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: 73 (1982)

Heft: 24

Artikel: Kabel und Freileitung im System

Autor: Meier, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905048

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 24.08.2025

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

eines 130-kV-Ölkabels während 12 Stunden unter einem Vakuum von 0,1 mm Hg zu halten, bevor er mit einwandfrei entgastem Öl gefüllt wird.

Bei Kunststoffkabeln wird der Deflektor nicht mehr analog der Muffe gewickelt. Im allgemeinen bevorzugt man aus Silikonharz oder EPR-Mischungen vorfabrizierte Teile, die rasch auf die Kabelisolation aufgeschoben werden können. Die Elastizität der Materialien bewirkt, dass zwischen der Isolation und dem aufgeschobenen Teil kein Hohlraum bleibt.

Der klassische Endverschluss wird an seiner Basis befestigt und so zu einem Fixpunkt. Es ist darauf zu achten, dass vom abgehenden Stromleiter, selbst im Falle eines Kurzschlusses keine unzulässigen Kräfte auf den Körper des Endverschlusses ausgeübt werden. Unterhalb des Endverschlusses ist das Kabel so zu befestigen, dass auch hier keine schädlichen, durch thermische Dilatation hervorgerufene Kräfte auf die Verbindungsstelle Kabel-Endverschluss auftreten. Dagegen können leichte, ganz aus Kunststoff bestehende Endverschlüsse, einschliesslich Isolator, mechanisch als Teil des Kabels angesehen werden und müssen nicht besonders befestigt werden. Dadurch wird der ganze Übergang vom Kabel auf den abgehenden Stromleiter biegsam.

11. Prüfung nach Verlegung und Montage

Weil das Kabel die Prüfungen in der Fabrik bestanden hat, muss es nach Abschluss der Installationsarbeiten (Verlegung und Montage) nur auf beschädigungsfreie Behandlung und auf fachgerechte Ausführung der Muffen und Endverschlüsse geprüft werden. Da meistens Prüfgeräte für eine Wechselspannungsprüfung mit der grossen benötigten Blindleistung nicht zur Verfügung stehen, wird mit hoher Gleichspannung geprüft. Dabei ist zu beachten, dass das elektrische Feld bei der Wechselspannungsprüfung in Funktion der Teilkapazitäten, bei der Gleichspannungsprüfung dagegen in Funktion der Isolationswiderstände verteilt wird.

Je nach Material und Gestaltung können sich hier besonders in den Zubehören bedeutende Unterschiede ergeben. Während den ersten Minuten einer Gleichspannungsprüfung ist die Feldverteilung wegen Übergangserscheinungen der örtlichen Ladungen praktisch kapazitiv wie bei der Wechselspannungsprüfung.

Es gibt somit keine zahlenmässig erfassbare Beziehung zwischen den Spannungswerten der Gleichspannungs- und der Wechselspannungsprüfung mit gleicher Wirkung. Die meisten Normen geben für die Gleichspannungsprüfung das Dreieinhalb- bis Vierfache der Betriebsspannung an. Dieser auf der Erfahrung beruhende Wert vermeidet einerseits Beschädigungen, die durch eine schlechte Feldverteilung hervorgerufen werden könnten, erlaubt es aber andererseits nur, grobe Montagefehler oder bedeutende Beschädigungen anlässlich der Kabelverlegung zu entdecken. In der Tat sind die ersten Tage des normalen Betriebes mit Wechselspannung als beste Prüfung zu werten.

Adresse des Autors
B. Schmidt, Câbleries et Tréfileries de Cossonay SA, 1305 Cossonay-Gare.

Kabel und Freileitung im System

Von A. Meier

Die steigenden Netzbelastungen bedingen grössere Kabelquerschnitte. Dreileiterkabel verschwinden mehr und mehr auf der Spannungsebene von 60 kV. Die Ölkabel müssen, teilweise aus Gewässerschutzgründen, den Kunststoffkabeln weichen. Auch die Verlegeart geht neue Wege, die ehemals klassische Erdverlegung muss der Rohrblockanlage weichen. Damit verbunden sind aber verschiedene Probleme, wie: Dilatation, Wandern der Kabel und damit auch die Fixierung der Kabel in ihrer Lage. Zudem treten auch bei Kabeln Störungen auf, was die Entwicklung neuer Kabelfehlerortungsgeräte bedingt.

Les charges des réseaux sans cesse croissantes exigent des sections de câbles toujours plus grandes. Des câbles à trois conducteurs disparaissent peu à peu sur le niveau de tension 60 kV. Pour des raisons concernant partiellement la protection des eaux, les câbles à huile doivent céder la place aux câbles en matière synthétique. Le type d'installation a également changé et l'installation souterraine classique doit céder la place au système de tuyaux en bloc. Ceci entraîne néanmoins divers problèmes, à savoir la dilatation, le déplacement des câbles, donc leur fixation dans la position requise. Les câbles sont en outre sujets à des perturbations, ce qui exige le développement de nouveaux détecteurs de perturbations pour câble.

1. Elektrotechnische Aspekte und betriebliches Verhalten

Bei der Freileitung besteht die Isolation weitgehend aus Luft, und nur an wenigen Stellen, an den Masten, muss eine eigentliche Isolation angebracht werden. Bei den Kabeln dagegen ist auf der gesamten Länge eine hochwertige Isolation erforderlich. Diese Isolation der Kabel stellt aber nicht nur eine elektrische Isolation dar, sondern ist gleichzeitig eine Wärmeisolation, was sich besonders auf die Übertragungsfähigkeit auswirkt.

Dies sei am folgenden Beispiel erläutert:

Eine 110-kV-Freileitung mit einem $3 \times 1 \times 400$ mm² Aldrey-Seil, weist eine thermische Dauergrenzbelastung von etwa 1000 A auf. Für die gleiche Belastung wären zwei mal drei parallele Kabel von 2 ($3 \times 1 \times 500$ mm²) Cu notwendig. Zieht man noch in Betracht, dass Kupfer einen etwa 1,8mal höheren Leitwert hat als Aldrey, so ergibt sich ein Querschnittsverhältnis von etwa 1:4. Aus wirtschaftlichen Überlegungen wird aber kaum eine Kabelanlage in diesem Masse erstellt werden können. Zwangsläufig ergibt sich daraus aber eine Einschränkung der Belastbarkeit der Kabelstrek-

ke. Zu beachten ist ferner, dass die Berechnung der Belastbarkeit der Kabel immer mit einem Unsicherheitsfaktor versehen ist, da die Wärmeleitfähigkeit des Bodens immer nur geschätzt werden kann. Auch nur ein kurzes Stück in einem schlecht leitenden Boden kann zu einer Wärmestauung und damit zum vorzeitigen Ausfall eines Kabels führen.

Aus dem grundsätzlich verschiedenen Aufbau der Kabel gegenüber den Freileitungen resultiert eine 25...40mal grössere Kapazität bzw. Ladeleistung der Kabel. So beträgt z. B. die spezifische Ladeleistung eines 110-kV-Kabels etwa 1000 kVA/km, bei einer entsprechenden Freileitung jedoch nur rund 40 kVA/km. Um bei längeren Kabelleitungen vernünftige Betriebsverhältnisse zu erhalten, müssen induktive Zusatzeinrichtungen eingebaut werden. Dies ist besonders zu beachten, wenn Freileitungen und Kabel im Parallelbetrieb geschaltet sind, wie es im Ringnetz oft der Fall sein wird. Hier wird, als Folge der kleineren Impedanz des Kabels, dieses eine höhere Strombelastung aufweisen als die leistungsfähigere Freileitung. Ähnlich ungünstig wirkt sich die hohe Kapazität des Kabels im Erdschluss aus, betragen doch die spezifischen Erdschlussströme ein Vielfaches derjenigen einer Freileitung.

2. Bauliche Fragen

Bei Kabelanlagen muss den bautechnischen Fragen eine ganz wesentliche Bedeutung zugemessen werden. Während bei Freileitungen die Fundationen für die einzelnen Tragwerke auch in schwierigen Geländepartien noch mit einem vernünftigen Aufwand erstellt werden können, so stellen Kreuzungen von Kabelanlagen mit natürlichen und künstlichen Hindernissen wie Flüsse, Tobel, Strassen, Bahnanlagen usw. oft ausserordentliche Schwierigkeiten dar und bedingen grössere Umwege oder sehr aufwendige bauliche Massnahmen. Da Kabelanlagen vorwiegend im Siedlungsgebiet oder in dessen Nahbereich zur Ausführung kommen, bieten sich in erster Linie Strassen als Trassen an.

Betrachtet man aber einen solchen Strassenquerschnitt (Fig. 1), so stellt man fest, dass durch Anlagen von Wasser, Gas, Abwasser, Telefon, Beleuchtung, Sekundärleitungen usw. der Raum im oberen Bereich des Trottoirs und des Strassenkörpers derart belegt ist, dass für Hochspannungskabel kein Platz mehr verfügbar ist. Als Lösung kann dann noch die Zone E, unterhalb der Hausanschlüsse, oder ein eventuell freier Raum im Fahrbahnbereich in Frage kommen. Für die Muffen sind in der Regel dann begehbare Muffenschächte mit Einstieg erforderlich. Ein Ausweichen auf das sogenannte Vorgelände kann infolge unterirdischer Bauten oder Zufahrten ganz erhebliche Schwierigkeiten ergeben, ausserdem sind auch hier die Hausanschlüsse zu beachten, so dass die Anlage ebenfalls relativ tief zu liegen kommt.

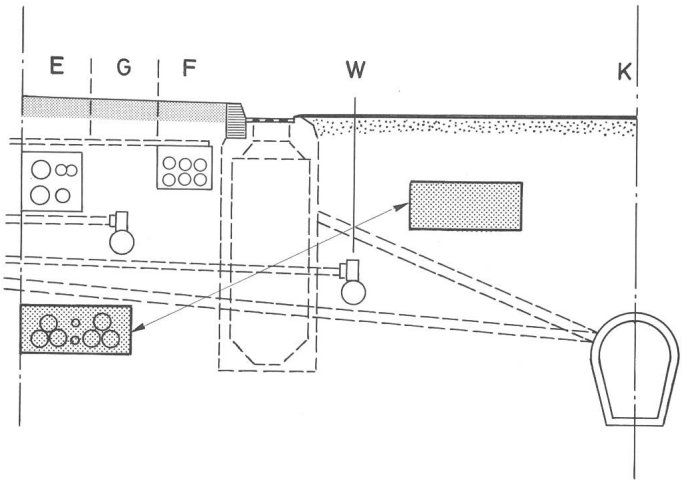

Fig. 1 Schematischer Strassenquerschnitt
E Elektrizität
G Gas
F Fernmeldedienst
W Wasser
K Kanalisation

3. Finanzieller Vergleich

Neben den technischen und betrieblichen Aspekten darf natürlich der Vergleich der Kosten nicht fehlen. Solche Vergleiche sind schon vielfach in Abhandlungen und Begründungen aufgestellt und in Kosten pro Kilometer einander gegenübergestellt worden. In der Praxis stimmt dieser Vergleich aber nicht ganz. Es ist im konkreten Fall kaum denkbar, dass eine Kabeltrasse die gleiche Länge aufweist wie eine Freileitung. An einigen effektiv durchgerechneten Beispielen resultierten z. B. Mehrlängen an Kabeln von 8 bis 20%. In einem Falle betrugen die Trasselängen und Kosten:

Kabelanlage	995 m	Fr. 1 966 000.–
Freileitung	925 m	Fr. 285 000.–

Daraus ergibt sich ein Kostenverhältnis:

effektiv	6,9:1
kilometermässig	6,4:1

Ein anderes Projekt ergab folgende Werte:

Trasselängen:

Kabel	3,8 km	Fr. 5 700 000.–
Freileitung	3,2 km	Fr. 1 008 000.–

Kostenverhältnis:

effektiv	5,6 :1
kilometermässig	4,76:1

Aus diesen beiden Beispielen ist bereits ersichtlich, dass keine allgemeingültige Formel angegeben werden kann, sondern die Werte in jedem einzelnen Fall ermittelt werden müssen. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen muss aber für den Spannungsbereich 110...150 kV bei einer Verkabelung mit vier- bis siebenfachen Mehrkosten gegenüber einer Freileitung gerechnet werden. Dieser Faktor vergrössert sich mit der Erhöhung der Betriebsspannung und kann bei 380 kV bis zum Zwanzigfachen ansteigen.

Die einst vorhandenen Reserven in den Übertragungsanlagen bauen sich mehr und mehr ab, und insbesondere Kabelstrecken, die, wie eingangs erwähnt, nicht über die gleich grossen Überlastreserven verfügen, stellen heute bereits Engpässe dar. Bei den vor 15 bis 20 Jahren verlegten Kabeln handelt es sich mehrheitlich um 3-Leiter-Ölkabel mit einem Leiterquerschnitt von 150–240 mm². Die Verlegung

erfolgte praktisch nur in besiedelten Gebieten und vorwiegend im Erdreich unter Decksteinen oder in Formsteinen. Die Verstärkung solcher Kabelstrecken, sei es durch Nachzug weiterer paralleler Kabel oder Ersatz durch Kabel mit grösserem Querschnitt, bedingen ein Freilegen der ganzen Kabeltrasse. Dies stösst nun oft auf schwerwiegende Probleme, wurden doch diese Anlagen sehr oft in den gesamten infrastrukturellen Ausbau integriert, so dass vielfach unverhältnismässig teure Grabarbeiten erforderlich sind. Aber auch ausserhalb der eigentlichen Baugebiete werden Grabarbeiten oft nur noch zeitlich limitiert und unter zahlreichen Bedingungen gebilligt. Berücksichtigt man, dass im NOK-Versorgungsgebiet allein in den letzten sieben Jahren auf der Spannungsebene 50...150 kV ebenso viele Kabel verlegt worden sind wie in den vorangegangenen 50 Jahren, so zeigt sich, welche Bedeutung der Kabelverlegung beizumessen ist.

Da in absehbarer Zukunft keine Änderung der allgemeinen Einstellung zur Energieversorgung zu erwarten ist, ist eine Neuüberdenkung des Problemes Verkabelungen sicher gerechtfertigt.

a) Leiterquerschnitt

Hier stellt sich ganz besonders die Gewissensfrage, welche Reserve bei der Projektierung mitberücksichtigt werden soll. Bedenkt man, dass für die Bestimmung des richtigen Querschnittes die Belastung in 20 oder 30 Jahren bekannt sein sollte, so sieht man deutlich, dass es sich hier nur noch um Schätzungen handeln kann. Im Gegensatz zu einer Freileitung, wo mittels eines bescheidenen Mehraufwandes bei den Tragwerken eine spätere Verstärkung der Leitung erfolgen kann, sind bei Kabeln relativ hohe Investitionen erforderlich, um eine entsprechende Reserve zu erhalten. Da langfristig doch eher mit einer Strombedarfszunahme zu rechnen ist, sollte der Leiterquerschnitt nicht allzu bescheiden gewählt werden.

b) Isolationsmaterial

Das bis zu den siebziger Jahren vorherrschende Ölkabel wurde in den letzten Jahren mehr und mehr durch Kunststoffkabel verdrängt. Ein Grund dafür mag darin liegen, dass die meisten Ölkabel mit Bleimänteln versehen sind, die erfahrungsgemäss einer gewissen Alterung unterliegen. Neben den eigentlichen Bleimantelrissen durch Umkristallisation des Bleies sind als weitere Schwachstellen die Muffen und Endverschlüsse zu betrachten. Dabei sei auf die sehr problematische Nebenerscheinung, das Auslaufen des Öls und damit die Verseuchung des umgebenden Erdreiches, hingewiesen. Dies hat schon verschiedentlich zu umfangreichen Sanierungsmassnahmen, in einzelnen Fällen sogar zur Eliminierung von Ölkabeln, geführt. Ein weiterer negativer Punkt ist die relativ aufwendige Drucküberwachung. Beschränkten sich früher die Kabelstrecken vorwiegend auf die Einführungen in die Unterwerke und Kraftwerke, so müssen heute auch vielfach Strecken in Freileitungen verkabelt werden, wodurch zusätzliche Informationen auf die ohnehin meist schon überlasteten Informationskanäle der Leitung eingegeben werden müssen.

Mit dem Vordringen der Kunststoffisolation bis zu den höchsten Spannungsebenen können diese Probleme umgangen werden. Es ist nur zu hoffen, dass diese neue Technik nicht mit neuen und noch grösseren Problemen aufwartet.

c) Schirm und Mantel, Mantelerdung

Durch die stete Zunahme der Leistung der Stützpunkte und die engere Vermaschung des Netzes steigen sowohl die dreiphasigen wie auch die einphasigen Kurzschluss- bzw. Erdschlussströme, die bei der Dimensionierung der Schirme bzw. Metallmäntel berücksichtigt werden müssen.

Bekanntlich werden durch den im Leiter fliessenden Strom in den Schirmen und Mänteln Längsspannungen induziert, die im Kurzschlussfalle einige Kilovolt betragen können, sofern die Mäntel nicht geerdet sind. Die beidseitige Erdung der Mäntel ergibt aber beachtliche Zusatzverluste, die die Belastbarkeit des Kabels vermindern. Zur Unterdrückung dieser Verluste können die Mäntel auf ihrer gesamten Länge isoliert und nur einseitig geerdet werden, wobei nie vergessen werden darf, dass dadurch der Mantel als spannungsführend betrachtet werden muss. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Mäntel in drei möglichst gleiche Abschnitte unterteilt und gegenseitig ausgekreuzt werden (sog. Cross-bonding-System). Bei längeren Kabelstrecken dürfte dies die einzig mögliche Lösung darstellen. Werden zwei benachbarte Unterwerke mit einem durchgehenden Kabel im Cross-bonding-System verbunden, so darf nicht vergessen werden, dass dadurch die Erdungssysteme der beiden Unterwerke galvanisch gekuppelt werden.

d) Verlegeart

Da es heute immer schwieriger wird, ganze Kabeltrassen offenzulassen, um die Kabel einzulegen, und zudem die Lastverhältnisse sich oft sprunghaft ändern können, wodurch sich eine frühzeitigere Erweiterung der Anlage aufdrängt, werden immer mehr Rohrblockanlagen erstellt. Mit dem Übergang von der offenen Verlegung zur Rohrblockanlage sind aber auch eine ganze Anzahl Fragen zu behandeln, wie

- die Belastbarkeit der Kabel im Rohr,
- die Rohrdistanz zur Minimalisierung der Wärmebeeinflussung,
- die Rohrmaterialien,
- die Anordnung der Rohre,
- die Rohrdurchmesser und -radien.

Die Gegenüberstellung verschiedener Anordnungen von Einleiterkabeln zeigt, dass sich insbesondere bei der Belastbarkeit und bei der gegenseitigen Beeinflussung der Kabel erhebliche Unterschiede ergeben. Dies sei am Beispiel eines 110-kV-Kunststoffkabels von 500 mm² Cu-Querschnitt dargestellt. Um eine optimale wirtschaftliche Lösung zu finden, sollte bei möglichst kleinem Trasseraum die grösstmögliche Belastbarkeit erzielt werden können.

Figur 2 zeigt für das aufgeführte Kabel die Dauerbelastbarkeit in Funktion des Abstandes zwischen den Kabeln bei den verschiedenen Verlegearten. Während bei den unter

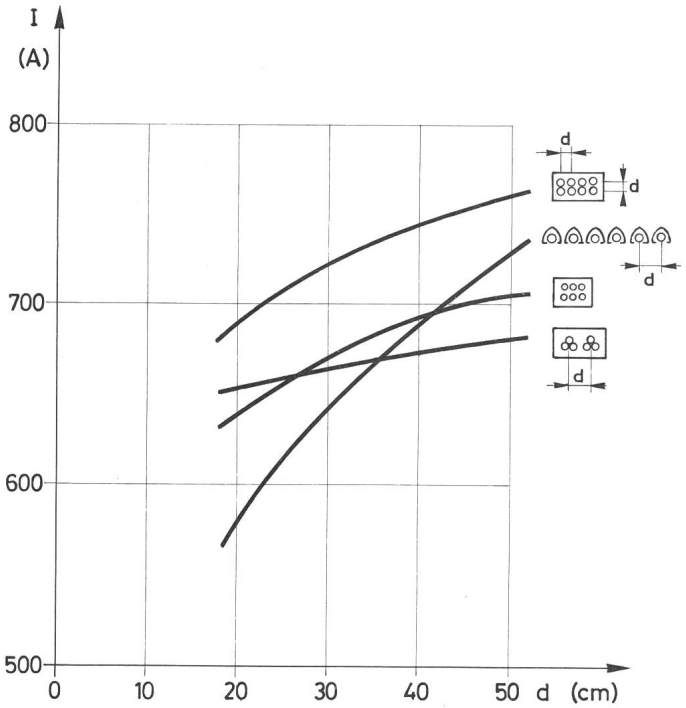

Fig. 2 Dauer-Belastbarkeit eines 110-kV-Kabels

Randbedingungen:

Umgebungstemperatur	20 °C
Max. Leitertemperatur	80 °C
Max. Oberflächentemperatur	50 °C

Decksteinen verlegten Kabeln die Dauerbelastbarkeit bei der Verkleinerung des Abstandes stark sinkt, ist die Verminderung bei rohrverlegten Kabeln, insbesondere bei den im Dreieck angeordneten, bedeutend geringer. Betrachtet man noch die in Figur 3 dargestellten induzierten Längsspannungen, so stellt man fest, dass die Dreiecksanordnung, wie

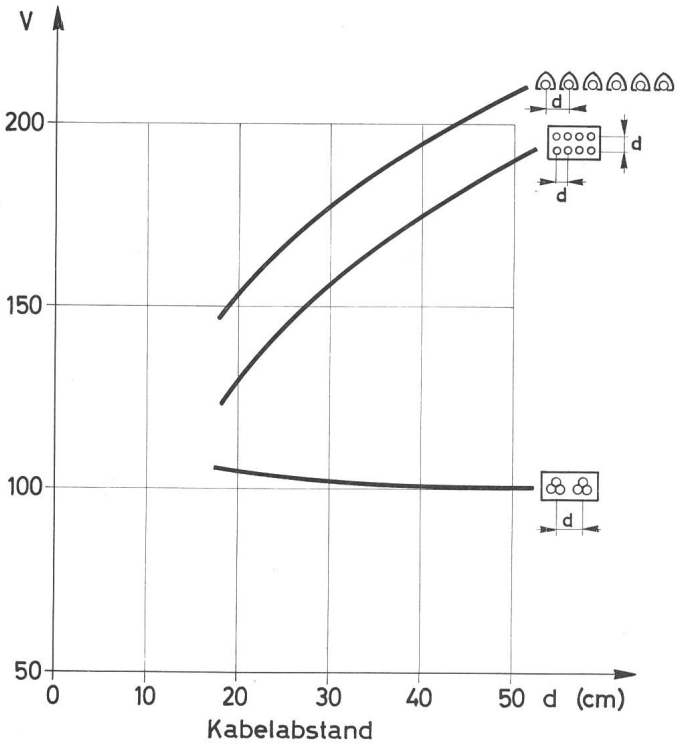

Fig. 3 Induzierte Spannung im Kabelmantel pro km und kA

erwartet, die kleinsten induzierten Mantelspannungen ergibt. Die Dreiecksanordnung ergibt somit bei einer minimalen Trassebreite auch sehr günstige elektrische Bedingungen.

Mit der vermehrten Anwendung von Rohrblöcken ist auch das Angebot an Rohrmaterialien stark gestiegen. Die einst gebräuchlichen Zementrohre sind fast vollständig verschwunden, da sie für den Einzug von Kabeln mit einem äusseren Kunststoffmantel nicht verwendbar sind. Dagegen wird von der kunststoffverarbeitenden Industrie eine ganze Palette von Rohren, angefangen von den Hart-PVC über Weich-PVC bis zum Hart-PE-Rohr, angeboten, dazu noch eine ganze Anzahl Sondermaterialien.

Um die Eignung des Rohrmaterials beim Einziehen der Kabel beurteilen zu können, wurden drei verschiedene Rohrtypen, nämlich Hart-PVC, Weich-PVC und Hart-PE, mit Radien von 2,5 und 10 m verlegt, wobei die Bogen jeweils 90° betrugen. In Zusammenarbeit mit den Kabelwerken Brugg wurden mit verschiedenen Zugseilen Durchscheuerungsversuche ausgeführt. Die Seile wurden ungefettet und gefettet mit einem konstanten Zug von 13...15 kN durch die verschiedenen Rohre gezogen. Die Seillänge betrug etwa 500 m und die Ziehgeschwindigkeit 14 m/min. Nach den Versuchen wurden die Rohre aufgeschnitten und die Einschlifftiefen gemessen. Die Tabelle I zeigt zusammengefasst die Resultate.

Resultate von Durchscheuerungsversuchen Tabelle I

Seil ∅ mm	gefettet	Rohrmaterial	Einfräsungen R = 10	R = 5	R = 2	Bemerkungen
11	nein	Hart-PVC	nur Spuren	nur Spuren	0,2	
13	nein	Weich-PVC	0,2	0,4	0,6	Rohrende durchgeschliffen
11	nein	Hart-PE	0,2	0,3	0,4	
11	ja	Weich-PVC	0,1	0,2	0,6	
13	ja	Hart-PE	–	0,1	0,3	

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die heute für den Kabelzug verwendeten Seile keinen messbaren Unterschied bezüglich Reibungskoeffizient in den Rohren aufweisen. Obwohl zwischen ungefetteten und gefetteten Seilen nur geringe Unterschiede in der Einfrästiefe feststellbar waren, ist eine Fettung sehr zu empfehlen. Die Austrittstemperatur der ungefetteten Seile nach Durchlaufen der Versuchsstrecke war eindeutig höher als die der gefetteten. Dies konnte besonders beim Weich-PVC-Rohr festgestellt werden, da neben der eigentlichen mechanischen Einfräsung noch plastische Verformungen der Rillenränder durch das erwärmte Zugseil sichtbar waren. Bei Biegeradien über 10 m ist bei keinem Rohrmaterial ein ernsthaftes Risiko vorhanden, dass die Rohre durch das Zugseil nennenswert beschädigt werden. Bei kleineren Radien ist es sehr empfehlenswert, anstelle der häufig verwendeten Weich-PVC (den sog. Kabelschutzrohren) Hart-PE-Rohre zu verlegen.

Verbunden mit der Verlegung von Kabeln in Rohre hat sich ein Problem ganz besonders in den Vordergrund ge-

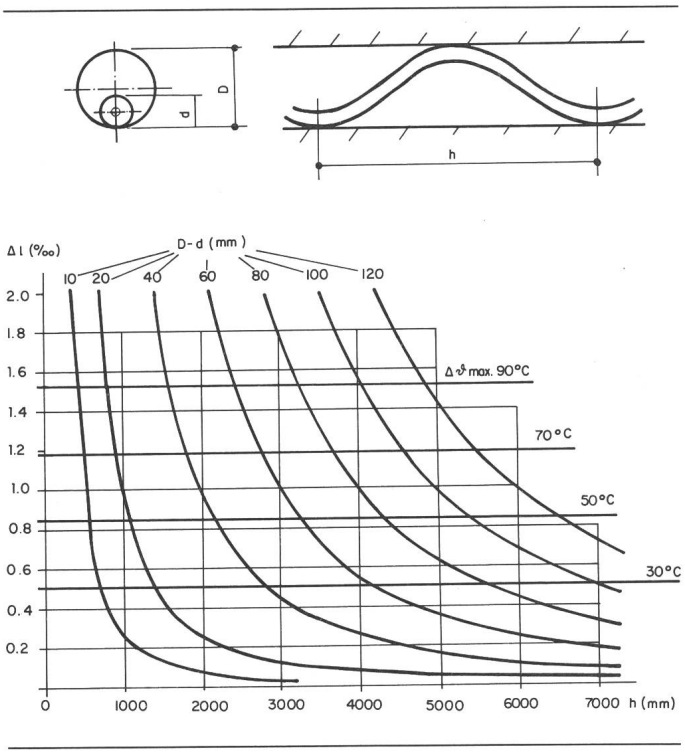

Fig. 4 Erforderliche Rohrgrösse zur Aufnahme der Kabelverlängerung bei der Erwärmung der Kabel

Annahme: Bei der Berechnung wurde angenommen, dass das Kabel sich sinusförmig in einer Ebene bewegt

drängt. Es ist dies die Dilatation der Kabel während des Betriebes. Bei einem Dreileiterkabel, das im Erdreich verlegt wurde, hat sich wohl kaum jemand Gedanken über die Dilatation dieses Kabels gemacht. Bei der Verlegung eines Einleiterkabels im Rohr darf dieser Faktor aber keinesfalls unberücksichtigt bleiben. Die Kabelhersteller haben diese Fragen frühzeitig geprüft und untersucht, ob mit Dehnungsschächten eine Lösung gefunden werden könne oder ob durch richtige Rohrdurchmesser die Kabelverlängerung sich im Rohr selbst unterbringen lässt. Wird rechnerisch und empirisch die zulässige «Wellungslänge» eines Kabels ermittelt, kann anhand des Diagrammes der Figur 4 die zulässige Erwärmung bzw. die erforderliche Rohrdimensionierung festgestellt werden.

Ein entsprechender Versuch in einem Plexiglasrohr ermöglichte es, die Vorgänge visuell zu verfolgen. Bei einer Durchmesserdifferenz von 70 mm zwischen Rohr und Kabel konnte die Verlängerung des Kabels bei einer Erwärmung auf 100 °C problemlos im Rohr erfolgen. Die Wellungslänge wies dabei eine Länge von etwa 3,5 m auf. Aufgrund verschiedener Überprüfungen darf angenommen werden, dass bei einem nicht allzu steifen Kabel eine Durchmesserdifferenz Rohr–Kabel von etwa 60 mm ausreicht, die Dilatation im Rohr spielen zu lassen.

Parallel zur Erwärmung und Wellung des Kabels erfolgt auf die Befestigungspunkte aber eine Schubbeanspruchung, deren Grösse vom Leiterquerschnitt und der Ummantelung abhängig ist. Im vorliegenden Versuch wurden an den Verankerungen Kräfte von 3500 N festgestellt. Es handelte sich dabei um ein TKT-Kabel mit 630 mm² Cu-Leiter. Ein Vergleichskabel mit einem Al-Wellmantel ergab Schubkräfte von mehr als 10 000 N. Dass die Übernahme derartiger Kräfte durch die Befestigungselemente nicht ganz problemlos ist, dürfte einleuchten, ist doch nebst den axialen Kräften auch noch die radiale Ausdehnung des Kabels zu berücksichtigen. Ein an einem 600 m langen verlegten Kabel einer Leitung durchgeführter Erwärmungsversuch bestätigte die im Laborversuch erhaltenen Beanspruchungen.

4. Störungen an Kabelanlagen

Die Versorgungssicherheit eines Gebietes hängt weitgehend von der Verfügbarkeit des Leitungsnetzes ab. Trotz aller technischer Fortschritte wird es nie möglich sein, Störungen ganz auszuschliessen. Die meisten Störungen im Freileitungsnetz sind eine Folge von atmosphärischen Überspannungen, die zu Überschlägen führen. Die Tatsache, dass bei Kabeln diese Störquelle weitgehend eliminiert werden kann, hat oft zur Annahme geführt, Kabel seien weniger störungsanfällig. Die sowohl im Inland wie auch im Ausland erstellten Störungsstatistiken zeigen aber, dass die Schadenhäufigkeit bei Kabeln und Freileitungen in der gleichen Grössenordnung liegt. Fehler an Freileitungen sind in der Regel sehr rasch auffindbar, und die Reparaturen können meistens mit eigenem Personal rasch ausgeführt werden. Kabelfehler dagegen benötigen vielfach den Einsatz von Spezialisten allein schon zur Ermittlung der Schadenstelle. Die notwendigen Ausserbetriebssetzungen der Leitung betragen meistens ein Vielfaches gegenüber denjenigen einer Freileitung. Welches sind nun die hauptsächlichsten Störungsursachen bei Kabeln?

Vorerst ist zu bemerken, dass bis vor wenigen Jahren im Spannungsbereich 30...150 kV mehrheitlich Papierbleikabel verlegt wurden. Die eigentliche Isolation, das vorimprägnierte Papier und Öl, ist dank ihrer hohen Durchschlagsfestigkeit prädestiniert, in der Kabeltechnik verwendet zu werden. Ebenso hat die Herstellung solcher Kabel einen Qualitätsstand erreicht, dass kaum mehr Schäden auftreten. Die Schwachstellen liegen aber im Bleimantel und besonders bei den Übergängen an den Endverschlüssen und Muffen. Blei hat die unangenehme Eigenschaft, unter gewissen Bedingungen einen Umkristallisationsprozess durchzuführen, dessen Folge Rissbildung und damit Ölleckage sind. Durch Beimischung von Tellur und anderen Legierungskomponenten kann dieser Gefahr begegnet werden, doch existieren immer noch etliche Kabel mit alten Bleimänteln, die dieser Gefahr ausgesetzt sind, und es ist zu befürchten, dass noch einige Störungen und Kabelausfälle auf dieses Konto zu buchen sind.

Die häufigste Schadenstelle ist jedoch die Lötplombe bei den Muffen und Endverschlüssen. Allein im Jahre 1981 sind im Netz der NOK an fünf verschiedenen Muffen Risse festgestellt und repariert worden. Die nähere Überprüfung der Ursache dieser Schäden ergab, dass vermutlich durch kleine Kabelschiebungen infolge Wärmeausdehnung Ermüdungsbrüche des Lötmaterials eingetreten sind. Solche Undichtheiten sind meist erst erkennbar, wenn ein deutlicher Druckabfall registriert wird. In diesem Zeitpunkt aber sind meistens schon 100 und mehr Liter Öl ausgeflossen. Mit Rücksicht auf eventuelle Grundwasserverschmutzungen müssen derartige Schäden als sehr ernst bezeichnet werden.

Prüfmöglichkeiten

Jeder Leitungseigentümer ist bestrebt, seine Anlagen dauernd in einem betriebstüchtigen Zustand zu erhalten. Bei Freileitungen lassen sich durch periodische visuelle Kontrollen auch langsam sich entwickelnde Schwachstellen wie z. B. Verschmutzung von Isolatoren, Aderbrüche an Seilen, Korrosionserscheinungen usw. sehr früh feststellen und rechtzeitig eliminieren. Bei Kabelanlagen sind die Überprüfungsmöglichkeiten sehr stark eingeschränkt. Wohl kann das Kabel nach der Fabrikation eingehend getestet werden, aber nach der Verlegung sind Kontrollen nur noch beschränkt und mit relativ grossem Aufwand möglich. Ganz besonders fehlt für die zurzeit im Vormarsch befindlichen Kunststoffkabel die Möglichkeit der Überprüfung des «inneren» Zustandes.

Die Kabelindustrie hat unermüdlich geforscht und entwickelt und hat ohne Zweifel in den verflossenen Jahren beachtliche Fortschritte erzielt. Aber in der Montage und in praktisch anwendbaren Prüfmethoden nach Inbetriebsetzung sind noch Verbesserungen zu erwarten.

Adresse des Autors
Alfred Meier, dipl. Ing. ETHZ, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Parkstrasse 23, 5401 Baden.

Schutz von Kabelanlagen

Von H. Glavitsch

Die Eigenheiten der Kabel und die damit verbundenen Schutzeinrichtungen werden beschrieben. Die Wahl des Schutzkonzepts wird darauf aufbauend nach dem Spannungsniveau und nach der Sternpunktsbehandlung diskutiert. Beim Überspannungsschutz werden Überlegungen zur Entstehung von transienten und betriebsfrequenten Spannungen und zur Auswahl der Überspannungsableiter angestellt.

Cet article décrit les caractéristiques des câbles et les dispositifs de protection qui y sont liés. A ce propos, il est question du choix du concept de protection selon le niveau de tension et le traitement du point neutre. En ce qui concerne la protection de surtension, il est question de l'origine des tensions transitoires, des surtensions à fréquence d'exploitation et du choix des parafoudres.

1. Einführung

Die Besonderheiten des Schutzes von Kabelanlagen liegen in den Strukturen der Netze und in den Eigenschaften der Kabel selbst. Kabel weisen gegenüber der Freileitung und dem Rohrkabel (SF_6) technologische Besonderheiten auf, die sich im Verhalten während des Betriebes und in der Entstehung eines Fehlers ausdrücken.

Unter Schutz soll sowohl der Überspannungsschutz als auch der Fehlerschutz verstanden werden. Ersterer könnte auch als agierender, letzterer als reagierender Schutz bezeichnet werden. Mit agierendem Schutz ist die Vermeidung einer Überspannung gemeint, die die Ursache für einen Durchschlag der Isolation sein könnte. Der Fehlerschutz muss auf den eingetretenen Fehler reagieren und den betroffenen Leitungsabschnitt ausschalten.

Die Eigenheiten der Entstehung von Überspannungen bei Kabeln liegen im wesentlichen in der Anordnung des Kabels im Netz und in den primären Leitungskonstanten (vor allem der Kapazität) des Kabels.

Fehlereintritt und Fehlerverlauf beim Kabel sind derart, dass nach der Fehlerfortschaltung eine Wiedereinschaltung nicht mehr möglich ist, da an der Fehlerstelle dauernde Schäden zurückbleiben. Der Fehlerschutz kann jedoch einen positiven Beitrag zur Begrenzung dieser Schäden leisten. Die Netzplanung muss dazu im voraus schon dafür sorgen, dass die Werte des Dauerkurzschlussstroms unterhalb der zulässigen Grenzströme des Kabels bleiben.

Ist der Schaden (Fehler) einmal aufgetreten, so gilt es, das schadhafte Kabelstück zu ersetzen, wozu vorerst eine möglichst genaue Kenntnis des Fehlerorts von Vorteil ist. Es besteht deshalb der Wunsch nach scharfer Selektivität des Fehlerschutzes oder zumindest nach einer Fehlerortung nach Eintritt des Fehlers.

Der Einsatz von Kabeln steht meistens unter dem Zwang von örtlichen Gegebenheiten, wie Überbauung, Umweltschutz, Überquerung von Gewässern usw. und ist mit hohen Aufwendungen verbunden. Meistens handelt es sich um Mittel- und Hochspannungsanlagen, bei denen die Leistung pro Kabelstrang nicht allzu hoch ist und die wirtschaftliche Rechtfertigung von vornherein schwierig ist. Die Einrichtungen stehen deshalb auch unter einem gewissen Kostendruck, und man wird im allgemeinen nicht immer allen Wünschen gerecht werden können.

2. Entstehung der Fehler

Da es sich hier um prinzipielle Betrachtungen handelt, werden bei der Entstehung von Fehlern nur Massekabel herangezogen. Der Fehler ist somit ein Durchschlag im Dielektrikum (Papier, Polymer) als Folge einer bestehenden Schwachstelle oder einer Schwächung durch eine Überspannung, einer ungewöhnlichen Erwärmung des Leiters oder auch des Dielektrikums selbst. Es gilt somit die grundsätzliche Unterscheidung nach

- dielektrischem Durchschlag und
- thermischem Durchschlag.

Der Vollständigkeit halber müssen noch der Fehler im Kabelendverschluss und der Fehler verursacht durch Be-