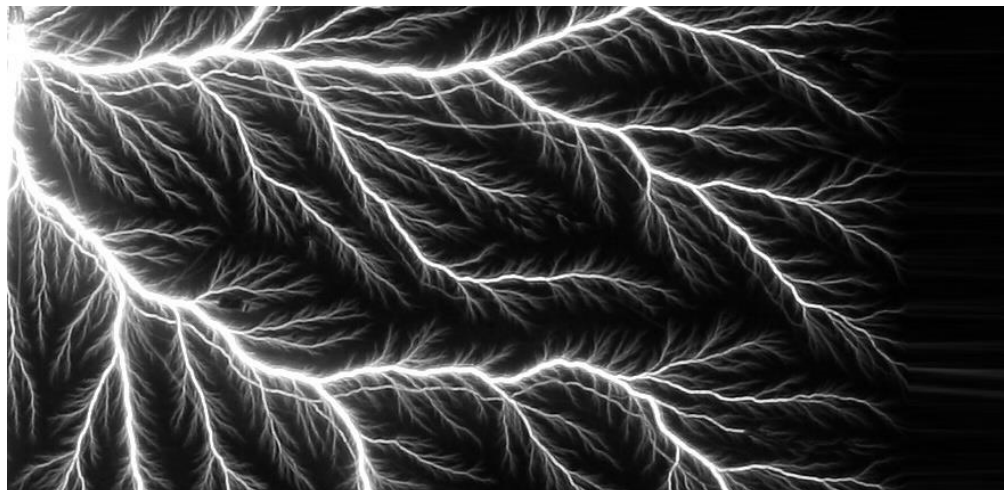


Leitfaden
**Teilentladungs-Messung und
-Diagnostik für Applikationen im
Niederspannungsbereich ≤ 1.000 Volt**



Impressum

Teilentladungs-Messung und
-Diagnostik für Applikationen im
Niederspannungsbereich ≤ 1.000 Volt

Herausgeber:
ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und
Elektronikindustrie e.V.
Fachverband Electrical Winding & Insulation Systems
Lyoner Str. 9
60528 Frankfurt am Main

Verantwortlich:
Dr.-Ing. Rolf Winter

Telefon: +49 69 6302-402
Fax: +49 69 6302-407
E-Mail: winter@zvei.org
www.zvei.org/ewis

Autoren:
Aumann, Sebastian – Isovolta
Becker, Stefan – Sekels
Berton, Dr. Farhad – Vacuumschmelze
Friederici, Gerald – CMC Klebetechnik
Gauer, Dr. Mario – Ephy-Mess
Jovalekic, Mark – Pucaro Elektro-Isolierstoffe
Kohlhof, Jens – Ephy-Mess
Kübler, Frank – Krempel
Radbruch, Jens – TMC Sensortechnik
Winter, Dr.-Ing. Rolf – ZVEI

Juni 2016

Dieses Dokument kann in jedem Format oder Medium, auch auszugsweise, kostenlos wiedergegeben werden, vorausgesetzt, es wird korrekt und nicht in einem irreführenden Kontext verwendet. Hierbei muss das ZVEI Copyright ersichtlich sein und der Titel des Dokumentes ist anzugeben. Ein Freixemplar des Dokumentes, in dem ZVEI-Material verwendet wird, ist zur Verfügung zu stellen.

Trotz größtmöglicher Sorgfalt übernimmt der ZVEI keine Haftung für den Inhalt. Alle Rechte, insbesondere die zur Speicherung, Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, sind vorbehalten.

Inhalt

1.	Einleitung	5
2.	Definition der Teilentladung	6
3.	Welche Teilentladungstypen gibt es?	7
4.	Was ist die Messgröße bei TE-Prüfungen?	8
	Exkurs zu Messaufbau und Durchführung einer TE-Messung	8
5.	Wie lassen sich TE-Messungen interpretieren?	9
6.	Was sind die Ursachen von Teilentladungen?	11
7.	TE- und sekundäre Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Isolationssystemen	12
8.	Wie können Teilentladungen vermieden werden?	14
9.	Praxisbeispiel für die Komplexität einer TE-Messung	15
10.	Zusammenfassung / Fazit	16
11.	Literaturverzeichnis	17
12.	Auflistung relevanter Normen	18
	Anhang 1: Paschengesetz	19
	Anhang 2: Sichere Trennung unter dem Gesichtspunkt der Teilentladungsbeständigkeit	21
	Anhang 3: Phasendiagramme – Interpretationshilfe	22
	Bildnachweis	23

1. Einleitung

Die Entwicklung von leistungsfähigeren elektrischen Bauelementen und Betriebsmitteln in immer kompakteren Bauweisen ist mit der Verbesserung der Eigenschaften von Isolationssystemen insbesondere in Bezug auf die elektrische, thermische, chemische und mechanische Belastung verbunden. Das weite Spektrum von Isolierwerkstoffen in elektrischen Komponenten und Betriebsmitteln besteht, abhängig von der jeweiligen Anwendung, aus gasförmigen, flüssigen und festen Isolierstoffen. Zu den festen Isolierwerkstoffen gehören organische und anorganische Werkstoffe sowie Kunststoffe (z. B. Polymere). Die mineralisch gefüllten und glasfaserverstärkten Kunststoffe gehören zu den Verbund- oder Kompositwerkstoffen und bestehen aus mindestens zwei Komponenten: Einem matrixbildenden organischen Polymerwerkstoff und einem anorganischen Füll- bzw. Verstärkungstoff.

Aufgrund der Energieeffizienzanforderungen für elektrische Betriebsmittel und Drehzahlreglungen von elektrischen Antrieben werden zunehmend Schaltnetzteile und Frequenzrichter eingesetzt. Die Lackdrahtisolationen von Asynchronmotoren werden mit der 2-fachen Zwischenkreisspannung beansprucht. Als eine der Ursachen für die schädigende Spannungsüberhöhung ist die Überlagerung der reflektierenden Spannungswelle mit der Versorgungsspannung aufgrund des Impedanzunterschiedes zwischen Kabel und Maschine zu nennen. Die rechteckförmige Betriebsspannung mit hohen Schaltfrequenzen erzeugt hohe Spitzenpegel und steile Anstiegsflanken (du/dt), die zusammen zur Erzeugung von Teilentladungen und beschleunigter Alterung von Isolationssystemen führen.

Auch bei der Überwachung der Produktqualität in der Fertigung durch die Typ- und Stückprüfung und zur Lebensdauerabschätzung von Isolationssystemen spielt die Teilentladungs-Messtechnik und -Diagnostik eine immer bedeutendere Rolle [1-4]. Die steigenden Anforderungen an feste Isolationssysteme von elektronischen und elektrischen Komponenten bzw. Betriebsmitteln mit kompakter Bauweise und bei steigenden Schaltfrequenzen der Halbleiter (IGBT, Siliziumcarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) Power-MOSFET) erfordern den Einsatz teilentladungsfreier / teilentladungsfester Isoliermaterialien bzw. Verbundwerkstoffen. Dies gilt insbesondere für elektrische Komponenten in drehzahlverstellbaren Antrieben für Bahn, Elektrofahrzeuge oder Anwendungen im Bereich der Energietechnik z. B. Solar- und insbesondere Offshore-Windparks.

Diese Broschüre gibt einen ersten Einblick in diese durchaus komplexe Thematik.

2. Definition der Teilentladung

Nach der EN 60270 respektive der VDE 0434 ist die Teilentladung (TE) in Absatz 3.1 wie folgt definiert: „Örtlich beschränkte elektrische Entladung, welche die Isolierung zwischen Leitern nur teilweise überbrückt und welche angrenzend an einen Leiter auftreten kann, aber nicht muss“ [1].

Für die Qualitätskontrolle des Isolationssystems von elektronischen oder elektrischen Komponenten können Kurzzeit-TE-Messungen als zerstörungsfreie Prüfverfahren herangezogen werden.

Auch bei Applikationen im Niederspannungsbereich (Transformatoren, E-Motoren, Sensoren, Spannungs- und Stromwandler) können Teilentladungen vorkommen. Hierbei handelt es überwiegend um innere Teilentladungen (Gas-Entladungen umgeben von einem festen Isolierstoff), welche infolge der stetigen Zersetzung des Isolationsmaterials eine beschleunigte Alterung und damit Schwächung bzw. Ausfall des Isolationssystems verursachen.

Für die Erzeugung von Teilentladungen müssen die folgenden drei Bedingungen erfüllt sein:

- eine ausreichend hohe elektrische Feldstärke, um eine Ionisierung zu verursachen
- ein Startelektron muss vorhanden sein
- ein Rückkopplungsmechanismus, der den Lawineneffekt aufrechterhält

Die Teilentladung ist eine physikalische Größe, welche mit Hilfe verschiedener Messverfahren wie folgt erfasst werden kann:

- durch klassisch elektrische TE-Messung entsprechend der EN 60270, Messung im Frequenzbereich
- TE-Spitzenwert-Auswertung, Integration im Zeitbereich
- Kurvenformanalyse der Impulsantwort bei Stoßspannungsprüfung
- die elektromagnetische Messmethode UHF
- akustische TE-Detektion
- Radio Interferenz Methode (veraltet)
- Messungen mit Ultraschall-Sensoren

Für die in diesem Merkblatt diskutierten Anwendungen wird in der Regel die klassische TE-Messtechnik nach der EN 60270 verwendet. Das UHF-Messverfahren wird eher für Zustands-Monitoring und Lokalisieren von TE in gasisolierten Schaltanlagen, großen Transformatoren und Generatoren verwendet und ist noch nicht für Abnahme und TE-Prüfungen von Komponenten und Motoren im Niederspannungsbereich verwendbar.

3. Welche Teilentladungstypen gibt es?

Teilentladungen werden in zwei Hauptgruppen aufgeteilt:

1) Äußere und Oberflächen-Teilentladungen

Äußere und Oberflächen-Teilentladungen sind Korona-, Glimm- und Gleit-Entladung, impulslose Teilentladung, Trichel-Impulse an Elektroden mit ausreichend hoher Krümmung sowohl in Gasen als auch auf Oberflächen von Feststoffisolierungen. Äußere TE können in Isolationssystemen von Niederspannungsanwendungen vorkommen, sind aber konstruktionsbedingt eher selten.

2) Innere Teilentladungen

Innere Teilentladungen sind Hohlraum- bzw. Gasentladungen, die in einem Feststoff- und/oder Flüssigdielektrikum vorkommen. In den meisten Fällen besteht das Isolationssystem eines elektrischen Gerätes aus mehreren dielektrischen Stoffen. Daher muss die Erhöhung der Feldstärke in dem Isolierstoff mit niedriger Dielektrizitätskonstante („Feldverdrängung“ genannt) bei der Berechnung/Dimensionierung des Isolationssystems zugrunde gelegt werden [2].

In elektrischen Betriebsmitteln treten i. d. R. Mischformen von Teilentladungen auf. Mit unterschiedlichen Anordnungen können die TE-Typen in Reinform nachgebildet werden, um damit ihre Auswirkungen zu untersuchen und zu verstehen. Dies hilft reale Fehlerbilder zu erkennen und diese Ursachen zuzuordnen.

Diese Anordnungen sind:

- i) Spitze-Platte (Koronaentladung)
- ii) Spitze-Dielektrikum-Platte (Oberflächenentladung)
- iii) Hohlraum
 - a) im Dielektrikum
 - b) an eine Elektrode angrenzend
- iv) Nadel im festen Dielektrikum (Electrical tree Entladung) [7]

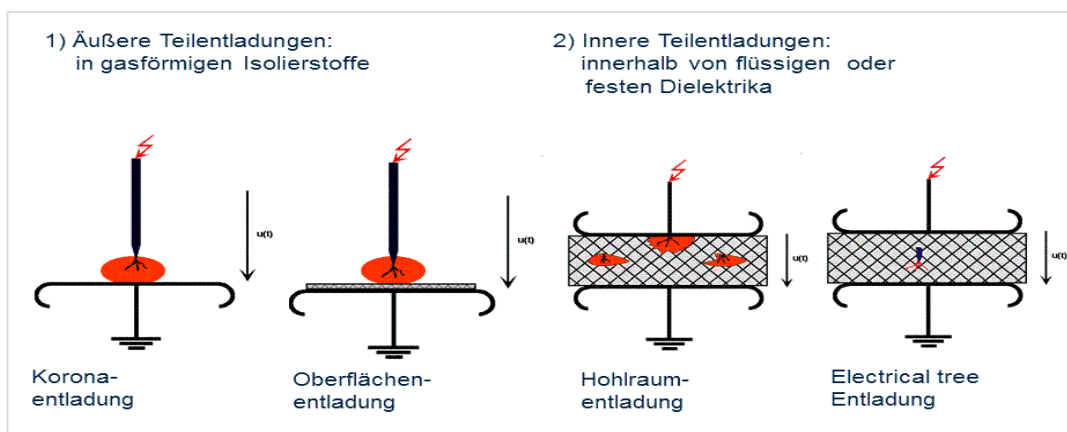


Bild 1: Anordnungen zur Darstellung von äußeren und inneren Teilentladungen [4]

4. Was ist die Messgröße bei TE-Prüfungen?

Als Messgröße bei TE-Prüfungen hat sich die scheinbare Ladung ($q_s = i_{TE,s}(t) \cdot dt$) der TE-Impulse international durchgesetzt. Sie ist nach der Norm EN 60270 sinngemäß definiert als: Die in die Prüflingsklemmen kurzzeitig eingespeiste Ladung eines Kalibrierimpulses, die die Klemmenspannung vorübergehend um denselben Wert ändert wie die TE selbst [1].

Des Weiteren sind die TE-Einsatzspannung U_i (Partial Discharge Inception Voltage) und Aussetzspannung U_e (Partial Discharge Extinction Voltage) für die Analyse bei der TE-Messung von Bedeutung. Die Teilentladungs-Einsatzspannung U_i ist die niedrigste Spannung, bei der in einem Prüfkreis Teilentladungen vorkommen, wenn die Prüfspannung von einem niedrigeren Wert ausgehend gesteigert wird. Die Teilentladungs-Aussetzspannung U_e ist die Spannung, bei der wiederholt auftretende Teilentladungen gerade nicht mehr vorkommen, wenn die Prüfspannung von einem über der Einsatzspannung liegenden Wert gesenkt wird.

In der Praxis wird ein TE-Pegel anwendungsspezifisch festgelegt. Mit anderen Worten: Beim Hochfahren der Spannung wird die Spannung, bei der dieser TE-Pegel erreicht wird, als TE-Einsatzspannung U_{PDE} (auch als U_i bezeichnet) definiert. Der Spannungswert, bei dem die TE-Aktivität aussetzt (z. B. TE-Pegel $< 10pC$) wird als TE-Aussetzspannung U_{PDA} (auch als U_e bezeichnet) aufgenommen [1].

Exkurs zu Messaufbau und Durchführung einer TE-Messung:

Bild 2 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild des TE-Messkreises mit einer Messimpedanz bestehend aus einer $R_M L_M C_M$ -Parallelschaltung. Die Messimpedanz hat die Aufgabe die hochfrequenten TE-Impulse, die der Prüfspannung überlagert sind, aus dem Hochspannungsprüfkreis auszukoppeln und dem TE-Messgerät zuzuführen. Hierin sind $U(t)$ die Belastungsspannung, Z_F die Impedanz des Hochspannungsfilters, C_P die Prüflingskapazität, C_K die Kapazität des Koppelkondensators, C_C die Kapazität des Messkabels und Z_M die Messimpedanz des Ankopplungsvierpols. Die Störungen aus dem Bereich der Hochspannungsversorgung werden durch das Hochspannungsfilter Z_F gefiltert. Der Prüfling ist vereinfacht als Kondensator C_P dargestellt. Die TE-Impulse gelangen von C_P über den Koppelkondensator C_K auf die Messimpedanz Z_M [7]. Der scheinbare TE-Impulsstrom $i_{TE,s}(t)$ teilt sich unter Vernachlässigung des Einflusses der parasitären Kapazität bzw. der Erdkapazität in zwei Komponenten auf.

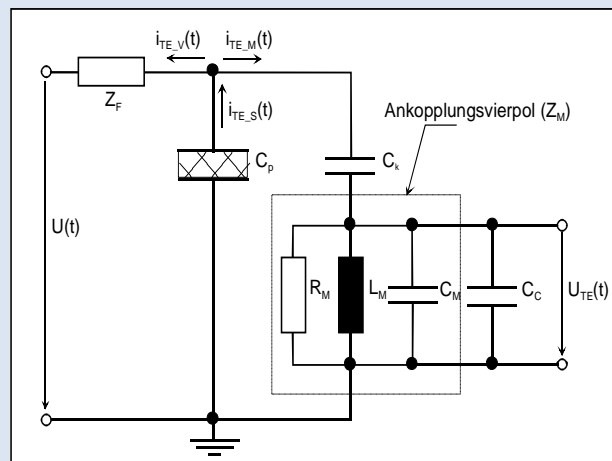


Bild 2: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des TE-Messkreises mit einer $R_M L_M C_M$ -Messimpedanz

Die erste Komponente ist der durch die Messimpedanz abfließende tatsächlich messbare TE-Impulsstrom $i_{TE,M}(t)$ und die zweite Komponente ist der Verluststrom $i_{TE,V}(t)$, der über die Impedanz Z_F abfließt. Das Messkabel wird in der Regel nicht mit einem Wellenwiderstand abgeschlossen und daher muss bei der Berechnung der Übertragungsfunktion die Kapazität des Messkabels C_C berücksichtigt werden. In Bezug auf den tatsächlich messbaren TE-Impulsstrom $i_{TE,M}(t)$ sind die Kapazitäten C_k und C_p , welche die Ersatzkapazität C_R bilden, in Reihe geschaltet. Diese Ersatzkapazität ist parallel zur Messkapazität C_M und Kabelkapazität C_C geschaltet.

5. Wie lassen sich TE-Messungen interpretieren?

Die Durchführung der TE-Messung als auch die Interpretation der Messergebnisse erfordern Erfahrung mit der TE-Messtechnik. Selbst Raumtemperatur und Luftfeuchte haben signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse.

Die gemessene Amplitude eines TE-Signals ist bei der Fehlerdiagnose weniger relevant. Die aussagefähigeren Kenngrößen sind die Phasenlage, Polarität, Impulshäufigkeit und Regelmäßigkeit der Teilentladungen, Spannungs- bzw. Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden Teilentladungen, die Veränderungen der Intensität mit der Spannungsänderung und das Verhältnis von TE-Einsatz- zu TE-Aussetzspannung.

Es sind unterschiedliche Ansätze zur TE-Interpretation bekannt [3]. Folgende Verfahren werden am häufigsten eingesetzt:

- klassischer physikalischer Ansatz (physikalische Vorgänge in der Fehlstelle)
Hinweis: Anhang 3 stellt die Interpretation von Phasendiagrammen des Sinusverlaufs dar
- statistischer Ansatz (Verteilungsfunktion)
- neuronale Netze (Entladungparameter und Fehlerarten über die neuronalen Netze in Beziehung zu setzen)
- Analyse der TE-Impulsform (time resolved analysis)
- Expertensysteme zur TE-Analyse, unterschiedliche Ansätze (fuzzy logic)

Ein wichtiges Einsatzgebiet für TE-Messungen sind Typ- und Stichproben-Prüfungen bei elektrischen Betriebsmitteln. Für Leistungsantriebe und deren Komponenten legt z. B. die Norm EN 61800-5-1:2008 die Anforderungen zur elektrischen, thermischen und energetischen Sicherheit fest. Insbesondere sind hier die Isolationssysteme, Kriech- und Luftstrecken und die Bedingungen für deren Prüfung bzw. Validierung definiert.

Teilentladungsmessungen gehören zu einer der wichtigsten Prüfungen zur Sicherstellung der Produktqualität.

Die TE-Messung und Auswertung wird in den Normen EN 61800-5-1:2008 und in der EN 60664-1:2008 für doppelte oder verstärkte Isolierung sinngemäß wie folgt beschrieben: Die AC-Prüfspannung wird von Null bis zu einem Spannungswert von $1,875 \cdot U_{PD}$ (gilt für verstärkte Isolierung) gesteigert und bei diesem Wert maximal 5 s gehalten. Danach wird die AC-Prüfspannung bis zu $1,5 \cdot U_{PD}$ reduziert und 15 s auf diesem Level gehalten. Bleibt der arithmetische Mittelwert des TE-Pegels innerhalb dieser 15 s unter 10 pC wird der Prüfling als TE frei bezeichnet. Die Spannung U_{PD} ist die periodisch wiederkehrende maximale Spannungsspitze, die in dem Betriebsmittel vorkommt.

Eine TE-Prüfung nach der Norm EN 61800-5-1:2008 für doppelt und verstärkte Isolierung ist dann gefordert, wenn der periodische Scheitelwert der Arbeitsspannung über der Isolierung größer als 750 Volt ist und die Spannungsbeanspruchung der Isolierung über 1 kV/mm liegt.

In der EN 60664-1:2008 findet man neben den Prüfbedingungen für verstärkte Isolierung auch Angaben zu den abweichenden Prüfbedingungen für Basisisolierungen.

Wichtiger Hinweis bei eingebetteten Sensoren im Isolationssystem:

Auch das Isolationssystem von eingebauten Komponenten wie z. B. Temperatursensoren oder Bimetallschalter muss entsprechend teilentladungsfrei sein. Allerdings kann durch den inneren Aufbau dieser Komponenten das Ergebnis der TE-Messung verfälscht werden. Sollte eine solche elektrische Komponente ein potentialfreies Metallgehäuse haben, das für die Druckstabilität des empfindlichen Sensors notwendig ist, so kann es während der Prüfung im inneren dieses Gehäuses zu elektrischen Entladungen zwischen dem potentialfreien Gehäuse und einem elektrischen Anschluss kommen. Diese Entladungen über eine Luftstrecke sind nicht schädlich für das Isolationssystem, sie überlagern die TE-Messwerte und führen zu einem erhöhten TE-Pegel. Da sie allerdings kein Maß für die Teilentladungsfestigkeit des Isolationssystems sind, verfälschen sie die Messung. In solchen Fällen sind zusätzlich vergleichende Messungen mit potentialfreiem Sensor durchzuführen, um Fehlinterpretationen auszuschließen.

6. Was sind die Ursachen von Teilentladungen?

Teilentladungen entstehen, wenn die Durchschlagsfeldstärke des Dielektrikums, auf Grund unterschiedlicher lokaler Feldstärken oder unterschiedlicher lokaler Spannungsfestigkeiten, punktuell überschritten wird und dadurch ein partieller Zusammenbruch des Isolationssystems erfolgt. Startvoraussetzung ist auch, dass die Spannung über dem Niveau der jeweiligen TE-Einsatzspannung (U_{PDE}) liegt.

Eine homogene Feldverteilung ist i. d. R. in einer Anwendung nicht gegeben, da Isolierstoffe mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten kombiniert werden. Hinzu kommen Variationen in der Verarbeitung.

Ursachen von Teilentladungen können das Vorhandensein von Fehlstellen (Hohlräume) im Isolationssystem, einer Alterung des Isolationssystems oder eine anordnungsbedingte starke Inhomogenität des elektrischen Feldes sein. Neben mangelnder Imprägnierung können Hohlräume unter anderem durch unvollständig entgaste Imprägnier- oder Gießharze bzw. durch chemische Nebenreaktionen beim Vorhandensein von Feuchtigkeit entstehen. Durch mechanische Spannung oder Versprödung kann es zu einer Ablösung zwischen Draht und Isolierung als auch zu einer ungenügenden Haftung kommen [2].

Verunreinigungen aller Art, eingebracht während der Fertigung, aber auch während des Betriebes im Feld, können zu Teilentladungen führen. Solche Verunreinigungen sind leitfähige Partikel wie Bürstenabrieb, Staub und Salzablagerungen (Offshore), welche speziell in Kombination mit Feuchte leitfähige Belege bilden. Dies kann in weiterer Folge die Ursache von äußeren Teilentladungen sein und schlimmstenfalls zu einem elektrischen Durchschlag führen.

Weitere Einflussfaktoren für TE sind vom Umrichter erzeugte Spannungspulse. Solche können auch als Wanderwellen die Verbindungskabel zwischen Umrichter und Motor durchlaufen. Da diese an der Motorwicklung reflektiert werden, kann es in Abhängigkeit von der Kabellänge zu Spannungsüberhöhungen z. B. an den Motorklemmen kommen.

7. TE- und sekundäre Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Isolationssystemen

Die beschleunigte Alterung durch Teilentladungen wird durch die sogenannten sekundären Faktoren stark beeinflusst:

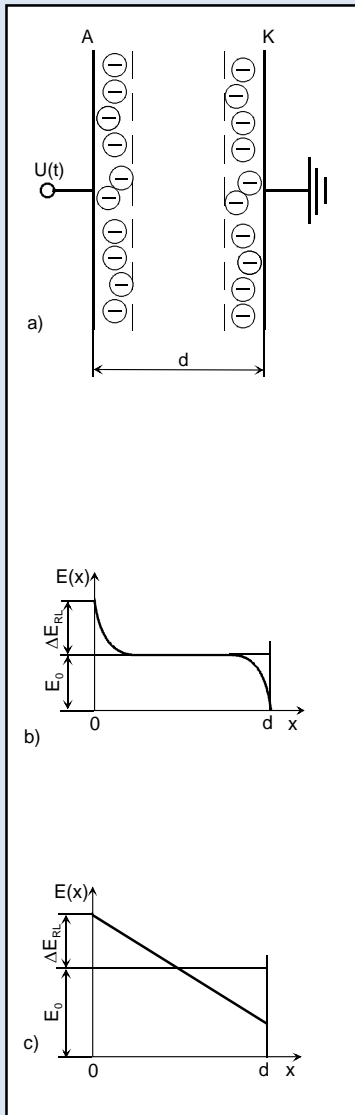
- Spannungsüberhöhungen (Spikes, Reflektionen, etc.)
- Umgebungstemperatur
- Spannungsgradient du/dt
- Schaltfrequenz der Spannung
- Feuchtigkeit
- Kriechwegbildung
- UV-Belastung durch TE
- Ozonbildung durch TE

Temperaturerhöhungen wirken beim Vorhandensein von TE als Katalysator und beschleunigen die Alterung (z. B. Versprödung) eines Isolationssystems und führen zu einem frühzeitigeren Ausfall des Betriebsmittels. Als Erfahrungswert hat sich etabliert, dass eine um 10 K höhere Temperatur zur Halbierung der Lebensdauer des Isolationssystems (z. B. bei Folien-Kondensatoren) führt. Ein Umkehrschluss (Verdopplung der Lebensdauer durch Betrieb bei 10 K niedrigerer Temperatur) ist leider durch die weiteren Einflussfaktoren nicht immer möglich. Mit der Alterung des Isolierstoffes einher geht eine niedriger werdende Spannungsfestigkeit. Im schlimmsten Fall kann die Grenze der TE-Einsatzspannung erreicht werden, was zu dauerhaften Teilentladungen und damit zum Ausfall des Isolationssystems führt.

Bei der Entwicklung eines Gerätes müssen neben den primären elektrischen Anforderungen auch die Umwelтанforderungen an Isolationssysteme berücksichtigt werden. Die Grundsätze zur Isolationskoordination für Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen ist in der Norm EN 60664-1 festgelegt.

Exkurs: Einfluss einer Raumladung auf Teilentladungen

Bei Wechselspannungsbelastung werden – bei Überschreitung gewisser Feldstärken – in der negativen Spannungshalbwelle Elektronen aus der Kathode in den Isolierstoff injiziert und (speziell in festen und flüssigen Isolierstoffen) an Haftstellen eingefangen. In der positiven Halbwelle wird ein Teil der injizierten Elektronen von den Haftstellen befreit und driftet zur Elektrode zurück. Der Rest verbleibt im Dielektrikum. Hierbei kommt es zur Ausbildung von ortsfesten negativen Raumladungen vor den Elektroden. Bei Wechselspannungsbelastung wirkt sich das Vorhandensein von Raumladungen stets feldverstärkend aus, weil in einer der beiden Halbwellen der Belastungsspannung die durch Raumladungen verursachte Feldstärke $\Delta E_{RL}(t)$ die gleiche Polarität besitzt wie die durch die äußere Spannung hervorgerufene lokale Feldstärke $E_0(t)$. Hierdurch entsteht in der Nähe der Elektroden eine Erhöhung der Feldstärke $E(t)$. Bild 3a) zeigt ein vereinfachtes Modell bestehend aus einem Plattenkondensator mit beidseitig aufgebauten Raumladungen der Raumladungsdichte $(-\rho)$. Bild 3b) und c) stellen die Feldstärkenverläufe nach kurzer und langer Belastungszeit dar, wenn sich bei langer Belastungszeit eine homogene Raumladungsverteilung einstellt [4].



$$E(t) = E_0(t) \pm \Delta E_{RL}(t)$$

Mit der Poissonschen Potentialgleichung kann man für einfache geometrische Anordnungen die durch Raumladungen hervorgerufene Feldstärke ΔE_{RL} berechnen.

$$\Delta \Phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

Die elektrische Feldstärke ergibt sich zu

$$E = -\text{grad}\Phi$$

Für eine Plattenkondensatoranordnung wird die Potentialgleichung für eine in x -Richtung gegebene Ortsabhängigkeit zu

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

und für die elektrische Feldstärke zu

$$E(x) = -\frac{d\Phi}{dx}$$

Nach der Lösung dieser Differentialgleichung für eine ortsunabhängige homogene Raumladung ergibt sich als resultierende Feldstärke:

$$E(x) = \frac{U}{d} + \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \left(\frac{d}{2} - x \right)$$

Bild 3: a) Plattenkondensator mit negativen Raumladungen vor den Elektroden
 b) Feldstärke nach kurzer Belastungszeit
 c) Feldstärke nach hinreichend langer Belastungszeit (bei homogener Raumladung)

8. Wie können Teilentladungen vermieden werden?

Entsprechend ihrer Entstehungsursache lassen sich mit unterschiedlichen Maßnahmen Teilentladungen vermeiden bzw. reduzieren. In den meisten Fällen kann man durch konstruktive Maßnahmen die Entstehungen von lokalen Felderhöhungen, die primär die Ursache von TE sind, vermeiden. Hierbei sind folgende Maßnahmen sehr hilfreich:

- Vermeidung von Verunreinigungen im Isoliermaterial während der Produktion (leitfähiger Belag, Metallspäne, Luft- oder Feuchtigkeitseinschluss)
- Feldlinienkonzentrationen an Spitzen und Kanten durch Abrundung (Homogenisierung des Feldes) vermeiden
- Einhaltung der minimal erlaubten Biegeradien der Wickeldrähte
- Formung des Wickelkopfes optimieren (Füllgradsteigerung ohne Vorschädigung der Wickeldrähte durch Pressung und Drahtzug)
- größerer Abstand (z. B. bei Gleitentladungen) reduziert die Feldstärke (Spannungsabfall pro Distanz)
- vollständiges Vergießen (Hohlraum- und blasenfrei z. B. unter Vakuum und Verwendung von Schutzgas, Füllen von unten nach oben mit Pipette, aufsteigender Verguss)
- erhöhte Isolationsschichtstärke
- Vermeidung von großen ϵ_r Sprüngen bei der Verwendung von zwei Dielektrika
- Einsatz von Werkstoffen, die gegen die Kriechstrombildung beständiger sind (höherer CTI-Wert) bzw. die einem verringerten Abbau durch Teilentladung unterliegen (unter anderem Glimmer)
- Feldsteuerung über teilleitfähige Beläge (z. B. halbleitender Flächenisolierstoff, als Voltage Controlled Resistor (VCR) wirkende Lacke)
- Vermeidung von Ablagerungen durch Bürstenfeuer / Schleifkontakte
- Einsatz von TE-resistenten Isolierlackschichten auf Leiterplatten
- Berücksichtigung des Einsatzortes (Höhe üNN) für die Luft- und Kriechstrecken-Bestimmung (siehe Anhang 1)

Geeignete Maßnahmen bei der Auslegung von Schaltungen (Ansteuerung von Leistungshalbleitern, Verwendung von Netzfiltern) tragen dazu bei, dass TE an einzelnen Bauteilen vermieden wird. Mit speziellen Hochfrequenzfiltern können Störungen (Stromspikes durch nicht galvanische, induktive Einkopplungen in Steuerleitungen) und Oberwellen gedämpft werden.

9. Praxisbeispiel für die Komplexität einer TE-Messung

Die TE-Messung ist vielfach in den Endabnahme-Prozess elektrischer Maschinen integriert worden.

Ist im Betrieb einer elektrischen Maschine beispielsweise ein Temperatursensor (Pt100) an seine Auswertelektronik angeschlossen, so liegt i. d. R. ein Anschluss über die Elektronik an Masse. Über diese Masseverbindung können TE- Impulse während des Betriebs z.B. über die Isolierung der Anschlusslitze entstehen. Daher sind Endabnahmeprüfungen von elektrischen Maschinen mit integrierten Sensoren wie folgt durchzuführen:

- a) Während der TE-Messung wird der Sensor allpolig auf Prüfspannungs-/Massepotential gelegt. So wird auch der TE-Pegel, der durch den Sensor entsteht, gegen die Motorerde miterfasst. Hierbei ist aber darauf zu achten, dass die Prüfspannung nicht die Isolationsfestigkeit des Sensors übersteigt.
- b) Da der TE-Pegel des Sensors sich dem der Maschine überlagert, ist es wichtig, den TE-Pegel des Einzelsensors zuvor zu bestimmen, um die Messergebnisse richtig interpretieren zu können.
- c) Wird dagegen eine Stoßspannungsprüfung durchgeführt (welche nach Normempfehlung vor der TE-Messung durchzuführen ist), kommen Spannungen zum Einsatz, die die Isolation des Sensors unweigerlich zerstören würden, wenn dieser falsch angeschlossen ist. Bei dieser Prüfung ist der Sensor unbedingt allpolig potentialfrei zu lagern, so dass er während der Messung elektrisch nicht wirksam ist.

Beim Einbau von Sensoren in der Wicklung und dem darauffolgenden Verguss ist darauf zu achten, dass auch die Hohlräume, die beispielsweise durch Schutzschläuche oder sonstige zusätzliche Isolierungen des Sensors entstehen können, sorgfältig mit vergossen werden (siehe auch Anhang 2).

10. Zusammenfassung / Fazit

In diesem Beitrag sind neben der Definition von Teilentladung (TE) die unterschiedlichen Typen von TE beschrieben. Hierbei sind die scheinbare Ladung als TE-Messgröße, TE-Ein- und TE-Aussetzspannung und der Einfluss einer Raumladung auf Teilentladungen erläutert. Die TE-Messungen und Interpretation von Messdaten anhand von TE-Mustern für die bekannten Fehlstellentypen wurden diskutiert und Erfahrungen zur Vermeidung von Teilentladung in Isolationssystemen als "best practice" vorgestellt.

Die Ursachen für TE sind vielfältig und können je nach Aufbau des Isolationssystems innerhalb des elektrischen Gerätes stark variieren. Die langfristige Folge von Teilentladungen ist ein vorzeitiger Ausfall des Isolationssystems und damit des Gerätes. Hauptursachen sind neben der „Spannungshöhe“ eine Vielzahl von anderen Faktoren und die Umweltbedingungen.

Daher können konkrete praktische Hinweise zur Vermeidung von Teilentladungen in Niederspannungsgeräten nur schwer allgemein gültig gegeben werden. Mit den dargestellten Grundlagen kann jedoch zielgerichteter die Entwicklung und Konstruktion eines neuen Gerätes auf TE-Freiheit hin ausgelegt werden. Darüber hinaus kann bei nicht vermeidbarer Teilentladung, durch Maßnahmen in der Entwicklung und Konstruktion die Lebensdauer verlängert werden.

Die Unternehmen des Fachverbandes EWIS stehen Ihnen bei weitergehenden Fragen gerne zur Verfügung und unterstützen Sie bei der Realisierung Ihres nächsten Projektes.

11. Literaturverzeichnis

- [1] IEC 60270, VDE Norm 0434:2001-08: Hochspannungsprüftechnik, Teilentladungsmessungen. VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1983
- [2] König, D.; Rao, Y.N.: Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik. VDE-Verlag, Berlin, 1993
- [3] Küchler, A.: Hochspannungstechnik, Grundlagen – Technologie – Anwendungen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996
- [4] Berton, F.: Entwicklung und Anwendung eines DSP-gesteuerten TE-Messgerätes zur Teilentladungsdiagnostik von Isolationssystemen, Shaker Verlag, Aachen, 2003
- [5] Peil, S.; Koziel, R.; Weidner, J.: Neue Entwicklung bei der Online-Überwachung von Generatoren. VDE-Fachtagung, Frankfurt, 2001
- [6] Bergmann, A.; Facklam, Th.: Teilentladungsprüfung an Bauelementen der Niederspannungstechnik. Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik, VDE-Verlag, 1993
- [7] Berton, F.; Bonfig, K. W.; Patsch, R.: Teilentladungsmesstechnik in elektrischen Betriebsmitteln der Energie- und Automatisierungstechnik. 9. Symposium „Sensoren und Messdatenverarbeitung“, Technische Akademie Esslingen, 2002
- [8] Porzel, R.; Neudert, E.; Sturm, M.: Diagnostik der elektrischen Energietechnik. Expert-Verlag, Renningen, 1996
- [9] F.H. Kreuger; Industrial High Voltage I and II; Delft University Press, 1991 and 1992

12. Auflistung relevanter Normen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

IEC 60270:2000 Hochspannungs-Prüftechnik – Teilentladungsmessungen; Deutsche Fassung EN 60270:2001

IEC 60664-1: 2007 Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen – Teil 1: Grundsätze, Anforderungen und Prüfungen; Deutsche Fassung DIN EN 60664-1:2008-01 (VDE 0110-1)

IEC 61800-5-1:2007 Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl – Teil 5-1: Anforderungen an die Sicherheit – Elektrische, thermische und energetische Anforderungen; Deutsche Fassung DIN EN 61800-5-1:2008

IEC 62068:2013 Elektrische Isolierstoffe und Isoliersysteme – Allgemeines Verfahren zur Bewertung der elektrischen Lebensdauer bei Beanspruchung mit sich wiederholenden Spannungsimpulsen; Deutsche Fassung DIN EN 62068:2013

IEC/TS 61934:2011 Elektrische Isolierstoffe und -systeme – Elektrische Messung von Teilentladungen (TE) bei sich wiederholenden Spannungsimpulsen mit kurzer Anstiegszeit; Deutsche Fassung DIN IEC/TS 61934:2012

IEC 60730: Automatische elektrische Regel- und Steuergeräte für den Hausgebrauch und ähnliche Anwendungen – Teil 2-9: Besondere Anforderungen an temperaturabhängige Regel- und Steuergeräte (IEC 72/779/CD:2009); Deutsche Fassung DIN EN 60730-2-9:2011

IEC 61000-4-3:2010 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-3: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder

Anhang 1: Paschengesetz

Das Paschengesetz besagt, dass in einem elektrischen Feld die Durchschlagspannung U_d eine Funktion des Produktes aus Gasdruck p des Isoliergases und Elektrodenanstand (Schlagweite) d der spannungführenden Elektroden/Leiter ist. Die Abhängigkeit $U_d = f(p \cdot d)$ gilt nur für eine bestimmte Temperatur und nur solange, wie die Dichte des Isoliergases eine lineare Funktion des Druckes darstellt. Bei sehr kleinen Schlagweiten (z. B. $d = 5 \text{ cm}$) und höheren Dichten ($p = 10 \text{ bar}$) gibt es Abweichungen von dieser Regel.

Paschengesetz und Townsend-Mechanismus liefern grundlegende Erklärungen für den Durchschlagmechanismus in Gasen. Da die Ionisierungszahl (Anzahl der in Luft je cm Wegstrecke gebildeten Ionenpaare) eine Funktion des Luftdruckes ist, sind auch Durchschlagfestigkeit und Durchschlagspannung davon abhängig. Dieses Gesetz gilt auch für das inhomogene Feld, wenn mit der Distanz proportional auch der Elektrodenkrümmungsradius geändert wird (Ähnlichkeitsgesetz nach Toepler). Der qualitative Verlauf der Paschenkurve ist in Bild 4 dargestellt.

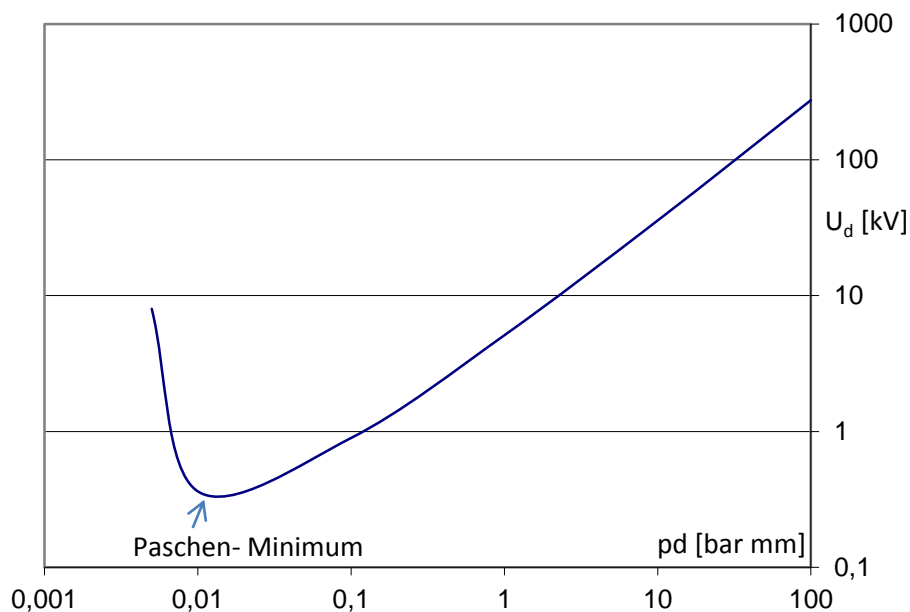


Bild 4: Qualitativer Verlauf der Paschenkurve

$$U_d(pd) = \frac{B \cdot pd}{\ln(A \cdot pd) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)}$$

mit

p = Gasdruck

d = Elektrodenanstand

γ = der 2. Townsend-Koeffizient

A und B = Konstanten

Die konstanten Faktoren für Luft als Isoliergas bei 20 °C sind:

$A = 1.130 \text{ mm}^{-1}$, $B = 27,4 \text{ kV/mm}$

$\gamma = 0,025$ einheitenloser Materialfaktor für Luft-Elektrodenoberfläche Kupfer

Aus der Formel ist ersichtlich, dass die Durchschlagspannung eine Funktion des Produktes aus Druck und Elektrodenabstand ist.

Um Messungen vergleichen zu können ist es wichtig Messungen bei gleichen Druck durchzuführen. Da die Gasdichte (und damit die Ionisierung) auch von der Temperatur abhängig ist, nimmt die Temperatur indirekt Einfluss auf die Messungen. Mit dem Temperaturanstieg sinkt die Durchschlagsfeldstärke.

Die Gasdichte ist für die Ionisierung ausschlaggebend. Aus diesem Grund müssen die Vergleichsdrücke immer auf die gleiche Temperatur bezogen werden. Speziell in der Hochspannungsanlagentechnik muss diese Dichteabhängigkeit beachtet werden. Bekanntlich nimmt der mittlere Luftdruck mit zunehmender Höhe (über Normalnull, üNN) für je +8 m um 1 h Pa ab, die mittlere Temperatur verringert sich dabei um 0,3...0,5 °C. Im Mittel liegt also die Luftdichte je +1.000 m Höhe um 125 hPa niedriger (barometrische Höhenformel).

Bei Auslegung des Isolationssystems elektrischer Komponenten für einen Einsatz über 2000m üNN sind erweiterte Luftstrecken aufgrund Corona- und Oberflächenentladungen zu berücksichtigen (Höhenfaktor).

Der weitverbreitete Wert 2.000 m üNN als Höhenangabe ist die typische Standard- Einsatzhöhe für elektrische Betriebsmittel. Ab dieser Höhe ist zu berücksichtigen, dass Luft ein immer schlechterer Isolator wird, was mit größeren Luft- und Kriechstrecken ausgeglichen werden muss. So ist z. B. bei 5.000 m Einsatzhöhe ein um 48 Prozent längerer Abstand einzuhalten als bei 2.000 m üNN und bei 4.000 m ist der Abstand noch 29 Prozent größer als bei der Referenzhöhe von 2.000 m üNN (DIN EN 60664-1, Tabelle A.2 Höhenkorrekturfaktoren).

Dieser Einfluss kann durch Vergleich mit Normalbedingungen ($T_0 = 293^\circ\text{K}$ und $p_0 = 1.013 \text{ hPa}$) auf Meereshöhe veranschaulicht werden.

Beispiel:

Meereshöhe NN: $p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$ $T_0 = 293^\circ\text{K}$ $U_{d0} = 1.000 \text{ V}$
(gewählt)

Bei 4.000 m üNN: $p_1 = 616,45 \text{ hPa}$ $T_1 = 282^\circ\text{K}$ $U_{d1} = \text{ist gesuchte}$

mit:

$$U_{d1} = U_{d0} * \frac{p_1 * T_0}{p_0 * T_1}$$

folgt also:

$$U_{d1} = 1.000 \text{ V} * (616,45 \text{ hPa} * 293^\circ\text{K}) / (1013,25 \text{ hPa} * 282^\circ\text{K})$$

$$= 1.000 \text{ V} * 0,63 = 630 \text{ V}$$

Die Temperatur- und Luftdruckangaben basieren auf der barometrischen Höhenformel.

In diesem Beispiel sieht man deutlich, dass die Spannungsfestigkeit mit sinkender Luftdichte abnimmt.

Paschen-Minimum: In Luft können Teilentladungen theoretisch bei Spitzenspannungen über 300 V AC auftreten. In der Praxis ist deren Auftreten unterhalb von 500 V aber unwahrscheinlich.

Anhang 2: Sichere Trennung unter dem Gesichtspunkt der Teilentladungsbeständigkeit

Sichere Trennung bedeutet ein konsequenter Schutz des Verwenders einer elektrischen Einrichtung vor elektrischem Schlag. Dabei sind etliche Rahmenbedingungen zu beachten, die sich aufgrund der technologischen Entwicklungen permanent verschärfen.

Sichere Trennung ist zwischen allen Nahtstellen verschiedener Stromkreise notwendig, in denen mindestens eine Spannungsebene oberhalb der Kleinspannung anliegt. Ein Beispiel dafür ist die Trennung zwischen einem SELV-Stromkreis (Safety Extra Low Voltage) und einem Stromkreis mit normaler Netzspannung. Sichere Trennung bedeutet, dass es dem Strom nicht möglich ist, von einem Stromkreis in einen anderen überzutreten und dadurch den Verwender der elektrischen Einrichtung zu gefährden.

Folgende Arten der elektrischen Isolation zwischen solchen Stromkreisen werden in den entsprechenden Normen (z. B. DIN EN 60664-1 / VDE 0110) beschrieben:

Funktionsisolierung: Diese Isolationsart ist für den einwandfreien Betrieb der Einrichtung erforderlich, bietet aber keinen Schutz gegen einen elektrischen Schlag.

Basisisolierung: Die Basisisolierung gewährt einen grundlegenden Schutz gegen einen elektrischen Schlag.

Zusätzliche Isolierung: Die zusätzliche Isolation dient als zweite Schutzbarriere, falls die Basisisolierung versagt.

Doppelte Isolierung: Begriff für die Basisisolierung und die zusätzliche Isolierung. Dabei sind die Basisisolierung und die Zusätzliche Isolierung zwei voneinander getrennte Schichten. Jede Schicht erfüllt den Basisschutz gegen elektrischen Schlag.

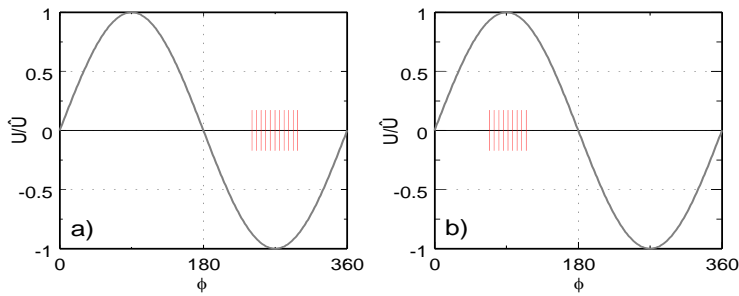
Verstärkte Isolierung: Isolierung besteht aus einem einheitliches Isoliersystem. Sie schafft einen gleichwertigen Schutz wie die doppelte Isolierung. Besteht sie aus mehreren Schichten (Mehrschichtlaminaten), sind diese nicht trennbar miteinander verbunden und können nicht einzeln getestet werden.

Natürlich wirken auch Luft- und Kriechstrecken als Isolationswege. Sie werden je nach Spannungshöhe, Verschmutzungsgrad und den Eigenschaften der eingesetzten Materialien in Normen definiert. Unter dem Gesichtspunkt der Teilentladungsbeständigkeit sind die mehrschichtigen Isolationsaufbauten der Doppelten Isolierung stets kritisch zu betrachten. Die Belastungen durch immer höhere Spannungen, nicht-sinusförmige Spannungsverläufe, Transienten und andere Phänomene können zu Teilentladungen führen. Besonders an den Übergängen der einzelnen Schichten kommt es in dem Fall zu Schädigungen der Isolationsmaterialien. Außerdem ist ein Verguss von mehrlagigen, aber nicht fest miteinander verbundenen Folien ohne Lufteinschlüsse technisch anspruchsvoll.

Muss man aufgrund der Betriebsbedingungen mit dem Auftreten von Teilentladungen rechnen, sind Verstärkte Isolierungen den Doppelten Isolierungen vorzuziehen. Die dabei verwendeten Mehrschichtlaminaten können weitgehend ohne Lufteinschlüsse gefertigt werden. Außerdem können sie leichter ohne massive Dielektrizitätssprünge (z. B. Lufteinschlüsse) in Vergussmassen eingebettet werden.

Anhang 3: Phasendiagramme – Interpretationshilfe [3] und [9]

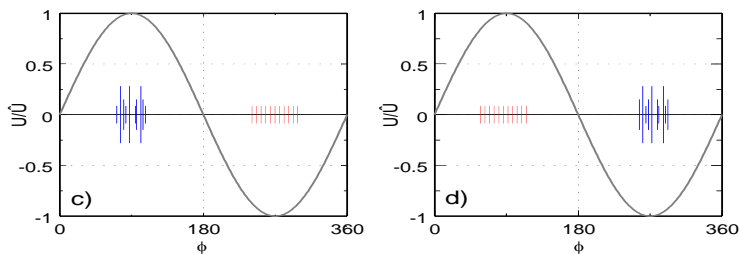
Koronaentladungen in Gas



Bei höherer Spannung kommen Entladungen in der anderen Halbwelle hinzu.

a) Spitze an Hochspannung b) Spitze an Erde

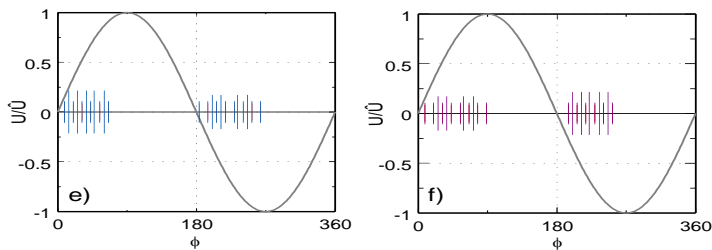
Koronaentladungen in Öl



Die Häufigkeit nimmt mit der Spannung zu.

c) Spitze an Hochspannung d) Spitze an Erde

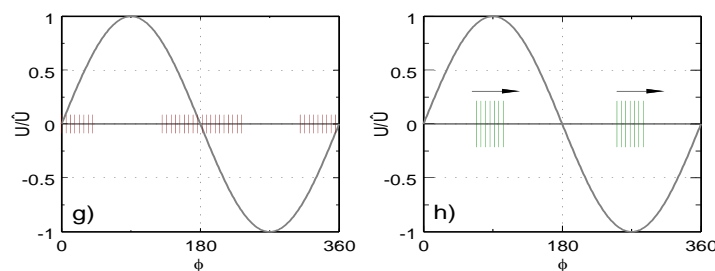
Hohlraum- oder Oberflächenentladungen



Die Amplituden der beiden Halbwellen unterscheiden sich mindestens um den Faktor 3.

e) Elektrode an Hochspannung f) Elektrode an Erde

Die Verteilung der Entladungen in einem Hohlraum ohne Kontakt zu einer Elektrode sieht ähnlich wie die Bilder e) und f) aus aber die Amplituden der beiden Halbwellen unterscheiden sich höchstens um den Faktor 3.



g) Kontaktrauschen

h) Entladungen von Elektroden auf freiem Potential

Bildnachweis:

Deckblatt: Treeing – nicht vollständiger elektrischer
Durchschlag in einem massiven Isolationsmaterial,
Gerald Friederici, CMC Klebetechnik

Bild 1 – 3: Dr. Farhad Berton

Bild 4: Jens Kohlhof, EPHY-Mess

Abbildungen Anhang 3: Dr. Farhad Berton



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektroindustrie e.V.
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-0
Fax: +49 69 6302-317
E-Mail: zvei@zvei.org
www.zvei.org