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: 87 (1996)

Heft: 1

Artikel: Energiekabel mit Dampfbarriere leben länger : Einfluss von Wasser auf die Lebensdauer von polymerisolierten Mittelspannungskabeln

Autor: Sarbach, Ewald

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902283

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: 12.07.2025

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

Die Lebensdauer von Mittelspannungskabeln wird wesentlich von Wasserbäumchen beeinflusst, welche sich im Laufe der Zeit ausbilden. Mikrohohlräume, als häufiger Ansatzpunkt von Wasserbäumchen, spielen – zusammen mit Diffusionsvorgängen – eine wichtige Rolle. Zwischen jahreszeitlich bedingten Kabelausfällen und dem Feuchtgehalt in den Mikrohohlräumen ergibt sich eine gute Korrelation. Aufgrund von Indizien lässt sich schliessen, dass Mittelspannungskabel mit einer metallischen Dampfsperre eine längere Lebensdauer aufweisen als solche ohne Barriere.

Energiekabel mit Dampfbarriere leben länger

Einfluss von Wasser auf die Lebensdauer von polymerisolierten Mittelspannungskabeln

■ Ewald Sarbach

Wasser in der Kabelisolation ist kaum vermeidbar

Die Lebenserwartung von polymerisolierten Mittelspannungskabeln wird wesentlich vom Wasser, welches sich im Laufe der Zeit in Wasserbäumchen manifestiert, bestimmt. Bereits im Herstellprozess entsteht als Folge von chemischen Reaktionen aufgrund des Vernetzungsvorganges Wasser in der Isolation. Eine übersichtliche Darstellung zu dieser Problematik findet man in [1], woraus auch die Tabelle I dieser Arbeit entnommen ist. Die Werte dieser Tabelle sollten nach unserer Erfahrung allerdings nur als Richtwerte interpretiert werden.

Zurzeit werden in der Schweiz zur Vernetzung von PE (VPE, X) die Gasvernetzung mit Wasserkühlung, die Kontaktrohrvernetzung und die Silanvernetzung eingesetzt. Die zum Teil heute noch irrige Ansicht, das Silanvernetzungsverfahren sei im Vergleich zur Gasvernetzung oder Kontaktrohrvernetzung (auch als Trockenvernetzung bezeichnet) minderwertig, wird eindeutig widerlegt: Sowohl der Wassergehalt wie auch die Zahl der Mikrohohlräume sind dort in etwa gleich wie beim Trockenvernetzungsverfahren.

Mikrohohlräume als Wasserreservoir für Wasserbäumchen

Im Feuchtehaushalt von Kabeln spielen die Mikrohohlräume (micro-voids), welche in grosser Zahl in der Isolation vorhanden sind, eine wichtige Rolle. Die Feuchte im Mikrohohlraum stellt sich stets so ein, dass der Partialdruck des Wasserdampfs in den Mikrohohlräumen gleich dem Partialdruck des Wasserdampfs ausserhalb des

Produktionsprozess (Vernetzung)	Höchster Wassergehalt während des Produktionsprozesses [ppm]	Zahl der Hohlräume [pro mm³]	max. Grösse der Hohlräume [µm]
Dampfvernetzung	1000–2000	10^5	30
Gasvernetzung, Wasserkühlung	>200	$6 \cdot 10^4$	15
Gasvernetzung, Gaskühlung	50–100	10^4	15
Kontaktrohrvernetzung	50–100	10^4	10
Silanvernetzung	80	10^4	15

Tabelle I Wassergehalt und Mikrohohlräume in Abhängigkeit des Produktionsprozesses

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

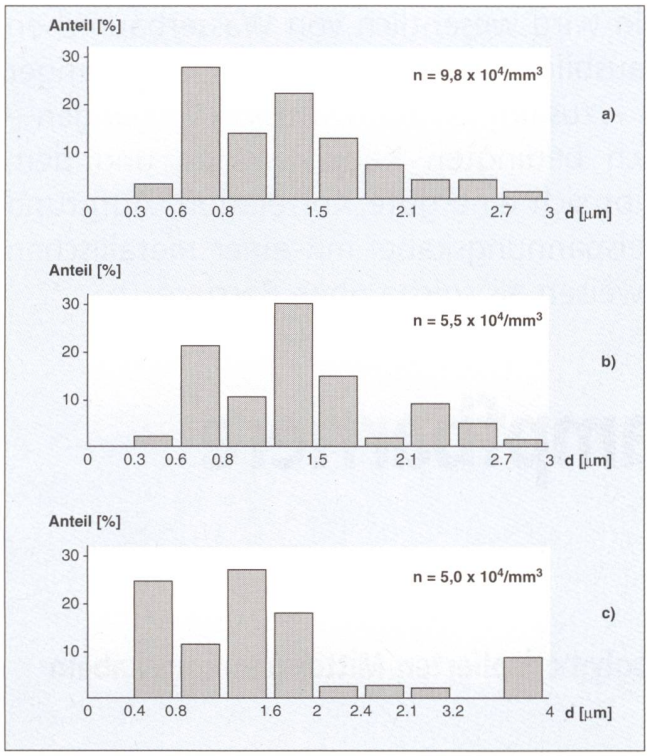


Bild 1 Anzahl und prozentuale Verteilung der Mikrohohlräume in MS-Kabeln

n Zahl der Mikrohohlräume pro mm^3 für verschiedene Fabrikate

d Durchmesser der Mikrohohlräume

a, b trockenvernetzte (peroxidische) Fabrikate

c silanvernetztes Fabrikat

Kabels wird. Das Wasser, welches sich in die Wasserbäumchen einlagert, wird über die Diffusion von Wasserdampf durch den Mantel und die Isolation nachgeliefert, sofern keine Dampfsperre in Form einer metallischen Barriere vorhanden ist. Die Zahl der Mikrohohlräume liegt bei polymerisolierten Mittel- und Hochspannungskabeln für die heute in der Schweiz üblichen Vernetzungsverfahren zwischen 10^4 und 10^5 pro mm^3. Bild 1 zeigt die Anzahl von Mikrohohlräumen und ihre Verteilung; dargestellt sind die Mittelwerte von je fünf Proben aus drei 20-kV-VPE-Kabeln, welche Mitte 1994 in der Schweiz in drei verschiedenen Kabelwerken hergestellt wurden. Kabel *a* und *b* sind trockenvernetzt, Kabel *c* ist silanvernetzt.

Die Mikrohohlräume sind häufig die Ausgangs- oder Ansatzpunkte für Wasserbäumchen, die bei Alterungsvorgängen eine wichtige Rolle spielen. In der Literatur werden als Ansatzpunkte für Wasserbäumchen zudem häufig Verunreinigungen des Isolierstoffes genannt [2]. Mikrohohlräume und Verunreinigungen lassen sich im Mikroskop oft nur schwer unterscheiden; die weitaus grösste Zahl aller Wasserbäumchen hat einen Mikrohohlraum als Ausgangspunkt. Die Oberfläche des Mikrohohlraumes ist an der Grenzfläche immer mit einem mono- oder polymolekularen Film von Wassermolekülen überzogen [3], wie auf Bild 2 dargestellt. Es ist deshalb naheliegend, dass Wasserbäumchen Mikrohohlräume als Ausgangspunkte haben. Nur bei absolut trockenem Gasinhalt des Mikrohohlraumes, was nie gegeben ist, würde überhaupt kein Film entstehen. Unter üblichen Bedingungen weist das Gas eine mehr oder weniger hohe relative Feuchtigkeit auf, so dass immer ein mono- oder ein polymolekularer Wasserfilm entsteht.

Diese Tatsache findet ihre Erklärung darin, dass stets Adhäsion zwischen den Molekülen des Isolierstoffs und den Wassermolekülen auftritt und dass bei zunehmender Relativfeuchte des Gases allmählich ein polymolekularer Wasserfilm entsteht. Die auf die Molekülschichten wirkende Adhäsionskraft nimmt zwar nach aussen ab, aber sie ist bei der äussersten Schicht immer noch grösser als die Kohäsionskraft einer Wasseroberfläche, welche für deren Sättigungsdampfdruck p_s massgebend ist. Daraus folgt, dass der Sättigungsdampfdruck p_s' über einem adsorbierten Wasserfilm niedriger ist als der Sättigungsdampfdruck p_s über einer Wasseroberfläche. Bei Übereinstimmung des Wasserdampf-Partialdruckes im Mikrohohlraum mit dem Sättigungsdampfdruck p_s' ist ein Gleichgewichtszustand erreicht. Ein mono- oder polymolekularer Wasserfilm an der Wandung des Mikrohohlraumes und eine relative Gasfeuchtigkeit von zum Beispiel 10% im Mikrohohlraum sind kein Widerspruch, sondern der Wirkung der Adhäsion und dem reduzierten Sättigungsdampfdruck über dem molekularen Wasserfilm zuzuschreiben. Dass nun Wasserbäumchen Mikrohohlräume als Ausgangspunkt wählen, ist leicht verständlich: einerseits ist der Ansatz an der Fehlstelle gegeben und andererseits ist genügend Wasser in Molekülform an der Grenzschicht vorhanden. Im Gas eines kugelförmigen Mikrohohlraums mit dem Radius *r* ist die Zahl n_1 der Wassermoleküle im Gleichgewichtszustand gegeben durch:

$$n_1 = n_A(4/3)\pi r^3(p/p_o)[T_o/(T_o+\vartheta)] \qquad (1)$$

Die Avogadrosche Konstante n_A beträgt bei Normalbedingungen $2{,}687 \cdot 10^{25}$ m^{-3}, *p* ist der Partialdruck des Wasserdampfs im Hohlraum, p_o der Luftdruck bei 0 °C (entspricht einem Druck von 1,013 bar), T_o ist die Absoluttemperatur bei 0 °C (T_o = 273 °K), und ϑ ist die Temperatur in der Blase in °C.

Für einen Blasendurchmesser von 1,2 µm und für eine relative Feuchte von 20% im Hohlraum und eine Temperatur ϑ = 40 °C wird n_1 rund 300 000. Die Anzahl n_2 der an der Blasenoberfläche angelagerten Wassermoleküle ist viel grösser. Diese Zahl n_2 lässt sich wie folgt abschätzen: $6 \cdot 10^{23}$ Wassermoleküle (Loschmidt-Konstante) wiegen 18 g; für 1000 kg, entsprechend 1 m^3, sind $3{,}3 \cdot 10^{28}$ Moleküle erforderlich, woraus sich ein Volumen pro Molekül von $3 \cdot 10^{-29}$ m^3 ergibt. Nimmt man würfelförmiges Volumen an, so ergibt sich eine Kantenlänge von $0{,}31 \cdot 10^{-9}$ m. Denkt man sich den Mikrohohlraum kugelförmig mit einem Radius von *r* = 0,6 µm, so ergibt sich eine Blasenoberfläche von $4{,}5 \cdot 10^{-12}$ m^2, und durch Division mit $(0{,}31 \cdot 10^{-9})^2$ lässt sich n_2 abschätzen: n_2 = $4{,}7 \cdot 10^7$. Im Gas des Mikrohohlraums befinden sich bei 20% relativer Feuchte rund 300 000 Wassermoleküle, während an der

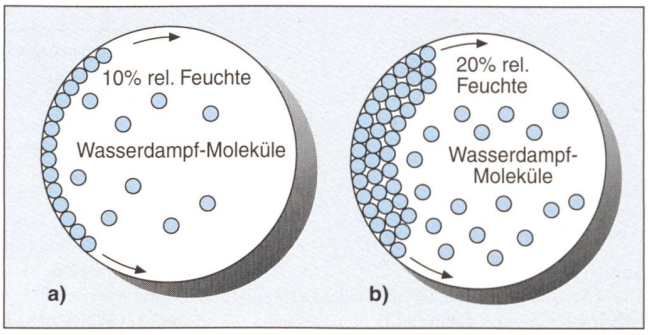


Bild 2 Belegung der Mikrohohlraum-Oberflächen mit Wasserfilmen

a monomolekularer Wasserfilm

b polymolekularer Wasserfilm

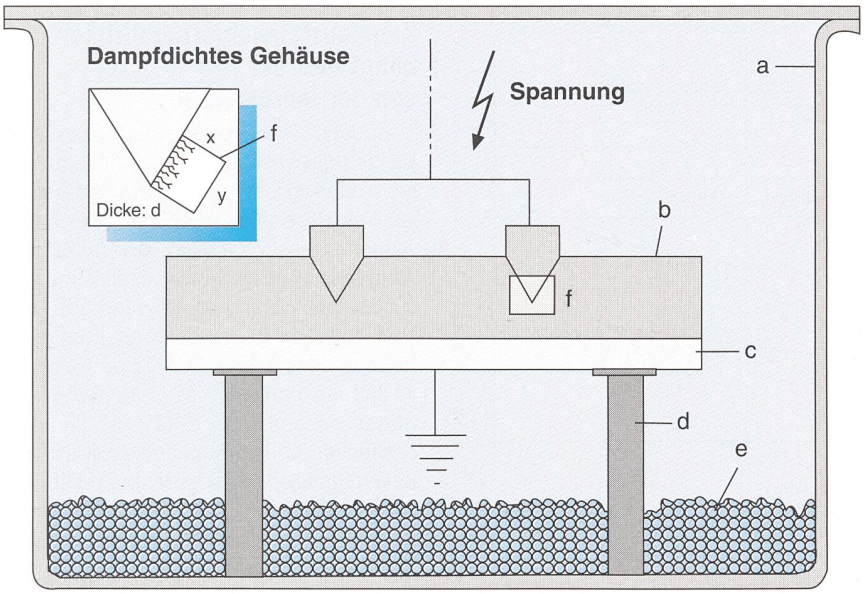


Bild 3 Versuchsanordnung zur Ermittlung des Wasserbäumchenwachstums bei unterschiedlichen Feuchtigkeiten

a Kunststoffzylinder
b Prüfling
c Leitsilber
d Probenhalter
e Salze (wässrige Lösung) oder Silikagel
f Probe (nach Belastung ausgeschnitten) für die Auszählung (x = 0,7 mm, y = 0,95 mm, d = 0,1 mm)

Wandung – bei monomolekularer Anordnung – rund 160mal mehr Moleküle angelagert sind. Es sind also, selbst bei tiefer relativer Feuchte in der Blase, immer genügend Wassermoleküle vorhanden, die den Wasserbäumchen als «Nahrung», das heisst als Nachschub dienen. In dem Masse wie die Wasserbäumchen wachsen, wird das Gleichgewicht gestört, und über die Diffusion wandern, sofern keine Dampfsperre vorhanden ist, Wassermoleküle von aussen nach innen.

Der Anteil Wasser in den Wasserbäumchen ist nicht präzise bekannt. Nach Untersuchungen von Meyer [4] enthalten «vented trees», das sind Bäumchen, die von den Grenzflächen ausgehen, ungefähr 10% Wasser, bezogen auf das Volumen des Bäumchens. Aus der Baupraxis ist bekannt [3], dass zylindrische Kapillaren sich beispielsweise bei 35% relativer Luftfeuchte mit Wasser füllen, wenn der Radius der Kapillare $\leq 1 \cdot 10^{-9}$ m (also ≤ 1 nm) beträgt. Bei einer Relativfeuchte von 70% werden Kapillaren mit einem Radius von 3,0 nm mit Kondensat gefüllt. Der Einfluss des elektrischen Feldes auf Bildung und Wachstum von Wasserbäumchen wird in vielen Publikationen nachgewiesen; eine Zusammenfassung findet man in [5].

Diffusion von Wasserdampf – nützlich oder schädlich?

Wasserbäumchen entziehen dem Mikrohohlraum Wasser; als Folge sinkt der Partialdruck im Blasenraum, und es setzt ein Ausgleichsvorgang über die Diffusion ein, um das Gleichgewicht der Partialdrücke wieder herzustellen. Die Praxis der Silanvernetztechnik nutzt die Diffusion von Wasserdampf in XLPE oder EPR. Bei dieser Technik sind die Wassermengen, die für den Vernetzungsvorgang gebraucht werden, 1000–1500 ppm. Zur Vernetzung einer etwa 5 mm dicken XLPE-Isolation mit einer zusätzlichen, ungefähr 1,5 mm dicken Halbleiterschicht sind bei 70 °C 72 Stunden erforderlich. Der Wasserbedarf der Wasserbäumchen ist um einige Grössenordnungen kleiner [4], und wenn auch der Diffusionswiderstand bei tieferen Temperaturen höher ist, ist der Zusammenhang zwischen Diffusion in der Silanvernetztechnik und Nachlieferung des Wassers zum Wachstum der Wasserbäumchen dennoch leicht einzusehen: Was in etablierter Herstelltechnik genutzt wird, vollzieht sich auch im Betrieb des Kabels; das heisst, über die Wasserdampfdiffusion wird Wasser zum Wachstum der Wasserbäumchen verfügbar. Die Nachlieferung von Wasser über Diffusion zur Speisung von Wasserbäumchen vollzieht sich in den langen Zeiträumen von Monaten bis Jahren trotz relativ hohem Diffusionswiderstand und kleinen Partialdruckdifferenzen problemlos.

Wachstum der Wasserbäumchen

Einen Hinweis über das Wachstum bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten sowie die Zahl der Wasserbäumchen pro Volumeneinheit kann mittels einer modifizierten Ashcraft-Methode [6] gewonnen werden. Bild 3 zeigt die prinzipiellen Elemente der Versuchseinrichtung, welche bei Studer-Kabel Däniken dazu benützt wurde. An Stelle des bei der Ashcraft-Methode verwendeten Elektrolyten, welcher aus einer NaCl-Lösung besteht und die kegelförmige Vertiefung ausfüllt, bildeten hier Metallkegel die Hochspannungselektroden. Die Feuchtigkeit in der Anlage lässt sich durch wässrige Lösungen verschiedener Salze einstellen. Die Versuchsparameter waren:

- *Rondellenpressung:* Standardmethode (nach Ashcraft) für Messung der Wachstumsgeschwindigkeit von Wasserbäumchen mit Compound UC 6201 (LDPE).
- *Medien für Luftfeuchtigkeiten:* für eine relative Luftfeuchtigkeit von 2%: Silikagel; für 45%: gesättigte K_2CO_3-Lösung; für 76%: gesättigte NaCl-Lösung; für 99%: H_2O. Zur Klimatisierung wurden die Rondellen vor der elektrischen Belastung während 96 Stunden diesen Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt.
- *Belastungsparameter:* 4 kV, 6 kHz, 22 °C, Dauer 48 h/120 h.
- *Auszählung:* erfolgte an ausgeschnittenen Plättchen von 0,7×0,95×0,1 mm (siehe Bild 3).

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle II zusammengestellt. Wegen des sehr kleinen Volumens (0,067 mm³), welches

Tabelle II Zahl und maximale Grösse der Wasserbäumchen

*zum Teil electrical trees

Belastungsdauer [h]	Luftfeuchtigkeit [%]	Zahl Wasserbäumchen [n/mm³]	max. Grösse [µm]
48	2	135	25
48	45	220	32
48	76	230	40
48	99	300	43
120	2	220	32
120	45	360	38
120	76	420*	28
120	99	520*	94

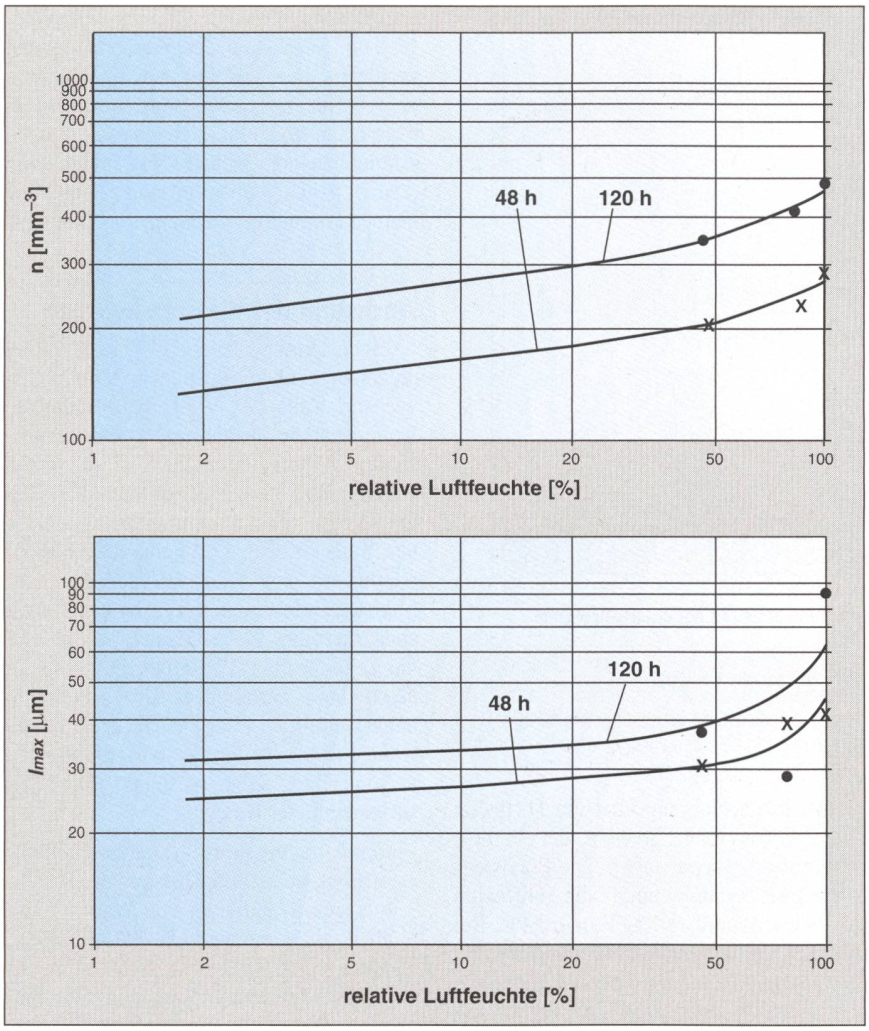


Bild 4 Anzahl *n* und maximale Grösse l_{max} von Wasserbäumchen in Abhängigkeit der relativen Feuchte
Die Messungen wurden bei Studer-Kabel Däniken mit der Prüfanordnung nach Bild 3 durchgeführt.

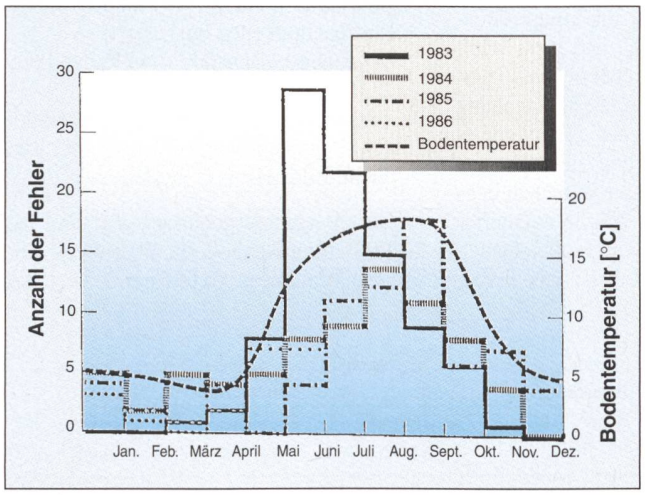


Bild 5 Kabelfehlerverteilung versus Bodentemperatur
Fehleranzahl bei 20-kV-PE-Kabeln in den Jahren 1983–1986 und Verlauf der mittleren Bodentemperatur in 1 m Tiefe (Stand 30. Juni 1986; aus [7])

zur Auszählung und Bestimmung der maximalen Bäumchengrösse diente, ist die letzte Kolonne mit Unsicherheiten behaftet und es ist mit grosser Streuung zu rechnen. Aus Bild 4 ist ersichtlich, dass Zahl und Grösse in Abhängigkeit der Feuchte im PE (d. h. in den Mikrohohlräumen) ansteigt. Ab rund 50% relativer Feuchte stellt man – für die gewählte Versuchsanordnung – ein beschleunigtes Wasserbäumchenwachstum fest. Für Zeiten ab etwa 120 h und relative Feuchte von ≥76% schlagen die Wasserbäumchen in «elektrische Bäumchen» (electrical trees) um.

Kabelausfallwahrscheinlichkeit hängt indirekt von der Jahreszeit ab

Im Jahre 1986 erschien in der Zeitschrift Elektrizitätswirtschaft ein bemerkenswerter Artikel [7], welcher Betriebserfahrungen mit PE-Kabeln offenlegte. Die Daten stammten aus dem Netz der Schleswag Aktiengesellschaft, welche damals im Mittelspannungsnetz rund 1500 km PE- und VPE-Kabel in Betrieb hatte und auf einer Fläche von ungefähr 15 000 km² (Schweiz 41 288 km²) etwa 1,9 Mio. Menschen mit Strom versorgte. Im Bild 5 ist die dem erwähnten Artikel entnommene Kabelfehlerverteilung für vier Jahre dargestellt und in Beziehung gebracht zum durchschnittlichen Verlauf der Bodentemperatur in 1 m Tiefe. Eine Erklärung für das Phänomen ist nicht über die Bodentemperatur zu suchen, sondern über die von Kabelbelastung und Bodentemperatur sich ergebende relative Feuchte in der Kabelisolation, welche im Sommer höher ist und bewirkt, dass die Wasserbäumchen in den Sommermonaten schneller wachsen als in den Wintermonaten.

Unter Annahme, dass der von Mittelspannungskabeln im Landesdurchschnitt übertragene Stromanteil proportional zum Verbrauch sei [8], ergibt sich aus Bild 6, *a*, die im gleichen Bild unter *b* dargestellte, bezogene Kabelverlustleistung. Daraus lassen sich für verschiedene Kabelbelastungen (in den folgenden Tabellen mit Fall I bis IV bezeichnet) unter Berücksichtigung der mittleren Quartals-Bodentemperatur (mittlere Temperatur pro Quartal) die mittleren Quartalstemperaturen in der Kabelisolation bestimmen; sie entsprechen in guter Annäherung den Leitertemperaturen. Als Stromverhältnis (siehe Tabelle III, jeweils 1. Kolonne der Belastungsfälle) ist der Quotient des Leiterstromes zu jenem Strom definiert, der bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C zu einer Leitertemperaturerhöhung von 40 °C führt. Die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ im Leiter bei den aufgeführten Verhältnissen ergibt sich zu

$$\Delta\vartheta = 40(i_L/i_{40})^2 \qquad (2)$$

wobei der Klammerwert dem oben erwähnten Quotienten entspricht.

Die mittleren Leitertemperaturen ergeben sich durch Addition der mittleren Bodentemperatur und der Temperaturerhöhung des Leiters. Diese Werte dienen zur Berechnung der relativen Feuchte in den Hohlräumen. Zu den Belastungsfällen: Fall I stellt eine extrem tiefe Belastung dar (mittlere Temperaturerhöhung <3 °C); die Fälle II und III entsprechen etwa der Praxis in der Schweiz (mit Schwerpunkt im Durchschnitt eher in Richtung Fall II); die

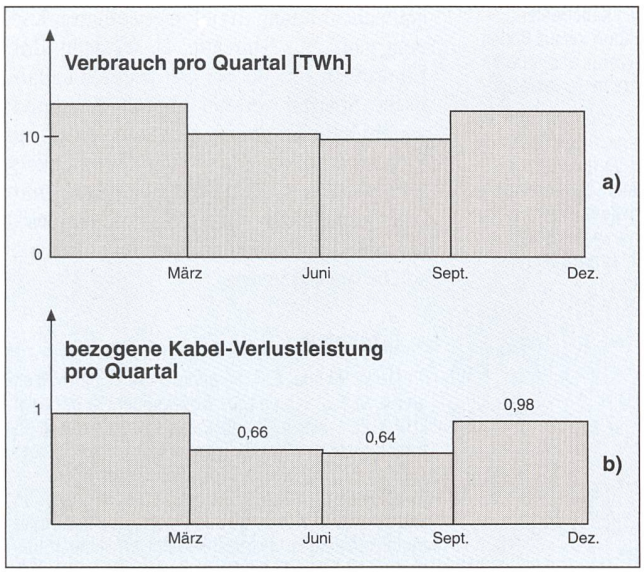


Bild 6 Kabelverlustleistungen in der Schweiz

a Verbrauch elektrischer Energie in der Schweiz 1994

b daraus abgeleitete bezogene Verlustleistung

Fälle III und IV entsprechen eher den Verhältnissen in Deutschland.

Nun ist bekannt, dass die mittlere relative Bodenfeuchte in Zentraleuropa in 1 m Tiefe das ganze Jahr ≥ 99% ist [9]. Diese Bedingung trifft auch zu für den Boden, der das Kabelrohr (oder das Kabel) umgibt, und zwar ab jener Distanz, in welcher keine merkbare Bodenerwärmung durch das Kabel mehr auftritt. Wenn sich Wasser im Rohr befindet, ist die relative Feuchte bereits im Rohr in der unmittelbaren Nähe des Wassers und an den Berührungsflächen annähernd 100%. Da dieses Wasser in der Grenzschicht zum Kabel annähernd die Temperatur der Kabeloberfläche erreicht, ergibt sich wegen des erhöhten Wasserdampf-Partialdrucks an diesen Stellen eine erhöhte Feuchte im Kabel. In der folgenden Tabelle IV sind die berechneten relativen Feuchten in den Mikrohohlräumen für die Belastungsfälle der Tabelle III für die vier Jahreszeiten aufgeführt. Für die Berechnung wird angenommen, dass sich kein Wasser im Rohr befindet; die relative Bodenfeuchte von annähernd 100% wird erst an jenen Stellen im Boden erreicht, welche keine Temperaturerhöhung durch das Kabel mehr aufweisen. Die in der Kolonne «relative Feuchte in der Isolation» aufgeführten Werte sind Gleichgewichtswerte, die sich nach einiger Zeit unter stationären Bedingungen einstellen. Der Sättigungsdampfdruck im Boden entspricht dem effektiven Partialdruck des Wasserdampfes im Boden (Feuchte ≈ 100%) in genügendem Abstand vom Kabel. Der Sättigungsdampfdruck in der Kabelisolation dient zur Berechnung der Isolationsfeuchte (Feuchte in den Mikrohohlräumen). Im zweiten und dritten Quartal ist die relative Feuchte in den Mikrohohlräumen für jeden Belastungsfall immer höher als im ersten und vierten Quartal; besonders ausgeprägt ist der Unterschied für Belastungsfall IV (Bild 7). Im gleichen Bild sind auch die gemittelte Fehlerrate aus Bild 5 und die mittlere Bodentemperatur eingetragen.

Der Anstieg der relativen Feuchte im zweiten und dritten Quartal korreliert gut mit der Kabelausfallrate. Aufgrund der beschriebenen Versuche, die induktiven Charakter besitzen, ist in den Sommermonaten (d. h. im 2. und 3. Quartal) mit erhöhten Ausfällen zu rechnen. Bemerkenswert ist auch, dass die Kurve «relative Feuchte in der Isolation» gegenüber der Kurve der Fehlerrate etwas nach links verschoben ist. Zwischen Wasserangebot und Ausfall der Kabel verstreicht noch etwas Zeit, was durch den Zeitbedarf des Wachstums erklärbar ist.

Eine tiefe Strombelastung (Fall I) ergibt höhere Feuchte im Kabel als eine hohe und umgekehrt (Fall IV). Daraus darf nicht etwa geschlossen werden, dass Kabel mit höherer Strombelastung als Folge kleinerer Feuchte später ausfallen. Bei tiefer Strombelastung begünstigt zwar eine hohe relative Feuchte in den Mikrohohlräumen das Wachstum der Wasserbäumchen (Fall I), andererseits ist die Temperatur aber tief, was das Wachstum wiederum verzögert. Welcher Einfluss stärker ist, ist nicht bekannt. Das Umgekehrte gilt für Fall IV (tiefe Feuchte, hohe Temperatur).

Jahreszeit	mittlere Bodentemperatur [°C]	Belastungsfall I			Belastungsfall II		
		Stromverhältnis (siehe Text)	Temperaturerhöhung Leiter [°C]	Leitertemperatur [°C]	Stromverhältnis (siehe Text)	Temperaturerhöhung Leiter [°C]	Leitertemperatur [°C]
1. Quartal	4,3	0,25	2,5	6,8	0,50	10,0	14,3
2. Quartal	9,0	0,20	1,6	10,6	0,41	6,6	15,6
3. Quartal	17,6	0,20	1,6	19,2	0,40	6,4	24,0
4. Quartal	6,1	0,25	2,5	8,6	0,49	9,8	15,9
Jahreszeit	**mittlere Bodentemperatur [°C]**	**Belastungsfall III**			**Belastungsfall IV**		
		Stromverhältnis (siehe Text)	Temperaturerhöhung Leiter [°C]	Leitertemperatur [°C]	Stromverhältnis (siehe Text)	Temperaturerhöhung Leiter [°C]	Leitertemperatur [°C]
1. Quartal	4,3	0,87	30,0	34,3	1,12	50,0	54,3
2. Quartal	9,0	0,70	19,8	28,8	0,91	33,0	42,0
3. Quartal	17,6	0,69	19,2	36,8	0,89	32,0	49,6
4. Quartal	6,1	0,86	29,4	35,5	1,11	49,0	55,1

Tabelle III Durchschnittliche Leitertemperaturen für vier verschiedene Belastungsfälle

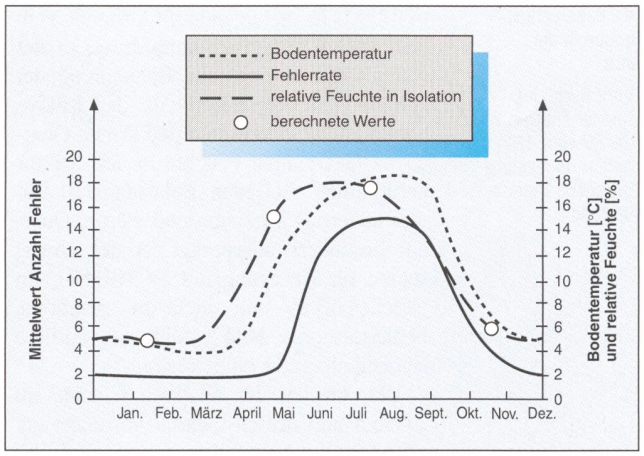


Bild 7 Kabelfehlerverteilung versus Bodentemperatur und relative Feuchte in der Isolation

Fehlerverteilung über vier Jahre gemittelt nach Bild 5 und Verlauf der mittleren Bodentemperatur sowie mittlere relative Feuchte in der Isolation für Belastungsfall IV.

Jahreszeit	T_b	p_b	I		II		III		IV	
			p_{iso}	f_{iso}	p_{iso}	f_{iso}	p_{iso}	f_{iso}	p_{iso}	f_{iso}
	[°C]	[kp/m²]	[kp/m²]	[%]	[kp/m²]	[%]	[kp/m²]	[%]	[kp/m²]	[%]
1. Quartal	4,3	84,7	100,7	84	166,3	51	551,6	15	553,0	5
2. Quartal	9,0	117,0	130,4	90	184,1	63	403,8	29	849,5	14
3. Quartal	17,6	205,3	227,0	90	304,3	67	633,0	32	215,0	17
4. Quartal	6,1	96,0	113,9	84	184,1	52	589,5	16	613,0	6

Tabelle IV Mittlere relative Feuchte in der Isolation in Abhängigkeit von der Belastung

T_b mittlere Bodentemperatur
p_b Sättigungsdampfdruck im Boden
p_{iso} Sättigungsdampfdruck in der Isolation
f_{iso} relative Feuchte in der Isolation
I–IV Belastungsfälle I–IV aus Tabelle III

MS-Kabel mit metallischer Wasserdampfbarriere leben (wahrscheinlich) länger

Vergleicht man den Mantel eines Mittelspannungskabels hinsichtlich Dampfdiffusionswiderstand mit einem bekannten Baustoff wie zum Beispiel Beton, so ergibt sich für eine rund 0,8 m dicke Betonwand etwa der gleiche Dampfdiffusionswiderstand wie für einen 2 mm dicken LDPE-Mantel. Fachleute würden aber die Betonwand kaum als Dampfbarriere bezeichnen. Man könnte in bezug auf den Mantel, im Vergleich zu vielen anderen durchlässigeren Baustoffen, höchstens von einer Dampfbremse reden.

Die Isolationsstoffe PE und EPR sind für die Diffusion etwas durchlässiger als ein Mantel aus PE (etwa Faktor 4). Wie erwähnt, wird für das Wachstum der Bäumchen nur wenig Wasser gebraucht (höchstens einige 10 ppm), so dass diese kleine Menge Wasser auch bei kleiner Partialdruckdifferenz durch den Mantel in die Isolation diffundiert. Diese Erkenntnis ist nicht neu, denn es werden praktisch alle polymerisolierten Kabel für Spannungen >50 kV mit einer metallischen Dampfsperre versehen. Wegen der gegenüber Mittelspannungskabeln erhöhten Feldstärke ist dies notwendig, um eine genügende Lebensdauer sicherstellen zu können.

Im vor kurzem im Bulletin SEV/VSE erschienenen Aufsatz «Vor-Ort-Diagnose von polymerisolierten Mittelspannungskabeln – Nachentladestrom-Messungen geben Auskunft über den Alterungszustand verlegter Kabel» [10] wird festgestellt: «Es ist jedoch noch nicht gelungen, die Wasserbäumchenbildung in polymerisolierten Kabeln ganz zu verhindern, es sei denn, das Eindringen von Wasser werde durch metallische Sperren verunmöglicht.» Aufgrund vieler Indizien kann man mit einer an Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit schliessen, dass Mittelspannungskabel mit einer metallischen Dampfbarriere eine wesentlich längere Lebensdauer aufweisen als solche ohne Barriere.

Literatur

[1] *W. Boone, E. F. Steennis, P. A. C. Bentvelzen* and *A. M. F. J. van de Laar:* Development and trial of EHV XLPE cables in The Netherlands. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension (Cigré), session Sept. 1984, Paper 21-02.

[2] *J. Sletbak* and *A. Botne:* A study of inception and growth of water trees and electrochemical trees in polyethylene and crosslinked polyethylene insulations. IEEE Trans, EI-12, No. 6, Dec. 1977, p. 383–388.

[3] *K. Speidel:* Wasserdampfdiffusion und -kondensation in der Baupraxis. Verlag Von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, 1980.

[4] *C. T. Meyer:* Water absorption during water treeing. IEEE Trans. EI-18, No. 1, Feb. 1983, p. 28–31.

[5] *E. Steennis:* Water treeing – the behaviour of water trees in extruded cable insulation. Thesis Delft. 1st ed., 1989.

[6] *A. C. Ashcraft:* Water Treeing in Polyethylene Dielectrics. World Electrotechnical Congress, Moscow, U.S.S.R., June 1977, Paper No. 3A-13, reprinted as Kabelisern, No. 152, «Treeing Update-Part», Union Carbide Corp. New York, July 1979.

[7] *H.-J. Fiss:* Betriebserfahrungen mit PE-Kabeln. Elektrizitätswirtschaft, 85(1986)18.

[8] Erzeugung und Abgabe elektrischer Energie in der Schweiz. Bull. SEV/VSE 86(1995)4, S. 70–71.

[9] W. *A. Jury, W. R. Gardner* und *W. H. Gardner:* Soil Physics (fifth Edition). Wiley, New York, 1991, p. 328.

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

Longévité accrue des câbles d'énergie avec pare-vapeur

L'influence de l'eau sur la durée de vie des câbles moyenne tension à gaine isolante polymère

La durée de vie des câbles à moyenne tension est notablement affectée par les arborescences d'eau qui se forment avec le temps. L'article analyse le rôle qu'y jouent les microcavités et la diffusion d'eau dans les câbles d'énergie. Il n'est généralement pas possible de fabriquer des câbles absolument exempts d'humidité et de microcavités (tab. I, fig. 1). Les forces d'adhérence entre les surfaces de ces cavités et les molécules d'eau engendrent normalement sur les surfaces des cavités la formation d'un film d'eau monomoléculaire voire polymoléculaire (fig. 2) qui devient souvent le point d'amorce d'arborescences d'eau.

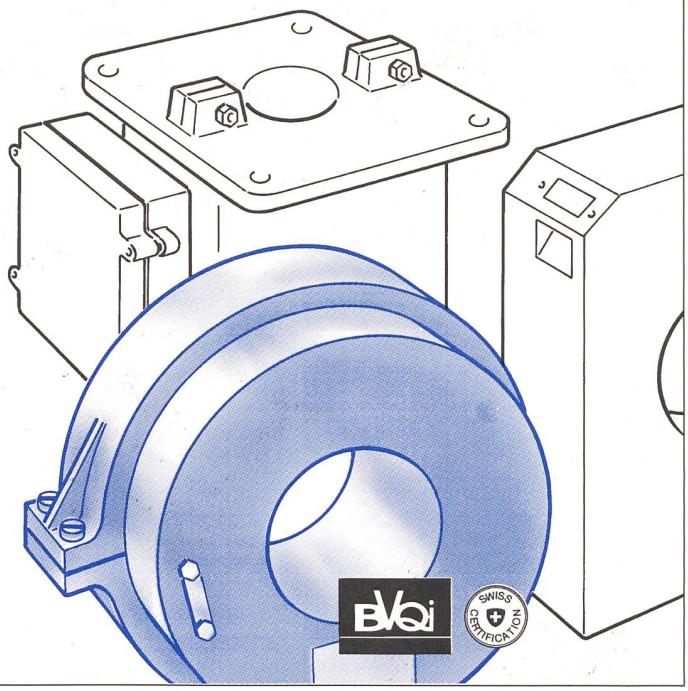
Avec un montage expérimental selon la figure 3 on a analysé la corrélation entre la croissance des arborescences d'eau et l'humidité atmosphérique. Les liens ainsi trouvés (tab. II et fig. 4) permettent de comprendre pourquoi la fréquence des défaillances de câbles est si fortement dépendante de la saison. On a constaté que la probabilité des défaillances de câbles ne dépend que de façon indirecte de la température de sol. Le phénomène se laisse plutôt expliquer par le fait que l'humidité relative (dépendante de la charge du câble et de la température de sol) dans l'isolation du câble détermine le vieillissement; en été il est plus élevé et il fait que les arborescences d'eau croissent plus vite dans les mois d'été qu'en hiver (fig. 5–7, tab. III et IV). La montée de l'humidité relative aux deuxième et troisième trimestres est en bonne corrélation avec le taux de défaillance des câbles. Ces indices permettent à l'auteur de conclure que les câbles à moyenne tension pourvus d'un pare-vapeur métallique ont une durée de vie notablement plus longue que ceux qui n'en sont pas équipés.

PFIFFNER

Kabelstromwandler
für isolierte Kabel

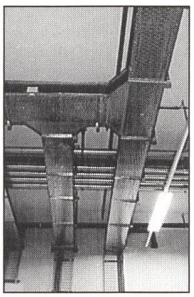
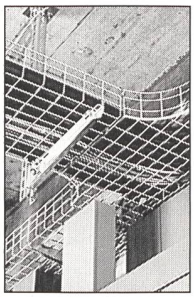
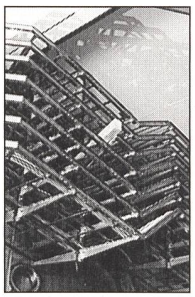
Ihr Vorteil, unsere Verpflichtung:

- beste Schweizer Qualität
- einfache Montage
- kompakte Bauweise
- kompetente Beratung
- spezifische Lösungen



PFIFFNER Messwandler AG
5042HIRSCHTHAL/SWITZERLAND
TEL ..41 62 739 28 28 FAX ..41 62 739 28 10

SUISSE ROMANDE: SOTERO SA
1114 Colombier, Tel. ..41 21 869 81 81

LANZ Kabelträgersystem
Multibahnen Kabelbahnen Gitterbahnen Kabelpritschen G-Kanäle Steigleitungen

Das gute und preisgünstige Schweizer Kabelträgersystem aus galv. verzinktem, feuerverzinktem oder rostfreiem Stahl und aus Polyester. Auch farbig.

- **Durchdachte Systemteile zur Lösung aller Kabelführungsprobleme. NEU: Multibahnen**
- **neue Verbindungstechnik für rasche Montage**
- **ohne Wartezeiten sofort lieferbar**

Beratung und Angebot von Ihrem Elektrogrossisten u.
lanz oensingen 062/388 21 21 Fax 062/388 24 24

Das LANZ Kabelträgersystem interessiert mich!
Bitte senden Sie Unterlagen über:

- ☐ LANZ Kabelträgersystem aus galv. Stahl
- ☐ idem, aus feuerverzinktem Stahl
- ☐ idem, aus rostfreiem Stahl
- ☐ LANZ Kabelträgersystem aus Polyester
- ☐ LANZ G-Kanäle
- ☐ LANZ Steigleitungen
- ☐ _____

☐ **Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!**
Name/Adresse/Tel.: _____

10

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen · Telefon 062 388 21 21

rotring
DAS CAE/CAD SYSTEMHAUS
KNOW-HOW UND POWER

DIE CAE/CAD-EXPERTEN
FÜR DIE ELEKTROTECHNIK

ELCAD und **AUCOPLAN** sind professionelle CAE/CAD-Lösungen für die
- Schalt- und Steuerungstechnik
- MSRE-Anlageplanung
- Gebäudeleittechnik

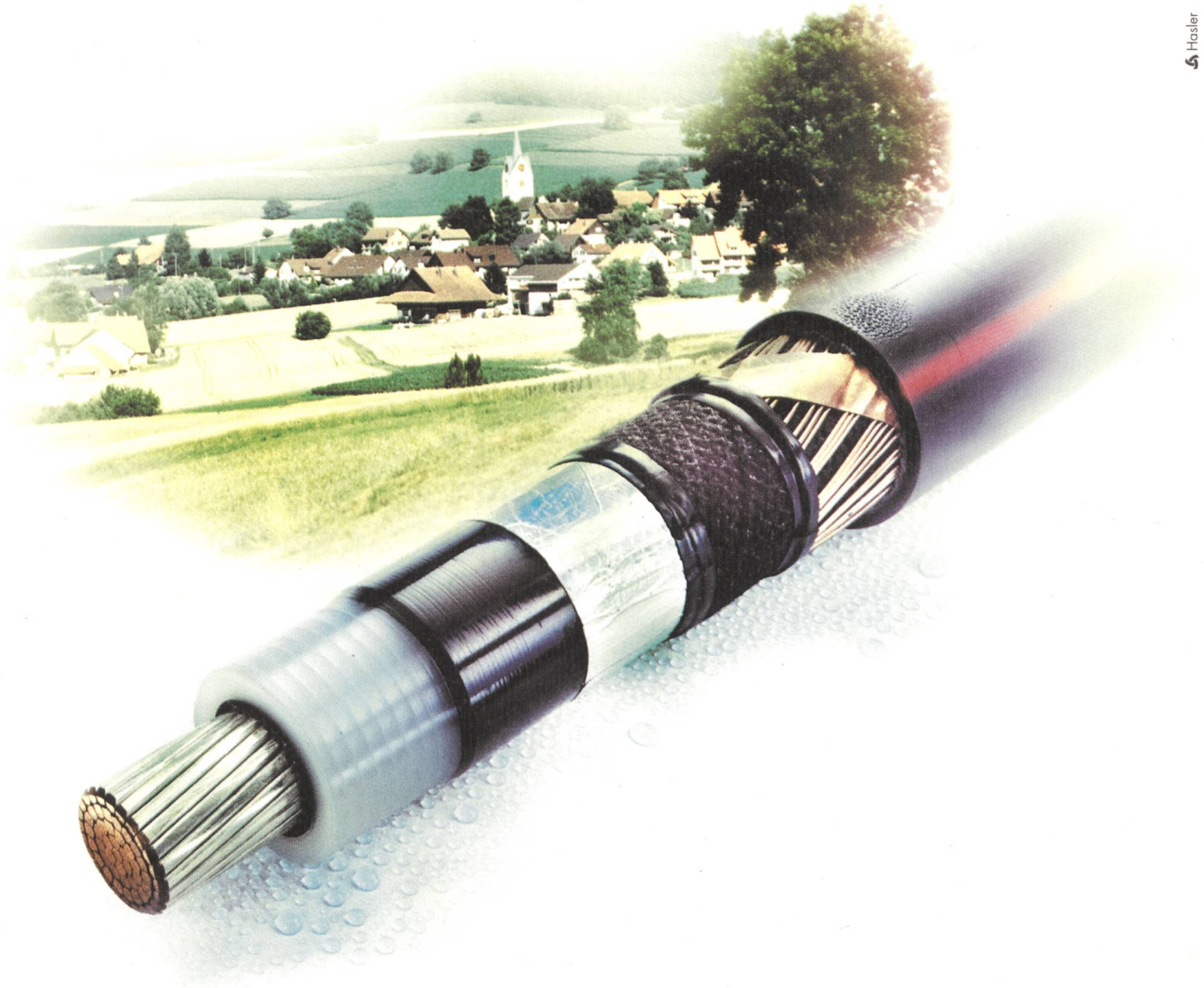
Unsere Systeme sind zukunftssicher und stehen europaweit über 6000 mal erfolgreich im Einsatz.

Kompetent und engagiert werden Sie von unseren Branchenspezialisten bei der optimalen Nutzung dieser Lösungen zusätzlich unterstützt.

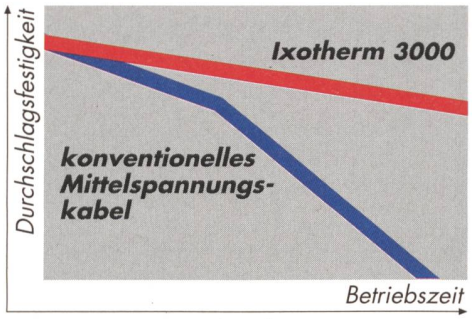
Zusammen mit dem Marktleader realisiert auch Ihr Team den entscheidenden Vorsprung!

Fordern Sie unsere Infobroschüre an!

rotring (Schweiz) AG
Riedstrasse 14
CH-8953 Dietikon
Tel. 01/740 20 21
Fax 01/742 10 52



ixotherm®
Mittelspannungskabel leben länger.



Mittelspannungskabel «Ixotherm 3000» von Dätwyler gehören qualitativ zum Besten, was der Markt heute zu bieten hat. Dass dem so ist, kommt nicht von ungefähr. Diese Überlegenheit basiert auf drei entscheidenden Merkmalen:

- *die hochgetrimmte XLPE-Isolation ist enorm spannungsfest und weist erhebliche Überspannungs- und Langzeitreserven auf.*
- *eine metallische Wasserdampfsperre schützt die Isolation vollständig vor Wasserbäumchen und eliminiert damit den «gefürchteten» Lebensdauerknick.*
- *Der Kupferschirm gibt keine Probleme bei der Kontaktierung. Zudem reicht sein normalisierter Querschnitt aus, um allen Beanspruchungen bei Kurz- und langdauerndem Erdschluss standzuhalten.*

Dätwyler

Dätwyler AG, Kabel + Systeme, Energietechnik
Gotthardstrasse 31, 6460 Altdorf, Telefon 044-4 11 22, Fax 044-4 18 40