

Entwicklungen in der Isolierstofftechnik für HS-Anwendungen

M. Muhr, C. Sumeder, R. Woschitz

Institut für Hochspannungstechnik mit Versuchsanstalt (IVH)
Technische Universität Graz, Österreich

Kurzfassung

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über Entwicklungen und Tendenzen bei Isoliermaterialien für Hochspannungsgeräte. Neue Technologien und Fortschritte bei festen, flüssigen und gasförmigen Komponenten und Systemen und deren Anwendungen werden diskutiert, sowie Tieftemperatur-Isolationssysteme vorgestellt. Im Bereich der Zustandsbewertung von Hochspannungsanlagen gewinnt das permanente online Monitoring an Bedeutung.

1. Feste Isolierungssysteme

Im Bereich der festen Isolierungssysteme werden traditionell eingesetzte Materialien durch Dielektrika ersetzt, die bereits bei anderen Hochspannungskomponenten angewandt werden. Der Bereich von verfügbaren Werkstoffen wird durch die Entwicklung von neuen Materialien erweitert beziehungsweise die Spannungsfestigkeit und das Teilentladungsverhalten durch Beschichtung bekannter Komponenten mittels halbleitenden Glasuren verbessert.

1.1 VPE isolierte Kabel für Wicklungen

Verwendet man Kabel mit vernetztem Polyethylen (VPE) als Isolierstoff anstatt konventioneller Wicklungsdrähte für Wicklungen im Elektromaschinenbau, so kann man Hochspannungsgeräte bis zum selben Spannungsbereich konstruieren, wie die Nennspannung des entsprechenden Kabels aufweist. Gegenwärtig sind VPE-Kabelsysteme bis zu einer Nennspannung von 440 kV Wechselspannung verfügbar. Ein Generator mit VPE-Isolierung wird Powerformer und ein Transformator Dryformer genannt ¹.

Die Wicklung dieser Geräte besteht aus Kabeln, die auch in der Energieübertragung eingesetzt werden, jedoch ohne Kabelmantel und ohne Erdungsdrähte (Abbildung 1). Durch die hohe Flexibilität der Kabel ist die Montage sehr einfach. Die äußeren halbleitenden Schichten aller Windungen werden zur Verhinderung von Teilentladungen und zur Erhöhung der Personensicherheit an Erdpotential gelegt. Zur Reduzierung von Wirbelströmen werden einige Teilleiter der Kabelader voneinander isoliert. Errechnet man die Feldverteilung gemäß der Maxwell'schen Gesetze, so ergibt sich ein radialhomogenes Feld, welches durch die runde Leitergeometrie hervorgerufen wird, die elektrische Belastung der Isolation ist auf ein Minimum reduziert.

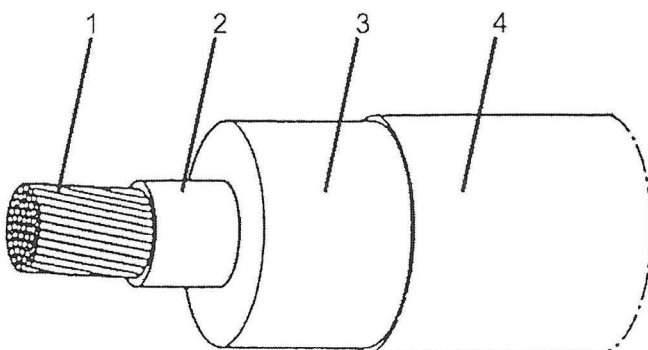


Abbildung 1:
Zylindrische Statorwicklung:
(1) Leiter, (2) innere halbleitende
Schicht, (3) VPE Isolierhülle,
(4) äußere halbleitende Schicht ²

Ein Powerformer verbindet die Funktionen eines Generators mit denen eines Transformators, wodurch der Powerformer eines Kraftwerkes ohne Aufwärtstransformator direkt an das Hochspannungsübertragungsnetz geschaltet wird. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß weniger Komponenten erforderlich sind, etwa entfällt die Mittelspannungsschiene. Mit der neuen Technologie können sowohl Turbogeneratoren als auch Schenkelpollläufer konstruiert werden. Abbildung 2 zeigt die Montage der Kabel für die Statorwicklung. Der erste Powerformer wurde in einem schwedischen Wasserkraftwerk im Jahre 1998 in Betrieb genommen.

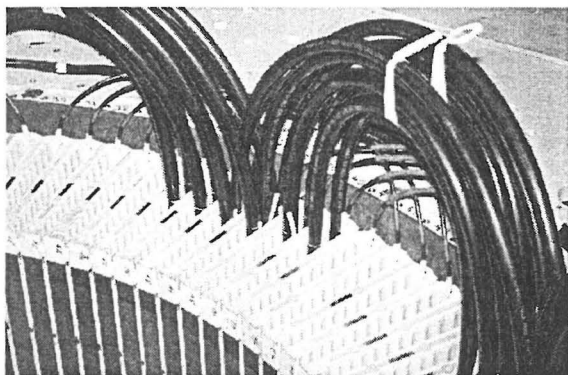


Abbildung 2:
Montage der Kabelwicklung in
einem Stator eines Powerformers ³

Der Dryformer ist ein Leistungstransformator, der absolut ohne Öl funktioniert. Konventionelle Öl/Zellulose Wicklungen werden durch Lagenwicklungen aus VPE-isolierten Kabel ersetzt. Das Gehäuse ist aus feuerverzinktem Stahl gefertigt und stellt neben der tragenden Funktion auch eine Korrosionsschutzwirkung für den Transformator dar. Die maximal zulässige Überlast eines Dryformers ist nicht durch Alterungsmechanismen des Wicklungssystems begrenzt, sondern durch die Erwärmung der VPE-Isolierung und der damit verbundenen Erweichung des Materials, die die mechanische Festigkeit reduziert. Dies bedeutet, daß ein Dryformer seine Maximaltemperatur ohne Lebensdauerverlust erreichen kann. Hot-Spots von ölisierten Transformatoren können aufgrund der Temperaturerhöhung des Wicklungssystems berechnet, Hot-Spots im Wicklungssystem von Dryformern können jedoch direkt über PT-100 Sensoren gemessen werden. Die Temperaturmessung in Verbindung mit regulierten Ventilatoren ermöglichen eine wesentlich exaktere und sicherere Steuerung von kritischen Lastpunkten im Vergleich zu ölisierten Transformatoren. Der Dryformer findet in Grundwasserschutzgebieten, Uferbereichen sowie EMV-empfindlichen, feuchten und tropischen Zonen Anwendung ⁴.

1.2 Silikon für Kabelgarnituren

Der dominierende Werkstoff für Kabelgarnituren ist Silikongummi (silicone rubber, SiR), welcher in verschiedensten vorgefertigten Technologien angewendet wird. Die Montage der Garnituren erfolgt meist in der Aufschiebetechnik oder dem Kaltschrumpfverfahren. Neben Kabelendverschlüssen können Kabelmuffen bereits komplett kaltgeschrumpft montiert werden. VPE isolierte Mittelspannungskabel benötigen Feldsteuerungen zur Reduktion der elektrischen Feldstärke im Bereich der Absetzkante und an der Garnituroberfläche, um Teilentladungen unter allen Einsatzbedingungen zu verhindern. Die Konstruktion der Feldsteuerung hängt von der eingesetzten Montagetechnik ab. Bei den meisten Garnituren ist der Feldsteuerkörper bereits integriert, was eine querschnittsübergreifende Anwendung ermöglicht. Da für die Montage keine Flamme notwendig und die Handhabung von Silikon einfach ist, ergibt sich eine wesentlich kürzere Montagezeit gegenüber der Warmschrumpftechnik.

Silikon wird auch für Mittelspannungskabelstecker eingesetzt, um Kabel an metallgekapselte Schaltanlagen anzuschließen. Die vorgefertigten isolierten Adapter sind für Nennspannungen bis 36 kV und Nennströme bis 630 A ausgelegt. Optionell können die

Stecker geschirmt oder metallgekapselt ausgeführt, oder mit Überspannungsableiter bestückt werden. Die Stecker gelten als wasserdicht (überflutungssicher) und sind für den Einsatz in extrem verschmutzten Bereichen geeignet.

1.3 Polypropylen/Papier Laminat für Kabelisolierungen

Die dielektrischen Verluste von ölhältigen Kabeln haben einen Anteil von 20-25 Prozent an den Gesamtverlusten, beispielsweise weist ein Mittelspannungskabel mit einer Nennspannung von 33 kV und einer Feldstärke von 4,5 kV/mm dielektrische Verluste von 0,4 W/m und ein Hochspannungskabel für 400 kV bei einer Feldstärke von 15 kV/mm dielektrische Verluste von 15,2 W/m auf. Aus diesen Grund ist es erforderlich Materialien zu finden, die niedrige dielektrische Verluste aufweisen und gleichzeitig den hohen elektrischen Feldstärken für den Betrieb in einem Übertragungsnetz stand halten. Polyolefine, wie Polyethylen und Polypropylen, entsprechen den dielektrischen Anforderungen. Eine Extrusion dieser Kunststoffe für Kabelanwendungen in der erforderlichen Dicke gelang bis jetzt jedoch nicht, diese Stoffe weisen eine geringere elektrische Festigkeit als Papierisolationen auf. Eine vielversprechende Annäherung ist die Entwicklung eines Laminats, das aus einem Film Polypropylen umgeben von zwei Schichten Isolierpapier besteht (siehe Abbildung 3). Während der dielektrische Verlustwinkel und die relative Dielektrizitätskonstante nicht so nieder sind wie bei einigen anderen Polymeren, wird bei diesem Mehrschichtstoff ein guter Kompromiß zwischen mechanisch-physikalischen und den elektrischen Eigenschaften von Polypropylen gefunden. Wichtige Funktionen des Papiers im Laminat sind: mechanische Verstärkung und Schutz vor Entladungserscheinungen an der Grenzfläche der Polypropylen-schichte unter Impulsbelastung.

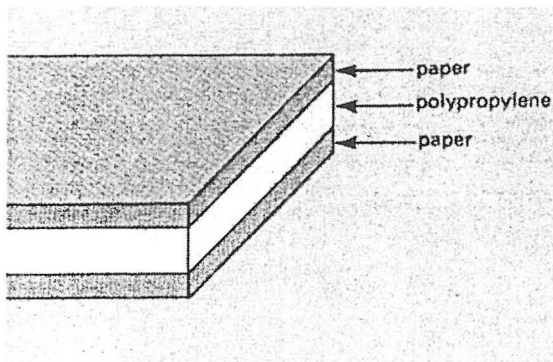


Abbildung 3:
Polypropylen/Papier Laminat als
Hauptisolierung bei Hochspannungs-
Energiekabeln⁵

Während Energieübertragungskabeln für einen maximalen Betriebsstrom ausgelegt sind, erreicht der tatsächlich fließende Strom in Niedriglastperioden, wie nachts oder früh morgens, nur einen Bruchteil des Betriebsstromes. Die Stromverluste hängen vom Quadrat des Stromes ab, weshalb in Zeitbereichen niedriger Last diese sehr klein sind. Die dielektrischen Verluste hingegen sind von der Nennspannung abhängig, der Verlustwinkel und die relative Dielektrizitätskonstante verändern sich nur geringfügig mit der Betriebstemperatur. Daher sind die dielektrischen Verluste für die meisten papierisolierten Kabel von großer Bedeutung und ein Faktor für die Kostenbewertung eines Übertragungssystems. Durch die Verwendung des Polypropylene/Papier Laminats können die dielektrischen Verluste um bis zu 30 Prozent gegenüber papierisolierten Kabeln gesenkt werden⁵.

1.4 Verbundisolatoren aus Polymeren

Die Komponenten Glasfaser als Trägermaterial und Silikon als äußere Isolierung verbinden die Vorteile von Verbundisolatoren aus Polymeren, wie Hydrophobie, niedrige Instandhaltungskosten, geringes Gewicht, hohe mechanische Festigkeit und gute Beständigkeit gegen Vandalismus. Der Hydrophobieeffekt ist von Faktoren abhängig, wie Alter, Verschmutzung und Degradation des Materials. Abhängig vom Einsatz kommen

verschiedene Silikonarten zur Anwendung: RTV, HTV, LTV oder LSR. Die Oberfläche des Isolators kann durch Wettereinflüsse, Korona oder Überschläge chemisch beansprucht werden, Kriechströme bilden sich aus und können den Isolator zerstören. Mit neuen Produktionsverfahren und Testmethoden können frühere Nachteile (Grenzschichtüberschlag oder Versprödungsbruch) verhindert werden.

Verbundstoffe mit Silikon haben sich neben der Verwendung bei Isolatoren für Freileitungen in spezielleren Anwendungen, wie Überspannungsableiter oder Durchführungen für Hochspannungsschaltanlagen, etabliert. Überspannungsableiter werden in der gleichen Ausführung wie Isolatoren gefertigt, die Metalloxidscheiben befinden sich innerhalb des Glasfaserrohres. Im Falle einer elektrischen oder thermischen Überbelastung besteht im Gegensatz zu keramischen Ableitern keine Gefahr der Explosion, die Personensicherheit ist gewährleistet.

Die Anwendung von Verbundisolatoren für Durchführungen bei Leistungsschaltern haben sich im Freiluftbereich wegen folgender Vorteile gegenüber Porzellanisolatoren bewährt: selbstheilende und wasserabweisende Oberfläche, schmutzabweisend, höhere dielektrische Festigkeit in nassem Zustand, erdbebensicher, zerstörungssicher, explosionsfest und geringes Gewicht. 1990 wurden Durchführungen aus Verbundstoffen vorgestellt und seither über 5000 Stück für Spannungen zwischen 72 und 550 kV eingebaut. Die größte Verbunddurchführung wurde für eine Nennspannung von 800 kV dimensioniert und in einem Stück produziert. Das Design der Verbunddurchführung wurde optimiert, um zur Porzellandurchführung konkurrenzfähig zu sein, beispielsweise wurde anstatt der zylindrischen eine konische Form gewählt, um das SF₆-Gasvolumen und das Gewicht zu senken und die Hochspannungsschirmung der Anschlüsse zu optimieren ⁶.

1.5 Beschichtung von keramischen Isolatoren

Keramische Isolatoren können mit einer halbleitenden Glasur (semiconductive glaze, SCG) beschichtet werden. Die SCG bedingt einen Trockeneffekt und eine gleichmäßige Spannungsverteilung an der Oberfläche sowie eine hervorragende Spannungsfestigkeit im verschmutzten Zustand, welche dreimal so hoch ist als bei vergleichbaren normal glasierten Isolatoren. Weitere Vorteile sind eine exzellente Unterdrückung von Teilentladungen an der Isolatoroberfläche, wegen der speziellen Spannungsverteilung auch unter verschmutzten Verhältnissen ⁷. Die SCG Isolatoren sind standardmäßig mit einer Hülle aus Zink überzogen, wodurch sich lange Wartungsintervalle ergeben. Die Dicke der SCG Schichte ist ein Kriterium für das elektrische Verhalten, wobei sie dicker als eine normale Glasur ist. Wird die Glasur zu stark aufgetragen, so geht der nützliche halbleitende Effekt verloren. Auf der Oberfläche der SCG Isolatoren fließt ein kleiner sinusförmiger Strom, der eine rasche Korrosion des Isolatoranschlüsse verhindert. Die Korrosion wird durch Vorbelastungen und unregelmäßige Stromflüsse, wie sie in Lichtbögen von Vorentladungen auftreten, unterstützt. Die Gleichstromkomponente des Stromes verursacht elektrolytische Korrosion. Entstehen trockene Bereiche an der Oberfläche, so fließt ein Kriechstrom in der halbleitenden Glasur, wobei die Spannungssteuerung den Strom auf einen niedrigen Level begrenzt und Vorentladungen verhindert (siehe Abbildung 4) ⁸.

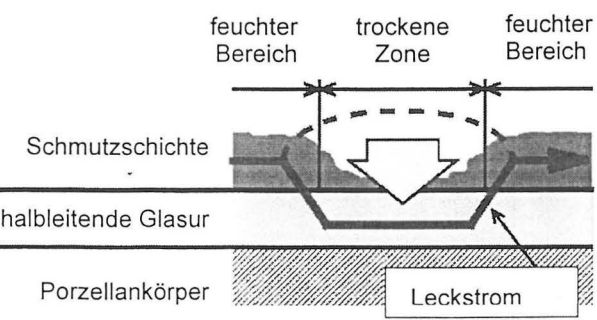


Abbildung 4:
Unterdrückungsmechanismus von
Teilentladungen bei SCG Isolatoren ⁹

Verglichen mit verschiedenen konventionellen Isolortypen, wie Porzellan oder Verbundisolator, weist die Überschlagespannung in Abhängigkeit der relativen Feuchte eines SCG Isolators einen flacheren Anstieg bei einem höheren Niveau bis zu einer absoluten Feuchte von 36 g/m^3 auf (Diagramm 1).

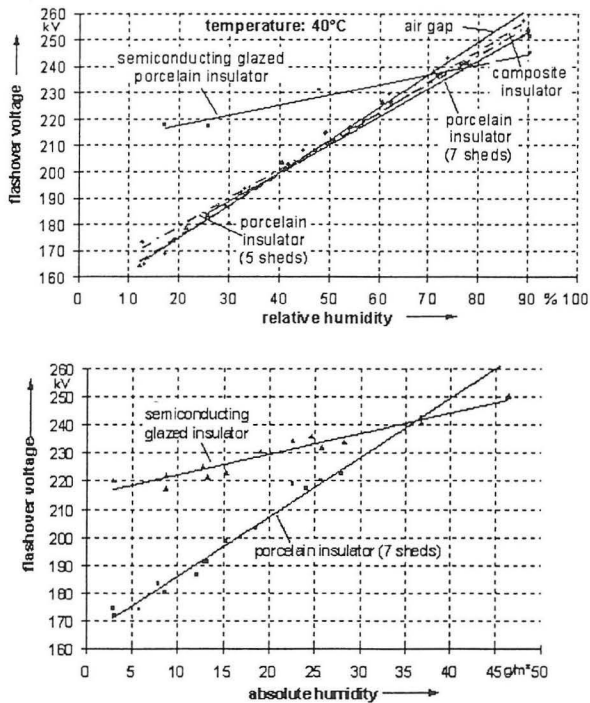


Diagramm 1:
Abhängigkeit der positiven Überschlagespannung von der relativen (oben) und absoluten Feuchte (unten) bei verschiedenen Isolortypen ¹⁰

Keramische Isolatoren können auch mit einer Schichte RTV-Silikon überzogen werden. Die Oberfläche gewinnt eine hydrophobische Eigenschaft, die den Leckstrom minimiert. Der Silikonmantel wird in Bereichen hoher Verschmutzung eingesetzt, wo eine Reinigung schwer möglich ist, beispielsweise in Tunnelröhren von Eisenbahnanlagen.

1.6 Oberflächenphänomene von Isolatoren

Ein Phänomen ist der temporäre Verlust der Hydrophobie, die Hydrophile, die unter Einwirkung von Korona, Plasma oder UV-Strahlung eintreten kann (Direkter Verlust). Nach der Exposition bildet sich wieder der normale Kontaktwinkel aus, beziehungsweise die Hydrophobie kehrt rasch wieder zurück. Dieser Effekt ist für Hochspannungsisolierungssysteme sehr vorteilhaft. Ebenso bedingt die Verschmutzung der Oberfläche eine Degradation des Hydrophobieeffektes (Indirekter Hydrophobieverlust). Auf der Oberfläche von Silikongummi kann sich kein kontinuierlicher Wasserfilm ausbilden, wodurch sich höhere Überschlagespannungen für stark verschmutzte Verbundisolatoren ergeben. Die physikalischen und chemischen Vorgänge der Hydrophobie, Degradation und des Selbstheilungseffektes sind noch nicht restlos geklärt. Ein Faktum ist, daß mit der Oberflächenverschmutzung kleine molekulare Partikeln (Low Molecular Weight, LMW) in das Silikon diffundieren ¹¹.

Ein weiteres Phänomen ist die biologische Verunreinigung der Oberfläche. Es wurden drei Arten an biologischen Organismen beobachtet: Pilze, Algen und Flechten. Der Pilzbefall von Kunststoffen kann sehr kritisch werden, da die Zellfäden in den Isolator eindringen können und so eine poröse Oberfläche entstehen kann. Für gewöhnlich besteht Silikon den Pilzbewuchs, jedoch wurde aus Florida von pilzbefallenen Isolatoren berichtet. Algen dringen nicht in die Isolatoroberfläche ein, ihr Ausmaß kann sich jedoch über eine größere Fläche erstrecken, wodurch sich die Oberflächeneigenschaften ändern können. Eine verwandte Spezie zu Pilzen und Algen ist die Flechte, die ebenfalls an der Isolatoroberfläche eine

symbiotische Lebensform bilden kann. Algen- und Flechtenwuchs wurde an Porzellan- und Glasisolatoren in Papua Neu Guinea, Paraguay, Mexiko, Neuseeland und Nordamerika beobachtet ¹².

2. Flüssige Isolationssysteme

Im Bereich der flüssigen Isolierungssysteme beschränkt sich die Forschung auf synthetische und biologische Produkte als Alternativen zum Mineralöl für den Einsatz bei Transformatoren in Umweltschutzgebieten.

2.1 Synthetische Flüssigkeiten als Isolierflüssigkeit

Mineralöl stellt bis heute die beste elektrische Isolierflüssigkeit für Transformatore dar. Die exzellenten elektrischen und dielektrischen Eigenschaften, gute Alterungsbeständigkeit, Viskosität und kostengünstige Produktion überwiegen den Nachteilen, wie Temperatur- und Feuchteabhängigkeit, geringer Flamm- und Brennpunkt und geringe relative Dielektrizitätskonstante. Leider ist Mineralöl im Falle einer Gehäuselecks eine Gefahr für das Grundwasser.

Ein Ersatz des Mineralöls stellen Esterflüssigkeiten, wie MIDEL 7131 oder SHELL Fluid 4600, dar. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften und die laut Norm erforderlichen Werte für Isolieröle.

Eigenschaft	Einheit	Erforderlicher Standard		MIDEL 7131	Shell Fluid 4600
Durchschlagsspannung	kV	> 45	IEC 156	55	> 60
Verlustfaktor $\tan \delta$		< $30 \cdot 10^{-4}$	IEC 247	$10 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$
Pourpoint	°C	< -45	ISO 3016	-50	-54
Flammpunkt	°C	> 250	ISO 2592	257	265
Brennpunkt	°C	> 300	ISO 2719	310	
Kinetische Viskosität 40°C	mm ² /s	< 35	ISO 3104	33	29,5
Kinetische Viskosität -20°C	mm ² /s	< 3000	ISO 3104	1100	1400
Dichte ρ 20°C	kg/m ³	< 1,00	ISO 3675	0,98	0,965

Tabelle 1: Eigenschaften von Esterflüssigkeiten ^{13, 14}

Die Eigenschaften von Ester sind der sehr hohe Flammpunkt von über 300 °C, die gute Umweltverträglichkeit, niedrige Giftigkeit, exzellente thermodynamische und gute dielektrische Eigenschaften, etwa niedrige Feuchteabhängigkeit und gutes Teilentladungsverhalten. Esterflüssigkeiten finden in jeder Art von Transformatoren Anwendung: Mast- und Verteilnetztransformatore, Stufenschalter für Leistungstransformatore, weiter auch als Kühlflüssigkeit für Thyristoren von leistungselektronischen Bauteilen. Wegen des hohen Brennpunktes, der geringen Toxizität und der biologischen Abbaubarkeit werden Esterflüssigkeiten für Transformatore in Wasserschutzgebieten und Ballungszentren eingesetzt ¹⁵.

2.2 Organisches Öl als Isolierflüssigkeit

Eine weitere Entwicklung ist der Einsatz von organischen Ölen anstatt mineralischen, zum Beispiel Öl aus der Rapspflanze. Analysen haben gezeigt, daß Rapsöl eine gute elektrische Isolierflüssigkeit ist, jedoch nicht alle DIN/VDE-Anforderungen erfüllt. Große Schwierigkeiten erwachsen durch die Alterung des Rapsöls. Ist das Öl Feuchte oder Luft ausgesetzt, so verringert sich die Langzeitbeständigkeit. Nur komplett entfeuchtet und in einer hermetischen Kapselung ist es als Alternative zu Mineralöl einsetzbar ¹⁶.

3. Gasförmige Isolationssysteme

Neben den traditionellen Gasen Vakuum und SF_6 besteht ein Trend zur Entwicklung von Gasmischungen, welche die exzellenten dielektrischen Eigenschaften bei geringen Kosten und besserer Umweltverträglichkeit vereinen sollen. Vakuumröhren werden für den Einsatz in Leistungs- und Lastschaltern für alle Spannungsbereiche konstruiert.

3.1 SF_6/N_2 Gasmischungen für den Einsatz in GIS und GIL

SF_6 ist ein gebräuchliches Isoliergas in GIS und GIL. SF_6 weist neben hervorragenden elektrischen Eigenschaften auch Nachteile auf, wie hohe Verflüssigungstemperatur, Einfluß auf den Treibhauseffekt und hohe Kosten¹⁷. Aus diesem Grund sucht man nach alternativen Isoliergasen. Mischungen aus SF_6/N_2 haben sich wegen günstigen ökologischen und ökonomischen Aspekten als sehr guter Ersatz herausgestellt. N_2 ist ein absolut unkritisches Gas in bezug auf Umweltverträglichkeit, es kommt in der Atmosphäre in großen Mengen vor. Reines N_2 würde als Isoliermedium unrealistische Abmessungen für die gewünschten Isolationspegel erzwingen. Die Gasmischung aus SF_6 und N_2 kann aufgrund ihrer guten Isoliereigenschaften in GIS und GIL eingesetzt werden. Das Durchschlagsverhalten der Gasmischung hängt von der Konzentration des SF_6 (5% ... 20%) in N_2 und dem Druck ab (siehe Diagramm 2).

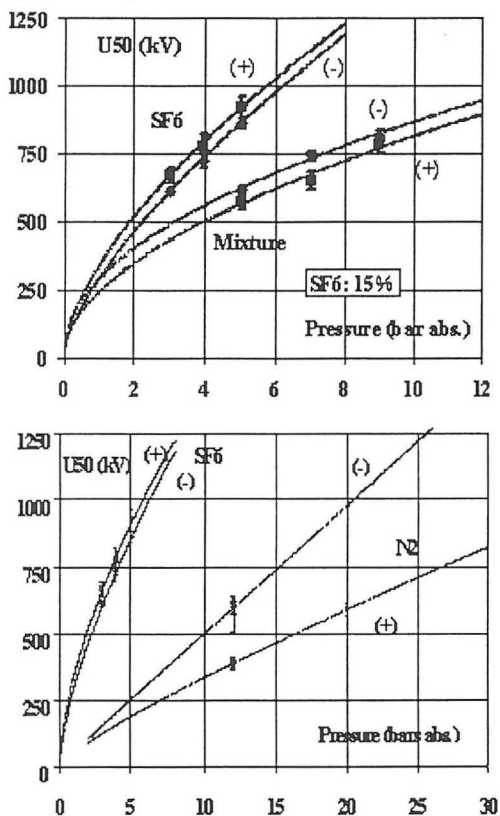


Diagramm 2:
 $U_{50\%}$ in Abhängigkeit des Drucks für eine Konzentration von 15 % SF_6 in N_2 (oben) und für reines SF_6 bzw. reines N_2 (unten)¹⁸

3.2 Vakuumschalter

Vakuumschalter wurden bisher hauptsächlich im Niederspannungsbereich eingesetzt, der Marktanteil am Mittel- und Hochspannungssektor war gering. Heute werden Vakuumschaltröhren bis zu einer Nennspannung von 145 kV gebaut. In Verbindung mit SF_6 als Isoliermedium für Sammelschienen werden Vakuumröhren im Mittelspannungsbereich sehr häufig für Leistungs- und Lastschalter eingesetzt. Die Vorteile der Vakuumröhre sind eine lange Lebensdauer, kompaktes Design und die Wartungsfreiheit. Das Verhalten

während der Lichtbogenlöschung ist hervorragend, das Kontaktmaterial wird sehr wenig beansprucht und die elektrischen Eigenschaften von Vakuum sind gleichbleibend. Durch den Lichtbogen entstehen keine Zersetzungsprodukte, die Schaltöhre ist absolut dicht, es treten keine Wechselwirkungen mit anderen Gasen (Verschmutzung oder Feuchte) auf. Heute werden Vakuumschaltröhren für Spannungsteilheiten bis zu 10 kV/ μ s bei einer Nennspannung von 15 kV und einem Kurzschlußstrom von 63 kA gebaut ¹⁹.

4. Tieftemperaturisolationssysteme

Seit der Entdeckung der keramischen Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) im Jahre 1986 lebte die Forschung an Supraleitern wieder auf. Die Übergangstemperatur dieser keramischen HTS liegt bei 77 K, das ist im Bereich der Siedetemperatur von flüssigem Stickstoff, wodurch ein technisch und wirtschaftlich realer Einsatz von HTS ermöglicht wurde. Es galt die sehr spröden keramischen Werkstoffe als flexible Leitungen zu formen. Die nun entwickelten HTS sind Verbunddrähte und können in allen klassischen Komponenten der Energieerzeugung und -übertragung, wie Generator, Transformator, Motor und Kabel, zur Anwendung kommen, finden aber auch in Spezialanwendungen für Spulen ihren Platz.

Es werden zwei Typen von HTS Kabel unterschieden, die „warm dielectric cables“ und die „cryogenic dielectric cables“. Der Aufbau von HTS Kabel besteht aus dem Kühlsystem, den HTS Drähten und dem äußeren Isolationssystem. Die HTS Drähte sind auf einem hohlen Träger aufgebracht, der von flüssigem Stickstoff durchströmt wird und somit auf die gewünschte Temperatur kühlt. Die äußere Isolierung erfolgt im ersten Fall mit konventionellen dielektrischen Isolierstoffen und im zweiten mit einer stickstoffgeköhlten Isolierung (Abbildung 5). Die Erdverlegung von HTS Kabel erfolgt im Dreierbündel, welches durch ein Stahlrohr geschützt ist. Der wesentliche Vorteil besteht neben der einzigartig niedrigen Verlustbilanz in der kostengünstigen Verlegemöglichkeit, es können bestehende Kabeltrassen für die Übertragung mehrfach größerer Energiemengen genutzt werden.

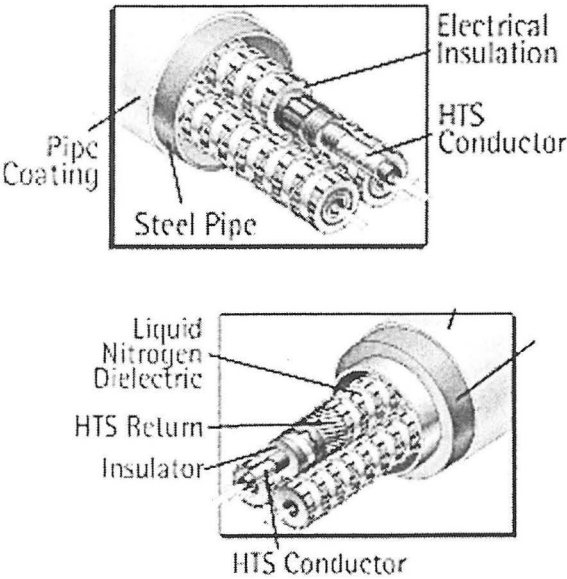


Abbildung 5:
HTS Kabel: warm dielectric cable (oben) mit konventioneller Isolierung und cyogenic dielectric cable (unten) mit Tieftemperatur-Isolierung als Dreierbündel in einem Rohr für Erdverlegung ²⁰

HTS Leiter werden auch in Spulen für medizinische und energietechnische Geräte eingebaut. Ein supraleitender magnetischer Energiespeicher (SMES) dient zur Kompensierung von Schwankungen im Hochspannungsnetz und kann so den Ausfall von mikroprozessorgesteuerten Geräten und damit teure Produktionsausfälle verhindern. Das Kernstück einer SMES besteht aus der heliumgeköhlten supraleitenden Magnetspule. Mit dieser Anlage können Spannungseinbrüche bis zu 75 % Netzabsenkung und in den Sekundenbereich kompensiert werden.

5. Permanentes online Monitoring

Der internationale Trend zur Liberalisierung des Strommarktes erhöht den Kostendruck auf die Energieerzeuger. Dies wirkt sich auch immer mehr auf den Bereich des Monitoring und der Diagnose aus. Der Trend von der periodischen zur zustandsorientierten und weiter zur „ereignisorientierten“ Instandhaltung ist unübersehbar. Auch der Aufwand für die Instandhaltung wird in letzter Zeit immer mehr im engen Zusammenhang - sowohl zum wirtschaftlichen als auch technischem Ausfallrisiko eines Maschinensatzes - gesehen. Die Instandhaltungskosten werden immer mehr nach wirtschaftlichen Kriterien und weniger nach Kriterien wie Versorgungssicherheit optimiert.

Die dielektrische Diagnose ist in diesem Zusammenhang ein wichtiges Hilfsmittel zur Beurteilung des Zustandes sowie des Ausfallrisikos von großen elektrischen Maschinensätzen. Trotz der Notwendigkeit der Diagnose zur Planung der Instandhaltung wird auch in diesem Bereich der wirtschaftliche Druck immer deutlicher spürbar. Ein Stillstand eines wichtigen Maschinensatzes über längere Zeit – um entsprechende Untersuchungen durchzuführen und Diagnosen zu erstellen - wird heute vom Kunden kaum mehr akzeptiert. Außerdem ist der Kunde nur mehr in Ausnahmefällen bereit, die Kosten für - technisch aufwendige – „prophylaktische“ Diagnosen zu tragen. Aus diesem Grund ist derzeit ein deutlicher Trend sowohl in Richtung der sogenannten periodischen online Diagnoseverfahren als auch der permanenten online Verfahren festzustellen.

Bei periodischen online Verfahren braucht der Generator nicht mehr vom Netz genommen werden. Die Diagnose erfolgt bei laufender Maschine, mit meist nur geringen Einschränkungen in der Betriebsführung des Generators. Die Messungen erfolgen in periodischen Abständen, welche nach Kriterien wie Wichtigkeit, Alter und Zustand des Maschinensatzes festgelegt werden. Der wesentliche Vorteil besteht darin, daß die teilweise sehr teuren Meßgeräte für sehr viele Maschinensätze eingesetzt werden können. Bei vielen Diagnosekenngrößen kann eine periodische Überwachung als sehr guter wirtschaftlicher Kompromiß zwischen Aufwand und Ergebnis angesehen werden. Bei wirtschaftlich wichtigen Maschinensätzen wird oft die aufwendigere aber dafür natürlich technisch wesentlich aussagekräftigere permanente online Diagnose bevorzugt. In diesem Fall werden die Meßwerte in relativ kurzen Abständen (Intervall je nach Meßgröße) erfaßt und entsprechend bewertet.

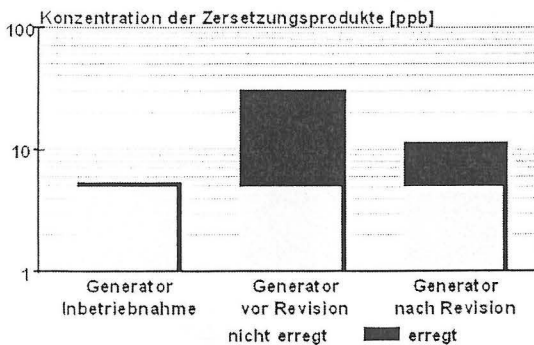


Diagramm 3:
Detektion von Koronaentladungen mittels Kühlluftanalyse, Abschätzung des Teilentladungspegels durch Messung der Ozonwerte in verschiedenen Betriebszuständen

Ein typisches Beispiel für ein neues innovatives online Diagnosverfahren bei großen rotierenden elektrischen Maschinen ist die Ozonanalyse. Treten Fehler, Verschmutzungen oder Schädigungen an der Oberfläche des Isolationssystems auf, kommt es ab einer gewissen elektrischen Feldstärke zu Oberflächengleitentladungen, zu Entladungen zwischen Isolationsoberfläche und Statorblechpaket, zu Gleitenladungen im Wickelkopf (z.B. bei Verschmutzung) oder zu Entladungen an den Phasentrennstellen. Diese Teilentladungsstellen produzieren Ozon, welches auch in der Kühlluft nachgewiesen werden

kann. Durch die Messung (online, permanent oder periodisch) und die entsprechende Bewertung der Ozonkonzentration in der Kühlluft der elektrischen Maschine kann auf Fehler und Schädigungsgrad des Isolationssystems insbesondere im AGS (Außenglimmschutz) und EGS (Endenglimmschutz) Bereich rückgeschlossen werde (Diagramm 3). Zu erwähnen wäre in diesem Zusammenhang noch, daß die Ozonkonzentration bzw. die Oberflächenentladungen von den unterschiedlichsten Faktoren bzw. Umgebungsparameter (wie z.B. Spannung, Feuchtigkeitsgehalt der Kühlluft, Luftdruck, Dichtheit des Kühlkreislaufes, etc.) abhängt. Diese unterschiedlichsten Einflußgrößen erfordern zur aussagekräftigen Bewertung modernste mathematisch-statistische Methoden zur Auswertung der Meßsignale, wie Modellbildung (z.B. Least Square Methode) oder die Anwendung neuronaler Verfahren.

Im Hinblick auf eine automatisierte Fehlerfrüherkennung gewinnen in der gesamten Diagnostik Auswertungsmethoden mit modellbasierten Systemen sowie mit neuronalen Verfahren immer mehr an Bedeutung. Die endgültige Bewertung eines durch ein Monitoringsystem entdeckten Problems wird aber auch in naher Zukunft noch immer einem entsprechenden Experten auf diesem Gebiet vorbehalten bleiben ²¹.

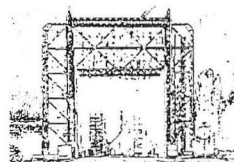
Zusammenfassung

Neu entwickelte Isolierstoffe weisen immer höhere elektrische Festigkeiten auf, wodurch die Hochspannungskomponenten für höhere Betriebsspannungen bei gleichbleibender Konstruktionsgröße dimensioniert werden. Der Ausnutzungsfaktor der Maschinen steigt bei geringeren Kosten. Die Tendenz traditionelle Isolierungssysteme durch neuen Materialien zu ersetzen, erfordert höhere Materialanforderungen: höhere Spannungsfestigkeit, bessere Teilentladungsfestigkeit, längere Lebensdauer, niedrigere Kosten, geringere Instandhaltungsaufwendungen, Minimierung der Umweltbelastung und ausgezeichnete mechanische Eigenschaften. Hochtemperatursupraleiter halten in Verbindung mit Tieftemperaturisoliermedien unter wirtschaftlich vertretbaren Verhältnissen erstmals Einzug in Komponenten der Energietechnik. Mit permanenten online Monitoringsystemen kann eine Zustandsbeurteilung und Diagnose des Isolierungssystems sehr exakt und ohne Betriebsunterbrechung unternommen werden, wodurch Fehler verhindert und Ausfallszeiten reduziert werden.

Anschrift der Autoren



Technische Universität Graz
Institut für Hochspannungstechnik mit Versuchsanstalt (IVH)
Inffeldgasse 18
A-8010 Graz
Tel.: +43/316/873-74 01
Fax: +43/316/873-79 00



O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael MUHR	muhr@hspt.tu-graz.ac.at	DW 74 00
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Christof SUMEREDER	sumereder@hspt.tu-graz.ac.at	DW 74 09
AO.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf WOSCHITZ	woschitz@hspt.tu-graz.ac.at	DW 74 18

- ¹ M. Leijon u.a., "Breaking Conventions in Electrical Power Plants", Paper 11/37-03, CIGRE 1998
- ² M. Leijon u.a., "High Voltage Cables in a New Class of Generators - Powerformer™", Paper NORD-IS 99
- ³ M. Leijon u.a., "Powerformer™ The First Commercial Turbo Powerformer Application", ABB Corporate Research, Schweden, 1999
- ⁴ "Dryformer", ABB Transformers AB, Schweden 1999, <http://www.abb.se/setfo/>
- ⁵ C.A.Arkell, "Polypropylene/paper laminates for power cables", Produktfolder von BICC Cables Limited, 1989
- ⁶ W. Freeman, C. Hutchinson, W. Schaefer, "Application of New Insulator Technologies to Circuit Breaker Bushings: An OEM Perspective", Insulator News & Market Report 11/12 1999, Seite 54-58
- ⁷ K. Naito, "Test methods and results for recent outdoor insulation in Japan", IEEE Transactions DEI, Vol. 6 No. 5, Oct. 1999
- ⁸ "NGK Moves to Wider Commercialization of Semi-Conducting Glazed Insulators", Insulator News & Market Report, May/June 1997, Seite 46-50
- ⁹ K. Chiyajou u.a., "Application Study on Semiconducting Glaze Hollow Insulators to Substation Equipment", Paper 33-110, CIGRE 2000
- ¹⁰ O. Elsässer, K. Feser, "Flashover Behavior of Different Insulating Materials under Positive Switching Impulse Voltage Stress at Different Climatic Conditions", Paper ISH 99
- ¹¹ H. C Karner, U. Stietzel, H. Janssen, A. Herden, „Hydrophobietransfer und Lebensdauer des Hydrophobie-Effekts“, ETG-Fachbericht 68 Silikonelastomere, 1997, Seite 21-29
- ¹² S. Gubanski, "Research Findings Comparing Performance of Different Insulator Designs on Distribution Lines in Tropical Environment", Insulator News & Market Report 11/12 1999, Seite 46-53
- ¹³ Technische Information, Schenectady Europe GmbH, 12.97
- ¹⁴ Datenblatt, Deutsche Shell AG, 06.99
- ¹⁵ H. Borsi, „Das elektrische Verhalten von Isolierflüssigkeiten für Transformatoren bei tiefen Temperaturen“, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 97(1998), Heft 13
- ¹⁶ R. Badent, K. Kist, J. Schwab, "Rape seep oil- a substitution for mineral oil?", Paper ISH 99
- ¹⁷ W. Pfeiffer, D. Schoen, C. Zender, "Corona Stabilisation in SF₆/N₂ Mixtures under VFT Stress", Paper ISH 99
- ¹⁸ M. Guillen, F. Buret, A. Beroual, "Lightning Impulse Withstand of a Gas-Insulated Line Filled With N₂/SF₆", Paper ISH 99
- ¹⁹ D. Sämann, "Vakuumschaltechnik – Prinzip für das nächste Jahrzehnt", ETZ Heft 6/1999
- ²⁰ www.amsuper.com, Juli 2000
- ²¹ G. Lemesch, "Neue Trends auf dem Gebiet der Hochspannungsisolierungen von Großmaschinen sowie in der elektrischen Diagnostik", VA TECH ELIN, Österreich, 2000