

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: 83 (1992)

Heft: 15

Artikel: Konstruktion und Herstellung von Hochspannungskabeln

Autor: Wyler, Charles

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902846>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 11.01.2025

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

Konstruktion und Herstellung von Hochspannungskabeln

Charles Wyler

Der Aufsatz beschreibt den heutigen Stand der Technik beim Bau von Hochspannungskabeln für die Übertragung grosser Energiemengen. Die verschiedenen in Frage kommenden Kabeltypen werden aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften und Fabrikationsmöglichkeiten einem technischen Vergleich unterzogen.

L'article décrit l'état actuel des techniques de construction de câbles haute tension destinés à la transmission de grandes quantités d'énergie. Les différents types de câbles entrant en ligne de compte sont soumis à une comparaison technique sur la base de leurs propriétés électriques et de leurs possibilités de fabrication.

Mit dem beständigen Zuwachs des Verbrauchs elektrischer Energie und den Schwierigkeiten, Bewilligungen für neue Leitungstrassen zu erhalten, werden künftige Leitungen für immer grössere Leistungen ausgelegt. Dies bedingt, dass die Spannungsebenen und die Querschnitte mit ansteigen. Andererseits können Freileitungen kaum mehr bis zu den Unterwerken gezogen werden, da diese vermehrt in überbauten Gebieten angelegt werden. Dieser Trend hat die Kabelhersteller veranlasst, Kabel zu entwickeln, die sehr hohe Leistungen übertragen können. Der vorliegende Aufsatz konzentriert sich daher auf Kabel für Spannungen über 150 kV und Querschnitte über 1000 mm².

Bei hohen Spannungen müssen an die elektrischen Eigenschaften der Kabelisolation harte Anforderungen gestellt werden, da sich Wirtschaftlichkeit und günstige Abmessungen

Entwicklungen zeigen, dass die Gradienten am Leiter gemäss Bild 1 mit genügender Sicherheit erzielt werden können.

Die Herstellung von Kabeln mit derartig hohen Betriebsspannungsgradienten bedingt jedoch sowohl spe-

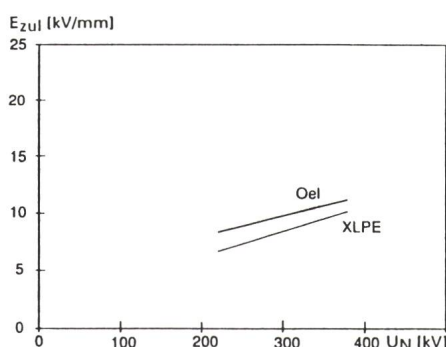


Bild 1 Spannungsgradienten in Kabelisolationen

E_{zul} zulässiger Spannungsgradient
 U_N Nennspannung

von Kabeln nur bei einem Betrieb mit hohen Spannungsgradienten erreichen lassen. Die sowohl in der Schweiz wie weltweit angestellten

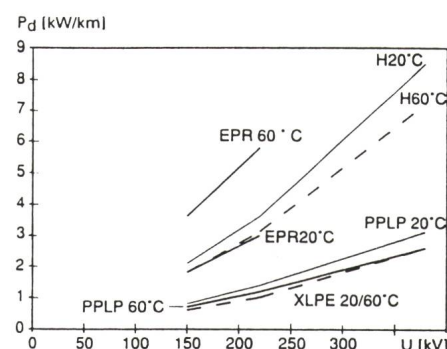


Bild 2 Dielektrische Verluste in Kabelisolationen

P_d dielektrische Verluste
 U Betriebsspannung

zielle Massnahmen bei der Materialbeschaffung wie auch bei der Fabrikation selbst. Die am besten geeigneten Isoliermaterialien müssen somit eine hohe elektrische Festigkeit und gute Herstellungseigenschaften aufweisen sowie, da sie mit dem Quadrat der Spannung ansteigen, kleine und stabile dielektrische Verlustwerte haben, damit das Kabel durch die entstehenden Verluste im Betrieb nicht zu hoch aufgewärmt wird.

Je nach Spannungsniveau lassen sich vernetzte Polyäthylen-Materialien (XLPE), eventuell EPR (Ethylen-Propylen-Rubber), Kraftpapiere oder PPLP-Papiere (Poly Propylene Laminated Paper), die mit dünnflüssigem Öl getränkt sind, einsetzen. Neben technischen Beurteilungen müssen auch wirtschaftliche Aspekte

Adresse des Autors

Charles Wyler, Dipl. El.-Ing. ETHZ,
Câbles Cortaillod S.A., 2016 Cortaillod.

in die Überlegungen einbezogen werden. Das Einsatzgebiet der verschiedenen Isolationsarten lässt sich heute wie folgt unterteilen:

EPR	$20 \text{ kV} \leq U \leq 150 \text{ kV}$
XLPE	$20 \text{ kV} \leq U \leq 500 \text{ kV}$
Ölkabel KP	$150 \text{ kV} \leq U \leq 380 \text{ kV}$
Ölkabel PPLP	$220 \text{ kV} \leq U \leq 500 \text{ kV}$

Leiterherstellung

Bei grossen Querschnitten und normalem Leiteraufbau liegt der Wechselstrom-Widerstand wegen des sogenannten Skin-Effektes wesentlich höher als der Gleichstromwiderstand, was höhere Zusatzverluste verursacht, wenn keine konstruktiven Massnahmen zur Begrenzung dieses Phänomens getroffen werden (siehe Bild 3). Aus diesem Grund werden Leiterquerschnitte über 1000 mm^2 aus-

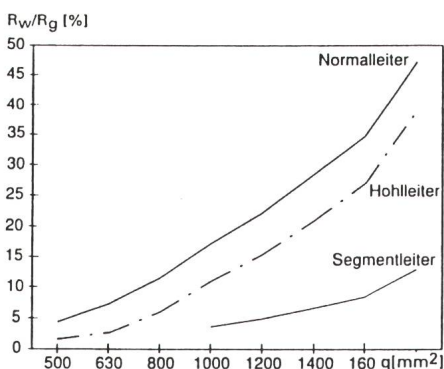


Bild 3 Wechselstromwiderstand von Kabelleitern

R_w/R_g Wechselstrom-Zusatzwiderstand R_w bei 50 Hz in % des Gleichstromwiderstandes R_g
 q Leiterquerschnitt

schliesslich aus Segmentleitern aufgebaut. Der Leiter besteht dann aus vier bis sieben Segmenten, die mit dem Verseildraht vorgeformt und dann zum Leiter verseilt werden (Bild 4). Jeder Draht, aus dem sich der Leiter bildet, wechselt somit ständig seine Lage von aussen nach innen und umgekehrt und erlaubt somit eine relativ gleichmässige Stromverteilung im Leiter selbst.

Die Leiterkonstruktionen müssen dem Kabeltyp angepasst sein. Für alle Kabel ist eine möglichst glatte Leiteroberfläche zwingend, um lokale Feld-Unregelmässigkeiten, das heisst Gradientenspitzen, zu vermeiden. Beim Kunststoffkabel muss die äussere Lage oder die metallische Umwicklung,

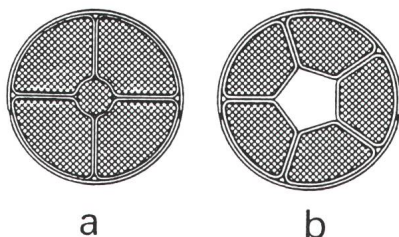


Bild 4 Segmentleiter

Leiter für Hochspannungskabel mit 2000 mm^2 Querschnitt

- a Segmentleiter von XLPE-Kabel; Aussendurchmesser 55.7 mm
- b Segmentleiter von Ölkabel; Aussendurchmesser 57.4 mm

wenn vorhanden, dicht ausgeführt sein, um zu verhindern, dass die hohen Spritzdrücke der Extruder die Halbleiterschicht ins Innere des Leiters drücken können und somit Oberflächen-Unregelmässigkeiten dieser Schicht zur Folge haben könnten. Bei den Abmessungen des Leiters sind sehr enge Toleranzen einzuhalten, um die Extrusion der dünnen, halbleitenden Schicht zu ermöglichen. Andererseits muss der Leiter gänzlich frei von Verbiegungen sein, da sonst keine genügend genaue Extrusion erfolgen kann.

Beim Segmentleiter für Öldruckkabel sind diese Anforderungen weniger hoch. Der Leiter muss jedoch im Zentrum einen Kanal haben, und die Lagen selbst dürfen nicht dicht sein, damit ein Austausch zwischen Kanal und Isolation gewährleistet ist (Bild 4). Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang, dass solche Leiter, vor allem für Kunststoffkabel, nur auf sehr starken, präzisen und damit teuren Anlagen hergestellt werden können.

Isolationen

Wie vorgängig erwähnt, kommen für höhere Spannungen XLPE-Isolationen oder mit dünnflüssigem Öl getränkte Papierisolationen zum Einsatz. Da die Spannungsgradienten sehr hoch sind, müssen besondere Massnahmen zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit getroffen werden.

PE-Isolationen

Beim Einsatz von Polyäthylen (PE) ist auf eine extrem hohe Sauberkeit bei der Herstellung zu achten, da die Reinheit des Produktes entscheidenden Einfluss auf die elektrischen, me-

chanischen und chemischen Eigenschaften nimmt. Selbstverständlich ist das Rohmaterial zu prüfen und jedes Risiko einer Verschmutzung bei der Fabrikation auszuschliessen. Neben elektrischen Prüfungen an Platten wird das zu verarbeitende Material noch auf Unreinigkeiten, speziell auf die Anzahl mikroskopischer metallischer Partikel und Ionen untersucht, da sie das Langzeitverhalten des späteren Kabels beeinflussen. Reines Polyäthylen könnte für die Kabelisolation nicht eingesetzt werden, da dieses Material schlechte Extrusionseigenschaften aufweist. Es werden somit Zusatzstoffe wie Peroxyde für den chemischen Vernetzungsprozess, Antioxydanten, die das Langzeitverhalten verbessern und Weichmacher, die den Fabrikationsprozess ermöglichen, beigemischt. Die Qualität dieser Additive beeinflusst selbstverständlich auch die Kabelqualität. Ein Prüfverfahren überwacht die Zusammensetzung und die innige Vermischung.

Die Halbleiter, die auf dem Leiter selbst wie auch auf der Isolation als äussere Feldbegrenzungsschicht eingesetzt werden, haben entscheidenden Einfluss auf die Kabelqualität. Die Oberflächenglätte dieser Schichten ist massgebend für eine gleichmässige elektrische Beanspruchung. Die leitenden Eigenschaften dieser Schichten werden erreicht durch das Beimischen von Kohlenstoff, dessen Qualität die Eigenschaften dieses wichtigen Konstruktionselementes ebenfalls stark beeinflusst.

Für das Aufbringen der Isolation lassen sich verschiedene Maschinenarten einsetzen, die sich mehr oder weniger gut für Kabel für hohe Spannungen und grosse Querschnitte eignen (Bild 5). Grundsätzlich ist für grosse Isolationsstärken nur die chemische Vernetzung möglich, die ein Wärme- und Druckverfahren bedingt. Zudem werden die drei Schichten (innerer Halbleiter, Isolation und äusserer Halbleiter) in einem Arbeitsgang aufgebracht.

Auch wenn sogenannte Kettenlinien-Anlagen (Bild 6.a) heute noch teilweise eingesetzt werden, zeigt die Tendenz bei der Herstellung grosser Durchmesser doch eindeutig in Richtung sogenannter Kontaktrohr-Anlagen (Bild 6.b). Beim Kettenlinien-Verfahren darf der isolierte Leiter während des Vernetzungsprozesses das Vernetzungsrohr nie berühren, was bei schweren Kabeln sehr hohe Spann- und Zugkräfte verlangt. Ein

Vernetzungsverfahren Vernetzungs-Medium Anlagentypen oder Verfahren	Chemisch				Physikalisch	
	Druck + Peroxyde			Silane (drucklos)	Drucklos	
	Dampf	Passive Atmosphäre	Kontakt (Gleitmittel)	Gesättigte Wasserdampf- Atmosphäre	Passive Atmosphäre	
Anwendungsbereich	Kettenlinie	Vertikal (Turm)	Horizontal (MDCV)	Sioplas Monosyl	Elektronen- beschleuniger	
Niederspannung						
Mittelspannung U < 30 kV						
Hochspannung 30 < U < 150 kV						
Höchstspannung U > 150 kV						
Grosse Querschnitte s > 1000 mm ²						
	Gut angepasst 	Wirtschaftlich nicht optimal 	Wirtschaftlich uninteressant 	Qualitativ nicht entsprechend 		
				Isolations-Stärke [mm]		
				< 2		
				< 10		
				< 20		
				< 25		
				bis 35		

Bild 5 Herstellung von Kabelisolationen

Vergleich heute verwendeter Verfahren für die Herstellung vernetzter Kabelisolationen

Kontakt mit dem Vernetzungsrohr würde die äussere Schicht irreparabel beschädigen. Andererseits würde sich unter dem Einfluss der Schwerkraft aus dem noch weichen Material nach dem Extruder ein birnenförmiges Gebilde bilden, wenn man dem nicht mit fabrikationstechnischen Massnahmen (mit der sogenannten Schnittsion) entgegenwirkte. Je grösser das Kabel wird, desto schwieriger wird es, den Leiter gut zentriert zu halten. Zur Ausschaltung dieses Nachteiles kann das Vernetzungsrohr auch senkrecht angelegt werden, was jedoch Gebäude

mit Höhen von 80 m bedingt und aus diesem Grunde vielerorts nicht möglich ist.

Das Kontaktrohr-Vernetzungsverfahren (Bild 6, b) bringt, obwohl horizontal extrudiert wird, ideale Fabrikationsvoraussetzungen. Bei diesen Anlagen gleitet das Kabel schlüssig in einem Rohr, das heisst der Rohrendurchmesser entspricht exakt dem Kabelaussendurchmesser. Durch bestimmte Fabrikationsmassnahmen kann in relativ einfacher Art und Weise der Leiter exakt zentriert werden.

Papierisolation

Seit mehr als 50 Jahren haben sich Öldruckkabel bestens bewährt. Auch die Extrapolation der Konstruktionsdaten für grosse Querschnitte und Spannungen bis etwa 380 kV aus jenen von Kabeln für kleinere Spannungen haben sich als richtig erwiesen.

Ab dieser Spannung wird allerdings die Herstellung der Kabel mit sogenannten Kraftpapieren schwierig, weil die dielektrischen Verluste stark ansteigen. Ein Öldruckkabel für eine Spannung von 750 kV würde sich zum Beispiel durch die dielektrischen Verluste so stark aufheizen, dass es zu thermischen Durchschlägen auch ohne Strombelastung käme.

Da aber diese Isolationsart das in sie gesetzte Vertrauen gerechtfertigt hat und keine merkbareren Alterungserscheinungen auftreten, wurde nach neuen Lösungen gesucht, die zulässigen Spannungen in papierisolierten Kabeln zu erhöhen. Dies ist mit der Entwicklung der sog. PPLP-Papiere auch gelungen (Bild 7).

Ein Vergleich mit in der Schweiz hergestellten Kabeln zeigt, dass mit diesem neuen Material die dielektrischen Verluste um einen Faktor 4 im Vergleich mit konventionellen Öldruckkabeln reduziert werden können und dass – auch wenn der Verlustwinkel $\text{tg } \delta$ (Bild 8) um einen Faktor 2 höher liegt als der von XLPE-Kabeln – die Verluste bei fertigen Kabeln in der gleichen Grössenordnung liegen wie diejenigen von XLPE-Kabeln.

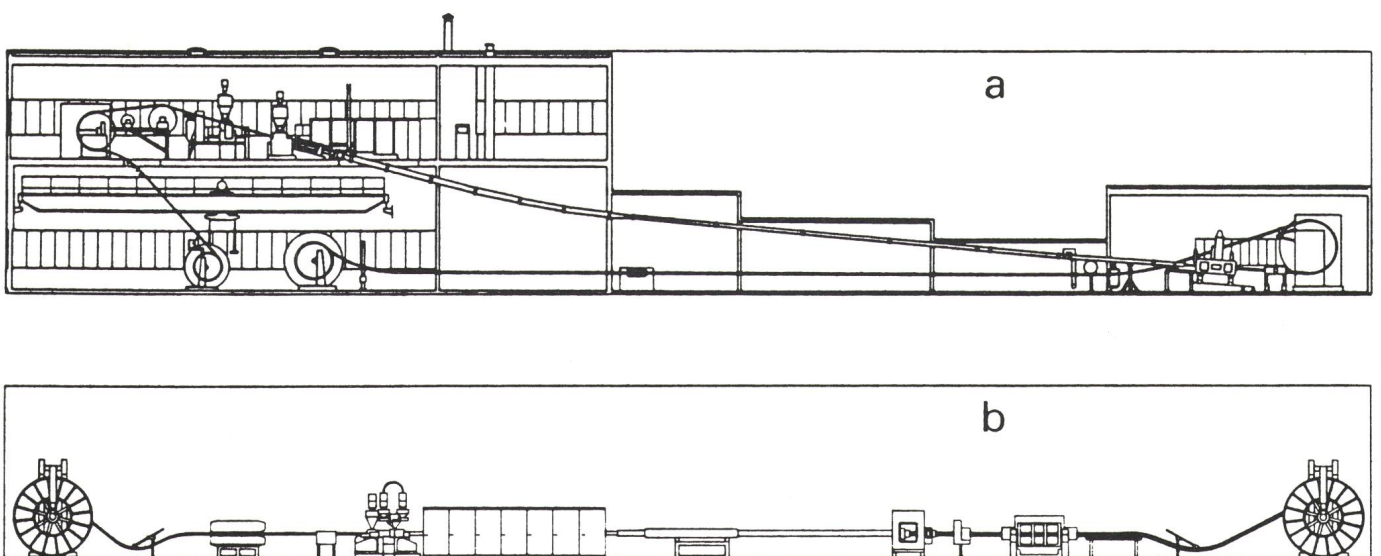


Bild 6 Vernetzungsverfahren

- a Prinzip der Vernetzung im Kettenlinienverfahren
- b Prinzip des Kontaktrohr-Vernetzungsverfahrens

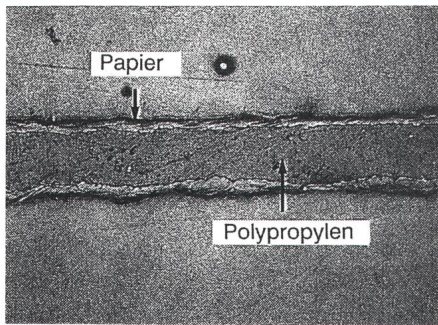


Bild 7 PPLP-Papier-Isolation
Beispiel für ein Wickelpapier, benützt für PPLP-Isolation, bestehend aus zwei Schichten Papier (im Bild je ungefähr 0,02 mm dick) und einer dazwischenliegenden Lage Polypropylen (hier etwa 0,1 mm dick)

Kabelmantel

Kunststoffkabel, die mit Spannungsgradienten von über 5 kV/mm betrieben werden, müssen nach der Aufbringung der Isolation entgast werden und mit einem metallisch dichten Mantel gegen Feuchtigkeit geschützt werden. Die an den Mantel gestellten Anforderungen sind, wenn von den Druckproblemen abgesehen wird, für alle Hochspannungskabel ähnlich; für Ölkabel und für XLPE-Kabel sind die gleichen Fabrikationsanlagen für die Aufbringung von Blei-, gewellten Kupfer- oder gewellten Aluminiummänteln gut geeignet (Bild 9). Zusätzlich dazu lassen sich damit bei Kunststoffkabeln auch die sog. Schichtenmäntel aufbringen.

Polyäthylen hat einen grossen Ausdehnungskoeffizienten von ungefähr $2 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Daraus ergibt sich für ein Kabel von 2000 mm² Leiterquerschnitt und 32 mm Isolationsstärke (Halbleiter inbegriffen) bei einem Temperaturanstieg von 70 °C eine Durchmesserergrößerung von rund 1 mm, ent-

sprechend einer Umfangvergrößerung von etwa 3 mm. Diesem Phänomen muss konstruktiv die grösste Aufmerksamkeit geschenkt werden; es bedingt den Einbau eines Polsters zwischen Isolation und Mantel, um die auf den Mantel und die Isolation wirkenden Kräfte in einem zulässigen Rahmen zu halten. Selbstverständlich tritt dieses Phänomen bei Öldruckkabeln nicht auf, da die Dehnung, in diesem Fall vom Öl, welches in die Ausgleichsgefässe zurückfliesst, aufgenommen wird. Als äusserer Schutz für den Metallmantel wird stets ein Thermoplastmantel eingesetzt.

Langzeitverhalten

Das Betriebsverhalten von Kunststoffkabeln zeigte in den Anfängen schnell Grenzen, die hauptsächlich auf die damals verwendeten Aufbauten und auf unangepasste Produktionseinrichtungen und -verfahren zurückzuführen waren. Damals war nicht bekannt, dass sich die Materialeigenschaften unter dem Einfluss von Ionisation schnell verschlechtern. Mit den heutigen Kenntnissen ist sogar unerklärlich, dass Kabel ohne inneren Halbleiter über längere Zeit ohne Durchschlag betrieben werden konnten. Als Feldbegrenzungsschicht wurde zunächst Graphit verwendet, das aber der unregelmässigen Trennschicht wegen rasch durch einen extrudierten Halbleiter ersetzt wurde. Die heutigen Kabelkonstruktionen sind ausgereift, und grundlegende Änderungen sind in den nächsten Jahren nicht zu erwarten.

Eine Qualitätsverbesserung kann somit nur noch durch den Einsatz von Materialien höherer Qualität und durch die Verfeinerung von Fabrikationseinrichtungen und Verfahren erreicht werden. In diese Richtung zielen neue Werkstoffe, wie die WTR (water tree-retardant)-Isolationsmaterialien, in denen durch Änderungen der Molekularstruktur das Wachstum von Wasserbäumchen (Watertrees) entscheidend verlangsamt werden konnte. Da diese Materialien im Neuzustand etwas schlechtere Eigenschaften als reines Polyäthylen aufweisen, kommen sie für sehr hohe Spannungen heute kaum in Frage. Auch wenn die Entstehung der Wasserbäumchen und der Durchschlagsvorgang in PE-Kabeln noch nicht ganz geklärt ist, weiss man, dass das Langzeitverhalten um so besser wird, je reiner das Material und je kleiner die internen Span-

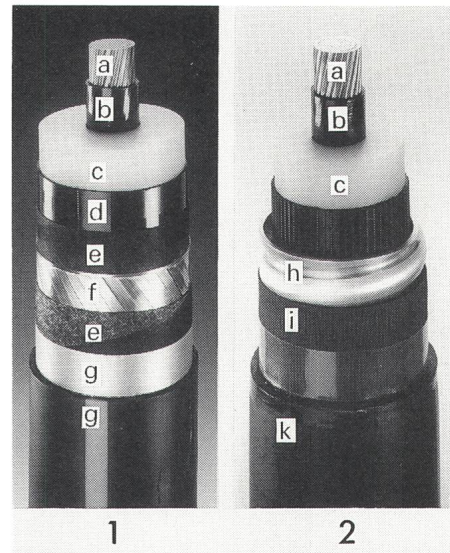


Bild 9 Aufbau moderner Hochspannungskabel

- 1 Hochspannungskabel mit Cu-PE-Schichtenmantel
- 2 Hochspannungskabel mit Alu-Wellmantel
- a Kupferleiter
- b innerer Halbleiter
- c Isolation
- d äusserer Halbleiter
- e Quellband
- f Flachbandschirm
- g Cu-PE-Schichtenmantel
- h Alu-Wellmantel
- i Korrosionsschutzmantel
- k PE-Mantel

nungen sind. In diesem Zusammenhang sind Verbesserungen in Material und Fabrikation noch möglich.

Auch wenn nicht garantiert werden kann, dass Kunststoffkabel heutiger Fabrikation eine ähnliche Lebensdauer wie Öldruckkabel erreichen werden, so zeigen Langzeitprüfungen doch deutlich, dass ihre Lebenserwartung sicher mehr als dreissig Jahre beträgt.

Schlussfolgerung

Für die Übertragung grosser Leistungen unter hohen Spannungen ist die Freileitung aus Kosten- und betrieblichen Gründen dem Kabel weit überlegen. Müssen aus besonderen Gründen solche Leitungen trotzdem verkabelt werden, dann ist die Kabelindustrie heute jedoch in der Lage – mindestens für kürzere Strecken – eine alternative Lösung vorzuschlagen.

Anmerkung: Dieser Aufsatz ist hervorgegangen aus einem Vortrag, gehalten am ETG-Kabelseminar vom 10./11. März 1992 an der ETH Zürich.

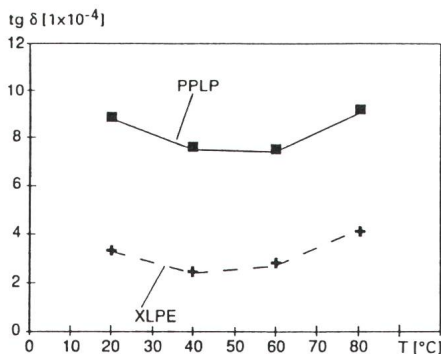


Bild 8 Dielektrischer Verlustfaktor von VLPE- und PPLP-Isolationen
tg δ Verlustwinkel
T Temperatur