,8	3,8	3,2	2,5
St tzn	Al	A2	5,7	4,5	3,8	2,9
St tzn	Cu/Rg/Ms	St tzn	4,5	3,6	3,0	2,3
A2/A4	St	A2/A4	4,3	3,4	2,9	2,2
A2/A4	A2/A4	A2/A4	4,1	3,3	2,8	2,1
A2/A4	Al	A2/A4	4,3	3,4	2,9	2,2

**Tabelle 3** enthält für ausgewählte Materialkombinationen die Verspannkkräfte in Abhängigkeit vom Anzugsmoment.



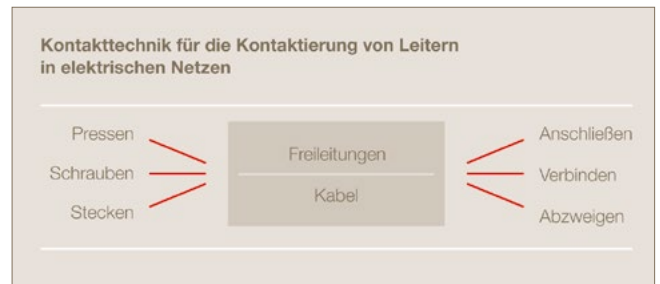
# Von bewährten Kontakt-techniken zu innovativen Verbindern

Der fünfte Teil gibt einen Überblick über die klassischen Verbindungstechniken Pressen, Stecken, Schrauben und zeigt: Fortschrittliche Klemmen können weit-aus mehr als der natürlichen Kontaktal-terung widerstehen. Sie erleichtern die Montage, reduzieren Fehlerrisiken, bie-ten eine höhere Arbeitssicherheit und decken ein breiteres Anwendungsspek-trum ab.

Überblickt man die Geschichte der Kontakttechnik bis zur Gegenwart, eröffnet sich ein großes Feld. Es umfasst alle mechanischen Verbindungen von Leitern in elektrischen Energienetzen, genauer von Kabeln und Freileitungen. Für deren Verbindung werden bis heute weltweit drei Techniken angewandt: Pressen, Stecken und Schrauben. Alle drei werden mit unterschiedlicher Gewichtung eingesetzt für die drei Grundformen der Kontaktierung Anschließen, Ver-binden und Abzweigen (Bild 1). Dagegen sind die traditio-nellen Techniken Schweißen und Löten in den letzten Jahr-zehnten so gut wie verschwunden.

## Pressen mit Maß

Das Prinzip der Presstechnik beruht auf der radialen und axialen Verformung der Hülse und der darin befindlichen Leiterenden durch Verpressung. Hierfür gibt es zwei ver-breitete Grundverfahren: die formgesteuerte symmetrische Verpressung (zum Beispiel Rund- oder Sechskant-Verpres-sung, Bild 2) sowie die kraftgesteuerte unsymmetrische Verpressung (zum Beispiel Tiefnut-Verpressung). Letztere ist für die Kontaktierung von Freileitungen nicht zugelassen, da hierbei die Einzeldrähte stärker gepresst werden und



**Bild 1:** Überblick über das weite Feld der heutigen Kontakttechnik: angefangen bei den drei wichtigsten Techniken über die zu verbindenden Leiterarten bis hin zu den drei gängigen Grundformen von Verbindungen.



**Bild 2:** Eine zuverlässige Langzeitkontaktierung erfordert die optimale Querleitfähigkeit des Leiters. Hierfür müssen beim Einsatz der Presstechnik nicht nur die Außenlagen des Leiterverbundes verpresst werden sondern auch seine Innenlagen. Eine optimale Verpressung per symmetrischem Press-Verfahren zeigt dieses Bild: Alle Einzeldrähte weisen die hierfür charakteristische kantige Verformung auf.

infolgedessen noch weiter in Längsrichtung wegfließen (axiale Verformung). Dadurch wird der Leiter an der Kontaktstelle dünner (Querschnittswund), seine mechanische Festigkeit sinkt. Freileitungen jedoch sind verstärkt diversen Zugkräften ausgesetzt, so dem eigenen Gewicht und Schwingungen infolge Wind und Wettereinflüssen, müssen also eine besondere Zugfestigkeit aufweisen. Die Berücksichtigung dieser Zugkräfte stellt Kontakttechnik-Hersteller bei allen Techniken – vor allem aber bei der Presstechnik – vor die Herausforderung, zwei gegenläufige Prozesse in Einklang zu bringen. Einerseits schwindet mit höherer Kontaktkraft der Widerstand, den der Strom zu überwinden hat – ein durchaus angestrebter Effekt. Denn mit höherem Widerstand steigt die thermische Belastung des Kontaktes, was seine Alterung beschleunigt (Details siehe Teil 3).

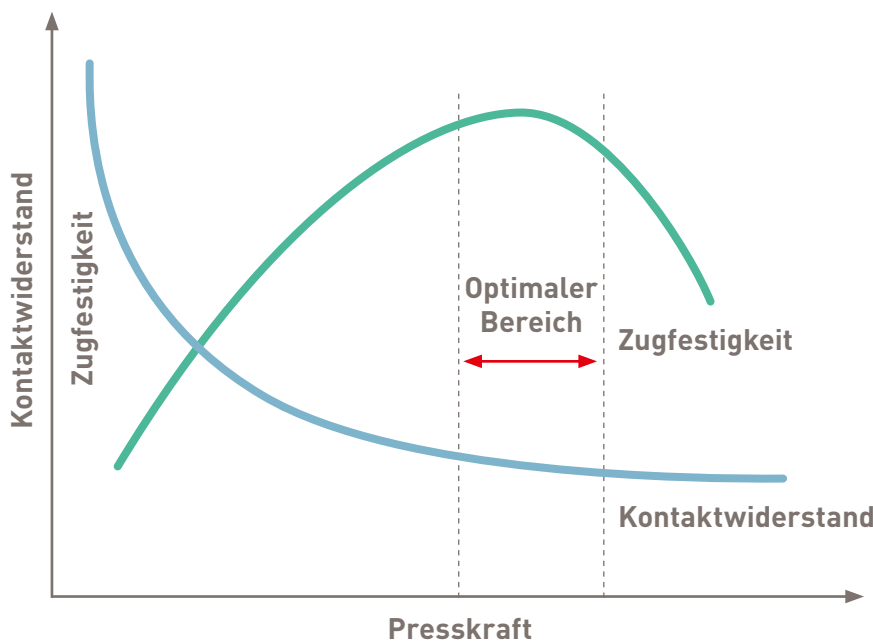
Andererseits werden ab einer gewissen Krafteinwirkung beim Kontaktieren die Leiter zu stark deformiert. Ist ihre mechanische Festigkeit jedoch zu gering, reißen sie bei höheren Zugkräften. Die Lösung: die Kontaktkraft wird so abgestimmt, dass der Verbinder den elektrischen und mechanischen Anforderungen gleichermaßen gerecht wird (Bild 3).

### Stecktechnik für lösbare Kontakte

Dass dies gelingen kann, beweist die Praxis: Nachdem die Presstechnik in den 1960er Jahren europaweit ihren festen Platz neben der Schraubtechnik eingenommen hat, wird

sie heute weltweit eingesetzt, primär zum Verbinden und Anschließen von Leitern mit Querschnitten von 16 bis 2500 mm<sup>2</sup>. Die wichtige Erkenntnis, dass sich mit mehreren kleinen und definierten Kontaktstellen eine höhere Kontaktqualität realisieren lässt als mit einer einzelnen großen Kontaktfläche (Detail-Info 1, siehe auch Teil 2), teilt die Presstechnik mit der jüngeren Stecktechnik. Diese hat sich in den 1970er und 1980er Jahren durchgesetzt, als Kabel zunehmend verwendet wurden und der Bedarf an berührungssicheren Anschlüssen stieg. Dies erforderte voll gekapselte Kontakt-Systeme, die sich nach der Erstkontaktierung wieder lösen lassen.

Eine fortschrittliche Lösung hierfür bietet das trocken steckbare und berührungssichere CONNEX-Kabelanschluss-System: Auf das Ende des zu verbindenden Kabels wird ein Stecker montiert, der wiederum in eine anlagenseitig verbaute Aufnahme-Buchse eingesteckt wird. Heute werden Steckverbinder aller Art eingesetzt, hauptsächlich zum Anschließen, gefolgt vom Verbinden. Vereinzelt ermöglichen auch das seltenere Abzweigen per Stecktechnik, zum Beispiel T-Abzweig-Muffen. Bei der Entwicklung und dem Design von Steckverbindern wird ebenfalls das Prinzip des elastischen Linienkontaktes zugrunde gelegt (Bild 4).



**Bild 3:** Ideale Anordnung der Kontaktelemente: Die Regel von Donati zur Strom-Kommuntierung zeigt, dass die Stromdichte einer Verbindung nicht an allen Stellen gleich ist: Die Kommutierung erfolgt zum großen Teil am Beginn und am Ende der Überlappungsfläche der Leiter. Ergo: Die Kontaktbereiche (Zonen, Linien, Punkte) werden möglichst nah an den Anfang bzw. das Ende der Klemme platziert.



**Bild 4:** Auch bei der Konstruktion von Steckverbindern werden für eine jahrzehntelange Lebensdauer der Verbindung die Kontaktstellen als Kontaktlinien definiert sowie eine hohe Elastizität mittels Federung eingebracht.

## Schraubtechnik: Tradition & Gegenwart

Die älteste Kontakt-Technik ist die Schraubtechnik mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Klemmen (Bild 5) für das Verbinden, Anschließen und Abzweigen. Hierbei werden zwei grundsätzliche Vorgehensweisen unterschieden: die ältere, aus dem Freileitungsbereich stammende blanke Schraubtechnik sowie die jüngere isolierte Schraubtechnik. Dabei sind einige Anforderungen an beispielsweise blanke Freileitungsklemmen niedriger, da Freileitungen von Luft umgeben sind und von Winden gekühlt werden. Anders bei den meist unterirdisch verlegten isolierten Kabeln, deren Isolierung Wärme speichernd wirkt. Damit hierfür verwen-

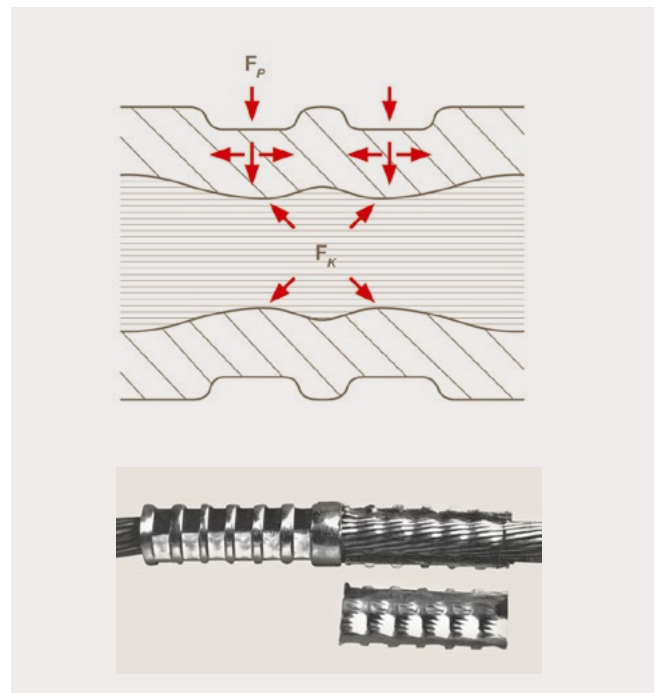
dete isolierte Kabelklemmen temperaturbedingt nicht vorzeitig altern (Teil 3) oder gar überhitzen, müssen sie höhere kontakttechnische Anforderungen erfüllen. Allen Schraubverbindern gemeinsam ist die Herstellung der

## Detail-Info 1:

Versuche haben erwiesen, dass mehrere definierte Kontaktstellen besser sind als eine einzelne große Kontaktfläche. Die Umsetzung dieser Erkenntnis erfolgt beispielsweise in der Presstechnik im Wege der Ehrfach-Verpressung: Dort, wo sich die Kante des Presswerkzeuges in Hülse und Leiter eindrückt, entstehen ebenfalls Kanten. Diese wirken als Kontaktlinien, über die der Stromfluss von einem Leiter zum anderen definiert geleitet wird. Hinzukommt: Infolge der Presskraft weicht der Leiter aus, dehnt sich in Längsrichtung und staucht sich in den Zwischenräumen der einzelnen Press-Stellen. In diesen so genannten Auskorbungen ist Elastizität gespeichert. Diese bewirkt, dass die fixierten Leiter unter verschiedenen thermischen Bedingungen immer mit einer bestimmten Kraft an die Presskanten, also an die Kontaktlinien gedrückt werden. Auf diese Weise wird die notwendige Mindestkontaktkraft über die gesamte Lebensdauer einer Verbindung aufrechterhalten.



**Bild 5:** Die Schraubtechnik ist nicht nur die älteste Kontakttechnik mit einer großen Vielfalt an Verbinderausführungen sondern stellt zugleich die fortschrittlichsten Klemmen, die heutzutage eingesetzt werden.



Eine Schlüsselkomponente: Der Übergang von der Freileitung auf das Prüfkabel – modular zusammengesetzt aus Elementen des HV CONNEX Systems.

Kontaktkraft per Schrauben (Designregeln zur Schraubenauslegung siehe Teil 4).

Wie in der Press- und Stecktechnik versuchen Kontakttechnik-Hersteller auch in der Schraubtechnik, Grundlagenwissen sowie Erfahrungen aus dem Praxiseinsatz in fortschrittliche Klemmendesigns zu transferieren. Mit Erfolg: Der Einsatz innovativer Schraubklemmen, wie zum Beispiel der ISICOMPACT, vereinfacht die Montage bei gleichzeitig höherer Arbeitssicherheit. Ihre Herstellung ist wirtschaftlicher, während sich die Einsatzmöglichkeiten dank ihrer Mehrbereichsfähigkeit vervielfachen. Folgende Merkmale zeichnen solche Schraubverbinder aus: ein isoliertes und damit berührungssicheres Design dank eines Verbinderkörpers aus Kunststoff und isolationsdurchdringender Kontaktelemente (Teil 4) sowie die Ein-Schrauben-Technologie mit Drehmoment-Auslösung.

Als weiteres Beispiel hierfür steht das SICON-Anschlusskonzept. Den Anstoß zu seiner Entwicklung gaben sich verändernde Markanforderungen (Teil 1): In den letzten dreißig Jahren haben sich die Kabelbauformen und -querschnitte vervielfacht, während sich das Profil eines Monteurs vom Spezialisten zum Allrounder wandelte. Zudem kamen mit der Entwicklung elastischer Kunststoffe mehrbereichsfähige Muffen auf den Markt. Den daraus resultierenden Bedarf an flexibel einsetzbaren Verbindern, die sich einfach und sicher montieren lassen, können die gängigen Lösungen nicht befriedigen. Die Presstechnik schon prinzipbedingt nicht, da sie Leiterquerschnitt zu Hülsenquerschnitt und Werkzeug fest zuordnet und somit nicht nur eine Fülle an Material und Werkzeugen erfordert sondern auch speziell geschultes Personal. Das Prinzip der modernen Schraubtechnik wiederum bietet das Potenzial, den heutigen Ansprüchen gerecht zu werden,

gleichzeitig scheitern herkömmliche Schraubverbinder daran aufgrund ihrer Schwachpunkte.

### Neue Technik, neue Herausforderungen

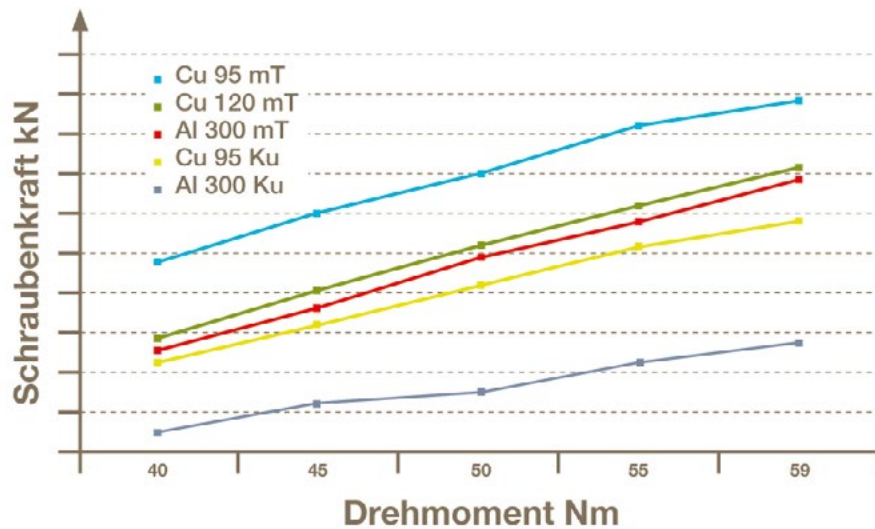
Einer davon: Das Einleiten der optimalen Kontaktkraft ist nicht sichergestellt, da dieser Vorgang von zwei unsicheren Faktoren abhängt. Zum einen von der subjektiven Einschätzung des Monteurs, ob und wann ausreichend Kraft eingeleitet ist. Zum anderen sind die hierfür als Abhilfe gedachten Drehmomentschlüssel nicht immer zuverlässig. Weiterer Nachteil: die über den Verbinderkörper herausragenden Schrauben erschweren das Anbringen einer Muffe. Eine erste Optimierung fand durch den Einsatz von mehrstufigen Abreißschrauben statt. Ihrer Bezeichnung gemäß reißen sie beim Kontaktieren ab, was das Anbringen von Muffen erleichtert. Das Abreißen erfolgt an definierten Sollbruchstellen beim Erreichen vorbestimmter Drehmomente.

Doch auch diese Neuerung stößt an Grenzen. Auf dem Markt hat sich der Anspruch durchgesetzt, mit einer Klemme einen Querschnittsbereich von 50 bis 240 mm<sup>2</sup> abzudecken. Dieser umfasst die sieben Querschnittsstufen 50, 70, 95, 120, 150, 185 und 240 mm<sup>2</sup> und damit sieben verschiedene Nenn-Durchmesser. Die mehrstufigen Abreißschrauben verfügen jedoch über maximal drei Abreißstellen, so dass mindestens vier Querschnittsstufen nicht passgenau abgedeckt sind. Andererseits sind sieben Sollbruchstellen auf einer Schraube nicht sinnvoll machbar, denn jede Sollbruchstelle schwächt die Tragfähigkeit des Gewindes.

Größter Nachteil der mehrstufigen Abreißschrauben: Sie lassen sich technisch nur in der Form ausführen, dass ihre erste, dem Leiter zugewandte Sollbruchstelle beim



**Bild 6:** Nachteil von Abreißschrauben mit mehrfach gestuften Abreißstellen: Das größte definierte Drehmoment (35 Nm) muss konstruktiv bedingt an der 3. Abreißstelle wirken, das kleinste definierte Drehmoment (25 Nm) an der 1. Abreißstelle. Aufgrund der drehmomentgesteuerten Krafteinleitung wirkt somit auf die kleinsten Leiter (bis 95 mm<sup>2</sup>) eine größere Kontaktkraft, während die größten Leiter (bis 240 mm<sup>2</sup>) mit einer geringeren Kontaktkraft kontaktiert werden.



niedrigsten definierten Drehmoment abreißt und die letzte, dem Schraubenkopf nächste Abreißstelle beim höchsten definierten Drehmoment (Bild 6). Die Folge: Dann, wenn man die Schraube ganz eindrehen muss – also beim Verbinden der kleinstmöglichen Leiterquerschnitte – wird das größte Drehmoment aufgebracht, und umgekehrt. Somit werden die kleinsten Leiter mit der größten Kontaktkraft behandelt und die größten Leiter mit der kleinsten Kontaktkraft.

Hinzu kommt: Grundsätzlich wird immer nur ein Teil des aufgebrachten Drehmoments in Kontaktkraft übersetzt. Der andere Teil wird in Reibungskräfte umgewandelt. Eine davon ist die unvermeidliche Gewindereibung. Als natürliche Gegenkraft zur Kontaktkraft nimmt sie proportional zu dieser zu oder ab und ist daher auch mit herkömmlichen Verbindern beherrschbar. Anders bei der Kopfreibung. Diese wirkt bei klassischen Schraubverbindern zwischen Schraubenkopf und Leiteroberfläche, ist daher stark schwankend, da in dieser Konstellation abhängig von dem Leiterwerkstoff, der Leiterhärte sowie dem Zustand der Leiteroberfläche. So ist die Kopfreibung beim Einsatz eines Standardverbinders auf Aluminiumleitern sehr hoch, und damit die Gefahr, dass nur ungenügend Kontaktkraft eingeleitet wird. Umgekehrt, wenn derselbe Verbinder auf einem Kupferleiter trifft. Dann ist die Kopfreibung deutlich niedriger, das Risiko hierbei: es wird zuviel Kontaktkraft eingeleitet, das Gewinde reißt oder Einzeldrähte werden stark beschädigt. Dabei sind die ebenfalls wichtigen Ein-

## Detail-Info 2:

Bei Schraubverbindern mit integrierter Druckscheibe wirkt die Kopfreibung zwischen Druckscheibe und Schraube, also zwischen Funktionselementen, deren Beschaffenheit der Hersteller des Schraubverbinders bestimmt. Damit ist die Kopfreibung vom Leiter nahezu unabhängig, lässt sich herstellerseitig berechnen und in die Auslegung der Drehmomente einbeziehen. Ergebnis: Ein Schraubverbinder mit Druckscheibe (mT) kann selbst bei Leitern mit sehr unterschiedlichen Reibbeiwerten, so bei Kupferleitern und Aluminiumleitern, die erforderliche Kontaktkraft konstant herstellen (mittlere drei Linien). Anders bei Schraubverbindern mit Kuppen-Schrauben (Ku), die ein kugelballiges Schraubende aufweisen: Hier wirkt die Kopfreibung zwischen Schraube und Leiter, ist also abhängig von Leiterwerkstoff, Leiterhärte und Leiteroberfläche und damit von schwankenden Faktoren, die sich dem Einfluss von Herstellern entziehen. Die Folge: das aufgebrachte Drehmoment wird je nach Leiter mehr oder weniger in Kontaktkraft umgewandelt (oberste und unterste Linie), die Herstellung der optimalen Kontaktkraft ist nicht gewährleistet.

flussfaktoren Leiterhärte und Leiteroberfläche noch gar nicht berücksichtigt.

### Vorteile moderner Schraubverbinder

Die Quintessenz: ein herkömmlicher Verbinder allein kann verschiedenartigen Leitern nicht gerecht werden. Erschwerend kommt hinzu, dass man bei mehrstufigen Abreißschrauben die nachteilige Anordnung von Drehmoment zu Abreißstelle konstruktiv bedingt nicht umkehren kann. In Summe mit fatalem Ergebnis: der für jede Verbindung zentrale Faktor Kontaktkraft ist mit den dargestellten Mitteln nicht zuverlässig definierbar.

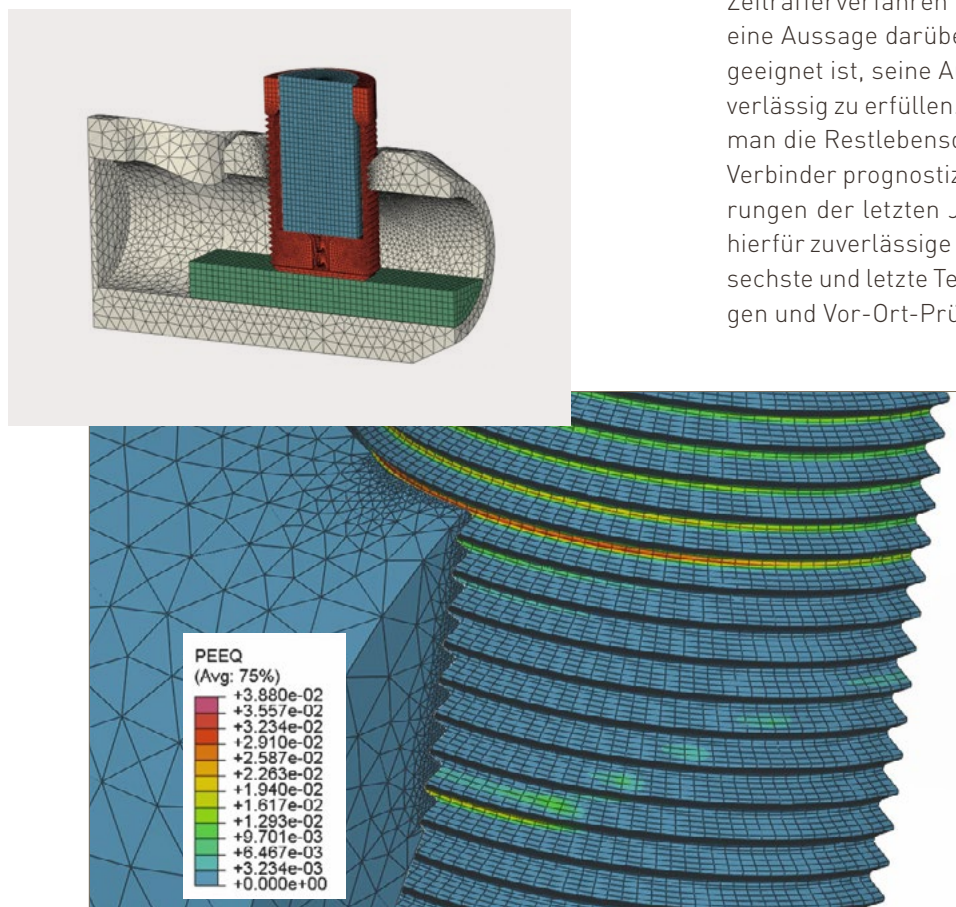
Anders mit SICON, der jüngsten Neuentwicklung auf dem Gebiet der Schraubverbinder. Die zwei wichtigsten Neuerungen des patentierten Anschluss-Systems für Leiterquerschnitte von 25 bis 2500 mm<sup>2</sup>: Die stufenlose Ausführung der Abreißschraube sowie die am Schraubenende integrierte Druckscheibe. Beide zusammen sorgen für optimale Kontaktkraft beim Einsatz an verschiedenen Leitern unabhängig von deren Beschaffenheit (Detail-Info 2), zudem können hiermit selbst feindrähtige Leiter der Klasse 5 ohne Beschädigungen kontaktiert werden. Wie genau, erklärt Detail-Info 3. Für die Entwicklung dieser wichtigen Funktionselemente müssen die im Verbinder wirkenden Kräfte und Spannungen beherrscht werden. Ihre Berechnung und Visualisierung erfolgte mit Hilfe der Finite-Elemente-

mente- Methode (FEM), ebenso die Analyse einzelner Schraubverbinder- Funktionen (Bild 7).

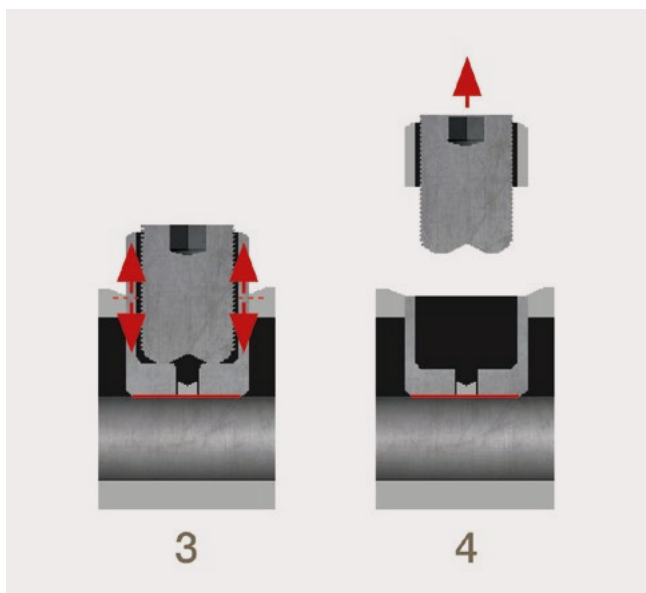
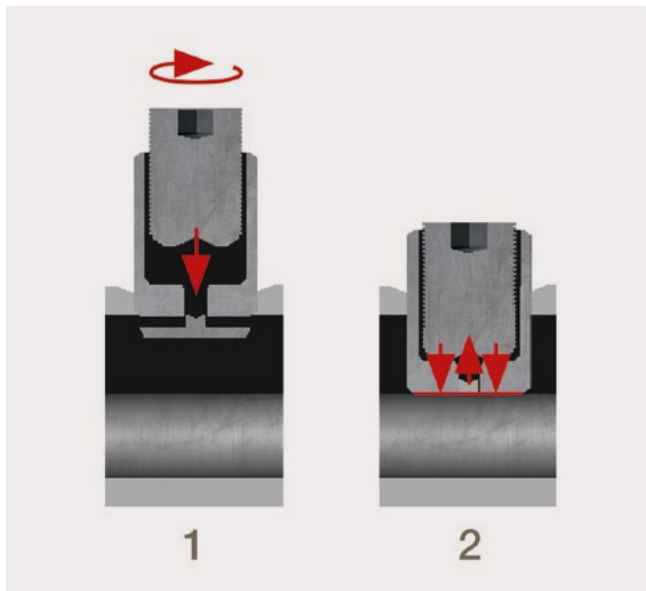
Mittlerweile belegt der Praxis- Einsatz von SICON in allen Spannungsebenen: das Anschluss-System erfüllt aktuelle Marktansprüche (Mehrbereichsfähigkeit, einfache Montage, höhere Montagequalität) und berücksichtigt Grundlagenwissen (Teile 2 bis 4). Letzteres bildet sich im SICON- Design beispielsweise wie folgt ab: Ein im Leiterkanal eingebrachtes Gewinde erzeugt definierte Kontaktkontaklinien. Die Verzinnung des gesamten Verbinderkörpers sowie die werkseitige Vorfettung des Leiterkanals schützen den Kontakt vor Oxidation und sichern seine Langzeitbeständigkeit. Durch die Werkstoffauswahl sowie das definierte Verhältnis von Leiterbohrungsdurchmesser zur Wandstärke des Verbinderkörpers wird Designelastizität erzielt: Beim Anziehen der Schraube wird der Verbinderkörper dauerelastisch verformt, so dass dieser gleich einer vorgespannten Feder wirkt. Damit wird Setz- und Fließvorgängen entgegengewirkt, gleichzeitig können die Systemkomponenten thermisch atmen. Alle diese Merkmale halten die natürliche Kontaktalterung in Schach.

### Wie lange hält der Kontakt?

Die Frage nach der tatsächlichen Langzeitbeständigkeit stellt sich bei Verbindern jeder Bauform. Ihre angestrebte Lebensdauer von vier bis fünf Jahrzehnten macht Echtzeittests jedoch unpraktikabel. Daher werden bei der Typprüfung von Neuentwicklungen Alterungsprüfungen im Zeitrafferverfahren durchgeführt. Sie lassen zumindest eine Aussage darüber zu, ob ein Verbinder grundsätzlich geeignet ist, seine Aufgabe im Energienetz dauerhaft zuverlässig zu erfüllen. Mit Vor-Ort- Prüfungen dagegen will man die Restlebensdauer bereits im Einsatz befindlicher Verbinder prognostizieren. Dies wirft mit Blick auf Erfahrungen der letzten Jahre eine andere Frage auf: Gibt es hierfür zuverlässige Methoden? Antworten darauf gibt der sechste und letzte Teil mit den Schwerpunkten Typprüfungen und Vor-Ort-Prüfungen.



**Bild 7:** Welche Kräfte und Spannungen in einem SICON-Schraubverbinder wirken, zeigt die linke FEM-Simulation. Die rechte FEM-Analyse belegt die Funktionsweise seines stufenlosen Abreißsystems: Der erste freie Gewindegang der SICON Schraube, der aus dem Gewinde des Verbinderkörpers austritt, ist zugleich der am höchsten mechanisch belastete Bereich. Ergo: an dieser Stelle reißt die stufenlose Schraube automatisch ab, sobald die optimale Kontaktkraft erzielt ist- auch ohne Sollbruchstellen.



## Detail-Info 3: Das SICON-Schraubenprinzip

**1.** Die SICON-Schraube besteht aus einem Gewindestift, einer Gewindehülse mit Innen- und Außengewinde sowie einer Druckscheibe am Schraubenende. Dank der stufenlosen Schraubenausführung wird der Aufbau der Kontaktkraft durch keinerlei Stufen oder Kerben an der Schraube unterbrochen. Beim Eindrehen der SICON Schraube mit einem Standard-Sechskantschlüssel dreht sich der Gewindestift in der Gewindehülse, bis er den Boden der Hülse erreicht.

**2.** Ab jetzt dreht sich die Gewindehülse mit, bis die Druckplatte am Schraubenende auf den zu verbindenden Leiter trifft. Die Druckplatte löst sich vom Boden der Schraube, die Schraube dreht sich auf der Scheibe weiter. Dabei verharrt die Scheibe bewegungslos auf der Leiteroberfläche, da die Reibung zwischen Scheibe und Leiter deutlich höher ist als die Kopfreibung zwischen Scheibe und Schraube. Vorteil: Am Leiter selbst tritt keine Kopfreibung mehr auf, das Drehmoment der Schraube wird nahezu unabhängig vom Leiter in Kontaktkraft umgewandelt (Detail-Info 2). Diese presst den Leiter an die gegenüberliegende Wand des Verbinderkörpers, womit die Klemmverbindung hergestellt ist. Gleichzeitig schützt die Druckplatte den Leiter vor Beschädigungen durch das Kontaktieren.

**3.** Die SICON Schraube dreht sich bis zum Erreichen des Abreißmoments weiter. Dabei kommt das Wechselspiel von Zugspannung und Kontaktkraft zum Tragen. Beide entstehen durch das Eindrehen der Schraube als gleich große und einander gegenläufige Kräfte gemäß dem mechanischen Gesetz Kraft gleich Gegenkraft: Die Kontaktkraft wirkt auf den Leiter, die Zugspannung in entgegengesetzter Richtung auf die Gewindehülse der SICON Schraube. Sobald eine der optimalen Kontaktkraft zugeordnete Zugspannung aufgebaut ist, ist der Abreißmoment erreicht: die auf Zug beanspruchte Schraube wird in einem vordefinierten Bereich der Gewindehülse axial gedehnt, bis diese abreißt.

**4.** Der SICON Verbinder ist so konstruiert, dass sich der Punkt der höchsten Zugspannung immer dort befindet, wo die Gewindehülse aus dem Gewinde des Verbinderkörpers austritt. Somit bildet der von außen betrachtet erste freie Gewingegang zugleich die Abreißkante (Bild 7). Ergo: Die SICON Schraube reißt immer unterhalb der Oberfläche des Klemmkörpers und dies ohne scharfkantige Schraubenüberstände. Dadurch entfällt der bisher notwendige Arbeitsschritt des Feilens, die Gefahr eines Durchschlages infolge metallischer Späne ist gebannt. Im Vergleich zu herkömmlichen Abreißschrauben reißt die SICON Schraube zudem sehr sanft und nahezu ruckfrei.

# Wie lange hält der Kontakt?

Ist ein neuer Verbinder für den jahrzehntelangen Einsatz grundsätzlich geeignet? Wie lange währt die Restlebensdauer bereits eingesetzter Verbinders? Auf die erste Frage geben Typprüfungen eine Antwort, die zweite versuchen Vor-Ort-Prüfungen zu klären. Beide Vorgehensweisen beleuchtet der sechste Teil mit Fokus auf Alterungseffekte bei Kontakten.



**Bild 1:** Die Auswertung des Wärmebildes ergibt: die Schrauben sind die mit Abstand heißeste Stelle in der geprüften Klemmenanordnung. Das heißt: der Strom fließt über die Schrauben statt über die Kontaktstellen – ein Vorbote des Kontaktausfalls

Eine gängige Form der Vor-Ort-Prüfung von oberirdischen Verbindungen, genauer von deren Kontaktqualität, ist die Thermografie. Im bildgebenden Verfahren macht sie Infrarotstrahlungen sichtbar, die als Grundlage für die Interpretation von Temperaturverteilungen dienen. Wärmebildkameras sind heute technisch weit entwickelt und realisieren in der Regel sehr gute Auflösungen. Der Knackpunkt ist die fachgerechte Auswertung der Wärmebilder. Diese erfordert Basiswissen zur Kontakttechnik. Einer ihrer wichtigen Grundsätze für die Auswertung thermografischer Aufnahmen lautet: Je höher der Widerstand einer Verbindung ist, umso schlechter steht es um ihre Lebensdauer, da hohe Widerstände mit entsprechend höheren Temperaturen einhergehen, die wiederum die natürliche Kontaktalterung forcieren (Teil 3). Demnach können Bildbereiche, die für höhere Temperaturen stehen, ein Indiz sein für eine schlechte Kontaktqualität.

## Klares Wärmebild – komplexe Analyse

Die gemessene Temperatur ist jedoch immer in Relation zu setzen zu weiteren Einflussfaktoren: Fließt im Moment der Wärmebildaufnahme ein sehr hoher Strom durch die Verbindung, kann ihre erhöhte Temperatur durchaus angemessen sein, während sie bei einem niedrigen Strom bereits als kritisch einzustufen wäre. Auch die Umgebungstemperatur kann eine Beurteilung verschieben: Eine höhere Temperatur bei einem Verbinder, den pralles Sonnenlicht zusätzlich erhitzt, ist anders zu bewerten als die eines bei winterlicher Kälte geprüften Verbinders. Ebenfalls zu berücksichtigen ist der Emissionsfaktor, der je nach Oberflächenbeschaffenheit des Verbinders variiert: blankes Aluminium strahlt anders als verschmutztes oder oxidiertes.

Ein weiterer für die Auswertung gültiger kontakttechnischer Grundsatz, der sich auch in den Normanforderungen bei Typprüfungen nach IEC 61238-1 und IEC 61284 spiegelt: Der Verbinder darf nicht wärmer sein als der Leiter. Die Anwendung dieses Grundsatzes erfordert neben entsprechend umfassenden Bildausschnitten Wissen zum und Erfahrung mit dem System, in dem die untersuchte Verbindung eingesetzt wird, genauer mit der Anordnung des Verbinders in diesem System (Bild 1).

Setzt man diese und weitere notwendigen Kenntnisse bei der Interpretation als gegeben voraus, können Wärmebilder, die einmalig nach mehreren Jahren Betrieb aufgenommen werden, zumindest folgende Frage beantworten: Verhält sich der Verbinder unauffällig oder befindet er sich bereits in einem kritischen Zustand? Verbindliche Aussagen, die über diese Grobanalyse des Status Quo hinausgehen, lässt dieses Vorgehen jedoch nicht zu.



Aus einer einmaligen Momentaufnahme lassen sich weder vergangene Entwicklungen rekonstruieren noch zukünftige Zeitfenster ableiten. Nach wie viel Betriebsjahren sich die Kontaktqualität in welchem Umfang verschlechtert hat, bleibt ebenso im Dunklen wie die tatsächlich verbleibende Restlebensdauer einer Verbindung. Immerhin, wenn auch der negative Befund »fünf vor zwölf« zeitlich relativ ist, kann zumindest eines unternommen werden: Man tauscht die als eindeutig kritisch identifizierte Verbindung umgehend aus.

### Sparen mit System

Ein systematischer Einsatz der Thermografie an ausgesuchten neuralgischen Punkten kann nicht nur eine höhere Netz- und Versorgungssicherheit realisieren sondern auch Kostenvorteile. Voraussetzung hierfür neben der fachgerechten Interpretation: Man lässt bereits bei der Inbetriebnahme einer Verbindung Wärmebilder anfertigen und erfasst hierzu die wichtigsten Daten, so zumindest Strom und Umgebungstemperatur. Diesen Fingerprint zieht man als Vergleichsbasis heran für folgende Thermografien, die man wiederkehrend, beispielsweise alle fünf Jahre, aufnimmt – inklusive Datenerfassung und Dokumentation.

Bereits der Fingerprint allein kann wichtige Erkenntnisse liefern. Wurden beispielsweise bei der Erstmontage eines Schraubverbinders die Schrauben nicht ausreichend angezogen, wird dies sichtbar. Aus dem Vergleich von aktuellen mit älteren Wärmebildern (Bild 2) respektive Daten wiederum lassen sich Trends ableiten, die eine vorausschauende und damit kosteneffiziente Netzstandhaltung ermöglichen. Steht beispielsweise der Austausch eines Transformators oder von Isolatoren an, kann die hierfür erforderliche Ausschaltzeit optimal genutzt werden, indem eine ortsnahe Verbindung, die einen klaren Negativtrend aufweist, zeitgleich ersetzt wird.

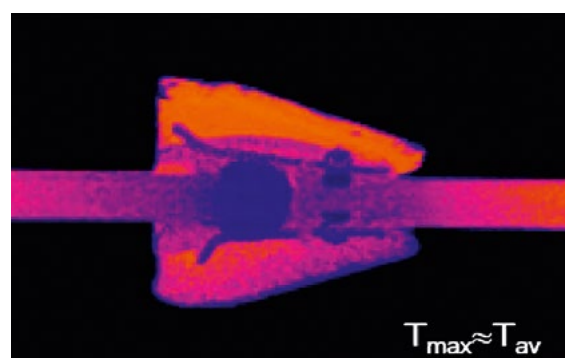
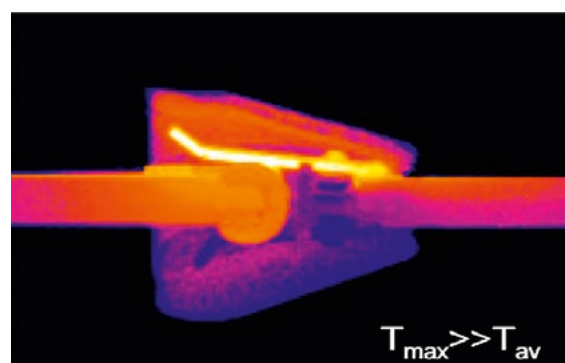
### Exakter Widerstand? Großer Aufwand!

Während sich die Thermografie über die Temperatur der für die Kontaktqualität zentralen physikalischen Größe Widerstand annähert, wird diese bei der ebenfalls verbreiteten Widerstandsmessung direkt über die Spannung und den Strom berechnet, so dass sie grundsätzlich als exakter gelten kann. Hierbei gibt es verschiedene Verfahren.

Die Widerstandsmessung unter Betriebsspannung wird nur an Freileitungen vorgenommen. Da die Vor-Ort-Messung des Betriebsstroms mit einem sehr großen Aufwand verbunden ist, wird der aktuelle Betriebsstrom meistens per Funk von der Netzwaite an das vor Ort prüfende Team übermittelt. Auch wenn die Wahrscheinlichkeit gering ist, birgt diese Konstellation das Risiko einer Ungenauigkeit: Zwar dauert die Messung nur circa zwanzig Sekunden, jedoch ist nicht auszuschließen, dass in diesem Zeitfenster die Netzauslastung schwankt und sich damit der Betriebsstromwert während der Messung ändert.

Die weitaus größere Herausforderung stellt mit Sicherheit die Anbringung des Messinstruments dar – ein stattlicher Apparat, der auf Rollen ferngesteuert über die Freileitung bis zur Verbindung fährt. Bis es soweit ist, können Tage verstreichen. Zunächst muss das Messgerät in die Höhe gehievt und dann mit meterlangen Isolierstangen auf der unter Betriebsspannung stehenden Freileitung positioniert werden.

Angesichts dieses Aufwandes erscheint der Einsatz dieses Verfahrens nur in vereinzelt Sonderfällen sinnvoll, zum Beispiel wenn eine vorangegangene thermografische Aufnahme an einem wichtigen Knotenpunkt mögliche Ausfallsymptome zeigt, jedoch nicht zweifelsfrei belegt. Eine Widerstandsmessung unter Betriebsspannung kann hier Klarheit bringen, bevor man sich für den weitaus kostenintensiveren Austausch entscheidet, für den die Freileitung abgeschaltet werden muss. Wie auch immer die Entscheidung in dieser Konstellation oder in anderen fällt, gilt bei dieser wie der folgenden Art der Widerstandsmessung: Ermittelt wird ein Momentanwert, der bei exakter Messung und richtiger Interpretation zwar die aktuelle Kontaktqualität beurteilen lässt, jedoch keine Aussagen zu deren früheren oder weiteren Entwicklung erlaubt.



**Bild 2:** Im Vergleich der beiden Infrarotaufnahmen wird der Unterschied zwischen einem kritischen Kontakt (oben) und einem neuen Kontakt (unten) deutlich sichtbar.

### Hoher Betriebsstrom – niedriger Mess-Strom

Die Widerstandsmessung ohne Betriebsspannung wird unter anderem dann eingesetzt, wenn es wiederkehrend zu Ausfällen kommt und infolgedessen die Sanierung eines größeren Netzabschnittes zur Debatte steht. Als Prüfling dient ein gebrauchter Verbinder, der aus dem Netz inklusive 2 bis 3 m Leiter an beiden Verbinder-Enden herausgeschnitten und häufiger im Labor, seltener vor Ort, unter Einsatz von Gleichstrom untersucht wird. Hierfür gibt es eine große Auswahl an Ohm-Metern auf dem Markt, die meistens mit Mess-Strömen von 5 bis 500 mA arbeiten.

Diese geringen Mess-Ströme sind jedoch erwiesenermaßen nicht geeignet für die Beurteilung eines Starkstromkontaktes, durch den zwischen 500 und 1.000 A fließen. Denn ein kleiner Strom findet zur Not seinen Weg auch ohne auffälligen Widerstand über nur wenige Kontaktstellen, während der Großteil des Kontaktes tatsächlich unbrauchbar ist. Daher muss der Mess-Gleichstrom mindestens 50 bis 100 A betragen, wobei dieser mit einem überschaubaren Aufwand realisierbar ist.

Und auch hier gilt: selbst die beste Messtechnik ist nutzlos ohne eine fachgerechte Analyse der Messwerte. Hierfür eignet sich der Vergleich des Verbinderwiderstands mit dem Widerstandsverhalten des ungeschnittenen Leiters. Dazu wird das Verhältnis von Verbinderwiderstand zum Widerstand eines Leiterstücks mit der Länge des Verbinders ermittelt. Nach IEC 61238-1 wird dieser Wert als Widerstandsfaktor bezeichnet. Je näher der Wert am Idealverhältnis 1 zu 1 liegt, umso besser die Kontaktqualität (vergleiche folgende Ausführungen zur Widerstandsbeurteilung bei der Typprüfung nach IEC 61238-1).

### Klick ohne Aussagekraft

Eine weitere verbreitete Form der Vor-Ort-Prüfung versucht, die Kontaktgüte von Schraubverbindern anhand der noch vorhandenen Kontaktkraft zu beurteilen. Auch wenn die Kontaktkraft nicht allein und alles entscheidet, ist sie ein zentraler Faktor für die Kontaktgüte, womit sie als Prüf-Indikator geeignet ist. Wir erinnern uns: Je niedriger die Kontaktkraft umso höher der Widerstand, der die natürliche Kontaktalterung beschleunigt (Teil 3).

Dabei erfasst dieses Verfahren nicht die verbliebene Kontaktkraft selbst, sondern versucht, diese indirekt über die Messung der Hilfsgröße Rest-Drehmoment festzustellen.

Die Beliebtheit dieses Verfahrens erklärt sich mit seiner Einfachheit: Als Messinstrument wird ein geeichter Drehmomentschlüssel eingesetzt, voreingestellt auf ein Soll-Drehmoment, das abgestimmt ist auf die im Verbinder eingesetzte Schraube, die die Kontaktkraft herstellt (Teil 4). Der Schlüssel wird an der Schraube angesetzt, man zieht und oft genug klickt der Schlüssel just bei Erreichen des Soll-Drehmoments. Daraus wird geschlossen: die ursprünglich eingeleitete Kontaktkraft ist noch vorhanden, der Kontakt in Ordnung. Meistens ist das leider ein Trugschluss.

Im Begriff »Drehmoment« klingt die Begründung bereits an: Der grundsätzlich gültige Zusammenhang zwischen Drehmoment und Kraft setzt eine Bewegung der Schraube voraus. Nach jahrelangem Einsatz jedoch erstarrt der Schraubenmechanismus infolge Verschmutzungen, mechanischen Beschädigungen oder Korrosion – ein völlig normaler Vorgang, der nicht zu verwechseln ist mit der davon unabhängigen dauerhaften Elastizität des Verbindersystems und in Einklang steht mit dem allgemeingültigen Anspruch an Verbinder, der lautet »anschießen, anschalten und vergessen.« Mit Blick auf die Schrauben heißt dies: ihre Bewegung wird über die Erstkontaktierung hinaus für die dauerhafte Kontaktgüte nicht benötigt. Mit Blick auf die Drehmomentmessung wird klar: Wo keine Bewegung stattfindet, ist der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Kraft ausgehebelt und das Klicken des Drehmomentschlüssels ohne Aussagekraft. Aus physikalischer Sicht ließe sich dieser Zusammenhang nur dadurch wieder herstellen, indem die bremsende Haftreibung überwunden wird. Dies ließe sich theoretisch über ein deutlich höheres Drehmoment erreichen. Doch wie soll dieses angesichts der von Schraube zu Schraube schwankenden Haftreibung abgestimmt werden?

Hinzukommt: Ist das Drehmoment zu hoch, kann die Schraube beschädigt werden. Und selbst wenn sich die Schraube bewegen ließe, sind weitere Faktoren, die das Verhältnis von Drehmoment und Kraft beeinflussen, wie beispielsweise die ursprüngliche Schraubenfettung, im Rahmen einer Vor-Ort-Prüfung weder reproduzierbar noch in der Form kalkulierbar, dass eine zuverlässiger Rückschluss vom Drehmoment auf die verbliebene Kontaktkraft möglich wäre. Egal, welche Variation im Vorgehen man durchspielt, stets kommt man zum gleichen Schluss: Die Drehmomentmessung eignet sich nicht für die Beurteilung der Kontaktgüte.

### Vor-Ort-Prüfung? Mit Vorbehalt.

Ergo: Abgesehen von der per se untauglichen Drehmoment-Messung haben die hier dargestellten Vor-Ort-Prüfungen sowohl Schwächen als auch Stärken. Sind diese bekannt, kann jeder Anwender deren Einsatz mit Blick auf Messmethodik, Interpretationsspielräume und Aufwand abwägen. Dabei ist immer zu bedenken: Keine kann die verbleibende Lebensdauer eines im Einsatz befindlichen Verbinders punktgenau bestimmen. Umso wichtiger ist es, nur solche Produkte einzusetzen, die ihre grundsätzliche Langzeittauglichkeit bewiesen haben. Dies mag in Europa Standard sein, weltweit betrachtet ist dies jedoch noch nicht selbstverständlich.

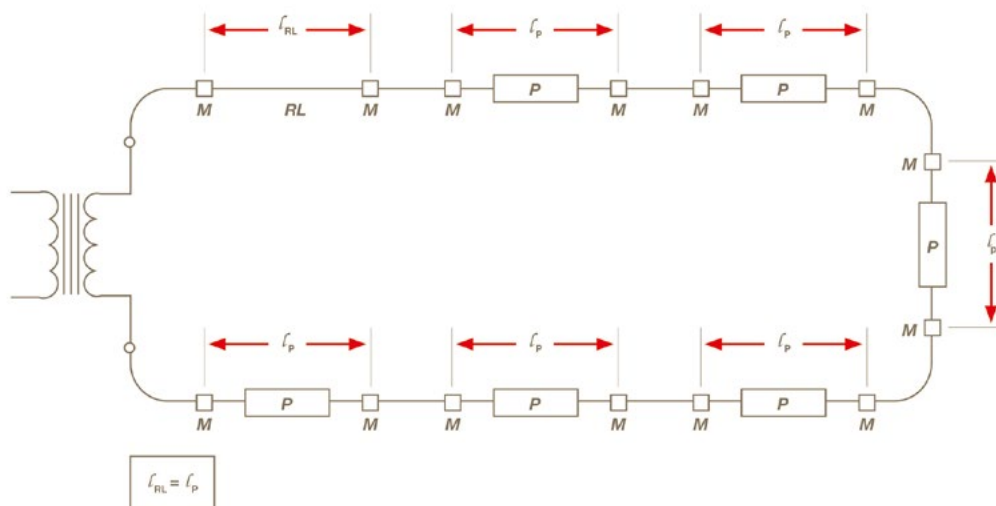
### Im Härtetest nach IEC 61238-1

Auch wenn eine geforderte Kontaktlebensdauer von mehreren Jahrzehnten Echtzeittests ausschließt, können Kabelverbinder diesen Beweis bereits vor ihrem Einsatz erbringen, indem sie eine Typprüfung nach IEC 61238-1

bestehen. Die Anwendung dieser Norm beschränkt sich aufgrund der Zuständigkeit der Normengremien auf die Nieder- und Mittelspannung, dennoch gibt es Anwender, die alle ihre Verbinder danach prüfen lassen. Zwar gibt es für HV-Verbinder gesonderte Prüfnormen, keine davon jedoch stellt so strenge Anforderungen an die Alterungsbeständigkeit von Kabelverbindern.

Bei der Prüfung nach IEC 61238-1 (Prüfaufbau im Bild 3) wird das Alterungsverhalten im Zeitrafferverfahren mittels 1.000 Heizzyklen respektive Lastzyklen simuliert. Die dabei aufgebrachte Belastung entspricht den üblichen Betriebslasten in 40 Jahren und länger.

Die Basis für dieses Vorgehen bildet das Arrhenius-Gesetz, wonach – verknüpft und vereinfacht – hohe Absoluttemperaturen die Kontakt-Lebensdauer verkürzen. Daneben beschleunigen Temperaturschwankungen infolge von Lastwechseln zusätzlich die Kontaktalterung, indem sie Setz- und Fließvorgänge auslösen (Teil 3).



**Bild 3:** Prüfkreisordnung bei Alterungsprüfung nach IEC 61238-1 mit sechs Prüflingen (P), Referenzleiter (RL) und Messpunkten (M).

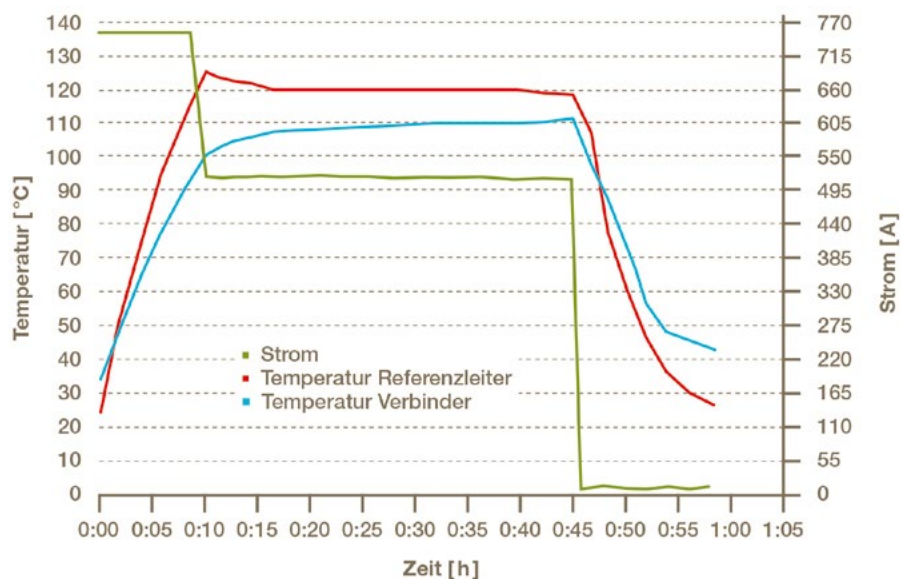
Beides – eine hohe Absoluttemperatur als auch Temperaturschwankungen – wird durch die Abfolge der Heizzyklen simuliert (Bild 4). Währenddessen werden die Temperaturen der sechs Prüflinge und die des Referenzleiters in regelmäßigen Abständen gemessen. Nach IEC 61238-1 dürfen unter Stromlast die Verbindertemperaturen die des Referenzleiters nicht überschreiten.

Parallel dazu werden die Verbinderwiderstände ermittelt. Bisher einzigartig bei der Prüfung nach IEC 61238-1 ist, dass hierbei die Querleitfähigkeit der verbundenen Leiter einfließt. Darin spiegelt sich die Eigenschaft des Verbinders, wie gut er die Einzeldrähte der Leiter in allen Leiterlagen kontaktieren und somit deren hohe Querleitfähigkeit sicherstellen kann. Entscheidender Richtwert für die Beurteilung der Verbinderwiderstände ist der Widerstandsfaktor  $k$ . Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis von Referenzleiter-Widerstand zu Kontakt-Widerstand. Nach Norm muss dieser bei allen Prüflingen unter anderem unter 2 und konstant bleiben (Bild 5).

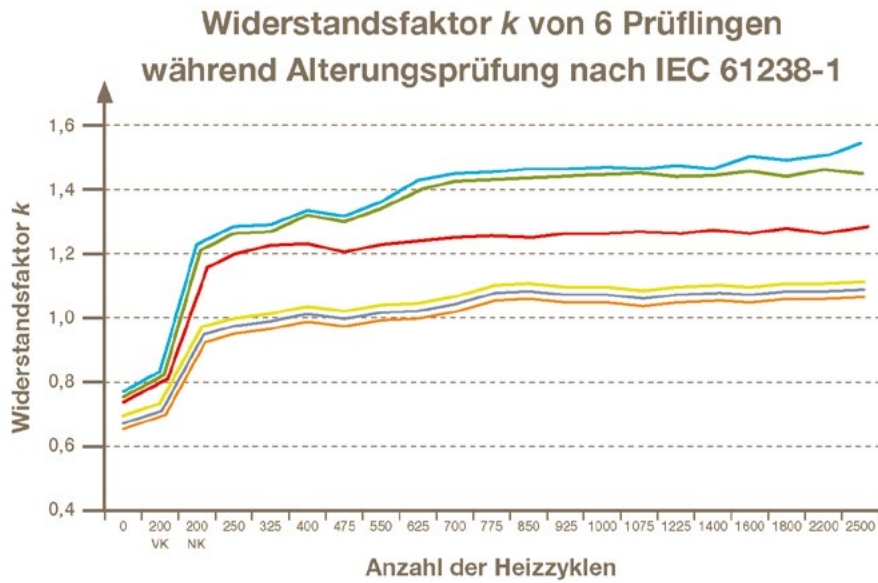
### Typprüfung je nach Klemme und Einsatz

Die temperaturwechselbasierte Alterungsprüfung von Freileitungs- und Schaltanlagenklemmen wird nach IEC 61284 durchgeführt. Da diese Klemmen aufgrund ihrer blanken Bauform und ihrer Einsatzorte geringeren thermischen Belastungen ausgesetzt sind (Teil 5), sind deren Prüfparameter entsprechend angepasst: Statt 1.000 Heizzyklen sind 500 durchzuführen, wobei die Temperatur des Referenzleiters 70 K über Umgebungstemperatur betragen muss. Im Grundsatz sind Prüfverfahren und Beurteilungsprinzipien der IEC 61284 jedoch identisch mit denen der IEC 61238-1, von der sie abgeleitet ist.

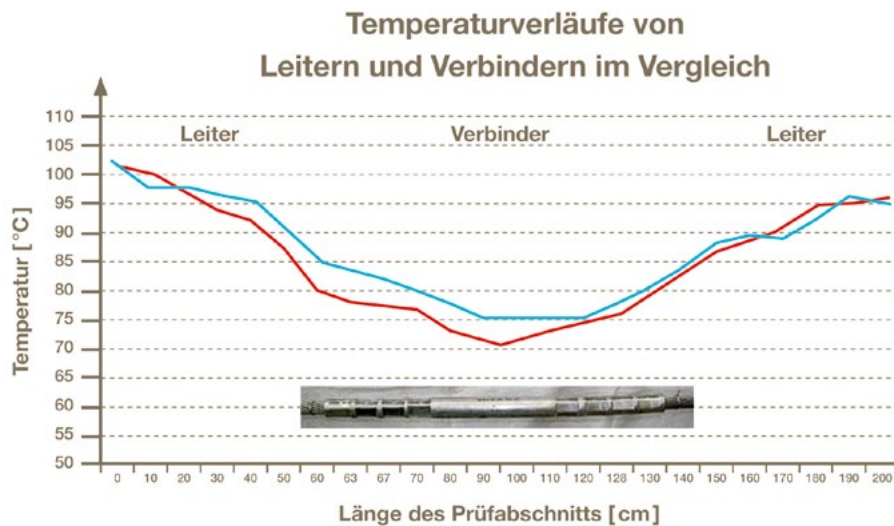
Die Ergebnisse von Prüfungen nach IEC 61284 bestätigen eine Reihe von Grundsätzen der Kontakttechnik, so auch diesen: Bei einem gleichmäßigen Stromfluss über einen Verbinder, der prinzipiengerecht konstruiert und korrekt installiert ist, liegt die Temperatur des Verbinders stets unter der des Referenzleiters. Damit ist das verbreitete Vorurteil, Verbinder seien grundsätzlich Heißpunkte im Netz, empirisch widerlegt (Bild 6).



**Bild 4:** Temperatur- und Strom-Verlauf während eines Heizzyklus bei einer Alterungsprüfung nach IEC 61238-1: Ein Heizzyklus besteht aus drei Phasen: In der ersten wird der Referenzleiter auf 120 °C aufgeheizt, dann wird die Temperatur über 30 Minuten konstant gehalten, zuletzt wird der Leiter wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Insgesamt sind 1.000 solcher Zyklen unmittelbar nacheinander durchzuführen. Im hier dargestellten Heizzyklus bildet sich ein normgemäßes Temperaturverhalten eines Verbinders ab: Unter Stromlast verbleibt seine Temperatur unter der des Referenzleiters.



**Bild 5:** Die Widerstandsverläufe der hier erfassten sechs Prüflinge zeigen: ihre Widerstandsfaktoren bleiben wie von IEC 61238-1 unter anderem gefordert konstant und kleiner 2 – und das weit über den 1000. Heizzyklus hinaus.



**Bild 6:** Die während einer Typprüfung nach IEC 61284 erfassten Temperaturverläufe von zwei Verbindern und deren Leitern zeigen: Ist der Verbinder prinzipiengerecht konstruiert und korrekt montiert, liegt bei gleichmäßigem Stromfluss die Verbindertemperatur unter der des Leiters. Grund: Durch die Parallelschaltung von Leiterseil und Verbinderhülse tragen im Bereich der Verbindung sowohl der Leiter als auch der Verbinder den Strom – damit steht dem Stromfluss der doppelte Querschnitt zur Verfügung, was einen geringeren Widerstand zur Folge hat. Außerdem kann über die insgesamt größere Oberfläche mehr Wärme abstrahlen.

Damit die Alterungsprüfungen gemäß beider Normen reproduzierbare Ergebnisse liefern können, müssen hierbei weitere alterungsforcierende Faktoren ausgeschlossen werden, die jedoch im Realeinsatz wirken. So beschleunigt das Eindringen von Sauerstoff, Feuchtigkeit und Salz in den Kontaktbereich die Alterung (Teile 3 und 4). Daher empfehlen sich je nach vorgesehenem Einsatz weitere Typprüfungen, beispielsweise die auf Salzbeständigkeit nach IEC 60068-2-52 (Bild 7 und 8) bei Verbindern für den Freiluft-Einsatz.

### Fazit: Sicherheit durch Spezifikation

Das höchstmögliche Maß an Sicherheit erreicht, wer seine Verbinder-Spezifikationen gemäß diesen Erfahrungswerten formuliert. So sollten Verbinder zumindest folgende drei wesentliche Designkriterien erfüllen: Definierte Kontaktstellen, ausreichend Elastizität und Einsatz von Kontaktschutzfetten (Teile 2 bis 4). Daneben sollten Verbinder die Typprüfungen nach den genannten Normen erfolgreich bestanden haben. Mit diesen Ansprüchen stehen Anwender glücklicherweise nicht allein. Eine Reihe von Herstellern entwickelt und produziert alle ihre Produkte mit Blick auf Norm und Stand der Technik, seien es große Komponenten für Hochspannungsanwendungen oder kleinere Klemmen für Mittel- und Niederspannungskontakte. Ein Einsatz, der sich rechnet. Die Gegenüberstellung von Investitionskosten und Gesamtkosten über die gesamte Lebensdauer belegt (Teil 1): Wer auf Qualität setzt, spart unterm Strich nicht nur Aufwand sondern auch bares Geld.



**Bild 8:** Leiter und Verbinder nach zehn Wochen Salzbeständigkeitsprüfung gemäß IEC 60068-2-52





**Bild 7:** Salzbeständigkeitsprüfung nach IEC 60068-2-52: Die Prüflinge (Zustand vor der zyklischen Salznebelbelastung) werden in einer Prüfkammer mit 3 m<sup>3</sup> Volumen angeordnet und darin mit einer Salzwasserlösung (5 % NaCl) besprüht. Ein Testzyklus dauert 24 Stunden (2 h Sprühen, 22 h Trocknen), währenddessen stehen die Prüflinge unter zyklischer Wechselstrombelastung ( $I_{on} = 220 \text{ A}$ /für 1 h,  $I_{off} = 0 \text{ A}$ /für 2 h).



# Verbindungen, die die Welt bewegen.

Die Welt der Elektrizitätsversorgung befindet sich im größten Wandel ihrer Geschichte. Experten von PFISTERER sind dabei:  
Mit unseren Komponenten und Systemen zur Verbindung von Energieleitungen werden die Energienetze der Zukunft geknüpft.