

Diss. ETH Nr. 15028

Das Teilentladungsverhalten in Mikrohohlräumen polymerer Isoliermaterialien

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

HANS-PETER BURGNER
dipl. El.-Ing. ETH Zürich
geboren am 28. August 1971
von Saas Balen, Wallis

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Klaus Fröhlich, Referent
Prof. Dr. Kurt Feser, Korreferent

Zürich, 2003

Kurzfassung

Faserverbundmaterialien werden in der Energietechnik vielfach eingesetzt. Auch in der Hochspannungstechnik finden sie aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen und dielektrischen Eigenschaften vermehrt Anwendung. Die elektrische Güte der faserverstärkten Isolierstoffe hängt stark vom Herstellungsverfahren ab. Die ständige Weiterentwicklung der Verfahrenstechnik führte dazu, dass grössere gasgefüllte Hohlräume im Millimeterbereich und damit gekoppelte Teilentladungen (TE) in faserverstärkten Isolierstoffen weitgehend vermieden werden. Verbesserte Materialeigenschaften ziehen jedoch automatisch Konstruktionen mit höheren Beanspruchungen nach sich. Deshalb wird zukünftig auch das Teilentladungsverhalten von Schwachstellen im Mikrometerbereich wie Harzablösungen von der Faser oder Risse von Bedeutung sein. Ausserdem können solch kleine Hohlräume extrem niedrige Teilentladungspegel ($< 1 \text{ pC}$) aufweisen, die in der Praxis aufgrund von externen Störgrössen kaum messbar sind, aber dennoch schädigend wirken können.

Aus oben genannten Gründen drängte sich eine eingehendere Untersuchung des TE-Verhaltens von Mikrohohlräumen auf. Die vorhandene Literatur zeigte, dass bis heute verschiedene Experimente und Simulationen durchgeführt wurden, um das TE-Verhalten als Funktion der Geometrie von scheibenförmigen oder sphärischen Hohlräumen zu erfassen. Der Einfluss der Seitenwände auf die Entladungen wurde aber in diesen Untersuchungen nicht berücksichtigt. Im Gegensatz dazu befasst sich die vorliegende Arbeit mit dem entladungshemmenden Effekt der Wände von engen, längs in der elektrischen Feldrichtung liegenden Mikrohohlräumen oder Rissen, die in faserverstärkten Isolierstoffen auftreten können. Dabei wurden Methoden erarbeitet, die sich durch eine erhöhte Empfindlichkeit auszeichnen und neben der TE-Messung zur Prüfung oder Dimensionierung zukünftig nützlich sein könnten.

Der entladungshemmende Einfluss der Seitenwände von länglichen, parallel zum elektrischen Feld liegenden Hohlräumen, wurde mit Hilfe eines gezielten Experiments untersucht. Dabei wurden definierte Bohrungen mit einer konstanten Tiefe ($300\ \mu\text{m}$) und variablem Durchmesser ($50\ \mu\text{m} - 300\ \mu\text{m}$) in einem mit Epoxidharz gefüllten Elektrodensystem angebracht. Für jeden Durchmesser wurden die Teilentladungen sowohl optisch wie elektrisch detektiert. Es zeigte sich ein markanter Anstieg der TE-Einsatzspannung und -feldstärke zu kleineren Durchmessern ($< 100\ \mu\text{m}$) hin. Dieser Anstieg ist vor allem auf die diffusionsbedingte Wechselwirkung der Elektronen mit der Seitenwandung zurückzuführen.

Der experimentelle Aufwand der Probenherstellung war gross, und die Untersuchungen des TE-Verhaltens von noch engeren Hohlräumen ($< 50\ \mu\text{m}$) verschiedener Längen waren aufgrund der verfügbaren Methoden zur Herstellung der definierten Hohlräume eingeschränkt. Unter der Annahme, dass mit Hilfe von Simulationen die dem Experiment noch nicht zugänglichen Bereiche des TE-Verhaltens von Mikro Hohlräumen erfasst werden können, wurde ein Modell für den TE-Einsatz in engen, zylindrischen Kavitäten erstellt. Die Modellierung basiert auf den Kontinuitätsgleichungen, die über die Ladungsträgerdichten in der Entladung mit der Poissongleichung bzw. dem elektrischen Feld verbunden sind. Das Teilentladungskriterium beruht dabei auf der photonischen Rückwirkung, d.h. einem Townsend-Mechanismus. Durch die experimentelle Anpassung eines Parameters, der die Wechselwirkung zwischen Elektronenlawine und der Peripherie des zylindrischen Hohlraums bestimmt, wurde eine gute Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen TE-Einsatzspannungen erreicht.

Für die Anwendung des vorgestellten Modells als elektrisches Dimensionierungswerkzeug müssen die materialspezifischen Abmessungen der Hohlräume bekannt und diese mittels einer Zylindergeometrie modellierbar sein. Die Anwendbarkeit der Simulation wurde an mechanisch geschädigten polyestergewebeverstärkten Epoxidharzrohren untersucht. Die Lichtmikroskopie diente zur Erfassung der mechanisch erzeugten Rissgrößen im genannten Material. Aufgrund eines Vergleichs der berechneten und optisch beobachteten Risslängen wurde die Tauglichkeit der Simulation der TE-Einsatzfeldstärken aufgezeigt. Für die Modellierung der scheinbaren Ladung müsste das bestehende Modell noch erweitert werden. Deshalb wird hier auf ein bereits in der Literatur beschriebenes Modell [29] zurückgegriffen.

Optische Untersuchungen von materialspezifischen Hohlräumen in Kombi-

nation mit Simulationswerkzeugen bieten das Potential zur Bestimmung kritischer Feldstärken bzw. Hohlraumgrößen, die der TE-Messung evtl. nicht zugänglich sind. Deshalb könnten diese Methoden Anwendern wie Herstellern von Isolierstoffen zukünftig bei der Formulierung der an Isolierstoffe gestellten Anforderungen hilfreich sein.

Im weiteren wurde der Einfluss der sequentiellen sowie der simultanen mechanischen und elektrischen Belastungen von glasfaserverstärkten Epoxidharzrohren untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer simultanen Beanspruchung das Gefahrenpotential hinsichtlich des dielektrischen Versagens grösser ist. Der Grund liegt in der Erzeugung von Ladungsträgern während des Aufbrechens der Grenzschicht von Faser und Matrix. Diese Ladungsträger können bei gleichzeitig anliegender hoher elektrischer Feldstärke zur Lawinenentwicklung und zum Versagen führen. Deshalb sollte bei der mechanischen Dimensionierung und Spezifizierung von faserverstärkten Isolierstoffen, die hohen dielektrischen und mechanischen Belastungen unterliegen, darauf geachtet werden, dass Rissentwicklungen und Delaminationen vermieden werden.

Abstract

Fibre-reinforced materials are widely used in the field of power engineering. Due to their outstanding mechanical and dielectric behaviour these materials find also high voltage applications. The dielectric properties of the fibre-reinforced insulation materials are strongly related to the manufacturing process. The continuous development of the process engineering suppresses the bigger gas-filled voids in the order of one millimeter and the related partial discharges (PD). Improved material properties lead automatically to designs employing increased stresses. Thus the PD behaviour of weak spots in the order of micrometers such as delaminations between fibre and matrix or cracks can be of importance in the future. However, such small voids could lead to very small partial discharge levels ($< 1 \text{ pC}$), which could be hardly detectable under practical conditions due to ambient noise, but could nevertheless affect the insulation.

The reasons stated above demand a closer investigation of the PD behaviour of microvoids. The literature available shows that so far a range of experiments and simulations have been accomplished to assess the PD behaviour as a function of the geometry of disc-shaped or spherical voids. However, the influence of the side walls on the discharges has not been taken into account with in these investigations. In contrast, this work considers the restricting effect of the side walls on the discharge with narrow microvoids or cracks parallel to the electrical field. Such cavities can also appear within fibre-reinforced materials. Considering this aspect methods were established, which distinguish themselves by an improved sensitivity and which could support the conventional PD measurement in assessment or dimensioning of insulation materials in the future.

The restricting influence of the side walls of longish voids parallel to the electrical field has been investigated by means of an experiment. To assess

this, well-defined holes of constant length ($300\ \mu\text{m}$) and various diameters ($50 - 300\ \mu\text{m}$) were drilled into the epoxy resin of a resin filled electrode system. For each diameter the partial discharges were measured electrically as well as optically. A considerable increase of the PD inception voltage and inception field strength was found towards smaller diameters ($< 100\ \mu\text{m}$). This increase has its origin mainly in the diffusion based interaction of the electrons with the side walls.

The experimental effort for the manufacturing of the samples was large and the investigations of the PD behaviour of even narrower voids ($< 5\ \mu\text{m}$) of various lengths were restricted due to the methods available for the preparation of the defined holes. Considering that voids of smaller dimensions can not yet be assessed by experiment a model for the simulation of the PD inception in narrow, cylindrical voids has been provided. The model is based on the continuity equations, which were coupled via the charge densities in the discharge with the Poisson equation and the electrical field. The PD inception criterion is based on a photonic feedback, i.e. a Townsend mechanism. With the experimental fitting of a parameter, which is describing the interaction of the electron avalanche with the periphery of the cylindrical void, a good correlation between the calculated and the measured PD inception voltages could be obtained.

For the application of the model presented as a tool for an electrical dimensioning, the materials-specific geometries of the voids must be known and modelling with a cylindrical geometry must be applicable. Thus the usefulness of the simulation was investigated with mechanically stressed polyester fabric reinforced epoxy tubes. The light microscopy served to assess the mechanically induced geometries of the cracks. By means of comparison of the calculated and optically measured lengths of the cracks the applicability of the simulation of the PD inception field strength could be shown. For a simulation of the apparent charge the existing model should be expanded. Thus a model presented in the literature [29] has been used.

Optical investigations of voids specific to the material in combination with simulation tools offer the potential to consider critical field strengths as well as void geometries, in a range not accessible to the conventional PD measurement. Thus the methods presented could be very helpful to users and manufacturers of insulation materials for formulating their requirements/specifications.

Further investigations showed the influence of the sequential as well as simultaneous mechanical and electrical stresses on glass fibre-reinforced

epoxy tubes. The experiments revealed that the dielectric failure potential is higher with simultaneous stresses. The reason is the generation of charge carriers during the cracking of the barrier layer between fibre and matrix. These charge carriers combined with a high field strength could lead to an avalanche development and to the dielectric failure. In the mechanical dimensioning and specification of fibre-reinforced materials, which have to support high dielectric and mechanical stresses, it has thus to be taken into account that even small-scale delamination and cracking must be avoided.