

Verschmutzungsverhalten von Hochspannungsisolatoren und Ableitern

Von 1980 bis 2005 wurde das Verschmutzungsverhalten unterschiedlicher Hochspannungsisolatoren und Überspannungsableiter im Freiluftprüffeld „Glogów“ untersucht. Fortschritte im Umweltschutz und neue Technologien haben zu einer bedeutenden Abnahme der Staub- und Gasemissionen in der Nähe von Kupferhütten geführt. Als direkte Folge hat sich der Umweltverschmutzungsgrad des Gebiets von vier (sehr hoch) in den 1980er-Jahren auf eins (leicht) im Jahr 2003 reduziert. Die Überschlagnspannung von Porzellanisolatoren wurde 1987 unter natürlichen Bedingungen und in den Jahren 2002 bis 2004 nach Befeuchtung mit Spritzwasser gemessen. Ferner wurden die Spannungsfestigkeit von Keramikisolatoren mit der von silikon- bzw. PTFE-beschichteten Isolatoren verglichen und die Messwerte der Innentemperatur von Metalloxid-Überspannungsableitern in einem Keramikgehäuse dargestellt.

Starke Verschmutzungen im „Kupfergebiet“ nahe Legnica (Liegnitz)/Polen haben zu verschmutzungsbedingten Überschlagnen an Freiluftisolatoren im Winter 1978/1979 geführt. Infolgedessen wurde 1980 das Freiluftprüffeld „Glogów“ errichtet. Die Station wird von einem 2-MVA-Leistungstransformator der TuR Dresden (heute Highvolt [1]) gespeist. Er liefert eine variable Spannung zwischen 0 V und 220 kV. Ähnliche Stationen wurden auch in anderen Ländern gebaut, z. B. Dungeness/Großbritannien, Boxberg (Baden)/Deutschland – Lengnrieden, Nässjö-Anneberg/Schweden, Martignes/Frankreich, Shiobara/Japan und Koeberg/Südafrika, um die Eigenschaften von Isolatoren unter natürlichen Bedingungen zu untersuchen. Durch den Test mittels künstlicher Verschmutzung des Isolators nach IEC 60507:1991-04 [2, 3] (Salznebel, Kaltnebelprüfung) oder die Untersuchungen zur beschleunigten Alterung von Kunststoffisolatoren nach

Dr.-Ing. Krystian Leonard Chrzan (50) hat Elektrotechnik an der Technischen Universität zu Breslau studiert, wo er 1987 auch promoviert wurde. Er befasst sich als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektrotechnologie der TH Breslau mit der Thematik Freiluftisolierung, Ableiter und Blitzschutz. E-Mail: chrzan@pwr.wroc.pl



Bild 1. Die Leistungstransformatoren: Symmetrietransformator (l), Regeltransformator (Mitte), Hochspannungstransformator 6/200 kV (r)

IEC 61109:1992-03 [4, 5] lassen sich nicht alle Faktoren nachbilden, die den Isolator unter den Betriebsbedingungen beeinflussen.

Das Freiluftprüffeld „Glogów“

Das Prüffeld auf dem Gelände der Kupferhütte Glogów (Glogau)/Polen wurde mit Transformatoren von TuR Dresden (Highvolt) ausgerüstet und 1980 in Betrieb genommen [6]. Die wichtigsten Kenndaten der Einspeisung sind: Bemessungsstrom 10 A, Bemessungsspannung 6/200 kV, Leistung 2 MVA, Kurzschluss-

Krystian Leonard Chrzan

spannung 8,5 %, Kurzschlussstrom 150 A. Die Leistung liefern drei Transformatoren: Symmetrietransformator ESDOM 6/1 kV (eingespeist über drei Außenleiter auf der 6-kV-Ebene), Regeltransformator FT/D/EO 1000/10 AL und Hochspannungstransformator 6/200 kV. Die Spannung kann mittels Eisenkern-Einstellung des Regeltransformators kontinuierlich angepasst werden. Während der Versuche, die 1987 durchgeführt worden sind, betrug die Spannung mit 70 kV 11 % mehr als die Leiter-Erde-Bemessungsspannung eines 110-kV-Systems. Die Transformatoren sind in Bild 1 dargestellt.

Die Randbedingungen im Freiluftprüffeld „Glogów“

Der Verschmutzungsgrad im Prüffeld „Glogów“ nahm besonders nach 1990 deutlich ab. Die Staub- und Schwefeldioxid-Emissionen im Jahr 2000 waren ungefähr 20-mal geringer als die Emissionen 1985. Deswegen sank der Staubniederschlag, welcher 1980 bis zu 9 g/m² am Tag betrug, auf 0,4 g/m² pro Tag im Jahr 2003 (Bild 2). Besonders hervorzuheben ist, dass gemäß polnischer Norm PN-E-06303:1998-06 [7] dieses Gebiet noch 1980 mit dem Umweltverschmutzungs-



grad vier (sehr hoch) und im Jahr 2003 mit dem Verschmutzungsgrad eins (leicht) klassifiziert wurde.

Es wurde herausgefunden, dass der industrielle Staub (einschließlich dem aus der Kupferhütte Glogów) schwer lösliche Salze (z. B. CaSO_4) beinhaltet. Demzufolge könnte zwischen Schichtleitfähigkeit und der Salzablagerungsdichte ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) ein nichtlinearer Zusammenhang bestehen. Diese Erkenntnis ist von Bedeutung für die Bewertung des Verschmutzungsgrads [8, 9]. Die 1985 durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass trotz sehr hoher Konzentration von Schwefeldioxid (SO_2) diese Gase eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu den Festkörper-Verschmutzungen spielen [10].

Prüfung der Keramikisolatoren

Mit den Aufzeichnungen der Ströme und Überschlänge wurde 1986 begonnen. Die Messungen der äquivalenten Salzablagerungsdichte ESDD und Staubablagerungsdichte DDD (Dust Deposit Density) wurden für einigen Typen der Langstabisolatoren und Glaskappenisolatoren des Typs PS16 eingesetzt. Die technischen Daten der Isolatoren sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die ESDD- und DDD-Messungen haben bewiesen, dass diese Parameter stark von

dem Profil des Isolators abhängig sind. Zum Beispiel war die DDD des Langstabisolators VKL 75/14 ungefähr zehnmal kleiner als die DDD des Massivstützers SWZP4 (vgl. Tabelle 2). Im Jahr 2000 wurden ähnliche Messungen bei Untersuchungen eines Stapels von drei Mittelspannungs-Massivstützern durchgeführt. Der Stapel wurde 50 cm über dem Boden

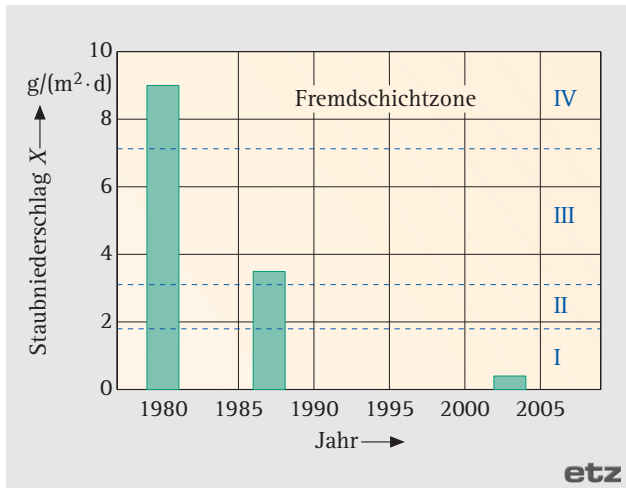


Bild 2. Der Staubniederschlag X auf dem Gelände des Prüffelds in den Jahren 1980, 1987 und 2003

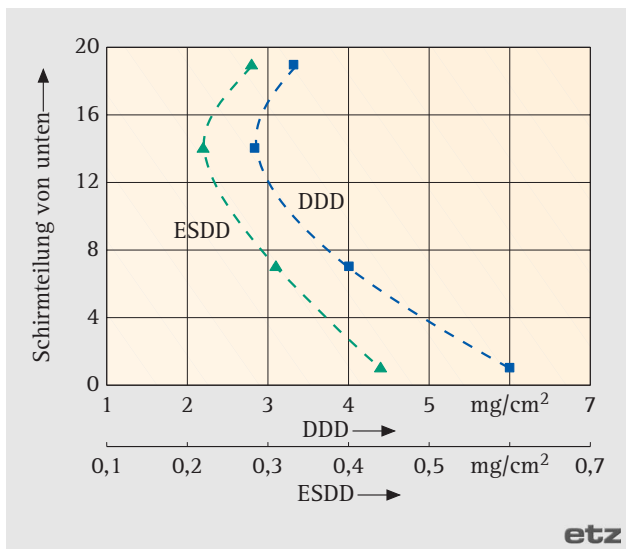


Bild 3. ESDD- und DDD-Messungen an einem Massivstützer SWZP4 (gemessen im Jahr 1987)

installiert. Die ESDD-Werte betragen $9 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (Oberteil), $16 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (Mitte) und $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (Unterteil). Die Messungen an den Massivstützern haben eine größere Abhängigkeit der ESDD-Werte von der Lage des Isolators über dem Boden als von der elektrischen Feldstärke gezeigt (Bild 3). Dabei sollte erwähnt werden, dass sich die höchste elektrische Feldstärke für die Massivstützer auf dem Oberteil des Isolators und die kleinste auf dem unteren Ende befindet. Die weiteren Ergebnisse zu ESDD- und DDD-Messungen wurden in einer früheren Veröffentlichung dargestellt [11].

Die Überschlänge wurden Mittels einer speziellen Sicherung aufgenommen (Bild 4). Der 1987 bestimmte spezifische Kriechweg eines Massivstützers SWZP4 betrug $18 \text{ mm}/\text{kV}$ (Zwischenphasenspannung). Dank der sauberen Umgebung im Jahr 2002 hat sich die Überschlängenspannung erhöht und der spezifische Kriechweg auf $13 \text{ mm}/\text{kV}$ abgenommen [6].

Tabelle 3 zeigt den in den Jahren 2001 und 2002 gemessenen spezifischen Kriechweg eines Massivstützers SWZP4 mit glasierter Oberfläche während der Fremdschicht-Überschlängensuche. Die sehr geringen Überschlängenspannungswerte wurden im Winter aufgenommen. Es stellte sich heraus, dass die Überschläng-



Bild 4. Massivstützer SWZP4 mit spezieller Sicherung

Isolatortyp	Länge Isolationsstrecke in mm	Schirmdurchmesser in mm	Kriechweg in mm	Formfaktor
LP 75/14	1 070	150	1 860	6,45
LPZ 75/27	1 060	175/150	3 000	9,1
SWZP4	1 020	220	2 760	5,8
PS16B	Kappenisolatoren	280	7 · 390	7 · 0,7

Tabelle 1. Technische Daten der Isolatoren

Verschmutzungsgrad in mg/cm ²	Isolatortyp			
	LP 75/14	LPZ 75/27	PS16B	SWZP4
ESDD _{max}	0,08	0,14	0,37	0,45
DDD _{max}	0,64	1,4	3,37	6,0

Tabelle 2. ESDD_{max} und DDD_{max}, gemessen an den Isolatoren in der Verschmutzungsprüfstation des Prüffelds „Glogów“ im Jahr 1987

Monat, Jahr	spez. Kriechweg in mm/kV	Umgebungstemperatur in °C
Oktober 2001	9	5
Dezember 2001	11	-4
Februar 2002	10	2
März 2002	6	4
Juni 2002	10	28
August 2002	8	20
Dezember 2002	13	-5

Tabelle 3. Spezifischer Kriechweg (umgerechnet auf die Zwischenphasenspannung), gemessen in den Jahren 2001 und 2002 an einem Massivstützer SWZP4

spannung im März 2002 doppelt so hoch wie die im Dezember 2002 war. Die Befuchtung des Isolators bei Umgebungstemperaturen unter 0 °C führt zum Aufbau einer dünnen Eisschicht. Die Verringerung der Durchschlagfestigkeit der Isolatoren im Winter wurde durch eine stärkere Schmutzablagerung als im Sommer verursacht (Mangel an Regen während des Winters).

Verhalten von Silikon-/PTFE-Beschichtungen und hydrophoben Glasuren

Im Jahr 1995 wurde auf die Massivstützer SWZP4 und auf einen Langstabilisator LP 75/27 eine RTV-Silikonschicht (RTV – Room Temperature Vulcanizing) aufgetragen. Ein Jahr später wurden dieselben Isolatoren mit einer Polytetrafluorethylen-(PTFE-)Beschichtung versehen.

Im Freiluftprüffeld „Glogów“ gibt es seit 1996 drei unterschiedliche Versionen des Massivstützers SWZP4:

- ohne Beschichtung (Originalzustand),
- mit Silikonbeschichtung und
- mit PTFE-Beschichtung.

Um die elektrische Festigkeit der Isolatoren zu vergleichen, wurde bei den Messungen eine modifizierte Auf- und Ab-Methode eingesetzt. Am Anfang wurden einige Schirme mit einem Draht über-

brückt. Danach wurde der Isolator mit Wasser (Leitfähigkeit 100 µS/cm) besprüht und eine Spannung von 100 kV angelegt. Die Versuche wurden bei gleicher Spannung mit den kürzeren und längeren Isolatoren durchgeführt. Bild 5 zeigt die Ergebnisse aus den Jahren 2001 bis 2003 als spezifischen Kriechweg in Zentimeter pro Kilovolt, umgerechnet auf die Zwischenphasenspannung.

Der spezifische Kriechweg wurde für Isolatoren mit einfacher Glasur auf 13 mm/kV bestimmt (vgl. Tabelle 3). Dieser Parameter war um ca. 30 % kleiner bei Isolatoren mit Silikonbeschichtung. Die Differenz wurde auf die hydrophoben Eigenschaften von Silikon zurückgeführt. Es ist zu betonen, dass die Überschlagspan-

Der spezifische Kriechweg der Isolatoren mit einer PTFE-Beschichtung war ca. 10 % länger als der solcher Isolatoren mit normal glasierter Oberfläche. Die PTFE-Oberfläche, zeigt auch in sauberem Zustand stark hydrophile Eigenschaften. Die hydrophoben Eigenschaften sind hingegen bereits nach zwei Jahren Betrieb verloren gegangen. Eine starke Degradation der Oberfläche zeigt sich besonders auf dem Strunk (isolierender Innenteil, aus dem die Schirme herausragen) des Isolators. Diese Veränderungen wurden wahrscheinlich durch elektrische Teilentladungen verursacht.

Die Prototypen der Isolatoren mit speziellen hydrophoben Glasuren wurden auf der Teststation über vier Jahre getestet. Die Glasuren wurden durch chemische Behandlungen oder durch elektrische Entladungen modifiziert, die Technologie der dritten Glasur ist unbekannt [12].

Das Verhalten von Verbundisolatoren

Die Prototypen der polnischen Verbundisolatoren wurden seit 1981 getestet [13]. Der größte Teil der Isolatoren wur-

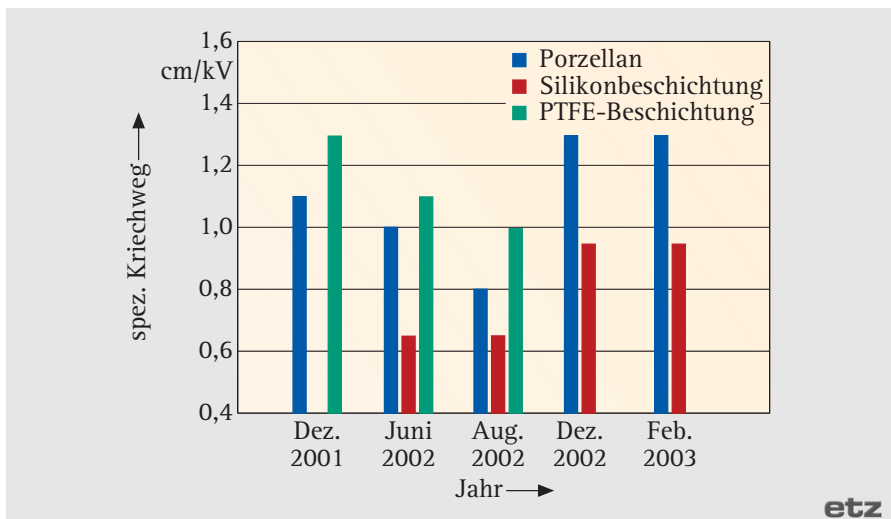


Bild 5. Spezifischer Kriechweg eines Massivstützers SWZP4 mit glasierter Oberfläche (Porzellan), Silikon- und PTFE-Beschichtung

Der spezifische Kriechweg der Isolatoren mit einer PTFE-Beschichtung war ca. 10 % länger als der solcher Isolatoren mit normal glasierter Oberfläche. Die PTFE-Oberfläche, zeigt auch in sauberem Zustand stark hydrophile Eigenschaften. Die hydrophoben Eigenschaften sind hingegen bereits nach zwei Jahren Betrieb verloren gegangen. Eine starke Degradation der Oberfläche zeigt sich besonders auf dem Strunk (isolierender Innenteil, aus dem die Schirme herausragen) des Isolators. Diese Veränderungen wurden wahrscheinlich durch elektrische Teilentladungen verursacht.

Die Prototypen der Isolatoren mit speziellen hydrophoben Glasuren wurden auf der Teststation über vier Jahre getestet. Die Glasuren wurden durch chemische Behandlungen oder durch elektrische Entladungen modifiziert, die Technologie der dritten Glasur ist unbekannt [12].

Die mit einer dicken Silikonschicht (Polastosil MV) versiegelten 20-kV-Epoxydharzisolatoren wurden in den Jahren 1986 bis 1990 untersucht. Ein aus drei



von diesen Isolatoren bestehen der Stapel mit einem Kriechweg von 3 · 60 cm wurde mit einer Spannung von 70 kV (spezifischer Kriechweg 15 mm/kV) erfolgreich getestet. In der gleichen Anordnung wurde in den Jahren 2000 und 2001 ein Stapel von drei Verbundmassivstützern aus Polymerbeton mit einem Kriechweg von 3 · 43 cm mit einer Spannung von 77 kV getestet. Nach zwei Jahren war der untere Isolator zerstört. Der untere Schirm war beschädigt, zusätzlich waren aufgrund



Bild 6. Wassertropfen auf einem verschmutzten RTV-Verbundisolator



Bild 7. Punktueller Überschlagschaden auf einem Isolatorzug ohne Schirme



Bild 8. Erosionsspuren auf einem Verbundisolatorzug vom Typ LTKC 25

Untersuchungen zeigen, dass ein vertikaler 100 cm langer Stab mit 2,5 cm Durchmesser nach ein paar Monaten zerstört war. Demgegenüber funktioniert der gleiche Stab in horizontaler Lage bei einer Spannung von 77 kV seit zehn Jahren, allerdings wurden nach acht Jahren Betrieb einige punktuelle Durchschlagschäden gefunden (Bild 7).

Die Oberfläche von einem Verbundisolatorzug vom Typ LTKC 25 wurde durch die elektrische Kriechwegbildung in nur 30 Tagen nach der Inbetriebnahme beschädigt (Bild 8). Die Isolationslänge beträgt 77 cm, was einen spezifischen Kriechweg von 6 mm/kV ergibt. Trotz eines sehr kurzen spezifischen Kriechwegs und der Kriechwegbildung in der Nähe beider Flansche, wurde der Isolator nicht zerstört. Die Kriechwegspuren haben sich in weiteren zwölf Monaten nicht vergrößert. Nach zwölf Monaten wurde ein Fremdschichtüberschlag festgestellt, welcher den Isolator nicht beschädigt hat.

Ein Stapel von vier Massivstützern aus hydrophoben Epoxydharz wird seit April 2003 untersucht. Der Kriechweg beträgt 4 · 60 cm. Nach den ersten 24 Monaten Betrieb wurden keine Erosionsspuren auf

1996 Metalloxidableiter vom Typ GXA 96 und GXAS 96 mit Porzellangehäusen untersucht. Die äußeren und inneren Ströme wurden über einen Strom-Impuls-Integrator CPI-1 (Transinor As [14]) aufgenommen. Über die Ergebnisse wurde in [15] berichtet. Die Temperatur des Varistors wurde mittels der digitalen Messeinrichtung Tynytalk (Gemini Data Loggers [16]) gemessen [17].

In den Überspannungsableiter GXA 96 wurden zwei Sonden im oberen und unteren Teil des Varistorstapels eingebaut. Bei der Messung des Temperaturunterschieds, bezogen auf die Umgebungstemperatur, konnte eine Temperaturerhöhung von 4 K im unteren und 7 K im oberen Teil festgestellt werden. Der geringe Temperaturunterschied zwischen dem oberen und unteren Teil des Ableiters ist auf eine unregelmäßige Spannungsverteilung entlang des Stapels und auf natürliche Konvektion innerhalb des Ableiter-Porzellengehäuses zurückzuführen. Daher hängt i. d. R. die gemessene Temperatur der Sonden nur von der Umgebungstemperatur ab, was durch mehrere Messreihen in Jahren 2001 bis 2005 bestätigt worden ist.

Jedoch konnten die Messsonden auch größere Temperaturunterschiede zeigen. Bild 9 zeigt einen untypischen Fall im Dezember 2003. Die Temperatur der oberen Messsonde war um 11 K höher als die der unteren. Der untypische Temperaturunterschied wurde vermutlich durch die unregelmäßige Spannungsverteilung auf dem verschmutzten Gehäuse verursacht. Die theoretischen Grundlagen des Einflusses der Verschmutzung auf die Temperaturverteilung entlang des Varistorstapels wurden in [18] beschrieben. Die höchste Temperatur von 56 °C wurde im Sommer 2005 gemessen. Die Umgebungstemperatur (im Schatten) betrug damals fast 40 °C.

Versehentlich wurde eine sehr hohe Spannung an den Varistorstapel angelegt. Die Spannung war wesentlich höher als die max. Betriebsspannung von 77 kV. Die Temperatur im Inneren der beiden Überspannungsableiter vom Typ 2 GXA 48 (Bemessungsspannung 96 kV) betrug mehr als 160 °C. Die beiden Temperaturfühler wurden zerstört und einige Varistorscheiben in zwei oder drei Teile zerbrochen (Bild 10a). Der Durchschlagkanal hat eine weiße Färbung (Bild 10b). Diese Art der Varistorbeschädigung weist einen signifikanten Unterschied zu den Beschädigungen auf, welche von vorangegangenen Stoßstromdurchschlägen verursacht wurden [19]. Bei diesem Ge-

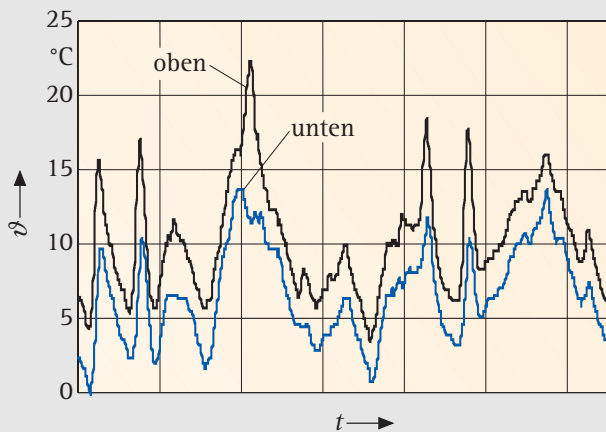


Bild 9. Untypischer Temperaturverlauf im oberen und unteren Teil des Überspannungsableiters GXA 96 im Dezember 2003

von Lichtbogeneinwirkung einige Erosionsspuren sichtbar.

Der spezifische Kriechweg liegt bei 10 mm/kV. Dieser Wert liegt deutlich unter dem kleinsten Wert von 13 mm/kV, der in den USA für sehr saubere Gebiete gebräuchlich ist.

Es gibt ebenfalls Untersuchungen an glasfaserverstärkten Stäben mit Silikonumhüllung. Die Stäbe haben keine Schirme. Diese vor zehn Jahren angefangenen

der Oberfläche festgestellt. Allerdings waren Verfärbungen zu beobachten.

Die Überspannungsableiter

Die Funkenstrecken-Überspannungsableiter vom Typ GZSb 96 und GZSMW 96 wurden in den 1980er-Jahren untersucht. Der Prototyp des Ableiters GZSbk 96/2 mit einem Silikongehäuse von 2,2 m Länge war eine interessante Lösung zu dieser Zeit. Ferner wurden seit

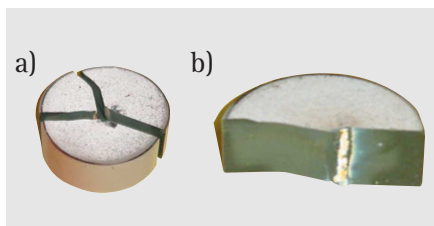


Bild 10. Beschädigter Varistor, a) vollständiger Bruch, b) Durchschlagkanal

schehen ist die Temperatur im Inneren bei anderen Überspannungsableitern mit einer Bemessungsspannung von 108 kV lediglich auf max. 63 °C gestiegen.

Die Ablesung der Temperaturmesswerte, welche im Speicher der Messsonden abgelegt sind, ist nach der Öffnung und Entnahme aus dem Varistorstapel möglich. Dies geschieht in einem Monatszyklus, da der Speicher der Messsonden begrenzt ist. Das Öffnen und Schließen der Überspannungsableiter ist im Besonderen während feuchter Wetterlagen riskant. Im Mai 2004 wurden Feuchtigkeits-/Entladungsspuren auf den Varistoroberflächen und der GFK-Stäbe sowie Rost auf den Metallteilen festgestellt (Bild 11). Feuchtigkeit und Teilentladungen bilden eine ernsthafte Gefahr für die Überspannungsableiter [20].

Ausblick

Die Schmutzabscheidung im Freiluftprüffeld „Glogów“ nimmt ständig ab und beträgt heutzutage 0,4 g/m² pro Tag. Demzufolge hat das Gebiet, das vor 20 Jahren den Umweltverschmutzungsgrad vier (sehr hoch) aufwies, nun nur noch den Verschmutzungsgrad eins (leicht).

Die Überspannung von Porzellan-Langstabilisatoren kann im Winter unter Eisbedingungen bis zu zwei Mal kleiner sein als die im regnerischen Sommer gemessene Überschlagspannung. Die Silikonbeschichtung hat sich nicht verschlechtert und besitzt nach zehn Betriebsjahren immer noch ihre hydrophoben Eigenschaften. Die Überschlagspannung von beschichteten Isolatoren ist ca. 30 % höher als die von unbeschichteten.

Die Beschichtung mit PTFE hat ihre hydrophoben Eigenschaften verloren und wurde nach acht Betriebsjahren teilweise zerstört. Die Überschlagspannung von diesen Isolatoren ist ungefähr 10 % kleiner als die von unbeschichteten.

Die Traktions-Silikonisolatoren ohne Schirme, die eine sehr kurze spezifische Kriechstrecke von 6 mm/kV aufweisen, haben in der horizontalen Lage über zwölf Monate richtig funktioniert. Danach wurde ein Überschlag notiert. Ein

ähnlicher, aber längerer Isolator (spezifische Kriechstrecke 9 mm/kV) funktioniert seit zehn Jahren ohne Überschlag. Die höchste Temperatur im 96-kV-Ableiter betrug 56 °C im heißen Sommer 2005.

Literatur

[1] Highvolt Prüftechnik Dresden GmbH, Dresden: www.highvolt.de



Bild 11. Spuren von Teilentladungen und Rost auf dem Varistorstapel als Folge von Feuchtigkeit

acceptance criteria. Genf/Schweiz: Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale (ISBN 2-8318-2263-7)

- [5] E DIN EN 61109 (VDE 0441-100):2006-10 Verbund-Hänge- und -Abspannisolatoren für Wechselstrom-Freileitungen mit einer Nennspannung über 1000 V – Begriffe, Prüfverfahren und Annahmekriterien. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [6] Chrzan, K. L.: Pollution test station Glogów, 20 years of research. S. 202ff in Proceedings of the 13th International Symposium on High Voltage Engineering, 25.8.–29.8.2003 in Delft/Niederlande: Rotterdam/Niederlande: Millpress, 2003 (ISBN 90-77017-79-8)
- [7] PN-E-06303:1998 Narażenie zabrudzeniowej izolacji napowietrznej i dobór izolatorów do warunków zabrudzeniowych (Verschmutzung der Freileitungsisolatoren und Auswahl der Isolatoren unter dem Aspekt der Verschmutzungsbedingungen). Warszawa (Warschau)/Polen: Polski Komitet Normalizacyjny (PKN). Zu beziehen über Polski Komitet Normalizacyjny, skr. poczt. 411, 00-950 Warszawa 1, Poland, E-Mail: oinsekr@pkn.pl, www.pkn.pl
- [8] Chrzan, K. L.: Conductivity of aqueous dust solutions. IEEE Trans. on Electrical Insulation 22 (1987) H. 3, S. 241–244 (ISSN 0018-9367)

- [2] IEC 60507:1991-04 Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a. c. systems. results. Genf/Schweiz: Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale (ISBN 2-8318-2002-2)
- [3] DIN EN 60507 (VDE 0448-1):1994-04 Fremdschichtprüfungen an Hochspannungs-Isolatoren zur Anwendung in Wechselspannungssystemen. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [4] IEC 61109:1992-03 Composite insulators for a. c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria. Genf/Schweiz: Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale (ISBN 2-8318-2263-7)

- [9] Chrzan, K. L.: More on evaluating pollution using ESDD approach. Insulators News and Market Report (INMR), 11 (2003) H. July/Aug., S. 24ff
- [10] Chrzan, K. L.: The role of gases in the pollution problem of outdoor insulators. Paper 52.12. in Proceedings of the 5th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 1987), 24.7.–28.7.1987 in Braunschweig. Braunschweig: Tech. Univ., 1987
- [11] Chrzan, K. L.; Haddad, A.: Behaviour of insulators and surge arresters at Glogów pollution test station. S. 193–196 in Proceedings of 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2004), 6.9.–8.9.2004 in Bristol/Großbritannien. Bristol/Großbritannien: Univ. of the West of England, 2004 (ISBN 1-86043-365-0)
- [12] Liebermann, J.: Hydrophobes Oberflächenverhalten verbessert das elektrische Fremd-schichtverhalten von Porzellanisolatoren und erlaubt vereinfachte Bauformen. Keram. Z. 54 (2002) H. 7, S. 554–559 (ISSN 0023-0561)
- [13] Fleszynski, J.; Pohl, Z.; Wankowicz, J.; Gubanski, S.; Winkler, J.: Experience with application of polymeric materials to outdoor HV insulators in Poland. Paper-No. 15-301 in Proceedings of the 37th Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 30.8.–5.9.1998 in Paris/Frankreich. Paris/Frankreich: CIGRE, 1998
- [14] Transinor As, Trondheim/Norwegen: www.transinor.no
- [15] Chrzan, K. L.; Jaroszewski, M.: Field test of metal oxide surge arresters at Glogów pollution test station (in Polish). S. 165–170 in Proceedings „V Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna: Napowietrzna Izolacja Wysokonapieciowa w Energetyce“ (NIWE '97), 26.6.–27.6.1997 in Bielsko-Biala (Bielitz-Biala)/Polen. Papers of the Institute of Electrical Engineering Fundamentals of the Wrocław University of Technology No. 9. Wrocław (Breslau)/Polen: Oficyna Wydawnicza PW, 1997 (ISSN 0324-9441)
- [16] Gemini Data Loggers (UK) Ltd., Chichester, West Sussex/Großbritannien: www.gemindataloggers.com
- [17] Chrzan, K. L.; Hinrichsen, V.: Temperature monitoring of metal oxide surge arresters. S. 183–186 in Przegląd Elektrotechniczny - Konferencja Nr. 77 „International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials“ (APTADM '2001), 17.9.–19.9.2001 in Wrocław (Breslau)/Polen. Warszawa (Warschau)/Polen: Wydawnictwo Sigma Not, 2001 (ISSN 0033-2097)
- [18] Feser, K.; Koehler, W.; Qiu, D.; Chrzan, K. L.: Behaviour of zinc oxide surge arresters under pollution. IEEE Trans. on Power Delivery PWRD-6 (1991) H. 2, S. 688–694 (ISSN 0885-8977)
- [19] Chrzan, K. L.: Wysokonapieciowe ograniczniki przepięć. Kapitel 8: Uszkodzenie Ograniczników. Wrocław (Breslau)/Polen: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2003 (ISBN 83-7125-108-4)
- [20] Chrzan, K. L.: Influence of moisture and partial discharges on the degradation of high-voltage surge arresters. Europ. Trans. on Electrical Power 14 (2004) H. 3, S. 175–184 (ISSN 1430-144X)

Der Autor bedankt sich bei Dipl.-Ing. Arkadiusz Dziubek und anderen Kollegen aus dem Hochspannungslaboratorium der Universität Braunschweig für die Übersetzung des Artikels. ■