

**Interpretation der
neuen CIGRE-Ausfallstatistik von VPE-Kabeln**
Prof. Dr. H. Brakelmann

nkt cables Studie



Completing the picture

Vorwort

nkt cables ist seit mehr als 135 Jahren ein innovatives Unternehmen im Bereich der Energieübertragung.

Bei der Entwicklung neuer Technologien beschränken wir uns nicht nur auf Kabel und Verbindungstechnik.

Intelligente Monitoring Systeme und Software, die ein ressourcenschonendes managen von Netzen ermöglichen, gehören genau so in unser Portfolio wie spezielle Produkte und Lösungen für die Übertragung erneuerbarer Energie.

In enger Zusammenarbeit mit Universitäten, Technischen Hochschulen und unseren Kunden entwickeln unsere Teams Lösungen für die bedarfsgerechte Energieübertragung der Zukunft. Und wir setzen diese Lösungen in Produkte für unsere Kunden um.

Prof Dr.-Ing. habil. Heinrich Brakelmann leitet zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch die Fakultät IW/ETS der Universität Duisburg-Essen. Die Vorliegende Studie wurde im Auftrag von **nkt cables** im Mai 2009 angefertigt.

Interpretation der neuen CIGRE-Ausfallstatistik von VPE-Kabeln

H. Brakelmann

Mai 2009

1. Aufgabenstellung

Von der CIGRE-Working Group B1-10 wurde soeben ein Bericht zur Ausfallstatistik von Hoch- und Höchstspannungskabeln veröffentlicht [1].

Im Hinblick auf VPE-isolierte Hoch- und Höchstspannungskabel sollen im Folgenden die dort veröffentlichten, nachstehend in der Tabelle 1 zusammengefassten Daten kurz kommentiert werden.

		XLPE CABLES (AC)			SCOF CABLES (AC)		
A. Failure Rate – Internal Origin Failures		60–219 kV	220–500 kV	ALL VOLTAGES	60–219 kV	220–500 kV	ALL VOLTAGES
Cable	Failure rate (fail./yr 100 cct.km)	0.027	0.067	0.030	0.014	0.107	0.041
Joint	Failure rate (fail./yr 100 comp.)	0.005	0.026	0.005	0.002	0.010	0.004
Termination	Failure rate (fail./yr 100 comp.)	0.006	0.032	0.007	0.005	0.015	0.009
B. Failure Rate – External Origin Failures		60–219 kV	220–500 kV	ALL VOLTAGES	60–219 kV	220–500 kV	ALL VOLTAGES
Cable	Failure rate (fail./yr 100 cct.km)	0.057	0.067	0.058	0.095	0.141	0.108
Joint	Failure rate (fail./yr 100 comp.)	0.002	0.022	0.003	0.002	0.004	0.002
Termination	Failure rate (fail./yr 100 comp.)	0.005	0.018	0.006	0.009	0.013	0.010
C. Failure Rate – All Failures		60–219 kV	220–500 kV	ALL VOLTAGES	60–219 kV	220–500 kV	ALL VOLTAGES
Cable	Failure rate (fail./yr 100 cct.km)	0.085	0.133	0.088	0.109	0.248	0.149
Joint	Failure rate (fail./yr 100 comp.)	0.007	0.048	0.008	0.004	0.014	0.006
Termination	Failure rate (fail./yr 100 comp.)	0.011	0.050	0.013	0.014	0.028	0.019

Table 1 in [1]: Failure rates on the different types of AC cable systems

Conclusion from CIGRE-WG B1-10:

- The internal failure rates reflect the inherent performance of the cable system
 - PILC cables have reached their end of life with a high level of internal failures.
 - It is not possible to compare failure rates of cable and accessories due to different scaling factors
 - Internal failure rates are greater at the higher voltage levels
 - It should be noted that the average age of SCOF, HPOF and GC cable systems is significantly greater than extruded cable systems.
 - Failure rates of SCOF include oil leaks reported as a failure.
 - Internal failure rates of SCOF and XLPE cable are in line with previous data
 - Further details regarding failure rates for different XPLE designs is given later
 - Internal failure rates of accessories, particularly on XLPE cable, are of greater concern.
- Focus on quality control during jointing operations must be maintained.

Tabelle 1: Ausfallraten nach [1]:

Angaben zu den Kabeln in Fehlern pro 100 System-km und Jahr
Angaben zu den Garnituren in Fehlern je 100 Stück und Jahr

2. Interpretation der Ausfallraten

Die in der Tabelle 1 angegebenen Fehlerraten beziehen sich

- bei den Kabeln auf Fehler pro 100 System-Kilometer und Jahr und
- bei den Garnituren auf Fehlern pro 100 Stück und Jahr.

Damit wird, abhängig von den im Mittel realisierten Muffenabständen, eine Umrechnung erforderlich, um die resultierenden Ausfallraten von VPE-Kabelanlagen zu ermitteln.

Im Folgenden wird angesetzt, dass je Systemkilometer Kabel 1,3 Muffensätze, also

- 3,9 Muffen je System-km

gegeben sind. Dies entspricht einer mittleren Lieferlänge von rd. 770 m.

Die Ausfallraten der Endverschlüsse sind für eine mittlere Länge der Kabelanlagen von mehr als 1 km vernachlässigbar.

Damit folgen aus Tabelle 1 die in der Tabelle 2 zusammengestellten Ausfallraten von VPE-Kabelanlagen der unterschiedlichen Spannungsebenen. Zusätzlich ist in der Tab. 2 das Verhältnis der Ausfallraten der betrachteten Betriebsspannungsbereiche wiedergegeben.

Fehlerraten für	Fehlerart	Spannungsebene 60 kV–219 kV	Spannungsebene 220 kV–500 kV	Faktor Spannungsebenen
		Fehler/(100 S.-km*a)	Fehler/(100 S.-km*a)	%
Kabel	intern	0,027	0,067	248
	extern	0,057	0,067	118
	Gesamt	0,084	0,134	160
Muffen	intern	0,0195	0,101	518
	extern	0,008	0,086	1075
	Gesamt	0,028	0,187	667
Kabelanlage	intern	0,0465	0,168	361
	extern	0,065	0,153	235
	Gesamt	0,112	0,321	289

Tabelle 2: Ausfallraten von VPE-Kabelanlagen bei Annahme von 1,3 Muffensätzen pro Kilometer

Zunächst muß festgehalten werden, dass die Ausfallraten von VPE-Kabelanlagen in dieser Statistik im Vergleich mit der in unterschiedlichen Gutachten der letzten Zeit verwendeten Größe der VDN-Statistik von

- $0,657/(100 \text{ System-km}^*a)$

im Betriebsspannungsbereich 60 kV–219 kV um einen Faktor von **rd. 6** und im Betriebsspannungsbereich $\geq 220 \text{ kV}$ um einen Faktor von **rd. 2** niedriger ausfallen.

Ansonsten sind der Tabelle 2 Zusammenhänge zu entnehmen, die in der Abb. 1 grafisch aufbereitet sind:

I. Für Spannungen < 200 kV gilt:

- a) Es überwiegen die externen gegenüber den internen Fehlern.
- b) Der Anteil der Muffenfehler ist gering
- c) Die Ausfallraten liegen um einen Faktor 6 niedriger als nach VDN-Statistik.

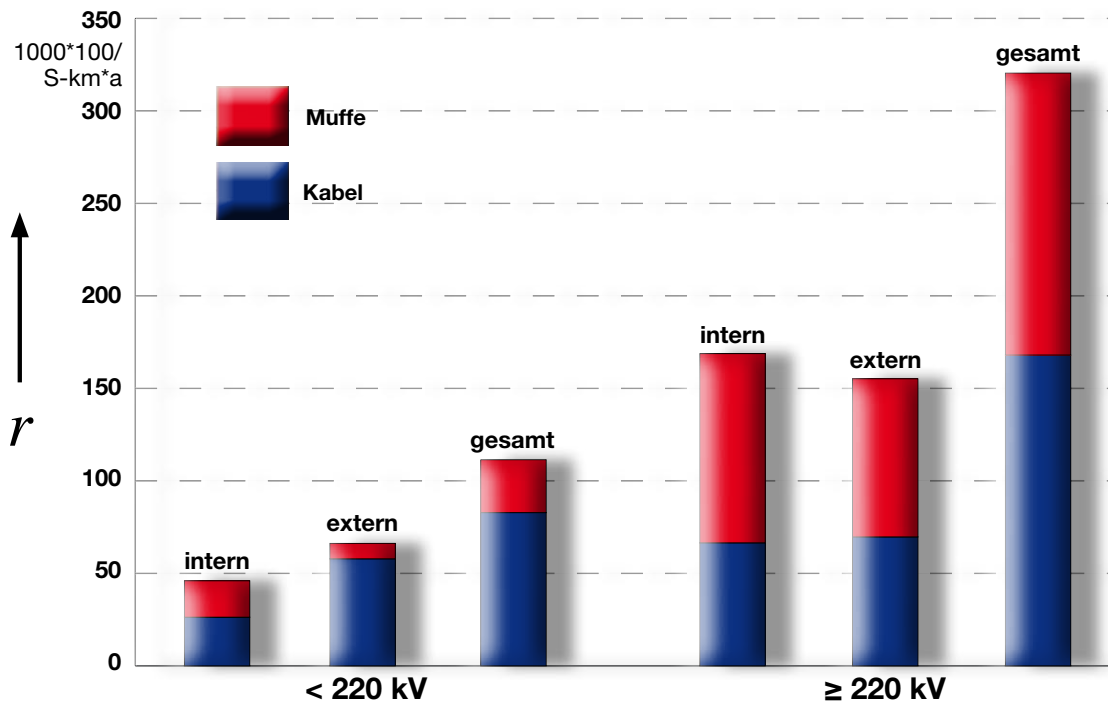


Abb. 1: Fehler-
raten von VPE-
Kabeln (blau)
und Muffen (rot)
für die beiden
Betriebsspan-
nungsbereiche

II. Für Spannungen ≥ 200 kV gilt:

- Die Rate der externen Fehler von Kabeln ist vergleichbar mit der Rate für den niedrigeren Spannungsbereich (was zu erwarten ist).
- Die Rate der externen Fehler von Garnituren ist extrem hoch. Allerdings erscheint die statistische Relevanz bei der geringen Anzahl von Garniturenfehlern fraglich und teilweise aus Sondersituationen abgeleitet.
- Die Rate der internen Fehler bei Kabeln ist um einen Faktor von 2,5 höher als im niedrigeren Spannungsbereich.
- Die Rate der internen Fehler bei Kabeln ist vergleichbar mit der Rate der externen Fehler.
- Die Rate der internen Fehler bei den Muffen liegt um einen Faktor 5,2 höher als im niedrigeren Spannungsbereich. Allerdings ist bei insgesamt nur 4 Fehlern die statistische Relevanz nicht gegeben.
- Insgesamt liegt die Fehlerrate der Kabelanlagen um einen Faktor 2,9 höher als im niedrigeren Spannungsbereich.
- Die Ausfallraten liegen um einen Faktor 2 niedriger als nach VDN-Statistik.

3. Folgerungen

Es ist zu berücksichtigen, dass in den Spannungsebenen 220 bis 500 kV etwa 40 % aller Fehler in weniger als einer Woche repariert wurden und somit keine durch Fehlerströme verursachten Zerstörungen sein können, sondern eher schnell zu beseitigende Unregelmäßigkeiten.

Einige Fehler sind als singuläre Ereignisse aufzufassen, z. B. sind 50 % aller Freiluftendverschlussfehler in einem Land aufgetreten.

Die zu ziehenden Folgerungen liegen teilweise auf der Hand:

3.1 Vermeidung externer Einwirkungen

Wenn es gelingt, externe Einwirkungen durch Bagger, Erdbohrer, andere Gewerke im Kabelgraben etc. auszuschließen, können die Fehlerraten lt. CIGRE-Statistik

- auf rd. 42% für $U < 220$ kV und
- auf rd. 52% für $U \geq 220$ kV

gesenkt werden.

Hierzu sind Lösungen denkbar, oberhalb der Kabel (ggfs. auch seitlich von ihnen) harte Betonbereiche, ggfs. in Verbindung mit Metallplatten, in den Graben einzubringen.

Solche Lösungen können mit der thermischen Ertüchtigung des Kabelgrabens kombiniert werden. So könnte der hochwärmeleitfähige Spezialbeton nach (2) in unmittelbarer Kabelumgebung als poröses, leicht zu entfernendes

Material eingebracht werden, um oberhalb dieses Bereiches sehr harte Betonplatten desselben Materials aufzulegen.

Auch kann über Frühwarnsysteme nachgedacht werden, die bei Eingriffen von Bagger etc. im oberen Grabenbereich Warnungen an die Leitstelle senden. Dies könnten beispielsweise ummantelte elektrische Leiter, aber auch Lichtwellenleiter sein, gegebenenfalls auch integriert in Kompensationsleiter zur Magnetfeldschirmung.

Das Verlegen der Kabel in Tunneln, Röhren oder in Kanälen bietet hierbei besondere Vorteile, die auch bei den Kostendiskussionen berücksichtigt und quantifiziert werden sollten.

3.2 Qualitätsverbesserung durch trainiertes Montagepersonal

Es gibt Beispiele, die darauf hinweisen, dass 50 % aller Garniturenfehler durch ungenügend geschultes Montagepersonal hervorgerufen werden.

3.3 Verringerung der Anzahl der Muffen

nkt cables wird in Zukunft durch geeignete Fertigungs- und Transporteinrichtungen in der Lage sein, selbst im Höchstspannungsbereich Lieferlängen bis zu 2...3 km zu realisieren. Die Konsequenz einer Vergrößerung des Muffenabstandes auf beispielsweise 3 km ist in der nachstehenden Tabelle 3 sowie in der Abb. 2 wiedergegeben.

Fehlerraten für	Fehlerart	Spannungsebene 60 kV–219 kV	Spannungsebene 220 kV–500 kV	Faktor Spannungsebenen
		Fehler/(100 S.-km*a)	Fehler/(100 S.-km*a)	%
Kabel	intern	0,027	0,067	248
	extern	0,057	0,067	118
	Gesamt	0,084	0,134	160
Muffen	intern	0,005	0,026	520
	extern	0,0021	0,022	1075
	Gesamt	0,0072	0,048	667
Kabelanlage	intern	0,032	0,093	361
	extern	0,059	0,089	235
	Gesamt	0,091	0,182	289

Tabelle 3: Ausfallraten von VPE-Kabelanlagen bei Annahme von 0,333 Muffensätzen pro Kilometer (Lieferlänge 3 km)

Es wird deutlich, dass bei einer solchen extremen Anhebung der Lieferlängen die Fehlerraten der Kabelanlagen nahezu halbiert werden. Damit erscheinen Anstrengungen in Richtung einer Vergrößerung der Lieferlängen als sehr vielversprechend, insbesondere auch im Hinblick auf Wettbewerbsvorteile zur Konkurrenz.

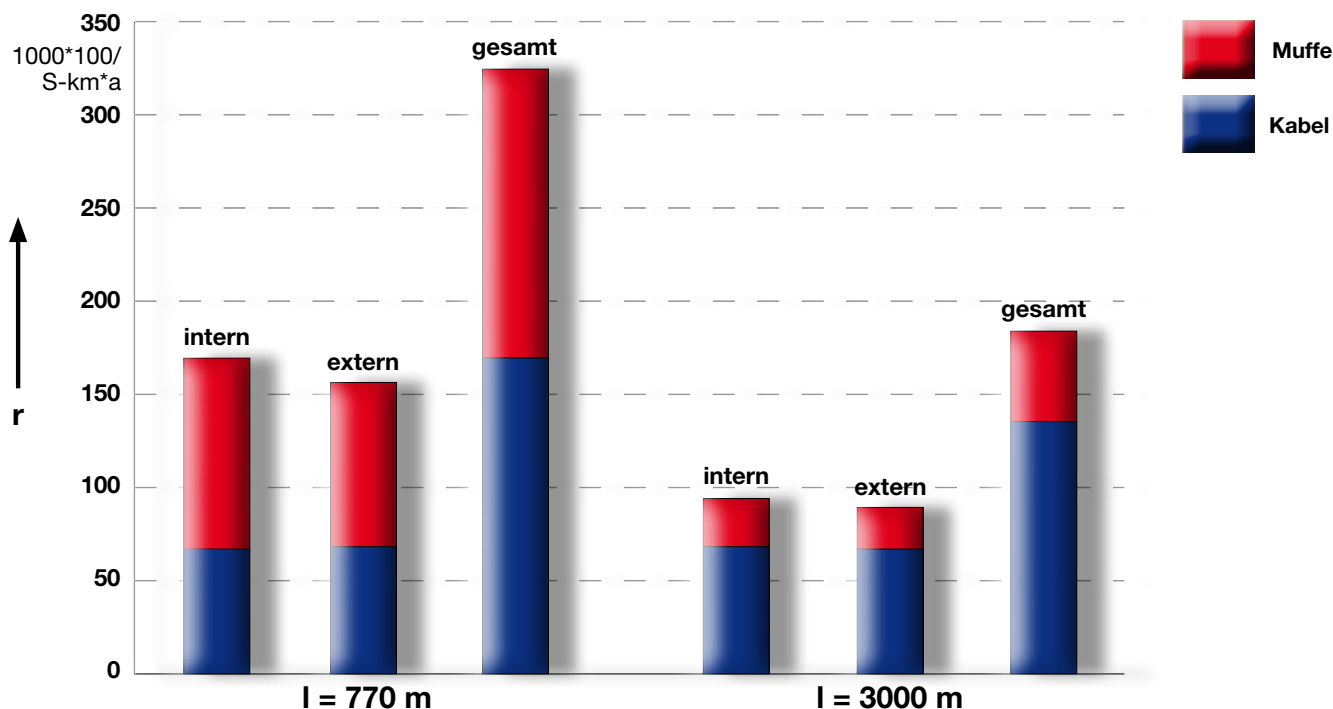


Abb. 2: Fehlerraten von VPE-Kabeln (blau) und Muffen (rot) des Betriebsspannungsbereichs $U \geq 220$ kV bei Vergrößerung der Lieferlängen auf 3 km

3.4 Erreichbare Fehlerraten

Auch ohne bei der elektrischen Festigkeit und der damit verbundenen Verfügbarkeit der VPE-Höchstspannungskabel und ihrer Garnituren Wesentliches zu verbessern, können durch Einführen eines wirksamen mechanischen Schutzes der Kabel sowie durch Vergrößerung der Lieferlängen entscheidende Verbesserungen erzielt werden.

Um dieses weiter zu verdeutlichen, gibt Abb. 3 einen Extrakt aus der Abb. 1 und zeigt den Übergang der heutigen Situation – herkömmliche Lieferlängen und normale Verlegung – auf Kabelanlagen mit extrem vergrößerten Lieferlängen und einen wirksamen Schutz gegen äußere mechanische Einwirkungen (nur interne Fehler).

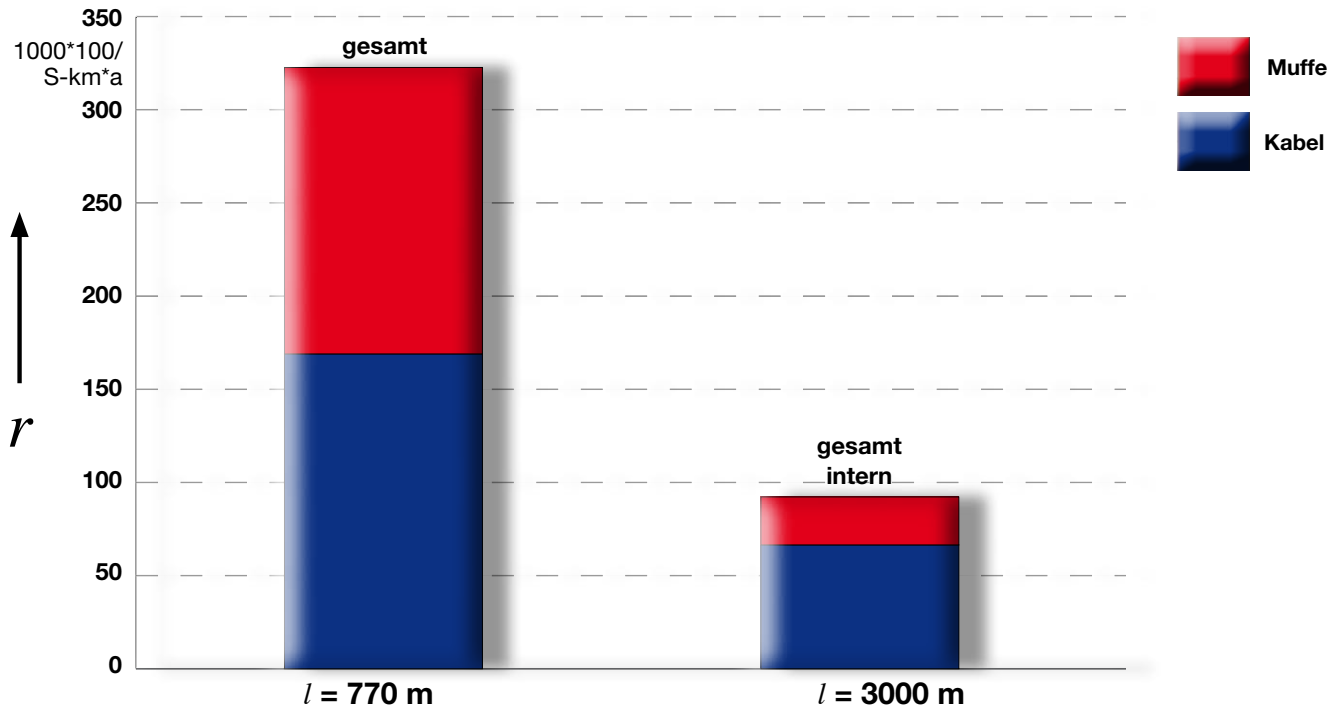


Abb. 3: Fehlerraten von VPE-Kabeln (blau) und Muffen (rot) des Betriebsspannungsbereichs $U \geq 220$ kV von der heutigen Situation (links) bei Vergrößerung der Lieferlängen und Einführung eines wirksamen mechanischen Schutzes

Allein durch diese Maßnahmen könnten die Fehlerraten der VPE-isolierten Höchstspannungskabel auf weniger als 30 % ihrer heutigen Größe vermindert werden.

4. Absolute Fehleranzahl von Höchstspannungskabeln

Die Gesamtanzahl von Fehlern liegt in [1] bei ca. 150 bei einer Gesamtmenge von ca. 20000 Systemkilometern extrudierter Kabel mit ca. 230000 Garnituren.

Für die Spannungsebenen 220 kV bis 500 kV sind es 40 Fehler bei ca. 1800 Systemkilometern und 9500 Garnituren.

Dieses zeigt, dass VPE-Höchstspannungskabelanlagen äußerst zuverlässig sind.

5. Schrifttum

[1] CIGRE WG B1-10 UPDATE OF SERVICE EXPERIENCE OF HV UNDERGROUND AND SUBMARINE CABLE SYSTEMS
Cigre-Report, Mai 2009

[2] H. Brakelmann Hochwärmeleitfähiger Spezialbeton für den Kabelgraben
J. Dietrich
A. Märten
H.P. May erscheint in: ew (Elektrizitätswirtschaft), Juni 2009

nkt cables GmbH
Schanzenstraße 6–20 · 51063 Cologne (Germany)
Tel.: +49 (0)221/676-30 19
Fax: +49 (0)221/676-23 10

E-mail: infoservice@nktcables.com

Internet: www.nktcables.com

nkt cables GmbH is a company of the Danish NKT Group

