

# Lebensdauer erhöhen - TE-beständige Klebebänder

Teilentladungen (PD) im Isolationsaufbau – Entstehung und Umgang damit  
Einsatz in der Qualitätssicherung

Gerald Friederici  
Anwendungsberater  
bei der CMC Klebtechnik GmbH



**Elektrische Geräte und Komponenten wie z.B. Transformatoren, Generatoren oder Elektromotoren enthalten aus Funktionsgründen und zur Sicherheit der Gerätenutzer eine Vielzahl von elektrischen Isolationen. Je nach Größe des Gerätes kann der Isolationsaufbau recht kompliziert sein und viele verschiedene Isolationsmaterialien enthalten. Zum Zwecke der Produktionsüberwachung sollte eine Prüfung dieser Isolationsanordnung dabei zerstörungsfrei sein und dennoch z.B. Fehlmontagen oder Materialverletzungen ohne Demontage erkennen können.**

Seit 2006 beschreibt eine revidierte Version der IEC 60270 ein zerstörungsfreies Verfahren zur Beurteilung der Güte des Isoliersystems mittels Teilentladungsmessung (TE-) Messung (IEC 60885 für Stromkabel; IEEE 436; ANSI 436:1991 Richtlinie für die Durchführung von Teilentladungsmessungen an elektronischen Transformatoren, VDE 0434). Auch zur Überwachung älterer Wicklungsaufbauten oder zur Beurteilung der Eignung von Isoliermaterialien für eine PWM-Ansteuerung mit kurzen Schaltzeiten wird die TE-Messung eingesetzt.

### 1.) Teilentladungen, was ist das?

Teilentladungen sind lokale elektrische Entladungen, die an Inhomogenitäten (Feldlinienkonzentration, Sprünge in der Dielektrizitätszahl), Verschmutzungen und Fehlstellen in der Isolation entstehen. Eine Teilentladung entsteht bereits ab ca. 400 V. Dabei werden durch die entstehende Feldstärke freie Elektronen soweit beschleunigt, dass sie weitere Ladungsträger aus ihrer stabilen Position schleudern. Es entwickelt sich eine Ladungsträgerlawine, die dann in eine Ionisierung der Luft (Corona- bzw. Gleitentladung) mündet.

Da die elektrische Entladung nicht die komplette Isolationsstrecke durchschlägt, redet man von einer Teilentladung.



Permanent entstehende Teilentladungen führen je nach örtlicher Gegebenheit innerhalb eines absehba-

ren Zeitraums zur Zerstörung der allermeisten polymeren Isoliermaterialien. Dabei wird das Isolationsmaterial durch die eingebrachte Energie (UV, Ionisation, Um-polarisierungsverluste, O<sub>3</sub>) zunehmend abgebaut. Es bildet sich - insbesondere bei Anwesenheit von Feuchtigkeit und Verschmutzung - ein leitfähiger Pfad aus. Zuletzt erfolgt ein voller Durchschlag durch die geschwächte Isolation hindurch, was üblicherweise zum Totalausfall führt.

Mit beachten muß man auch, daß bei höheren Wechselspannungsfrequenzen die Spannungsfestigkeit von polymeren Isolationswerkstoffen merklich sinkt (z.B. PET-Folie von 6 kV (50 Hz) auf nur noch etwa 3 kV (1 kHz). Ein Maß dafür ist der  $\tan \delta$ , DIN EN 60664-4) des Isolierstoffs. Daher darf z.B. in Switchpower-Supplies nicht mit den 50 Hz-Werten gerechnet werden.

Dagegen beschreibt die TE- oder Teilentladungsfestigkeit also prinzipiell die Beständigkeit des Isolationsstoffes gegenüber der Dauerstressbelastung durch hohe (Wechsel-) Spannungen.

### 2.) Äußere und Innere Teilentladung

Bekanntestes Beispiel für die „Äußere Teilentladung“ ist das Knistern und ggf. die bläuliche Coronaentladung an Hochspannungsleitungen. Sie entsteht auch in Hochspannungsschaltanlagen oder in Form von Gleitentladungen auf Hochspannungsgarnituren. Insbesondere scharfe Kanten oder Spitzen führen zu einer drastischen Erhöhung der Feldstärke (inhomogenes Feld) und damit zur Überlastung der Isolation. Feldsteuernde Maßnahmen wie abgerundete Leitungsführung, feldsteuernde Ringe oder hochohmige Feldsteuerlacke und -bänder können zur Homogenisierung des elektrischen Feldes eingesetzt werden.

Besonders Gleitentladungen auf Isolationsoberflächen längs des elektrischen Feldes führen zur Kriechweg-Entstehungen mit anschließendem Volldurchschlag.

### 3.) Innere Teilentladung

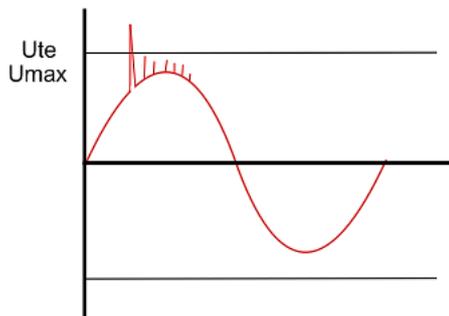
„Innere Teilentladungen“ entstehen in Flüssigkeiten (Trafoöl), Festkörpern oder in Gasen meist an Übergängen von Isolierstoffen unterschiedlicher Dielektrizitätszahl auf. Dies können z.B. in Trafoöl eingelagerte Wasser- oder Gaströpfchen sein, die eine deutlich geringere Spannungsfestigkeit haben. Eine sorgsame Vermeidung (Trocknung von Trafoöl, Gasabscheidung, Verguß unter Vakuum) von solchen Dielektrikum-

Sprünge erhöht die Bauteil-Lebensdauer erheblich. Hinweis: Auch in gas- oder ölisolierten Systemen wird durch Teilentladungen das Isoliermittel langfristig abgebaut. Diese Abbauprodukte reduzieren die TE-Beständigkeit. Die TE-Messung ist daher in solchen Systemen eine gute Möglichkeit der Zustandsüberwachung des Isolationsmittels.

Anders wie in Gasen und Isolierflüssigkeiten haben Feststoffisolationen nicht die Möglichkeit der Selbstheilung. Das heißt, die Schädigung durch die Coronaentladungen schreitet immer weiter voran.

In Gerätestromkreisen moderner Geräte (kleiner, schneller, leistungsfähiger) wie Netzgeräten, Filterkomponenten und Powermodul-Antrieben kommt es vermehrt zu sich wiederholenden, energiereichen Impulsen (Schaltimpulse). Sie haben kurze Anstiegszeiten und Scheitelspannungen deutlich über dem Nennwert der Versorgungsspannung.

Selbst wenn die Nennspannung unterhalb der TE-Einsatzspannung liegt, können solche überlagerten Impulse Teilentladungen zünden. Dabei beeinflussen die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Impulsform, -polarität und -wiederholungsrate wesentlich die Degradationsgeschwindigkeit der Werkstoffe.



Getriggelter TE-Einsatz durch Überspannungsimpuls auch unter TE-Einsatzspg.

(Quelle: CMC)

#### 4.) Mögliche Maßnahmen gegen Schäden durch TE

Die simpelste Methode Teilentladungen zu vermeiden, ist ein ausreichender Abstand, also dicke Isolationsmaterialien und große Luftstrecken. Das widerspricht jedoch dem Wunsch nach einer guten magnetischen Kopplung und geringen Parasitärkapazitäten. Denn nur der „Eisen-“ und Kupferanteil tragen zur eigentlichen Funktion bei.

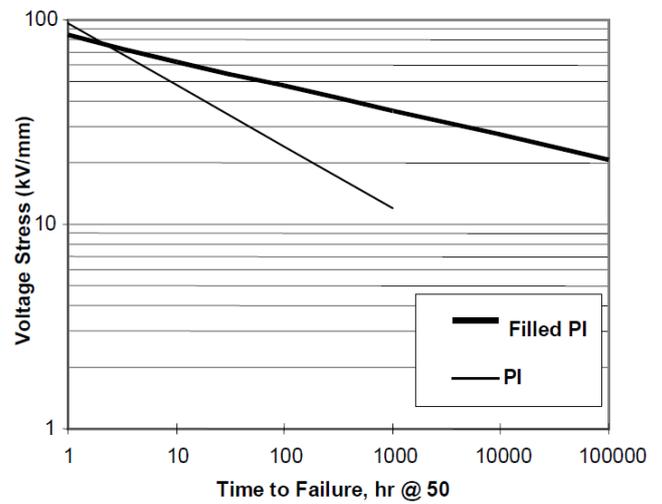
Kann man die Gefahr von Teilentladungen nicht ausschließen, verwendet man Materialien, die besonders

TE-beständig sind. Dazu gehören alle anorganischen Isolationsstoffe wie Glas, Keramik oder der Naturstoff Glimmer (Mica). Sie werden von Corona Entladungen nicht geschädigt. Eine erhöhte Corona Beständigkeit bei Flächenisolerstoffen, wie z.B. NOMEX-Aramidpapier T 418, wird durch die Einbringung von Feinglimmerplättchen erreicht. Dadurch wird die Corona-Beständigkeit von Hochspannungsmaschinen (Generatoren, Motoren) merklich verbessert werden. Dies gilt natürlich auch für den Isolationsaufbau von Motoren, die an Frequenzumrichtern (Invertern) betrieben werden.

In großen Anlagen (Motoren, Generatoren, Verteiltransformatoren) kann man halbleitende Materialien (z.B. halbleitendes Kreppklebeband CMC 15631) einsetzen, um diese Gleit- und Glimmentladung so weit wie möglich zu vermeiden. Auf diese Weise wird das elektrische Feld in einer Weise geformt, dass keine Feldlinienkonzentrationen entstehen können.

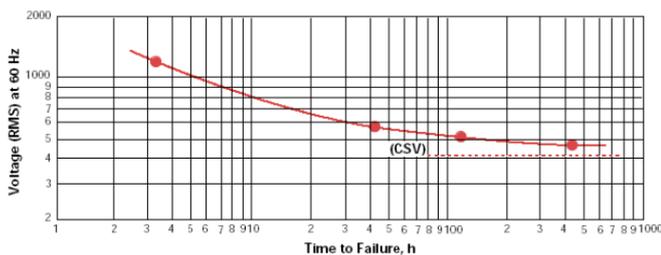
Diese Konzentration von Feldlinien an Kanten und Spitzen belastet deutlich stärker Isolationsmaterialien wie ein homogenes, flächiges E-Feld (z.B. die Kanten isolierter Kupferbänder der Reihe CMC 38xxx).

Bei kleineren Baugrößen und dort, wo man TE-Entladungen nicht ganz vermeiden kann, empfiehlt sich der Einsatz von Kapton® CR (CMC 70300) oder Fluorpolymere wie z.B. FEP (CMC 72730). Bei Kapton® CR wird die TE-Beständigkeit durch die Zugabe von anorganischen Werkstoffen in die Polymermasse drastisch erhöht. Fluorpolymere (z.B. CMC 77700) bestehen durch ihre geringe Reaktivität und niedriges  $\epsilon_r$ , haben jedoch andere Nachteile (Dehnbarkeit, Kaltfluß).



Lebensdauer-Unterschied zwischen Kapton HN und Kapton CR bei Belastung durch Teilentladungen (Quelle: DuPont)

Vergussmassen sind ein gängiges Mittel, um Oberflächenentladungen (Corona) zu vermeiden. Durch die allseitige Umhüllung mit z.B. Polyurethan-, Silikon- oder Epoxidharz vermindert man  $\epsilon$ -Sprünge und verhindert Entladungen durch die Luft. Von Haus aus bringen solche Vergussmassen keine besondere Teilentladungsfestigkeit mit, erlauben jedoch einen beliebig hohen Schichtaufbau, um einen hohen nominellen Durchschlagsfestigkeit zu erzielen. Entscheidend beim Einsatz von Vergussmassen in Hochspannungsanwendungen ist allerdings die Blasen- und Lunkerfreiheit (Vergussverfahren).



Corona Starting Voltage (CSV) = 425 V

Dauer, bis Kapton unter Spannungsstress die TE-Einsatzspannung erreicht (Quelle: DuPont)

### Zusammenfassung: Welche Folgen hat TE für Isolationen

- Teilentladungen zerstören die Isolation durch aggressive Abbauprodukte, UV-Strahlung und Ozon
- Ausbildung von Leitpfaden auf der Oberfläche der Isolation
- Elektromechanische Ermüdung auf Grund der Stromimpulse
- Dielektrische Erwärmung wegen der hochfrequenten Anteile der Spannungsimpulse

### 5.) Qualitätssicherung mittels TE-Messung

Ganz allgemein kann man sagen, dass die Anzahl an messbaren Entladungsvorgängen Auskunft über die Güte der Isolationsanordnung gibt. Mit der entsprechenden Erfahrung kann zudem abgeschätzt werden, wann ein Bauteil (durch zu starke Teilentladungen) ausfallen wird. Viele auf dem Markt erhältliche Messsysteme helfen bei der Interpretation der Messergebnisse durch entsprechende Filterung und Aufbereitung des Signals.

Es gibt mehrere Messmethoden zur Erfassung einer Teilentladungserscheinung.

a.) Häufig eingesetzt wird ein Messkreis, der aus einem Hochspannungstransformator, dem dazu parallel geschalteten Prüfling (Kapazität) und einer Stützkapazität besteht sowie dem Messgerät, das den Spannungsabfall misst.

Im Fall einer Teilentladung wird die Prüfkapazität (Prüfling) durch die Stützkapazität nachgeladen. Der dabei fließende Strom wird als Spannungsabfall gemessen. Die Maßeinheit für die Teilentladung ist Coloumb (C) und wird auch in As angegeben. Eine Faustregel besagt, dass Teilentladungen unter 10 pC keine schädlichen Auswirkungen auf das Isolationsystem haben.

Anhand der Form, der Phasenlage und der Höhe bei der positiven oder negativen Halbwelle können Art der Teilentladung und z.B. bei Kabeln die Lage der Störung (Wanderwellen) festgestellt werden.

b.) Bei größeren Geräten und Komponenten misst man mit einem Weitbereichsempfänger (VHF, UHF) die durch die Teilentladung ausgesandte elektromagnetische Störstrahlung. Diese Messmethode eignet sich vor allem für den mobilen Einsatz. Allerdings hat man mit wechselnden Rahmenbedingungen wie z.B. Rundfunksender oder industriellen Funkquellen zu tun, so dass die Interpretation der Messergebnisse sehr sorgfältig durchgeführt werden muß.

Alternativ ist auch eine akustische (Knistern) oder optische (UV-Strahlung) Detektion stellenweise möglich.

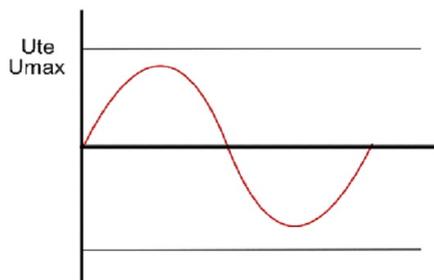
c.) Zuletzt sei noch die „Baker“ Impuls-Methode erwähnt. Dabei wird in das zu prüfende Gerät ein energiereicher aber sehr kurzer Impuls eingespeist. Die Sprungantwort auf diesen Impuls gibt einem ebenfalls sehr viele Informationen über den Zustand des Isoliersystems innerhalb des Gerätes oder der Spule.

Allgemein muss man anmerken, dass TE-Messungen in komplexeren Systemen meist eine Aufsummierung mehrerer paralleler Teilentladungsphänomene ist. In manchen Aufbauten (Statorwicklung großer Hochspannungsmotoren) ist eine geringe Menge Teilentladung auch kaum zu vermeiden.

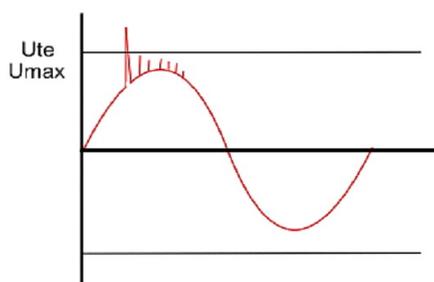
Zudem werden Messungen durch die Rahmenbedingungen bei der Messung stark beeinflusst. So kann z.B. eine hohe Luftfeuchtigkeit bei der Messung von nicht getränkten Spulen zur scheinbaren Verschlechterung der Isolationsgüte führen.

## Einsetz- und Aussetzspannung

Die Zündung der TE erfolgt beim Spannungsanstieg und führt zum kurzfristigen Spannungseinbruch bei Zündung. Dieser Punkt wird als TE-Einsatzspannung bezeichnet.



TE-Einsatzspannung über maximaler Betriebsspannung



Getriggerteter TE-Einsatz durch Überspannungsimpuls auch unter TE-Einsatzspg.

Sinkt die Spannung in Richtung Nulldurchgang, setzt irgendwann die Teilentladung durch Spannungsunterschreitung wieder aus. Diese als TE-Aussetzspannung bezeichnete Spannung muß immer über der maximalen Arbeitsspannung des Gerätes bzw. der Komponente liegen. Dadurch stellt man sicher, dass Teilentladungen, die durch eine vorübergehende Überspannung gezündet wurden, bei Betriebsspannung wieder sicher verlöschen.

## 6.) Zuverlässigkeit durch zuverlässige Isolationsmaterialien von CMC

Aus Erfahrungen bei Kunden und Messreihen haben sich Fluor-Polymerfolien als besonders geeignet herausgestellt. Sie haben eine nur geringe Abhängigkeit des  $\epsilon_r$  von der Temperatur und eine sehr hohe chemische und elektrische Beständigkeit gegenüber Coronaentladungen. Auch haben sie ein gutes Verlustfaktorverhalten bei hohen Frequenzen, wie sie in Schaltnetzteilen und Invertern vorkommen können.

Daneben gibt es im Lieferprogramm von CMC eine Variante der gut bekannten Kapton® HN Folie, die sich durch eine besonders gute Coronabeständigkeit (Glimmentladung, Teilentladung) auszeichnet: Kapton® CR. Wie bereits beschrieben nutzt man den Umstand aus, dass anorganische Substanzen bei weitem nicht so anfällig auf Coronaentladungen reagieren.

Der Polyimid-Matrix des Kapton® CR ist daher ein anorganischer Füllstoff beigemischt. Das Kaptonmaterial behält dabei weitgehend seine hervorragenden physikalischen und chemischen Werte. Zusätzlich ist die Coronabeständigkeit drastisch verbessert.



Für Anwendungen, bei denen es auf eine besonders hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer ankommt (zum Beispiel Frequenzrichter in Windkraft- und Solaranlagen), kann es also sein, dass günstige Isolierstoffe wie Polyester oder PEN nicht ausreichend sind. Insbesondere bei der Anwesenheit von Feuchtigkeit und Wärme (z.B. in einem Schaltschrank/-kasten im Außenbereich) kann es zu zusätzlichen Abbauprozessen im Isolationsstoff kommen (Hydrolyse). Schmutz, Betauung und aus fehlerhafter Montage stammende Verschmutzungen auf der Isolatoroberfläche verkürzen die Isolationsstrecke. Teilentladungen können so leichter entstehen und schneller zur Zerstörung des Isolators beitragen (Verkohlung, erhöhte Schmutzanfälligkeit durch raue Oberfläche).

Insgesamt erreichen Kleband-Produkte wie **CMC 75730** (FEP-Folie), **CMC 75738** (PTFE-Folie) oder **CMC 77700** (ETFE-Folie) hervorragende Lebensdauerbewertungen, da diese Art der Polymere von sich aus eine sehr große Alterungsbeständigkeit besitzen sowie eine gute TE-Leistung (hohe TE-Aussetzspannung bzw. geringe Empfindlichkeit gegenüber Kriechwegbildung)

mitbringen. Alle Varianten sind leicht dehnfähig, so dass sie bei sorgfältiger Auslegung der Wicklungen und des Spulenkerns eine sichere Trennung von Primär- zu Sekundärwicklung ermöglichen (alternativ zum Fiedern von z.B. Polyesterfolie).

Die Kapton® CR Folie von CMC wird seit langem im Hochspannungsmotoren- oder -generatorenbau eingesetzt. Ausgedehnte Versuche bei ABB und Siemens haben nachgewiesen, dass die Glimmentladungsbeständigkeit gegenüber „normalem“ Kapton® HN oder Polyimid-Folie anderer Hersteller deutlich höher ist.

Kapton® Folie hat anders wie die Fluorpolymerfolie nicht die Neigung, unter Druck nachzugeben. Dafür ist die Folie aber auch steifer, was in den Randbereichen „Wicklung zu Spulenträger“ zu Problemen führen kann (Umschlagen).

### 7. Zusammenfassung:

Heutige Geräte werden unter der Maxime „kleiner, schneller, leistungsfähiger“ konstruiert. Entwickler versuchen durch möglichst kleine Isolationsabstände (bei erschwerter Entwärmung) und durch deutlich höhere Frequenzen diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Wenn mehrere Belastungsarten zusammen kommen - hohe Spannung und Umwelteinflüsse - sowie eine große Lebensdauer gefordert wird, kann der Einsatz auch relativ teurer Isolierfolien Sinn machen. Insbesondere, wenn man bedenkt, dass die meisten Isolationsmaterialien bei steigender Taktfrequenz deutlich an Spannungsfestigkeit verlieren.

Bei anderen, günstigeren Isolationsmaterialien, die bereits seit vielen Jahren mit guten Erfahrungen eingesetzt werden, ist meist die Einsatzdauer des Gerätes, in denen der Transformator oder die Spule eingebaut wurde, geringer als die Lebensdauer der Isolation.

Bei heutigen Langzeitanforderungen (15-25 Jahre) kann es jedoch notwendig sein, seinen Isolationsaufbau kritisch auf seine Dauerhaftigkeit zu überprüfen - eine Möglichkeit dazu ist die Teilentladungsmessung.

### Übersicht von Normen in dem Themenbereich elektrische Isolation:

IEC 60085 Elektrische Isolierung, thermische Bewertung und Bezeichnung

IEC 60112 Verfahren zur Bestimmung der Prüfzahl und der Vergleichszahl der Kriechwegbildung von festen, isolierenden Werkstoffen

IEC 60216 Elektroisolierstoffe - Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens

IEC 60243 Elektrische Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen – Prüfverfahren

IEC 60270 Zerstörungsfreies Verfahren zur Beurteilung der Güte des Isoliersystems mittels Teilentladungs- (TE-) Messung

IEC 60343 Empfohlene Prüfverfahren zur Bestimmung der relativen Beständigkeit isolierender Werkstoffe gegen Durchschlag infolge Oberflächenteilentladung

IEC 60454 Bestimmungen für selbstklebende Isolierbänder für elektrotechnische Anwendungen

IEC 60505 Bewertung und Kennzeichnung von elektrischen Isoliersystemen

IEC 60674 Bestimmung für Kunststoff-Isolierfolien für elektrotechnische Zwecke

IEC/TS 61934 Elektrische Messung von Teilentladungen (TE) bei sich wiederholenden Spannungsimpulsen mit kurzer Anstiegszeit

IEC 62068 Elektrische Isolierstoffe und Isoliersysteme - Allgemeines Verfahren zur Bewertung der elektrischen Lebensdauer bei Beanspruchung mit sich wiederholenden Spannungsimpulsen

EN 61558 Sicherheit von Transformatoren, Netzgeräten, Drosseln und dergleichen

UL746B Polymerwerkstoffe - Bewertungen der Langzeiteigenschaften

ASTM D 2275 Prüfung der Spannungsfestigkeit von festen Isolierstoffen unter Einwirkung von Teilentladungen an der Oberfläche

### CMC Klebtechnik GmbH

Rudolf-Diesel-Straße 4 -  
67227 Frankenthal  
Tel. 0049/6233-872-356

[www.cmc.de](http://www.cmc.de)  
[friederici@cmc.de](mailto:friederici@cmc.de)



**cmc Klebetechnik**

Beschichten - Stanzen - Schneiden

CMC Klebetechnik GmbH Rudolf-Diesel-Straße 4 Germany - 67227 Frankenthal 0049 (0)6233/872-300

© Gerald Friederici, CMC