**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:** Schutz von Kabelanlagen

**Autor:** Glavitsch, H.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-905049

**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:** 09.07.2025

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

*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-

schädigung von aussen hinzugezählt werden. Beim Fehler im Kabelendverschluss kann der Mechanismus des Durchschlages gleich wie im Kabel selbst sein (Innendurchschlag), oder es kann sich um einen Isolatorüberschlag (Aussendurchschlag) handeln. Der letztgenannte Fehler ist insofern von Interesse, als es sich um einen Durchschlag in Luft handelt und nach einer spannungslosen Pause eine Wiederverfestigung der Durchschlagsstrecke eintreten kann. In diesem Fall ist die Wiedereinschaltung zulässig. Der Entscheid für die Wiedereinschaltung wird davon abhängen, ob mit einer genügend grossen Wahrscheinlichkeit eines Fehlers am Kabelendverschluss gerechnet werden kann, so dass eine erfolgreiche Wiedereinschaltung Aussicht auf Erfolg hat.

Im allgemeinen wird es sich jedoch um einen Fehler im festen Dielektrikum handeln, die Fehlerstelle weist Brandspuren auf, und die Ausschaltung des Kabelabschnitts muss aufrechterhalten bleiben.

Für den Schutz beziehungsweise für die Auswirkung des Fehlers ist die Art der Störung von Wichtigkeit. Sie wird im wesentlichen von der Bauart des Kabels bestimmt.

Bei Einleiterkabeln bei Verlegung mit einem entsprechenden Phasenabstand bleibt die Störung in den meisten Fällen auf eine Phase beschränkt. Der Fehler wird somit ein einpoliger Erdschluss sein.

Der zweipolige oder dreipolige Kurzschluss ist selten. Es ist daher sinnvoll, den Erdschlussstrom zu begrenzen, und zwar durch eine entsprechende Sternpunktbehandlung des Netzes. Erdschlusslöschung und niederohmige Erdung werden hierfür angewendet, wobei im Bereich bis 110 kV mehrheitlich die Erdschlusslöschung und im Mittelspannungsbereich beide Arten dieser Sternpunktbehandlung zur Anwendung kommen. Im gelöschten Kabelnetz kann bei Auftreten eines Erdschlusses der Betrieb weitergeführt werden. Die Erhöhung der Spannung der gesunden Phasen führt jedoch häufig zum Doppelerdschluss, wobei die zweite Fehlerstelle weit entfernt von der ersten auftreten kann. Der Fehlerschutz hat hier eine besonders schwierige Aufgabe zu bewältigen.

Diese planerischen Massnahmen haben somit einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Störung und deren Folgen.

Im Mittelspannungsbereich wird das Einleiterkabel nicht angewendet, sondern das Gürtelkabel oder das Höchstädterkabel. Die drei Phasenleiter befinden sich auf engem Raum, und die Wahrscheinlichkeit ist gross, dass ein Fehler im Kabel zwei oder drei Phasen erfasst. Das heisst, dass mehrpolige Fehler ohne weiteres auftreten können. Die Störungs- und Schadenstatistik (VEÖ, VDEW) zeigt auch, dass der Kurzschluss im Mittelspannungsbereich der häufigste Fehler ist. Die Erdschlusslöschung hat deshalb im Kabelnetz mit dieser Spannung weniger Bedeutung. Es muss schnellstens dreipolig ausgeschaltet werden.

Bei Spannungen über 110 kV wird die Erdschlusslöschung nicht mehr eingesetzt. Wegen der Spannungsanhebung der gesunden Phasen wird das Netz starr geerdet, was zur Folge hat, dass jeder Erdschluss ein Erdkurzschluss ist und im Falle des Kabels grössere Schäden an der Erdschlussstelle auftreten. Der Erdschluss muss schutztechnisch wie ein Kurzschluss behandelt werden.

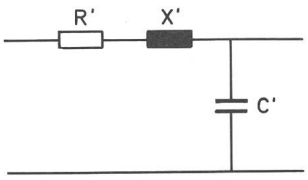


**Fig. 1 Modell des Kabels pro Wegelement (Mit- und Nullsystem)**

## 3. Modell des Kabels

Die Anforderungen an den Schutz von Kabelanlagen sind mit denjenigen für Freileitungen vergleichbar, und das Gerätesortiment ist für den Leitungsschutz heute allgemein einsetzbar. Somit ist im wesentlichen eine genaue Kenntnis des Netzes erforderlich, in dem das Kabel eingebettet ist. Die speisende Seite des Netzes ist genauso wichtig wie die abgehende Seite (vom Relaiseinbauort aus gesehen).

Ein besonderes Merkmal von Kabelanlagen im Vergleich zu Freileitungsnetzen ist die geringe geographische Ausdehnung. Eine Kabelstrecke (Drehstrom) kann aus Gründen des Ladestroms nicht länger als 40 km sein (Grenzlänge). Praktisch handelt es sich eher um Längen von 1 bis 10 km. Die Fehlerentfernung ist deshalb von vornherein gering.

Für die elektrisch auftretenden Fehlerimpedanzen muss das Leitungsmodell des Kabels betrachtet werden, wofür ein Modell mit verteilten Parametern angesetzt wird, siehe Figur 1.

Bei diesem Modell, das sowohl für das Mit- als auch für das Nullsystem eingesetzt werden kann, sind von den sogenannten primären Leitungskonstanten, $R_1'$, $X_1'$, bzw. $L_1'$ und $C_1'$, sowie $R_0'$ und $X_0'$ bzw. $C_0'$, einige charakteristische mit ihren Abhängigkeiten im folgenden diskutiert. Von Interesse ist die Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt und von der Betriebsspannung.

Die Widerstandsbeläge $R_1'$ und $R_0'$ bedürfen keiner besonderen Erläuterung. Prinzipiell gilt die abnehmende (hyperbolische) Abhängigkeit vom Querschnitt. Eine Spannungsabhängigkeit ist durch die Auslegung auf eine bestimmte Leistung gegeben.

Beim Induktivitäts- und Kapazitätsbelag dagegen spielen die Anordnung des Phasenleiters sowie seine Abschirmung eine wesentliche Rolle. Für den induktiven Blindwiderstandsbelag ist in Figur 2 die Abnahme mit dem Quer-

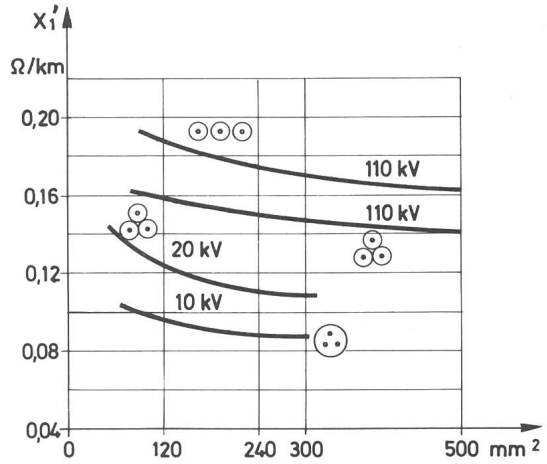


**Fig. 2 Induktive Blindwiderstandsbeläge bei 50 Hz von Drehstromkabeln 10, 20, 110 kV (Mit-, Gegensystem) unterschiedlicher Bauart (nach [1])**

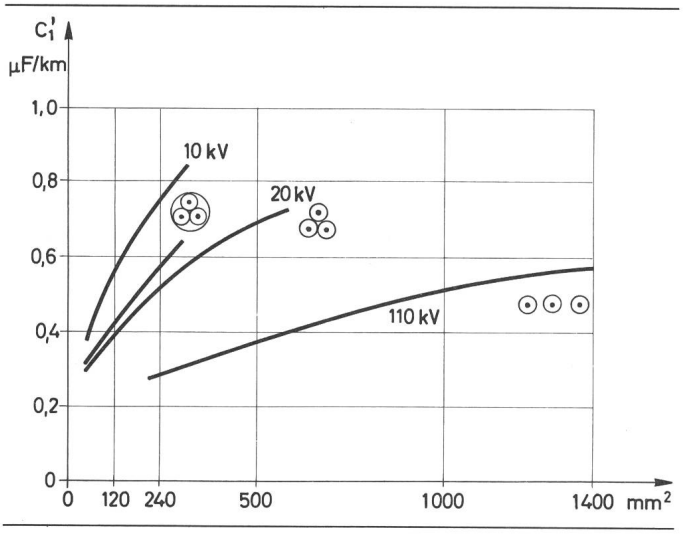


**Fig. 3 Kapazitäten von Dreimantelkabeln, Höchstädterkabeln und Einleiterkabeln (Massekabel)**
**$C_1' = C_2' = C_0'$ (nach [1])**

schnitt für Einleiter- und Dreileiterkabel gezeigt. Die Kurven gelten für eine feste Spannung und damit für einen festen Isolationsabstand. Da sich mit zunehmendem Querschnitt das Verhältnis von Leiterradius zum Radius der Abschirmung ändert, nimmt der Belag ab.

Beim Kapazitätsbelag ist es umgekehrt. Mit dem Querschnitt nehmen die Oberflächen des Leiters und der Abschirmung zu und deshalb auch der Kapazitätsbelag, wie es die Figur 3 zeigt.

Werden die Daten von Mittelspannungs- und Hochspannungskabeln etwas systematisch überprüft, so sind die folgenden auffallenden Gegebenheiten festzustellen:

*Mittelspannung*

- Das Verhältnis $\frac{R_1'}{X_1}$ ist in der Grössenordnung von 1 bis 2
- Der Reaktanzbelag bewegt sich im Bereich zwischen 0,1 bis 0,15 Ω/m
- Das Verhältnis $\frac{R_0'}{X_0'}$ liegt bei 2
- Der Kapazitätsbelag $C_1'$ variiert im Bereich von 0,2...0,6 µF/km (abhängig vom Leiterquerschnitt)

*Hochspannung*

- Das Verhältnis $\frac{R_1'}{X_1'}$ ist in der Grössenordnung von 0,5
- Reaktanzbelag $X_1'$ liegt zwischen 0,14 und 0,2 Ω/km
- Das Verhältnis $\frac{R_0'}{X_0'}$ liegt bei 2,5
- Der Kapazitätsbelag $C_1'$ variiert von 0,2...0,5 µF/km (abhängig vom Leiterquerschnitt)

Eine einfache Überprüfung zeigt, dass die Kapazität des Kabels bei den hier interessierenden Längen (z. B. 0...15 km) beim Kurzschluss keine Rolle spielt. Für die Kurzschlussimpedanz ist somit nur das Längsglied der $\pi$-Ersatzschaltung $R + jX$ massgebend.

Bei Kabellängen von 15 km ist mit Fehlerimpedanzen in den untenstehenden Bereichen zu rechnen.

Mittelspannung (20 kV):
Mitsystem $R_1 + jX_1 = 0...1{,}5 + j\,1{,}5\,\Omega$
Nullsystem $R_0 + jX_0 = 0...15 + j\,9\,\Omega$

Hochspannung (110 kV):
Mitsystem $R_1 + jX_1 = 0...1{,}5 + j\,3\,\Omega$
Nullsystem $R_0 + jX_0 = 0...9 + j\,4\,\Omega$

Dieses Beispiel zeigt, dass das Nullsystem wesentlich höhere Impedanzen als das Mitsystem aufweist, wobei noch der ohmsche Anteil grösser als der induktive Anteil ist. Bei Einsatz eines Distanzschutzes ist diesen grossen Impedanzunterschieden bei der Einstellung der Parameter für den einpoligen Erdschluss Rechnung zu tragen.

Für den Fehlerschutz interessiert nun ebenso die Netzseite, und zwar einerseits vom Gesichtspunkt der Strombegrenzung oder überhaupt der zu erwartenden Stromamplituden und anderseits vom Gesichtspunkt der Messspannungen.

Die bestimmenden Grössen dafür sind die dreipolige Kurzschlussleistung und die Sternpunktbehandlung. Zur Charakterisierung des Mitsystems werden die zwei typischen Spannungsebenen 110 kV und 20 kV mit typischen Kurzschlussleistungen betrachtet, nämlich

110 kV : 4000 MVA
20 kV : 500 MVA

Wird auf die Netzreaktanz zurückgerechnet, so ergeben sich für

110 kV : X = 3 Ω und für
20 kV : X = 0,8 Ω

Bei der Sternpunktbehandlung genügt es, wenn hier die
- Erdschlusskompensation
- die niederohmige Erdung
- das isolierte Netz

betrachtet werden.

Im isolierten und im kompensierten Netz ist die Fehlerspannung der betroffenen Phase verschwindend klein, so dass bekanntlich die Sternpunktverlagerung und der Wirkanteil des Fehlerstroms für eine Erdschlussanzeige herangezogen werden müssen.

Beim dreipoligen Fehler und beim Erdschluss im niederohmig geerdeten Netz richtet sich die Fehlerspannung nach dem Verhältnis der Fehlerimpedanz zur Netzimpedanz. Der Vergleich der oben angegebenen Kabelimpedanzen mit den gerechneten Netzreaktanzen zeigt, dass die Fehlerspannungen sich im Bereich von 0...50% der Nennspannung bewegen werden.

Elektrisch hat man es somit beim Kabel immer mit relativ wenig ausgedehnten Schutzbereichen zu tun. Bemerkenswert dabei ist, dass im Hinblick auf eine Anwendung eines Distanzrelais der ohmsche Anteil der Kabelimpedanz relativ hoch ist und dass eine markante Variation des Stromes mit der Kabellänge (Grössenordnung 1:2) nicht gegeben ist.

## 4. Auswahl des Schutzkonzepts

### *4.1 Wesentliche Gesichtspunkte*

Nach der Bauart der Kabel, ihren Erdungsverhältnissen und ihren Kenndaten muss der Schutz von Kabelanlagen nach der Sternpunktbehandlung und nach dem Spannungsniveau betrachtet werden, womit sich vier Kategorien ergeben, siehe Tabelle I.

*Charakterisierung von Kabelanlagen* Tabelle I

| | Mittelspannung | Hochspannung |
|---|---|---|
| Gelöschtes Netz<br>Isoliertes Netz | Kategorie A | Kategorie B |
| Niederohmig geerdetes Netz | Kategorie C | Kategorie D |

Bezüglich der zu verwendenden Schutzrelais kann festgehalten werden, dass die heute von den Herstellern angebotene Hardware allgemein anwendbar ist und keine speziellen Relais für den Kabelschutz erforderlich sind. Elektronische Relais erlauben die Einstellung beliebiger Charaktèristiken für Distanzrelais, wie zum Beispiel eine in Polygonform in Figur 4 gezeigt ist.

Ebenso lassen sich Überstromrelais freizügig einstellen, so dass hier mit dem herkömmlichen Relaissortiment gearbeitet werden kann. Für Richtungsrelais gilt prinzipiell das gleiche.

Es ist eher eine Kostenfrage als ein technisches Argument, dass ein für den Zweck geeignetes Relais nicht zum Einsatz kommt und man mit einer einfacheren Ausführung das Auslangen findet.

Wenn es sich nun bei den Kabelanlagen um gelöschte Netze oder isolierte Netze handelt, so tritt jeweils an die Stelle des Erdschlussschutzes die Erdschlussanzeige (Sternpunktverschiebung und Erdschlussrichtung). Daneben ist jedoch ein Kurzschlussschutz vorhanden. Beim niederohmig geerdeten Netz ist der Erdschluss ein Erdkurzschluss, so dass dieser zusammen mit dem zweipoligen und dreipoligen Kurzschluss von einem einzigen Relais bewältigt werden kann.

Wiedereinschaltung bei einem Fehler im Kabel selbst ist nicht möglich, wohl aber am Kabelendverschluss. Von einem Mittelspannungsnetz 10 (20) kV in Budapest ist bekannt, dass aufgrund der statistischen Erfahrung Wiedereinschaltung eingesetzt wurde.

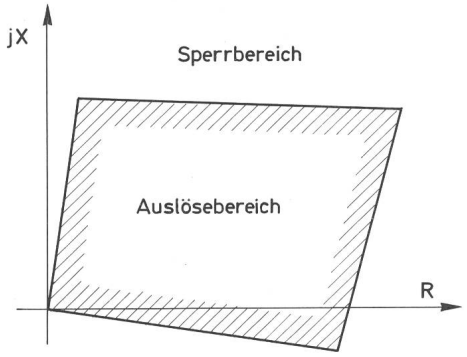


**Fig. 4 Charakteristik eines Distanzrelais in Polygonform**

### *4.2 Schutzkonzept bei Mittelspannung im gelöschten (isolierten) Netz – Kategorie A*

Auf der Mittelspannung handelt es sich meistens um radial betriebene Netze (vermascht aufgebaut, aber einseitig offene Kabelstrecken).

In diesen Fällen ist der Kurzschlussschutz mit einem Überstromrelais realisierbar. Eine gewisse Staffelung ist möglich. Sie kommt aber nur dann zum Tragen, wenn längs des Kabels Schalter eingesetzt werden können (selektives Ausschalten). Ansonsten können die Relais in einer gestaffelten Anordnung nur zur Fehleranzeige angewendet werden. Der am Kabeleingang befindliche Schalter bereinigt den Fehler, und die im Zuge des Kabels installierten Relais (mit Speicherung) zeigen bis zur Fehlerstelle den Kurzschluss an. Damit kann die Fehlerstelle leicht eingegrenzt werden. Die Staffelzeiten können relativ lang sein (bis 5 s).

Für die Erdschlussanzeige kommt ein wattmetrisches Relais oder ein Wischerrelais (gelöschtes Netz) bzw. ein Richtungsrelais basierend auf dem kapazitiven Erdschlussstrom (isoliertes Netz) in Frage.

Kabel im Mittelspannungsnetz sind in Form des Dreileiterkabels aufgebaut. Damit ist bei einem Erdschluss die Gefahr der Entstehung eines zweipoligen oder dreipoligen Kurzschlusses an derselben Fehlerstelle gross. Aus Gründen der Spannungsanhebung der gesunden Phasen beim Erdschluss ist auch die Tendenz zum Doppelerdschluss gegeben.

### *4.3 Schutzkonzept bei Hochspannung im gelöschten Netz – Kategorie B*

Das 110-kV-Netz, das repräsentativ für ein Hochspannungsnetz angesehen werden kann, in dem Kabelstrecken vorkommen, wird vermascht betrieben. Deshalb muss für den Kurzschlussschutz ein Distanzschutz eingesetzt werden, was noch durch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen unterstützt wird.

Der Erdschluss muss durch ein Richtungsrelais angezeigt werden (wattmetrisch), wofür die üblichen Lösungswege in Frage kommen.

Da nun auf dieser Spannungsebene das Kabel als 3× Einleiterkabel vorhanden ist, tritt der zweipolige Fehler in einer unangenehmen Konfiguration auf. Eine einzige Fehlerstelle ist wegen der Einleiterkabel wenig wahrscheinlich. Der Doppelerdschluss ist viel häufiger vertreten, wobei die Fehlerstellen nicht unbedingt im selben Schutzbereich des Distanzrelais liegen. Es gilt somit entweder beide Fehler zu bereinigen oder zumindest einen davon, wobei der andere als Erdschluss in der üblichen Weise anzuzeigen ist.

Bei der Erfassung des Doppelerdschlusses benutzt das Distanzrelais die gleiche Beziehung wie für den einpoligen Erdschluss, und zwar

$$U_R = Z_m \cdot \left(I_R + I_0 \frac{Z_0 - Z_m}{Z_m}\right) = Z_m \, (I_R + I_0 \, k)$$

Das Ansprechen des Relais ist jedoch abhängig von der relativen Lage der Fehler in den Phasen zum Relaiseinbau-

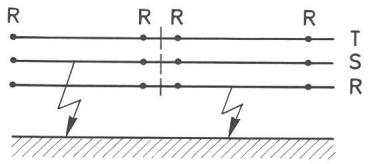


**Fig. 5 Doppelerdschluss auf einem Kabelsystem Fehlerorte in unterschiedlichen Schutzbereichen**
R = Relaiseinbauorte

ort. Dazu wird eine Situation nach dem Schema in Figur 5 betrachtet, wofür ein gelöschtes Kabelnetz vorausgesetzt wird.

Die Relais an den Einspeisungen stellen die Erdberührung nicht fest, da kein Nullstrom oder bestenfalls der Kompensationsstrom vorhanden ist. Als zweipoliger Fehler erscheint der Fehlerort weit weg.

Die Relais zwischen den Fehlerorten sehen jeweils einen einpoligen Fehler, wobei jedoch die Anregerelais beide Phasen fehlerbehaftet anzeigen. Die Fehlerimpedanz $Z_m$ wird nach der obigen Beziehung korrekt festgestellt, und zwar in beiden Schutzbereichen.

In dieser Situation wird nun ein Abschnitt in Abhängigkeit der Phasenfolge der Fehlerorte dreipolig ausgeschaltet. Bei der Wahl der zyklischen Folge wird beim Fehler in *R* vor *T* vor *S* die Leitung ausgeschaltet.

Damit wird ein Fehler bereinigt, und ein einpoliger Erdschluss bleibt bestehen. In der Anordnung nach Figur 5 wird demnach die Leitung mit dem Fehler in der Phase S ausgeschaltet. In einem solchen Fall könnte auch ein Richtungsvergleichsschutz zur Anwendung kommen (phase comparison), der die Fehler selektiv bereinigt.

### *4.4 Schutzkonzept bei Mittelspannung im niederohmig geerdeten Netz – Kategorie C*

Die niederohmige Erdung schafft klare Verhältnisse bezüglich der Lokalisierung des Erdschlusses, der in dem Fall ein Erdkurzschluss ist. Der Fehler muss ausgeschaltet werden, damit wird die Gefahr des Doppelerdschlusses vermindert. Der Schutz ist deshalb ein Kurzschlussschutz, der als Überstromschutz oder als Distanzschutz aufgebaut sein kann. Ersterer ist wieder nur bei radialer Betriebsweise des Kabelnetzes möglich, was jedoch bei dieser im Mittelspannungsnetz bevorzugten Struktur häufig der Fall sein wird.

### *4.5 Schutzkonzept bei Hochspannung im niederohmig geerdeten Netz – Kategorie D*

Die niederohmige Erdung ist im Hochspannungsnetz (aus traditionellen Gründen) nicht üblich. Deshalb kann sie nicht als Charakteristikum hervorgehoben werden. Wesentlich ist jedoch auf dieser Spannungsebene, dass man einen Distanzschutz einsetzen wird (es könnte sich auch um ein starr geerdetes Netz handeln), und zwar wegen der Vermaschung. Die bei dieser Netzkonzeption auftretenden Fehlerarten werden vom Distanzschutz gut beherrscht.

Ein Richtungsvergleichsschutz kommt ebenso in Frage, um die bei Kabeln erwünschte genaue Eingrenzung des Fehlers zu erreichen.

## 4. Überspannungsschutz

Die Aufgabe des Überspannungsschutzes besteht darin, das Auftreten von unzulässigen Überspannungsamplituden zu verhindern, wobei beim Kabel die Form des Anstiegs der Überspannung (Impuls, Schaltspannung, Betriebsfrequenz) nicht die Rolle spielt wie bei der Freileitung. Das Kabel ist im wesentlichen durch die Amplitude gefährdet. Der Überspannungsschutz kann genauso wenig wie sonst in einer Schaltstation betriebsfrequente (temporäre) Überspannungen begrenzen, sondern nur atmosphärisch oder durch Schalthandlungen bedingte Spannungserhöhungen.

Betriebsfrequente Spannungen sind entweder an der Quelle (Spannungsregelung) oder durch Blindleistungskompensation zu beherrschen, worauf hier jedoch nicht näher eingegangen wird.

Die Frage, die es bei Kabelanlagen wieder zu beantworten gilt, ist die, auf welche Weise sich die Eigenheiten des Kabels und seines Einbaus im Leitungszug auf die Entstehung von Überspannungen auswirken.

Es sei hier vorweggenommen, dass atmosphärische Überspannungen im Vordergrund des Interesses stehen. Diese stammen von Blitzeinschlägen auf der Freileitung, und daher müssen hier Kabelabschnitte im Zuge von Freileitungen oder an deren Ende betrachtet werden.

Ausgedehnte Kabelnetze sind daher durch diese Art der Beanspruchung nicht gefährdet.

An dieser Stelle ist es angebracht, sich die wichtigen Parameter des Kabels im Vergleich zur Freileitung zu vergegenwärtigen. Für Einleiterkabel gilt grössenordnungsmässig [2]:

$$v_K = 0{,}5\ v_F$$

$$C'_K = (18 \ldots 30)\ C'_F$$

$$\frac{Z_K}{Z_F} = \frac{1}{9} \ldots \frac{1}{15}$$

wobei

$v_K$, $v_F$ Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des Kabels bzw. der Freileitung
$C'_K$, $C'_F$ Kapazitätsbelag des Kabels bzw. der Freileitung
$Z_K$, $Z_F$ Wellenwiderstand des Kabels bzw. der Freileitung

Um diese Unterschiede zu veranschaulichen, stelle man sich ein 2 km langes Kabel vor, das auf $60\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV aufgeladen ist. Seine Ladung entspricht einer rund 50 km langen Freileitung, und der Entladestromstoss ist 10mal so gross wie derjenige der Freileitung, d. h. 0,02 As und 1220 A statt 122 A ($Z_K = 40\,\Omega$).

Nach [2] sind nun zwei Fälle zu unterscheiden, die beim Aufladen eines Kabelschnittes durch eine von der Freileitung herkommende Spannungswelle von Bedeutung sind, nämlich das Kabel am Leitungsende und das Kabel im Zuge der Freileitung.

In keinem der Fälle wird durch das Kabel die Amplitude der Spannungswelle vermindert. Wohl wird die Steilheit der weiterlaufenden Welle reduziert, und zwar in Abhängigkeit der Kabellänge. Je länger das Kabel, um so flacher wird die Welle. Beim Kabel am Leitungsende steigt die Spannung auf das Doppelte, unabhängig von der Kabellänge.

Beim Kabel im Zuge der Freileitung steigt die Spannung an den Kabelenden nicht über die Amplitude der einfallenden Welle an.

Der erstere Fall ist somit derjenige, der näher betrachtet werden muss, da er auch in Anlagen häufig vorkommt, wie z. B. beim Anschluss eines Transformators. Dabei interessiert nicht nur die Spannungsbeanspruchung des Kabels, sondern ebenso diejenige des Transformators. Diese Konfiguration ist eingehend untersucht worden, und zwar vor allem bezüglich der Wirkung eines Überspannungsableiters, der am Eingang des Kabels plaziert wird.

Das Interesse richtet sich vor allem danach, ob die Vorgabe eines Schutzniveaus durch den Überspannungsableiter das Ansteigen der Spannung am Kabelende darüber hinaus verhindern kann. Interessanterweise ist die Antwort darauf abhängig davon, in welcher Entfernung vom Überspannungsableiter der Blitzschlag erfolgt.

Die Anordnung dieser Kabelanlage und die wesentlichen Ergebnisse sind in der Figur 6 aus [2] dargestellt.

Daraus ist ersichtlich, dass Naheinschläge bis zu einer Spannung am Transformator führen können, die das Doppelte des Schutzniveaus ausmacht. Wenn dagegen der Blitzschlag laufzeitmässig mindestens so weit entfernt ist, wie das Kabel lang ist, liegt die Spannungserhöhung nur im Bereich von 20...30%; das heisst, dass es nicht genügt, am Kabel einen Überspannungsableiter anzubringen, sondern die Leitung muss so geschützt werden, dass im Nahbereich des Kabeleingangs kein Blitzschlag in den Phasenleiter erfolgen kann (Erdseil, Masterdung). Die Länge des Kabels hat somit nur eine relative Bedeutung. Ein wirksamer Schutz des Kabels und der daran angeschlossenen Anlagen ist auf diese Weise möglich.

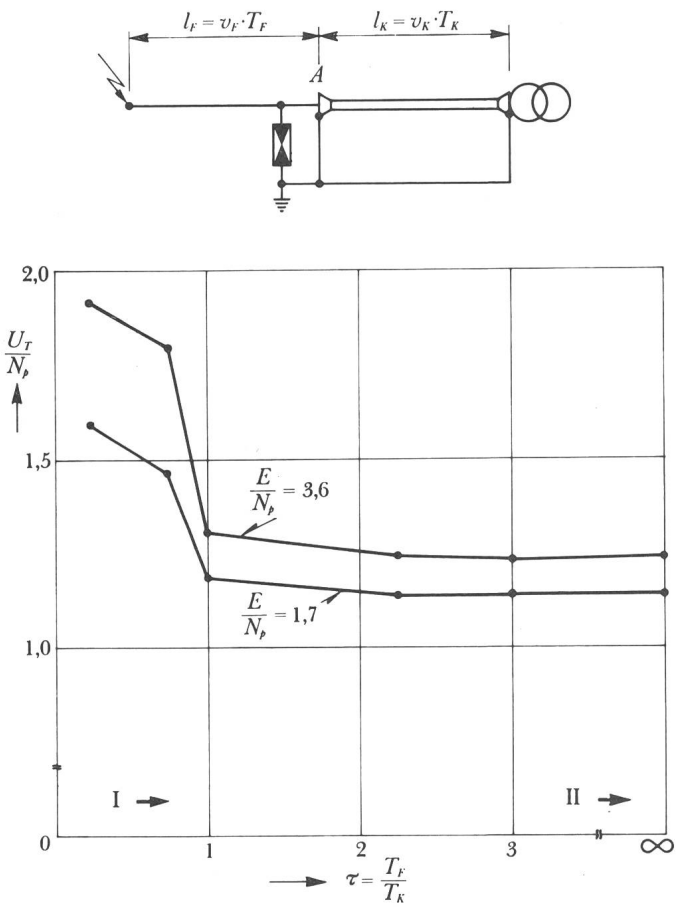


**Fig. 6 Maximale Spannungen an einem Transformator mit direkt eingeführten Kabeln bei Blitzschlag in die vorgelagerte Freileitung. Resultate aus Berechnung mit Digitalrechner**

Reflexionskoeffizient $\gamma = -0{,}875$, entsprechend $Z_F = 15\ Z_K$

$A$ = Übergangsstelle Freileitung–Kabel
$T_F$ = Laufzeit von der Einschlagstelle bis zum Kabel
$T_K$ = Laufzeit durch das Kabel
$\tau = \frac{T_F}{T_K}$ = Laufzeitverhältnis
$U_T$ = Maximale Spannung am Transformator
$N_p$ = Schutzniveau des Ableiters am Kabeleingang
$E$ = Amplitude der einfallenden Welle
I = Zone der Naheinschläge
II = Zone der Ferneinschläge

Bezüglich der Auswahl des Überspannungsableiters sind wieder einige Eigenheiten des Kabelnetzes zu berücksichtigen. Primär ist zu beachten, dass beim gelöschten Kabelnetz die Nennspannung in der Grössenordnung der verketteten Spannung liegt. Soll dafür ein Zinkoxid-Ableiter eingesetzt werden, so müssen entsprechend mehr Ableitereinheiten verwendet werden, und der Ableiter wird teurer.

Auf der andern Seite ist der Entladestrom eines längeren Kabels (10 km) so gross, dass ein Ableiter mit Funkenstrekken dem mehrmaligen Ansprechen nicht gewachsen ist. Ein Parallelschalten nützt dabei nichts, da eine entsprechende Aufteilung des Stroms nicht erfolgt.

Demgegenüber hat der Zinkoxid-Ableiter den Vorteil, dass durch Parallelschalten Anordnungen aufgebaut werden können, die den Entladestrom bewältigen.

Zur Illustration sind untenstehend die Charakteristiken eines Zinkoxid-Ableiters angegeben, wie er in einem gelöschten 110-kV-Kabelnetz eingesetzt werden könnte.

*Ableiterdaten*

| | |
|---|---|
| Nennspannung | 120 kV (Effektivwert) |
| Höchstzulässige Betriebsspannung | 97,2 kV (Effektivwert) |
| Schutzniveau (3 kA, 8×20 µs) | 345 kV (Scheitelwert) |
| Schutzniveau (Schaltspannung) | 236 kV (Scheitelwert) |

Bezieht man sich auf die Nennspannung Phase gegen Erde, so erhält man ein Schutzniveau von 2,73 p. u. (3 kA) bzw. 2,36 p. u.

Um auf die tiefstmöglichen Überspannungen im Kabel zu kommen, muss nun der Einbau des Kabels im Netz, wie das Beispiel in Figur 6 zeigt, miteinbezogen werden.

Bei Schaltspannungen verhält sich das Kabel wie eine konzentrierte Kapazität, so dass dafür keine besonderen Betrachtungen notwendig sind. Die Überlegungen bezüglich der Wirksamkeit des Ableiters zur Begrenzung der Schaltspannungen sind die gleichen wie für die Freileitung. Das heisst, es ist letztlich eine Frage der vom Ableiter dissipierten Energie, die von der Netzkonfiguration und nicht allein vom Kabel abhängig ist.

## 6. Fehlerortung

Für die rasche Reparatur von Kabeln ist es von Wichtigkeit, die Fehlerstelle im Kabel genau, das heisst sozusagen auf den Meter genau zu kennen. Der Fehlerschutz kann diese Aufgabe on-line nicht erfüllen. Eine exakte Lokalisie-

rung des Fehlers ist nur post mortem durch Auswertung von aufgezeichneten Verläufen von Spannungen und Strömen möglich. Schätzmethoden unter Benutzung des Wanderwellenmodells des Kabels, die auf einem Computer zu implementieren sind, erlauben eine solche Lokalisierung. Die Voraussetzung ist jedoch die Aufzeichnung von Strom und Spannung an den Kabelenden, was nicht von vorneherein gegeben ist.

### 7. Schlussbetrachtungen

Der Schutz von Kabelanlagen lässt sich mit den heute zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln und dem Gerätesortiment befriedigend bewerkstelligen. Die Eigenheiten des Kabels lassen sich bei der Einstellung der Schutzrelais ohne weiteres berücksichtigen. Schwierigkeiten machen eher prinzipielle Gegebenheiten der Kabelanlagen, wie die Erdschlusslöschung bezüglich Erdschlussanzeige und Bereinigung eines Doppelerdschlusses.

Die Grundlagen für die Auslegung eines Überspannungsschutzes von Kabelanlagen sind seit langem bekannt. Neue Gesichtspunkte sind durch die Einführung von funkenstreckenlosen Überspannungsableitern hinzugekommen, die jedoch die Aufgabe technisch eher erleichtert haben.

### Literatur


[1] *H. Happoldt, D. Oeding:* Elektrische Kraftwerke und Netze, 5. Auflage 1978, Springer.

[2] *M. Christoffel:* Der Einfluss von Kabelstrecken auf die Überspannungsvorgänge in Übertragungsnetzen mittlerer und hoher Spannung, Brown-Boveri-Mitteilungen, 51(1964)6, S. 369.


### Adresse des Autors


Dr. *H. Glavitsch*, Professor am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik der ETH, Gloriastrasse 35, 8092 Zürich.


# Mess- und Prüftechnik an Hochspannungs-Isolationen


Von P. Seitz



*Teilentladungsmessungen an installierten Kabelsystemen sind mit externen Spannungsspeisungen möglich. Mit einer Brückendetektor-Schaltung können Pegel von 5 pC an dreiphasigen Systemen gemessen werden. Verlustfaktormessungen im Feld können mit einer Differentialtransformator-Brücke und modernen, elektronisch kompensierten Stromwandlern mit Netzspannung durchgeführt werden. Wenn neu zu installierende Kabelsysteme mit isoliertem Schirm ausgeführt werden, können Verlustfaktormessungen während des Betriebes durchgeführt werden, oder es besteht sogar die Möglichkeit, ein Verlustfaktor-Überwachungssystem als dauerndes Isolations-Überwachungsgerät einzusetzen.*

*Des mesures de décharges partielles sur des systèmes de câble installés peuvent être effectuées avec des alimentations en tension externes. Une connexion avec détecteur en pont permet de mesurer des niveaux de 5 pC sur des systèmes triphasés. Les facteurs de perte sur place peuvent être mesurés avec un transformateur différentiel en pont et des transformateurs de mesure modernes à compensation électronique et avec la tension du secteur. En réalisant de nouveaux systèmes de câble avec écran isolé, les facteurs de perte peuvent être mesurés pendant l'exploitation ou il est même possible d'employer un système de contrôle pour facteurs de perte en tant qu'instrument de contrôle permanent d'isolation.*


### 1. Teilentladungsmessungen am Hochspannungskabel im Labor

Teilentladungsmessungen an Kunststoffkabeln werden normalerweise in einem abgeschirmten Raum (Faraday-Käfig) vorgenommen. Der Teilentladungspegel muss nach IEC-Empfehlungen weniger als 5 pC betragen [1; 5]. Solche Empfindlichkeiten können nur in einem abgeschirmten Raum zuverlässig erreicht werden. Die Störunterdrückung für magnetische Einflüsse muss mindestens 80 dB betragen [8], damit in normalen Industrieanlagen vernünftig gemessen werden kann. Elektronische Störunterdrückungsmethoden haben sich in der Praxis bis heute nicht bewährt. Für Teilentladungsmessungen kennt man zwei Methoden. Die ältere der beiden Methoden nennt man die Geradeaus-Detektor-Methode [1] (s. Figur 1). Für diese Methode benötigt man eine Hochspannungsspeisung mit sehr kleiner Eigenteilentladung. Um dies zu erreichen, ist der Speisung normalerweise ein Hochspannungsfilter (Tiefpass) nachgeschaltet, das die Störungen des Hochspannungstransformators weiter abschwächt auf einen Eigenteilentladungswert von weniger als 1 pC.

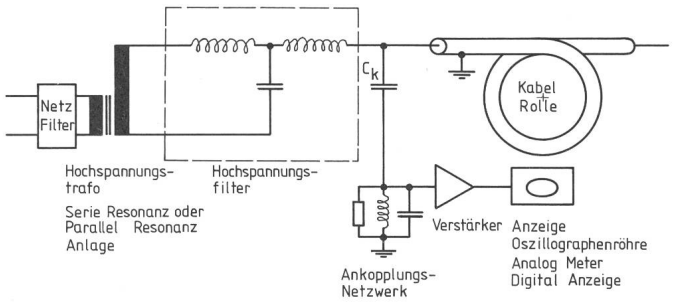


**Fig. 1 Einfache Verstärkermethode (Straight Detector)**