

# Kabelsysteme für Mittel- und Hochspannung - Installieren und Vergessen ?

Dr.-Ing. D. Meurer  
Alcatel Kabel AG & Co, Hannover

## Inhalt

	Seite
1. Einleitung .....	2
2. Komponenten von Kabelsystemen.....	4
2.1 Kabel .....	4
2.1.1 Papierisierte Kabel .....	4
2.1.2 VPE-isolierte Kabel .....	5
2.2 Garnituren .....	6
2.2.1 Endverschlüsse .....	7
2.2.2 Muffen .....	8
2.3 Montagetechniken .....	8
3. Alterung .....	9
3.1 Grundlagen .....	9
3.1.1 Ursache und Wirkung.....	10
3.1.2 Lebensdauerprognose .....	13
3.2 Prävention .....	14
3.2.1 Design und Produktqualität .....	15
3.2.2 Kabellegung und Garniturenmontage .....	16
3.2.3 Beanspruchungen im Betrieb .....	17
3.3 Diagnose .....	18
3.3.1 Sensoren/Monitoring .....	18
3.3.2 Alterungsindikatoren .....	19
3.3.3 Zustandsbestimmung .....	20
3.4 Sanierung.....	22
4. Zusammenfassung.....	23
5. Literatur .....	24

# 1. Einleitung

Die Geschichte der Energiekabel als unterirdischer Alternative zur Freileitung beginnt vor etwa 100 Jahren unwesentlich nach den ersten Versuchen, überhaupt elektrische Energie über nennenswerte Entfernungen zu übertragen.

Schon sehr früh gab es Versuche, neben der Isolierung aus imprägnierten Papieren auch einschichtige Dielektrika auf Kunststoffbasis zu entwickeln (z.B. Guttapercha). Aufgrund der beschränkten Verarbeitungsmöglichkeiten und Qualität gab es jedoch im Mittel- und Hochspannungsbereich über 50 Jahre praktisch keine Alternative zu papierisolierten Kabeln. Außerdem zeigte sich, daß mit der Entwicklung neuer Bauarten und einer fortschreitenden Optimierung der Wickel- und Tränktechnologie auch höchste Spannungen zuverlässig beherrscht werden konnten.

Erst in den fünfziger Jahren war es möglich, PVC isolierte Mittelspannungskabel zu bauen. Mit der technologischen Nutzbarmachung des Polyethylens und anschließend des vernetzten Polyethylens begann schließlich die bis heute andauernde Substitution der traditionellen Kabeltypen.

Einen zusammenfassenden Überblick der Kabelgeschichte gibt Tabelle 1.1.

<b>Papierisolierte Kabel (thermisch instabile Bauarten)</b>	
1892	Dreiphasen-Wechselstromkabel (Gürtelkabel)
1913	Höchstädter: 33 kV (Radialfeldkabel)
<b>Papierisolierte Kabel (thermisch stabile Bauarten)</b>	
1917	Emanueli: 132 kV Ölkabel mit Hohlleiter
1920	Fisher und Atkinson: Gasinnendruckkabel
1926	Höchstädter: Gasaußendruckkabel
<b>Kunststoffisolierte Kabel</b>	
1952	PVC-isolierte Mittelspannungskabel
1953	PE-/VPE isolierte Mittelspannungskabel
1970	VPE-isolierte Kabel $\geq 110$ kV

**Tabelle 1.1: Geschichtliche Entwicklung der Bauarten von Mittel- und Hochspannungskabeln**

Die Entscheidung zwischen Kabel und Freileitung wird im wesentlichen von ökonomischen Gesichtspunkten bestimmt. Im Kostenvergleich zeigt sich die Kabellösung mit ansteigender Spannungsebene um den Faktor 2-20 teurer, was überwiegend durch höhere Trassen- und Verlegekosten verursacht wird. Erst in den letzten Jahren gewinnen zunehmend auch ökologische Aspekte an Bedeutung.

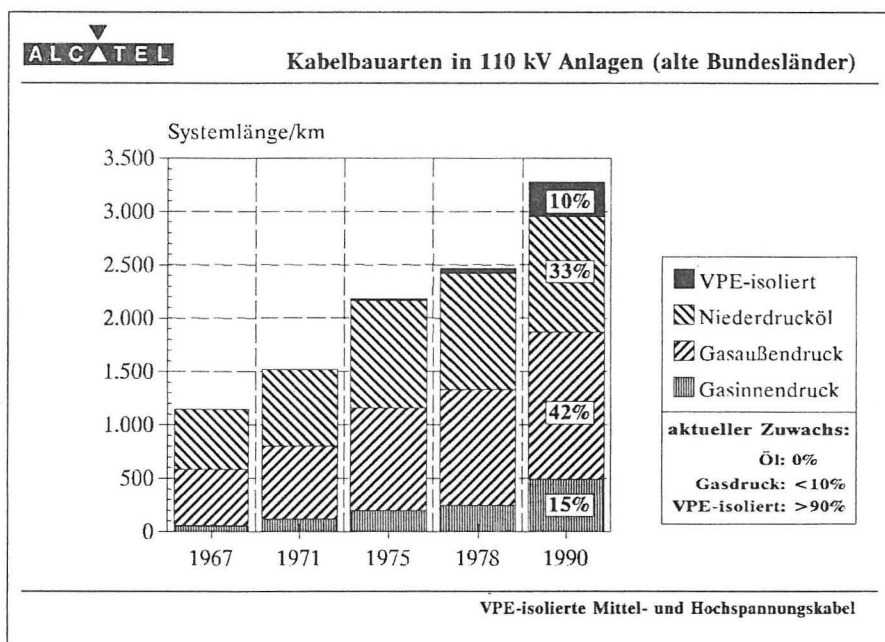
Tabelle 1.2 zeigt die Gesamtentwicklung des deutschen Energieversorgungsnetzes und den spezifischen Kabelanteil.

	> 1 bis 60 kV		110 kV		≥ 220 kV	
	System- länge in Tkm	Anteil Kabel Tkm	System- länge in Tkm	Anteil Kabel Tkm	System- länge in Tkm	Anteil Kabel km
1991	464	267 / 58 %	73,2	4,2 / 5,7 %	40	38 / 0,1 %
1992	471	277 / 59 %	73,3	4,3 / 5,8 %	40	38 / 0,1 %
1993	471	281 / 60 %	74,4	4,4 / 5,9 %	40	38 / 0,1 %
1994	465	279 / 60 %	74,4	4,4 / 5,9 %	40	38 / 0,1 %
1995	476	294 / 62 %	74,7	4,7 / 6,2 %	40	38 / 0,1 %
1996	480	302 / 63 %	74,7	4,7 / 6,3 %	41,1	93 / 0,2 %

**Tabelle 1.2: Stromkreislängen und Kabelanteil in Mittel- und Hochspannungsnetzen in Deutschland /1/**

Der Wiederbeschaffungswert des deutschen Kabelnetzes für Spannungen > 1 kV beträgt nach Schätzungen der PreussenElektra Engineering GmbH ca. 35 Mrd. DM /2/.

Im Zusammenhang mit der hier diskutierten Problematik ist allerdings neben dem Gesamtvolumen die Frage wichtig, aus welchen Kabelbauarten sich dieses Netz derzeit zusammensetzt. Beispielhaft ist in Bild 1.1 die Verteilung für die 110 kV Ebene angegeben.



**Bild 1.1: Kabelbauarten im 110 kV Netz**

Wesentlich dabei ist, daß offensichtlich alle in Tabelle 1.1 erwähnten Hochspannungskabeltypen in größerem Umfang auch heute noch im Netz betrieben werden. Da diese Aussage qualitativ auch für die Mittelspannungsebene zutrifft, müssen Überlegungen zur Alterung, zur Zustandsdiagnose und zu evtl. möglichen Sanierungsmaßnahmen das gesamte Spektrum der Kabelbauarten umfassen.

## 2. Komponenten von Kabelsystemen

Kabel sind prinzipiell nur als Kabelsystem in Verbindung mit der entsprechenden Garnitur als Verbindungselement zwischen Einzellängen oder als angepaßter Schnittstelle zu vor- und nachgeschalteten Betriebsmitteln einsetzbar.

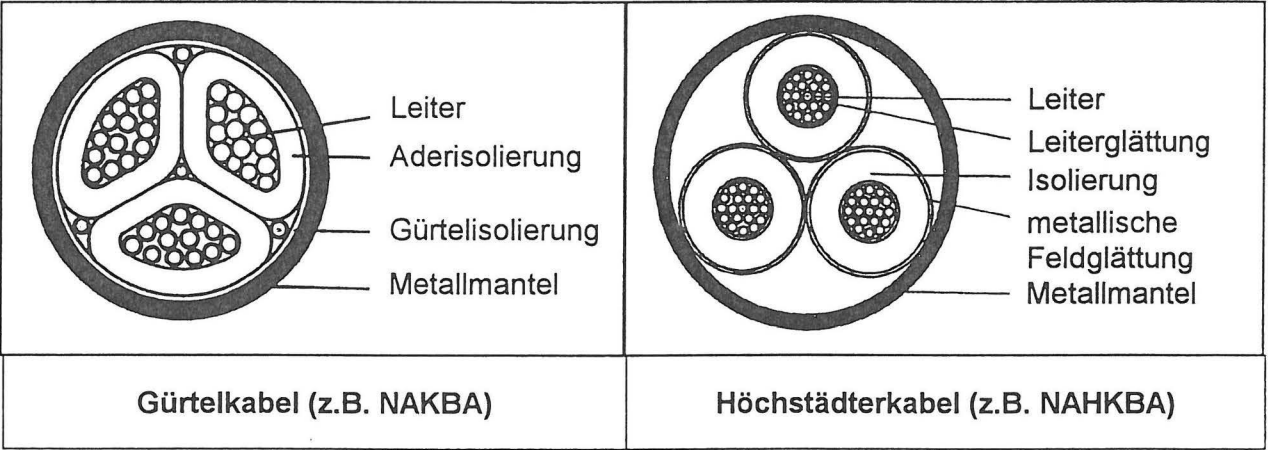
Fragen der Langzeiteigenschaften und Alterungsphänomene in und an Kabelsystemen sind eng verknüpft mit den Besonderheiten der individuellen Bauarten aller Systemkomponenten aber auch mit den sehr unterschiedlichen Montagetechniken.

### 2.1 Kabel

#### 2.1.1 Papierisolierte Kabel

Bild 2.1.1.1 zeigt die im Mittelspannungsbereich im wesentlichen eingesetzten 3-adrigen, papierisierten Kabelbauarten (Mittelspannungs-Massekabel). Beide Kabeltypen sind thermisch nicht stabil d.h., bei wiederholten Lastwechseln im Betrieb ist mit der Bildung von Hohlräumen in der Isolierung zu rechnen (und damit dem Zünden von Teilentladungen). Eine Verwendung als Hochspannungskabel ist dadurch ausgeschlossen.

Das Gürtelkabel besitzt in der Regel Sektorleiter; über der eigentlichen Aderisolierung liegt unter dem Bleimantel eine gemeinsame Gürtelisolierung. Entsprechend der Anordnung ist das elektrische Feld nicht symmetrisch und die Ausnutzung der Papierisolierung über dem Umfang ungleichmäßig. Im Unterschied dazu wird im sog. Höchstädterkabel das elektrische Feld jeder Ader durch ein metallisiertes Papier auf ein reines Radialfeld begrenzt.

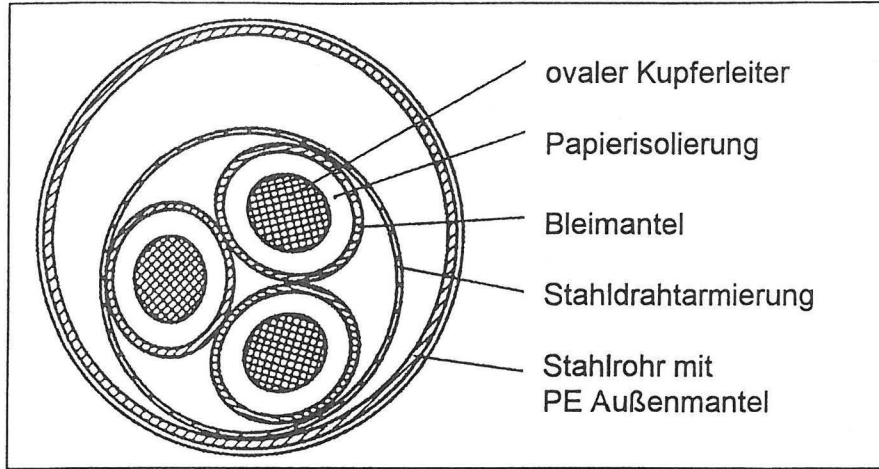


**Bild 2.1.1.1: Bauarten papierisolierter Mittelspannungskabel (Massekabel)**

Hochspannungsanwendungen erfordern thermisch stabile papierisierte Kabel, die aufgrund ihres Funktionsprinzips auch bei thermomechanischer Wechselbeanspruchung eine hohlraumfreie Isolierung gewährleisten.

Bild 2.1.1.2 zeigt einen Querschnitt des 3-adrigen Gasaußendruckkabels. Die jeweils mit einem Bleimantel umhüllten Einzeladern mit ovalem Leiter und massegetränkter Papierisolierung sind miteinander verseilt und mit Stahldrähten armiert. Bei der Verlegung wird das Kabel an dieser Armierung in vorverlegte Stahlrohre eingezogen. Das Stahlrohr steht unter hohem Stickstoffdruck (ca. 15 bar), der in Verbindung mit dem ovalen Leiter und den plastisch verformbaren Bleimänteln Hohlräumbildungen in der Isolierung bei Dehnungsspielen verhindert.

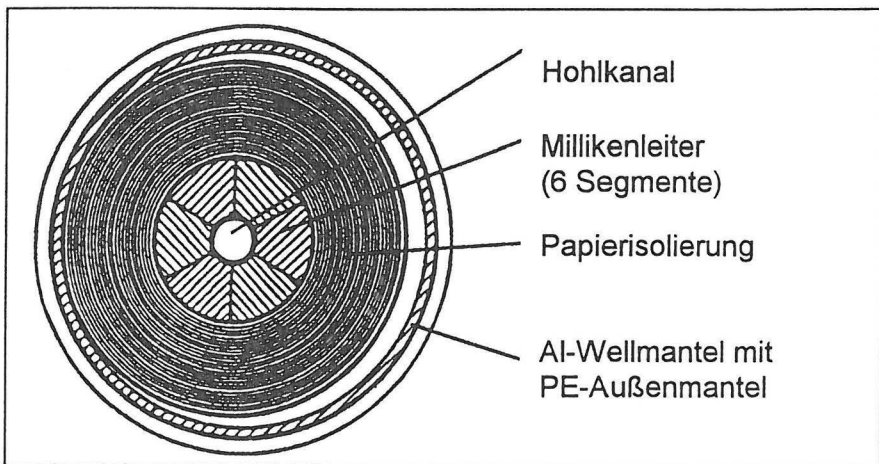




**Bild 2.1.1.2:**  
**Gasaußendruckkabel**  
**(110 kV)**

Eine weitere Variante papierisolierter Hochspannungskabel ist das Niederdruckölkabel wie in Bild 2.1.1.3 dargestellt.

Die Papiere sind bei dieser Bauart mit niederviskosem Kabelöl getränkt, das unter leichtem Überdruck steht und sich innerhalb des Hohlkanals im Leiter und unter dem Metallmantel aus Blei oder Aluminium frei bewegt. Damit kann von den Enden des Kabelsystems aus mit Drucktanks das mit der Temperatur wechselnde Volumen des Kabels ausgeglichen und eine Hohlraumbildung verhindert werden.



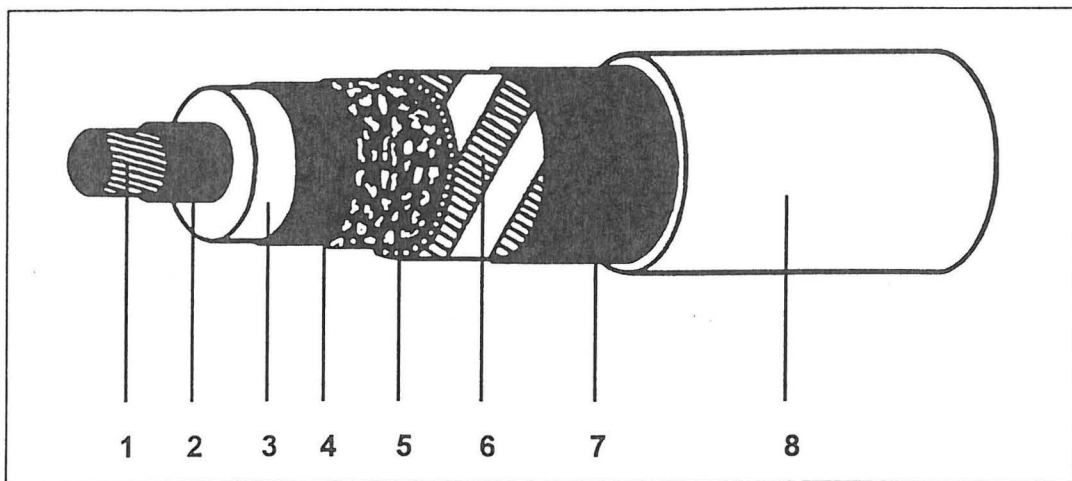
**Bild 2.1.1.3:**  
**Niederdruckölkabel**  
**(bis 420 kV)**

## 2.1.2 VPE-isolierte Kabel

Wesentliches Merkmal VPE-isolierter Kabel ist das 3-schichtige, in der Regel in einem Arbeitsgang (Dreifachspritzkopf) hergestellte Isoliersystem, bestehend aus innerer Leitschicht, Isolierschicht und äußerer Leitschicht.

Im Mittelspannungsbereich werden heute aufgrund der ökonomischen und ökologischen Vorteile praktisch nur noch VPE-isolierte Bauarten verlegt, bei Hochspannungskabeln ist die Substitution der Papierkabel bei Neuanlagen ebenfalls weitgehend abgeschlossen.

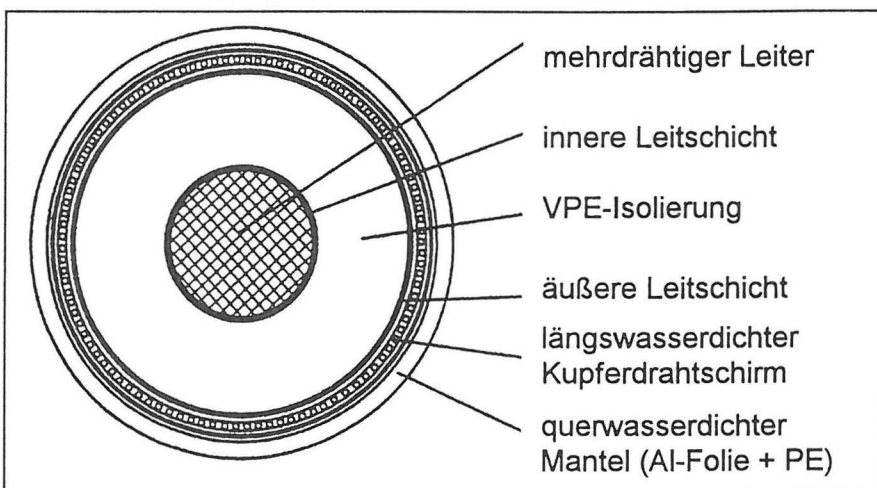
Die Standardausführung eines VPE-Mittelspannungskabels ohne zusätzliche Maßnahmen z.B. zur Längs- und Quersdichtheit zeigt Bild 2.1.2.1. Über dem oben erwähnten Isoliersystem befindet sich hier auf einem Polster der Kupferdrahtschirm mit Gegenwendel als äußerer Abschluß des elektrischen Feldes. Der Außenmantel aus Polyethylen (PE) bietet den erforderlichen mechanischen Schutz des Systems.



**Bild 2.1.2.1: VPE-isoliertes Mittelspannungskabel**

- |                         |                       |                   |
|-------------------------|-----------------------|-------------------|
| 1: mehrdrähtiger Leiter | 4: äußere Leitschicht | 7: Bandierung     |
| 2: innere Leitschicht   | 5: Schirmbettung      | 8: PE-Außenmantel |
| 3: VPE-Isolierung       | 6: Kupferdrahtschirm  |                   |

Die in Deutschland übliche Bauart des VPE-isolierten Hochspannungskabels unterscheidet sich davon im wesentlichen durch die längswasserdichte Konstruktion des Drahtschirmes durch Einbringen quellfähiger Werkstoffe und den Einsatz eines Schichtenmantels, bei dem eine Aluminiumfolie unter dem PE-Außenmantel für die zusätzliche Querwasserdichtheit des Kabels sorgt (siehe Bild 2.1.2.2).



**Bild 2.1.2.2:  
VPE-isoliertes  
Hochspannungskabel  
(bis 420 kV)**

## 2.2 Garnituren

Kabelgarnituren lassen sich im wesentlichen in 2 Gruppen einteilen: Muffen und Endverschlüsse. Muffen dienen ganz allgemein zum Verbinden einzelner Kabellängen, die von gleicher aber auch von unterschiedlicher Bauart sein können.

Endverschlüsse sind die Schnittstellen zwischen Kabeln und anderen Betriebsmitteln innerhalb des Netzes. Dazu gehören z.B. Freiluft- oder gasisolierte Schaltanlagen, Freileitungen, Transformatoren und rotierende Maschinen.

Der Vielfalt unterschiedlicher Aufgabenstellungen innerhalb dieser Klassifikation entspricht das breite Spektrum der unterschiedlichen Bauformen und Ausführungen von Garnituren. Trotzdem lassen sich grundsätzliche Gemeinsamkeiten erkennen, die gerade für die Frage der Alterung von Bedeutung sind.

In Tabelle 2.2.1 sind dazu einige wesentlich Garniturentypen mit ihren elektrischen und mechanischen Funktionen aufgelistet.

Bezeichnung	mechanische Funktion	elektrische Funktion
Endverschluß (EV)		
Freiluft-EV	- mech. Stabilisierung des Kabelendes (Porzellan, Verbundisolator)	- Feldsteuerung an der Kante der äußeren Kabelleitschicht  - stromtragfähiger Anschluß
Schaltanlagen-EV		
Transformator-EV		
Muffe		
Verbindungs-muffe	- Schutz der Verbindungsstelle	- stromtragfähige Leiterverbindung  - kabeläquivalente elektrische Isolierung der Verbindungsstelle
Übergangsmuffe		

Tabelle 2.2.1: Bauarten und Funktionen von Kabelgarnituren

2.2.1 Endverschlüsse

Zur sicheren Beherrschung des elektrischen Feldes im Endverschluß sind bei Mittel- und Hochspannungsgarnituren feldsteuernde Maßnahmen an der Absetzkante der äußeren Leitschicht bzw. über der freien Kabelader erforderlich.  
Im Falle papierisolierter Kabel wird dazu die Isolierung mit definierter Steigung keulenartig aufgedickt und, falls erforderlich mit zusätzlichen metallischen Einlagen, eine kapazitive Feldsteuerung erreicht.

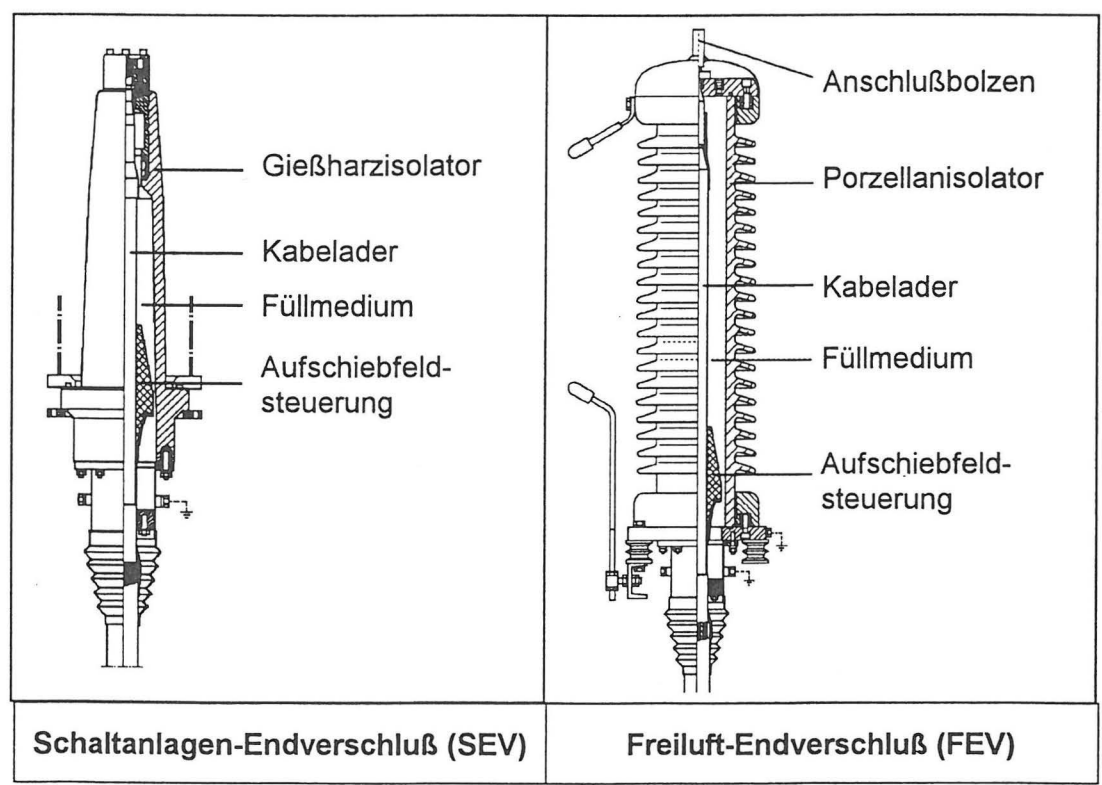


Bild 2.2.1.1: Endverschlüsse für VPE-isolierte Hochspannungskabel

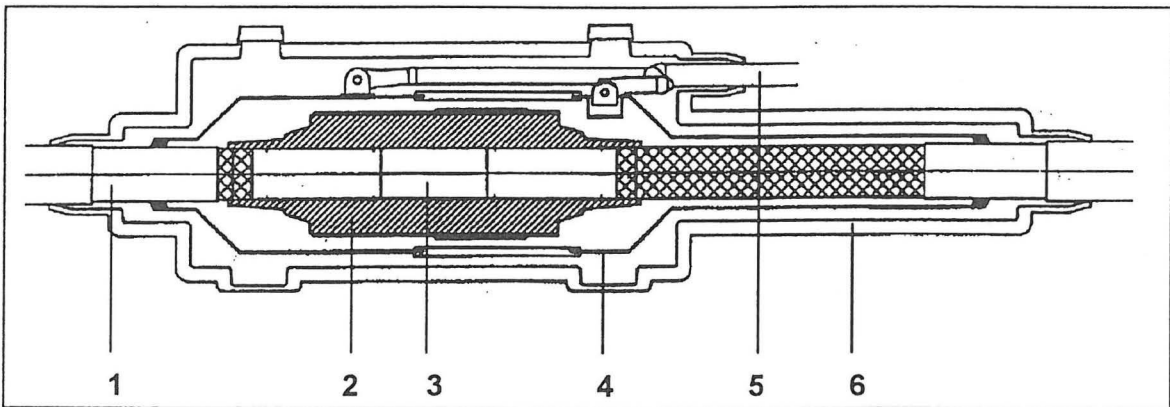
Bei kunststoffisolierten Bauarten werden in der Regel Aufschiebfeldsteuerelemente aus Silikon-Gummi oder EPR montiert, deren integrierte Elektrode aus leitfähigen Compounds das elektrische Feld an der Absetzkante aufweitet und unzulässige Feldstärken verhindert (siehe Bild 2.2.1.1).

## 2.2.2 Muffen

Wie in Tabelle 2.2.1 erwähnt besteht die wesentliche Aufgabe bei der „elektrischen“ Konstruktion von Kabelmuffen darin, das in diesem Bereich unterbrochene Kabelisoliersystem äquivalent zu ergänzen.

Die dazu eingesetzten Techniken sind ähnlich denen beim Endverschluß: definiert aufgebraachte Papierwickel beim papierisolierten Kabel und vorgefertigte Kunststoff-Aufschiebelemente mit eingebetteten Feldsteuerelektroden bei VPE-isolierten Typen. Zusätzlich zur Feldsteuerung an den Enden der äußeren Leitschichten bedarf hier jedoch auch die elektrisch hochwertige Glättung der unregelmäßig geformten Leiterverbindung besonderer Maßnahmen.

Bild 2.2.2.1 zeigt beispielhaft den Aufbau einer Verbindungsmuffe für VPE-isolierte Hochspannungskabel.



**Bild 2.2.2.1: Verbindungsmuffe für VPE-isolierte Hochspannungskabel**

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| 1: Kabel  | 4: metallische Hülle      |
| 2: vorgefertigter Muffenkörper mit Feldsteuerelektroden | 5: Cross-bonding Anschluß |
| 3: Leiterverbindung                                     | 6: äußere Schutzhülle     |

## 2.3 Montagetechniken

Garnituren innerhalb von Kabelsystemen müssen trotz des zunehmenden Einsatzes vorgefertigter und vorgeprüfter Komponenten im wesentlichen immer noch nach der Kabelleitung auf der Baustelle montiert werden. Selbst bei optimalen Randbedingungen bleibt deshalb die Herstellung einer Isolieranordnung, die vergleichbar ist mit der im kontinuierlich maschinengefertigten Kabel, ein nur schwer erreichbares Ziel.

Gerade in papierisolierten Kabelsystemen älterer Bauart und nach langen Betriebszeiten muß den Garnituren deshalb bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit und der weiteren Betriebstüchtigkeit besondere Beachtung geschenkt werden.

Die Frage nach möglichen Sanierungsmaßnahmen steht dabei in engem Zusammenhang mit den angewendeten Montagetechniken und der Demontierbarkeit.

Tabelle 2.3.1 gibt dazu einen Überblick in den Montagebereichen Leiterverbindung, Aufbau der Feldsteuerung/Muffenisolierung und Korrosionsschutz.

	Montagetechnik	Demontierbarkeit
Leiterverbindungen	Preßverbindung	zerstörend
	Schweißverbindung	zerstörend
	Schraubverbindung (mit Abreißschrauben)	zerstörend
Aufbau der Feldsteuerung und Muffenisolierung	Aufschiebtechnik	teilweise demontierbar
	Schrumpftechnik	teilweise demontierbar
	Wickeltechnik (Papier, selbstverschweißende Bänder)	teilweise demontierbar
Korrosionsschutz	Vergußtechnik	zerstörend
	Gießharztechnik	zerstörend
	Schrumpftechnik	teilweise demontierbar
	Wickeltechnik (selbstver- schweißende Bänder)	teilweise demontierbar

Tabelle 2.3.1: Montagetechniken bei Mittel- und Hochspannungskabelsystemen

3. Alterung

3.1 Grundlagen

Alle biologischen und technischen Systeme unterliegen während ihrer Lebensdauer mikro- skopischen und makroskopischen Veränderungen, die allgemein mit dem Begriff „Alterung“ beschrieben werden und die in der Regel nachteilige Entwicklungen der Systemeigen- schaften bewirken.

Im Hinblick auf Kabelsysteme soll nachfolgend nur auf die Alterung des Isoliersystems selbst eingegangen werden, die sich in einer Verminderung der elektrischen Festigkeit zeigt und mit äußeren Maßnahmen im Betrieb in der Regel nicht beeinflusst werden kann. Die prinzipiellen Zusammenhänge dazu sind in Bild 3.1.1 dargestellt.

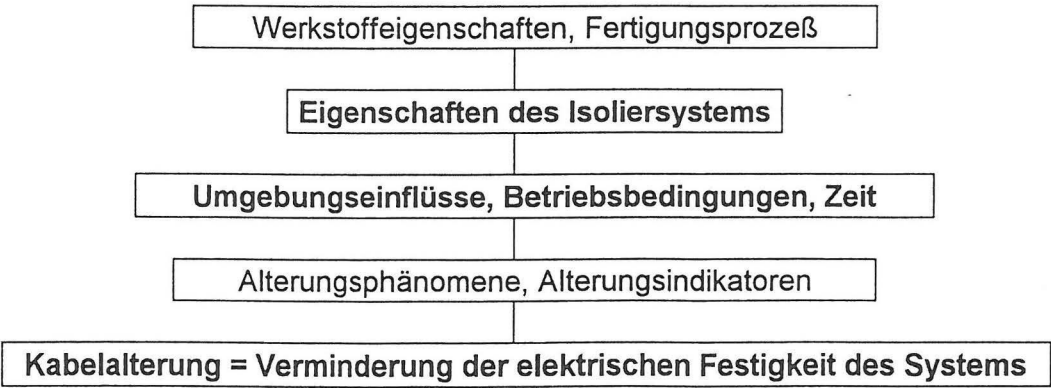


Bild 3.1.1: Alterung von Kabelsystemen

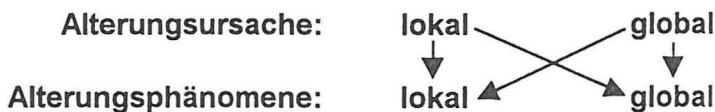
Die Dynamik dieses Alterungsprozesses im Hinblick auf Kabel ist sowohl systemspezifisch, als auch abhängig von der Summe aller äußeren und inneren elektrischen und nichtelektrischen Beanspruchungen also z.B. der Verlege- und Betriebsbedingungen /3/.

Darüber hinaus muß prinzipiell unterschieden werden zwischen dem **nominalen Alter**, also der Zeitspanne von der Herstellung bis zum Beobachtungszeitpunkt und dem **realen Alter**, das den Lebensdauerverbrauch durch die Funktionsausübung beschreibt und für den Betreiber der Kabelanlage von weitaus größerer Bedeutung ist.

### 3.1.1 Ursache und Wirkung

Voraussetzung für die Beherrschung des Phänomens „Alterung“ ist das Verständnis der Zuordnung von Ursache und Wirkung. Alterungsphänomene, insbesondere optisch auffindbare, können zwar den Durchschlag des Kabels einleiten, sind aber letztlich nur die Reaktion des Systems auf Einwirkungen von innen oder außen.

Überlegungen hinsichtlich Prävention und Diagnose basieren auf diesem Hintergrund in der Differenzierung zwischen lokalen und globalen Alterungsursachen, die in Folge zu lokalen und globalen Alterungsphänomenen führen können.



### Papierisolierte Kabel

Die elektrische Festigkeit papierisolierter Kabel wird wesentlich durch die Qualität des Imprägnier- und Tränkvorganges bestimmt. Der erste Schritt ist dabei ein Aufheizen der Kabelader unter Vakuum, um die im Papier vorhandene Feuchtigkeit auszutrocknen. Danach wird, ebenfalls bei hohen Temperaturen und Vakuum, das Tränkmittel zugeführt, um eine blasen- und hohlraumfreie Durchdringung der Isolierung sicherzustellen.

Je nach Spannungsebene des späteren Kabels erfolgt dann ohne oder mit nur noch kurzzeitigem Kontakt mit der Umgebungsluft die Fertigung der hermetisch geschlossenen metallischen Hülle als gemeinsamem Aufbauelement aller papierisolierten Kabelbauarten.

Vor der Entwicklung extrudierbarer Kunststoffschichten war dieser Metallmantel sicher die einzige technische Möglichkeit, die mehr oder minder viskosen Tränkmittel zurückzuhalten und die Papierisolierung vor der Austrocknung zu bewahren. Tatsächlich stellt sie jedoch auch das wirksamste Mittel dar, den Alterungsprozeß des von ihr eingeschlossenen wasser- und hohlraumfreien Isoliersystems zu verlangsamen, was zu dem in Bild 3.1.2.1 dargestellten praktisch horizontalen Verlauf der Lebensdauerkurve führt.

Alterung setzt bei papierisolierten Kabelsystemen demnach ein, wenn sich der ursprüngliche Tränkungszustand des Isolierwickels verändert. Dafür kommen im wesentlichen 3 Ursachen in Betracht:

- eine Beschädigung des metallischen Kabelmantels, Austritt von Tränkmittel und Eindringen von Luft und Wasser,
- das Auftreten von Undichten an den Garnituren und



- die Bildung von Hohlräumen und ausgetrockneten Bereichen durch eine Erhöhung des Volumens unter dem Metallmantel (insbesondere Bleimantel) durch thermomechanische Effekte bei Wechsellast.

In allen 3 Fällen wird das Isoliervermögen des geschichteten Dielektrikums stark herabgesetzt und das Einsetzen von Teilentladungen (TE) begünstigt, die lokale Verkohlungen zur Folge haben und den endgültigen Durchschlag der Isolierung einleiten.

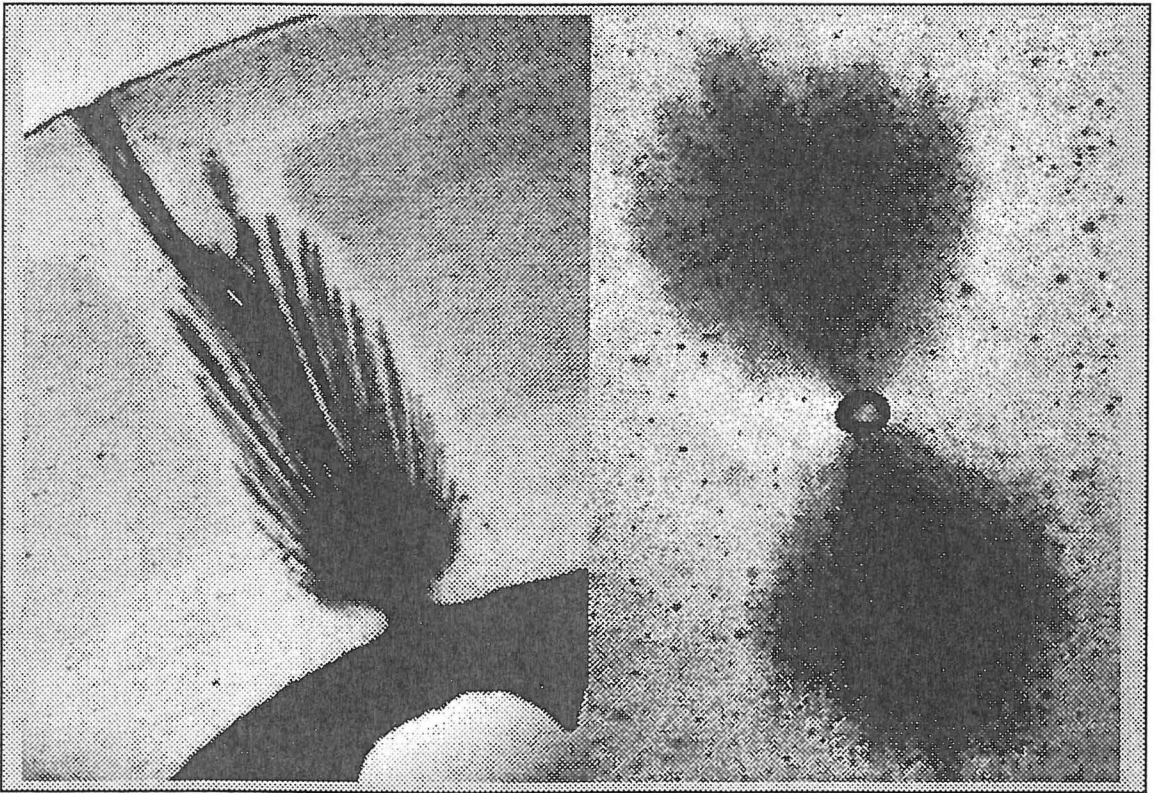
Bei Ölkabeln führt der Kontakt mit der Außenluft an der Schadenstelle darüber hinaus zu einer globalen Verschlechterung der Ölqualität (Wassergehalt, Gasgehalt) und zu einer oxidativen Alterung (Erhöhung des Verlustfaktors, Absenkung der Durchschlagfestigkeit.), was aufwendige Sanierungsmaßnahmen erforderlich machen kann (siehe auch Abschnitt 3.4).

### VPE-isolierte Kabel

Mit dem Übergang zu VPE-isolierten Kabeln ohne geschlossenen Metallmantel im Mittelspannungsbereich war in den sechziger Jahren die Hoffnung verbunden, auch die Anfälligkeit des geschichteten Papierisoliersystems gegenüber Feuchtigkeit überwinden zu können. Diese Hoffnung erfüllte sich nicht. Schon bald kam es zu Ausfällen, zurückzuführen auf wasserangereicherte Strukturen innerhalb des Kunststoffes, die aufgrund ihrer teilweise bäumchenartigen Struktur als water trees (wt) bezeichnet wurden.

Man unterscheidet dabei zwischen den bow tie trees (btt) an einer Inhomogenität in der Isolierung und den vented trees (vt) mit einem Fußpunkt auf einer der beiden Leitschichten (siehe Bild 3.1.1).

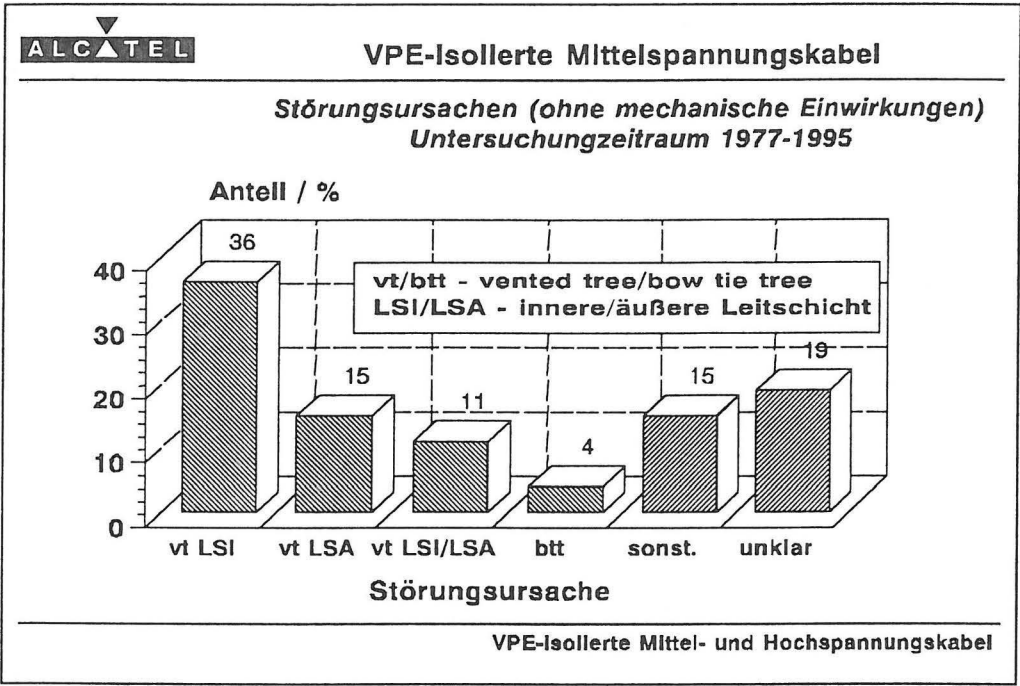
Bis heute sind die Abläufe bei der Bildung von wt's nicht endgültig geklärt, Wasser und insbesondere ein inhomogener Verlauf des elektrischen Feldes sind jedoch zur Initiierung unbestritten erforderlich.



**Bild 3.1.1.1: Vented tree (links) an der inneren Leitschicht und bow tie tree (rechts) in der Isolierung eines VPE-Mittelspannungskabels**

Water trees sind zwar augenfällige Indikatoren für die Kabelalterung, stellen aber erst dann eine Gefährdung für das Isoliersystem dar, wenn sie durch ihre Struktur eine weitere Verzerrung des elektrischen Feldes bewirken, dadurch lokal die maximale Festigkeit des Werkstoffes überschritten wird und durch Teilentladungen die Erosion des Polymers einsetzt. Das Wachstum feiner Entladungskanäle (electrical tree) kommt in der Regel nicht mehr zum Stillstand und leitet den endgültigen Durchschlag der Isolierung ein (Bild 3.1.1.1: vt mit Durchschlagkanal).

Bild 3.1.1.2 verdeutlicht die technisch/wirtschaftliche Bedeutung dieses Phänomens. Ausgewertet wurden die Störungsursachen an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln ohne Berücksichtigung der mechanischen Einwirkungen insbesondere bei Tiefbaumaßnahmen. Bei immerhin 66% der untersuchten Proben konnte ein Zusammenhang des Durchschlages mit dem Wachsen von water trees nachgewiesen werden.



**Bild 3.1.1.2: Störungsursachen von VPE-isolierten Mittelspannungskabeln**

Zur Beherrschung des water treeing wird in Deutschland bei Hochspannungskabeln eine längs- und querwasserdichte Bauart eingesetzt. Bei den Mittelspannungskabeln wurde durch die gezielte Auswahl und Entwicklung von Werkstoffen, durch Modifikation des Aufbaus und durch eine Optimierung der Fertigungsprozesse die wt-Resistenz derart verbessert, daß auch bei Vorliegen von beliebigen Mengen Wasser im Kabel eine Lebensdauer im Bereich von 40-50 Jahren prognostiziert werden kann (siehe Abschnitt 3.1.2).

Für Kabel aus aktueller Fertigung müssen die bestimmenden Alterungsfaktoren deshalb verstärkt in optisch nicht mehr nachweisbaren globalen Veränderungen des Isoliersystems und seiner Grenzflächen gesucht werden. Dazu gehören Rekristallisationsvorgänge in der Polymermatrix, ein im wesentlichen durch Sauerstoffeinfluß initiiert oxidativer Abbau mit der Bildung freier Radikale und die Migration von niedermolekularen Bestandteilen im elektrischen Feld.

Die Dynamik dieser morphologischen Alterung ist nach heutigem Wissen in der Regel verglichen mit dem wt-Wachstum extrem langsam, führt aber ebenfalls zu einer Verminderung der elektrischen Festigkeit.

### 3.1.2 Lebensdauerprognose

Von entscheidender Bedeutung für den Betreiber ist die Zuverlässigkeit, die ganz allgemein als statistische Verfügbarkeit der Kabelanlage in Abhängigkeit vom realen Alter in Überlegungen bezüglich der Versorgungssicherheit des Netzes berücksichtigt werden muß.

Wegen der Vielfalt der Bauarten und dem breiten Spektrum der Verlege- und Betriebsbedingungen können jedoch auf der Basis des Ausfallverhalten aller Kabelstrecken nur mit vergleichsweise geringer statistischer Sicherheit Aussagen für das Einzelsystem getroffen werden.

Es sind deshalb trotz langjähriger Betriebserfahrung auch weiterhin umfangreiche Untersuchungen erforderlich, um die Lebensdauer bzw. die Restlebensdauer von Kabelsystemen zu prognostizieren. Im wesentlichen werden dabei 2 Wege beschritten:

#### Prognose der Lebensdauer aus Prüfungen an neuwertigen Kabeln:

Der traditionelle Ansatz führt über die Extrapolation von Ergebnissen aus Kurzzeitversuchen (typisch: bis einige 100h) mit konstanter Feldstärke unter definierten Bedingungen mit Hilfe des sog. Lebensdauergesetzes (inverse power law) als mathematischem Modell, wie in Bild 3.1.2 für Hochspannungskabel dargestellt.

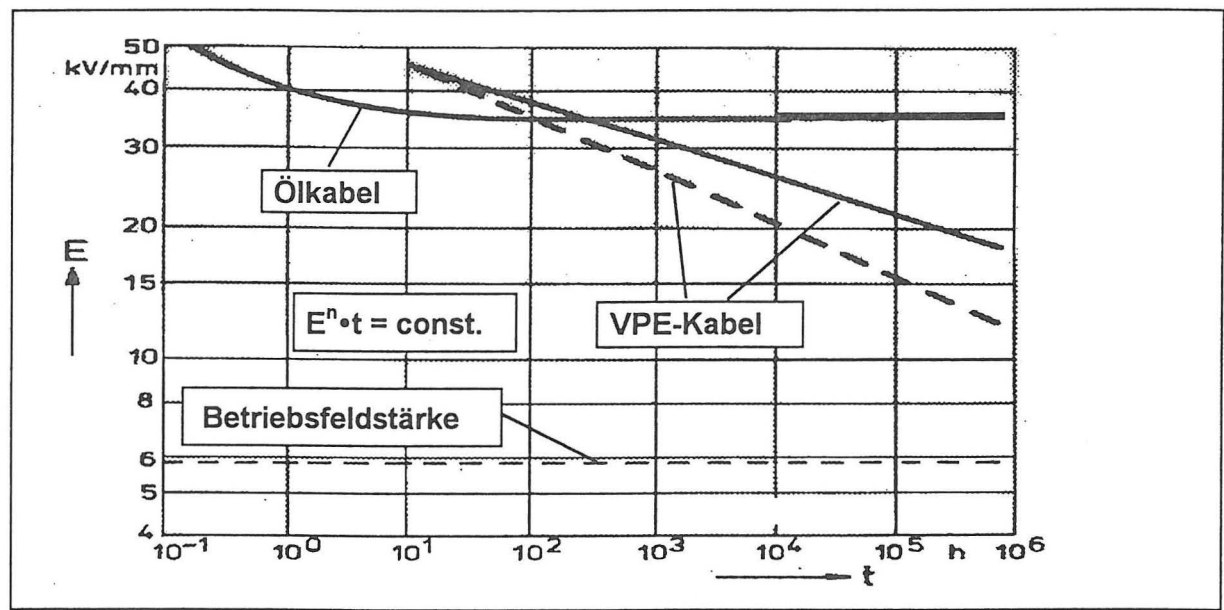


Bild 3.1.2.1: Lebensdauerkurven von Hochspannungskabeln

Nicht berücksichtigt werden bei diesem Verfahren in der Regel die neben der Feldstärke zusätzlich denkbaren alterungsbeschleunigenden Parameter wie Temperatur und Feuchtigkeit, die sich vor allem bei VPE-isolierten Kabeln als wesentlich herausgestellt haben. Deshalb wurden speziell für VPE-isolierte Mittelspannungskabel Langzeitprüfverfahren entwickelt, in denen Prüflingskollektive bis zu 2a gealtert werden, aus deren Restfestigkeiten auf der Basis bestehender Erfahrungen eine Aussage über die zu erwartende mittlere Lebensdauer im Betrieb gewonnen werden kann.

Um die erforderliche qualitative und quantitative Korrelation zu den Alterungsvorgängen im Netzbetrieb zu gewährleisten muß dabei trotz einer möglichst wirksamen Beschleunigung der Alterung sichergestellt bleiben, daß die Ergebnisse nicht durch Initiierung völlig neuer Alterungsmechanismen verfälscht werden.

Die wesentlichen Parameter des derzeit in den VDE-Prüfvorschriften für VPE-isolierte Mittelspannungskabel festgelegten Prüfverfahrens sind in Tabelle 3.1.2.1 aufgelistet.

<b>Konditionierung:</b>	- 5 Prüflinge, 12/20 kV, 150mm², Alu (je 10m aktive Länge) - 7d bei 90°C
<b>Alterungsverfahren:</b>	- 3x5 Prüflinge, 12/20 kV, 150mm², Alu (je 10m aktive Länge) - Prüfspannung $4U_0=48\text{kV}$ , Temperatur des Isoliersystems 50°C - Wasser im Leiter und im Schirm
<b>Auswerteprogramm:</b>	- Steptestfestigkeit nach Konditionierung, 0.5a, 1a und 2a - water tree Entwicklung nach 2a
<b>Anforderungen:</b>	- Kleinstwert für jede Prüfreihe $\geq 9U_0$ - Nennwert der Weibull-Verteilung $\geq 12U_0$ - water tree Länge nach 2a $\leq 1\text{mm}$

**Tabelle 3.1.2.1: Langzeitprüfverfahren nach DIN VDE 0276-620**

Nach allgemeiner Einschätzung kann für Kabel, die diese Langzeitprüfung bestehen und keinen extremen Betriebsbeanspruchungen ausgesetzt sind, eine mittleren Lebensdauer von 40-50 Jahren erwartet werden. Eine unmittelbare Berechnung ist aufgrund der vielfältigen Einflußfaktoren und der komplexen Wechselwirkungen nicht möglich /4/.

**Prognose der Restlebensdauer von betriebsgealterten Kabeln:**

Im Rahmen des Konzeptes einer vorbeugenden Instandhaltung und Austauschplanung kommt einer Prognose der Restlebensdauer nach langen Betriebszeiten eine immer größere Bedeutung zu.  
Auch bei betriebsgealterten Kabeln kann jedoch aus Untersuchungen nur der aktuelle Zustand des Systems ermittelt und daraus mit vorhandenen Erfahrungen die Restlebensdauer abgeschätzt werden. Es besteht bisher keine Möglichkeit, die Dynamik des Alterungsprozesses zuverlässig zu beschreiben und die individuell noch verbleibende Betriebszeit hochzurechnen.

Die derzeit genutzten Verfahren zur Bestimmung des Alterungszustandes als Basis der Restlebensdauerprognose gliedern sich nach ihren Auswirkungen auf die untersuchte Kabellänge in 3 Gruppen (siehe auch Kapitel 3.3.3):

- zerstörend:** Probenentnahme und Prüfung im Labor,
- lebensdauerverbrauchend:** Spannungs- Teilentladungs(TE)-Messungen vor Ort
- Polarisationsmessungen:** Ermittlung des Polarisationsverhalten vor Ort

**3.2 Prävention**

Die wirkungsvollste Methode, jede Art von Alterung zu bekämpfen ist die Vorbeugung. Bei technischen Systemen kann damit bei der Auswahl spezieller Konstruktionen und Werkstoffen begonnen werden mit denen nach dem Stand der Technik ein Produkt mit überprüfbar hohem Qualitätsstandard realisiert wird.  
Im Bereich der Kabeltechnik gehört dazu jedoch auch die optimierte Verlege- und Montage-technologie und soweit möglich die systemspezifische Wartung.  
Für den Anwender ergibt sich die Notwendigkeit, den Betriebszustand zu überwachen, um unzulässige und alterungsbeschleunigende Beanspruchungen zu vermeiden.



3.2.1 Design und Produktqualität

Papierisolierte Kabel haben in der Kabelherstellung ihre Bedeutung weitgehend verloren, deshalb soll nachfolgend im wesentlichen auf Aspekte eingegangen werden, die für VPE-isolierte Mittel und Hochspannungskabel von Bedeutung sind.

Wie in 3.1 erläutert wird die Alterung von VPE-Isoliersystemen wesentlich durch den Einfluß von Wasser und den Kontakt mit dem Luftsauerstoff bestimmt. Zumindest freies Wasser läßt sich durch die Auswahl spezieller Konstruktionen mit Maßnahmen zur Längs- und/oder Querwasserdichtheit weitgehend vermeiden. Dieser Weg wird bei Hochspannungskabeln eingeschlagen, in der Mittelspannung sind derzeit nur etwa 40% der gefertigten Kabel im Schirmbereich längswasserdicht und < 10% längs- und querwasserdicht. Die Gründe dafür liegen sicher in der inzwischen hohen Alterungsstabilität der Standardkonstruktion durch optimierte Werkstoffe und Prozesse, aber auch in dem für diese Bauarten höheren Preis.

Gerade zur Sicherstellung eines hervorragenden Langzeitverhaltens solcher Bauarten ohne aufwendige konstruktive Zusatzmaßnahmen ist ein abgestimmtes Prüfsystem unbedingt erforderlich, das schon bei den eingesetzten Werkstoffen beginnt, umfangreiche fertigungsbegleitende Prüfungen umfaßt und schließlich in eine Vielzahl von Prüfungen am fertigen Kabel mündet (siehe Tabelle 3.2.1.1).

Qualitätsnachweis durch Prüfungen		
Werkstoffe	Halbfabrikat	Produkt
Wareneingangsprüfung	fertigungsbegleitende Prüfungen	Typprüfung Auswahlprüfung Stückprüfung Langzeitprüfung

Tabelle 3.2.1.1: Prüfsystem für Energiekabel

Den Prüfungen am fertigen Produkt kommt dabei sicher besondere Bedeutung zu, da hier die qualitätsbeeinflussenden Faktoren aller Komponenten mit ihren komplexen Wechselwirkungen erfaßt werden können. In Tabelle 3.2.1.2 sind die wesentlichen Arten von Produktprüfungen am Kabel mit ihrer spezifischen Zielsetzung aufgelistet.

Diese Gruppe der Prüfungen ist dabei auch nicht auf das Kabel beschränkt, sondern umfaßt das gesamte Kabelsystem mit den Garnituren, um insbesondere die Kompatibilität im Hinblick auf Werkstoffe und thermomechanische Beanspruchungen nachzuweisen.

	Ziel der Prüfung
Entwicklungsprüfung:	alternative Konstruktionskonzepte Werkstoffauswahl
Typprüfung:	Konstruktion Werkstoffe
Stückprüfung:	Fertigungsqualität
Auswahlprüfung:	Aufbau und Geometrie
Systemtypprüfung:	Typprüfung des Kabels mit Garnituren
Langzeitprüfung:	Alterungsverhalten unter erhöhten Beanspruchungen

Tabelle 3.2.1.2: Produktprüfungen für Kabelsysteme

### 3.2.2 Kabellegung und Garniturenmontage

Zwischen der letzten Qualitätsprüfung im Herstellerwerk und dem Betrieb des Kabelsystems als Mittel zur Energieübertragung und -verteilung liegen in Form der Kabellegung und der Garnitureninstallation Arbeitsvorgänge, die das Langzeitverhalten in weit höherem Maße beeinflussen können, als das bei anderen Betriebsmitteln erwartet werden muß. Die in 3.2.1 vorgestellte Prüfsystematik wird deshalb ergänzt durch Vor-Ort Prüfungen, in denen speziell die einwandfreie Verlege- und Montagequalität nachgewiesen werden muß.

#### Kabellegung

Verfahren zur Kabellegung werden seit dem Beginn der Kabeltechnik entwickelt und mit dem Ziel optimiert, in diesem kostenintensiven Bereich kabeltypspezifische, wirtschaftliche Lösungen zu finden /5/.

Aus der Vielzahl unterschiedlicher Gesichtspunkte bei der Trassenfestlegung und -vorbereitung, bei der Auswahl der Verletechnik und flankierender Maßnahmen sollen 2 Aspekte besonders herausgehoben werden:

- Jede Art der Einbringung von Kabeln in den Erdboden oder auch die Verlegung in Kanälen, Rohren oder ähnlich hergerichteten Trassen führt zu mechanischen Zug- und/oder Biegebeanspruchungen aller Kabelaufbauelemente in Längs- und Querrichtung. Werden diese Belastungen durch spezielle Maßnahmen auf den zulässigen Bereich begrenzt, so ist nicht mit einer Vorschädigung zu rechnen. Besonderer Aufmerksamkeit erfordern in diesem Zusammenhang allerdings punktuelle Krafteinwirkungen auf den Kabelmantel, die in extremen Fällen zu Löchern oder Rissen führen können, damit den direkten Zutritt von Feuchtigkeit an bzw. in das Isoliersystem erlauben und im betroffenen Abschnitt zu frühzeitiger Alterung führen. Den Abschluß der Kabellegung bildet deshalb in der Regel **eine Gleichspannungsprüfung am Kabelmantel**, mit der nicht die Isolationsfähigkeit, sondern die Unversehrtheit dieser äußeren Kabelumhüllung überprüft werden soll.
- Die Strombelastbarkeit von Kabeln wird wesentlich mitbestimmt von der Möglichkeit, Verlustwärme in die Umgebung abzuführen. Bei Erdverlegung basiert deshalb die Dimensionierung auf dem Wärmewiderstand des umgebenden Bettungsmaterials. Dieser Wärmewiderstand muß auch über lange Zeiten stabil bleiben d.h., es darf bei Einbringung der Verlustwärme auch abschnittsweise nicht zu einer unzulässigen Bodenaustrocknung und damit Temperaturerhöhung kommen, durch die bei vorgegebener Last die maximale Leitertemperatur überschritten wird. Damit müssen an die Verfülltechnik besondere Anforderungen gestellt werden im Hinblick auf die eingesetzten Werkstoffe aber auch im Bereich der Verarbeitung und Verdichtung.

#### Garniturenmontage

Im Gegensatz zur Kabellegung, die heute praktisch ausschließlich VPE-isolierte Bauarten umfaßt, werden Montagearbeiten auch an papierisolierten Kabeln z.B. bei Umlegungen, Anbindungen oder nach Fehlern weiterhin notwendig bleiben.

Wie in Tabelle 2.3.1 dargestellt, sind eine Vielzahl der bei Kabelgarnituren eingesetzten Montagetechniken irreversibel und Nachbesserungen damit nur in sehr beschränktem Umfang möglich. Montagemängel bedeuten deshalb häufig einen kompletten Neuaufbau unter Verlust aller eingesetzten Komponenten und Materialien.

Trotz der Verwendung moderner Werkstoffe oder bei VPE-isolierten Kabeln zunehmend vorgefertigter Garniturenkomponenten erfordert deshalb die Garniturenmontage vor allem im Hochspannungsbereich ein hohes Maß an Ausbildung und Erfahrung.



Auch wenn die Arbeiten im Bereich des Isoliersystems dabei sicherlich die höchsten Anforderungen stellen, darf nicht vergessen werden, welche Bedeutung im Hinblick auf das Langzeitverhalten über Jahrzehnte auch hier dem Wiederaufbau des Kabelmantels und ganz allgemein der Wiederherstellung der metallischen und/oder nichtmetallischen Umhüllung zukommt.

Die Montagequalität im Hinblick auf die elektrischen Eigenschaften des Systems läßt sich durch eine **abschließende Spannungsprüfung** mit einem gegenüber dem Nennbetrieb erhöhten Prüfpegel sicher belegen.

In der Vergangenheit wurden diese Inbetriebnahmeprüfungen in der Regel aus prüftechnischen Gründen mit hohen Gleichspannungen durchgeführt, deren Nachweispotential allerdings bei VPE-isolierten Kabeln unbefriedigend ist. In den letzten Jahren werden deshalb im Mittelspannungsbereich zunehmend Wechselspannungen mit einer Frequenz von 0.1 Hz verwendet, bei Hochspannungssystemen konnten auf der Basis frequenz geregelter Resonanzanlagen transportable Prüfeinrichtungen im Bereich der Netzfrequenz bis ca. 500 kV entwickelt werden.

Zusätzlich ermöglichen neue Techniken im Rahmen der Inbetriebnahmenprüfung auch die ortsselektive **Vor-Ort Messung von Teilentladungen**, um insbesondere bei Hochspannungsgarnituren an VPE-isolierten Kabeln die Teilentladungsfreiheit mit hoher Empfindlichkeit nachzuweisen.

**3.2.3 Beanspruchungen im Betrieb**

Auch einwandfrei gefertigte fachgerecht verlegte und montierte und gegenüber schädigenden Umwelteinflüssen durch spezifische Mantelkonstruktionen weitgehend geschützte Kabelsysteme unterliegen natürlich den elektrischen und thermischen Beanspruchungen während des Betriebes. Bleiben diese Belastungen unter den Bemessungsgrenzwerten, so wird dadurch keine signifikante Alterung der Isoliersysteme verursacht.

Treten darüber hinausgehende Beanspruchungen auf, können sie, abhängig von der Zahl bzw. der Dauer der Belastungen auch ohne kurzfristige Auswirkungen sehr wohl alterungsbeschleunigend wirken.

**Thermische Überlast**

Thermische Überlast, das heißt ein Überschreiten der in Tabelle 3.2.3.1 aufgelisteten maximalen Leitertemperaturen, kann bei papierisolierten Kabeln und Garnituren eine Depolymerisation der Papierzellulose und einen thermischen Abbau des Tränkmittels auslösen. Die damit verbundene Gas- und Hohlraumbildung begünstigt den Einsatz von Teilentladungen, die eine weitere Erosion der Isolierung bewirken.

VPE-Kabelsysteme sind im Vergleich thermisch höher belastbar. In extremen Fällen muß jedoch auch hier mit einem oxidativen Abbau der Leitschichten und des Isoliermaterials gerechnet werden, der die elektrische Festigkeit insbesondere an den Grenzflächen herabsetzt.

Besonders in städtischen Netzen, bei denen die Kabeltemperatur bei Häufungen oder Kreuzungen in der Trasse nicht nur durch den Belastungsstrom bestimmt wird, ist deshalb besondere Vorsicht geboten.

	VPE-isolierte Kabel	Papierisolierte Kabel
maximale Leitertemperatur im Betrieb / °C	90°C	- bauartspezifisch - 60°C-80°C
im Kurzschluß / °C	250°C	140°C-180°C

**Tabelle 3.2.3.1: Maximale Leitertemperaturen von Kabeln**

## Überspannungen

Überspannungen in Kabelnetzen treten in der Regel in Form von Blitz- oder Schaltstoßspannungen auf und müssen durch eine geeignete Beschaltung mit Ableitern auf ein zulässiges Maß begrenzt werden. Dabei sind mögliche Potentialanhebungen sowohl zwischen Leiter und geerdetem Schirm, als auch, insbesondere bei langen Übertragungsstrecken, zwischen Schirm und Erde zu berücksichtigen. Trotz dieser äußeren Maßnahmen stellen Überspannungen ganz allgemein für VPE-isolierte Mittelspannungskabel, die unter dem Einfluß von Feuchtigkeit gealtert sind, ein erhebliches Gefährdungspotential dar.

Wie schon unter 3.1.1 dargelegt, sind die in diesen Kabeln zu erwartenden water trees zwar ein Anzeichen für fortgeschrittene Alterung, gefährden aber das System erst, wenn an ihren Ausläufern durch Teilentladungen Hohlräume gebildet werden und der wt in einen electrical tree umschlägt.

Man kann davon ausgehen, daß das Zünden von electrical trees in der Regel dann erfolgt, wenn Spannungen über der Betriebsspannung auftreten, auch wenn diese noch weit unter der im Rahmen der Isolationskoordination festgelegten Bemessungsstoßspannung des neuwertigen Kabels liegt.

### 3.3 Diagnose

Die Bestimmung des Zustandes betriebsgealterter Kabelsysteme mit dem Ziel, auf der Basis bestimmter Annahmen zum weiteren Alterungsverlauf die Restlebensdauer abzuschätzen, erfordert in der Regel die Einbeziehung eines breiten Spektrums von Einzelinformationen. Dazu gehört die Beurteilung der aktuellen und in der Vergangenheit aufgetretenen elektrischen und nichtelektrischen Beanspruchungen (soweit verfügbar), insbesondere aber die Ergebnisse

- einer visuellen Begutachtung des Systems und seiner Komponenten
- physikalisch/chemischer Untersuchungen
- elektrischer Prüfungen und
- optisch/mikroskopischer Analysen.

#### 3.3.1 Sensoren/Monitoring

Grundlage zur Bewertung der spezifischen Beanspruchung einer Kabelverbindung sind die Meßwerte der relevanten physikalischen Einflußgrößen, die abhängig vom Monitoringkonzept kontinuierlich oder in bestimmten Zeitabständen aufgezeichnet werden.

Strom und Spannung als wichtigste elektrische Betriebsparameter werden traditionell durch Wandler an den Enden, also außerhalb der Kabelverbindung erfaßt.

Darüber hinausgehende Messungen physikalischer Größen am Kabel oder an den Garnituren waren in herkömmlicher Meß- und Leittechnik aufgrund fehlender Sensortechnik, der schwer beherrschbaren elektromagnetischen Beeinflussung und der notwendigen hohen Signalpegel bei langen Übertragungsleitungen, nur mit hohem Aufwand zu realisieren.

Eine grundlegende Veränderung dieser Situation konnte erst durch Entwicklungen auf der Basis von Lichtwellenleitern (LWL) erreicht werden.

LWL-Fasern können heute z.B. als Sensor in den Schirmbereich von Kabeln integriert werden und ermöglichen dort eine orts aufgelöste Temperaturmessung zur Erfassung und damit Vermeidung lokaler Übertemperaturen in thermisch außergewöhnlich beanspruchten Trassenabschnitten (Häufung, Kreuzungen, Annäherung an Wärmeübertragungssysteme).

Elektromagnetisch nicht beeinflusste LWL-Übertragungsstrecken parallel zum Energiekabel ermöglichen aber auch den vergleichsweise einfachen Aufbau von Meßsystemen, die In-

formationen von speziellen Punkten der Kabelstrecke zu einer Schaltwarte zur weiteren Verarbeitung übertragen können. Besonders zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang die hochempfindliche und in Verbindung mit speziellen Sensoren ortsselektive Teilentladungsmessung an Garnituren von Hochspannungskabeln zur Überprüfung der Montagequalität aber auch zum TE-Monitoring während des Betriebs.

### 3.3.2 Alterungsindikatoren

Zentrales Leistungsmerkmal eines jeden Isoliersystems und damit auch aussagefähigster Alterungsindikator ist die elektrische Festigkeit bzw. Restfestigkeit. Die Bestimmung der Restfestigkeit ist für Betriebsmittel im Hochspannungsbereich kostenintensiv, Einzelergebnisse unterliegen darüber hinaus statistischen Gesetzmäßigkeiten und sind damit in der Regel zur Diagnose nicht ausreichend.

Auf diesem Hintergrund ist ein generelles Ziel im Bereich der Alterungsdiagnose das Auffinden von Systemeigenschaften die meß- und prüftechnisch im Vergleich leichter zugänglich sind, von der fortschreitenden Alterung ebenfalls quantitativ beeinflusst werden und mit dem Wert einer mittleren Restfestigkeit korrelieren.

Alterungsphänomene (siehe 3.1.1) können, aber müssen nicht notwendigerweise auch Alterungsindikatoren sein.

#### Papierisolierte Kabel

Auf dem Hintergrund der in 3.1.1 für papierisolierte Kabel beschriebenen Mechanismen lassen sich nach obiger Definition im wesentlichen drei Gruppen von Alterungsindikatoren unterscheiden:

- der Zustand des Isolieröls bei Hochspannungs-Ölkabeln (Gasgehalt, Oxidations- und Abbauprodukte)
- die dielektrischen Eigenschaften des Isoliersystems (Isolationswiderstand, Verlustfaktor)
- die Teilentladungsaktivität in Mittelspannungs-Massekabeln und deren Garnituren.

Wesentliche Erkenntnisse und Erfahrungen im Bereich der Alterungsdiagnose an papierisolierten Kabeln konnten von anderen Betriebsmitteln mit ähnlichen, geschichteten Isoliersystemen, z.B. Transformatoren und Wandlern, übernommen werden /6/.

#### VPE-isolierte Kabel

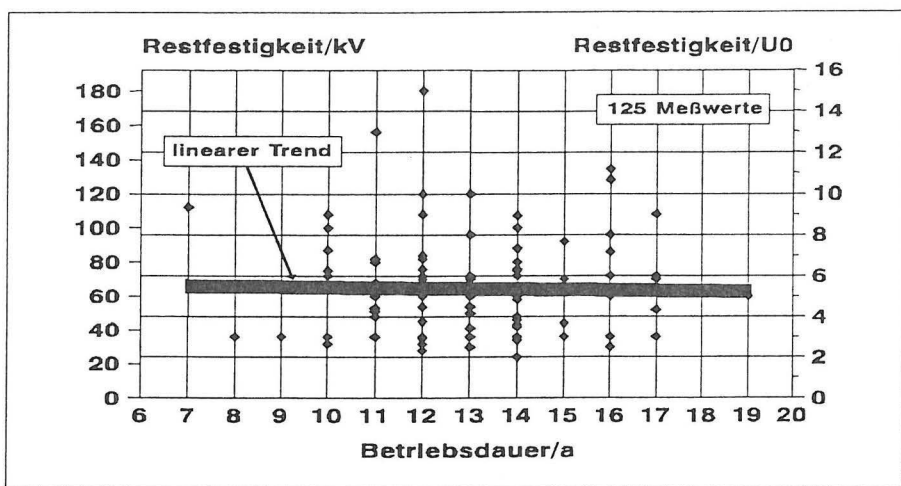
Im Gegensatz zu den Papierkabeln mußten und müssen für VPE-Festkörperdielektrika völlig neue Alterungsindikatoren gefunden werden, da sich gezeigt hat, daß weder die traditionellen physikalischen und chemischen Untersuchungsverfahren noch die bekannten dielektrischen Kennwerte wie Isolationswiderstand und Verlustfaktor bei Netzfrequenz ausreichend empfindlich auf eine fortschreitende Alterung reagieren.

Teilentladungen in electrical trees, sofern sie aufgrund ihrer geringen Intensität in Vor-Ort Messungen überhaupt meßbar sind, weisen hier nur auf ein nahes Ende des Kabellebens hin, eignen sich aber nicht als längerfristige Meßgröße zur Quantifizierung des Alterungszustandes.

Ein erster Versuch zur Findung eines solchen neuen Indikators basierte auf der Annahme, daß der Alterungsprozeß gegenüber den hermetisch von der Umwelt abgeschlossenen Papierkabelisolierungen zwar beschleunigt, aber ähnlich kontinuierlich verläuft. Danach sollte aus der Betriebsdauer der Rückschluß auf die Restfestigkeit möglich sein.

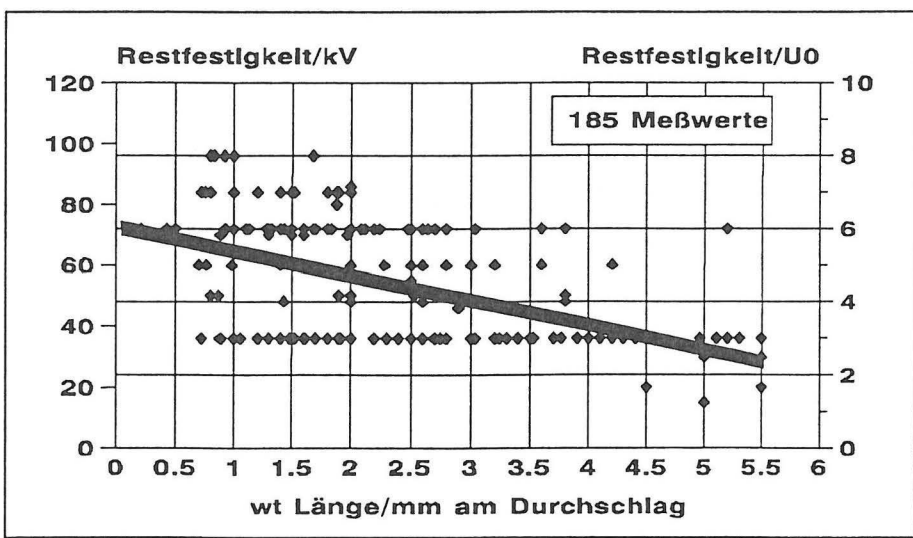
Bild 3.3.2.1 zeigt Ergebnisse einer Auswertung der Restfestigkeit VPE-isolierter Mittelspannungskabel in Abhängigkeit von der Betriebsdauer. Die Trendlinie verläuft praktisch hori-

zontal, das reale Alter der Prüflinge ist damit unabhängig vom nominalen Alter (siehe 3.1), eine Korrelation zur Restfestigkeit besteht nicht /6/.



**Bild 3.3.2.1: Restfestigkeit von VPE-Mittelspannungskabeln in Abhängigkeit von der Betriebsdauer**

Ein weiterer Ansatz, der schon über Jahrzehnte verfolgt wird, ist die Beobachtung und Auswertung des optisch einfach nachweisbaren Phänomens water treeing (siehe 3.1.1). In Bild 3.3.2.2 ist dazu als Beispiel dargestellt die Restfestigkeit von Mittelspannungskabeln in Abhängigkeit von der Länge desjenigen wt, der den Durchschlag des Systems ausgelöst hat. Klar erkennbar ist der ja auch plausible Rückgang der mittleren Festigkeit mit der Länge, aber auch die große Streuung der Einzelergebnisse. Eine Untersuchung der Korrelation für andere geometrische wt-Formparameter oder deren Kombinationen ergibt ähnliche Ergebnisse, was zu dem Schluß führen muß, daß im Einzelfall ausschließlich aus der Bestimmung des water tree Bildes keine zuverlässige Prognose der Restfestigkeit abgeleitet werden kann. Zur Beurteilung des Alterungszustandes im Rahmen eines Diagnosekonzeptes dagegen liefert die Auswertung der wt's einen wichtigen Beitrag im Hinblick auf lokale Schädigungsstrukturen.



**Bild 3.3.2.2: Restfestigkeit von VPE-Mittelspannungskabeln in Abhängigkeit von der water tree Länge am Durchschlag**

Trotz langjähriger Bemühungen, aus dem breiten Spektrum von Werkstoff- und Struktureigenschaften wirksame Alterungsindikatoren auszufiltern, wurden neben den water trees erst in den letzten Jahren im elektrischen Polarisationsverhalten der VPE-Isoliersysteme diagnostisch nutzbare Eigenschaften gefunden, in denen sich der **globale Alterungszustand** widerspiegelt.

Wie sich in verschiedenen Untersuchungen gezeigt hat, sind dabei insbesondere die „langsamen“ Randschicht- und Grenzflächenpolarisationen von Bedeutung, die sich in Messungen mit 50 Hz Netzfrequenz nicht nachweisen lassen.

In den zwischenzeitlich kommerziell verfügbaren Meß- und Prüfeinrichtungen wurden Polarisationsmessungen sowohl im Frequenz-, als auch im Zeitbereich realisiert:

**Frequenzbereich:** Verlustfaktor bei 0,1 Hz

**Zeitbereich:** Polarisationsstrommessungen  
Depolarisationsstrommessungen (IRC)  
Messung der Wiederkehrspannung

Bei allen Verfahren werden aus den Meßergebnissen alterungsrelevante Kennwerte extrahiert und auf der Basis vorliegender Referenzdaten eine Klassifizierung des Kabels bzw. eine Prognose der Restfestigkeit (IRC-Verfahren) erstellt.

### 3.3.3 Zustandsbestimmung

Die Bestimmung des Alterungszustandes einer Kabelstrecke erfordert unter Kostengesichtspunkten in der Regel eine angepasste Prüf- und Untersuchungsstrategie auf der Grundlage der spezifischen (bekannten oder auch vermuteten) Streckendaten.

Dazu gehören u.a.:

- Kabelbauart/Garniturenkonstruktion
- Inbetriebnahmedatum/Betriebsdauer
- Besonderheiten der Trasse
- Besonderheiten in den Betriebsbedingungen
- bisheriger Schadensverlauf
- vorhandene Diagnose- und Prüfergebnisse

Auch wenn nachfolgend im wesentlichen Verfahren zur Zustandsdiagnose **der Isoliersysteme** im Kabel näher beschrieben werden sollen bleibt ganz ohne Zweifel die Sichtprüfung der Anlage immer der 1. Schritt einer Untersuchung. Dabei können zumindest an den nicht in Erde liegenden Endverschlußgarnituren aber auch z.B. an Mastaufführungen Veränderungen in Form von Korrosionsschäden an Metallteilen, gealterten Dichtungssysteme mit Leckagen und mechanischen Beschädigungen erkannt werden.

Weitergehende Informationen können dann allerdings nur mit Methoden gewonnen werden, die in den ungestörten Betrieb des Kabels eingreifen und die Kenngrößen der als Alterungsindikatoren bekannten Eigenschaften und Phänomene der Isoliersysteme ermitteln. Unterschieden werden muß dabei zwischen der Untersuchung einer Kabelprobe im Labor und damit für das Kabelsystem immer einem **zerstörenden** Verfahren und den elektrischen Prüfungen Vor-Ort, die in Abhängigkeit vom Prüfpegel und der Prüfzeit jedoch **lebensdauerverbrauchend** wirken können.

Eine Besonderheit in diesem Zusammenhang stellt das schon unter 3.3.2 erwähnte IRC-Verfahren zur isothermen Entladestrommessung (Isothermal Relaxation Current) an VPE-isolierten Kabeln dar, bei dem die Polarisationsspannung weit unter der Betriebsspannung liegt (ca. 1 kV DC) und das damit als **nicht lebensdauerverbrauchend** eingestuft werden kann [7, 8].



In der nachfolgenden Tabelle sind wesentliche Merkmale der unterschiedlichen Diagnosekonzepte zusammengefaßt.

	Vorteile	Nachteile
Laborprüfung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- alle bekannten Alterungsindikatoren können untersucht werden</li> <li>- die Restfestigkeit der Kabelprobe ist direkt bestimmbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Kabelstrecke muß geschnitten und mit 2 Reparaturmuffen wiederhergestellt werden</li> <li>- der Zustand der Garnituren wird in der Regel nicht erfaßt</li> </ul>
Vor-Ort Prüfung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Prüfung erfaßt die gesamte Strecke mit allen Garnituren und evt. unterschiedlich gealterten Abschnitten</li> <li>- die Unterbrechung des Betriebes ist vergleichsweise kurz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Anzahl der untersuchbaren Alterungsindikatoren ist beschränkt</li> <li>- in Spannungsprüfungen kann nur eine Mindestrestfestigkeit nachgewiesen werden mit dem Risiko des Kabeldurchschlages</li> </ul>
IRC-Verfahren (Vor-Ort und an Proben anwendbar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nicht zerstörend, nicht lebensdauerverbrauchend</li> <li>- liefert bei Vor-Ort Messungen einen Prognosewert für die Restfestigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nicht anwendbar bei gemischten Systemen (Papier/VPE)</li> <li>- erfordert eine bauartspezifische Referenzdatenbank</li> <li>- keine Beurteilung des Zustandes der Garnituren</li> </ul>

Tabelle 3.3.3.1: Merkmale von Diagnosekonzepten

Welche Diagnosestrategie gewählt wird d.h. welche Verfahren in welcher Reihenfolge angewendet werden, muß sicher im Einzelfall auch auf dem Hintergrund des gewünschten Diagnosezieles entschieden werden. Der Nachweis der aktuellen Betriebstüchtigkeit einer Strecke erfordert z.B. sicher andere Maßnahmen, als die Alterungsklassifizierung im Rahmen einer langfristigen Austauschplanung.

### 3.4 Sanierung

Verfahren zur Sanierung von Kabelsystemen, die nicht nur äußere Korrosionsschäden beseitigen, sondern direkt in das gealterte Isoliersystem eingreifen, sind bis heute nur in sehr beschränktem Umfang verfügbar.

Bei den papierisolierten Bauarten gehört dazu z.B. die Entgasung und Aufbereitung des freien Ölvolumens nach Montagearbeiten in Ölkabelanlagen, die mit einer Öffnung des Isoliersystems verbunden sind. Ein vollständiger Austausch des Tränkmittels kann jedoch dabei nicht erreicht werden.

Für VPE-isolierte Kabel wurde in den USA ein Verfahren entwickelt, bei dem ein niederviskoses Silikonfluid durch den Leiter in die Isolierung gepreßt wird, um dort das freie Wasser aus den water tree Strukturen zu verdrängen und die elektrische Festigkeit signifikant zu erhöhen.

Eigene Untersuchungen an derart sanierten Mittelspannungskabeln belegen qualitativ diesen Effekt, sind jedoch quantitativ uneinheitlich und scheinen stark vom jeweiligen Alterungszustand abhängig zu sein.



Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist die Durchlässigkeit des Leiters auf der gesamten Länge. Muffen mit Preßverbinder müssen also herausgeschnitten und anschließend die Enden in der Regel mit 2 Reparaturmuffen wieder verbunden werden, was je nach Trassenverlauf zu erheblichen Kosten führt /9/.

Im Bereich der Garnituren scheitert selbst bei frühzeitig vor dem Durchschlag erkannten alterungsbedingten Schäden der Versuch einer Reparatur oder Sanierung häufig an den verwendeten Montagetechniken (siehe Abschnitt 2.3).

Die nur in wenigen Fällen mögliche zerstörungsfreie Demontage erzwingt praktisch immer ein Schneiden der Kabelstrecke und die Installation einer völlig neuen Garnitur.

## **4. Zusammenfassung**

Kabelstrecken sind in allen Spannungsebenen ein unverzichtbarer Bestandteil von Systemen zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. Aufgrund ihrer hohen mittleren Lebensdauer sind in den Netzen praktisch alle in den vergangenen Jahrzehnten entwickelten Bauarten mit Papier- und Kunststoffisoliertsystemen noch in größerem Umfang vertreten.

Im Mittel- und Hochspannungsbereich mit hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit der Anlagen kommt der Frage nach der Zuverlässigkeit eine besondere Bedeutung zu, wobei der Anwender bei Kabelverbindungen ein über die gesamte Betriebszeit unauffälliges System erwartet.

Obwohl der Ausfall von Kabelstrecken in der Praxis im wesentlichen auf mechanische Fremdeinwirkungen zurückgeführt werden kann, ist im Rahmen der Betriebsführung, der Anlagenüberwachung und Netzplanung auch bei diesem Betriebsmittel die Kenntnis und Beherrschung des Phänomens „Alterung“ unerlässlich.

Dabei hat die Vorbeugung einer beschleunigten Alterung z.B. durch gezielte Auswahl der Kabelkonstruktion, der Sicherstellung einer hohen Produkt- und Montagequalität und einen Betrieb im zulässigen Belastungsbereich sicher die größte Bedeutung.

**Ein bei weitem überwiegender Anteil der installierten Kabelsysteme wurde und wird auf der Grundlage langjähriger Erfahrungen betrieben mit der Erwartung „Installieren und Vergessen“.**

**Trotz oder gerade wegen der bis heute in Zusammenarbeit von Herstellern und Betreibern nicht abgeschlossenen kontinuierlichen Bemühungen um eine Optimierung der Energiekabeltechnologie spricht nichts dagegen, daß dies auch in Zukunft so bleibt!**

Darüber hinaus können natürlich bei Kabelverbindungen unter besonderen Randbedingungen weitergehende Maßnahmen im Bereich Monitoring und Alterungsdiagnose technisch und ökonomisch sinnvoll sein. Auf dem Hintergrund komponenten- und bauartspezifischer Alterungsprozesse wurden dazu differenzierte Strategien und Techniken entwickelt und in der Praxis umgesetzt.

Verfahren zur Sanierung von Kabelstrecken sind auch heute erst in sehr begrenztem Umfang verfügbar und wurden von Kabelbetreibern in Deutschland bisher, sicher auch auf dem Hintergrund hoher Kosten, nur in einzelnen Fällen angewendet.

## 5. Literatur

- /1/ VDEW (Hrsg.)  
**Statistik für das Jahr 1996**  
Frankfurt 1998
- /2/ H. Brumshagen  
**Kabelnetze in der Energieversorgung**  
53. Kabelseminar, Februar 1999, Hannover
- /3/ D. Meurer, W.-D. Schuppe, M. Beigert, H.-G. Kranz  
**Alterung VPE-isolierter Mittelspannungskabelsysteme  
- Phänomenologie und Diagnose -**  
etz Elektrotechnische Zeitung, Jg. 116 (1995), Heft 20
- /4/ H. Klockhaus, F. Merschel  
**Langzeitverhalten VPE-isolierter Mittelspannungskabel  
- Prüfverfahren, Normung, Ergebnisse**  
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96 (1997), Heft 20
- /5/ M. Wohlers  
**Methoden der Kabellegung**  
53. Kabelseminar, Februar 1999, Hannover
- /6/ Cigrè WG 21.05  
**Diagnostic Methods for HV Paper Cables and Accessories**  
Electra No. 176, February 1998
- /7/ M. Beigert, H.-G. Kranz, D. Kaubisch, D. Meurer  
**Computergestützte zerstörungsfreie Alterungsdiagnose für  
VPE-isolierte Mittelspannungskabel**  
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 93 (1994), Heft 11
- /8/ H.-G. Kranz, D. Steinbrink, M. Beigert, H. Schlapp  
**Kostensparende Zustandsanalyse an PE/VPE-isolierten  
Mittelspannungskabeln**  
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96 (1997), Heft 26
- /9/ D. Mithöfer, T. Kaminsky  
**CableCure Sanierung water tree geschädigter Mittelspannungskabel  
- Erfahrungsbericht Deutschland**  
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 95 (1996), Heft 26