

*FKH / ETH - Fachtagung
24. November 2016
ETH Zürich*

Einsatz von Feststoffisolationen in Hochspannungsbetriebsmitteln

Veranstalter:



*Fachkommission für Hochspannungsfragen,
Hagenholzstrasse 81
8050 Zürich*

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

*High Voltage Laboratory
ETH Zürich*



*Physikstrasse 3
8092 Zürich*

**FKH / ETH - Fachtagung
24. November 2016
ETH Zürich**

Vorwort zur Tagung

Die Weiterentwicklung der festen Isolierstoffe für Hochspannungsbetriebsmittel hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Zum einen wächst der Wunsch nach unterirdischer Energieübertragung und -verteilung, zum anderen verursacht der stärkere Einsatz von Gleichspannung und Leistungselektronik prinzipiell neue elektrische Beanspruchungen der Isolierstoffe. Die Anpassung der dielektrischen Materialeigenschaften an diese neuen Anforderungen haben grundlegende physikalische und technologische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig gemacht.

Die Fachtagung geht auf die hieraus entstandenen Problemstellungen sowie die F&E-Arbeit auf diesem Gebiet ein und stellt innovative Lösungen, die bereits in Hochspannungskomponenten verwirklicht wurden, vor. In diesem Zusammenhang wird auch auf die klassischen Problemstellungen der Festisolerstoffe eingegangen: Im Unterschied zu flüssigen und gasförmigen Isoliermedien sind bei festen Isolierstoffen Alterungsvorgänge und Defekte weitgehend irreversibel, was besondere Ansprüche an die Qualität stellt. Ausserdem kommen den festen Isolierstoffen weitere Aufgaben zu: Sie haben für ausreichende mechanische Festigkeit und Formgebung zu sorgen; sie haben oft Dichtigkeitsfunktionen und bilden die Grenzflächen zur Umwelt.

Das Tagungsprogramm beinhaltet Beiträge über die Grundlagenforschung und der Industrie. Unter Anderem wird darauf eingegangen, wie Materialien durch gezielte Kombinationen und Zusätze angepasst und optimiert werden können.

Beiträge von Herstellerfirmen zeigen, wie die Materialien unter Wechsel- und Gleichspannungsbelastung in der Praxis erfolgreich eingesetzt werden. Behandelt werden wichtige Fortschritte bei Freiluftisolatoren, GIS-Isolatoren, Apparategehäuse und Kabelendverschlüssen.

Prof. Dr. Christian Franck
Tagungsleiter,
High Voltage Laboratory, ETH Zürich

Dr. Reinhold Bräunlich
Geschäftsleiter, FKH

Tagungsprogramm

Titel: Einsatz von Feststoffisolationen in Hochspannungsbetriebsmitteln

Datum: Donnerstag, 24. November 2016

Ort: ETH Zürich, Audimax

Tagungsleiter: Prof. Dr. Christian Franck, High Voltage Laboratory, ETH Zürich

	Programmpunkt	Referent
08 ³⁰ -09 ¹⁰	Willkommenskaffee	
09 ¹⁵ -09 ⁵⁰	Begrüssung, Einführung	Prof. Dr. Christian Franck, ETH, Zürich
09 ⁵⁵ -10 ²⁵	PET – ein thermoplastischer Isolationswerkstoff in GIS	Dr. Falko Meyer, GE Grid (Switzerland) GmbH, Oberentfelden
10 ³⁰ -11 ⁰⁰	Grenzflächenaufladung in gasisolierten Anlagen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	Malte Tschentscher, ETH, Zürich
	Kaffeepause	
11 ³⁵ -12 ⁰⁵	Diagnosemessungen an Betriebsmitteln mit Verbundisolationen	Dr. Thomas Brügger, FKH, Zürich
12 ¹⁰ -12 ⁴⁰	Hochspannungskabelanlagen -- Aktuelles und Trends bei Kabelgarnituren	Dr. Myriam Koch, Pfisterer Kontaktsysteme GmbH, Winterbach
12 ⁴⁵ -13 ¹⁵	Hochspannungsgleichstrom Kabelsysteme – Stand der Entwicklung und Herausforderungen	Dr. Markus Saltzer ABB AB, Karlskrona, SE
	Mittagessen	
14 ⁵⁰ -15 ²⁰	Repetitive Pulsbelastung polymerer Isolationsstoffe - Alterung und Diagnostik	Raphael Färber, ETH, Zürich
15 ²⁵ -15 ⁵⁵	Geschirmte Feststoffisolation für Mittelspannungs- Schaltanlagen	Dr. Raimund Summer Schneider Electric Sachsenwerk GmbH, Oberentfelden
16 ⁰⁰ -16 ³⁰	Aktuelle Entwicklungen und Anwendungstrends bei Freileitungsisolatoren	Dr. Frank Schmuck, Pfisterer Sefag AG, Malters
ab 16 ⁴⁰	Ausklang, Möglichkeit zur Besichtigung des Hochspannungslabors der ETH, Apéro	

Ende der Veranstaltung ca. 17¹⁵

Zusammenfassung der Referate

Inhaltsverzeichnis

	Seite
PET – ein thermoplastischer Isolationswerkstoff in GIS	1
Dr. Falko Meyer, GE Alstom „Grid Solutions“, Oberentfelden	
Grenzflächenaufladung in gasisolierten Anlagen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	17
Malte Tschentscher, ETH Zürich	
Diagnosemessungen an Betriebsmitteln mit Verbundisolationen	21
Dr. Thomas Brügger, FKH, Zürich	
Hochspannungskabelanlagen -- Aktuelles und Trends bei Kabelgarnituren	31
Dr. Myriam Koch, Pfisterer Kontaktsysteme GmbH, Winterbach	
Hochspannungsgleichstrom Kabelsysteme – Stand der Entwicklung und Herausforderungen	37
Dr. Markus Saltzer, ABB AB, Karlskrona, SE	
Repetitive Pulsbelastung polymerer Isolationsstoffe - Alterung und Diagnostik	43
Raphael Faerber, ETH Zürich	
Geschirmte Feststoffisolation für Mittelspannungs-Schaltanlagen	47
Dr. Raimund Summer, Schneider Electric Sachsenwerk GmbH, Oberentfelden	
Aktuelle Entwicklungen und Anwendungstrends bei Freileitungsisolatoren	55
Dr. Frank Schmuck, Pfisterer Sefag AG, Malters	
Referentenadressen	65
Internetseite zur Fachtagung	67
Notizen	69

FKH - Fachtagung

24. November 2016

Einsatz von Feststoffisolation in Hochspannungsbetriebsmitteln

PET- ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS

Dr. Falko Meyer

GE Grid (Switzerland) GmbH, Oberentfelden

Funktion und beruflicher Werdegang

Seit 2013 Mitglied des TK10 - Flüssigkeiten für elektrotechnische Anwendungen.

Seit 2009 Mitarbeit in Cigré-WGs des SC B3 zum Thema SF6.

Seit 2006 **GE Grid (Switzerland) GmbH**

Experte für Werkstoffe in GIS und Antrieben.

(Isoliergase, Polymere, Elastomere, Metallische Werkstoffe, Schmierstoffe, Beschichtungen, Schadensanalysen, Normung)

2001-2006 Leiter Verfahrenstechnik in einem Unternehmen in der Oberflächenbranche.

Postdoc-Aufenthalt an der Universität Bayreuth.

Chemiestudium und Promotion an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS

Falko Meyer

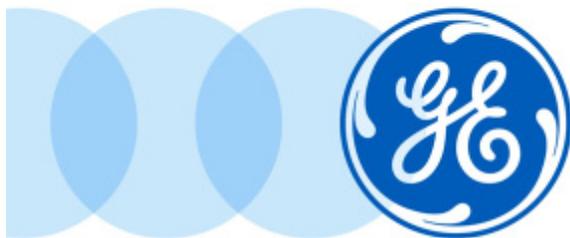
GE Grid (Switzerland) GmbH, Oberentfelden

1 Kurzfassung

Einführend werden die Aufgaben von Isolierteilen in GIS vorgestellt.

Die einzelnen Herstellungsschritte von PET-Isolierteilen werden betrachtet. Angefangen von der Synthese der Monomere über die Polykondensation zum Polymer, die Kristallisation und die Extrusion zum Halbzeug bis hin zur spanabhebenden maschinellen Bearbeitung zum fertigen Isolierteil.

Die Eigenschaften Werkstoffe PET und Epoxidharz werden verglichen. Abschliessend werden Erfahrungen aus dem Einsatz von PET-Isolierteilen aufgeführt.



PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS

Falko Meyer, GE Grid (Switzerland) GmbH, Oberentfelden
FKH – Fachtagung, ETH Zürich, 24.11.2016

Imagination at work

Inhalt

- Isolierteile in GIS
- PET
Eigenschaften, Herstellung, Qualifikation,
Ökologie
- PET vs. Epoxidharz
- Erfahrungen im Einsatz
- Zusammenfassung



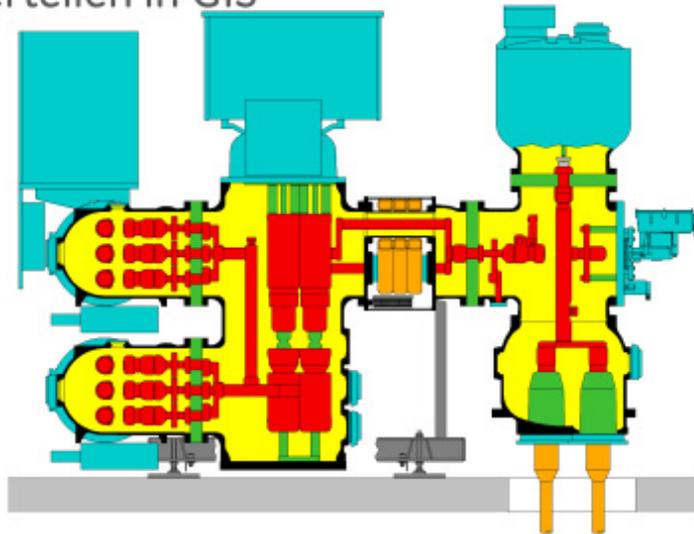
Isolierteile in GIS



Isolierteile in GIS

Aufgaben von Isolierteilen in GIS

- Isolieren
- Lagern /Führen
- Kräfte übertragen
- Gasdruck widerstehen

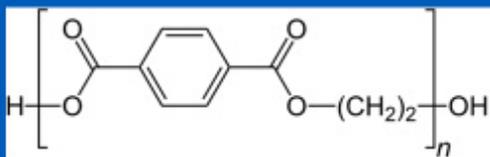


PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

5

PET – Eigenschaften PET = Polyethylenterephthalat

Chemisch



• C₁₀H₈O₄

Thermisch

- T_g: ~ 80 °C
- Schmelztemperatur : 253 °C

Struktur

- semikristallin
- ~36% kristalliner Anteil



Mechanisch

- Zugfestigkeit: 85 MPa
- E-Modul: 3200 MPa
- 0,2% -Dehngrenze: 66 MPa



PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

7

PET - Eigenschaften

Elektrische Eigenschaft	Einheit	Wert	Norm
Oberflächenwiderstand	Ω	10^{16}	IEC 60093
Spezifischer Widerstand	$\Omega \times \text{cm}$	5×10^{16}	IEC 60093
Relative Permittivität ϵ_r		3.7	IEC 60250
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan(\delta)$	%	0.3	IEC 60250
Dielektrische Festigkeit (3mm)	kV/mm	15	IEC 60243-1



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

8

PET - Herstellung von Isolierteilen

Herstellungsschritte

- Synthese der Monomere
- Polykondensation zum Polymer, Kristallisation
- Extrusion zum Halbzeug
- Spanabhebende Bearbeitung



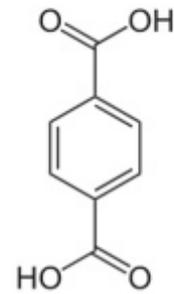
PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

10

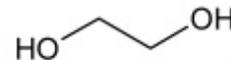
PET - Herstellung von Isolierteilen

Synthese der Monomere

- Terephthalsäure (1,4-Benzoldicarbonsäure), $C_8H_6O_4$
 ca. 50 Mio. t/a in 2012



- Ethylenglycol (1,2-Dihydroxyethan, Ethan-1,2-diol), $C_2H_6O_2$
 ca. 21 Mio. t/a in 2012



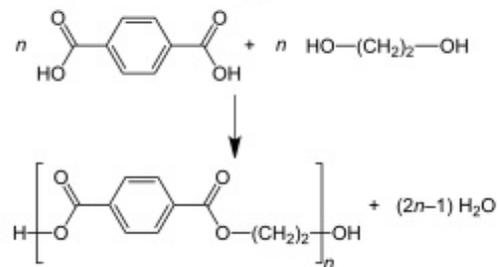
PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

11

PET - Herstellung von Isolierteilen

Polymersisation

- 1. Schritt: Schmelzphasenpolykondensation, Veresterung
 → kontinuierlich



- 2. Schritt: Unterwassergranulierung
- 3. Schritt: Festphasenpolykondensation, Kristallisation
 → diskontinuierlich

→ semi-kristallines Granulat



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

12

PET - Herstellung von Isolierteilen

Extrusion

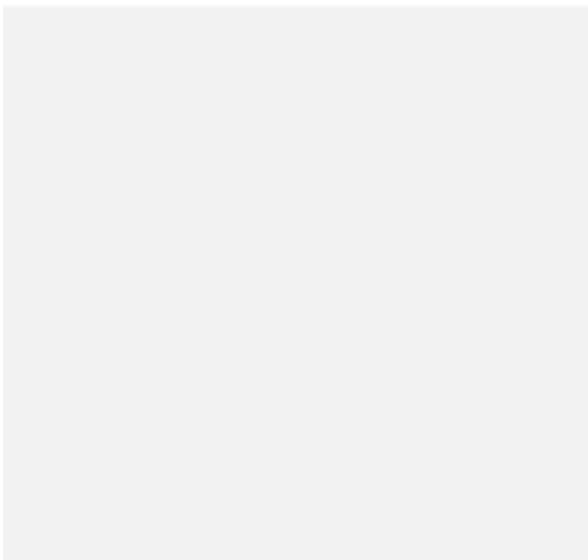
- Granulat im Silo, Förderung mit Pressluft
- Trocknung des Granulats
- Schneckenextruder – Granulat schmilzt auf und wird extrudiert
- Formgebung: Stangen, Platten, Profile, Folien
- Thermische Nachbehandlung
- kontinuierlich



PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

13

PET - Herstellung von Isolierteilen



Halbzeug

- Stangen
- Platten
- Profile
- Folien

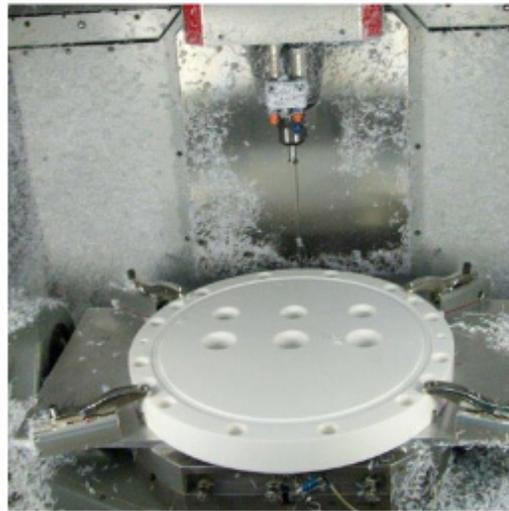
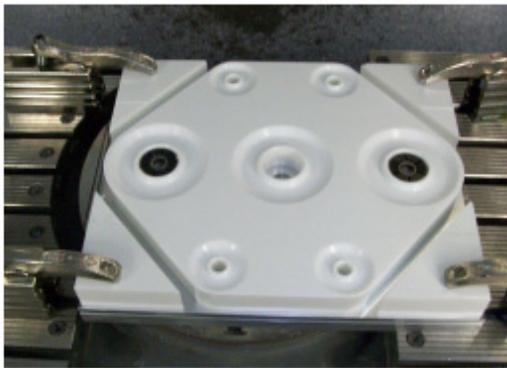


PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

16

PET - Herstellung von Isolierteilen

Spanabhebende Bearbeitung



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

17

PET - Qualität

Qualitätskontrolle

- Granulat
 - Reinheit
 - Feuchtigkeitsgehalt
- Halbzeug
 - Poren / Hohlräume
 - Verunreinigungen
- Spanabhebende Bearbeitung
 - Massliche Kontrolle
 - Oberflächengüte



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

19

PET - Qualität

PET für GIS-Isolierteile

- Nur sortenreines PET, keine anderen Polymere, keine Füllstoffe.
- Nur Neugranulat d.h. frisch synthetisiertes Polymer / Granulat, kein Recycling- Material.
- Kristalliner Anteil ~ 36%.
- Nur zugelassene Werkstoffe / Lieferanten.



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

20

PET - Qualität

PET im Druckbehälter

- Keine Normen, die thermoplastische Isolatoren in GIS abdecken.
- PET-Schottungsisolatoren wurden getestet nach EN50089 (Gießharz-Zwischenwände für metallgekapselte gasgefüllte Hochspannungsschaltgeräte und -Schaltanlagen) und IEC 62271-203 (unabhängig vom Material des Schottungsisolators).
- Typen-Prüfung: Berstdruck muss mindestens 3 mal höher sein als der maximal erlaubte Betriebsdruck ($p < B/3$).
- Üblicher Betriebsdruck: 8 bar, erreichter Berstdruck: 38 bar.

PET-Schottungsisolatoren erfüllen die Anforderungen der EN50089 und IEC 62271-203



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

21

PET - Ökologie

Abfälle bei Herstellung

- Produktionsabfälle werden sortenrein gesammelt, geschreddert und wiederum zu Halbzeugen extrudiert
- Die Qualität des erhaltenen Halbzeuges ist etwas tiefer als bei dem zuvor eingesetzten. Entsprechend darf für Hochspannungsisolatoren in einer GIS kein recyceltes Material eingesetzt werden.
- Eine verbreitete Anwendung für recyceltes PET ist die Herstellung von Polyester-Fasern, z.B. für die Automobil-Industrie oder in der Stoffherstellung.



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

23

PET - Ökologie

End of life

- Schottungs- und Stützisolatoren aus PET tragen zu etwa 5-9% der Gesamtmasse einer GIS bei. Um diesen Prozentsatz wird die Recycle-Rate erhöht.
- PET ist zu 100% stofflich wiederverwertbar.
- PET enthält keine gefährlichen Inhaltsstoffe.
- PET ist bei der Herstellung, der Verwendung und der Entsorgung unbedenklich.



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

24

PET - Ökologie

End of life

Beispiele für PET-Granulat aus recyceltem Material

Spezialisierte Recyclingfirmen



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

PET vs. Epoxidharz

Duroplaste – Thermoplaste - Elastomere

Duroplaste
 Können nach dem Aushärten durch Erwärmen nicht mehr verformt werden.

Thermoplaste
 Lassen sich in einen bestimmten Temperaturbereich reversibel verformen.

Elastomere
 Formfeste aber elastisch verformbare Kunststoffe.



PET - ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

PET vs. Epoxidharz Duroplaste – Thermoplaste - Elastomere

Duroplaste	Thermoplaste	Elastomere
Amorph	Amorph und kristallin	Amorph
Erweichen oberhalb Tg	Erweichen oberhalb Tg	Elastisch oberhalb Tg
Zersetzen sich ohne zu schmelzen	Schmelzen	Zersetzen sich ohne zu schmelzen
Verbundwerkstoff mit (keramischem) Füller	Polymer mit und ohne Füller	Compounds mit vielen Zusatzstoffen
Spröde, hart, brechen	Elastische und plastische Verformung	Elastisch
Isolierteile z.B. Schottungs- und Stützisolatoren, Konen, Schaltstangen	Isolierteile z.B. Düsen, Gleitlager	Dichtungen z.B. O-Ringe, Formdichtungen



PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

28

PET vs. Epoxidharz

PET	Epoxidharz
+ Maschinell bearbeitbar	+ höhere mechanische Festigkeit
+ Komplexe Geometrien möglich	+ höhere HT-Festigkeit
+ Schnelle Prototypen-Fertigung	+ höhere Steifigkeit / Konturtreue
+ Schnelle Fertigung von Ersatzteilen	
+ Keine Initialkosten	
+ Tiefere laufende Kosten	
+ geringere Wasseraufnahme	
+ kann T > Tg eingesetzt werden	
+ tiefere relative Permittivität	



PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

29

Erfahrungen im Einsatz von PET-Isolierteilen

Konstruktion

- Die elektrischen Eigenschaften von PET sind vergleichbar oder besser als die von gefülltem Epoxidharz.
- PET unterscheidet sich bezüglich der mechanischen Eigenschaften von gefülltem Epoxidharz. Insbesondere gibt es eine veränderte Temperaturabhängigkeit (durch Tg). Dies muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

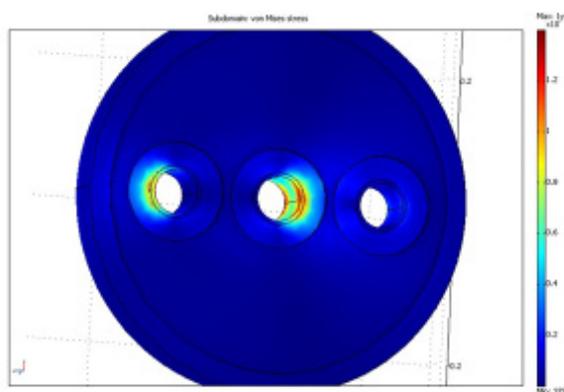


PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

31

Erfahrungen im Einsatz von PET-Isolierteilen

Anwendungsbeispiel: 72.5 kV GIS-Trenner



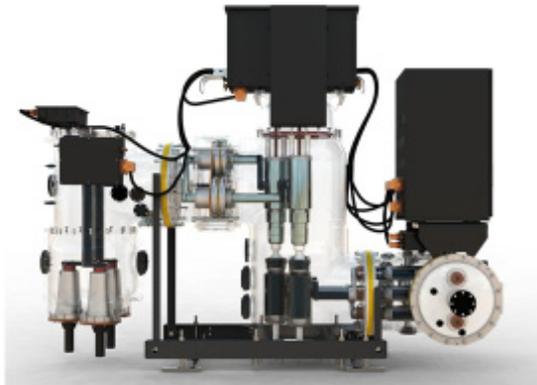
PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

32

Erfahrungen im Einsatz von PET-Isolierteilen

Anwendungsbeispiel: Schottungsisolator

3-phasig gekapselte 72.5 - 170 kV GIS, Konstruktion an Schottungsisolator aus PET angepasst.



PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

33

PET – Erfahrungen im Einsatz

PET-Isolierteile im Einsatz (72,5 kV bis 170 kV)
(GIS von GE Grid (Switzerland) GmbH Oberentfelden)

- Seit 1996
 - > 6'500 Felder mit PET-Isolierteilen
 - > 35'000 Betriebsjahre

davon

- Seit 2003
 - > 4'500 Felder mit PET-Schottungsisolatoren
 - > 19'000 Betriebsjahre

Fehler im Feld, verursacht durch PET als Isolierwerkstoff?

KEINE



PET – ein thermoplastischer Isolierwerkstoff in GIS 24.11.2016

34

Zusammenfassung

Thermoplastisches PET ist als Werkstoff für Isolierteile
in GIS einsetzbar.

Die Erfahrungen aus der Praxis sind gut.

Thermoplaste können eine gute Alternative /
Ergänzung zu Duroplasten sein.



FKH - Fachtagung

24. November 2016

Einsatz von Feststoffisolation in Hochspannungsbetriebsmitteln

Grenzflächenaufladung in gasisolierten Anlagen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

Malte Tschentscher
 High Voltage Laboratory, ETH Zurich

Funktion und beruflicher Werdegang

<i>Since 06/2013</i>	PhD candidate, High Voltage Laboratory (HVL), ETH Zurich, Switzerland Field: Influence of material properties on insulator charging in HVDC GIS
<i>10/2010 - 03/2013</i>	M.Sc. RWTH Aachen University, Germany Electrical Power Engineering M.Sc. Thesis, Department for Gas Insulated Switchgears (GIS) Corporate Research Center, ABB Switzerland Ltd, Switzerland “Design of a HVDC-GIS-Insulator based on novel materials”
<i>08/2011 - 01/2012</i>	Student Exchange, Electrical Power Engineering, Aalto University Helsinki, Finland
<i>10/2007 - 10/2010</i>	B.Sc. RWTH Aachen University, Germany Electrical Engineering, Information Technology and Computer Engineering B.Sc. Thesis, Institute of Power Systems and Power Economics (IAEW) RWTH Aachen University, Germany “Analysis and modeling of important influences on nodal load and generation in the European extra-high voltage grid”

Mitglied der Cigré JWG D1/B3.57 mit dem Thema „Dielectric Testing of gas-insulated HVDC Systems“.

Grenzflächenaufladung in gasisolierten Anlagen zur Hochspannungs-Gleichstromübertragung

Malte Tschentscher

High Voltage Laboratory, ETH Zurich

1 Kurzfassung

Bei der Übertragung von elektrischer Energie über weite Entfernungen, überlagerter Unterstützung des zukünftigen Übertragungsnetzes, der Anbindung von Offshore-Energieerzeugungsanlagen oder asynchronen Netzkopplungen, bilden Hochspannungs-Gleichstromübertragungen (HGÜ) eine technische und wirtschaftliche Alternative zur konventionellen Drehstromtechnik. Die Übertragungstechnologien begegnen hierbei, neben den durch die Energiewende begründeten Herausforderungen, auch einer weltweit zunehmenden Urbanisierung, welche ihnen anspruchsvolle Raum- und Leistungsanforderungen diktiert. Der Einsatz gasisoliert-gekapselter Komponenten zur Hochspannungs-Gleichstromübertragung bietet eine platzsparende, verlustarme und betriebssichere Antwort auf die Herausforderungen unserer Zeit.

Die Entwicklung und Dimensionierung von gasisoliert-gekapselten HGÜ-Betriebsmitteln unterscheidet sich maßgeblich von der für Wechselspannung optimierter Isolationssysteme. Die größte Herausforderung liegt in der Berücksichtigung der im Isolationssystem auftretenden Ladungsgenerations- und Ladungstransportprozesse. Durch die aufgrund der Gleichspannung wirkenden elektrostatischen Kräfte kommt es zu einem gerichteten Ladungsträgertransport und zur Polarisierung der Isolationsmaterialien. Der Transport von vornehmlich freien Ladungsträgern gewinnt bereits nach kurzen Betriebszeiten gegenüber der als Polarisierung bekannten Bewegung der gebundenen Ladungen an Gewicht. Ein detailliertes Verständnis, der in diesem Fall relevanten Phänomene wie der Ladungsträgergeneration und Akkumulation an Grenzflächen und der von Temperatur und Feldstärke abhängigen Ladungstransporteigenschaften in der Feststoff- und Gasisolation, bildet somit den entscheidenden Grundstein für die Dimensionierung von gasisoliert-gekapselten HGÜ-Betriebsmitteln.

Da HGÜ-Anlagen neben den durch die Gleichspannung begründeten Beanspruchungen im Betrieb auch transienten Überspannungen ausgesetzt sind, gewinnt die Isolationskoordination an Komplexität. Kurz gesagt, erfordert dies eine Dimensionierung, welche sämtlichen für AC-Anlagen bekannten Beanspruchungen im Betrieb und Test widersteht und zusätzlich die sich aus der Gleichspannungsbelastung ergebenden Anforderungen berücksichtigt. Die entscheidende Bedeutung der Ladungstransportprozesse und deren grundlegenden Unterschiede beim Vergleich von Feststoff- und Gasisolation erschwert hierbei eine kombinierte Prüfung der dielektrischen Eigenschaften mit der Lebensdauerbeständigkeit des Isolationssystems.

Ziel unserer Forschung ist es, zu einem detaillierten Verständnis der Ladungsträgerquellen und ihrer Transportprozesse beizutragen. Hierbei bedienen wir uns Polarisations- und Depolarisationsstrommessungen (PDC), dielektrischer Spektroskopie (DS) und hochaufgelösten Oberflächenladungsmessungen, welche eine

ortsaufgelöste Diskussion der Isolationseigenschaften ermöglicht. Dieser Beitrag wird die Grundlagen der Dimensionierung von gasisoliert-gekapselten HGÜ-Betriebsmitteln diskutieren und auf mögliche Testspezifikationen eingehen. Des Weiteren gibt der Beitrag einen Einblick in Messverfahren, welche eine ortsaufgelöste Analyse der Ladungsgenerations- und Ladungstransportprozesse in HGÜ-Anlagen ermöglicht.

FKH - Fachtagung

24. November 2016

Einsatz von Feststoffisolation in Hochspannungsbetriebsmitteln

Diagnosemessungen an Betriebsmitteln mit Verbundisolationen

Dr. sc. ETH Thomas Brügger
FKH, Zürich

Funktion und beruflicher Werdegang

seit 2012 Fach-/Prüfingenieur, FKH Zürich

2008 – 2011 Elektrotechnik ETH Zürich, Promotion „Einfluss starker Lastwechselfrequenz
auf das Alterungsverhalten der Isolierung grosser Hydrogeneratoren“,
Leitung: Prof. Dr. K. Fröhlich

2004 – 2007 Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Projektleitungsassistent

2000 – 2004 Elektrotechnik ETH Zürich

1999 – 2000 Betriebs- und Produktionswissenschaften, ETH Zürich

1997 – 1999 Elektrotechnik ETH Zürich

Diagnosemessungen an Betriebsmitteln mit Verbundisolationen

Thomas Brügger
FKH, Zürich

1 Kurzfassung

Nach einer Einführung in die spezifischen Eigenschaften von Verbundisolationstoffen werden zwei Beispiele für die Zustandsdiagnose an Apparaten mit solchen Isolationssystemen aus dem Tätigkeitsfeld der FKH vorgestellt.

Ein erstes Beispiel behandelt das Verbund-Isolationssystem grosser Synchrongeneratoren. Nach einem kurzen Überblick über die geschichtliche Entwicklung und den Aufbau der modernen Statorisolationen wird auf die verschiedenen Diagnosemessungen und deren Bedeutung für die Beurteilung von Alterungszustand und Isolationsfehlern eingegangen. Am Schluss des ersten Teils wird das aktuell von der FKH durchgeführte und vom PSEL unterstützte Forschungsprojekt zur Teilentladungsmessung mit tiefen Prüfspannungsfrequenzen im VLF-Bereich um 0.1 Hz präsentiert.

Im zweiten Beispiel wird auf die Diagnostik von giessharzisierten Messwandlern eingegangen. Die FKH hat wesentliche Beiträge zur Bereitstellung von Vorort-TE-Messungen geleistet und hat basierend auf den in grosser Zahl durchgeführten Prüfungen Entscheidungskriterien zur Beurteilung von betriebsgealterten, teilweise mit TE behafteten, Wandlern entwickelt.

2 Diagnosemessungen an Statorisolation grosser Synchrongeneratoren

2.1 Zweck von Diagnosemessungen

Schäden der Statorisolation sind ein häufiger Grund für ungeplante Ausfälle von Hydrogeneratoren. Für den Betreiber sind solche Ausfälle aufgrund der damit verbundenen Produktionsausfälle immer kostspielig. Aussagekräftige und effiziente Diagnosen sind deshalb speziell bei zustandsbasierter Instandhaltung von grosser Bedeutung.

Eine Umfrage der Cigré bei Betreibern von insgesamt 1'199 Hydrogeneratoren ergab, dass Fehler der Statorisolation über die Hälfte der Maschinenschäden ausmachen (Abbildung 1).

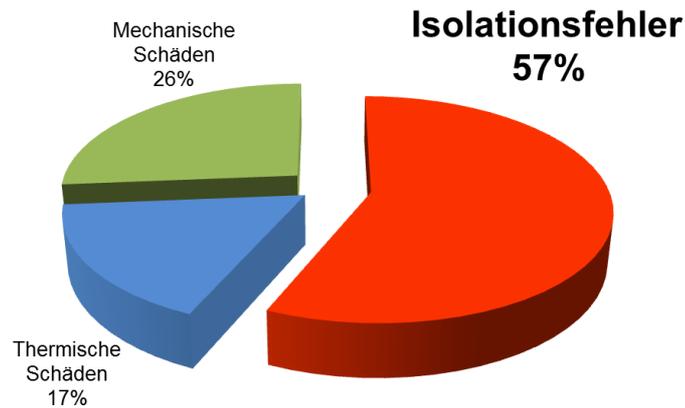


Abbildung 1: Verteilung von Schadensursachen bei Hydrogeneratoren (Quelle: Cigré)

2.2 Aufbau einer glimmerhaltigen Statorisolation

In Abbildung 2 ist der Aufbau des Stators einer rotierenden Hochspannungsmaschine dargestellt. Man erkennt das Blechpaket mit den darin verkeilten Leiterstäben und den Wickelkopfbereich, der mit dem Nutaustritt der Stäbe beginnt.

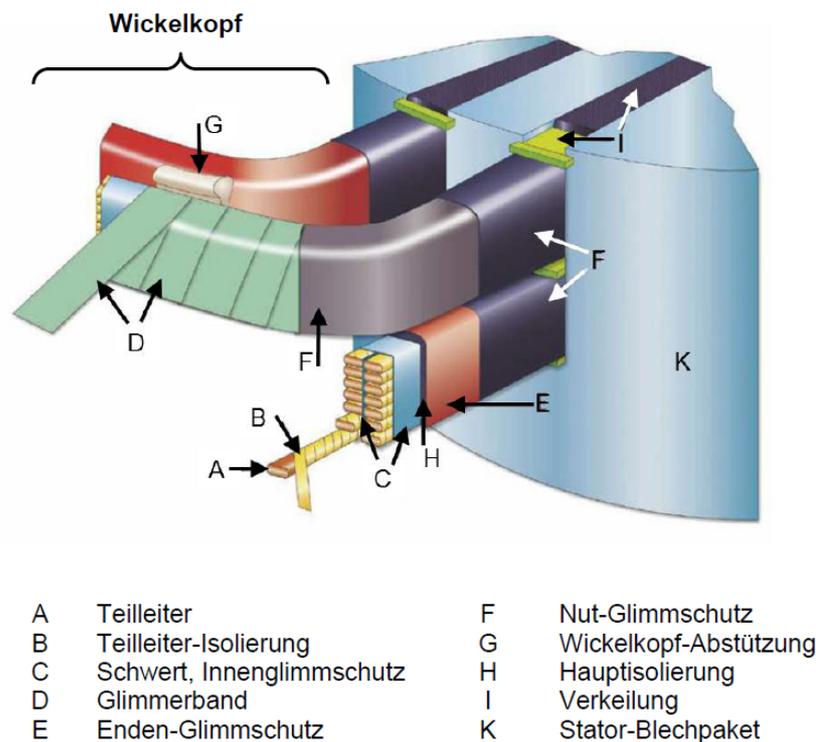


Abbildung 2: Aufbau Stator (Quelle: Von Roll AG)

Die Hauptisolierung liegt zwischen den Leiterstäben und dem geerdeten Stator-Blechpaket, sowie zwischen verschiedenen Leiterstäben in der gleichen Statornut. Im Wickelkopf liegt sie zwischen den Leitern unterschiedlicher Spulen. Die Hauptisolierung muss während der gesamten vorgesehenen Lebenszeit die Betriebsfeldstärke E_n (bei heutigen Generatoren ca. 2.5-3 kV/mm) halten können.

Seit der Entwicklung der ersten Hochspannungs-Wechselstrommaschinen ($U_n > 1\text{kV}$) im ausgehenden 19. Jahrhundert bestehen die Wicklungsisolierungen im Wesentlichen aus drei Elementen:

- der dielektrische Barriere (Glimmer),
- deren Träger und
- Bindematerial.

Diese Komponenten des Isoliersystems sind bis heute gleich geblieben, obwohl die verwendeten Materialien und Herstellungsprozesse im Laufe der Zeit geändert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Historische Entwicklung der Isolierung von rotierenden HV Maschinen

Periode	Dielektrische Barriere	Träger	Binde-material	Herstellungs-prozess
1880-1920	Spaltglimmer (Grösse: $> 1\text{ cm}$)	Papier, Baumwolle, Seide	Leinsamenöl, Naturharze, Schellack	Handwicklung
1920-1950	Spaltglimmer (Grösse: $> 1\text{ cm}$)	Papier	Schellack, Asphalt	Handwicklung
1950-1960	Glimmerpapier (Partikel-Grösse $100\text{-}1'000\ \mu\text{m}$)	Papier	Schellack, Asphalt, Polyesterharz	Handwicklung
1960-1970	Glimmerpapier (Partikel-Grösse $100\text{-}1'000\ \mu\text{m}$)	Papier, Glasgewebe, Polyestervlies	Asphalt, Polyester-, Epoxidharze	Hand-, Maschinenwicklung;
1970-heute	Glimmerpapier (Partikel-Grösse $100\text{-}1'000\ \mu\text{m}$)	Glasgewebe, Polyestervlies, PETP-Film	Polyester-, Epoxidharze	Hand-, Maschinenwicklung;

2.3 Teilentladungsmessung

Mit der Teilentladungsmessung ist es möglich, einzelne TE-Quellen in der Statorwicklung zu detektieren und deren Gefahrenpotential zu beurteilen.

Die Ladungsverschiebungen von einzelnen TE-Ereignissen werden hierfür entweder mit einem Kopplungskondensator C_k auf der Hochspannungsseite oder einem Stromwandler auf der Sternpunktseite und einer Messimpedanz Z_m erfasst (Prüfkreis gemäss IEC 60270, Abbildung 3) und einem TE-Messsystem zugeführt.

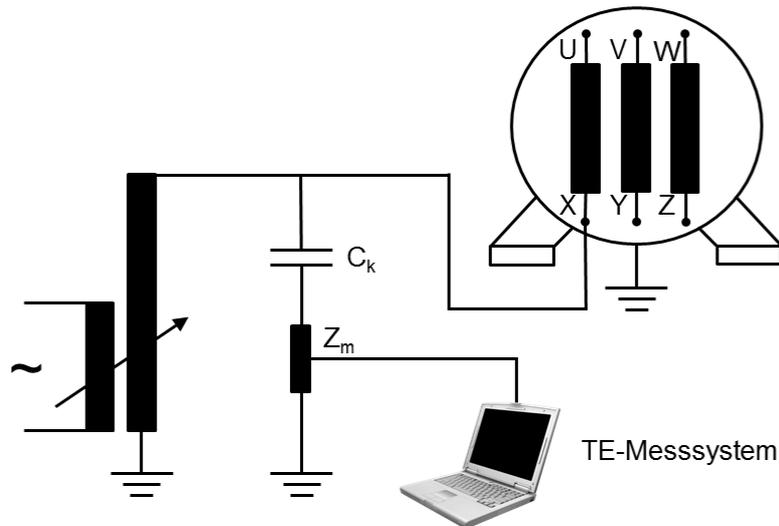


Abbildung 3: Aufbau Teilentladungs-Messkreis

Das TE-Messsystem zeichnet das Signal der Messimpedanz auf und stellt aussagekräftige Kennwerte für Auswertung und Beurteilung bereit. Diese umfassen:

- Scheinbare Ladung der TE-Impulse (q_{IEC})
- Phasenlage und Polarität
- Impulshäufigkeit und Impulsanzahl
- TE-Ein- und Aussetzspannung

Im Isoliersystem einer Statorwicklung können an verschiedenen Stellen Teilentladungen auftreten. Die häufigsten TE-Quellen sind in Abbildung 4 dargestellt: Gaseinschlüsse (TE1), flächige Ablösungen an der Grenzfläche Leiter/Isolierung oder zwischen einzelnen Lagen der Isolierung (TE2), Nutentladungen (TE3), Oberflächenentladungen (engl. Surface Tracking) im Wickelkopfbereich (TE4) und bei Phasentrennungen (TE5). Diese TE-Quellen werden mit den charakteristischen Teilentladungs-Mustern gemäss Abbildung 4 assoziiert.

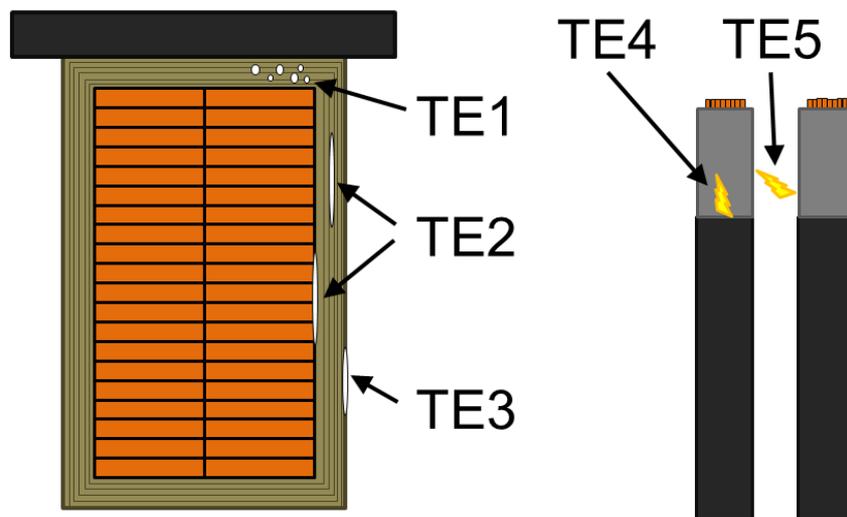
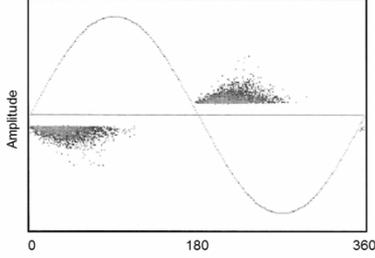
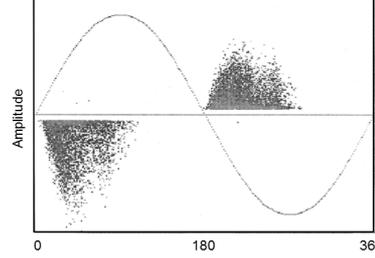
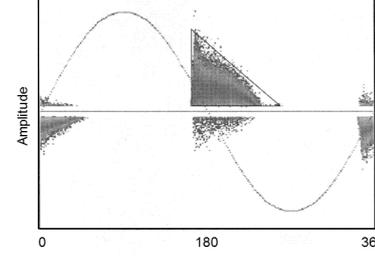
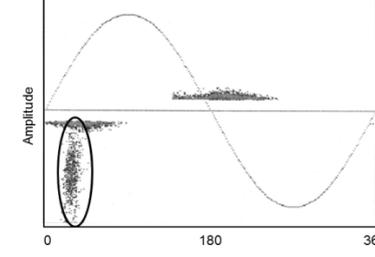
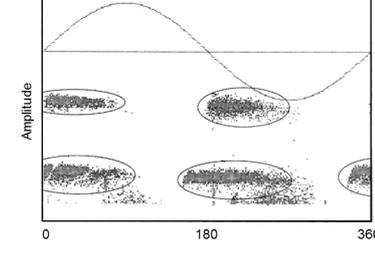


Abbildung 4: TE-Typen

Tabelle 2: Typische Ursachen von Teilentladungen mit assoziierten phasenaufgelösten TE-Pattern

Typ	Ursache	Pattern
TE 1	<ul style="list-style-type: none"> • Gaseinschlüsse (Voids) innerhalb der Epoxid/Glimmer-Hauptisolierung 	
TE 2	<ul style="list-style-type: none"> • Ablösung der Hauptisolierung von den Kupferleitern • Flächige Delaminationen zwischen einzelnen Glimmerbändern 	
TE 3	<ul style="list-style-type: none"> • Nutentladungen 	
TE 4	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächen-Entladungen (Surface Tracking) im Bereich des Endglimmschutzes 	
TE 5	<ul style="list-style-type: none"> • TE zwischen verschiedenen Phasen im Wickelkopf 	

3 Diagnosemessungen an giessharzisierten Messwandlern

3.1 TE-Messung

Teilentladungsmessungen (TE-Messungen) an Wandlern zeichnen sich gegenüber anderen Methoden dadurch aus, dass Sie den schädigenden Mechanismus bei elektrischer Überlastung von Fehlerstellen unmittelbar und in Echtzeit anzeigen. Gemessene Teilentladungen lassen sich ausserdem quantifizieren und bis zu einem gewissen Grad auch lokalisieren. Zur Feststellung des momentanen Isolationszustands von Hochspannungsmesswandlern stellt deshalb die TE-Messung die aussagekräftigste aber auch die aufwändigste Methode dar.

Eine Vor-Ort-TE-Prüfung an betriebsgealterten Messwandlern soll insbesondere bei älteren Wandlern mit unbekanntem Zustand der Isolation ein Kriterium liefern, welches die Entscheidung ermöglichen sollte:

- ob der untersuchte Wandler weiterbetrieben werden kann,
- ob der Wandler im Werk näher überprüft werden soll,
- ob er ausgeschieden werden muss.

Die FKH schlägt folgendes Prüfverfahren, welches bisher in allen durchgeführten Versuchen konsequent angewendet wurde:

- Teilentladungsmessung bei U_0 , (Dauer: 1 min)
- 5 min Belastung mit $1.2 \times U_0$
- Teilentladungsmessung bei U_0 , (Dauer: 1 min)

Während dieses Prozederes werden die zu prüfenden Wandler mit einer temporären Überspannung beansprucht, wie sie grundsätzlich auch im Betrieb auftreten könnte. Neben den absolut gemessenen Teilentladungspegeln sind bei diesem Verfahren vor allem auch Veränderungen des TE-Diagramms zwischen den Messungen vor und nach der 5-minütigen Überspannung von entscheidender Bedeutung. Ein Ansteigen des Teilentladungspegels oder das Auftreten einer neuen TE-Störstelle bei der zweiten Teilentladungsmessung weist auf eine fortschreitende Isolationsschädigung hin.

3.2 Vorort-Prüfungen

Durch eine optimierte Mess- und Prüfeinrichtung und insbesondere durch die Kombination verschiedener Störunterdrückungsmassnahmen bei der Speisequelle und in der Messkette kann der Teilentladungs-Grundstörpegel bei Vorort-Prüfungen auf Werte reduziert werden, wie sie mit Standardausrüstungen nur in geschirmten Labors erreichbar sind. In Abbildung 5 sind TE-Messungen an den Messwandlern der 72.5-kV-Reihe in den Schaltanlagen des Gotthard-Strassentunnels zu sehen.



- A: Trenntrafo C: Stepup-Trafo E: Koppelkondensator
 B: Umrichter D: 50-H-Drossel F: Spannungsteiler

Abbildung 5: Vorort-Prüfung mit TE-Messung an 72.5-kV-Giessharwandlern

Die Wandler werden nach Kriterien in Tabelle 3 klassifiziert. Bei den kritischen Komponenten (Kategorie Nr. IV) wird aus Gründen der Betriebssicherheit ein Austausch empfohlen.

Tabelle 3: Kriterien zur Klassifikation von betriebsgealterten Wandlern

Nr.	Beschreibung der Gruppe	Beurteilungskriterien
I	TE-frei (unbedenkliche Komponenten)	Keine messbare TE-Aktivitäten
II	Leicht TE-behaftet (weitgehend unbedenkliche Komponenten)	Ein- und Aussetzspannung > 110% Phasenspannung TE-Pegel bei 110% verkettete Spannung ≤ 20 pC
III	TE-behaftet (grenzwertige Komponenten)	Ein- und Aussetzspannung > 110% Phasenspannung TE-Pegel bei 110% verkettete Spannung > 20 pC
IV	Stark TE-behaftet (kritische Komponenten)	Ein- und/oder Aussetzspannung ≤ 110% Phasenspannung

FKH - Fachtagung

24. November 2016

Einsatz von Feststoffisolation in Hochspannungsbetriebsmitteln

Hochspannungskabelanlagen: Aktuelles und Trends bei Kabelgarnituren

Dr. Myriam Koch

PFISTERER Kontaktsysteme GmbH, Winterbach

Funktion und beruflicher Werdegang

Abschluss des Diplomstudiums Elektrotechnik und Informationstechnik an der RWTH Aachen (2010)

Wissenschaftliche Assistentin und Promotion am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik an der ETH Zürich (2011-2015)

Entwicklungsingenieurin für Forschung und Grundlagen im Bereich Kabelgarnituren der Pfisterer Kontaktsysteme GmbH (seit 2015)

Hochspannungskabelanlagen: Aktuelles und Trends bei Kabelgarnituren

Myriam Koch

PFISTERER Kontaktsysteme GmbH, Winterbach

1 Einleitung

Die Statistik der ENTSO-E zeigt, dass der Anteil der Kabelanlagen (sowohl Öl-Papier- und Massekabel als auch kunststoffisolierte Kabel) an der Gesamtleitungslänge in den europäischen Übertragungsnetzen derzeit noch sehr klein ist (Tabelle 1). Eine der ersten errichteten längeren Strecken mit VPE-Kabeln ist die 380 kV-Transversale in Berlin, die um die Jahrtausendwende gebaut wurde [1]. Aufgrund der zunehmend schlechteren Akzeptanz von Freileitungen in der Bevölkerung wird in den nächsten Jahren immer häufiger eine (Teil-) Verkabelung in diesen Spannungsebenen in Betracht gezogen werden. Daneben bieten Hochspannungskabelstrecken den Vorteil eines geringeren Platzbedarfs im Vergleich zu einer Freileitung und können einfacher an die vermehrt eingesetzten gekapselten Schaltanlagen angebunden werden. In der Schweiz ist aktuell ein Ersatz der Freileitung über den Grimselpass durch eine 380-kV-VPE-Kabelstrecke im Tunnel der Grimselbahn geplant [2].

Spannungsebene	110-150 kV	220 kV	380/400 kV
ENTSO-E	3,5%	2,5%	1,1%
Schweiz	27,7%	0,3%	--
Deutschland	88,1%	0,3%	0,3%

Tabelle 1: Anteil der Kabellängen in den Übertragungsnetzen der ENTSO-E [3]

Jede Kabelanlage enthält verschiedenste Garnituren, die oftmals als die Schwachpunkte der Verkabelung angesehen werden. Die veröffentlichten Statistiken basieren zwar auf einer geringen Datenbasis, können diese Annahme jedoch nicht bestätigen [4,5]. Die meisten der berichteten Ausfälle sind auf eine fehlerhafte Montage zurückzuführen.

Das Referat zeigt anhand zweier Beispiele die bereits erfolgten Entwicklungen von Garnituren für kunststoffisolierte AC-Kabel auf, die zu einer besseren und sichereren Installation in Hochspannungskabelanlagen geführt haben. Steckbare Techniken („Plug and Operate“) erlauben den flexibleren Einsatz von Garnituren: Montage auf einer breiten Palette von Kabeln sowie die Austauschbarkeit zwischen Kabelanschluss, Durchführung oder Ableiter und damit Anpassung von Konfigurationen mit minimalem Aufwand. Aktuelle Trends und Fragestellungen in diesem Bereich, wie die Verbesserung des Zusammenspiels der verschiedenen Isoliermedien, die Optimierung für sehr kalte Einsatzgebiete, die Kontaktierung von Kabeln mit Einzeldrahtisolierung, die Integration von Sensoren, etc., schließen die Darstellungen ab.

2 Aufgaben der Kabelgarnituren

Kabelgarnituren werden an Übergangsstellen, beispielsweise der Verbindungsstelle zweier Kabel (Kabelmuffe) oder dem Übergang Kabel-Freileitung bzw. Kabel-GIS und Kabel-Transformator (Kabelendverschluss, konventionell oder steckbar), benötigt. Ihre Aufgabe ist es einerseits die geforderte Stromtragfähigkeit sicher zu stellen und andererseits die elektrischen Felder zu beherrschen. Für die Aufgabe der Feldsteuerung stehen verschiedene Techniken zur Verfügung, wobei bei Kabelgarnituren zumeist die geometrische Feldsteuerung verwendet wird [6].

Die Funktion der Garnituren wird vielfach überprüft: während der Entwicklungsphase durch Typ- und Präqualifizierungstests, am Ende der Fertigung durch Stückprüfungen und nach der Montage durch eine Inbetriebnahmeprüfung [7]. Einige Schritte der Installation, wie beispielsweise die Kabelpräparation, können erst vor Ort durchgeführt werden und erfordern daher ein hohes handwerkliches Geschick sowie sauberes und gewissenhaftes Arbeiten. Kleinste Verschmutzungen, z.B. leitfähiger Abrieb aus dem Schmirgelprozess, können bereits zum Versagen der Garnituren führen. Daher schlägt die Cigré-Arbeitsgruppe B1.22 eine Standardisierung von Hilfsmitteln und Vorgängen vor und betont die Notwendigkeit die Monteure entsprechend zu schulen [8].

3 Beispiele

3.1 Kabelmuffen

Bei Öl-Papier- und Masse-Kabeln werden Muffen in einer Wickeltechnik hergestellt, d.h. nach der Kabelpräparation werden einzelne Papierlagen aufgewickelt und anschließend mit dem flüssigen Isoliermedium imprägniert. In den Anfängen der kunststoffisolierten Kabel wurde diese Technik übernommen und z.B. mit selbstverschweißenden EPR-Bändern die Muffe vor Ort hergestellt [9]. Diese Technik erlaubt zwar einerseits eine hohe Flexibilität und Anpassbarkeit, es ist aber keine Stückprüfung möglich und es existieren viele Fehlerquellen (Verschmutzung, fehlerhafte Montage, ...).

Aus diesem Grund sind heute vorgefertigte und stückgeprüfte Aufschiebemuffen aus Silikon oder EPR Stand der Technik. Auch hier ist die Montage durch geschultes Personal durchzuführen. Bei korrekter Installation haben die Verbindungen aber eine gute Qualität und erreichen die Lebenszeit des Kabels [10].

3.2 Kabelendverschlüsse

Die Entwicklung im Bereich der Kabelendverschlüsse zeigt den Trend von flüssigkeits- und gasgefüllten hin zu trockenen Systemen (siehe auch Abbildung 1). Insbesondere bei einer Installation der Endverschlüsse auf einem Mast vereinfachen trockene Varianten die Montage [11]. Sie können komplett am Boden fertig gestellt werden und müssen anschließend lediglich mit dem Kran positioniert werden. Bei konventionellen Endverschlüssen ist abschließend das Isoliermedium einzufüllen, was oftmals eine Herausforderung auf der Baustelle darstellt. Zum anderen entfällt darüber hinaus die Notwendigkeit der Langzeitüberwachung, z.B. die Drucküberwachung von SF₆-gefüllten Endverschlüssen.

In diesem Bereich sind die aktuellen Entwicklungen stark geprägt von der Reduktion der Installationszeit durch verminderten Montageaufwand vor Ort und durch den

Umweltaspekt. Es wird nach Möglichkeiten gesucht das Isolieröl oder –gas zu ersetzen oder zumindest deren Einsatz zu reduzieren (ib. SF_6). Hierfür werden neue Materialien und Methoden erprobt, wie beispielsweise funktionale Feldsteuermaterialien [12].

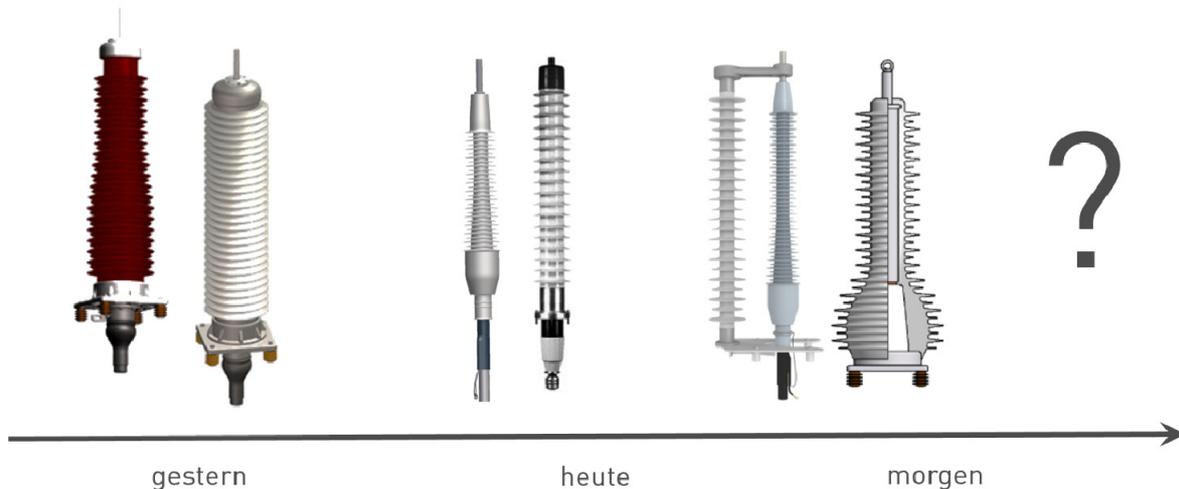


Abbildung 1: Entwicklung von Endverschlüssen: von ölgefüllten über trockenen hin zu funktionalisierten Komponenten

4 Aktuelle Trends und Herausforderungen

Die beiden Beispiele zeigen, dass in den letzten Jahren bereits einige Entwicklungsschritte hin zu zuverlässigen Kabelgarnituren stattgefunden haben. Dem aktuellen Trend zu mehr Flexibilität wird mit steckbaren Systemen begegnet. Diese erlauben den Anschluss einer großen Bandbreite verschiedenster Kabeltypen sowie ein Austausch des Kabelanschlusses mit einer Durchführung oder einem Ableiter ohne die sonst notwendigen Öl- oder Gasarbeiten.

In modernen Kabelgarnituren ist das Zusammenspiel verschiedenster Materialien, insbesondere von Feststoffen, notwendig. Metalle, thermoplastische Kunststoffe, Silikone, Harze, Verbundstoffe und andere Materialien weisen teils stark unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Die Funktionalität vieler Garnituren wird durch den korrekten Anpressdruck zwischen der Kabelisolation und dem feldsteuernden Körper aus Silikon oder EPR bestimmt [13]. Insbesondere bei steckbaren Endverschlüssen bleibt dem Silikonteil, im Gegensatz zu konventionellen Freiluftendverschlüssen, zwischen Kabelisolation und Giesharz kaum Raum zur Expansion. Im Extremfall können Temperaturen von -50°C bis $+100^\circ\text{C}$ auftreten. Die hierdurch resultierende Volumenänderung konnte erst in den letzten Jahren aufgrund der deutlich leistungsfähigeren Simulationswerkzeuge erfasst werden und so wird heute verstärkt in der Entwicklungsphase darauf Wert gelegt, den Anpressdruck über den erforderlichen Temperaturbereich optimal einzustellen.

Neben den höheren Anforderungen an den Temperaturbereich erfordern auch Neuentwicklungen im Bereich der Kabel selbst neue Konzepte. Der steigende Bedarf an elektrischer Energie führt zum Einsatz größerer Leiterquerschnitte, weshalb gerade im Hochspannungsbereich immer häufiger einzeldrahtisolierte Kabel zur Reduktion der Verluste eingesetzt werden. Hier sind neue Lösungen für die Leiterkontaktierung gefragt, da herkömmliche Verbinder nicht mehr wirkungsvoll sind. Darüber hinaus

stellen manche Kabelhersteller derzeit Hochspannungskabel mit neuen Werkstoffen vor. Diese lassen sowohl höhere Leitertemperaturen als auch höhere Feldstärken im Isoliermaterial, d.h. geringere Kabelisolationsticken, zu, die auch von den Garnituren beherrscht werden müssen.

Verbunden mit dem immer bedeutenderen Aspekt des Umweltschutzes wird versucht den erforderlichen Bauraum von Transformatoren und gasisolierten Schaltanlagen zu verringern. Durch die geschickte Integration von Messmitteln für Strom und Spannung in die Anschlusssysteme wird hier in Zukunft eine Volumenreduktion zusätzlich zu der bereits heute möglichen kompakten Bauweise durch Stecksysteme erreicht werden können.

5 Literatur

- [1] ENTSO-E und Europacable: *Gemeinsame Studie: Machbarkeit und technische Aspekte der Teilverkabelung von Höchstspannungsfreileitungen*, 2011 (<http://www.europacable.com/home/energy-cables/documents.html>)
- [2] Website zum Grimmseltunnel-Projekt: www.grimmseltunnel.ch
- [3] ENTSO-E: *Yearly Statistics & Adequacy Retrospect 2014* (<https://www.entsoe.eu/publications/statistics/yearly-statistics-and-adequacy-retrospect/Pages/default.aspx>)
- [4] Cigré Working Group B1.10: *Update of Service Experience of HV Underground and Submarine Cable Systems*, Technical Brochure 379, 2009
- [5] Meijer S., et al.: *Availability and Risk Assessment of 380 kV Cable Systems in Transmission Grids*, Cigré-Session 2012, Paper B1-104, Paris, 2012
- [6] Kuchler A.: *Hochspannungstechnik – Grundlagen, Technologie, Anwendungen*, 3. Auflage, Springer-Verlag Heidelberg, 2009, S. 481 ff
- [7] Gramespacher H., Vogelsang R. and Freilinger M.: *Application Guide for High Voltage Accessories*, Brugg Cables Academy, 2nd edition, 2015
- [8] Cigré Working Group B1.22: *Cable Accessory Workmanship on Extruded High Voltage Cables*, Technical Brochure 476, 2011
- [9] Peschke E. und von Olshausen R.: *Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung*, Publicis MCD Verlag Erlangen und München, 1998
- [10] Meijer S., et al.: *Return of Experience of 380 kV XLPE Landcable Failures*, 8th International Conference on Insulated Power Cables, Paper A.3.7, Versailles, 2011
- [11] Freilinger M.: *New design of dry type cable terminations up to 170 kV*, INMR Journal Issue 105 Q3, pp. 86-89, 2014
- [12] Ye H., et al.: *Investigation of electrical field grading bushings with microvaristor filled epoxy resin components*, IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, Santa Fe, pp. 153-156, 2014
- [13] Farahani, et al.: *Influence of the Joint Pressure on Dielectric Strength at the Interface between PE and Silicon*, International Conference on Dielectrics, Montpellier, 2016

FKH - Fachtagung

24. November 2016

Einsatz von Feststoffisolation in Hochspannungsbetriebsmitteln

Hochspannungsgleichstrom Kabelsysteme – Stand der Entwicklung und Herausforderungen

Dr. Markus Saltzer
ABB AB, High Voltage Cables, Karlskrona

Hochspannungsgleichstrom Kabelsysteme – Stand der Entwicklung und Herausforderungen

Markus Saltzer

ABB AB, High Voltage Cables, Karlskrona

1 Kurzfassung

HGÜ (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung)-Kabelverbindungen sind heute ein wesentlicher Bestandteil nachhaltiger Energieübertragungssysteme. Sie erlauben es, große Mengen Energie über weite Entfernungen zu übertragen und somit Energiemärkte über Landesgrenzen hinweg miteinander zu verbinden. Dabei ist insbesondere die Technik der extrudierten HGÜ-Kabelsysteme vorteilhaft, wenn Energie effizient in Küsten- und Hochsee-Anwendungen übertragen werden soll, sowie wenn Energie im Untergrund durch besiedelte oder ökologisch sensible Flächen geführt wird. Derzeit sind extrudierte HVDC-Kabel bis zu einem Spannungsniveau von 320 kV installiert beziehungsweise im Aufbau. Für die Zukunft werden weiter eine Erhöhung der übertragenen Leistung und eine damit einhergehende Verringerung der elektrischen Verluste gewünscht. Schon jetzt zeigt sich, dass die daraus resultierende Entwicklung zu extrudierten Kabelsystemen führt, deren Spannungsniveau über 500 kV liegt.

In diesem Beitrag wird ein solches, erfolgreich qualifiziertes Kabelsystem mit einer Energieübertragungsleistung von über 2 GW und einer Spannung über 500 kV vorgestellt. Es wird die Entwicklung insbesondere der Feststoffisulationskomponenten skizziert und auf zukünftige Anforderungen eingegangen.

2 Das Kabelsystem

Bei dem hier vorgestellten extrudierten HGÜ-Kabelsystem handelt es sich um die Entwicklung von Kabel, vorgefertigter Kabelmuffe, Kabelendverschluss sowie einer Fabrikkelmuffe auf dem Spannungsniveau von 525 kV. Als Basismaterial für die Kabelisolation wird VPE verwendet, welches in Zusammenarbeit mit einem Materialhersteller entwickelt wurde und sich durch eine besonders niedrige elektrische Leitfähigkeit auszeichnet.

Bei vorgefertigten Kabelmuffen besteht der Muffenkörper typischerweise aus mehreren elastischen Feststoffkomponenten (Elastomere) welche in einem Muffenkörper vernetzt werden. Solche Muffen werden bei der Installation durch aufschieben auf die Kabelenden montiert und bieten so den Vorteil einer kurzen Montagezeit von ein bis zwei Tagen. Spezielle Container erlauben, Vorort kontrollierte Installationsbedingungen zu schaffen. Als Konzept wird bei der hier vorgestellten vorgefertigten Muffe nicht-linear resistiv feldsteuerndes Material verwendet. Eine patentierte Technologie, welche es ermöglicht, die durch die Lastzyklen und Temperaturänderungen bedingten Schwankungen in der elektrischen Feldstärke über die kritische Grenzfläche zwischen Kabel und Muffe auszugleichen.

Die Kabelendverschlüsse des 525 kV HGÜ-Kabelsystems bestehen aus einem polymeren Verbundisolator und bieten so ein Höchstmaß an Sicherheit, ohne das Risiko von Schrapnellen oder Explosionen. Das Innere des Endverschlusses ist in der hier vorgestellten Version mit dielektrischem Gas (SF₆) gefüllt. In der Grenzfläche zum Kabel kommt wie bei der vorgefertigten Muffe auch bei dem Endverschluss eine nicht-linear resistive Feldsteuerschicht zum Einsatz. Diese wird in Kombination mit einer geometrischen Feldsteuerung in Form von elastomeren Elementen umgesetzt.

Bei der Fabrikkabelmuffe oder auch flexiblen Muffe wird im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Garnituren kein Elastomer eingesetzt. Zur Verbindung zweier Kabelenden werden hier die Leiter verschweißt und die Isolationsschichten aus VPE werden mit Formherstellungs- und Extrusionsverfahren wiederhergestellt. Dieser Prozess ist zeitaufwendig und erfordert ein hohes Mass an Reinheit in den verschiedenen Prozessschritten.



3 Der Entwicklungsprozess

Im Entwicklungsprozess gilt es Materialkonzepte für das Kabel und Zubehör, sowie Designkonzepte insbesondere für das Kabelzubehör zu entscheiden. Dabei werden auf mehreren Skalen eine große Anzahl von Tests, Messungen und Simulationen durchgeführt. Beispielsweise wurden, beginnend mit einer Studie über die Isolationskonzepte, Untersuchungen und Tests durchgeführt, die von Plattenproben im Millimeterbereich reichen und über Modellkabel von wenigen Millimetern Isolationsstärke führen, bevor auf einer mittleren Skala der Isolationsstärke Kabel sowie Kabelzubehör evaluiert werden, um schließlich nach Entwicklungstest auf der vollen Skala der Endprodukte die Qualifikation von Kabel und Kabelzubehör durchzuführen. Zahlreiche Messungen von Materialeigenschaften, Experimente mit Isolationssystemen sowie Simulationen begleiten dabei den Prozess auf allen Skalenebenen. Hierzu gehören beispielsweise die Bestimmung von Durchbruchfeldstärken AC wie DC, Leitfähigkeitscharakteristiken und -profile, Raumladungsverhalten, mechanische Stabilität unter und oberhalb des Schmelzpunktes, chemische Stabilität, Alterungsprozesse, elektrische Feldmessungen, etc.

4 Qualifikation

Das vorgestellte, extrudierte 525 kV HGÜ-Kabelsystem ist im Einklang mit internationalen Standards und Empfehlungen geprüft worden. Für die elektrische Qualifikation kam hier das Qualifizierungsverfahren nach CIGRE, Technische Broschüre (TB) Nr 496 (2012) zur Anwendung. Nicht HGÜ-Kabel spezifische mechanische oder andere Tests basieren auf verschiedenen IEC-Normen. Bei den elektrischen Testverfahren innerhalb TB 496 handelt es sich im Wesentlichen um zwei wichtige Tests. Ein Typentest, welcher bei einer erhöhten Spannung des 1.85-fachen der Nominalspannung über 30 Tage lastzyklische Beanspruchung simuliert und einen Langzeittest, welcher bei 1.45-facher Nominalspannung über 360 Tage verschiedene Beanspruchungszyklen simuliert wird. Insgesamt wurde das System seit 2014 mehrfach erfolgreich langzeit- sowie mehrfach erfolgreich typengetestet.

5 Herausforderungen

Für die Zukunft gibt es jedoch noch weitere potenzielle Herausforderungen, welche sich derzeit in der Abklärung befinden. Temporäre Überspannungen auf Kabelsystemen sind eine solch potenzielle Herausforderung. Hier können neuere Entwicklungen im Umrichter Bereich zu neuen Überspannungen auf HGÜ-Kabelsystemen führen. Als Beispiele seien hier neue Spannungsformen im unwahrscheinlichen Fall eines fehlerhaften Umrichters genannt oder dem DC Signal überlagerte hochfrequente Anteile, welche sich durch Schaltvorgänge ergeben können. Auch die Entwicklung von einfachen Kabelpunktverbindungen hin zu gemischten Netzwerken beispielsweise aus einem Kabelsystem und einer Hochspannung Überlandleitung können zu neuen Signalanforderungen an das Kabelsystem führen, sei es beispielsweise durch Blitz Einschläge in die Hochspannungsleitung, Erdungsfehler, oder die Interaktion von AC und DC System am gleichen Hochspannungsmast. Neu auftretende Signalformen müssen dabei in jedem Fall hinsichtlich ihres Einflusses auf das Feststoffisolationssystem in der Kabelverbindung geprüft werden.

6 Schlusssatz

Die bestehende Qualifikation des 525 kV extrudierten HGÜ Kabelsystems, ist ein signifikanter Schritt im Rahmen unterirdischer HGÜ-Systeme. Mit einer Leistungsübertragung von mehr als 2 GW in der neuen Klasse der HGÜ-Kabelsystemen über 500 kV lassen sich mindestens 50% mehr Leistung über sehr lange Distanzen übertragen, als es mit früheren Lösungen auf 320 kV der Fall war. Ebenso ermöglicht die Technologie das niedrigste Kabelgewicht- pro installiertem Megawatt. Der Autor glaubt, dass sich das hier präsentierte Spannungsniveau auch in Zukunft etablieren wird, und dass diese Entwicklung einen Beitrag zu niedrigeren Energieverlusten, zu zuverlässigeren Energieübertragungssystemen, zu größeren Mengen übertragener Energie, sowie zu einem flexibleren Energienetz leisten kann.

FKH - Fachtagung

24. November 2016

Einsatz von Feststoffisolation in Hochspannungsbetriebsmitteln

Repetitive Pulsbelastung Polymerer Isolierstoffe - Alterung und Diagnostik

Raphael Färber

High Voltage Laboratory, ETH Zürich

Funktion und beruflicher Werdegang

Mai 2014-heute	Doktorand im Hochspannungslabor der ETH Zürich
2013	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen
2012	Praktikum bei ABB Corporate Research, Baden-Dättwil
2006-2011	M.Sc. in Physik, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Repetitive Pulsbelastung Polymerer Isolationsstoffe - Alterung und Diagnostik

Raphael Färber

High Voltage Laboratory, ETH Zürich

Zusammenfassung

Die jüngsten Entwicklungen im Bereich der Leistungshalbleiterschalter (allen voran die Reifung der Siliziumkarbid-Technologie) eröffnen neue Möglichkeiten in Bau und Anwendung von leistungselektronischen Umrichtern für die Mittelspannungsebene. Nebst bereits etablierten halbleiterbasierten Netztechnologien wie der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) und den sogenannten Flexible AC Transmission Systems (FACTS) wird derzeit intensiv an der (Weiter-)Entwicklung von sogenannten Solid-State-Transformatoren (SSTs) geforscht [1]. Zum Preis einer erhöhten Komplexität in Steuerung und Aufbau im Vergleich zu konventionellen 50-Hz Transformatoren bieten SSTs nebst höheren Leistungsdichten eine einmalige Flexibilität als elektrische Energiewandler. Als *aktive* Netz-Netz-, Netz-Last- oder Netz-Quelle-Schnittstellen verbinden sie unterschiedliche Spannungsebenen und Spannungsfrequenzen (inkl. Gleichspannung) und sind damit ein wichtiger Bestandteil zukünftiger Übertragungs- und Verteilnetze.

Obwohl bereits in den 1950er Jahren Zusammenhänge zwischen nichtharmonischer Spannungsbelastung und gehäuften Kabelisulationsversagen beschrieben wurden [2], gewann die Thematik vor allem mit dem grossflächigen Aufkommen von regelbaren Antrieben für Induktionsmotoren basierend auf dem Prinzip der Pulsweitenmodulation (PWM) an Aufmerksamkeit. Man stellte eine zum Teil drastische Verkürzung der Lebensdauer der polymeren Wicklungsisolation der angesteuerten Motoren fest - und erkannte die Notwendigkeit dedizierter Isolationskonzepte um die Funktion der Potentialtrennung bei solchen Belastungen über die vorgesehene Lebensdauer aufrecht erhalten zu können [3,4].

Mit der Kommerzialisierung von Halbleiterschaltern mit Sperrspannungen über 10 kV, nutzbaren Schaltfrequenzen von mehreren Dutzend kHz und Schaltflanken über 10 kV/ μ s (sowie dem Einsatz neuer mehrstufiger Konvertertopologien) wird die oben angesprochene Isolationsproblematik noch verschärft und die Hochspannungstechnik mit neuen Herausforderungen konfrontiert. Gerade bei Feststoffisolationen nimmt die Identifizierung und das Verständnis der aktiven Alterungsprozesse wegen der Irreversibilität eines Isolationsversagens eine herausragende Rolle ein. Ziel unserer Forschung ist es, durch Untersuchungen an Labor-Prüfkörpern mit unterschiedlichen Elektrodengeometrien (quasihomogen, stark inhomogen, Litze), dem Verständnis der relevanten molekularen Prozesse (z.B. Temperatur- und Frequenzabhängigkeit dielektrischer Verluste) und geeigneter diagnostischer Methoden (on-/offline dielektrische Spektroskopie, optische Teilentladungsmessung) eine quantitative Charakterisierung der Alterungsprozesse unter repetitiver Pulsbelastung zu erhalten. Diese Erkenntnisse sollen dann zur Realisierung von langzeitstabilen Isolationsmaterialien

bzw. -systemen für Belastungen dieser Art beitragen (z.B. Wicklungsisolation im Mittelfrequenztransformator eines SSTs).

Im Fachtagungsvortrag werden einführend ganz allgemein die Quellen netz- und lastseitiger nichtharmonischer Spannungen sowie deren negative Auswirkungen auf Betriebsmittel diskutiert. Des Weiteren soll darin auf den aktuellen Wissensstand sowie die offenen Fragen bezüglich den (verstärkt) aktiven Alterungsprozessen in polymeren Isolationsstoffen bei nichtharmonischer Spannungsbelastung eingegangen werden. Abschliessend wird ein experimenteller Aufbau zur Festigkeitsprüfung von Trockenisolationmaterialien unter gleichzeitiger Einwirkung von thermischer und PWM- bzw. Mischspannungsbeanspruchung (mit gekoppelter Zustandsdiagnostik) vorgestellt.

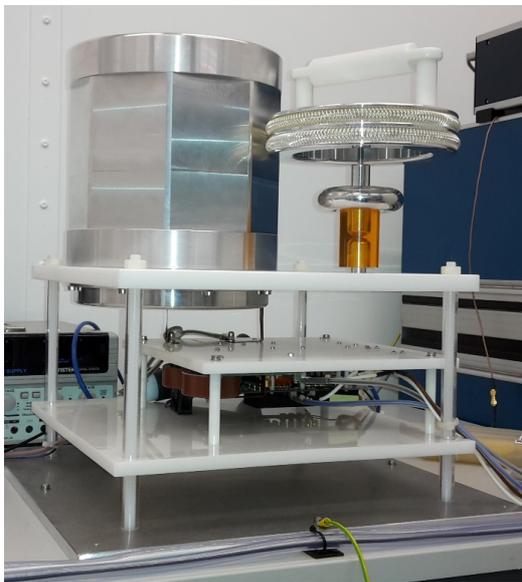


Abbildung 1: Prüfstand zur Simulation elektrothermischer Isolationsbelastungen in Mittelspannungskonvertern

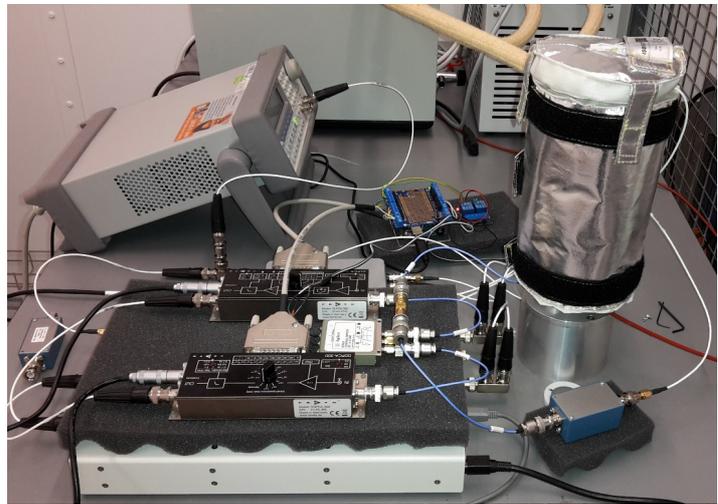


Abbildung 2: Modulares dielektrisches Spektrometer für die Alterungsdiagnostik belasteter Prüfkörper

2 Referenzen und weiterführende Literatur

- [1] J.W. Kolar, G. Ortiz, "Solid-State-Transformers: Key Components of Future Traction and Smart Grid Systems", International Power Electronics Conference (IPEC), 2014.
- [2] S.B. Warder, F. Friedlander, and A. N. Arman, "The influence of rectifier harmonics in a system on the dielectric stability of 33-kV cables", CIGRE paper no. 1025, 1950.
- [3] T. Bengtsson, et al., "Repetitive Fast Voltage Stresses – Causes and Effects", IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009.
- [4] A. Cavallini, D. Fabiani, and G.C. Montanari, "Power Electronics and Electrical Insulation Systems – Part 1: Phenomenology Overview", IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010.

FKH - Fachtagung

24. November 2016

Einsatz von Feststoffisolation in Hochspannungsbetriebsmitteln

Geschirmte Feststoffisolation für Mittelspannungsschaltanlagen

Dr. rer. nat. Raimund Summer
Schneider Electric, Regensburg

Funktion und beruflicher Werdegang

Studium der Physik an der *TU München*, mit Aufenthalt als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der *University of California at Berkeley* (Hochtemperatursupraleiter), Diplom in 1996. Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der *Universität Regensburg* (HT-Supraleiter Bolometer für THz Strahlung, optische Modulation der el. Leitfähigkeit von Halbleiterübergittern, THz Modulation der el. Leitfähigkeit von angeregtem GaAs), mit Promotion in 2002.

Seit 2003 tätig in der Entwicklung von Mittelspannungsschaltanlagen (*Alstom, Areva, Schneider Electric*). Aufbau der numerischen wissenschaftlichen Berechnungen in F&E, Leiter der Simulationsgruppe, Leiter der Abteilung Forschung und Vorentwicklung und deren Projekte. Seit 2013 Architekt für MS GIS mit Leitung von Forschungsprojekten und Vorentwicklungsprojekten.

Geschirmte Feststoffisolation für Mittelspannungsschaltanlagen

Raimund Summer

Schneider Electric, Regensburg

1 Kurzfassung

Die verschiedenen Typen von Schaltanlagen in den Wechselspannungsnetzen der Mittelspannung können nach ihrer vorwiegend eingesetzten Technologie zur elektrischen Isolierung unterteilt werden. Eine neuere Form stellen die vollständig geschirmten Feststoff-isolierten Systeme dar. Sie werden meist als SSIS (shielded solid insulated system) oder auch 2SIS bezeichnet. Vor allem im unteren Leistungssegment teilt dieses Isolationssystem Vorzüge mit Gas-isolierten Systemen (GIS) hinsichtlich höherer Betriebssicherheit, erhöhter Verfügbarkeit, Robustheit gegen äußere Einflüsse, kompaktere Bauform und vermindertem Wartungsaufwand. Der vorliegende Beitrag führt in die Thematik der Isolationstechnik von Mittelspannungsschaltanlagen ein und stellt schließlich am Beispiel der Anlage *Premset* (Abbildung 1) der Firma Schneider Electric die 2SIS Technologie vor.



Abbildung 1: SSIS Schaltanlage Premset, Produktbild (links), Innenansicht (mitte), Explosionsdarstellung (rechts)

2 Technologien zu elektrischen Isolation in der Mittelspannung

Zur elektrischen Isolierung von Hochspannungskomponenten eignen sich grundsätzlich verschiedenste Materialien in allen Aggregatzuständen - oder auch der weitestgehend stofffreie Raum, das Ultrahochvakuum. Zur Wahl der geeigneten Isolation muss unterschieden werden, welche quasistatische Belastung durch das elektrische Feld bei anliegender Spannung widerstanden werden muss und ob das Medium auch zur Unterbrechung, also der Löschung des Nennstromes oder des Kurzschlußstromes mit nachfolgender Wiederverfestigung der elektrischen Isolation dienen soll. Weiter muss

das Isolationsmedium auch eine ausreichend thermische Übertragungsleistung bieten können, um die elektrische Verlustleistung abzuführen und um die Temperaturen an den Bauteilen der Anlage auf ein betriebssicheres Niveau zu begrenzen.

Das älteste und bis heute gebräuchlichste Medium ist gasförmig, die Umgebungsluft. Seit den 1980'er Jahren haben sich daneben die GIS unter Verwendung von Schwefelhexafluorid (SF₆) durchgesetzt und einen Teil der Luft-isolierten Anlagen (AIS), hauptsächlich aber die mit flüssigem Öl isolierten Systeme sowie die meisten der ebenso in den 80ern aufkommenden Feststoff-isolierten Anlagen (SIS) ersetzt. Dieser Trend stellte sich durch die steigenden Anforderungen hinsichtlich höherer Betriebssicherheit, erhöhter Verfügbarkeit, Robustheit gegen äußere Einflüsse, kompaktere Bauform und vermindertem Wartungsaufwand ein.

Die Typ-Bezeichnung wird auf die vorwiegende Isolation bezogen. Genaugenommen sind alle bis heute verwendeten Anlagen Hybride aus zwei oder mehr der genannten Systeme. Ein AIS zum Beispiel benötigt Feststoffisolatoren, um die spannungsführenden Bauteile zu tragen, Felder mit einem Leistungsschalter nutzen Vakuum-Schaltröhren oder SF₆-Schalter, letztere in einer feststoffisolierten Kapselung. GIS nutzen Stützer und elektrische Durchführungen aus Feststoff-Isolatoren sowie die bereits genannten Leistungsschalter. SIS in ihrer klassischen Form nutzen zusätzlich auch für die statische Isolierung ein externes Luftvolumen. Sie sind Hybrid-Systeme, bei denen nur ein Teil des elektrischen Potentials innerhalb der Feststoffisolierung abgebaut wird, der meist größere Potentialabfall erfolgt in der Luftisolierung.

3 Feststoff-Isolation in der Mittelspannung

In Europa wurden bereits in den 70er Jahren SIS von namhaften Herstellern entwickelt und Anfang der 80er Jahre auf den Markt gebracht. Ein Ziel war es, Lichtbogenfußpunkt-freie Anlagen zur Verfügung zu stellen (Abbildung 2). Leider entwickelte sich diese Idee zu einem etwas verunglückten Kapitel in der Mittelspannungstechnik bei Netzspannungen oberhalb der 10 kV Ebene. Es kam zu zahlreichen Störfällen im Netz und die Anlagen wurden nach und nach durch andere Technologien ersetzt. In der Folge litt die SIS unter einem ungünstigen Ruf in Europa. Die Ursachen lagen wohl teils in dem frühen Entwicklungsstadium der Kunststoff-Technologie, aber zum Teil auch im derzeit favorisierten Konstruktions- und Bedienkonzept mit ausfahrbaren Schaltwagen. Einige Hersteller haben jedoch bis heute die SIS weiterentwickelt, meist mit fest installiertem Leistungsschalter. Vor Allem im außereuropäischen Raum kamen auch in jüngerer Zeit neue Produkte auf den Markt, unter anderem um im Nachgang des Kyoto Protokolls Alternativen zur SF₆-Isolierung zu bieten.

Feststoffisolatoren wie Silika-gefülltes Epoxidharz oder auch Silikon weisen in praktischen Anwendungen eine hohe elektrische Durchschlagsfeldstärke von über 20 kV/mm auf. Diese Werte werden in Gasen erst bei hohen Dichten (Drücken) erreicht, bei SF₆ in homogenen elektrischen Feldern etwa bei annähernd 3 bar. Allerdings ist die Durchschlagsfeldstärke keine reine Material-Größe der Isolatoren. Sie hängt ab von der Dicke des Isolators und von seiner Verarbeitungsqualität (Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen, Volumeneffekt). So kann beispielsweise in Silikonelastomeren eine Durchschlagsfeldstärke von mehr als 100 kV/mm bei Schichtdicken kleiner 1 mm erreicht werden, jedoch bei realistischen Dicken von mehr als 10 mm sinkt in praktischen Prüfungen der Wert auf einige 20 kV/mm.



Abbildung 2: „Lichtbogenfußpunktfreie“ SIS der 80er
(Quelle: Netzpraxis, Jg.50, Heft 10, 2011)

In SIS können sehr kompakte Bauformen realisiert werden, vergleichbar mit der einer GIS. Hohe Feldstärken werden vor allem in Bereichen mit inhomogener Feldverteilung erreicht, beispielsweise an Verschraubungen oder an Leiterenden. Eine Ummantelung mit einem Feststoffisolator senkt die maximal auftretende Feldstärke an der Leiteroberfläche und schützt den Bereich durch die intrinsisch hohe Durchschlagsfestigkeit des Isolators. An der Oberfläche des Isolators ist das elektrische Feld bereits etwas homogener und leichter beherrschbar. Allerdings baut sich in dem Hybridsystem das elektrische Potential nur langsam bis zur Oberfläche des Isolators ab. Selbst wenn die elektrische Feldstärke an der Oberfläche unterhalb der Ionisationsschwelle der Umgebungsluft liegt, können in diesem Bereich Umgebungseinflüsse wie Verschmutzungen, Salze, metallische oder dielektrische Partikel, Kondensation oder Kleintiere zu Entladungen entlang der Oberfläche oder Überschlägen in der Luft führen und den Isolator erodieren (Abbildung 3). Berührungssicherheit ist per se nicht gegeben. Regelmäßige Wartungsarbeiten zur Reinigung der Isolatoroberflächen können bei entsprechenden Umgebungsbedingungen zu erhöhten Ausfallzeiten führen, vergleichbar zu einer AIS.



Abbildung 3: Alterung einer Feststoffisolierung durch Ionisation am Trielpunkt in erschwerter Umgebung. Anfangsstadium mit erodiertem Epoxid und freiliegendem Füllstoff (links), fortgeschrittenes Stadium (mitte), und Endresultat mit starker Schädigung durch Kriechströme und Überschläge (rechts)

Jede Ummantelung hat ein geometrisches Ende. An diesen Stellen existieren sogenannte Trielpunkte, das sind Schnittstellen der 3 angrenzenden Medien Leiter, Isolator und Luft. Die elektrische Feldstärke erhöht sich stark an Trielpunkten. Solche Stellen müssen durch die Formgebung der Leiter oder durch leitfähige Einlagen abgeschirmt werden. Bei SIS ist der gesamte Leiterzug bis auf den Trenn- und Erdschalter feststoffummantelt. Die Fügstellen zwischen den Isolatoren der einzelnen Bauteile, die Edelfugen, werden durch Kombination von harten und elastischen Isolatoren mit starker Anpressung gebildet, um eine möglichst perfekte interne

Grenzfläche ohne Fremd- oder Luftporen zu gewährleisten. An diesen Fugen ist die Entladung tangential zur inneren Grenzfläche auslegungsrelevant.

Im Betrieb erfahren die Bauteile starke Temperaturänderungen durch die elektrische Verlustleistung und durch tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen. Die Wärmeausdehnung der elektrischen Leiter unterscheidet sich von der des Isolators. Konstruktiv bedingt dies möglichst einfache und gerade Leiterzüge um die mechanischen Belastungsgrenzen des Isolators nicht zu überschreiten und um eine Ablösung vom Leiter zu vermeiden. Ablösungen können zu Entladungen in der entstehenden Kavität und letztlich zum Versagen der Isolation führen. Bei Elastomeren reicht es häufig einen geeigneten Primer an der Grenzfläche zu verwenden. Bei den spröden Epoxiden ist oft eine elektrisch leitende Zwischenschicht hilfreich, um etwaige Kavitäten feldfrei zu halten.

Um eine möglichst hohe Qualität und damit eine gute Langzeitbelastbarkeit zu gewährleisten, sollten feststoffisolierte Bauteile einer strengen Prüfung der Teilentladung (TE) unterzogen werden, an Baumustern auch nach Temperaturwechseln. Real ist die Forderung nach TE-Freiheit messtechnisch wegen der Grundstörpegel begrenzt. Wiederholbar hohe Qualität bedingt hohe Kompetenz bei der Herstellung und eine starke Bindung an den Lieferanten und den Materialhersteller. Anders als bei Gasen sind Fehlstellen bei Feststoffisolatoren ortsfest und potentiell anwachsend. Wie auch von Durchführungen an HV GIS und Transformatoren bekannt, lassen sich auch bei regelmäßiger Überwachung ein Einsetzen von Teilentladungen und der Zeitpunkt des Versagens der Isolation nicht vorhersagen.

Die Wärmeableitung erfolgt bei einer SIS durch Wärmeleitung im Isolator und Konvektion an der Oberfläche des Isolators. Abhängig von der Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Isolatoren und deren Schichtdicke sowie der zur Verfügung stehenden Oberfläche, kann bei einer SIS die Kühlung besser sein als bei einer GIS, da letztere an 3 Grenzflächen einen konvektiven Wärmeübergang überwinden muss; am Leiter, an der Behälterinnenseite und an der Behälteraussenseite. Elastomere tendieren zu einer kleineren, Epoxidsysteme zu einer höheren Kühlleistung. Die an den eingegossenen Leitern zulässigen Dauer-Grenztemperaturen sind vom Isolatormaterial begrenzt und erfordern unter Umständen größere Leiterquerschnitte.

Feststoffisolatoren müssen mit Sorgfalt behandelt, transportiert und montiert werden. Schäden an den Oberflächen und Risse durch Schlageinwirkung oder zu große oder zu kleine Verschraubungskräfte sind unter allen Umständen zu vermeiden.

4 Geschirmte Feststoff-Isolation in der Mittelspannung

Geschirmte Feststoffisolation ist per se nicht neu; Hochspannungskabel und Kabelstecker, feststoffisolierte Sammelschienen an GIS und metallisierte Wandler nutzen beispielsweise diese Technologie. Kabel etwa können durch Extrusion in Längen hergestellt werden bei begrenzter Variantenzahl je Produktionsmenge. Eine Schaltanlage erfordert hingegen viele kleinere Bauteile die in deutlich kleineren Mengen und in mehreren Produktionsschritten einzeln verarbeitet und geprüft werden müssen. Im unteren Mittelspannungsbereich, mit mäßiger Varianz bezüglich der Bemessungswerte Strom und Spannung sowie bezüglich der Funktionalitäten, bietet sich jedoch das SSIS an.



Abbildung 4: Einfluß der Oberflächenschirmung auf die elektrische Feldverteilung am Beispiel des Vakuumleistungsschalters (VI). Modelldarstellung mit aufgeschnittener Ansicht des VI (mitte). Bei (hybrider) SIS Isolierung (links) zeigen die Feldlinien die Spannungsbelastung des Außenraumes an. Bei SSIS bewirkt die Schirmung einen feldfreien Außenraum.

Im Unterschied zu SIS sind bei einer SSIS alle Isolator-Oberflächen elektrisch leitfähig beschichtet und geerdet. Die Bauteile sind daher Berührungssicher und der Außenraum ist frei von elektrischen Feldern (Abbildung 4). Da das elektrische Potential vollständig über die Feststoffisolation abfällt, erhöht sich die elektrische Feldstärke im Feststoffisolator im Vergleich zu einer SIS und die elektrische Festigkeit der Feststoffisolatoren wird genutzt. Dank der leitfähigen oder metallisierten Oberflächen (Abbildung 5) wird dabei der Feststoff weitestgehend vor Alterung durch äußere Einflüsse geschützt, so dass eine langzeitstabile Isolierung gewährleistet wird.

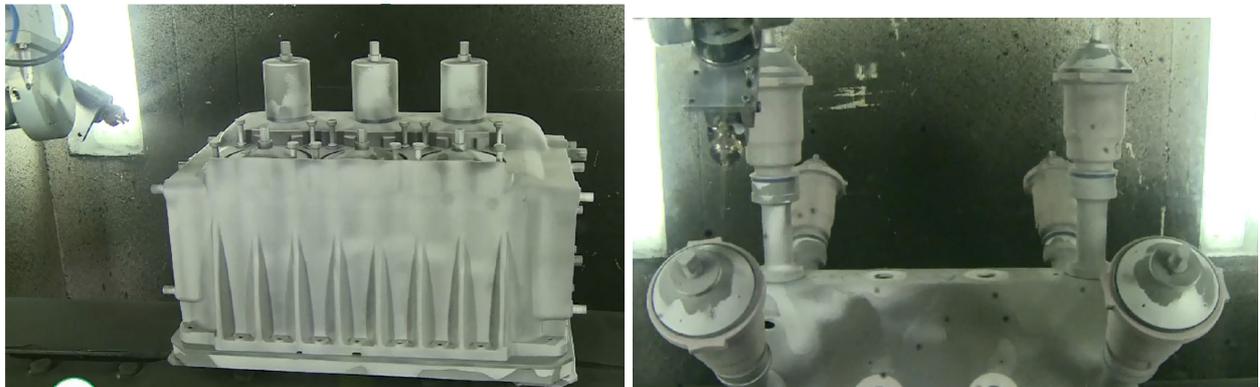


Abbildung 5: Metallische Beschichtung des Epoxidgehäuses und der VI und Anschlüsse. (Quelle: Video „Premset Industrial Process“, <http://www.schneider-electric.com/b2b/en/products/product-launch/premset/videos.jsp>)

Die wesentlichen Vorteile einer SSIS liegen in ihrer ultra-kompakten Baugröße, ihrer Unempfindlichkeit gegen Umgebungseinflüsse wie Staub oder Feuchtigkeit, die vollständige Berührungssicherheit und der einfachen und schnellen Aufstellung und Inbetriebnahme. Ähnlich einer GIS müssen wenige Verbindungen an den modularen Feldern geschaffen werden, ganz im Gegensatz zu einer AIS. Die fabrikfertigen und vorgeprüften SSIS Anlagen bieten einen hohen Sicherheitswert bei Aufstellung und erfordern nur einfache und wenige störungsanfällige Arbeiten bei der Verbindung der Anlagen.

Die Verbindungselemente (Sammelschiene) erlauben eine einfache und sichere Montage und sind durch eine dicke Leitschicht robust geschützt gegen Beschädigungen bei der Handhabung. Ein neues, flaches Verbindungselement wurde entwickelt um die Verbindung zu Vereinfachen. Geometrisch feldsteuernde Elemente gewährleisten eine entladungsfeste Verbindung in den Randbereichen des komprimierten Elastomers. Alle elektrisch leitfähigen Beläge werden geerdet.

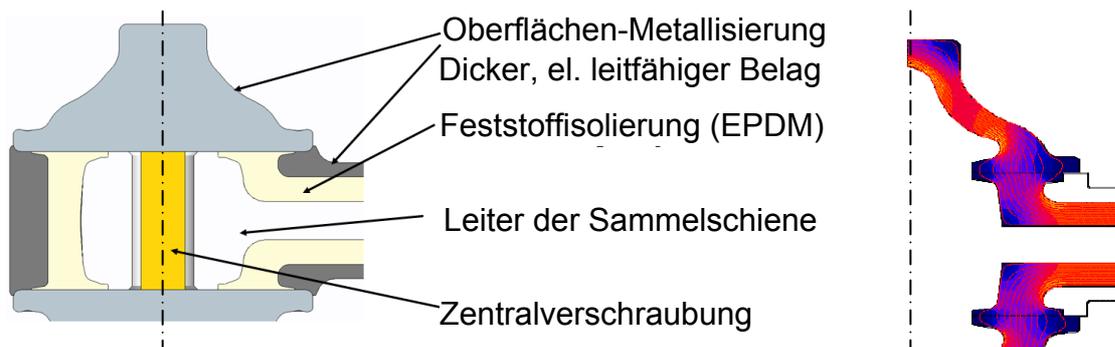


Abbildung 6 Neuartige, flache Sammelschieneverbindung (links) und Verteilung der elektrischen Feldstärke in den Feststoffisolatoren (rechts)

Im Betrieb vermeidet die Feststoffisolation in Verbindung mit der Oberflächenmetallisierung selbst im Störfall über den größten Teil der Anlage das Risiko der Ausbildung eines 3-phasigen Störlichtbogens, vermindert also die Auswirkungen eines Lichtbogens weitgehend. Die Alterungsbeständigkeit ist durch die Oberflächenmetallisierung deutlich gegenüber einer SIS verbessert. Der feldfreie Raum um die Oberflächen vermeidet Schäden durch Ionisation oder Kriechstrombildungen im Zusammenspiel mit Temperatur, Feuchtigkeit und Staub oder Salzen. Die Metallisierung schützt den Isolator (Epoxidharz) weitgehend gegen Feuchtigkeit und Chemikalien. Im Unterwassertest demonstrierte die Anlage, daß der Betrieb bei Überflutung unter 15 kV Spannung für 4 Tage aufrechterhalten werden kann (Siehe: *“Premset Underwater : Flooding test”* <http://www.schneider-electric.com/b2b/en/products/product-launch/premset/videos.jsp>).

Langzeituntersuchungen unter erhöhter Temperatur, Temperaturwechsel, Feuchtigkeit und Salznebel sowie Schwefeldioxid, mit und ohne Spannungsbelastung, resultierten in einer rechnerischen Lebenserwartung von 40 Jahren.

5 Schlussfolgerung

Geschirmte feststoffisolierte Anlagen stellen eine konsequente Weiterentwicklung der SIS dar, welche insbesondere für den Einsatz bei erschwerten und aggressiven Umgebungsbedingungen und bei begrenztem Raumangebot die Vorteile einer Feststoffisolation vollständig nutzen und die der SIS noch übertreffen. SSIS stellt damit eine moderne Technologie zur Verfügung, die analog zu heutigen GIS den aktuell höchsten Anforderungen an Betriebssicherheit und Personensicherheit genügt und eine lange Lebensdauer bietet.

FKH - Fachtagung

24. November 2016

Einsatz von Feststoffisolation in Hochspannungsbetriebsmitteln

Aktuelle Entwicklungen und Anwendungstrends bei Freileitungsisolatoren

Dr.-Ing. habil. Frank Schmuck
PFISTERER SEFAG AG, Malters

Funktion und beruflicher Werdegang

Frank Schmuck ist gegenwärtig Leiter des Bereiches Technology Freileitungen bei der Pfisterer Sefag AG in Malters (CH). Pfisterer Sefag stellt seit ca. 40 Jahren Verbundisolatoren für weltweite Anwendungen her. Eine kurze Zusammenfassung der beruflichen Stationen:

- 1992 Promotion über das Verhalten von Silikongummi als Mantelwerkstoff von Verbundisolatoren an der TH Zittau
- 1994 bis 1998 Produktmanager und Entwicklungsleiter für epoxidharzverstärkte Elektroprofile und Verbundhohlisolatoren bei der Fa. Cellpack (CH)
- Seit 1994 Mitarbeit in internationalen Arbeitsgruppen der CIGRE und IEC
- Seit 2006 Leiter der CIGRE-Arbeitsgruppe für Isolatoren
- Seit 2007 Kolumnist des internationalen Isolatorenmagazins „Insulator News and Market Report“
- Seit 1998 Tätigkeit bei Pfisterer Sefag, Bereichsleitung Isolatorentchnik
- 2011 Publikation des Buches „Silikon-Verbundisolatoren“ im Springer-Verlag
- 2012 Habilitation an der TU Dresden
- 2014 Kapitelautor im Green Book „Freileitungen“ der CIGRE

Aktuelle Entwicklungen und Anwendungstrends bei Freileitungsisolatoren

Frank Schmuck

PFISTERER SEFAG AG, Malters

1 Kurzfassung

Der Beitrag befasst sich mit der Technologie der Verbundisolatoren und besteht aus zwei Teilen: Ausgehend von den drei Halbzeugen eines Verbundisolators werden aktuelle Entwicklungen und Anwendungstrends aufgezeigt. Am praktischen Beispiel eines SBB-Isolators kann die Produktoptimierung aufgrund der Formvariabilität des Mantelwerkstoffs gezeigt werden. Im zweiten Teil wird kurz von der CIGRE 2016 in Paris und speziell von der Freileitungssession des CIGRE-Studienkomitees B2 berichtet.

2 Teil 1 - Entwicklungen und Anwendungstrends

Verbundlangstabisolatoren wurden in den späten sechziger Jahren eingeführt. Sie sind aus verschiedenen Komponenten aufgebaut (Abbildung 1). Die Grundidee besteht in der Kombination unterschiedlicher Materialien, die gemäss ihrer Festigkeit und ihrem Eigenschaftsbild die verschiedenen Aufgaben in der Isolatorenfunktion erfüllen. Daraus ergibt sich, dass die Endkappen und der glasfaser-verstärkte Harzstab die mechanische Funktion und der Mantelwerkstoff massgeblich die elektrische Funktion wahrnehmen. Der Mantelwerkstoff schützt auch den Stab gegenüber Umwelteinflüssen, sodass intakte Interfacebereiche und eine langzeitstabile Adhäsion zwischen Stab und Mantelwerkstoff für eine hohe Lebensdauer entscheidend sind. Aufgrund der hohen Marktakzeptanz von Verbundisolatoren bis in die höchsten Spannungsebenen sind Serienfertigungen möglich, die einen entsprechenden positiven Kosteneffekt haben (economy of scales). In bestimmten Anwendungsfällen sind Lösungen ohne Verbundisolatoren und mit konventioneller Technology nicht möglich. Als Beispiel kann das Ultramet des deutschen EVU's Amprion gelten, wo auf existierenden AC-Traversen ein DC-System aufgelegt wird. Des Weiteren sind nach dem Erscheinen der ersten Norm IEC (6)1109 für Verbundlangstabisolatoren /1/ im Jahr 1992 weitere Normen verfügbar, die den aktuellen Stand der Technik reflektieren und im Rahmen von Wartungszyklen kontinuierlich weiterentwickelt werden. Es soll aber auch angemerkt werden, dass der Kostendruck bei allen Isolatortechnologien zu einer Verschärfung der Normung führen wird, um weiterhin zuverlässige Produkte zu gewährleisten. Es ist der Trend erkennbar, dass EVU's auf Grundlage existierender Normen schärfere Abnahmekriterien in ihren Spezifikationen festlegen und aufgrund der Globalisierung innerhalb einer international agierenden Herstellergruppe individuelle Audits durchführen und Freigaben für spezifische Werke erteilen.

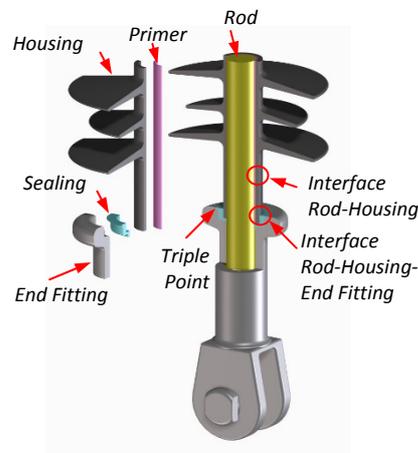


Abbildung 1: Aufbau eines Verbundlangstabisolators

Im Folgenden wird der Stand der Technik bezüglich der Halbzeuge vorgestellt.

Endkappen

Für Verbundlangstabisolatoren werden typischerweise Armaturen aus Stahl verwendet. Abhängig von der Anwendung und der Belastung sind Stahlguss (z. B. EN-GJS 400) oder Stahlschmieden (CK 45) die angewandten Verfahren. Für vorwiegend zugbelastete Isolatoren und Nennlasten > 70 kN ist die Verwendung von geschmiedetem Stahl eingeführter Stand der Technik. Die Anschlussdimensionen für Verbundlangstabisolatoren basieren aufgrund der erforderlichen Substitutionskompatibilität auf den Normen von konventionellen Isolatoren (Abbildung 2) und sind z. B. in den Normen IEC 60120 /2/, IEC 60471 /3/ oder IEC 61466 /4, 5/ umfassend beschrieben. Die Stahlarmaturen sind feuerverzinkt. Die Dicke der Zinkschicht wird gemäß den Empfehlungen der IEC 60383 /6/ eingestellt, als eingeführte Größe gilt > 85 μm . Größere Schichtdicken (z. B. 150 μm) für stark korrosive Einsatzbedingungen (Wüste, Tunneleinsatz, Trassenverlauf in Meeresnähe) oder Gleichstromanwendungen sind möglich.



Abbildung 2: Endkappen für Verbundlangstabisolatoren

Aufgrund der Standardisierungsvorgaben gibt es praktisch kein Potential zur Weiterentwicklung.

Stab

Der GFK-Stab ist eine wichtige Komponente des Verbundisolators. Der Stab wird üblicherweise in einem kontinuierlichen Pultrusionsverfahren hergestellt. Je nach Anwendung oder Belastung kommen unterschiedliche Durchmesser zum Einsatz. Der Fasergehalt bestimmt die intrinsische Zug- und Biegefestigkeit der Stäbe. Stand der Technik ist der Einsatz von sprödebruch-resistentem E-CR-Glas.

Stabdurchmesser bis 220 mm sind in der Entwicklung (75 kg/m!). Bei diesen grossen Durchmessern ist aufgrund der endothermen/exothermen Charakteristik bei der Harzvernetzung die Bildung von Exothermierissen eine Herausforderung (Abbildung 3).



Ein Verfügbarkeitsproblem könnte sich zeitnah abzeichnen: Die ECHA (European Chemicals Agency) will den Einsatz von bestimmten und in der Elektroindustrie bewährten Anhydridhärtern (Hexahydrophthalic Anhydride, Methylhexahydrophthalic Anhydride) für Epoxidharze ab 2020 verbieten. Der Import fertiger Produkte ist aber weiterhin erlaubt. Die resultierenden Konsequenzen wären:

Abbildung 3:
Exothermieriss in einem Stab mit 88 mm Durchmesser

- Verlagerung der Produktion in nicht-EU-Länder,
- Import der entsprechenden Produkte,
- Preiserhöhung,
- Verlust der Technologieführerschaft und Wettbewerbsfähigkeit.

Mantelwerkstoff

Heute hat sich der Werkstoff Silikongummi durchgesetzt, im Freileitungsbau wird nahezu ausschliesslich HTV-Silikongummi eingesetzt, der eine sehr hohe Erosionsbeständigkeit gegenüber anderen Silikongummitypen aufweist. Eine essentielle und den Betriebswert erhöhende Eigenschaft ist die Hydrophobie. Bisher gibt es noch kein Prüfverfahren, um diese dynamische Eigenschaft mit ihren Ausprägungen Hydrophobiebeständigkeit, -wiederkehr und -transfer zu beschreiben. Im Rahmen von zwei wissenschaftlichen Arbeiten an der TU München und der Hochschule Zittau/Görlitz, abgeschlossen im Jahr 2016 /7/, /8/ wurden Prüfverfahren entwickelt, mit denen diese dynamischen Eigenschaften quantifizierbar werden. Aktuell befasst sich die CIGRE WG D1.58 (Evaluation of dynamic hydrophobicity of polymeric insulating materials under AC and DC voltage stress) mit diesem Thema, um mit internationaler Beteiligung eine normungsfähige Beschreibung zu erstellen. Ein Prüfverfahren ist das Dynamische Tropfen-Prüfverfahren (DTPV - Abbildung 4), das aufgrund einfacher Prüflingsgeometrie für Materialentwicklungen und Qualitätssicherung eingesetzt werden kann. Im DTPV wird die Zeit bis zum Übergang vom hydrophoben zum hydrophilen Zustand bewertet (Abbildung 5).

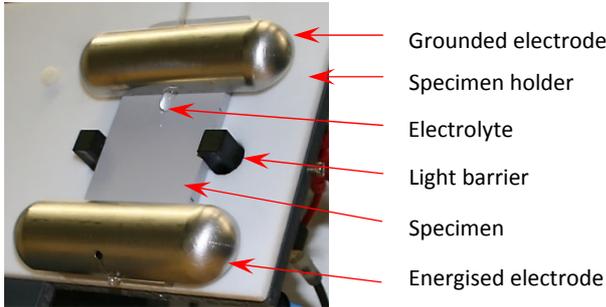


Abbildung 4:
 Aufbau des DTPV



Abbildung 5: Seitenansicht eines hydrophoben (links) bzw. teilhydrophilen (rechts) Isolierstoffes

Ein interessantes Ergebnis dieser Untersuchungen war die Erkenntnis, dass der Verlust der Hydrophobie bei einer DC-Belastung äquivalent zu dem Effektivwert einer AC-Belastung mehr Zeit erfordert, was die weltweit positiven Erfahrungen mit Silikongummi-Verbundisolatoren in DC-Leitungen erklären kann (Abbildung 6).

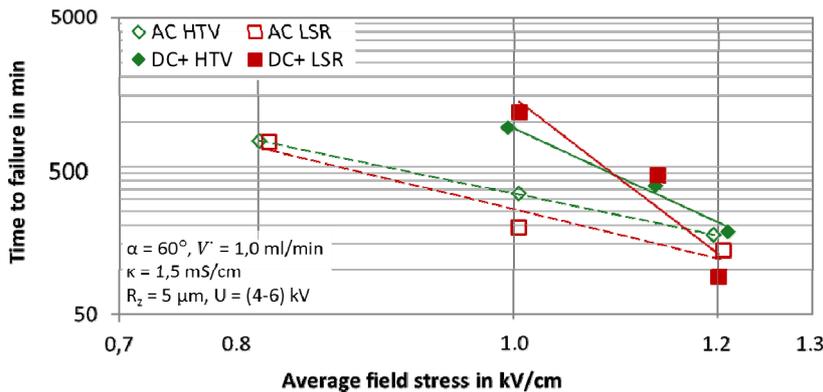


Abbildung 6: Zeit bis zum Hydrophobieverlust bei AC- und DC-Belastung

Optimierung der Kettenlänge eines SBB-Isolators für 132 kV

Zur Erhöhung der Übertragungsleistung ist das sogenannte Spannungsuprate eine mögliche Option. Im SBB-Netz bestand aufgrund der Netzstruktur die Notwendigkeit, die Übertragungsspannung von 66 kV auf 132 kV zu erhöhen und dies unter Nutzung bestehender Masten und entsprechender Bodenabstände des Leiterseils. Mit dem Einsatz von 2 «Grossschirmen» mit einem Durchmesser von 400 mm konnte die Kette unter die Baulänge der existierenden 66-kV-Kette eingestellt werden (Abbildung 7). Die Schirme wurden am Übergang zum Isolatorstrunk so ausgeführt, dass keine Durchschläge durch das Schirmmaterial auftreten können. Zur Vermeidung von windinduzierten Vibrationen wurden an der Schirmunterseite zur Schirmperipherie hin verlaufende Stege eingeführt. In den elektrischen Typprüfungen konnten die gewünschten Eigenschaften nachgewiesen werden, die geforderten Werte wurden mit hoher Sicherheitsmarge überschritten.

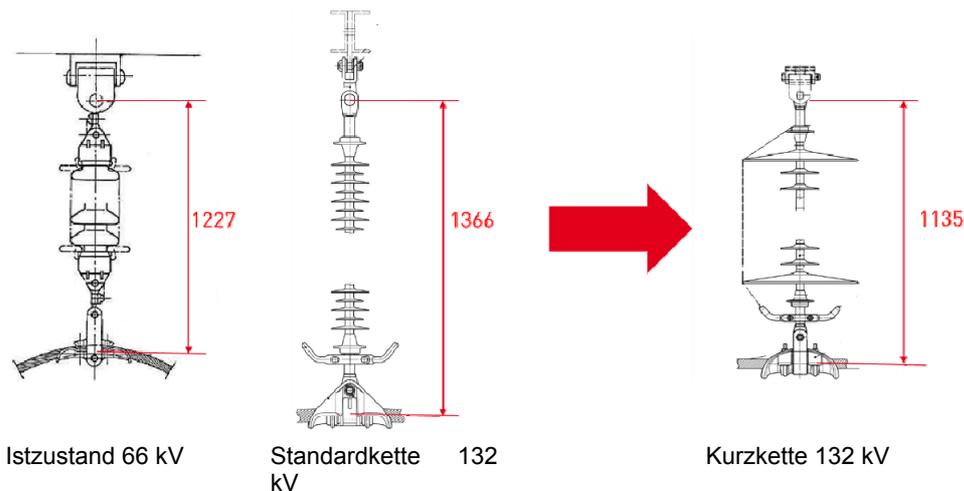


Abbildung 7: Optimierte «Kurzketten» für 132 kV

2 Teil 2 – CIGRE 2016 aus Sicht des Studienkomitees B2 (Freileitungen)

Die CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), gegründet 1921 in Paris, hält in jedem «geraden» Jahr eine 5-tägige Haupttagung im August in Paris ab. In diesem Jahr war ein erneuter Teilnahmerecord zu verzeichnen:

- Mehr als 8000 Teilnehmer aus 93 Ländern,
- 36 Studienkomitee-Meetings,
- 163 Arbeitsgruppenmeetings,
- 242 Aussteller.

Der technische Wert der Haupttagung besteht darin, dass in den jeweiligen eintägigen Vortragsveranstaltungen der Studienkomitees der aktuelle Wissenstand vermittelt wird – eine hocheffiziente Form der Weiterbildung. Für die CIGRE-Haupttagung wurden in 2016 543 internationale Publikationen angenommen, in 2014 waren es 467 Publikationen. Bezüglich Freileitungsisolatoren gab es 7 Publikationen in B2 (gesamthaft 39) und in D1 6 Publikationen (gesamthaft 32). In Bezug auf Freileitungen (SC B2) konnten folgende aktuelle Entwicklungen und Anwendungstrends identifiziert werden:

- Kompaktleitungen,
- Hochtemperaturleiter inkl. Leitungsmonitoring,
- HVDC und Hybrid Lines.

Aus den Publikationen werden 3 Beiträge im Folgenden kurz vorgestellt. Im Beitrag B2-307 /9/ wird eine Lösung für eine 420-kV-Kompaktleitung beschrieben, die nur den Volumen-Platzbedarf aus Sicht der Höhe und Durchleitungsrechte wie eine konventionelle 245-kV-Leitung aufweist (Abbildung 8). Diese faszinierende Lösung basiert auf einer signifikanten Reduktion des Leiterseildurchhangs durch den Einsatz von Stahlseilen (bekannt aus dem Bau von Seilbahnen und Brücken). Die Stahlseile verbinden die Masten mit einer höheren Zugspannung als die energieübertragenden Leiterseile. Jedem Phasenbündel ist ein Stahlseil zugeordnet, was in einen Durchhang

von nur 6 m bei einer Spannfeldlänge von 420 m resultiert (bei EDS und 10 °C). Die Trag- und Abspannisolatoren wurden als Verbundisolatoren ausgeführt, die Abspannisolatoren für eine Nennkraft von 1320 kN! ausgelegt. Die eingesetzten Stabdurchmesser liegen zwischen 88 mm und 170 mm, um auch Druckkräfte aufnehmen zu können. Die Inbetriebnahme einer Pilotstrecke ist für 2017 vorgesehen und die ersten Betriebsergebnisse werden mit Spannung erwartet.

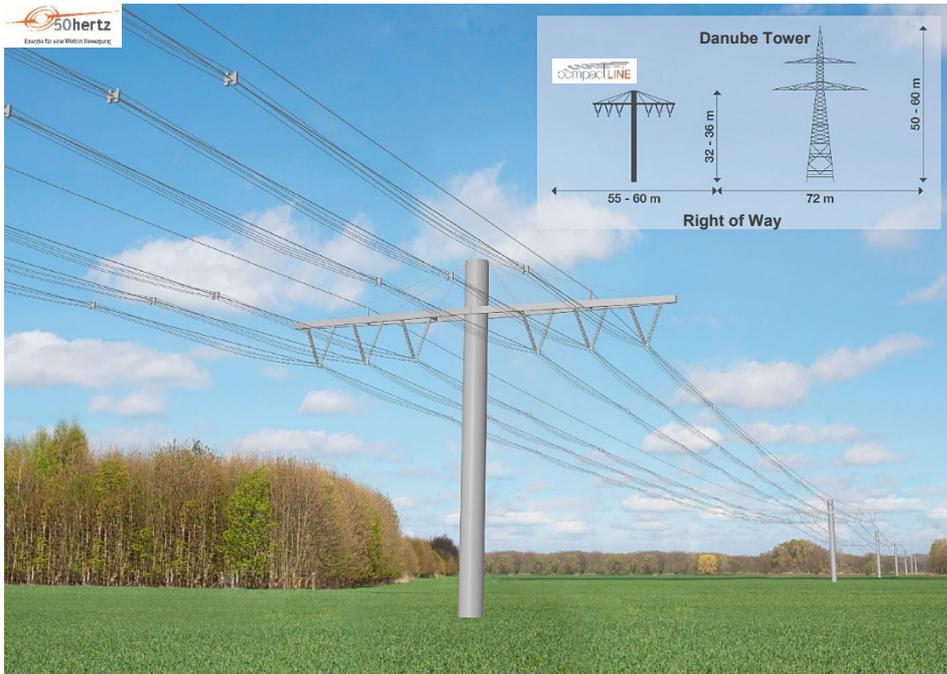


Abbildung 8: compactLine-Konzept

Im Beitrag B2-106 /10/ wird das Thema Leitungsstabilität diskutiert. Instabilitäten können bei Schwingtraversen (sog. pivoted cross-arm oder horizontal Vee) auftreten, wenn benachbarte Spannfelder durch nichtlineare Winde angeströmt werden und die Traversen zum Rotieren/Ausschlagen kommen.

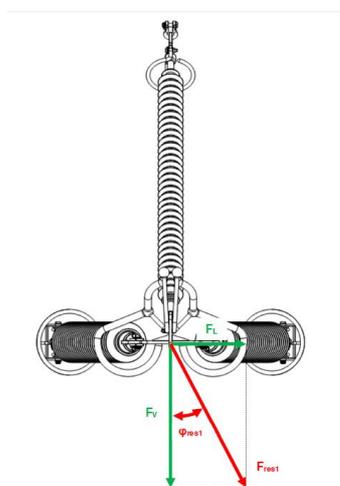


Abbildung 9: Steife 245-kV-Isoliertraverse (Braced Line Post) mit V-Stützer-Arrangement

Es wurde ein Rechenmodell erstellt, das das zufällige ungleichmässige Auftreten von Wind vorsieht und die Leiterseile als nicht-lineare Elemente simuliert. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die Spannfeldlänge einen grossen Einfluss auf die Stabilität haben kann. Wird ein Wert von 300 m gewählt, kann bis zu einer Leitungslänge von 2700 m mit Schwenktraversen gearbeitet werden, bei 400 m verringert sich dieser Wert auf 2400 m. Eine Lösung zur Stabilisierung durch eine versteifte Isoliertraverse ist in Bild 9 gezeigt. Diese Lösung hat den Vorteil, dass Standardkomponenten mit langer Betriebserfahrung zum Einsatz kommen können.

Im Beitrag B2-208 /11/ wurde über sog. „Bird Streamer“ berichtet. Als „Bird Streamer“ wird die Situation beschrieben, wenn grosse Vögel von Traversen starten und ihr Exkrementstrahl zu einem Kettenüberschlag führt. Dieses Thema ist mit dem Einsatz von Verbundisolatoren in einigen Einsatzregionen von Bedeutung. Verbundisolatoren können im Gegensatz zur Technologie der Porzellanlangstabisolatoren auch einteilig bis in die höchsten Spannungsebenen eingesetzt werden (Abbildung 10). Ketten aus Porzellanlangstäben bestehen aus mehreren seriell angeordneten Einzelisolatoren mit den entsprechenden Zwischenarmaturen. Daraus resultierten längere Ketten, im gezeigten Beispiel einer 420-kV-Kette sind dies bis zu 1.5 m Längendifferenz. Die aus Sicht des Leiterseilabstandes zum Boden erwünschte kürzere Verbundisolatorkette ist aufgrund der geringeren Schlagweite eher durch einen „Bird Streamer“ gefährdet. Entsprechende Massnahmen unter Berücksichtigung des Umweltschutzes zielen darauf ab, die jeweilige Vogelspezies hinsichtlich „Sitzposition“ auf der Traverse zu führen, sodass sie sich nicht über den Ketten platzieren.

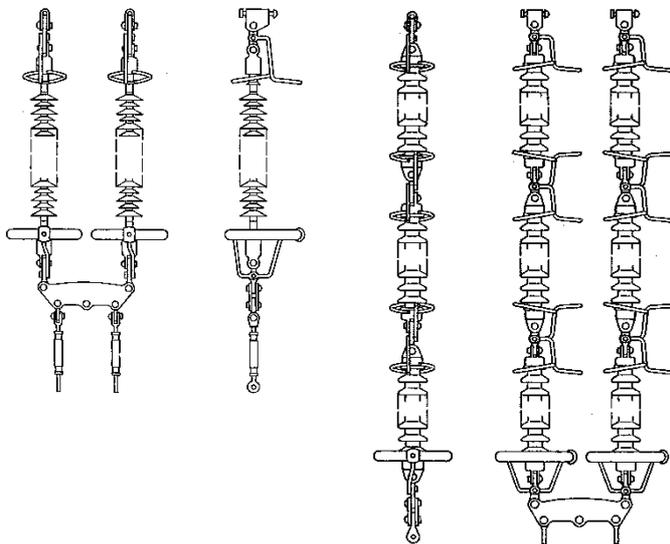


Abbildung 10: 420-kV-Ketten mit Verbundisolatoren (links) und Porzellanisolatoren (rechts)

Danksagung

“Time goes by”: Mit Prof. Dr. Klaus Fröhlich (2012-2016) und Dr. Konstantin Papailiou (2010-2016) legen zwei Schweizer Spezialisten und mit Prof. Dr. Josef Kindersberger (2010-2016) ein deutscher Spezialist ihre Funktionen bei der CIGRE nieder. Sie haben die CIGRE immer als wichtigen Bestandteil des Ingenieurberufes gesehen und mit Beiträgen und hohem Engagement den Stand der Technik weiterentwickelt. Dafür und für die gelebte Vorbildfunktion für die nachfolgenden Generationen herzlichen Dank. In Anerkennung für ihr Wirken erhielten K. Papailiou und J. Kindersberger den Honorary Member Award der CIGRE in 2016, herzlichen Glückwunsch.

In diesem Kontext, herzlichen Glückwunsch an Dr. R. Stephens von der südafrikanischen ESKOM zur Nominierung als neuen CIGRE-Präsidenten, an H. Lugschitz von der österreichischen APG und an Dr. R. Pietsch von der deutschen HighVolt als neue Vorsitzende der Studienkomitees B2 und D1.

Referenzen

- /1/ IEC 61109:1992: Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria
- /2/ IEC 60120 Ed 3: 1984: Dimensions of ball and socket couplings of string insulator units
- /3/ IEC 60471 Ed. 2: 1977 und Amendment 1: 1980: Dimensions of clevis and tongue couplings of string insulator units
- /4/ IEC 61466-1 Ed 1: 1997: Composite string insulator units for overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V - Part 1: Standard strength classes and end fittings
- /5/ IEC 61466-2 Ed 1.1: 2002: Composite string insulator units for overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V - Part 2: Dimensional and electrical characteristics
- /6/ IEC 60383-1 Ed 4: 1993: Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V - Part 1: Ceramic or glass insulator units for a.c. systems - Definitions, test methods and acceptance criteria
- /7/ C. Bär: Bewertung dynamischer Hydrophobieigenschaften polymerer Isolierstoffe mit dem Dynamischen Tropfen-Prüfverfahren unter Wechsel- und Gleichspannungsbeanspruchung, Dissertation, Technische Universität München, 2016.
- /8/ A. Hergert: Test methods for evaluating dynamic properties of hydrophobicity of polymeric insulating materials, Dissertation, Technische Universität München, 2016.
- /9/ F. Golletz, W. Kiewitt, B. Bohm, A. Radke, S. Behrend, H. Pohlmann, P. Sattler, M. Murr, J. C. Kahlen, J. Scheffer, M. Feldmann, M. Brückner, M. Mehdiانpour: CompactLine – a new Overhead Transmission Line Concept
- /10/ P. Rodriguez, J. C. Polo, L. F. Alvarado, A. Carnicero, J. Jimenez-Octavio, C. Sanches-Rebollo: Compact lines with pivoted insulated cross-arms. General stability design criteria
- /11/ J. Lachman, P. Janys, J. Velek, V. Sklenicka, J. Brejcha: Research into an increased number of unexplained line outages of polymeric insulator sets used within the Czech transmission grid

Referentenadressen

Brügger, Dr.	Thomas	Fachkommission für Hochspannungsfragen Hagenholzstrasse 81 8050 Zürich	bruegger@fkh.ch Tel.: +41 253 62 68
Färber	Raphael	ETH Zürich Physikstrasse 3 8092 Zürich	faerberr@ethz.ch Tel.: +41 44 632 83 09
Franck, Prof. Dr.	Christian	ETH Zürich Physikstrasse 3 8092 Zürich	cfranck@ethz.ch Tel.: +41 44 632 47 62
Koch, Dr.	Myriam	Pfisterer Kontaktsysteme GmbH Rosenstrasse 44 DE 73650 Winterbach	myriam.koch@pfisterer.com Tel.: +49 7181 7005 377
Meyer, Dr.	Falko	GE Grid (Switzerland) GmbH Carl-Sprecher-Strasse 3 5036 Oberentfelden	falko.meyer@ge.com Tel.: +41 58 506 18 87
Saltzer, Dr.	Markus	ABB AB High Voltage Cables Verkö P.O. Box 546 SE 371 23 Karlskrona	markus.saltzer@se.abb.com Tel.: +46 455 53 514
Schmuck, Dr.	Frank	PFISTERER SEFAG AG Werkstrasse 7 6102 Malters	frank.schmuck@sefag.ch Tel.: +41 41 499 74 30
Summer, Dr.	Raimund	Schneider Electric Sachsenwerk GmbH Rathenaustrasse 2 DE 93055 Regensburg	raimund.summer@schneider- electric.com Tel.: +49 941 4620 733
Tschentscher	Malte	ETH Zürich Physikstrasse 3 8092 Zürich	malte.tschentscher@eeh.ee.ethz.ch Tel.: +41 44 632 56 70

Internetseite für nachträgliche Informationen zur Fachtagung

Internetseite: www.fileserver.fkh.ch

Benutzername: FT2016

Passwort:
(wird anlässlich der Tagung angegeben)

Die Gross-/Kleinschreibung muss bei der Eingabe des Benutzernamens und des Passwortes berücksichtigt werden.

Bei der Benutzung des Microsoft Internet-Explorers Version 7.0 muss die Freigabe zum Download aus Web-Seiten vor dem Aufruf des FKH-Fileservers erfolgen, sonst tritt ein Fehler auf. Bei allen anderen Versionen und Browsern kann der Download auch bei Rückfrage des Browsers noch bestätigt werden.

