

Elektrische Prüfungen an VPE-isolierten Mittel- und Hochspannungskabelsystemen im Werk und vor Ort

D. Meurer
KABELRHEYDT AG
Geschäftsbereich Energietechnik, Duisburg

0. Zusammenfassung

1. Allgemeines

- Aufbau VPE-isolierter Kabel
- el./nichtel. Prüfungen
- Prüfungsarten und -ziele
- Normung

2. Prüfungen im Werk

2.1 Prüfanlagen und Prüfeinrichtungen

2.2 Hochspannungsprüfungen

- Wasserendverschlußsysteme

2.3 TE-Messung

- „Prüfphilosophie“
- Anforderungen an Meßsysteme

3. Prüfungen vor Ort

- Abnahmeprüfungen
- Monitoring
- Alterungsdiagnose

4. Schlußbemerkungen

5. Literatur

0. Zusammenfassung

Durch die Entwicklung moderner Qualitätsmanagement- und Qualitätssicherungsstrategien, die in wachsendem Umfang die gesamte Lebensdauer umfassen, kommt einer produktbezogenen Prüfsystematik immer größere Bedeutung zu.

Auf der Grundlage der weitreichenden Normung im nationalen und internationalen Bereich ist dabei gerade auch durch die erweiterten Möglichkeiten der Prüftechnik, der Sensorik und der Datenverarbeitung eine neue Dynamik entstanden.

Sowohl die Art und Anzahl der Prüfungen, als auch die jeweilige Höhe der Prüfbeanspruchungen für VPE-isolierte Kabeln sind deshalb z.Zt. in der Diskussion.

Dies gilt vor allem im Bereich der höchsten Übertragungsspannungen, die derzeit gerade technisch erschlossen werden.

Hochspannungsprüfungen an Komponenten und Anlagen erfordern ein auf das jeweilige Produkt und die in den einschlägigen Prüfvorschriften festgelegten Beanspruchungen abgestimmtes System an Prüfeinrichtungen.

Dieses System beinhaltet generell entsprechende Spannungserzeuger, zusätzlich jedoch produktspezifische Komponenten, bei der Prüfung VPE-isolierter Kabel insbesondere die Wasserendverschlüsse.

Die Teilentladungsmessung ist bei kunststoffisolierten Kabelanlagen ein zentrales Element der Qualitätsbeurteilung. Anforderungen an Meßgeräte und Detektoren sind dabei eng mit den Bewertungskriterien, der „Prüfphilosophie“, und damit wieder dem produktspezifischen Verhalten gegenüber Teilentladungen verknüpft.

Wesentliche neue Entwicklungen sind im Bereich der „Prüfung nach Verlegung“ zu beobachten.

Der traditionelle Begriff muß hier im Sinne einer umfassenderen Definition mit neuen Inhalten gefüllt werden:

- die Abnahmeprüfung markiert auch weiterhin den Abschluß der Montagetätigkeiten,
- betriebsbegleitende Monitoringsysteme werden in zunehmendem Maße installiert,
- die Alterungsdiagnose gibt Informationen zum Alterungszustand nach bestimmten Betriebszeiten.

1. Allgemeines

In Bild 1 sind wesentliche Daten zum Aufbau VPE-isolierter Kabel aufgelistet.

Neben dem aktuell mit VPE-Kabelsystemen technisch beherrschten Nennspannungsbereich werden für wichtige Konstruktionselemente Größenordnungen der geometrischen Abmessungen angegeben.

Die eigentliche elektrische Isolierung übernimmt das in der Regel in einem Arbeitsgang extrudierte dreischichtige Isoliersystem aus leitfähigem Compound und vernetztem Polyethylen.

Bild 1

VPE-isolierte Mittel- und Hochspannungskabel <i>Aufbau</i>	
Nennspannung	3,6/6kV - 230/400kV
Leiterwerkstoff	Kupfer, Aluminium
Leiterquerschnitt	25mm ² - 2500mm ²
Innere Leitschicht	0.3mm - 2mm
Isolierhülle	3.4mm - 30mm
Äußere Leitschicht	0.3mm - 2mm
Schirm	Kupferdrähte
Mantel	- PVC/PE - Schichtenmantel - Bleimantel - Al-Wellmantel
Äußerdurchmesser	20mm - 180mm
KABELRHEYDT	

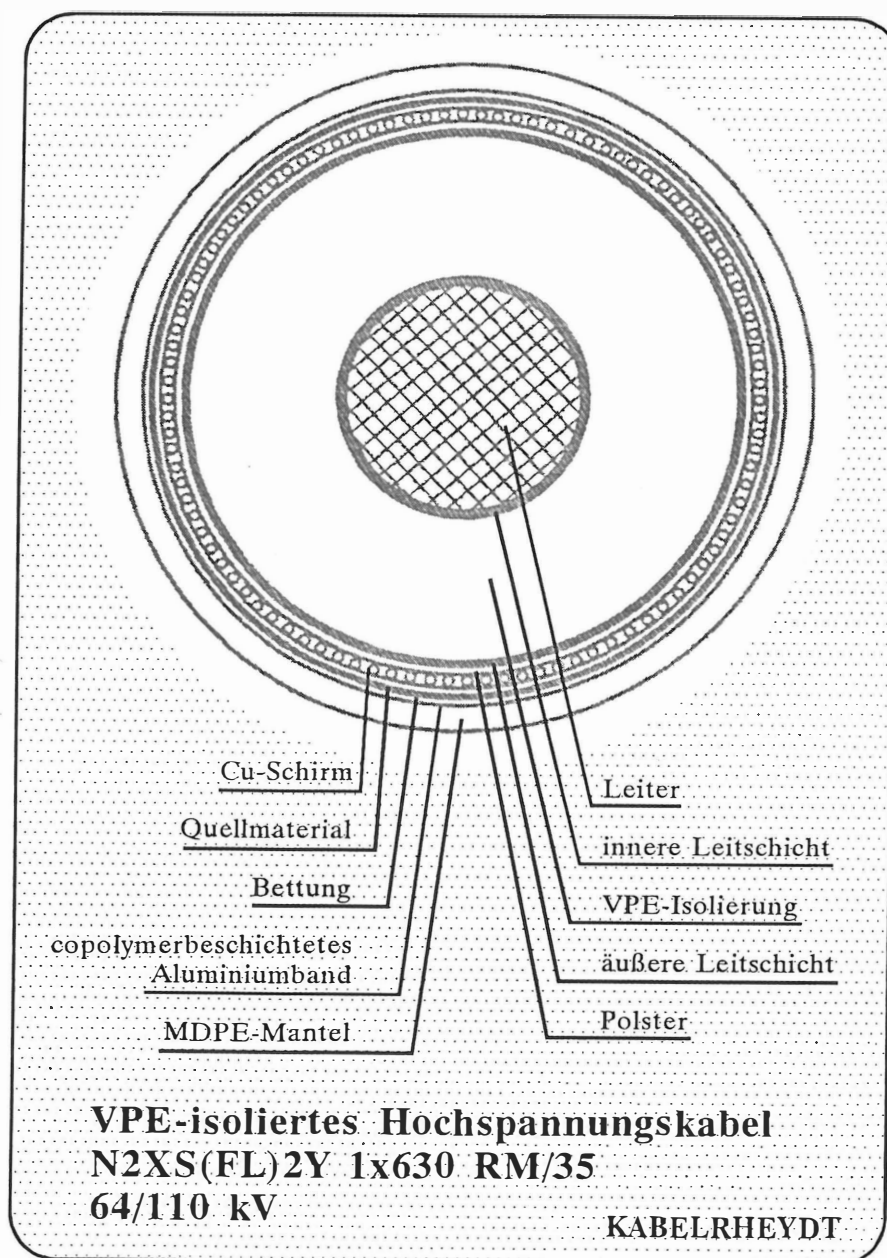
Bild 2 zeigt den Querschnitt eines VPE-isolierten Kabels für eine Nennspannung von 64/110 kV.

Das Kabel ist mit einem verdichteten, rund-mehrdräftigen Leiter (Querschnitt 630 mm²) ausgeführt und hat eine Isolierwanddicke von 18mm („Standardaufbau“ in Deutschland).

Der Cu-Drahtschirm (Querschnitt 35 mm²) trägt im Normalbetrieb den kapazitiven Lade-
strom, im Fehlerfall führt er kurzzeitig den Kurzschlußstrom.

Quellmaterial im Schirmbereich und ein Schichtenmantel (Aluminiumband und MDPE-Mantel) gewährleisten die Längs- und Querwasserdichtigkeit.

Bild 2



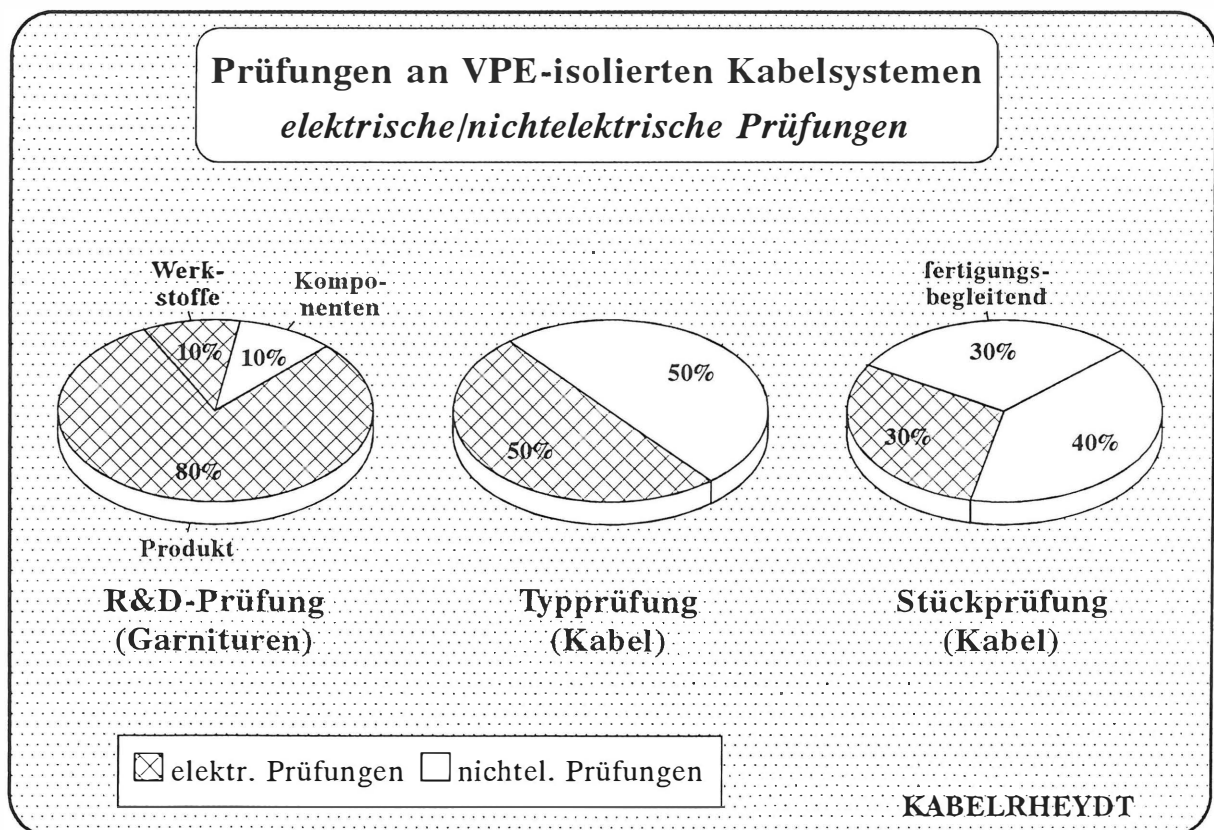
Neben den hier behandelten elektrischen Prüfungen an Kabeln und Garnituren steht die große Gruppe der vom Hersteller durchzuführenden nichtelektrischen Prüfungen.

Dazu gehören z.B. Komponentenprüfungen im Entwicklungsbereich (R&D), der nichtelektrische Teil der Typprüfung und als ganz zentrale nichtelektrische Prüfung fertigungsbegleitend oder im Rahmen der Stückprüfung der Aufklartest.

Dabei wird die Oberfläche der inneren Leitschicht und die Isolierschicht bei Temperaturen $> 100^{\circ}\text{C}$ und damit im transparenten Zustand des VPE visuell auf Unregelmäßigkeiten und Inhomogenitäten untersucht.

Bild 3 gibt eine Abschätzung des Aufwandes für die verschiedenen Prüfungsbereiche.

Bild 3



In Bild 4 sind die verschiedenen Prüfungsarten aufgelistet, denen heute VPE-isolierte Kabelsysteme und deren Komponenten unterworfen werden.

Sie unterscheiden sich voneinander ganz wesentlich in Umfang und Zielsetzung und damit auch in der Prüffrequenz d.h., in der Häufigkeit, mit der sie durchgeführt bzw. wiederholt werden müssen.

Aktuell immer mehr Bedeutung gewinnen die sehr umfangreichen Qualifizierungsprüfungen für komplette Systeme incl. der Langzeitprüfungen und die Prüfungen vor Ort.

Bild 4

Art der Prüfung	Ziel der Prüfung
Entwicklungsprüfung	alternative Konzepte optimale Lösung
Typprüfung	Konstruktion Werkstoffe
Stückprüfung	Fertigungsqualität
Auswahlprüfung	Aufbau und Geometrie
Systemtypprüfung	Typprüfung des Kabels mit Garnituren
Langzeitprüfung	Alterungsverhalten unter erhöhten Beanspruchungen
Qualifizierungsprüfung	Systemtypprüfung erweitert durch Langzeitprüfung
Vor-Ort Prüfung	a) Verlegung/Montage b) Monitoring c) Alterungszustand
Prüfungen an Kabelkomponenten, -systemen und -anlagen	
KABELRHEYDT	

Prüfanforderungen werden in der Regel in Normen festgelegt, Bild 5 zeigt den derzeitigen Stand der Normung für den Bereich VPE-isolierter Mittel- und Hochspannungskabel.

Angegeben werden für die jeweiligen Betriebsspannungsbereiche die gültige DIN VDE Bestimmung und der entsprechende IEC-Standard.

Dabei bleibt festzustellen, daß derzeit für Nennspannungen $> 150\text{kV}$ noch keine nationale oder internationale Norm existiert, obwohl auch in diesem Bereich zunehmend VPE-isolierte Kabel eingesetzt werden.

Bild 5

**Elektrische Prüfungen an VPE-isolierten
Mittel- und Hochspannungskabeln**
Stand der Normung

- ▶ $1\text{kV} < U_0 < 30\text{kV}$
DIN VDE 0273/12.87
6/10, 12/20, 18/30 kV
DIN VDE 0276-620/12.94
3,6/6 kV bis 20,8/36 kV
IEC 502/1983
1 kV bis 30 kV
- ▶ $30\text{kV} < U_0 < 150\text{kV}$
DIN VDE 0263/02.91
>18/30 kV bis 87/150 kV
IEC 840/1988
>30 kV bis 150 kV
- ▶ $150\text{kV} < U_0 < 400\text{kV}$
DIN VDE ?
IEC ?

Cigré Recommendations
WG 21.03/1993
>170 kV bis 400 kV

KABELRHEYDT

2. Prüfungen im Werk

In Bild 6 sind die wesentlichen Teile der im Werk durchgeführten elektrischen Typ-, Stück- und Langzeitprüfungen an Kabeln aufgeführt.

Die Typprüfung wird in der Regel als Abschluß von Neuentwicklungen, bei wesentlichen Konstruktionsänderungen oder in Verbindung mit speziellen Aufträgen an kurzen Kabelmustern (ca. 20m) erforderlich, die Stückprüfung ist für jede Lieferlänge vorgeschrieben.

Langzeitprüfungen unter verschärften Bedingungen haben vor allem im Mittelspannungsbereich große Bedeutung (Alterungsverhalten unter dem Einfluß von Wasser!).

Bild 6

Elektrische Prüfungen an VPE-isolierten Mittel- und Hochspannungskabeln *Prüfungen im Werk*

Typprüfung

1. Biegeprüfung
2. Wechselspannungsprüfung
3. Teilentladungsprüfung
4. Verlustfaktormessung
5. Lastwechselprüfung
6. Stoßspannungsprüfung

Stückprüfung

1. Leiterwiderstand
2. Wechselspannungsprüfung
3. Teilentladungsprüfung

Langzeitprüfung

1. Wechselspannungsprüfung
2. Lastwechselprüfung

KABELRHEYDT

2.1 Prüfanlagen und Prüfeinrichtungen

Die elektrische Prüfungen an VPE-isolierten Kabeln beinhalten im wesentlichen 3 Beanspruchungsformen: Wechsellspannung
Stoßspannung
Lastwechsel (Heizung des Kabels durch Strom in Leiter) .

Von zentraler Bedeutung bei allen Prüfungen ist die Frage der Endverschlüsse, eingesetzt werden zur reinen Kabelprüfung heute in der Regel Wasserendverschlußsysteme.

Einen Überblick der erforderlichen „Prüfhardware“ einschließlich der wichtigsten Meßsysteme gibt Bild 7.

Bild 7

Elektrische Prüfungen an VPE-isolierten Mittel- und Hochspannungskabeln *Prüfanlagen und Prüfeinrichtungen*

► *Prüfanlagen*

- Wechsellspannungsprüfsystem
(Transformator, Resonanzanlage)
- Stoßspannungsprüfsystem
(Blitzstoß, Schaltstoß)

► *Prüfeinrichtungen*

- Wasserendverschlußsysteme
- Induktionsheizer ($> 2.5 \text{ kA}$)

► *Meßeinrichtungen*

- Teilentladungsmeßsystem
- Verlustfaktormeßeinrichtung
- Temperaturmessung (potentialfrei)
- LWL-Übertragungsstrecken
(z.B. Strommessung)

KABELRHEYDT

2.2 Hochspannungsprüfungen

Im Gegensatz zu den Spannungserzeugern als weitgehend produktunabhängige Bestandteile von Prüfanlagen, stellen die schon erwähnten Wasserendverschlußsysteme eine kabelspezifische Komponente dar, die nachfolgend näher diskutiert werden soll.

Dabei stehen weniger die in Spezifikationen festgelegten Produkteigenschaften im Mittelpunkt, sondern es werden für verschiedenen Funktionsbereiche die kritischen Beanspruchungen aufgezeigt, die im Prüfalltag über den Wert einer Prüfeinrichtung mitentscheiden.

Bild 8 nennt 2 im Bereich der elektrischen Funktionen kritische Anwendungen, deren besondere Anforderungen als Randbedingungen in die Rohr- und Abschirmelektrodendimensionierung eingehen sollten.

Bild 8

Hochspannungsprüfungen

Wasserendverschlußsysteme -1-

► *elektrische Funktion*

kritisch: große Anzahl von Prüfungen

- Rohrdimensionierung
 - zu schälende Länge = 2 x Rohrlänge !

kritisch: Grenzfestigkeitsuntersuchungen

- Optimierung der Feldsteuerung
 - Kabeldurchschlag im EV
= Rohrdurchschlag ?

KABELRHEYDT

Neben den rein elektrischen Funktionen sind bei Wasserendverschlußsystemen die mechanischen Eigenschaften von großer Bedeutung:

- Bei der Montage von Hochspannungskabeln mit großen Querschnitten sollte die Konstruktion zur Verstellung der Rohrneigung die Montage unterstützen.
- Während der Prüfung ist auch bei großen Kabelgewichten eine hohe Standsicherheit erforderlich, was bei der Auslegung des Fahrgestells berücksichtigt werden muß.
- Um eine Verlagerung der Ader bei Lastwechselprüfungen zu verhindern, kann eine zusätzliche Fixierung des Kabels notwendig werden.

Bild 9

Hochspannungsprüfungen
Wasserendverschlußsysteme -2-

► ***mechanische Funktion***

kritisch: **Hochspannungskabel**

- Montage
 - 400kV; 1600mm²: Biegeradius > 2m
- Standfestigkeit
 - 400kV; 1600mm²: ca 30kg/m
- Fixierung des Kabels
 - Lastwechselprüfung
axialer Temperaturgradient im EV!

KABELRHEYDT

Bei der Durchführung länger andauernder Prüfungen werden an die Wasseraufbereitungsanlage besondere Anforderungen gestellt:

- Um größere Unterbrechungen zu vermeiden, sollte das Anlagenhandling im Hinblick auf notwendige Wartungsarbeiten optimiert sein.
- Auch in elektromagnetisch ungünstigen Bedingungen (magn. Felder durch Heizströme im kA-Bereich, Impulsstörer bei Durch- und Überschlägen) muß die Ventilsteuerung zuverlässig arbeiten.
- Bei unzulässigen Betriebszuständen müssen Sicherheitseinrichtungen die Prüfstrecke, aber auch alle Komponenten des EV-Systems schützen.

Bild 10

Hochspannungsprüfungen
Wasserendverschlußsysteme -3-

► ***Wasseraufbereitung***

kritisch: Typ-/Langzeitprüfungen

- Anlagenhandling
 - Wartung/Inspektion
 - Komponentenwechsel
- Steuerung
 - elektrisch/elektronisch
 - Ventiltechnik
- Sicherheitsfunktionen
 - Schutz der Prüfstrecke
 - Eigenschutz

KABELRHEYDT

2.3 TE-Messung

Die Intensität von Teilentladungen ist für eine Vielzahl elektrischer Betriebsmittel ein wesentliches Qualitätskriterium.

Dies gilt in besonderem Maße auch für VPE-isolierte Kabel und Garnituren, da TE in den vorliegenden Kunststoffdielektrika immer auf Fehler hindeuten, die für das Gesamtsystem „lebensgefährlich“ sind.

In Bild 11 sind die grundlegenden Zusammenhänge für Kabel und Garnituren zusammengefaßt.

Bild 11

**TE-Messungen an VPE-isolierten
Mittel- und Hochspannungskabelsystemen**
"Prüfphilosophie -1-"

► **Kabel und Garnituren:**

Ursachen von *Teilentladungen* im Isoliersystem
sind *irreversible Fehler*.
(Einschlüsse, Hohlräume, Beschädigungen)

Reparaturen sind nicht möglich !

► **Garnituren:**

Muffen und Feldsteuerteile in Endverschlüssen
sind *nicht mehrfach montierbar*.

Nachbesserungen sind nicht möglich !

KABELRHEYDT

Aufgrund der prinzipiellen und extremen Gefährdung von polymeren Isoliersystemen durch Teilentladungen kann im Hinblick auf eine Qualitätsaussage keine „zulässige“ Intensität für TE in der eigentlichen Isolierung angegeben werden.

Für die technische Umsetzung der TE-Messung ist allerdings die Definition von Grenzwerten zwingend erforderlich, da einerseits die Empfindlichkeit der TE-Meßgeräte begrenzt ist, andererseits aber auch die erforderlichen Maßnahmen zur Absenkung des Grundstörspegels und zur Vermeidung von TE aus/von peripheren Komponenten technisch und ökonomisch realisierbar bleiben müssen.

Bild 12

**TE-Messungen an VPE-isolierten
Mittel- und Hochspannungskabelsystemen**
"Prüfphilosophie -2-"

- *Teilentladungen* im elektrisch hochbeanspruchten Bereich *dürfen nicht toleriert werden.*
- Die in Normen definierten *Grenzwerte* (ca. 1pC-10pC) beschreiben den *Stand der Technik.*
 - Meßempfindlichkeit
 - Grundstörspegel
 - Entladungen an peripheren Komponenten

KABELRHEYDT

Das dargestellte produktspezifische Verhalten VPE-isolierter Systeme gegenüber Teilentladungen hat unmittelbare Auswirkungen auf die Bewertung des Ergebnisses einer Teilentladungsmessung, aber auch auf die Anforderungen an die Meßeinrichtungen.

Ein zusätzlicher Parameter im Hinblick auf die Auslegung des TE-Meßsystems ist der konkrete Zusammenhang d.h., das Ziel der Prüfung, im Verlauf der die TE-Messung durchgeführt wird.

In Bild 13 wird für unterschiedliche Prüfungsarten die Bedeutung wichtiger Systemeigenschaften bewertet.

Bild 13

TE-Messung an Kabeln und Garnituren <i>Anforderungen an Meßsysteme</i>				
	R&D- prüfung	Typ- prüfung	Stück- prüfung	Vor-Ort Prüfung
<i>Hardware</i>				
Meßempfindlichkeit	+++	++	++	++
Störunterdrückung	+++	+++	+(++)	+++
Flexibilität Meßsystem	+++	++	+	+++
Ortung	+	+	+++	+++
integr. Spannungsmessung	++	+++	+	+
	=====	=====	=====	=====
	12	11	8	12
<i>Handling</i>				
einfache Bedienung	+	+	+++	++
Transportfähigkeit	+	+	+	+++
Robustheit	+	+	+++	+++
	=====	=====	=====	=====
	3	3	7	8
<i>Datenbearbeitung</i>				
Protokollierung	+	++	+++	+++
Dokumentation	+++	++	+	+++
Datenspeicherung	+++	+	+	++
TE-Analyse	+++	+	+	+++
	=====	=====	=====	=====
	10	6	6	11
KABELRHEYDT				

3. Prüfungen vor Ort

Aus sehr unterschiedlichen Motiven des Betreibers von Kabelstrecken gewinnen Prüfungen vor Ort, also nach Verlegung des Kabels und nach Montage der Garnituren, aktuell immer mehr an Bedeutung.

Gleichzeitig sind hier wesentliche neue Entwicklung im Bereich der Prüftechnik zu beobachten.

Der traditionelle Begriff „Prüfung nach Verlegung“ als „Inbetriebnahmeprüfung“ muß deshalb erweitert und neu definiert werden.

Bild 14 zeigt eine mögliche Einteilung der Prüfungen vor Ort, die sich an zeitlichen Abschnitten der Systemlebensdauer orientiert.

Bild 14

Elektrische Prüfungen an VPE-isolierten Mittel- und Hochspannungskabeln *Prüfungen vor Ort*

Abnahmeprüfung

- Projektabschluß
- Übergabe der Anlage
- Überprüfung von Verlegung und Montage

Betriebsüberwachung/monitoring

- Überwachung des Betriebszustandes (z.B. Temperaturprofil)
- Beobachtung von Alterungsindikatoren (z.B. Teilentladungen)

Alterungsdiagnose

- Untersuchung des Alterungszustandes
- Beurteilung der Restlebensdauer

KABELRHEYDT

Prüfungen, die im Rahmen der Systemabnahme durchgeführt werden, stellen den Abschluß der Verlege- und Montagearbeiten dar und dienen vornehmlich dazu, die Einschaltbereitschaft des Systems nachzuweisen.

In Bild 15 sind derzeit genutzte, teilweise auch in Normen festgelegte Prüfverfahren angegeben, die zur Abnahmeprüfung eingesetzt werden.

Ein Ziel gegenwärtiger Entwicklungen ist, Gleichspannungsbeanspruchungen von VPE-isolierten Kabeln generell durch Wechselspannungsprüfungen zu ersetzen.

Im Bereich der Mittelspannungskabel ist dies zwischenzeitlich realisierbar, für Hochspannungskabel ist weltweit weiterhin die Gleichspannungsprüfung Standard.

Bild 15

**Elektrische Prüfungen an VPE-isolierten
Mittel- und Hochspannungskabeln**

Abnahmeprüfung

- ▶ ***Spannungsprüfung***
 - DC
 - AC (50/60Hz, 0.1Hz)
- ▶ ***Teilentladungsmessung***
 - bei Wechselspannung
 - unkonventionelle Spannungsformen (z.B. Schaltstoß)

KABELRHEYDT

Im Rahmen moderner Schutzkonzepte aber auch zur optimalen Netzführung müssen Betriebsparameter einer Kabelstrecke möglichst kontinuierlich überwacht werden.

In der Praxis ermöglicht wurde dieses „monitoring“ von Kabeln praktisch erst durch die Integration von Lichtwellenleitern als Sensoren in das Energiekabel (in der Regel im Schirm), eine aufwendige (Garnituren!), aber in der Zwischenzeit beherrschte Technik.

Eine Auswahl überwachbarer Betriebsparameter zeigt Bild 16.

Bild 16

Elektrische Prüfungen an VPE-isolierten Mittel- und Hochspannungskabeln

Betriebsüberwachung/monitoring

► *Überwachbare Betriebsparameter (Auswahl)*

- Strom/Spannung
- Kabeltemperatur (Temperaturprofil)
- TE in Garnituren
- Ableiter in cross-bonding Systemen

► *LWL-Einsatz in monitoring-Systemen*

- LWL-Sensoren
(LWL-Integration in das Kabelsystem)
- störungsfreie Datenübertragung
(keine Integration erforderlich)

KABELRHEYDT

Die Lebensdauer eines Betriebsmittels steht sicher für jeden Betreiber mit im Mittelpunkt seiner Überlegungen /1/.

Verfahren zur Alterungsdiagnose, insbesondere an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln, sind deshalb ein Schwerpunkt gegenwärtiger Entwicklungen /2,3/.

Gefördert wurden diese Bemühungen sicher dadurch, daß sich offensichtlich ein Teil der 1. Generation PE/VPE-isolierter Kabel nach bis zu 25a Betriebsdauer in einem weit fortgeschrittenen Alterungsstadium befindet.

Die Möglichkeiten zur Bestimmung des Alterungszustandes reichen dabei von zerstörenden Untersuchungen nach Probenentnahme bis zu mikrodielektrometrischen Verfahren, die zertörungsfrei eine Beurteilung des Polarisationsverhaltens als Alterungsindikator erlauben.

Bild 17

Elektrische Prüfungen an VPE-isolierten Mittel- und Hochspannungskabeln

Alterungsdiagnose

► *zerstörend (Probenentnahme)*

- TE-/Verlustfaktormessung
- elektrische Restfestigkeit
- (chemische/physikalische Eigenschaften, z.B. wt)

► *lebensdauerverbrauchend*

- Spannungsprüfung (DC/AC)
- TE-/Verlustfaktormessung

► *nichtzerstörend*

- Auswertung der Wiederkehrspannung
- Relaxationsstromanalyse (IRC)

KABELRHEYDT

4. Schlußbemerkungen

Eine produktbezogene Prüfsystematik ist fester Bestandteil jedes modernen Qualitätsmanagementsystems.

In wachsendem Umfang endet für VPE-isolierte Kabelsysteme diese Prüfsystematik nicht mit der Übergabe der Anlage an den Kunden, sondern umfaßt die gesamte Lebensdauer.

Gerade auf diesem Hintergrund ist eine Optimierung des Prüfwesens zentrale Aufgabe für jeden Hersteller, wobei sich in dieser Aufgabe die Sicherstellung einer hohen Produktqualität und die Minimierung der Prüfkosten gegenüberstehen.

Prüfkosten fallen in diesem Zusammenhang nicht nur produktabhängig an, sondern werden zu einem erheblichen Teil durch die Leistungsfähigkeit, die Zuverlässigkeit und das Handling der Prüfanlagen und -einrichtungen mitbestimmt.

Zwei wichtige Beispiele dazu aus dem Bereich der Kabelprüfung, die Wasserendverschlüsse und die TE-Meßsysteme wurden vorgestellt.

5. Literatur

- /1/ D. Meurer, W.-D. Schuppe
**VPE-isolierte Mittelspannungskabel -
Langzeitverhalten und Alterungsdiagnostik**
ETG-Fachtagung: Isoliersysteme der elektrischen Energietechnik -
Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen
Würzburg, Mai 1992

- /2/ M. Beigert, H.-G. Kranz
**Destruction Free Ageing Diagnosis of Power Cable Insulation
Using Isothermal Relaxation Current Analysis**
Int. Symp. on Electr. Ins., Pittsburgh (USA), June 5-8, 1994

- /3/ M. Beigert, H.-G. Kranz, D. Kaubisch, D. Meurer
**Computergestützte zerstörungsfreie Alterungsdiagnose
für VPE-isolierte Mittelspannungskabel**
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 93(1994), Heft 11