

Beurteilung von Maschinenisolierungen

Eingebettete Elektrode als Ergänzung in der Beurteilung von Maschinenisolierungen

Im deregulierten und liberalisierten Energiemarkt gewinnt die Zuverlässigkeit von Hochspannungsmaschinen immer mehr an Bedeutung. Da Lebensdauerprüfungen für Isoliermaterialien sehr aufwändig sind, wurde an der ETH Zürich eine Methode entwickelt, die eine Beurteilung von Maschinenisolierungen mit stark reduziertem Aufwand erlaubt. Untersuchungen der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Durchschlagzeit zeigen, dass die Herstellungsqualität die mikroskopische Struktur und damit die Durchschlagzeiten von Wicklungsisolierungen signifikant beeinflusst. Die Unterschiede in den Durchschlagzeiten – und damit der potenziellen Lebensdauer – können dabei bis zu 4 Größenordnungen betragen.

Etwa ein Viertel aller Ausfallzeiten von Kraftwerken sind auf Probleme in Wicklungsisolierungen von rotierenden Hochspannungsmaschinen (HS-Maschinen) zurückzuführen [1–3]. Die Hersteller der Maschinen verlangen nach kostengünstigeren Wicklungsisolierungen, die bei höheren Feldstärken als den heute üblichen

Ruben Vogelsang, Rudolf Brütsch, Klaus Fröhlich, Bernhard Fruth

2–3 kV/mm arbeiten. Im Gegensatz dazu möchten die Energieversorger ihre Kosten durch längere Wartungsintervalle und eine höhere Lebensdauer der Maschinen reduzieren.

Allerdings sind die Prozesse, welche zum Ausfall von Wicklungen in rotierenden HS-Maschinen führen, noch nicht vollständig aufgezeigt. Bisherige Forschungen haben sich hauptsächlich darauf konzentriert, die Wirkungen von Betriebsbelastungen auf die Lebensdauer der Wicklungsisolierungen zu beschreiben. Betrachtet man jedoch den gesamten Prozess vom Einsatz der Rohmaterialien bis hin zum Versagen der Isolierung, so fehlt eine Beschreibung des Einfluss der Herstellungsverfahren und -qualitäten auf die Durchschlagzeiten.

Für die Hersteller ist es sehr aufwändig, die Isoliersysteme und deren Verarbeitungsqualität zu testen bzw. zu über-

wachen, da Prüfungen nach der Standardmethode IEEE 1043 Std¹⁾ einen sehr hohen Materialaufwand bedingen. Es existieren damit nur wenige Resultate von Lebensdaueruntersuchungen, welche auf Grund der geringen Probenanzahl zudem noch eine hohe statistische Unsicherheit aufweisen. Aus Sicht der Kraftwerksbetreiber, welche neue Generatoren kaufen oder alte Generatoren neu wickeln lassen, ist es praktisch unmöglich, die Güte der Isolierung über den Abnahmetest hinaus zu überprüfen. Oft müssen sie daher auf die Aussagen der Hersteller vertrauen.

Aus diesen Gründen wurde an der ETH Zürich eine neue Prüfmethode entwickelt, die es erlaubt, Maschinenisolierungen mit wesentlich weniger Aufwand zu testen, als es Prüfungen nach Norm erfordern.²⁾ Die Vorstellung der neuen Prüfmethode, deren Verifikation im Vergleich zu Normtests sowie deren Anwendung zur Beurteilung von Wicklungsisolierungen

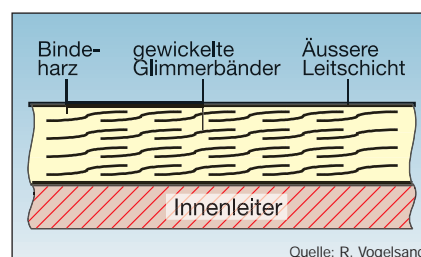


Bild 1 Struktur einer Wicklungsisolierung
Halbüberlappende Glimmerbänder

gen verschiedener Hersteller sind Gegenstand dieses Beitrags.

Aufbau einer Wicklungsisolierung für rotierende HS-Maschinen

Die Wicklungsisolierung einer rotierenden HS-Maschine besteht aus Glimmer, einem Trägermaterial (Polyethylenfolie oder Glasgewebe) und dem Bindeharz. Diese Kombination wird in Bandform hergestellt und als Glimmerband bezeichnet. Das Band wird um den elektrischen Leiter gewickelt und mit Harz imprägniert. Die Imprägnierung erfolgt durch das «Vakuum Pressure Impregnation (VPI)»-Verfahren oder durch das «Resin Rich (RR)»-Verfahren. Zusammen mit dem Aussen- und Endenglimmschutz (AGS/EGS) ergibt dieser Verbund die fertige Wicklungsisolierung (Bild 1).

Neue Prüfanordnung mit eingebetteter Elektrode

Grundlagen

Wird eine Hochspannungsisolierung durch die angelegte Spannung belastet, so wird die elektrische Festigkeit des Materials geschwächt. Der endgültige Durchschlag einer Isolierung ist Folge einer fortschreitenden Beschädigung des Isolierstoffes, der elektrischen Alterung. Die durch die Beschädigung im Isolierstoff entstehende baumartige Struktur wird als «Electrical Treeing» bezeichnet. Auf Grund der inhomogenen Struktur der Isolierung oder möglicher Beschädigungen des Aussen- und Endenglimmschutzes bzw. der inneren Leitschicht muss mit der Entstehung des Electrical Treeings³⁾ bereits vom Beginn der Lebensdauer an gerechnet werden [4–9]. Im Gegensatz zur homogenen Isolierung von Kabeln, wird das Electrical Treeing in Wicklungsisolierungen durch die Barrieren der Glimmerbänder gehindert. Die Durchschlagzeit T_{bd} lässt sich gemäss Formel 1 aus der Entstehungszeit der Trees T_{ti} und ihrer Ausbreitungszeit T_{tp} bestimmen.

$$T_{bd} = T_{ti} + T_{tp} \quad (1)$$

bd: Breakdown; ti: Tree Inception; tp: Tree Propagation

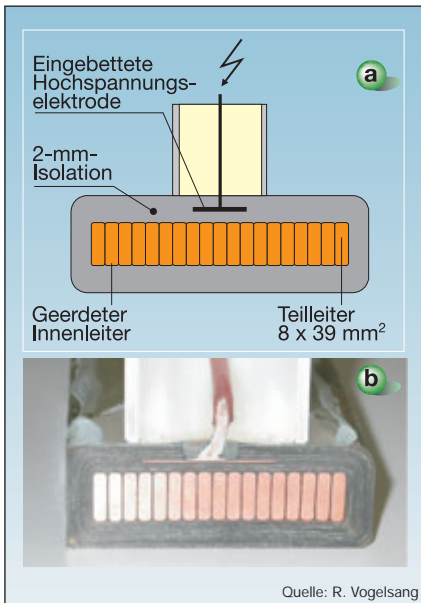


Bild 2 Eingebettete Elektrode

Bild 2a: Aufbau der neuen Prüfmethode mit eingebetteter Elektrode; Bild 2b: Ansicht der eingebetteten Elektrode in einer Wicklungsisolierung.

Da der Tree meist an den Kanten des Innenleiters oder möglicher Beschädigungen des AGS/EGS entsteht [4, 6–9], kann man T_{ti} als ein Mass für die Güte des Innenleiters und des AGS/EGS betrachten. Im Gegensatz dazu ist T_{tp} ein Mass für die Güte der Isolierung. Für eine vereinfachte Beurteilung der Güte der Isolierung reicht damit die Bestimmung des Zeitintervalls T_{tp} vollkommen aus. Dieser Effekt wurde in der neu entwickelten Prüfanordnung genutzt, indem das Electrical Treeing künstlich erzeugt wird und die Zeit des Einsetzens der Trees T_{ti} auf $T_{ti} = 0$ gesetzt wurde. Mit der im Test erhaltenen Durchschlagzeit T_{bd} wird damit also nur die Ausbreitungszeit T_{tp} der Trees, also ein reiner Materialparameter bestimmt: die «Güte» des Materials.

Aufbau der neuen Prüfanordnung

Bei der neuen Prüfanordnung wird ein Kupferplättchen von $20 \times 20 \text{ mm}^2$ mit einer Dicke von 0,2 mm in die Isolierung eingebettet und mit einem Kabel verbunden. Es dient als Hochspannungselektrode. Durch die extreme Feldüberhöhung an den Kanten des Plättchens startet das Electrical Treeing sofort (weniger als 10 s nach dem Einschalten der Spannung). Um ungewollte äussere Entladungen zu vermeiden, wurde oberhalb des Kupferplättchens noch Isoliermaterial aufgebracht und die Kabelverbindung in Epoxidharz eingegossen. Die Struktur der neuen Prüfmethode sowie ein Bild

einer Isolierung mit eingebetteter Elektrode sind in Bild 2 zu sehen.

Mit der neuen Prüfanordnung wurden längs eines 1 m langen Wicklungsstabs vier Elektroden in gleichen Abständen eingebettet. Dies ermöglicht es, an einem Generatorstab mehrere Tests durchzuführen.

Vergleich mit Test nach Norm IEEE 1043

Um die Messergebnisse beurteilen zu können, wurden Versuche mit der eingebetteten Elektrode und Versuche an Wicklungsisolierungen nach Norm IEEE 1043⁴⁾, durchgeführt. In beiden Tests wurden ausser der Präparation alle anderen Parameter konstant gehalten (gleiche Isolierdicke von 2 mm, gleiche Spannung von 32 kV rms, gleiche Temperatur von $20 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$, gleicher Leiterquerschnitt von $8 \times 39 \text{ mm}^2$).

Um die allgemeine Gültigkeit der Methode mit der eingebetteten Elektrode zu zeigen, wurden 3 Isoliersysteme mit signifikant unterschiedlichen Durchschlagzeiten gewählt. Die elektrische Prüfung nach IEEE 1043 wurde entsprechend der Norm durchgeführt [10, 11]. Die Durchschlagzeiten wurden mittels einer 2-parametrischen Weibull-Verteilung⁵⁾ analysiert. Nach Norm IEEE 1043 wurden 30, mit der eingebetteten Elektrode 10 Tests durchgeführt.

Vergleich der Durchschlagzeiten

Die Messung der Durchschlagzeiten (Bild 3) zeigt, dass es zwischen den beiden Testmethoden keinen signifikanten

Unterschied in den 63%-Quantilen gibt, da sich die Konfidenzbereiche überlappen. Signifikante Unterschiede entstehen hingegen durch die Wahl der Materialien. Mit der Übereinstimmung der Resultate für die unterschiedlichen Materialien, wurde die neue Messmethode verifiziert und ihre allgemeine Gültigkeit für Wicklungsisolierungen gezeigt. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass mit nur 3 Wicklungsstäben mit eingebetteten Elektroden die gleiche statistische Aussage gewonnen werden kann wie mit 30 Stäben nach Norm IEEE 1043.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse in Bild 3, dass die Durchschlagzeit des Materials bei elektrischer Belastung hauptsächlich von der Ausbreitung der Trees bestimmt wird. Mit dem Einschalten der Spannung ist – auch bei Stäben mit AGS/EGS – mit Einsetzen von Trees zu rechnen. Da dies für das Material der Isolierungen von grosser Bedeutung ist, wurden das Einsetzen der Trees sowie die Durchschlagwege mittels Schlibbildern analysiert.

Analyse des Einsetzens von Trees und Verlauf des Durchschlagwegs

Die Schlibbilder des Materials zeigen, dass Hohlräume zwischen Teilleitern zur Feldüberhöhung und damit zum Einsetzen von Trees führen. Bild 4a zeigt den Hohlraum zwischen den Teilleitern und einen Tree, der aus einem Hohlraum heraus entstanden ist. Berechnungen haben ergeben, dass die Feldüberhöhungen in solchen Hohlräumen bei den üblichen Kantenradien ausreichen, um die elektrische Festigkeit des angrenzenden Harzes

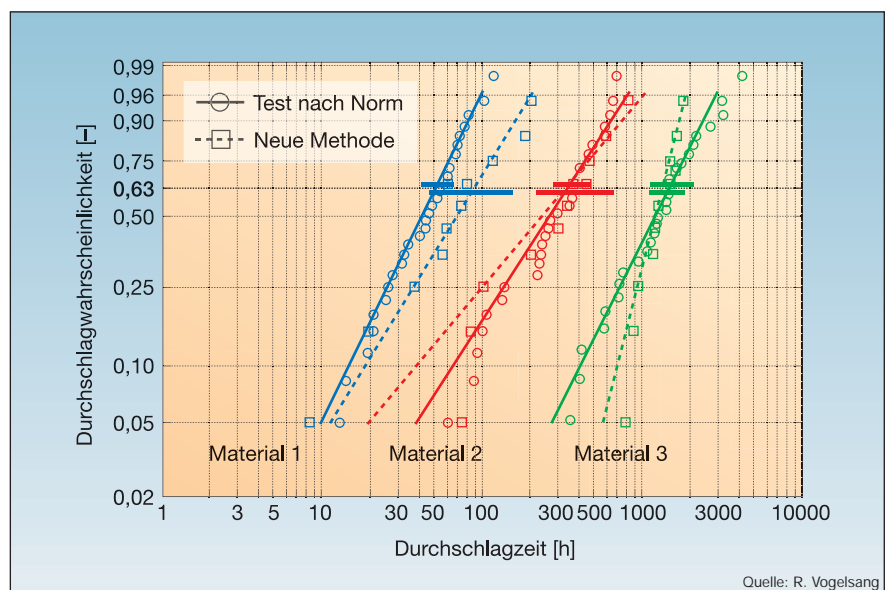


Bild 3 Vergleich der gemessenen Durchschlagzeiten

Gemessen wurde nach Norm IEEE 1043 sowie mit der Methode der eingebetteten Elektrode, die Durchschlagzeiten sind in einem Weibull-Diagramm für alle 3 getesteten Materialtypen dargestellt.

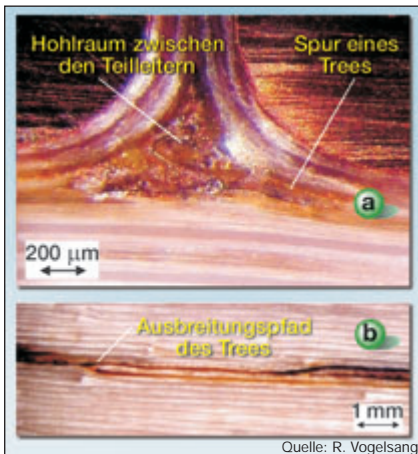


Bild 4 Electrical trees in einer Isolierung

Bild 4a: Entstehung eines Trees in einem Hohlraum;
Bild 4b: Ausbreitung des Trees in einer Wicklungsisolierung

zu überschreiten und einen Electrical Tree selbst bei Nennspannung zu initiieren [9].

Die aufgenommenen Durchschlagpfade zeigen, dass sich der Tree einen Weg durch die Isolierung um die Glimmerbänder herum bahnt. An Schwachstellen – beispielsweise ein schlechtes Interface zwischen den Glimmerschichten, Delaminierungen oder geschädigte Glimmerbänder – kann der Tree schneller vorwachsen. Dabei breitet er sich je nach Material bis zu ± 10 cm um den eigentlichen Durchschlagpfad aus. Er überwindet verschiedene Barriereebenen meistens an Stellen der Bandüberlappungen, wie in Bild 4b zu sehen [9].

Vorteile der neuen Testmethode

Der grösste Vorteil des Messens mit der eingebetteten Elektrode ist vor allem die enorme Einsparung an Material. Dies wird erreicht, da die Anzahl der Samples bei gleich bleibender Aussagefähigkeit (Bild 3) stark reduziert werden kann. So liefert beispielsweise ein Generatorstab von 1 m Länge nach der herkömmlichen Methode 1, nach der neuen Prüfmethode aber 4 Messergebnisse, was einer Materialeinsparung von 75% entspricht. Die Materialeinsparung vergrößert sich mit zunehmender Länge der Generatorstäbe.

Des Weiteren können mit der eingebetteten Elektrode auch kürzere Stabstücke für die Tests verwendet werden, da kein Bereich für den EGS benötigt wird. Zudem wird das Messergebnis nicht durch etwaige Einflüsse des EGS und AGS bestimmt.

Trotz der vielen Vorteile der neuen Methode gegenüber der Norm IEEE 1043

ist sie als ergänzende Prüfmethode anzusehen. Mit ihr sollen Tests in Forschung und Entwicklung mit weniger Materialaufwand sowie zur Beurteilung verschiedener Materialien in der Produktion durchgeführt werden. Abnahmetests für Stäbe von Wicklungsisolierungen sollten weiterhin nach Norm IEEE 1043 durchgeführt werden.

Beurteilung von Stäben unterschiedlicher Fertigungsqualitäten

Der Einfluss der Herstellungsverfahren und -qualitäten auf die Durchschlagzeiten der Isolierungen ist bisher noch nicht beschrieben worden. Für diese Untersuchungen wurde die neue Prüfmethode angewendet, wodurch die Prüfkosten für die in der Produktion sehr teuren Stäbe erheblich reduziert werden konnten. Bei den Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass die Verarbeitungsqualität entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer der Materialien hat.

Nachfolgend wird an je einem Beispiel für VPI- und RR-Isolierungen gezeigt, wie die Güte der Materialien von fünf unterschiedlichen Lieferanten beurteilt werden kann.

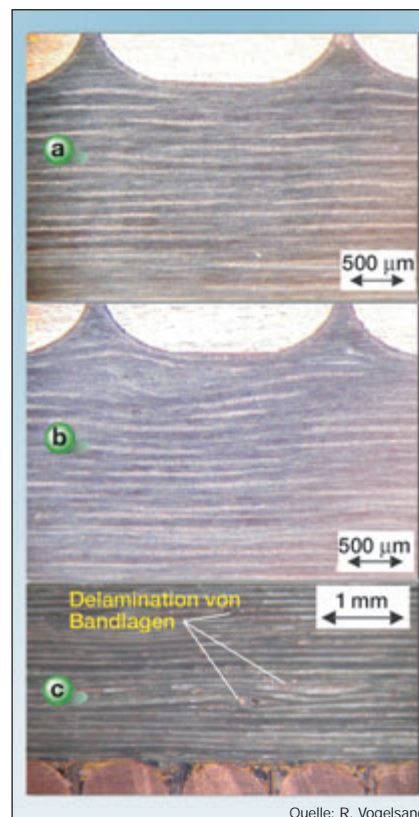


Bild 5 VPI-Wicklungsisolierung

Bild 5a: bei Referenzfertigung; Bild 5b: bei Fertigung durch Firma 2; Bild 5c: bei Fertigung durch Firma 1.

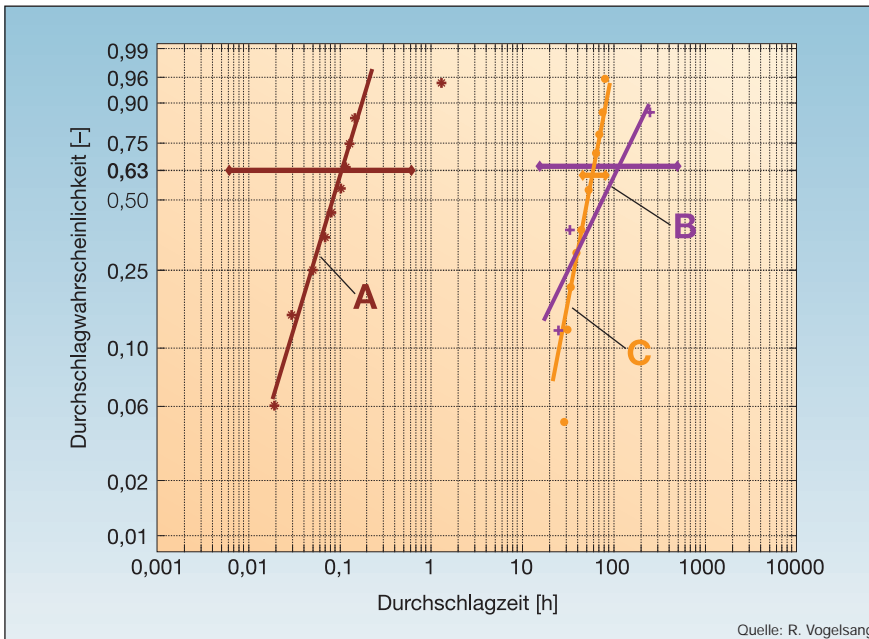


Bild 6 Durchschlagzeiten von VPI-Isolierungen unterschiedlicher Firmen

A: Industriell von Hand gewickelte VPI-Isolierung von Firma 1; B: Industriell von Maschine gewickelte VPI-Isolierung von Firma 2; C: VPI-Isolierung von Maschine gewickelt aus Referenzfertigung

VPI-Isolierungen

Die zu vergleichenden VPI-Isolierungen wurden aus den gleichen Glimmerbändern gefertigt. Sie unterscheiden sich in der Art der Wicklung, wie:

- A: Industriell von Hand gewickelte VPI-Isolierung von Firma 1
- B: Industriell von Maschine gewickelte VPI-Isolierung von Firma 2
- C: VPI-Isolierung von Maschine gewickelt aus Referenzfertigung

Bild 5 zeigt die Strukturen der Isolierung der drei Fertigungsarten.

Die Schlibbilder zeigen deutlich, dass sowohl das Referenzmaterial als auch das maschinengewickelte Material der Firma 2 eine sehr gute Qualität aufweisen. Im Gegensatz dazu zeigt die Struktur der handgewickelten Isolierung von Firma 1 sowohl Hohlräume als auch Delaminierungen zwischen den Bandlagen.

Bild 6 zeigt den Vergleich der Durchschlagzeiten gemessen mit der Methode der eingebetteten Elektrode in einem Weibull-Diagramm für alle 3 getesteten Herstellungsarten. Die Resultate zeigen keinen signifikanten Unterschied in den Durchschlagzeiten zwischen dem Referenzmaterial und jenem der Firma 2. Dies zeigt, dass die Herstellung durch Maschinenwicklung in Firma 2 eine sehr gute Qualität liefert. Die schlechte Wickelqualität von Firma 1 hingegen führt zu signifikant geringeren Durchschlagzeiten. Der Unterschied in den 63%-Quantilen (Bild 6) beträgt mehr als 2 Größenordnungen.

Die Ursache für diesen Unterschied wird in der Art der Wicklung vermutet. Es ist anzunehmen, dass mit Handwicklung kein konstanter Wickelzug aufrechterhalten werden kann. Dies führt dazu, dass die Bänder an den Kanten eng anliegen und im Bereich der Flachstücke des Stabes Ablösungen des Bandes und damit Hohlräume auftreten. Diese begünstigen wiederum die Ausbreitung der Electrical Trees und führen zu reduzierten Durchschlagzeiten.

Für den praktischen Betrieb scheint es wichtig zu erwähnen, dass die Materialien den Eingangstest nach Norm bestanden hätten. Dabei werden die Stäbe durch einen 1-Minutentest nach IEC 60243-1 Std [12] und IEC 1212.2 Std [13] geprüft. Wäre der Test an den schlechten Stäben durchgeführt worden⁶⁾, so hätten ihn diese bestanden, obwohl die Durchschlagzeiten – und somit das Isolier- und Lebensdauerpotenzial – wesentlich geringer ist als bei guter Verarbeitung.

RR-Isolierungen

Die zu vergleichenden RR-Isolierungen wurden aus 2 unterschiedlichen Materialien gefertigt. Sie unterscheiden sich in der Art der Wicklung, wie:

- D: Industriell von Hand gewickelte RR-Isolierung II von Firma 3
- E: Industriell von Maschine gewickelte RR-Isolierung I von Firma 4
- F: RR-Isolierung I von Maschine gewickelt aus Referenzfertigung
- G: RR-Isolierung II von Maschine gewickelt aus Referenzfertigung

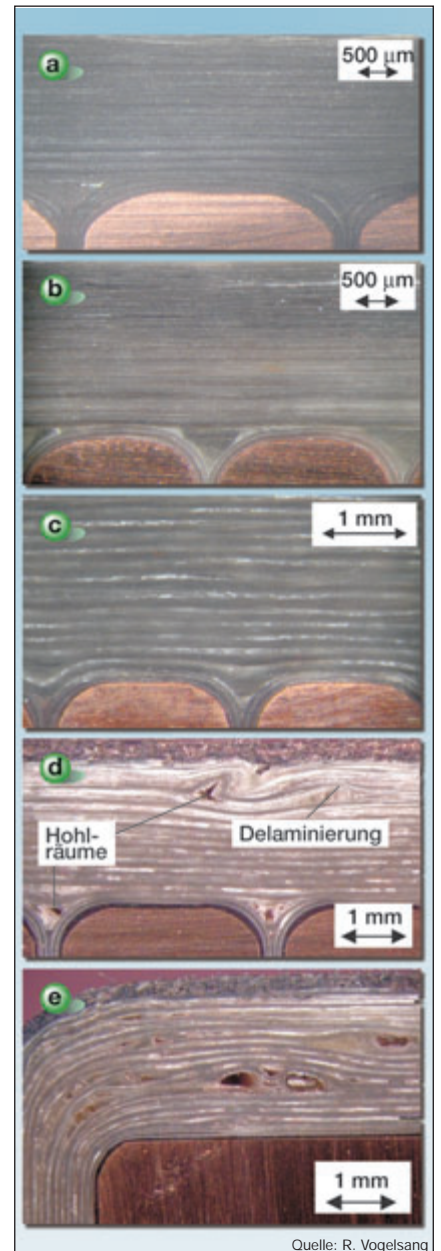


Bild 7 RR-Wicklungsisolierung

Bild 7a: Material I bei Referenzfertigung; Bild 7b: Material I bei Fertigung durch Firma 3; Bild 7c: Material II bei Referenzfertigung; Bild 7d: Material II bei Fertigung durch Firma 4; Bild 7e: Hohlräume in der RR-Wicklungsisolierung II bei Fertigung durch Firma 4

Die Schlibbilder von Bild 7a und b zeigen, dass die Strukturen der Referenzfertigung und der maschinengewickelten Fertigung von Firma 3 gleich sind. Beide Isolierungen haben keine Einschlüsse oder Delaminierungen.

Die Struktur von Material II, welches im Anwendungslabor gefertigt wurde, ist von einer hohen Qualität (Bild 7c). Im Gegensatz dazu weist die Struktur der handgewickelten Isolierung von Firma 4 mit ihren vielen Hohlräumen und Delaminierungen eine sehr schlechte Qualität auf (Bilder 7d und 7e).

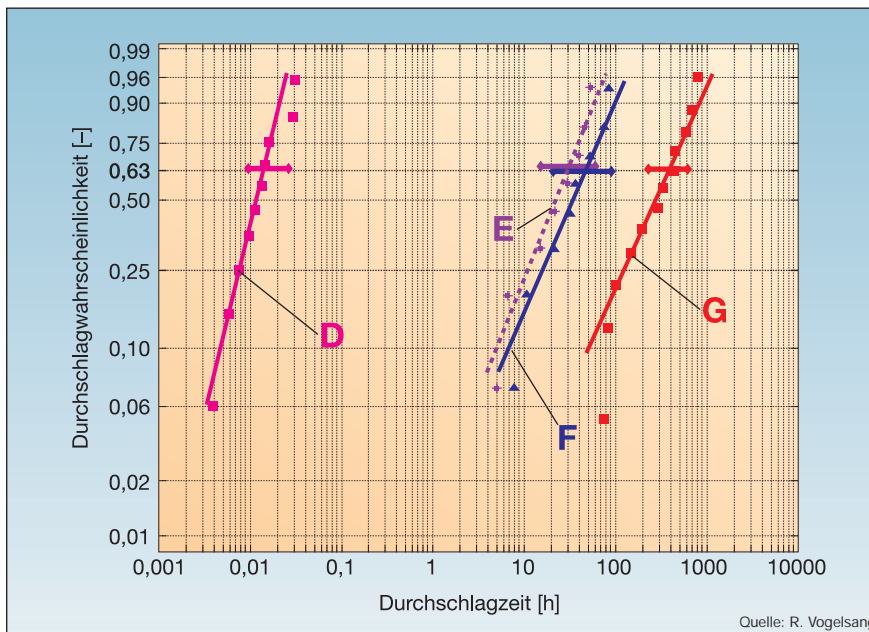


Bild 8 Durchschlagzeiten von RR-Isolierungen unterschiedlicher Firmen

D: Industriell von Hand gewickelte RR-Isolierung II von Firma 4; E: Industriell von Hand gewickelte RR-Isolierung I von Firma 3; F: RR-Isolierung I von Maschine gewickelt aus Referenzfertigung; G: RR-Isolierung II von Maschine gewickelt aus Referenzfertigung.

Bild 8 zeigt den Vergleich der Durchschlagzeiten gemessen mit der Methode der eingebetteten Elektrode in einem Weibull-Diagramm für alle 4 getesteten Fertigungsarten. Die Resultate zeigen keinen signifikanten Unterschied in den Durchschlagzeiten zwischen dem Referenzmaterial und demjenigen der Firma 3. Die Herstellung durch Maschinenwicklung in Firma 3 liefert also eine sehr gute Qualität. Die schlechte Wickelqualität von Firma 4 hingegen führt zu Durchschlagzeiten, die signifikant geringer sind als die des Referenzmaterials. Der Unterschied in den 63%-Quantilen beträgt dabei mehr als 4 Grössenordnungen.

Die Ursache für diesen Unterschied ist wie beim VPI-Material in der Art der Wicklung zu suchen. Auch hier kann angenommen werden, dass mit Handwicklung kein so konstanter Wickelzug aufrechterhalten werden kann wie bei Maschinenwicklung. Dies führt auch hier dazu, dass die Bänder an den Kanten eng anliegen und im Bereich der Flachstücke des Stabes Ablösungen des Bandes bzw. Hohlräume auftreten, welche die Ausbreitung des Trees begünstigen und zu reduzierten Durchschlagzeiten führen. Dass der Unterschied in den RR-Materialien grösser ist als bei den VPI-Materialien liegt an der Art der Imprägnierung. Im Gegensatz zu VPI reicht im RR-Prozess die begrenzte Menge Harz in den Bändern nicht aus, um sehr viele und/oder grosse Hohlräume auszufüllen.

Das RR-Verfahren ist damit fehleruntoleranter als das VPI-Verfahren.

Auch bei den RR-Isolierungen scheint es für den praktischen Betrieb wichtig zu erwähnen, dass die meisten Proben den 1-Minutentest nach IEC 60243-1 Std [12] und IEC 1212.2 Std [13] bestanden hätten, obwohl die Durchschlagzeiten – und somit das Isolier- und Lebensdauerpotenzial – wesentlich unter jenen der Materialien aus guter Verarbeitung liegen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Schlussfolgerungen

Die Verwendung der Methode mit eingebetteter Elektrode empfiehlt sich aus verschiedenen Gründen.

Im Vergleich zur Messung nach Norm IEEE 1043 können Tests bei gleicher statistischer Aussage mit wesentlich geringerem Aufwand und stark reduziertem Einsatz von Material durchgeführt werden.

Da die Qualität der Isolierung und damit die potenzielle Lebensdauer auch vom Hersteller der Isolierungen abhängen, empfiehlt es sich, ausgewählte Isolierungen vor der Verwendung zu testen und mit Durchschlagzeiten der Referenzmaterialien zu vergleichen. Hierbei weist die neue Testmethode auf Grund des geringeren Materialverbrauchs grosse Kostenvorteile auf, was es erlaubt, die Herstellung regelmässig zu überprüfen und so Fehler in der Herstellung, welche zu

einer starken Reduktion der Durchschlagzeiten führen können, zu vermeiden.

Da Proben mit sehr schlechter Qualität eines Materials bei den $3 \cdot U_n$ -Tests bereits nach wenigen Minuten versagen, die Gesamtdurchschlagzeiten des Materials bei guter Qualität jedoch einige zehn bis zu tausend Stunden betragen, wird empfohlen, die vorgeschriebene Testdauer von 1 Minute auf etwa 10 Minuten auszuweiten. Sehr schlechte Materialien können damit erkannt werden, ohne dass intakte Strukturen der Isolierungen signifikant geschädigt würden.

Ausblick

Eine Testmethode zu haben, die mit wesentlich weniger Aufwand mehr Ergebnisse bei gleicher Aussagekraft erlaubt, ist gerade für Forschungsinstitute ein grosser Vorteil. Daher sind weitere Untersuchungen geplant, und es soll der Einfluss der Verarbeitungsqualität auf die Lebensdauer von Wicklungsisolierungen breiter abgestützt beschrieben werden. Weiterhin soll geprüft werden, ob die neue Methode mit eingebetteter Elektrode dazu geeignet ist, Tests an betriebsgealterten Stäben für Restfestigkeitsbestimmungen durchzuführen.

Referenzen

- [1] O. V. Thorsen, M. Dalva: A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals and oil refineries. IEE Trans. on Ind. Appl., vol. 31, no. 5, Seiten 1186–1196, 1995.
- [2] N. Srb: Erfahrungen mit Stossspannungsprüfungen an elektrischen Maschinen. Allianz Report 70, Heft 2, Seiten 58–62, 1997.
- [3] IEEE Motor Reliability Working Group: Report of large motor reliability survey of Industrial and commercial installations, Part I and Part II. Committee report. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-21, no.4, Seiten 853–872, 1985.
- [4] K. Hee-Gon, K. Hee-Soo, P. Yong-Kwan: A study on the analysis of degradation mechanism for generator stator windings. 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Conference Proceedings, Seoul, Korea, Seiten 985–989, 1997.
- [5] T. Tsukui, T. Isogai, G. Takahashi, K. Kaneko: Electrical breakdown stress of mica-insulated high voltage coils. J. Electrical Engineering in Japan, vol. 96, no. 6 (translated version in vol. 96A, no. 11, Seiten 519–526), 1976.
- [6] R. Vogelsang, R. Brütsch, K. Fröhlich: Effect of electrical tree propagation on breakdown in mica insulations. 13th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Delft, Niederlande, Konferenzband, Seiten 1–4, 2003.
- [7] K. Engel: Bewertung von Teilentladungen in spaltförmigen Isolierstoffdefekten. Doktorarbeit Universität Dortmund, Deutschland, Shaker Verlag Aachen, Deutschland 1998.
- [8] K. Kimura, Y. Kaneda: The Role of Microscopic Defects in Multistress Aging of Micaceous Insulation. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 3, Seiten 426–432, 1995.
- [9] R. Vogelsang: Time to breakdown of high voltage winding insulations with respect to microscopic

properties and manufacturing qualities. Doktorarbeit Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich, Verlag Hartung-Gorre, Konstanz, Deutschland, ISBN: 3-89649-965-3, 2004.

- [10] IEEE Std 1043-1996: IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils. Voltage Endurance Committee of the Dielectrics and Electrical Insulation Society, 1996.
- [11] IEEE Std 1553-2002: IEEE Trial-Use Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators. IEEE Power Engineering Society, 2002
- [12] IEC 60243-1: Electrical strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies. Second Edition 1998.
- [13] IEC 1212-2: Industrial rigid round laminated tubes and rods based on thermosetting resins for electrical purposes – Part 2: Methods of test. First Edition 1995.

Angaben zu den Autoren

Dr. **Ruben Vogelsang** studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden (TUD, D) und der University of Sheffield (UK). Von 1999 bis 2000 arbeitete er an der TUD im Bereich polymerisierter Gleichspannungskabel. Danach begann er an der Eidgenössisch Technischen Hochschule (ETH) Zürich als Doktorand und schloss im August 2004 mit dem Thema «Time to breakdown of high voltage winding insulations with respect to microscopic properties and manufacturing qualities» ab. Parallel zum Doktorat studierte er Betriebswirtschaft an der ETH Zürich, was er 2004 als Master of Business Administration (MBA) abschloss. Seit Januar 2005 arbeitet er bei der ABB Schweiz AG in Zürich Oerlikon.
ruben.vogelsang@ch.abb.com

Dr. **Rudolf Brüttsch** studierte Chemie an der Universität Bern und erhielt sein Doktorat 1972 von der gleichen Universität. Von 1972 bis 1986 arbeitete er im Bereich F&E von metallischen, keramischen und polymeren Werkstoffen. 1986 wechselte er zur Von Roll Isola AG und ist heute Manager für Technisches Marketing der Geschäftseinheit Elektrik der Von Roll Isola, Breitenbach, SO.
rudolf.bruetsch@vonroll-isola.com

Prof. Dr. **Klaus Fröhlich** erhielt Diplom und Doktorat in Elektrotechnik von der Technischen Universität (TU) Wien. Nach 11 Jahren Tätigkeit in den Bereichen Leistungsschalter und Hochspannungstechnik

bei BBC (später ABB) Schweiz wurde er 1990 als ordentlicher Professor an die TU-Wien berufen. Seit 1997 arbeitet er als ordentlicher Professor für Hochspannungstechnologie an der Eidgenössisch Technischen Hochschule Zürich. Prof. Fröhlich ist Fellow IEEE, Vorstandsmitglied von Electrosuisse, Mitglied des Cigré-Nationalkomitees und Chairman von Cigré-Studien-Komitee A3 (High Voltage Equipment).
froehlich@eeh.ee.ethz.ch

Dr. **Bernhard Fruth** studierte Elektrotechnik an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen, Deutschland, und schloss sein Doktorat 1986 an der gleichen Hochschule ab. Von 1987 bis 1992 arbeitete er als Manager für die Hochspannungsgruppe der ABB Corporate Research in Baden. Seit 1992 betreibt Dr. Fruth seine eigene Firma mit Schwerpunkt Diagnostik und Teilentladungsmonitoring rotierender Maschinen. Er ist Geschäftsführer und Technischer Direktor der Firma PD Tech Power Engineering AG in Neuenhof, AG.
fruth@pdtech.ch

¹ «IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils» nach [10]

² Die Arbeit entstand im Rahmen eines KTI-Projektes und Doktorats an der ETH Zürich. Fachliche und materielle Unterstützung erhielten die Autoren von der Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg (FR), der Ofima/Ofible Kraftwerke AG (TI), der Gebrüder Meier AG (ZH), der Astom AG (AG) sowie der Allianz Versicherungen (D). Die Arbeiten werden an der ETH Zürich fortgesetzt.

³ Gelegentlich werden die Trees nur als Entladungen bezeichnet.

⁴ Bei diesem Test nach [10] werden die Stäbe mit Aussen- und Endenglimmschutz getestet.

⁵ Die Weibull-Verteilung ist eine statistische Verteilung, die in der Praxis häufig bei Untersuchungen von Lebensdauern oder Ausfallraten verwendet wird. Ihr grosser Vorteil liegt darin, dass einzelne Ausfälle (oder Durchschlagzeiten) entsprechend berücksichtigt werden und gesamte Ausfallraten (oder Lebensdauern) vergleichend bewertet werden können. Sie ist benannt nach dem Schweden Waloddi Weibull (1887-1979).

⁶ Die verwendete Spannung entspricht etwa dem der Anforderung aus der Norm für die Isolierdicke von 2 mm.

Evaluation des isolements de machines

Une électrode incorporée permet de compléter l'évaluation des isolements de machines

Dans le marché dérégularisé et libéralisé de l'énergie, la fiabilité des machines à haute tension revêt une importance toujours croissante. Etant donné que les essais de durée de vie utile pour matériaux isolants exigent un travail très considérable, il a été développé à l'EPF de Zurich une méthode permettant une évaluation des isolants de machines à bien moindre frais. L'analyse des principaux facteurs influençant le temps de claquage montre que la qualité de fabrication a une influence considérable sur la structure microscopique et, partant, sur le temps de claquage des isolants d'enroulements. Les différences de temps de claquage – et donc de la durée de vie potentielle – peuvent atteindre 4 ordres de grandeur.