

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 106 (2015)

Heft: 8

Artikel: Langzeitausfälle bei Entstörkondensatoren

Autor: Jacob, Peter

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856696>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Langzeitausfälle bei Entstörkondensatoren

Entstehung und Folgen von Koronaentladungen

Mit der Verbreitung dezentraler, erneuerbarer Energiesysteme kommen immer mehr Stromumrichter ans Netz. Um den Eintrag von Störtransienten der Leistungselektronik in die Verteilernetze zu minimieren, sind Filtersysteme aus Folienkondensatoren und Induktivitäten im Einsatz. Obgleich solche Kondensatoren Selbstheilungseigenschaften und erhöhte Brandsicherheit aufweisen, kam es in letzter Zeit immer wieder zu Ausfällen mit teils erheblichen Folgeschäden, meist erst nach monate- oder jahrelangem problemlosem Betrieb. An der Empa wurden die Ursachen untersucht.

Phase und Nullleiter oder Masse handelte. Untersuchungen an derart zerstörten Bauteilen erlauben normalerweise kaum mehr sinnvolle Rückschlüsse auf die Ursache. Da es sich in den meisten Fällen jedoch um Dreiphasensysteme handelt, stehen oft noch unbeschädigte Nachbarkondensatoren identischer Bauart und mit identischer Betriebshistorie zur Verfügung. Auf diese «Nachbarn» und auf gleichartige Neubauteile als Vergleichsreferenz fokussierten sich die Untersuchungen.

Peter Jacob

Mit dem Einzug der IGBTs Mitte der 1990er-Jahre in die Stromumrichter von Trams, Trolleybussen und Lokomotiven konnte eine bisher nicht vorstellbare Kompaktheit der Umrichter bei zugleich sehr günstigen Preisen erreicht werden. Somit stand auch einer breiten Einführung kompakter Stromsteller mittlerer Leistungsklassen für die ab den Nuller-Jahren in grosser Zahl aufkommenden Solarstromanlagen und Windparks nichts mehr im Wege. Um Störeinträge ins Netz durch die bei elektronischen Stromstellern auftretenden Transienten zu verhindern, sind aufwendige Störfilter notwendig. In diesen sind pro Umrichter je nach Typ und Leistungsklasse um die 100 X- und Y-Folienkondensatoren verbaut. Diese besonders impulsfesten Kondensatoren sind im Dauerbetrieb zwischen zwei Phasen oder zwischen Phase und Nullleiter (X-Kondensatoren) oder zwischen Phase und Erdung (Y-Kondensatoren) geschaltet. Ihre Größenordnung bewegt sich zwischen 0,1 und einigen μF ; die Entstör-Kondensatoren sind über die gesamte Betriebsdauer hinweg Wechselspannungen von 400 V bei anwendungsspezifischen Frequenzen zwischen 15 und 400 Hz (in Europa meist 50 Hz und gelegentlich Bahnstrom 16,7 Hz) ausgesetzt. Meist werden dafür heute metallbeschichtete Folienkondensatoren auf Polypropylen-Basis verwendet; vor 1990 waren hauptsächlich Keramik-Kondensatoren oder Kondensatoren mit Papier-Dielektrikum in Gebrauch.

Schadensfälle

Aus Stromumrichter-Anwendungen diverser Hersteller wurden uns Schadensfälle vorgestellt, bei denen jeweils ein Kondensator aufgequollen oder verbrannt war. In einem Fall waren von der Umrichtereinheit nur noch Brandreste vorhanden, in zwei Fällen wurde gar von einem explosionsartigen Schadensbild gesprochen, wobei der Umrichter danach (mit «abgeschossenem», d.h. unterbrochenem, aber nicht kurzgeschlossenem Kondensator) weiter im Betrieb lief.

Allen Fällen war gemeinsam, dass der Schadensfall erst nach langer Betriebszeit – meist erst nach mehreren Jahren – aufgetreten ist und es sich ausnahmslos um Folienkondensatoren in direkter Verschaltung zwischen zwei Phasen oder

Formierung und Selbstheilung

PP-Folienkondensatoren werden aus Wickeln von Aluminium-beschichteter PP-Folie hergestellt. Nach dem engen, möglichst blasenfreien Wickeln und dem Aufpulvern der Anschlussmetallisierung/Anschlusspins (Schooper-Metallisierung) erfolgt nach einem Pressvorgang der Einbau und Verguss in ein Kunststoffgehäuse, worauf der elektrische Test, kombiniert mit einem Formierungsprozess, folgt. Da die PP-Folie – als Dielektrikum – stets einer gewissen Oberflächenrauigkeit mit Dünnstellen unterliegt, muss die Spannung am Kondensator allmählich erhöht werden. An den Dünnstellen der Folie kommt es dabei zu kontrollierten, strombegrenzten Durchschlägen, die dank der Kondensatoreigenschaften von selbst ausheilen, d.h. um den Durchschlagpunkt herum verdampft die Folienmetallisierung, sodass trotz erfolgter Folien durchschmelzung kein Kurzschluss

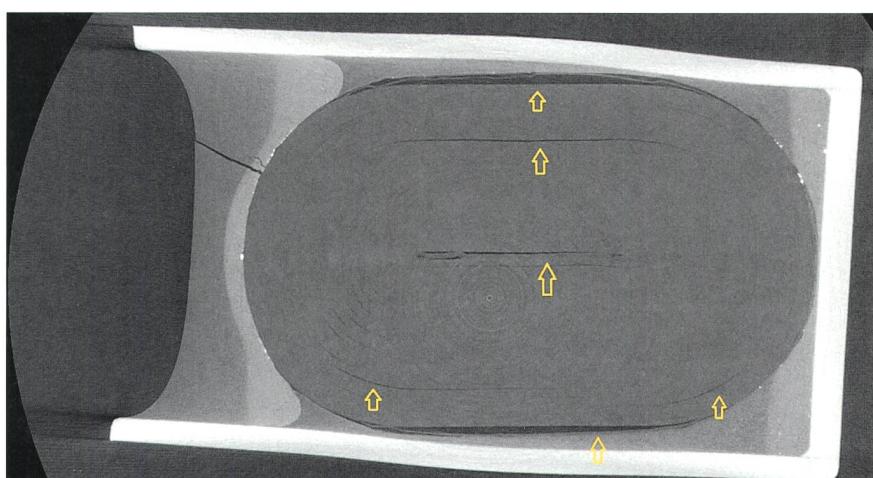
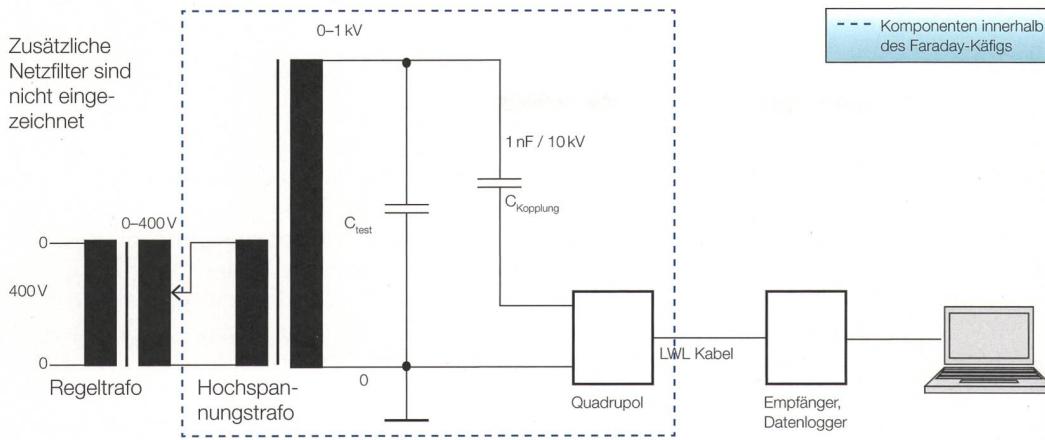


Bild 1 Virtueller Mikroschnitt mittels Röntgen-Tomografie durch einen Folienkondensator. Die gelben Pfeile zeigen Lufteinschlüsse; zusätzlich ist links ein Riss in der Gehäuse-Vergussmasse erkennbar.

Zusätzliche
Netzfilter sind
nicht einge-
zeichnet



- - - Komponenten innerhalb
des Faraday-Käfigs

Bild 2 Grundsätzlicher Messaufbau zur Korona-Entladungs-Messung in Folienkondensatoren.

bestehen bleibt. Dieser Prozess wird bis zum Erreichen der Testgrenze (meist etwas höher als die spezifizierte Wechselspannung) fortgesetzt und nennt sich Formierung. Die dabei eintretenden Kapazitätsverluste sind vernachlässigbar klein. Im Normalfall sind die Kondensatoren bei kurzen Spannungsimpulsen (Transienten) auch beim Betrieb im Durchschlagsfall kaum gefährdet, da auch dann noch die Selbstheilung funktioniert.

Vorcharakterisierung

Sowohl die «Nachbar»-Kondensatoren als auch Neubauteile zum Vergleich werden zunächst der klassischen Eingangsprüfung unterzogen: der Messung von Kapazität, Verlustfaktor und DC-Leckströmen. Zudem wird bei einzelnen Proben eine 3D-Röntgentomografie gemacht, die virtuelle Schnittdurchflüge in beliebiger Richtung ermöglicht und so Aufschluss über Lufteinschlüsse gibt (**Bild 1**). Die elektrischen Untersuchungen ergaben keine nennenswerten Abweichungen, aber die Röntgenuntersuchungen zeigten teils erhebliche Lufteinschlüsse und vereinzelt auch Rissbildungen im Verguss, jedoch gab es in der Regel auch hier keine ausfallsignifikanten Veränderungen bei den langjährig im Einsatz befindlichen Kondensatoren im Vergleich zu neuen Referenzbauelementen.

Koronaentladungen

Den Teilentladungstest kennt man aus der Hochspannungstechnik. In diesem normierten Test werden unter Hochspannung stehende Betriebskomponenten auf unbekannte Entladungspfade durch Wechselspannungsentladungen (z.B. bei zu knappen Abständen zu Erdschienen und Ähnliches) untersucht. Die oft im Ultraschallbereich detektierbaren Teil-

entladungen können mit Spezialmikrofonen geortet werden. Diesen Test setzen wir in einer abgewandelten Version an der Empa für die Messung innerer Koronaentladungen in Folienkondensatoren ein (**Bild 2**). Herzstück ist der für hohe Ströme ausgelegte 1 kV/10 A-Trenn- und Regeltrafo, der zur Vermeidung des Eintragens von Netztransienten mit mehreren zusätzlichen Netzfiltern ausgestattet ist. Der eigentliche Messaufbau mit einem lichtleitergekoppelten Quadrupol und dem Prüfling befindet sich in einem Faraday-Käfig, wie er für EMV-Untersuchungen verwendet wird – auch diese Massnahme gilt der absoluten Fernhaltung von Störsignalen von außen. Über einen 10-kV-Hochspannungskondensator erfolgt die Verbindung zwischen Quadrupol und Prüfling, wobei hierüber auch die Messsignal-Auskopplung erfolgt. Vor jeder Messung wird die Einrichtung bei angeschlossenem Prüfling mit einem Ka-

librationsgenerator auf den Schwellwert für den Korona-Einsetzpunkt von 10 pC kalibriert.

Überraschende Resultate

Man würde erwarten, dass eine messbare innere Koronaentladung erst deutlich oberhalb der spezifizierten AC-Nennspannung des Kondensators einsetzt und auch der tiefer liegende Korona-Aussetzpunkt noch oberhalb der AC-Nennspannung liegt. In vielen Fällen ergaben sich jedoch auch bei Neubauteilen Einsetz- und Aussetzspannungen, die z.T. deutlich unterhalb der spezifizierten AC-Spannungen lagen (**Bild 3**). Dabei gab es beträchtliche Unterschiede von Hersteller zu Hersteller, während die Unterschiede zwischen Neubauteilen und solchen mit bereits langer Einsatzdauer marginal waren. **Bild 4** zeigt eine typische Messserie mit Neubauteilen von verschiedenen Herstellern (A–E). Zum Vergleich wurden Mess-

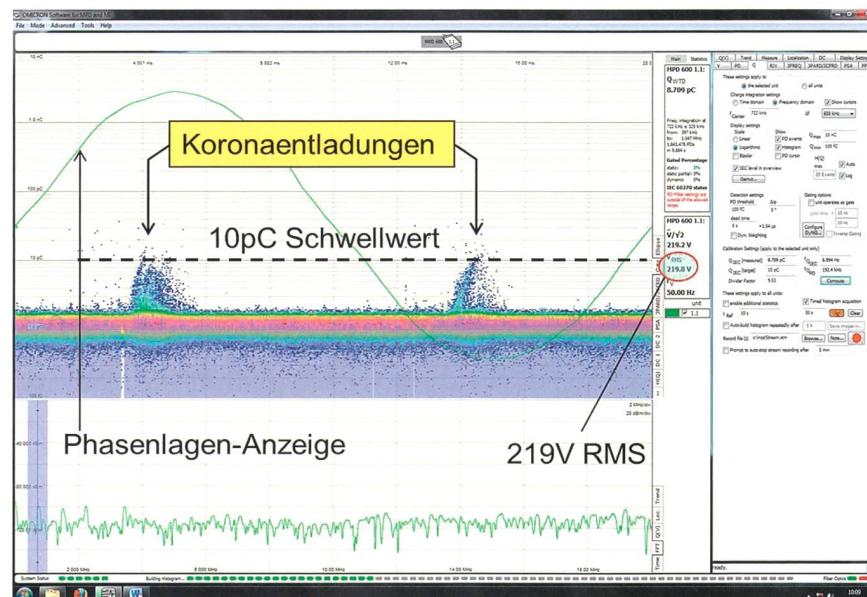


Bild 3 Beispiel einer Koronaentladungsmessung im Folienkondensator.

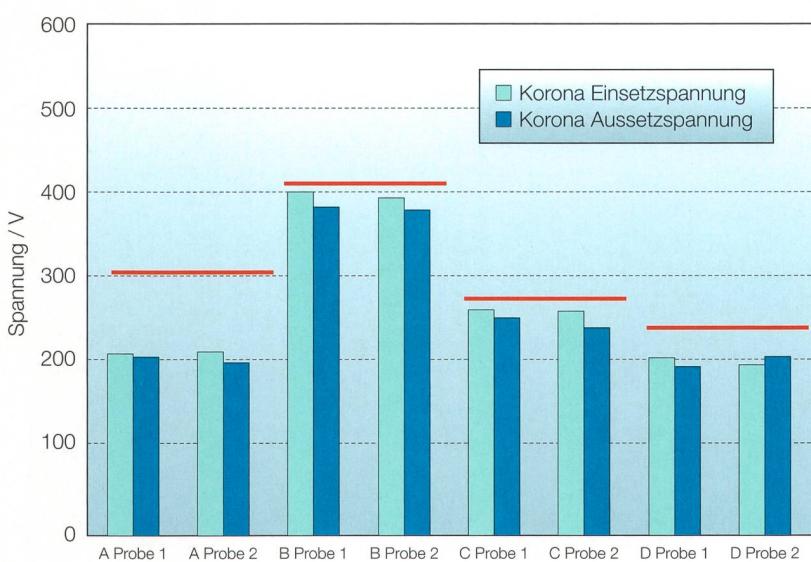


Bild 4 Koronaeinsetz- und Aussetschwellen verschiedener Kondensatorproben. Die rote Linie zeigt jeweils die vom Kondensatorhersteller angegebene AC-Nennspannung.

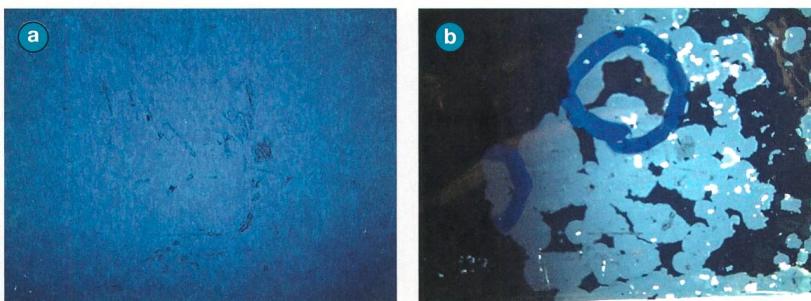


Bild 5 Betrachtung von abgewickelter Kondensatorfolie unter einem Mikroskop (Unterlicht). Links neuer Kondensator; rechts Kondensator nach Langzeiteinsatz, Zone mit Lufteinschluss; zahlreiche Delaminationen (dunkel: beide Seiten metallisiert, hellblau: eine Seite metallisiert, weiß: keine Metallisierung mehr vorhanden).

serien an ähnlichen Anlagen an zwei anderen Orten gemacht, die die Resultate bestätigten. Zusammenfassend konnte – abgesehen von den Bauteilen nur weniger Kondensatorhersteller – festgestellt werden, dass die Kondensatoren, wenn sie tatsächlich mit ihrer AC-Nennspannung belastet werden, innere Koronaentladungen deutlich über dem 10-pC-Schwellwert aufweisen.

Physikalische Effekte

Beim Abwickeln des Folienwickels von neuen und im Langzeiteinsatz befindlichen Kondensatoren zeigten sich signifikante Unterschiede (**Bild 5**). Während sich bei den Neubauteilen die Metallisierung als homogene Schicht zeigte, zeigte sich bei den im Einsatz befindlichen Kondensatoren eine löchrige und inhomogene Metallisierung, was auf zahlreiche Delaminationen und zur

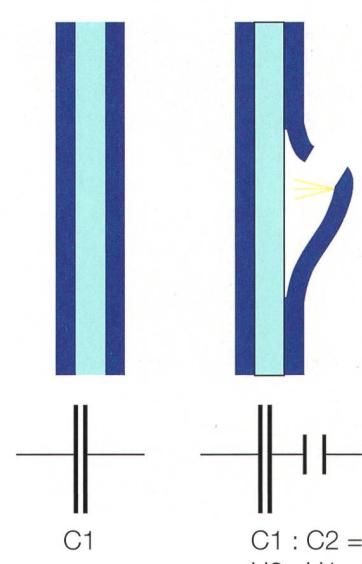
Nachbarfolie verlagerte Anhaftungen der Metallisierung hinwies. Durch die fortwährenden Kondensator-Umladungen und die damit verbundenen wechselnden Kraftwirkungen war es also in den Bereichen, in denen es Lufteinschlüsse gab, zu lokalen Delaminationen der Al-Metallisierung gekommen.

In solchen Bereichen liegt eine lokale Serienschaltung aus einem Kondensator mit PP-Dielektrikumszahl (hohe Kapazität) und einem solchen mit Luft-Dielektrikum (tiefe Kapazität) vor (**Bild 6**). Da sich in einer solchen Schaltung die Kapazitäten umgekehrt proportional zu den Spannungsabfällen verhalten, liegt im Delaminations-Luftspalt die grösste Spannung an – ausreichend, um dank der vorhandenen Luftmoleküle ein Plasma zu zünden, d.h. die Luftmoleküle werden ionisiert und damit zu elektrischen Ladungsträgern. Die im stetigen

Plasma bewegten Ionen «bombardieren» während der Umladevorgänge das PP-Dielektrikum, das dadurch über sehr lange Zeit hinweg eine lokale Dünning erfährt. Kommt es dann zum Durchschlag, so kann in vielen Fällen die Selbstheilung nicht mehr ansprechen, da keine isolierende Luft, sondern elektrisch leitfähiges Plasma im Defektbereich «nachrückt» und somit einen Lichtbogen zündet. Spätestens dann greift der Schaden in benachbarte «Schadnester» über und das Polypropylen wird zersetzt, wobei unter anderem Azetylen entsteht. In Verbindung mit der Funkenbildung oder, sofern bereits ein explosionsfähiges Gasgemisch vorliegt, auch durch Zündung infolge z.B. Relais-Schaltfunken oder Ähnlichem kann es im schlimmsten Fall sogar zu Explosionen kommen.

Fazit

Die Untersuchungen machen den Fehlermechanismus plausibel, jedoch überraschen die tiefen Einsetzpunkte der jeweiligen Koronaentladungen. Nur wenige Hersteller von AC-spezifizierten X- und Y-Folienkondensatoren haben sich mit der Problematik der inneren Teilentladungen befasst, vielen ist auch das Messverfahren an sich bisher weitgehend unbekannt. Aus langjährigen eigenen Erfahrungen und auch aus anderen Quellen ist bekannt, dass für AC-Anwendungen auch bei gegebener AC-Spezifikation der Kondensatoren ein Derating von etwa 30% der AC-Nennspannung empfohlen wird. Der Wettbewerbsdruck sowohl bei den Kondensatorherstellern als auch bei den



Lokale Al-Beschichtungs-Delamination.

Anwenden lässt jedoch solche Empfehlungen (auch angesichts der grossen Stückzahlen) ins Leere laufen: Während der Kondensator häufig sehr «sportlich» spezifiziert wird, verhallen die Forderungen von Schaltungsentwicklern nach einem angemessenen Derating spätestens beim Bauteile-Einkauf meist ungehört. Dieser «unheiligen Allianz» der Kostenminimierung auf beiden Seiten sind letztlich die hier aufgezeigten Probleme zuzuordnen. Bleibt die Hoffnung, dass sich der Koronatest zumindest für X/Y-Kondensatoren auf breiter Front durchsetzt und er als Kriterium bei der Zuordnung der AC-Nennspannungs-Belastbarkeit eines nicht zu fernen Tages Eingang in die Normengebung finden wird.

Autor

Prof. Dipl.-Ing. **Peter Jacob** arbeitet an der Empa an Ausfallanalysen von der Bauteile- bis zur Systemebene. 2010 erhielt er den International Dresden Barkhausen Award für Arbeiten auf dem Gebiet ESD-Schutz in robotischen Prozessanlagen.

Empa, 8600 Dübendorf, peter.jacob@empa.ch

Résumé

Les pannes à long terme des condensateurs d'antiparasitage

Naissance et conséquences des décharges corona

La propagation des systèmes exploitant les énergies renouvelables entraîne le raccordement de plus en plus de convertisseurs au réseau. Des systèmes de filtrage composés de condensateurs à films et d'inductances sont utilisés afin de minimiser l'introduction des transitoires parasites de l'électronique de puissance dans les réseaux de distribution. Bien que de tels condensateurs présentent des propriétés autorégénératrices et une sécurité incendie accrue, le nombre de pannes dont les dommages consécutifs sont parfois considérables n'a cessé d'augmenter ces derniers temps, et ce, en majorité après des mois, voire des années d'exploitation sans faille. Dans tous les cas, il s'agissait de condensateurs à films directement raccordés entre deux phases ou entre une phase et le conducteur neutre ou la masse. Afin de découvrir les causes de tels dysfonctionnements, l'Empa a étudié les décharges corona internes au moyen de mesures de décharges partielles. Des condensateurs provenant de divers fabricants ont présenté des décharges corona nettement supérieures à la valeur seuil de 10 pC, et ce, déjà lorsqu'ils étaient soumis à leur tension nominale AC. Les inversions de charge des condensateurs pendant leur exploitation et le changement associé des actions des forces entraînent des délaminations locales de la métallisation dans les zones présentant des poches d'air. L'interstice généré présente une chute de tension supérieure à celle des endroits non altérés qui suffit à engendrer un plasma. Après un fonctionnement sans faille parfois de plusieurs années, un claquage irréversible du diélectrique peut se produire. Dû à l'amincissement avancé et à l'environnement plasma, il a alors pour conséquence la destruction rapide du condensateur suite à l'amorçage d'arcs électriques. C'est la raison pour laquelle des mesures de décharges partielles sont recommandées pour de tels condensateurs.

No

Anzeige

100 YEARS
GROWING WITH
THE CHALLENGE



100 JAHRE, DIE VERBINDELN

Unser Know-how für Ihre Verkabelung

Besuchen Sie uns:

ineltec. 8. - 11. September 2015, Halle 1.1, Stand A102



Datennetzwerke



Sicherheitskabelanlagen



Datacenter-Lösungen



FTTx-Lösungen

Dätwyler Cabling Solutions AG

Gotthardstrasse 31, 6460 Altdorf, T 041 875-1268, F 041 875-1986
info.cabling.ch@datwyler.com, www.cabling.datwyler.com

 **DATWYLER**