Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 25

Artikel: Mittelspannungskabel : mit oder ohne Diffusionssperre?

Autor: Sarbach, Ewald

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902154

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 24.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Was sich beim Hoch- und Höchstspannungskabel als notwendig erwiesen hat, ist beim Mittelspannungskabel sinnvoll: eine Diffusionssperre. Sie verhindert, dass Wasserdampf in die Isolation eindringt. Damit wird den gefürchteten Wasserbäumchen die Grundlage zum Wachstum entzogen. Die Lebensdauer des Kabels wird verlängert.

Mittelspannungskabel: mit oder ohne Diffusionssperre?

■ Ewald Sarbach

Seit längerer Zeit herrscht die Kontroverse, ob es sinnvoll sei, Mittelspannungskabel mit einer Diffusionssperre auszurüsten. Die widersprüchlichen Meinungen sind weitgehend bedingt durch die irrige Auffassung, eine Diffusionssperre verteuere das Kabel. Diese Fehleinschätzung wird durch Unkenntnis der Diffusionsgesetze und der daraus folgenden Diffusionsvorgänge verursacht. An sich sind diese Gesetze einfach zu verstehen. Die Einschätzung dieser Vorgänge macht uns aber Mühe, weil sie unseren Sinnen nicht direkt zugänglich sind. Ist ein nasses Handtuch schwerer als ein trockenes? Die Antwort ist sicher immer ja. Ist trockene Luft leichter oder schwerer als nasse? Ohne Kenntnis der betreffenden Naturgesetze oder gute, schlüssige Beobachtung neigt man eher dazu anzunehmen, trockene Luft sei leichter als nasse, was aber falsch ist. Dass feuchte Luft leichter ist, wird auch durch den Barometerstand bewiesen, der bei Regen niedriger ist als bei Sonnenschein. Das Barometer zeigt ja nichts anderes an als Luftsäulengewichte.

Schwieriger zu beantworten sind Fragen wie: Welche Feuchte stellt sich in der Isolation bei einem im Boden verlegten Mittelspannungskabel konventioneller Bauart ein und wie wird diese von durchschnittlichen Betriebsbedingungen beeinflusst? Ist bei einem Kabel, welches ein Gewässer durchquert, dieses wegen direktem Wasserkontakt gefährdeter? Weshalb sind Kabel, welche in Gebäuden verlegt werden, meistens auch nach längerer Betriebszeit frei von Wasserbäumchen? Gibt es eine kritische relative Feuchte im Kabel unterhalb derer die schädliche Wasserbäumchen-Bildung in der Isolation nicht auftritt? Verhindert eine Diffusionssperre die Wasserbäumchen-Bildung generell, oder reduziert sie die Wachstumsgeschwindigkeit? Wird die Lebensdauer eines Kabels mit Diffusionssperre signifikant verlängert? Viele dieser Fragen werden, wie die eingangs gestellte «Ist trockene Luft leichter oder schwerer als feuchte?», intuitiv falsch beantwortet. Daraus können falsche Schlussfolgerungen des Anwenders resultieren. Der Schweizerische Elektrotechnische Verein (SEV) hat Aspekte, welche für den Anwender wichtig und die mit obigen Fragen verknüpft sind, im Reglement für das Konformitäts- und Qualitätszeichen (SEV+) «spezielle Anforderungen für Mittelspannungskabel» festgehalten. Für den Anwender ist es lohnend, dieses Reglement sorgfältig zu studieren.

Der Aufsatz beantwortet viele der gestellten Fragen und erleichtert den Anwendern eine zweckdienliche, optimierte Kabelwahl.

Wasserdampfdiffusion bei Kabeln

Praktisch alle Kunststoffisolationen weisen in fein verteilter Form Poren kleinster Abmessungen auf, oft als Mikrohohlräume (micro voids) bezeichnet. Das gilt auch für polymerisolierte Mittel- und Hochspannungskabel. Die Zahl der Hohlräume liegt zwischen 10^4 und 10^5 pro mm^3. Nähere Angaben über

Adresse des Autors
Ewald Sarbach, Dipl. Ing. ETHZ, Studer Draht- und Kabelwerk, 4658 Däniken

Anzahl und prozentuale Verteilung der Mikrohohlräume in Mittelspannungskabeln für unterschiedliche Vernetzungsverfahren findet man in [1].

Bei einem absolut trockenen Kabel sind die Poren mit Gas gefüllt; befindet sich jedoch ein Kabel ohne Diffusionssperre in wasserdampfhaltiger Luft, dann dringt eine bestimmte Wasserdampfmenge in die Mikrohohlräume ein und kondensiert an den Porenwänden so lange, bis die Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist, die vom Partialdruck des Dampfes in der Umgebungsluft abhängt. Unmittelbar nach der Extrusion sind polymerisolierte Mittelspannungskabel relativ trocken; die Ausgleichsvorgänge in Richtung Gleichgewichtsfeuchte beginnen sofort und sind, unter Voraussetzung von konstantem Partialdruck des Dampfes in der Umgebungsluft, in einigen Tagen abgeschlossen. Diese zeitliche Abschätzung deckt sich mit der Erfahrung der Silanvernetzung, bei welcher Wasserdampf in die Isolation diffundiert. Beispielsweise beträgt die nötige Diffusionszeit für 5 mm Isolationsdicke bei 80 °C und einer relativen Feuchte der Luft von 90% für einen Wassertransport von 1000 ppm, welcher für die Vernetzung gebraucht wird, ungefähr 70 Stunden. Aus Erfahrung ist bekannt, dass sich die Diffusionszeit jeweils um etwa den Faktor 2 verändert pro 10 °C veränderter Vernetzungstemperatur. Mit diesen Werten lässt sich die Diffusionszeit t_D abschätzen, die bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte verstreicht. Für ein Mittelspannungskabel mit einer Wandstärke von 5 mm, einer Diffusionsmenge von 50 ppm und einer relativen Luftfeuchte von 45% gilt bei 20 °C Umgebungstemperatur:

$$t_D \approx 2^6 \cdot 70\ \text{h} \cdot \frac{45\%\ \text{r.F.}}{90\%\ \text{r.F.}} \cdot \frac{50\ \text{ppm}}{1000\ \text{ppm}} \approx 112\ \text{h} \qquad (1)$$

wobei der Exponent 6 durch (80 °C–20 °C)/10 °C = 6 gegeben ist.

Ein Teil des Wassers, welches an den Wänden der Mikrohohlräume angelagert ist, stammt beim peroxidisch vernetzten Kabel aus den Vernetzungsreaktionen; ein Teil war bereits im Ausgangsmaterial vorhanden, und ein Teil diffundiert – sofern die Gleichgewichtsfeuchte noch nicht erreicht ist – unmittelbar nach der Extrusion in die Isolation. An den Innenwänden der Mikrohohlräume sind also Wassermoleküle angelagert. Die Zahl der Wassermoleküllagen lässt sich in etwa abschätzen: Nimmt man an, die Mikrohohlräume seien kugelförmig mit einem Radius r von $0{,}8 \cdot 10^{-6}$ m und ihre Zahl sei 10^{14} pro m³ und die an der Innenwand angelagerte Wassermenge betrage 100 ppm, so ergibt sich für ein spezifisches Gewicht von $0{,}92 \cdot 10^3$ kg/m³ des Polyäthylens pro Hohlraum ein Wasservolumen V_i von $1{,}15 \cdot 10^{-18}$ m³. Daraus lässt sich die Wasserschichtdicke d an der Wand der Mikrohohlräume berechnen:

$$d = r - \sqrt[3]{r^3 - \frac{3V_i}{4\pi}} \qquad (2)$$

Mit den oben erwähnten Werten ergibt sich $d = 136$ nm, und da der Durchmesser eines Wassermoleküls etwa 0,31 nm beträgt, kann die Anzahl der Wassermoleküllagen auf 400 abgeschätzt werden. Trockenvernetzte Kabel sind also keineswegs trocken, aber der Wassergehalt ist im Vergleich zu dem ursprünglich angewandten Dampfvernetzen um den Faktor 10 bis 50 kleiner; der Wassergehalt liegt in einem vollständig unkritischen Bereich. In diesem Sinn sind sie also tatsächlich trocken. Wie verhält es sich diesbezüglich mit silanvernetzten Mittelspannungskabeln? Der Silanisierungsprozess braucht Wasser, weshalb die Kabel nach der Extrusion in heissem Wasser – oder meistens in feuchter Heissluft (z.B. bei 80 °C mit einer relativen Feuchte von 90%) – eine Zeitlang gelagert werden. Die für die Vernetzung benötigte Wassermenge beträgt 1000 bis 1500 ppm, und die übliche Vernetzungszeit für 5 mm Isolationsdicke beträgt ungefähr 70 h. Die Kabel werden vor Abschluss der vollständigen Vernetzung dem Vernetzungskessel entnommen und weiterverarbeitet. Die weiter fortschreitende Vernetzung trocknet das Kabel fast vollständig aus, und man ermittelt an fertiggestellten Kabeln Werte, die 30 bis 50% unter den Werten der trockenvernetzten Kabeln liegen. Typische Wertebereiche für den Feuchtegehalt der Isolation von Mittelspannungskabeln sind:

Dampfvernetzte Kabel	1000–3000 ppm
Peroxydisch vern. Kabel	100– 200 ppm
Silanvernetzte Kabel	60– 150 ppm

Die Erkenntnis, dass silanvernetzte Kabel sehr trocken sind, ist keineswegs neu, sie wurde bereits 1984 in [2] beschrieben. Messungen, die Anfang 1997 im Auftrag der Firma Studer von der Kema durchgeführt wurden, bestätigen die oben angeführten Wertebereiche. Es sei nochmals wiederholt: auch trockenvernetzte Kabel sind genügend trocken und verdienen die Bezeichnung «trockenvernetzt» zu Recht.

Wasserbäumchen brauchen Wasser

Im elektrischen Feld erfahren die Wassermoleküle in den Mikrohohlräumen eine Kraft. Wenn diese Kraft grösser ist als die molekularen Bindungskräfte der Wassermoleküle untereinander und mit dem Polyäthylen, so setzt ein Wassertransport ein und Wasserbäumchen können entstehen. Die molekularen Bin-

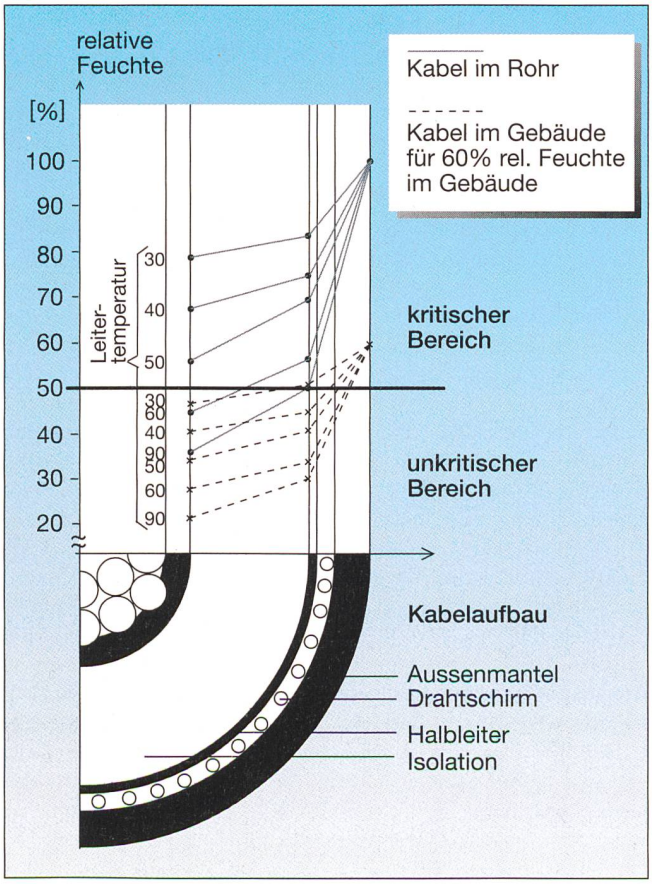

Bild 1 Kritische und unkritische Feuchtigkeit für verschiedene Leitertemperaturen

dungskräfte nehmen mit zunehmender molekularer Schichtdicke ab. Die molekulare Schichtdicke ist, wie erwähnt, auch von der relativen Feuchte der Umgebungsluft abhängig. Nach dieser Modellvorstellung ist zu erwarten, dass bei gegebenem elektrischem Feld eine kritische relative Feuchte existiert. Wenn dieser Wert überschritten wird, ist zu erwarten, dass Wasserbäumchen entstehen. Unterhalb des kritischen Wertes sollten Wasserbäumchen ausbleiben. Eine höhere elektrische Feldstärke müsste die kritische relative Feuchte in Richtung tieferer Werte verschieben. In [3] sind Versuche an Polyäthylen(PE)-Isolationen Rogowski-Typ beschrieben, mit einer elektrischen Beanspruchung von 10 kV/mm und unterschiedlichen relativen Feuchten im Versuchsgefäss, eingestellt durch wässrige Lösungen von Salzen. Die relativen Feuchten betrugen: 20, 33, 52, 76, 93 und 100%. Bei relativen Feuchten von 20, 33 und 52% konnten keine Wasserbäumchen festgestellt werden – weder Bäumchen, die in der Isolation entstehen (bow-tie trees), noch solche, die ihren Ursprung in den Halbleiterschichten haben (vented trees). Mit steigender Feuchte ab 76% und längerer Versuchszeit nahmen sowohl die Zahl wie die Länge der Wasserbäumchen zu. Die Versuchsdauer betrug neun Wochen. Aus diesem Versuch ergibt sich eine kritische relative Feuchte, die zwischen 52 und 76% liegt (elektrische Beanspruchung 10 kV/mm). Ein ähnlicher Versuch an Kabeln über eine Versuchsdauer von 0,8 und 1,6 Jahren mit einer Feldstärke von 20, 30 und 43 kV/mm ist in [4] beschrieben. Auch bei dieser Versuchsreihe traten bei relativen Feuchten von 0, 20 und 33% keine Wasserbäumchen auf. Bei 52, 56 und 76% ergab sich das übliche Bild mit vielen Wasserbäumchen. Die kritische Feuchte liegt bei diesem Versuch – mit einer Feldstärke ≥20 kV/mm – zwischen 33 und 52%. Die Ergebnisse bestätigen die Modellvorstellung, nach der bei höheren Feldstärken der Wert der kritischen Feuchte tiefer liegt. In den Arbeiten [3] und [4] fehlt der Bezug zu Kabeln, die unter üblichen Bedingungen betrieben werden. Liegt die Feuchte von Kabelisolationen nach längerer Betriebszeit im kritischen oder im unkritischen Feuchtebereich?

Leiter-temperatur [°C]	Temperatur Grenzschicht innerer Halbleiter und Isolation [°C]	Temperatur Grenzschicht Isolation und äusserer Halbleiter [°C]	Temperatur Oberfläche Aussenmantel [°C]
90	85	77	61
60	58	53	42
50	48	44	37
40	38	36	31
30	29	28	25

Tabelle I Berechnung des Temperaturprofils bei verschiedenen Leitertemperaturen für ein 20-kV-Kabel, 240 mm² Leiterquerschnitt

Leitertemperatur [°C]	Sättigungsdampfdruck Grenzschicht innerer Halbleiter und Isolation [N/m²]	Sättigungsdampfdruck Grenzschicht Isolation und äusserer Halbleiter [N/m²]	Sättigungsdampfdruck Aussenmantel [N/m²]	Relative Feuchte Grenzschicht Isolation und äusserer Halbleiter [%]	Relative Feuchte Grenzschicht innerer Halbleiter und Isolation [%]
90	57 820	41 908	20 866	50	36
60	18 158	14 303	8 201	57	45
50	11 164	9 103	6 276	69	56
40	6 627	5 942	4 493	75	68
30	4 006	3 781	3 169	84	79

Tabelle II Sättigungsdampfdruck und relative Feuchte bei verschiedenen Leitertemperaturen für ein 20-kV-Kabel

Ausgleichsvorgänge bestimmen die Isolationsfeuchte im Betrieb

Die im folgenden dargelegten Ausgleichsvorgänge können nur stattfinden, wenn das Kabel keine metallische Diffusionssperre aufweist. Der Wasserdampf-Partialdruck in den Mikrohohlräumen ist bestrebt, sich zu jedem Zeitpunkt an den Partialdruck ausserhalb des Kabels anzugleichen. Für stationäre Betriebsverhältnisse kann, ausgehend von unterschiedlichen Strombelastungen, die relative Feuchte, die sich in den Mikrohohlräumen einstellt, für jede Isolationsschicht bestimmt werden. Dazu sind zwei Schritte notwendig: Im ersten Schritt bestimmt man das Temperaturprofil des Kabels und anschliessend lassen sich im zweiten Schritt, ausgehend vom Partialdruck des Wassers oder des Wasserdampfes in der Umgebung des Kabels, die relativen Feuchten in der Isolation bestimmen. In praktisch allen Fällen befindet sich zum Beispiel in der Rohranlage irgendwo Wasser, so dass die relative Feuchte im Rohr 100% erreicht. Selbst in einer trockenen Rohranlage ist die relative Feuchte in 1 m Bodentiefe immer >95%, meistens sogar ≥99%. Auch bei direkter Erdverlegung ändert sich diesbezüglich nichts, vorausgesetzt der Boden trockne nicht durch übermässige Kabelbelastung aus. Die hohe relative Bodenfeuchte ist bedingt durch den hohen Wassergehalt des Bodens in 1 m Tiefe; der Volumenanteil des Wassers liegt in Europa immer zwischen 15 und 50%.

In Tabelle I ist das berechnete Temperaturprofil eines Mittelspannungskabels für verschiedene stationäre Leitertemperaturen dargestellt.

Ausgehend von diesen Temperaturen kann nun der Sättigungsdampfdruck gemäss dem Temperaturprofil und daraus die relative Feuchte in der Isolation bestimmt werden (Tabelle II).

Die Berechnung setzt voraus, dass sich irgendwo in der Umgebung des Kabels etwas Wasser befindet, welches annähernd die Temperatur der Kabelmantel-oberfläche annimmt. Der Wasserdampf-Partialdruck zum Beispiel im Rohr ist demnach annähernd gleich dem Sättigungsdampfdruck, und die relative Feuchte im Rohr beträgt annähernd 100%.

In Bild 1 sind die Ergebnisse der Rechnung dargestellt. Wie im vorhergehenden Abschnitt erwähnt, liegt die kritische Feuchte bei einer Feldstärke von ≥20 kV/mm im Bereich 33 bis 52% relativer Feuchte. Die wesentlich kleinere

Feldstärke im Betrieb verschiebt den kritischen Bereich in Richtung höherer relativer Feuchte.

Die örtliche Feldstärke in der Isolation hängt wesentlich von Verunreinigungen und von Form und Grösse der Mikrohohlräume ab. Da diese nicht genau bekannt sind, ist es aus Sicherheitsgründen angezeigt, den kritischen Bereich nicht zu stark – trotz tieferer Feldstärke im Betrieb gegenüber dem erwähnten Versuch – nach oben zu schieben. Deshalb ist der kritische Bereich in Bild 1 mit einer relativen Feuchte von ≥50% angegeben. Im praktischen Betrieb werden Mittelspannungskabel selten dauernd mit Leitertemperaturen >60 °C betrieben, oder zum mindesten folgen auf Zeiten höherer Belastung wieder Perioden (z.B. Nachtbetrieb) tieferer Belastung. Daraus folgt, dass bei Rohr- oder Erdverlegung die relative Feuchte, die sich in der Isolation von Mittelspannungskabeln ohne metallische Diffusionssperre einstellt, praktisch immer im kritischen Bereich liegt.

Ausserhalb der Rohranlage, zum Beispiel im Gebäudeinnern, ist die relative Feuchte der Umgebung tiefer, das heisst die Linien der relativen Feuchte verschieben sich nach unten. In Bild 1 ist als Beispiel die Verschiebung für 60% relative Feuchte im Gebäude, wieder für verschiedene Leitertemperaturen, eingezeichnet. Die relative Feuchte der Isolation liegt in diesem Fall immer im unkritischen Bereich.

Untersuchungen an fünf Kabelmustern von unterschiedlichen Kabelherstellern, mit einer Betriebsdauer von 10 bis 30 Jahren, bestätigen mit einer Unsicherheit von etwa 3%, dass bei einer relativen Luftfeuchte von beispielsweise 60% und einer durchschnittlichen Leitertemperatur von 50 °C keine Wasserbäumchen entstehen (Bild 1, unkritischer Bereich).

Bei Kabel Nummer 1 (Tabelle III) trat ein Durchschlag wegen mechanischer Beschädigung auf. Die Musterentnahme erfolgte im Gebäude. Bei den Kabeln Nummer 2, 3 und 4 traten elektrische Durchschläge auf. Die Musterentnahme erfolgte in der Nähe der Durchschlagsstellen. Diese befanden sich ausserhalb der Gebäude im Rohr. Bei Kabel Nummer 5 trat kein Schaden auf, die Musterentnahme erfolgte im Gebäude. Kabelmuster, welche aus dem Gebäudeinnern stammten, enthielten keine Wasserbäumchen, jene aus der Rohranlage jedoch immer.

Einfluss der Kabelkonstruktion auf Wasserbäumchen

Da man die Verlegebedingungen meistens nicht ändern kann, ist es angezeigt, durch zweckdienliche Kabelkonstruktionen die Dampfdiffusion zu reduzieren oder besser zu eliminieren. Einfache Versuche, im folgenden kurz dargelegt, lassen den Einfluss der Kabelkonstruktion anschaulich nachvollziehen. Wenn Kabelstücke nach einer Versuchsanordnung gemäss Bild 2 geprüft werden, so ist zu erwarten, dass sich relativ rasch Wasserbäumchen bilden, besonders wenn der Mantel entfernt wird.

Auf Bild 3 ist die Wasserbadtemperatur dargestellt. Die Versuchsanordnung ist besonders geeignet, wenn zum Beispiel der Einfluss von Konstruktionselementen in bezug auf Wasserbäumchen-Bildung untersucht werden soll. Will man zum Beispiel den Einfluss des PE-Isolationsmaterials untersuchen, so ist es von Vorteil, Kabelstücke direkt ab der Extrusionslinie zu verwenden. Damit die Ableitströme abfliessen können, werden die Kabelstücke mit einem lose aufgebrachten Kupferband umwickelt, welches während der Versuchsdurchführung geerdet wird. Bild 4 zeigt Beispiele von zwei Prüflingen mit PE-Isolationsmaterialien unterschiedlicher Provenienz, die fünf Versuchszyklen unterworfen wurden.

Die Zahl der Wasserbäumchen nach Bild 4a beträgt etwa 32 000 pro mm³ mit einer maximalen Länge von etwa 360 µm und nach Bild 4b etwa 4400 pro mm³ mit einer maximalen Länge von etwa 135 µm.

Es ist bekannt, dass ein PE-Mantel im Vergleich zu einem PVC-Mantel einen wesentlich höheren Diffusionswiderstand aufweist [5] und dass eventuell auch ein Quellband (längswasserdichte Kabelkonstruktion) eine verzögernde Wirkung erbringt.

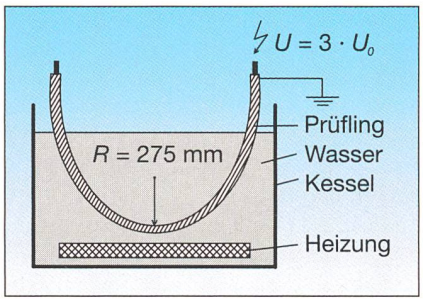

Bild 2 Versuchsanordnung, Bildung von Wasserbäumchen

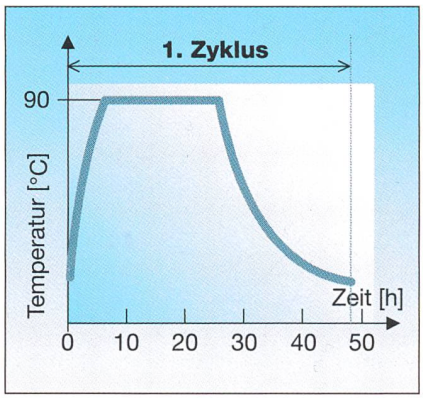

Bild 3 Wasserbadtemperatur
Versuchsanordnung nach Bild 2

Mit diesen beiden konstruktiven Elementen lässt sich die Wasserbäumchen-Bildung verzögern, aber nicht vermeiden. Nach zum Beispiel 16 Zyklen (Versuch nach Bild 2) an einem Kabel mit längswasserdichter Konstruktion und PE-Mantel ergaben sich ungefähr 16 Wasserbäumchen pro mm³ mit einer maximalen Länge von 80 µm. Nur eine metallische Barriere kann den Diffusionsvorgang unterbinden. In diesem Fall entstehen nur sehr wenige und sehr kleine Wasserbäumchen, die von der Anfangsfeuchte erzeugt werden. Wesentlich ist, dass die Wasserbäumchen nicht wachsen können, weil der Nachschub von Wasser über Diffusionsvorgänge fehlt. So ergab sich nach 16 Zyklen (Versuch nach Bild 2) an einem Mittelspannungskabel mit einer metallischen Diffusionsbarriere etwa 1 Wasserbäumchen pro mm³ mit einer maximalen Länge von nur 25 µm. Will man also Wasserbäumchen vermeiden, so ist es notwendig, eine metallische Sperre vorzusehen. Dies wurde bereits in [6] festgehalten: «Es ist jedoch noch nicht gelungen, die Wasserbäumchen-Bildung in polymerisolierten Kabeln ganz zu vermeiden, es sei denn, das Eindringen von Wasser werde durch metallische Sperren verunmöglicht.»

Muster-kabel Nr.	Spannungsreihe [kV]	Betriebsspannung [kV]	Querschnitt [mm²]	Einsatzdauer [a]	Zahl der Wasserbäumchen [mm⁻³]	max. Länge [µm]
1	30	16	240	13	–	–
2	30	15	240	30	60	700
3	20	16	150	16	20	140
4	20	16	95	18	190	170
5	20	10	25	20	–	–

Tabelle III Musteruntersuchung hinsichtlich Wasserbäumchen von Kabeln aus dem Betrieb

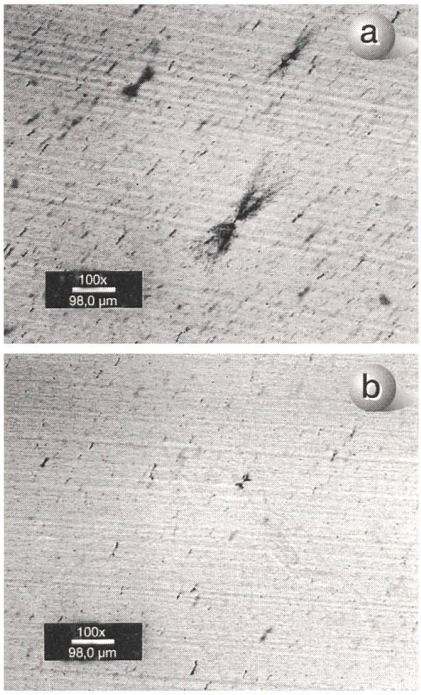

Bild 4 Wasserbäumchen in PE unterschiedlicher Provenienz

Massnahmen für überdurchschnittliche Lebensdauer

Konventioneller Stand der Technik

Mittelspannungskabel (Spannungsbereich 10 bis 36 kV Systemspannung) werden zurzeit weltweit zu über 90% ohne metallische Dampfbarriere produziert. Es ist bekannt und allgemein akzeptiert, dass die Bildung und das Wachstum von Wasserbäumchen in der Isolation den lebensbegrenzenden Faktor darstellen. Aus diesem Grunde sind denn auch Langzeitprüfungen (long time test) mit definierten Anforderungen an die Spannungs-Restfestigkeit eingeführt worden. Das Wasser hat bei diesen Prüfungen freien Zutritt zu den Halbleiterschichten. Kabel, welche diese Prüfungen erfolgreich bestehen, weisen demnach eine gewisse Resistenz gegen zu schnelles Wachstum der Wasserbäumchen auf, und man schätzt allgemein, dass die Lebensdauer etwa im Bereich von 30 bis 50 Jahren liegt. Der Abfall der elektrischen Festigkeit wird durch einen Exponenten N charakterisiert; ein kleiner Wert bedeutet starken Verlust der elektrischen Festigkeit. Für Kabel ohne Diffusionssperre, ermittelt mit einem Langzeittest, liegt N im Bereich 7 bis 15. $N=10$ bedeutet zum Beispiel, dass die elektrische Festigkeit im Langzeittest in zwei Jahren um etwa 40% abnimmt.

Kabel mit metallischer Diffusionssperre

Die Diffusionssperre verhindert, dass Wasser in Form von Dampf in die Isolation eindringen kann. Der Abfall der elektrischen Festigkeit ist wesentlich kleiner, weil Wasserbäumchen nur unbedeutend wachsen können. Es ist bekannt, dass Polymerkabel bei Bedingungen wie beim Langzeittest, aber ohne Diffusionsmöglichkeit des Wassers im Zweijahrestest praktisch nicht altern. Solche Kabel weisen deshalb einen Exponenten $N>50$ auf. In Ausnahmefällen wurden Werte von N bis zu 400 ermittelt [7]. Im Langzeittest (ohne direkten Wasserzutritt zu den Halbleiterschichten) ergäbe sich demnach ein Abfallen der elektrischen Festigkeit von weniger als 10%. Man schätzt daher, dass die Lebensdauer eines Kabels mit Diffusionssperre gegenüber gewöhnlichen Konstruktionen um über 15 Jahre zunimmt. Polymerisolierte Mittelspannungskabel mit einer metallischen Diffusionssperre erreichen demnach eine Lebensdauer, die mindestens jener der Haftmasse-Papierbleikabel entspricht, also mehr als 50 Jahre. Üblicherweise wird die Diffusionssperre so dimensioniert, dass sie im Falle eines Fehlers die Mantelströme führen kann [8] und man somit auf einen zusätzlichen Drahtschirm verzichten kann. Kabel mit metallischer Diffusionssperre müssen deswegen nicht unbedingt teurer sein als gewöhnliche Kabel.

Literatur

[1] *E. Sarbach:* Energiekabel mit Dampfbarriere leben länger. Bulletin SEV/VSE 87(1996)1, S. 19–24.

[2] *W. Boone et al.:* Development and Trial of EHV XLPE Cables in the Netherland. Cigré-Bericht 1984, 21-02.

[3] *E. Ildstad, H. Faremo:* Importance of Relative Humidity on Water Treeing in XLPE Cable Insulation. 7th Intern. Symp. on High Voltage Engineering. Paper 23.04, Aug. 91.

[4] *H. Faremo et al.:* Endurance Testing of XLPE Cable Insulation at Extra High AC Voltages. IEE 1993, Pul. N° 382.

[5] *S.H. Poulsen et al.:* Sensitive Testing of XLPE Cable Radial Watertightness. Power Technology International, 1993.

[6] *T. Heizmann und W. Zaengl:* Vor-Ort-Diagnose von polymerisolierten Mittelspannungskabeln. Bulletin SEV/VSE 85(1994)23, S. 27–37.

[7] *E.F. Peschke et al.:* Erweiterung des Einsatzbereiches von VPE-Kabeln auf 500 kV durch technologische Fortschritte. Elektrizitätswirtschaft, 94(1995)26.

[8] *E. Sarbach:* Belastungsgrenze präziser festlegen. Bulletin SEV/VSE 87(1996)23, S. 11–16.

Câbles à moyenne tension: avec ou sans barrière de diffusion?

Ce qui s'est révélé nécessaire pour les câbles à haute tension et les câbles à très haute tension, est judicieux pour les câbles à moyenne tension: une barrière de diffusion. Elle empêche l'entrée de vapeur d'eau dans l'isolation. Ainsi est enlevée la base de croissance aux arborescences d'eau redoutées. La durée de vie du câble est rallongée.

Der SEV auf dem Internet / L'ASE sur l'Internet:
http://www.sev.ch