

Hochspannungs- **XLPE** PERFORMANCE kabeltechnik

Björn Dellby, Gösta Bergman, Johan Karlstrand, Johannes Kaumanns

Die Liberalisierung der Strommärkte und das zunehmende Umweltbewusstsein schaffen interessante neue Märkte für Stromübertragungslösungen mit extrudierten Hochspannungskabeln. Gleichzeitig ermöglichen Verbesserungen in allen Bereichen einen immer breiteren Einsatz von Kabelsystemen bis 500 kV, die mit vernetztem Polyethylen (VPE/XLPE) isoliert sind. Heutige auf Kabelsystemen basierende Lösungen können mit Freileitungen konkurrieren. Seekabel mit integrierten Lichtwellenleitern und flexiblen Verbindungsmuffen werden dank neuer Fertigungsverfahren in größeren Teillängen geliefert als je zuvor. Nicht zuletzt trägt die Weiterentwicklung von extrudierten Isoliersystemen mit zum Erfolg der jüngsten ABB-Innovationen wie HVDC Light, Powerformer™, Dryformer™ und Windformer™ bei.



1 400-kV-VPE-Kabel mit 28 mm Isolierungsdicke

Hochspannungskabelsysteme für Nennspannungen von 220 kV und darüber bilden inzwischen das Rückgrat so mancher moderner Stromübertragung. Ihr Einsatz verpflichtet die Hersteller, in besonderem Maße zu sorgen, dass diese Kabelsysteme höchst zuverlässig arbeiten. Außerdem müssen die Kabel und ihre Garnituren wegen der hohen elektrischen Beanspruchungen auf solchen Spannungsebenen fachgerecht koordiniert sein.

Qualifikation von 400- und 500-kV-Kabelsystemen

Die IEC-Normen heben die Bedeutung von Zuverlässigkeit und Koordination der Kabel und Kabelgarnituren hervor, indem sie empfehlen, das Betriebsverhalten des *Gesamtsystems*, bestehend aus Kabel, Muffen und Endverschlüssen, nachzuweisen. Der IEC-Entwurf 62067 beschreibt ausführlich das umfangreiche Prüfprogramm einschließlich eines «Präqualifikationstests».

ABB qualifizierte sich im Jahr 1995 als Lieferant von Kabelsystemen für die 400-kV-Spannungsebene und führt derzeit eine Qualifikationsprüfung für 500-kV-Systeme durch.

Qualität, Werkstoffe und Fertigung

Die Werke, in denen ABB Hochspannungskabel und -garnituren produziert, sind nach ISO 9001 und 14001 zertifiziert. Wichtige Materialien beziehen sie nur von zertifizierten Lieferanten. Für die

zentralen Isolierstoffe von Höchstspannungskabeln gelten spezielle, in einem Qualitätssicherungsvertrag mit dem Lieferanten verankerte Qualitätssicherungsmaßnahmen. Sie werden grundsätzlich am Standort des Lieferanten durchgeführt und umfassen folgende Aufgaben:

- Auswahl des Ausgangsharzes auf der Grundlage einer Online-Sauberheitskontrolle
- Extrafeine Filtration des Ausgangsharzes
- Erweiterte Sauberheitskontrolle der Zwischenprodukte und der VPE-Verbindung
- Eine strenge Sauberheitsspezifikation, die Verunreinigungen von 50 µm aufwärts enthält
- Verbesserte Reinraum-Verfahren und ein spezielles Betriebshandbuch für Höchstspannung
- Spezielle Bedienschulung

Die Kabelfabrik ergänzt die lieferantenseitigen Materialmaßnahmen durch besondere Anstrengungen bei der Optimierung der Fertigungsprozesse und Verfahrensverbesserungen beim Transport der Werkstoffe.

Die VPE-Kabelader entsteht auf einer Fertigungslinie mit Trockenaushärtung. Ein Dreifach-Extruderquerkopf extrudiert das Isoliersystem des Kabels einschließlich der Leitschichten in einem Arbeitsgang. Diese Teilanlage ebenso wie die drei Extruder für das Isolier- und Leitmaterial stehen in einem Reinraum.

Neben der Sauberkeit sind während des Extrusionsvorganges weitere Kriterien zu beachten. Dazu gehören:

- Die Schnittstellen, um glatte Flächen und eine starke Haftung zwischen den Isolier- und Leitschichten sicherzustellen

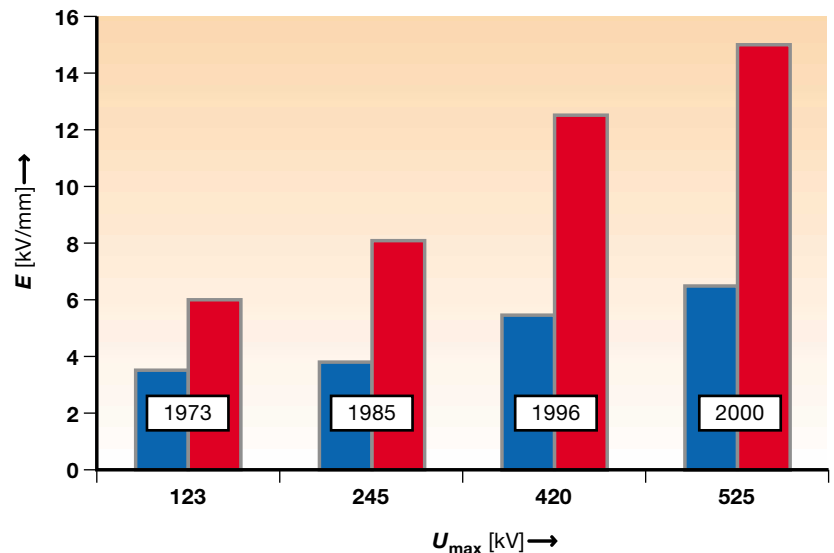
2 Auslegungsbeanspruchungen von VPE-Kabeln und Jahr der Einführung

Blau *Äußere Leitschicht*

Rot *Innere Leitschicht*

E *Elektrische Beanspruchung*

U_{max} *Spannung*



- Die Homogenität der Isolierung (möglichst geringe innere Spannungen)

ABB stützt sich in seinem kompromisslosen Bemühen um Zuverlässigkeit auf numerische Modelle zur Nachbildung der Fertigungsprozesse und der neuen Umgebungsbedingungen, in denen die Kabel zum Einsatz kommen. Die Modelle berücksichtigen so verschiedene Bereiche wie die nichtlineare Visko-Elastizität in der Statik fester Körper, die Diffusion großer Moleküle in teilkristallinen Polymeren und die nicht-newtonsche Strömungsmechanik.

Kabelaufbau

1 zeigt das zur Qualifikationsprüfung verwendete 400-kV-Kabel. Der Kupferleiter hat 1600 mm² Querschnitt. Er ist zur Reduzierung der durch den Skineneffekt verursachten Verluste in fünf

Segmente unterteilt. ABB verwendet für Querschnitte von mehr als 1000 mm² sogenannte «Milliken-Leiter», die aus Einzelleitern bestehen. Für Querschnitte unter 1000 mm² sind die Leiter sehr kompakt ausgeführt, um eine runder, glatte Oberfläche zu erhalten.

Der Metallschirm besteht aus Kupferdrähten, die mit Krepp-Papier gepolstert sind, um die mechanischen und thermischen Beanspruchungen durch die Isolierung zu verringern. Die Anzahl der Drähte und der Gesamtquerschnitt richten sich nach der Kurzschlussleistung des Netzes. Quellpulver in den Zwischenräumen zwischen den Schirmdrähten sorgt für die nötige Längswasserdichtigkeit.

Vor äußeren mechanischen Beanspruchungen und vor Korrosion schützt ein zäher extrudierter Schichtenmantel aus HDPE (Hochdruck-Polyethylen). Eine auf die Innenseite des Mantels aufgeklebte Aluminiumfolie

verhindert, dass Wasser in das Kabel diffundiert.

Aus diesem schlanken und leichten Kabelaufbau ergeben sich mehrere Vorteile. Wegen des geringeren Durchmessers passt mehr Kabel auf eine Trommel; zudem vermeidet der innere Aufbau hohe Wirbelstromverluste im Kabelmantel und optimiert die Strombelastbarkeit.

Der Außenmantel bietet folgende Optionen:

- Eine extrudierte Leitschicht für Messungen am Außenmantel
- Eine extrudierte, schwer entflammbare Schicht als zusätzliche Sicherheit in explosionsgefährdeten Umgebungen

Als weitere Option kommt ein Kabelaufbau zur räumlichen Temperaturüberwachung mit Lichtwellenleitern hinzu. Die Leiter liegen in einem in den Kabelschirm integrierten Edelstahlrohr,

das ungefähr die gleiche Dicke wie der Schirmdraht hat. Mit der Temperaturüberwachung lässt sich die Strombelastung des Kabels optimieren.

Dicke der Isolierung

Wie **2** zeigt, steigt die Auslegungsbeanspruchung von VPE-Hochspannungskabeln mit dem Spannungsbereich. Bereits vor zehn Jahren verließ ein fachgerecht hergestelltes VPE-Hochspannungskabel bei einer Leiterbeanspruchung von 50 kV/mm mehrere hundert störungsfreie Betriebsstunden [1]. Nur wenige Jahre später zeigte die Praxis, dass die Fachwelt vernünftigerweise mit einer Grenzspannung nur wenig unter 50 kV/mm **3** rechnen durfte, obwohl der Lebensdauerexponent n mit abnehmender elektrischer Beanspruchung steigt. Inzwischen gelangen

weitere Verbesserungen, z. B. bei der VPE-Hochspannungskabeltechnik, der Qualität der Werkstoffe, der Herstellung und dem Handling.

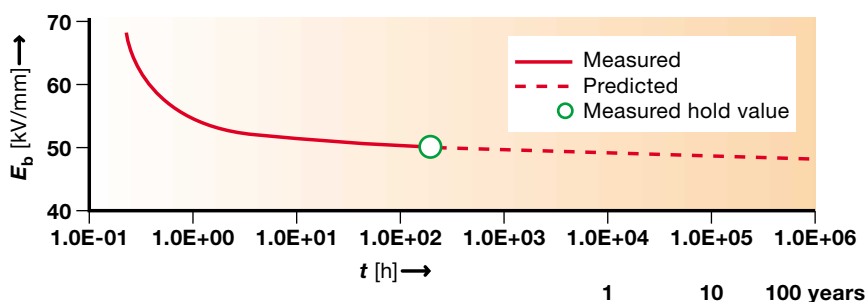
Diese Erfahrungen sowie Prüfungen an VPE-Kabeln bei ABB haben gezeigt, dass Prüfbeanspruchungen von mindestens 40 kV/mm zur Routine werden können. Höhere Beanspruchungen verbessern möglicherweise die Effektivität der Prüfung, haben aber nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Lebensdauer. Daraus lässt sich schließen, dass die Auslegungsbeanspruchung bei VPE-Höchstspannungskabeln in nächster Zukunft 15 kV/mm überschreiten könnte.

Kabelgarnituren

In den frühen neunziger Jahren entwickelte ABB für Höchstspannungskabel eine vorkonfektionierte Muffe, die vollkommen trocken ist, d.h. weder gasförmige noch flüssige Stoffe enthält und keinerlei Wartung bedarf. Daher lassen sich die wichtigsten elektrischen Teile in der Fabrik überprüfen. Dies beschleunigt die Montage vor Ort und reduziert die damit verbundenen Risiken **4**.

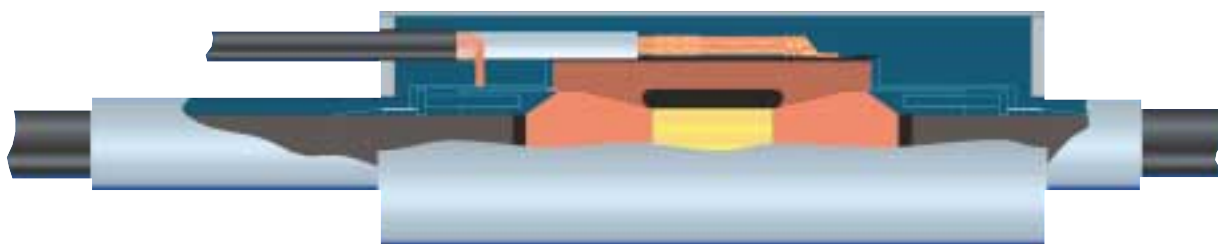
Die Muffe besteht aus einem Isolierkörper aus Epoxidharz mit integrierter feldsteuernder Elektrode. Als «Hochspannungs-Abdichtung» zwischen Kabel und Muffenkörper dienen Gummi-Wickelkeulen mit einem Deflektor zur integrierten Feldsteuerung. Die Wickelkeulen werden durch Metallfedern mechanisch vorgespannt, um die homogene Druckverteilung ungeachtet der

3 Lebensdauerkurve für VPE-Kabel von ABB; Durchschlagbeanspruchung (E) über der Zeit (t)

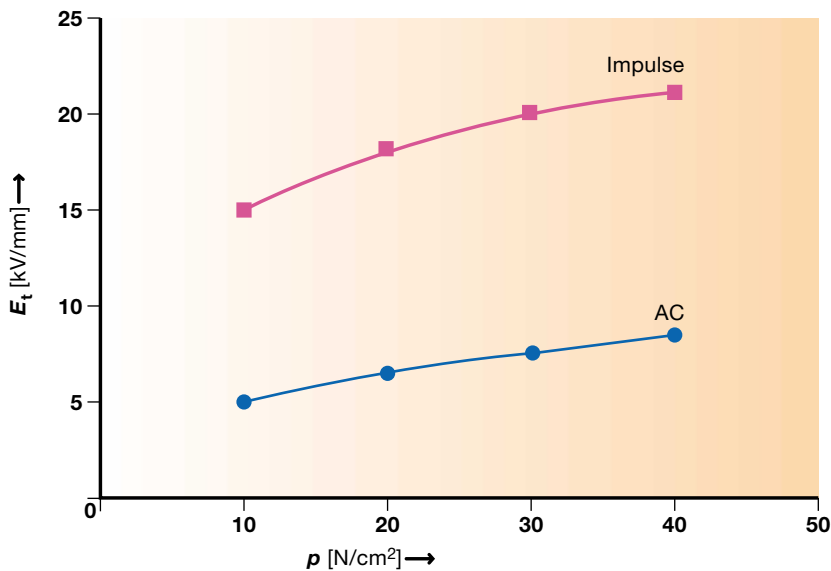


4 Von ABB entwickelte vorkonfektionierte Höchstspannungskabelmuffe.

Sie enthält weder gasförmige noch flüssige Stoffe und ist wartungsfrei.



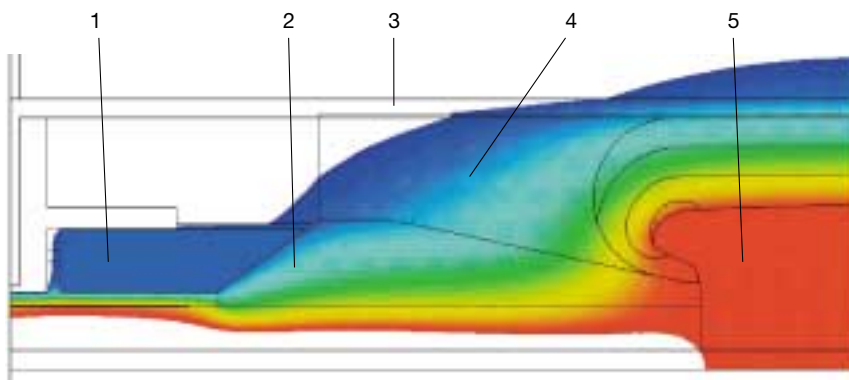
5 Tangentiale Durchschlagfestigkeit (E_t) der Gummi-Epoxidharz-Grenzfläche, abhängig vom Grenzflächendruck (p)



6 Temperaturverteilung in der Kabelmuffe in Luft, berechnet mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode

T_{amb} 25°C; Kabeltemperatur 95°C; rot 65°C; blau 40°C

- 1 Druckeinrichtung
- 2 Gummi-Wickelkeule
- 3 Muffengehäuse
- 4 Muffenkörper
- 5 Mittelelektrode



Wärmeausdehnung des Kabels oder der Wickelkeulen an allen elektrischen Schnittstellen sicherzustellen. Das einwandfreie Betriebsverhalten der Muffe wurde von ABB-Forschern mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode rechnerisch nachgewiesen. Die elektrischen Schnittstellen erfordern einen bestimmten Druck, damit sie den hohen elektrischen Beanspruchungen standhalten **5**.

Um Regeln für die zuverlässige elektrische Auslegung der elektrischen Schnittstellen zu entwickeln, wurde zu ihrer Untersuchung eine Prüf-anordnung errichtet, die ein fast reines elektrisches Tangentialfeld erzeugen kann. Zudem gab es Untersuchungen zur Ermittlung der Temperaturverteilung im Muffenkörper **6**. Die Muffe hat auch einen integrierten kapazitiven Teilentladungsfühler, der nach der Montage Teilentladungen (TE) misst und überwacht.

Zum Muffenkörper gehört eine integrierte Mantelisolierung, damit er den Anforderungen der CIGRE-Empfehlung in Electra 128 genügt. Sie verlangt, dass er Stoßspannungen von 125 kV zwischen den zwei Muffenteilen und von 63 kV gegen Erde standhalten muss. Dadurch lässt sich der Kabelschirm auskreuzen, was die im Schirm induzierten Ströme und die Verluste im Drehstrom-Kabelsystem verringert.

Das komplette Kabelsystem mit Muffe, Freiluft-Endverschlüssen und GIS-Endverschlüssen hat die Anforderungen der Qualifikationsprüfung in jeder Beziehung erfüllt.

Prüfung von 400- und 500-kV-Kabeln

Beim Entwurf von Mittelspannungskabeln denken die Planer gewöhnlich in *Komponenten*. Selbst Ausrüstungsteile von verschiedenen Lieferanten lassen sich zusammen einsetzen, und das System als Ganzes funktioniert. Dies ist der Grund, warum

IEC 60502 in den Bauanforderungen Grenzwerte für die elektrischen Beanspruchungen angibt.

Demgegenüber werden Hoch- und Höchstspannungskabel sowie -garnituren als *Systeme* entworfen. Für diese Spannungspegel gibt es keine Bauvorschriften, sondern lediglich die Prüfvorschriften in IEC 60840 und im IEC-Entwurf 62067.

Qualifikation gemäß IEC-Entwurf 62067

Die Qualifikation von Hoch- und Höchstspannungskabelsystemen umfasst die normale Typprüfung und eine Präqualifikationsprüfung. Letztere hat zum Ziel, das Kabelsystem realistisch zu beanspruchen, indem es nicht nur der Spannungsbeanspruchung, sondern auch der im Betrieb auftretenden thermomechanischen Beanspruchung unterworfen wird. Die Prüfung dauert, um einen Alterungseffekt zu erzielen, ein Jahr statt der 20 Tage bei normalen Typprüfungen. Die thermomechanische Beanspruchung wird mit Vollast-Spielen und einem längeren Kabel als bei Typprüfungen üblich simuliert. Außerdem wird das Kabel in wirklichkeitsnaher Weise verlegt.

Das gesamte Kabelsystem aus 100 m Kabel einschließlich aller Garnituren steht ein Jahr lang unter dem 1,7-fachen der Spannung U_0 ¹⁾. Mindestens 180 Lastspiele mit Temperaturen zwischen 90 und 95 °C und Umgebungstemperatur beanspruchen es in diesem Zeitraum. Abschließend müssen Kabelproben einer Blitzstoßspannungsprüfung standhalten.

¹⁾ U_0 = Nennspannung (Effektivwert) zwischen Leiter und Schirm.



7 Erstes europäisches VPE-Kabelsystem für 400 kV, installiert in Altbach in Deutschland

Stückprüfung und Prüfung am Einsatzort

Anders als Typ- und Präqualifikationsprüfungen geschehen Stückprüfungen und Prüfungen am Einsatzort an Teilen, die nach der Prüfung in Betrieb gehen. Daher müssen die Prüfbeanspruchungen so gewählt werden, dass sie die Teile nicht beschädigen. Der IEC-Entwurf 62067 spricht von einem möglichen Schwellenwert von 30 kV/mm, schlägt jedoch einen längeren Prüfzeitraum vor, um die niedrigere Prüfspannung zu kompensieren. Die Mindestprüfspannung für die Stückprüfung beträgt $1,5 U_0$, die maximale Prüfzeit 10 h. Bei Isoliersystemen, für die Schwellen-Grenzwerte kein Problem darstellen, kann der Lieferant die Prüfspannung erhöhen und die Prüfzeit auf 30 min verkürzen.

Der IEC-Entwurf 62067 empfiehlt, nach der

Montage der Kabel und Garnituren den Kabelmantel einer Gleichspannungs- und/oder die Hauptisolierung einer Wechsellspannungsprüfung zu unterziehen. Soll nur die Mantelprüfung durchgeführt werden, so können die qualitätssichernden Maßnahmen während der Montage der Garnituren die Isolationsprüfung ersetzen.

Während der Wechsellspannungsprüfung lassen sich TE-Messungen vornehmen. Weil das Werk jedoch stückgeprüfte Kabel anliefert, genügt es, solche Messungen auf die am Einsatzort montierten Garnituren zu beschränken. Die an modernen Kabelgarnituren angebrachten Sensoren gestatten TE-Messungen mit der erforderlichen Empfindlichkeit. Die Sensoren können in Verbindung mit einem Überwachungssystem weitere Informationen über das Verhalten der Kabelgarnituren im Betrieb liefern. Dabei sendet jeder Sensor sein Signal über einen Lichtwellen-



8 400-kV-Kabelsystem in einem 6,3 km langen Tunnel im Zentrum von Berlin

leiter und ein spezielles Koppelgerät zu Anzeige- und Diagnosezwecken weiter an ein Verarbeitungsgerät.

Ein solches Überwachungssystem wird derzeit in Deutschland in einem 400-kV-VPE-Kabelsystem installiert.

VPE-Kabelprojekte für 400 und 500 kV

In Europa erhielt ABB den ersten kommerziellen Auftrag zur Lieferung und Installation eines 400-kV-VPE-Kabelsystems im Jahr 1993 vom deutschen Elektrizitätsversorgungsunternehmen Neckarwerke. Das Kabel sollte den Netztransformator mit der gasisolierten Schaltanlage eines neuen Blocks im Wärmekraftwerk Altbach/Deidzau verbinden. Das Kabel ist längs- sowie radialwasserdicht. Es besteht aus einem Aluminiumleiter mit 800 mm² Querschnitt, einem Kupferschirm mit 150 mm² Querschnitt und einem Schichtenmantel aus Aluminiumfolie. Im Transformatorfeld kamen Freiluft-Endverschlüsse, für den Anschluss an die Schaltanlage GIS-Endverschlüsse zum Einsatz. Der 380 m lange Kabelkreis liegt in einem Kanal mit separaten Pritschen für jedes Einzelkabel. Im August 1996 ging das Kabel in Betrieb **7**.

Im gleichen Jahr (1996) erhielt ABB auch vom

Berliner Versorgungsunternehmen Bewag den Auftrag, ein VPE-Kabelsystem für 400 kV zu liefern und in einem 6,3 km langen unterirdischen Tunnel im Zentrum Berlins zu verlegen. Der belüftete Tunnel verläuft in einer Tiefe von 25 bis 35 m unter der Erde und hat einen Durchmesser von 3 m **8**. Das Kabelsystem mit einem Segmentkuperleiter von 1600 mm² Querschnitt hat eine Übertragungsleistung von 1100 MVA und ist Teil einer diagonalen Übertragungsverbindung zwischen den Übertragungsnetzen westlich und östlich der Hauptstadt.

Bei dem Berliner Kabelsystem ruhen die drei Phasen senkrecht übereinander auf speziell entwickelten Kabelträgern, die jeweils 7,2 m Abstand zueinander haben. Zur Kurzschlussfestigkeit ist in der Mitte jedes Spannungsfeldes ein Abstandhalter vorgesehen. Die Kabelstrecke besteht aus neun ungefähr 730 m langen Abschnitten. Neue ABB-Muffen verbinden die Teilstücke miteinander, und GIS-Endverschlüsse binden das Kabelsystem an die beiden Unterstationen an. Das verlegte Kabel besteht aus drei ausgekreuzten Hauptabschnitten und drei kleineren Abschnitten innerhalb jedes Hauptabschnittes.

Während der Inbetriebnahme des Kabelsystems wurden an allen Garnituren Prüfungen mit

einer Wechselspannung von 400 kV (1,73 U₀) und Teilentladungsmessungen durchgeführt. Das Kabelsystem ging im Dezember 1998 in Betrieb.

Die Bewag bestellte Ende 1998 ein zweites VPE-Kabelsystem für 400 kV, dieses Mal mit einer Länge von 5,4 km und ebenfalls zur Verlegung in einem unterirdischen Tunnel bestimmt. Dieses System, das dem Kunden im Juli 2000 übergeben wurde, vervollständigt die diagonale Verbindung zwischen den Übertragungsnetzen westlich und östlich von Berlin.

Im Mai 1999 erhielt ABB die erste Bestellung über ein VPE-Kabel für 500 kV. Der Auftrag umfasst zwei Kabelkreise von fast 400 m Länge. In einem Wasserkraftwerk in China sollen die Kabel die Transformatoren in der Kraftwerks-Kaverne mit der oberirdisch errichteten gasisolierten Schaltanlage verbinden. Sie verlaufen deshalb auf einer Länge von ungefähr 150 m in einem senkrechten Schacht. Die Kabelsysteme sollen sofort nach Abschluss der Präqualifikationsprüfungen ausgeliefert werden. Die Montage ist für 2001 geplant.

Neue Seekabelprojekte

Im Jahr 1998 erhielt ABB den Zuschlag für das Channel Islands Electricity Grid-Projekt, das die Stromversorgung von Frankreich zur Kanalinsel Jersey verstärken und erstmals Guernsey an das

europäische Verbundnetz anbinden soll. Der Unterwasserteil dieses Projektes ist seit Juli 2000 abgeschlossen.

Für dieses Projekt lieferte ABB folgende Hauptkomponenten:

- Seekabel zwischen Frankreich und Jersey sowie zwischen Jersey und Guernsey (ca. 70 km)
- Erdkabel auf Jersey und Guernsey
- GIS-Unterstationen
- Neue Transformatoren und Drosselspulen

Die Systemspannung beträgt 90 kV. Obwohl die Projektausschreibung ursprünglich flüssigkeitsgekühlte Seekabel vorsah, wurden schließlich VPE-Kabel als technisch bessere und umweltverträglichere Alternative gewählt.

Die zwei Seekabel gleichen sich in ihrem Grundaufbau, d.h. sie bestehen aus drei Adern mit separatem Bleimantel und dreifach extrudierter VPE-Isolierung. Jedes Kabel enthält ein LWL-Kabel mit 24 Leitern für die Systemkommunikation und für unmittelbare Fernauslösung. Die Kabel haben eine doppelte Drahtbewehrung: innen eine flexible Bewehrung und außen eine sogenannte «Felsbewehrung» zum Schutz vor etwaigen Beschädigungen durch Gezeitenströme und Fischfang.

Der Durchmesser der in Luft rund 85 kg/m wiegenden Kabel beträgt ca. 250 mm.

Das Werk hat beide Kabel in voller Länge ausgeliefert, sodass sämtliche Verbindungsarbeiten vor Ort entfielen. Dies gelang durch eine neue, senkrecht montierte Verseilmaschine, die Kabel in jeder gewünschten Länge herstellen kann.

Zu dem Projekt gehörte auch die Lieferung separater bewehrter LWL-Kabel und deren Verlegung parallel zu den Starkstromkabeln.

Wegen der Gefahren durch die Fischerei wurden die Kabel zwischen Jersey und Guernsey und

die Lichtwellenleiterkabel zwischen Jersey und Frankreich als zusätzliche Schutzmaßnahme in den Meeresboden eingespült.

Ein weiteres neues Seekabelprojekt, für das ABB kürzlich den Auftrag erhielt, ist das Ma Wan- und Kap Shui Mun-Kabel, das einen Kanal in Hongkong durchquert. Um den starken Schiffsverkehr in diesem Kanal nicht während der Verlegearbeiten zu stören, beschlossen die Verantwortlichen, auf eine konventionelle Installation der 132- und 11-kV-Systeme zu verzichten. Sie lösen das Problem, indem sie unter dem Meeresboden Kanäle bohren lassen, durch die dann die Kabel gezogen werden. Dieses Verfahren hat den zusätzlichen Vorteil, dass es spätere Aufrüstungen problemlos ermöglicht.

Die Pläne sehen zur Überwachung des Betriebs der Kabelverbindung, die bis zum Frühjahr 2002 fertig sein wird, den Einbau separater Steuer- und Regelsysteme vor.

Neue Kabel ermöglichen neueste ABB-Innovationen

Mehrere Innovationen von ABB im Bereich der Stromübertragung und -verteilung setzen auf moderne Hochspannungs-Kabeltechnik. Dazu gehören beispielsweise das HVDC Light-Konzept, das 1997 auf den Markt kam, der 1998 eingeführte Hochspannungsgenerator Powerformer™, ein 1999 als Dryformer™ auf den Markt gebrachter ölfreier Leistungstransformator und der Windformer™. Das ist ein neuer Windturbinengenerator, der im Offshore- und Küstenbereich Elektrizität erzeugen und in das öffentliche Netz einspeisen soll.

Die drei «Former»

Powerformer™ [2], Dryformer™ [3] und Windformer™ [4] verdanken ihre Markterfolge teilweise der Tatsache, dass die VPE-Isolierung ihrer Leiter

zwar reduziert wurde, aber ohne Einschränkung der erforderlichen hohen Spannungspegel. Ferner kann durch die Erdung und den Schutz der Kabel innerhalb der Maschine auf Schirm und Außenmantel verzichtet werden. Das Ergebnis: ein schlankeres Kabel, das eine entsprechend kleinere Maschine zur Folge hat.

Die Entwickler der für diese Innovationen vorgesehenen Kabel berücksichtigten verschiedene Anforderungen: Z. B. solche, die sich ergeben, wenn Strom in einem verlustarmen Leiter fließt, der für den Einsatz in einem externen Magnetfeld bestimmt ist. Andere Entwurfskriterien waren die hohen Spannungen und das Ziel, einen vollkommen kreisrunden und kompakten Aufbau zu erreichen.

HVDC Light

Hochspannungs-Gleichstrom (HG)-Kabel dienen zur Übertragung großer Leistungen über lange Strecken, hauptsächlich unter Wasser. Die Kabeltechnik beruht auf Papierisoliertechniken, die mit Öl hoher Viskosität getränkt sind. Diese Kabel bieten zwar viele technische Vorzüge, aber ihre Fertigung ist zeitaufwendig und das Endprodukt mechanisch empfindlich. Daher hat die Kabelindustrie lange Zeit nach einem Kabel gesucht, wie es in Wechselstromsystemen zum Einsatz kommt.

Die Schwierigkeiten bei der Entwicklung solcher Kabel ergeben sich im wesentlichen aus den Raumladungsbewegungen im Werkstoff. Das starke Gleichstromfeld zwingt die Raumladungen, sich zu bewegen und zu sammeln. Die Konzentration erhöht die Beanspruchung und führt letztlich zum Isolationsdurchbruch. Um diese Effekte zu beherrschen, muss ein Werkstoff neben guten Raumladungsqualitäten hohe mechanische Widerstandsfähigkeit und eine hohe elektrische Durchschlagfestigkeit aufweisen.

Daneben wurden auch neue Arten von Gleichstrom-Garnituren entwickelt. Die Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich hauptsächlich auf die Lösung der Hochspannungs-Schnittstellenprobleme zwischen den Werkstoffen. Das Ergebnis waren aus Band gepresste Muffen sowie vorkonfektionierte, auf die Übertragung mit extrudierten Gleichstromkabeln abgestimmte Muffen. Zu den Neuentwicklungen gehören auch vorkonfektionierte polymere Endverschlüsse mit Widerstandsregelung des Gleichspannungsfeldes.

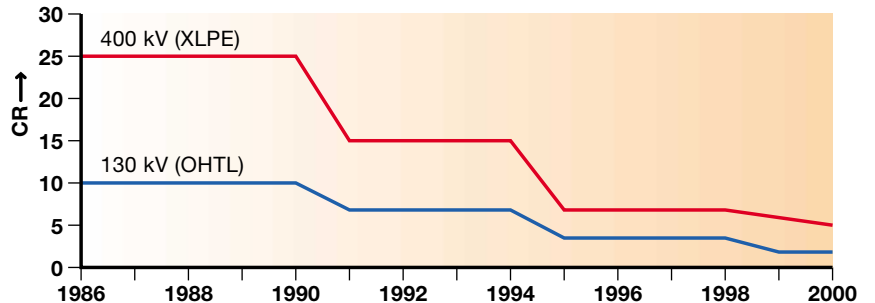
Mit HVDC Light [5] hat ABB ein extrudiertes Kabelsystem auf den Markt gebracht, das mit neuen Transistor-Umrichtern arbeitet und die HG-Übertragung selbst bei kleinen Nennleistungen konkurrenzfähig macht. Beim ersten kommerziellen System dieser Art beträgt die Nennleistung 50 MW. Es leitet auf der schwedischen Insel Gotland elektrische Energie von einer Windkraftanlage zur Stadt Visby [6]. Das jüngste Projekt, eine 80-kV-Direktverbindung für 180 MVA Nennleistung, überträgt elektrische Energie zwischen den Staaten New South Wales und Queensland in Australien.

Während die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung mit HVDC Light auch bei Verbindungen niedrigerer Nennleistung wirtschaftlich arbeitet, eignen sich extrudierte Kabelsysteme natürlich auch für höhere Beanspruchungen. ABB bietet zurzeit für HVDC Light Kabelsysteme mit Nennspannungen bis 150 kV an.

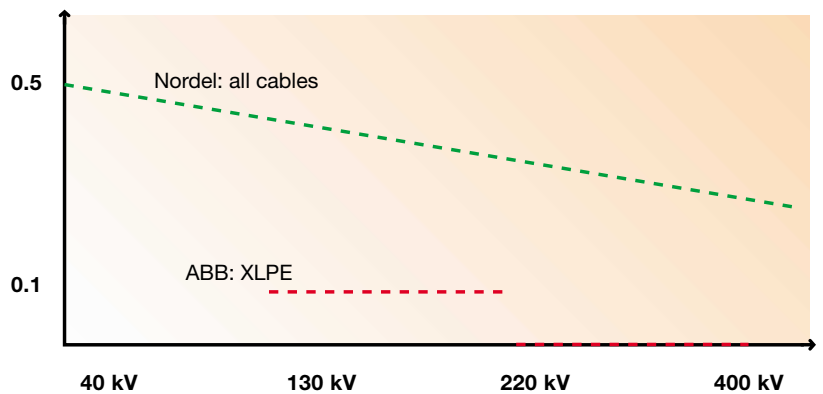
Für HVDC Light zeichnen sich folgende Einsatzmöglichkeiten ab:

- Speisung von Einzelverbrauchern
- Asynchroner Netzanschluss
- Übertragung der Leistung kleiner Stromerzeugungseinheiten (z.B. Windkraftanlagen)
- Gleichstromnetze

9 Vergleich des Kostenverhältnisses für VPE-Kabelsysteme (XLPE) und Übertragungs-Freileitungen (OHTL)



10 Die Ausfallrate ist bei installierten Kabeln stetig gesunken



- HG-Anlagen in großen Meerestiefen, die von den Netzen weit entfernt liegen

Die Liberalisierung schafft neue Regeln

Die Liberalisierung der Strommärkte hat bereits die Regeln geändert, nach denen die Versorgungsunternehmen die Elektrizität erzeugen, übertragen und verteilen. Gleiches gilt auch für deren Ausrüster. Heute steht der Kunde mehr denn je im Mittelpunkt. Der Markt muss stärker auf die öffentliche Meinung Rücksicht nehmen, und die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass die Öffentlichkeit auch eine weniger ins Auge fallende Infrastruktur für die Stromübertragung und -verteilung fordert.

Die neuen Marktbedingungen zwingen alle

Akteure, ihre Kosten zu senken und gleichzeitig eine höhere Zuverlässigkeit der Übertragungs- und Verteilsysteme zu gewährleisten.

Nach Lage der Dinge ist davon auszugehen, dass die Unternehmen neue Kabelverbindungen bauen und betriebliche Sicherheitsspielräume besser berücksichtigen werden, um ihre Netze technisch und wirtschaftlich zu optimieren. »Intelligenter« Netze dürften entstehen, möglicherweise in Kooperation mit den Betreibern faseroptischer Netzwerke.

Auch die Stromversorgungsunternehmen werden Tätigkeiten, die nicht zum Kerngeschäft gehören, an Fremdfirmen vergeben und sich mehr auf den Stromhandel konzentrieren statt auf Fragen der Technik oder der Verwaltung. Ihren künftigen Neukunden dürften

elektrische Systemlösungen und schlüsselfertige Lieferungen interessanter erscheinen.

In diesem neuen, von starkem Wettbewerb geprägten Umfeld werden extrudierte Kabelsysteme eine wichtige Rolle übernehmen, besonders wenn es darum geht, Freileitungen durch Erdkabel zu ersetzen.

Die Kosten von VPE-Kabelsystemen sind in den letzten zehn Jahren gesunken und werden wahrscheinlich noch weiter fallen. Parallel zum Kostenrückgang stieg ihre Leistungsfähigkeit enorm an. Die neue Botschaft lautet deshalb: VPE-Kabelsysteme können in Bezug auf Technik, Umweltfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit mit Freileitungen konkurrieren. Dies gilt besonders für den Spannungsbereich von 12 bis 170 kV **9**.

Extrudierte Isolierung – Betriebsverhalten und Verbesserungen

Die Ausfallrate ist bei den installierten VPE-Kabeln im Laufe der Jahre weiter gesunken. **10** stellt die Daten von Nordel, einer Gesellschaft zum Austausch von Informationen zwischen den Mitgliedern des nordischen Strommarktes, denen von ABB gegenüber. Die Nordel-Statistik enthält alle Kabel-Nennleistungen, während sich die ABB-Daten nur auf VPE-Kabel über 100 kV beziehen.

Der deutliche Trend hin zu geringerer Dicke der Isolierung wird sich fortsetzen und die Kabel verschlanken **11**. Solche Kabel bieten zahlreiche Vorteile, wie z.B. größere Lieferlängen, weniger Verbindungsmuffen, leichtere Montage sowie geringere Wärmeausdehnung bzw. -schrumpfung der Isolierstoffe.

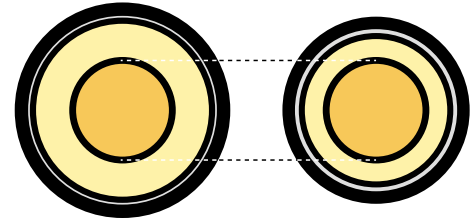
Die während der Entwicklung von VPE-Kabelsystemen für Höchstspannung gesammelten Erfahrungen, die bei den Werkstoffen und Prozessen erzielten Verbesserungen und die ausgezeichneten Betriebsergebnisse mit VPE deuten darauf hin,

dass sich die Dicke der VPE-Isolierung bei 132-kV-Kabelsystemen in nächster Zukunft sehr wahrscheinlich auf 12 bis 10 mm reduzieren lässt. Dadurch werden VPE-Kabelsysteme in Vergleichen mit Freileitungen wesentlich besser abschneiden als bisher, denn für Systeme von 50 bis 170 kV ist ein Kostenverhältnis von 1:1 erzielbar. Für Spannungen zwischen 50 und 245 kV lässt sich bei den Lebensdauerkosten ein Verhältnis zwischen 1:1 und 1:1,5 erreichen.

Erdkabel oder Freileitungen?

Natürlich gibt es viele Parameter in den Bereichen Betrieb, Sicherheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit, durch die sich VPE-Kabelsysteme von Freileitungen deutlich unterscheiden. Bei der neuen Klasse von VPE-Kabelsystemen für die Stromverteilung (d.h. 50–170 kV) fallen besonders das verbesserte Kostenverhältnis und Umwelt- sowie Zuverlässigkeitsvorteile ins Gewicht. Wegen ihres größeren Querschnittes weisen Kabel gewöhnlich geringere Verluste pro MVA auf als vergleichbare Freileitungen. Die *Tabelle* gibt einen Überblick über die Vorteile von VPE-Kabelsystemen.

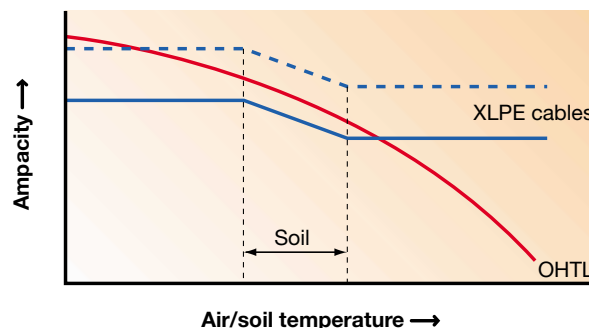
11 Standard-VPE-Kabel (links) und die neue Generation schlanker VPE-Kabel



Die großen, besonders von Elektroheizungen geprägten Lasten im Winter bestimmen wesentlich die Nennleistung von Freileitungen. Sie transportieren an heißen Sommertagen rund 50% weniger Leistung als im Winter. Das macht Freileitungen, wenn künftig die Belastungskurven mehr geglättet werden, weniger interessant. Statt dessen bieten sich in Versorgungsgebieten mit vielen Klimageräten VPE-Erdkabel aufgrund ihrer Vorzüge eindeutig als erste Wahl an **12**.

Wegen der hohen thermisch wirksamen Masse des umgebenden Erdreichs weisen erdverlegte Übertragungsleitungen während Belastungsdauern unter 60–90 min eine höhere Überlastbarkeit auf.

Darüber hinaus sprechen noch weitere Faktoren für eine Verlegung von VPE-Kabelsystemen für Hochspannung:



12 Bemessung von Übertragungs-Freileitung (OHTL) und erdverlegtem VPE-Kabel im Vergleich. Die gestrichelte Linie zeigt, dass unter Berücksichtigung der täglichen Belastungskurve höhere Leistungen übertragbar sind.

Tabelle: Vorteile unterirdisch verlegter Übertragungsleitungen

Umwelt	Netzicherheit	Wirtschaftlichkeit	Betrieb
Keine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes	Keine Beeinträchtigung durch Wind, Schnee, Eis, Nebel usw.	Geringerer Wartungsbedarf	Höhere Verfügbarkeit, weniger Fehler
Niedrige bzw. keine elektromagnetischen Felder	Es kann nichts gestohlen werden	Minimaler Investitionsbedarf für See-/Flussüberquerungen	Gewöhnlich niedrigere Verluste pro übertragene Leistung
Hoher Schutz des Personals, geringe Gefahr von Überschlägen in Luft		Minimaler Landverbrauch	Höhere Kurzzeit-Überlastbarkeit
Bessere Arbeitsbedingungen		Wert von Land und Gebäuden wird nicht gemindert	

- Auch die Kabelverleger haben ihre Betriebe neu organisiert und Kosten gesenkt
- Infrastrukturprogramme für Breitband-LWL-Lösungen laufen bereits heute
- Es ist ein übliches und bewährtes Verfahren, Lichtwellenleiter neben Starkstromkabeln zu verlegen

Die Infrastruktur von morgen – heute schon Realität

Die Hersteller liefern extrudierte Kabelsysteme als Gesamtlösungen und begleiten sie von ihrer Entstehung bis zur Entsorgung. Sie bieten sowohl in wirtschaftlicher als auch in technischer Hinsicht schlüsselfertige Lösungen an. So könnte beispielsweise der Austausch einer Freileitung gegen ein Kabelsystem in folgenden Stufen ablaufen: in der ersten Stufe Beantragung der Genehmigung, in der zweiten Demontage der Freileitung, in der

dritten Lieferung und Verlegung des Kabelsystems und in der letzten umweltgerechte Entsorgung der alten Ausrüstung.

Komplette Kabelsystemlösungen können als intelligente Kombinationen aus Überwachungseinrichtungen, Stromrichtern, Lastverteilergeräten, Reihen- und/oder Parallelkompensations-Einrichtungen betrachtet werden. Auch die Finanzierung ist organisierbar. Hier ließen sich durch einen Leasingvertrag und eine neue Art von Verfügbarkeitsgarantie mehrere kommerzielle Unsicherheiten ausräumen.

Der kurze Ausblick auf die Zukunft zeigt das Bild eines neuen, kundenorientierten Marktes. Lösungen mit extrudierten isolierten Kabelsystemen dürften auf diesem Wachstumsmarkt eine entscheidende Rolle spielen, denn sie erfüllen die Anforderungen der Übertragungs- und Verteilnetze nicht nur von heute, sondern auch von morgen.

Adressen der Autoren

Dr. Björn Dellby
 ABB Transmission and Distribution Management
 ABB Power Systems
 SE-721 64 Västerås/Schweden
 bjorn.dellby@se.abb.com

Gösta Bergman
Johan P. Karlstrand
 ABB High Voltage Cables
 PO box 546
 SE-371 23 Karlskrona/Schweden
 gosta.bergmann@se.abb.com
 johan.p.karlstrand@se.abb.com

Dr. Johannes Kaumanns
 ABB Energiekabel GmbH
 Rhenaniastraße 12–30
 DE-68199 Mannheim/Deutschland
 johannes.kaumanns@de.abb.com

Literaturhinweise

[1] **K.B. Mueller, U. Tretow, B. Dellby, C. Hjalmarsson:** XLPE cable and technologies for operating voltages of 245 kV and above. IEEE/PES, T&D Conference, New Orleans, 1989.

[2] **M. Leijon:** Powerformer™ – ein grundlegend neuer Hochspannungsgenerator. ABB Technik 2/98, 21–26.

[3] **T. Andersson et al.:** Dryformer™ – ein neuer ölfreier und daher umweltfreundlicher Leistungstransformator. ABB Technik 3/00, 59–64.

[4] **M. Dahlgren et al.:** Windformer™ – Großtechnische Nutzung der Windenergie. ABB Technik 3/00, 31–37.

[5] **K. Eriksson:** HVDC Light Gleichstromübertragung mit Spannungszwischenkreis-Umrichtern. ABB Technik 1/98, 4–9.

[6] **M. Byggeth et al.:** The development of an extruded HVDC cable system and its first application in the Gotland HVDC Light project. JICABLE 1999.