Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 59 (1968)

Heft: 14

Artikel: Erfahrungen mit Kunststoffkabeln in Deutschland

Autor: Wanser, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916063

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: 10.07.2025

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

Erfahrungen mit Kunststoffkabeln in Deutschland

Von *G. Wanser,* Langenhagen

621.315.211.9.004(43)

1. Historischer Überblick

Die Starkstromkabeltechnik ist so alt wie die Starkstromtechnik selbst. Mit der Erzeugung und Anwendung elektrischer Energie mussten auch Möglichkeiten zu ihrer Übertragung geschaffen werden. In Deutschland wurde das erste Starkstromkabel 1880 in Berlin verlegt. Es hatte sieben Adern und war mit Guttapercha isoliert, einem Werkstoff, der heute fast nicht mehr bekannt ist. Bei der Fertigung dieses Kabels konnten die Hersteller auf Erfahrungen zurückgreifen, die man bereits mit Nachrichtenkabeln gewonnen hatte; denn schon um 1850 waren mit Guttapercha isolierte Telegrafenkabel für eine Nachrichtenverbindung zwischen England und Frankreich verlegt worden (Fig. 1).

Auch in Deutschland war man sich bald darüber im klaren, dass für die Übertragung stärkerer Ströme andere Kabelbauarten als für Fernmeldezwecke gefunden werden mussten. Die schon bei verhältnismässig niedrigen Temperaturen erweichende Guttapercha ist bei grösseren Belastungen als Isolierstoff für Starkstromkabel ungeeignet. In England und in den USA ersetzte man die Guttapercha durch Gummi. In Deutschland war man sparsamer und versuchte es mit getränkten Faserstoffen wie Jute und Hanf, die dann mit einem Bleimantel gegen Feuchtigkeit geschützt wurden.

Einen entscheidenden Auftrieb erhielt die Starkstromkabeltechnik durch *Ferranti,* der erstmals 1890 in England mit Erdwachs getränktes Papier als Isolierung für ein 10 kV-Einphasenkabel verwendete. Dieses Kabel mit seinem geschichteten Dielektrikum war die Grundlage für die spätere Massekabeltechnik und damit auch für die heutigen Bauformen von Höchstspannungskabeln wie Ölkabel, Gasinnen- und Gasaussendruckkabel.

Technische und wirtschaftliche Gründe gaben in den 30er Jahren Anlass zur Verwendung von Kunststoffen als Isolier- und Mantelwerkstoff. Damit kann man wieder auf Bauformen zurück, die bereits um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts aus der Nachrichtentechnik übernommen waren. Es ist anzunehmen, dass man wohl kaum über die Jute zur Papiertechnik gekommen wäre, wenn seinerzeit schon Kunststoffe mit den Eigenschaften von heute zur Verfügung gestanden hätten. So aber ist die Entwicklung einen weiten Umweg gegangen und kehrt nun langsam zu Verfahren und Bauformen zurück, die schon fast vergessen sind.

Wenn von technischen und wirtschaftlichen Gründen gesprochen wird, die den Einsatz von Kunststoffkabeln in Deutschland beschleunigten, so sind die bekannten Vorteile zu nennen, die das Kunststoffkabel vor dem Papierbleikabel hat: einfachere Herstellung, kein Abwandern der Masse, kein Austritt von Masse an den Enden, geringeres Gewicht, keine Korrosionsgefahr, kleinere zulässige Mindestbiegeradien, vereinfachte Verlege- und Montagetechnik. Als Beispiele werden in Fig. 2 die Endabschlüsse eines Kunststoffkabels und eines Papierbleikabels in einer Niederspannungsanlage und in Fig. 3 die Innenraumendverschlüsse von 10 kV-Kunststoffkabeln gezeigt. Auch blieben die damaligen Bestrebungen in Deutschland, von Rohstofflieferungen aus dem Ausland weitgehend unabhängig zu sein, nicht ohne Einfluss auf die Entwicklung. Dies war besonders im Krieg der Fall, als eine starke Verknappung von Isolierölen und Blei eintrat.

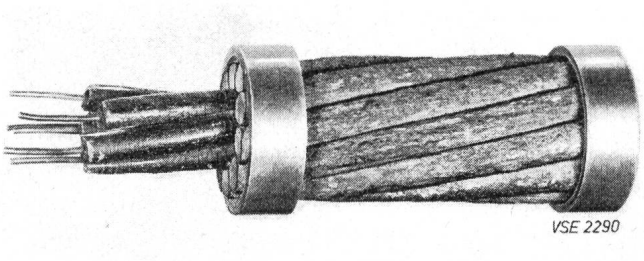

Fig. 1
Nachrichtenkabel mit Isolierung aus Guttapercha (vermutlich um 1850)

Heute werden in Deutschland im Niederspannungsbereich fast ausschliesslich Kunststoffkabel mit einer Isolierung aus weichgemachtem Polyvinylchlorid (PVC) eingesetzt. Das Papierbleikabel hat in diesem Bereich seine Bedeutung verloren. Auch in 10 kV-Netzen nehmen Kunststoffkabel mehr und mehr zu. Im 20...30 kV-Bereich herrscht dagegen noch das Massekabel vor. Aber auch hier ist eine Änderung zu erwarten, nachdem die Erfahrungen in einigen europäischen Ländern — wie hier in der Schweiz — insbesondere aber auch in den USA vermuten lassen, dass Polyäthylen (PE) als Isolierstoff dem Papierdielektrikum technisch und wirtschaftlich überlegen ist.

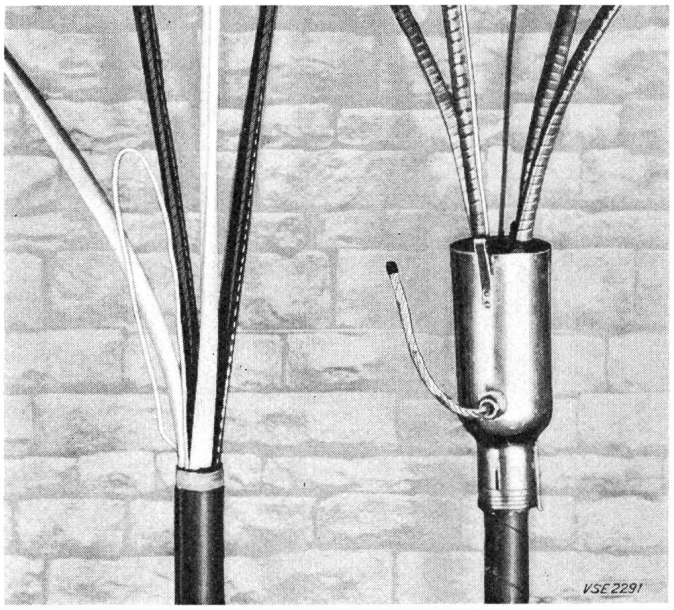

Fig. 2
Endabschluss Niederspannungs-Kunststoff- und Papierbleikabel

2. Aufbau und Eigenschaften von Kunststoffkabeln

Es hat weniger technische als historische und wirtschaftliche Gründe, warum in Deutschland das Polyvinylchlorid und nicht der Butylkautschuk oder das Polyäthylen *der* Isolierstoff für Kunststoffkabel geworden ist. Im Gegensatz zu Butylkautschuk und Polyäthylen ist die Entwicklung von Polyvinylchlorid stark von Deutschland beeinflusst und dort auch während des Krieges vorangetrieben worden. Andererseits waren Butylkautschuk und Polyäthylen in den ersten Nachkriegsjahren in Deutschland nicht erhältlich, und so ist es zu verstehen, dass sich die Entwicklung dort weiter auf

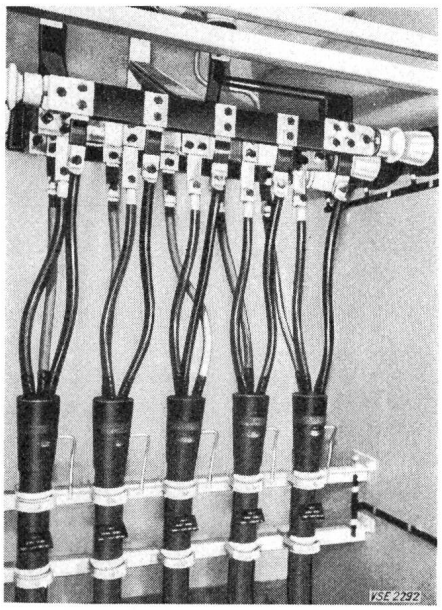

Fig. 3
Innenraumendverschlüsse von 10 kV-Kunststoffkabeln

Polyvinylchlorid konzentrierte. Polyvinylchlorid ist ein typischer Thermoplast. Seine mechanischen Eigenschaften sind stark temperaturabhängig, wobei seine Erweichung in Abhängigkeit von der Temperatur stetig verläuft. Die Grenze seiner oberen Verwendungstemperatur liegt etwa bei 70 °C. Die Belastung von PVC-Kabeln muss also so begrenzt sein, dass an keiner Stelle diese Temperatur überschritten wird, bei der Polyvinylchlorid auch eine ausreichende Lebensdauer hat.

Von wesentlicher Bedeutung für die Verwendung des Polyvinylchlorids als Isolierstoff sind seine elektrischen Eigenschaften: Spannungsfestigkeit, dielektrischer Verlustfaktor und Dielektrizitätskonstante. Die grösste Feldstärke, mit der gerade noch eine Haltezeit «unendlich», d. h. mehr als 1000 Stunden erreicht werden kann, liegt bei Polyvinylchlorid bei etwa 10 kV/mm. Entsprechend sind für die Berechnung der

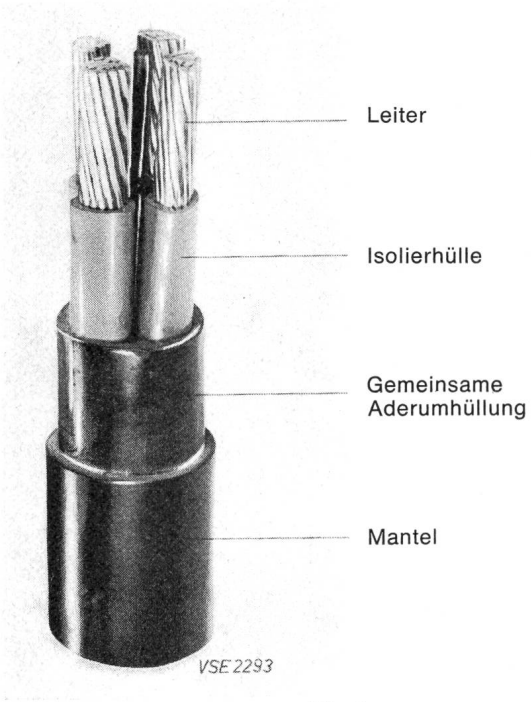

Fig. 4
1 kV-Kunststoffkabel ohne Schirm (NYY)

Wanddicken von PVC-Kabeln eine Betriebsfeldstärke am Leiter von 2–4 kV/mm zugrunde gelegt. Der dielektrische Verlustfaktor ist wegen des Dipolcharakters von Polyvinylchlorid verhältnismässig hoch und liegt bei $50...80 \cdot 10^{-3}$. Dies ist auch ein Grund dafür, dass Polyvinylchlorid nicht ohne besondere Vorkehrungen für Hochspannungskabel verwendet werden kann.

Kunststoffkabel mit einer Isolierung aus PVC sind heute in der Bundesrepublik nach VDE 0271/10.63 für Spannungen von 0,6/1 kV bis 5,8/10 kV zugelassen. Kabel nach dieser Vorschrift können in ein- oder mehradrigen Ausführungen mit Kupfer- oder Aluminiumleiter gebaut werden. Sie sind für feste Verlegung in Innenräumen, im Freien, in Erde und in Wasser zugelassen. Kabel für Spannungen von $U_0 = 0{,}6$ kV sollen nach VDE einen konzentrischen Mittel- oder Schutzleiter oder einen Schirm oder eine Bewehrung haben, wenn dies im Hinblick auf besondere mechanische Beanspruchungen beim Legen oder mit Rücksicht auf die Gefahr einer späteren Beschädigung als mechanischer Schutz notwendig erscheint. Kabel für Spannungen über 0,6/1 kV müssen dagegen immer eine metallische Umhüllung haben.

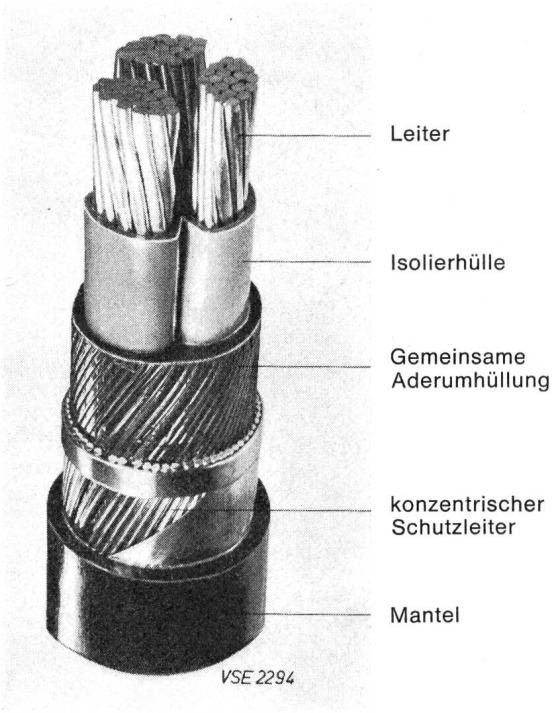

Fig. 5
1 kV-Kunststoffkabel mit konzentrischem Schutzleiter (NYCY)

Im Gegensatz zu Frankreich besteht in Deutschland auch die zwingende Vorschrift, dass der konzentrische Schutzleiter aus Sicherheitsgründen nur aus Kupfer bestehen darf.

Die in der Bundesrepublik bevorzugten Bauarten sind:

a) das mehradrige Kabel ohne äusseren Schirm (NYY) für 0,6/1 kV (Fig. 4);

b) das dreiadrige Kabel mit konzentrischem Schutzleiter (NYCY) für 0,6/1 kV (Fig. 5);

c) das dreiadrige Kabel mit einer Flachdrahtbewehrung unter Aussenmantel (NYFGbY) für 0,6/1 kV und 3,5/6 kV (Fig. 6);

d) das dreiadrige Kabel mit einem Kupferschirm über jeder Einzelader (NYCEY) für Spannungen von 5,8/10 kV und höher (Fig. 7).

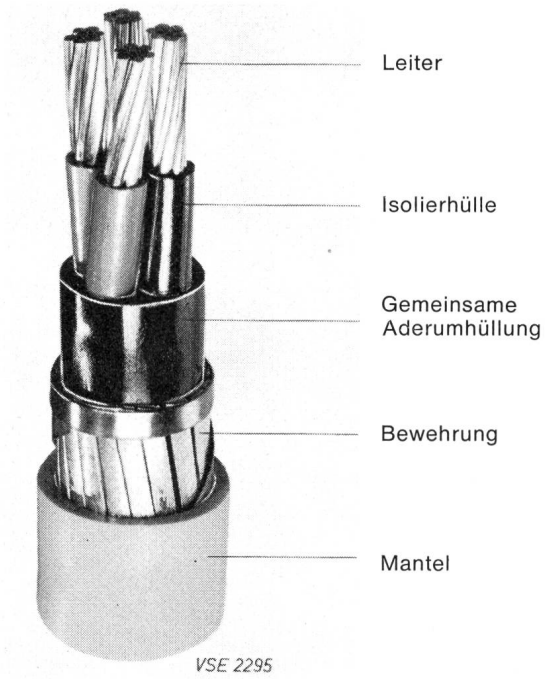

Fig. 6
1 kV-Kunststoffkabel mit Flachdrahtbewehrung (NYFGbY)

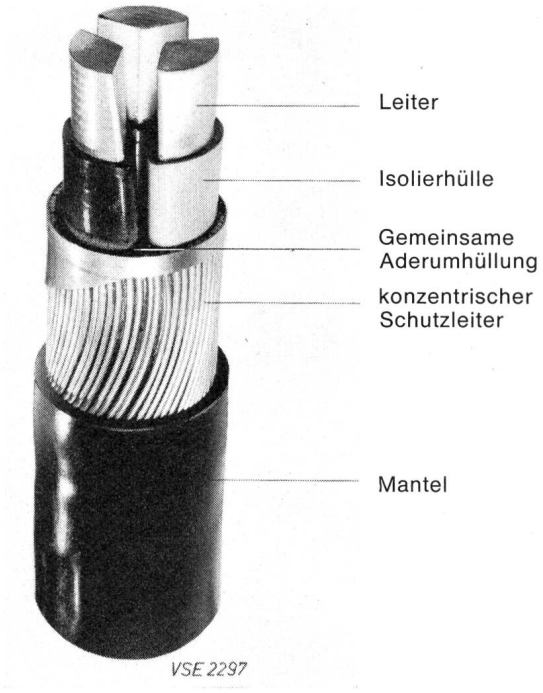

Fig. 8
Ceander-Kabel mit massiven Sektorleitern aus Aluminium (NAYCWY)

Auch werden Einleiterkabel für 10 kV vom Typ NYCY eingesetzt. Diese Kabel gewinnen mehr und mehr an Interesse.

Auf der Hannover-Messe 1962 wurden erstmalig zwei Sonderkonstruktionen eines dreiadrigen Kunststoffkabels mit konzentrischem Schutzleiter gezeigt: das Ceanderkabel (Fig. 8) und das Oka-Ce-Kabel (Fig. 9). Beiden Kabeln ist gemeinsam, das der konzentrische Schutzleiter nicht umseilt ist, sondern aus Kupferdrähten besteht, die sinus- oder lokkenförmig parallel zur Kabelachse auf dem Innenmantel aufgebracht sind. Daraus ergibt sich der grosse Vorteil, dass beim Herstellen von Abzweigmuffen sich die einzelnen Drähte des Schutzleiters ohne geschnitten zu werden mühelos abheben und mit dem Schutzleiter des Anschlusskabels verbinden lassen. Es kann also ohne Trennen des Schutzleiters montiert werden. Dadurch wird nicht nur die Betriebsicherheit der Anlage erhöht, sondern auch die Montagezeit wesentlich verkürzt (Fig. 10). Noch im gleichen Jahr kamen die Hersteller dieser beiden Konstruktionen überein, zukünftig nur noch eine einzige Konstruktion zu fertigen. Nach sorgfältigen, gemeinsam mit einigen EW durchgeführten Untersuchungen gab man dem Ceanderkabel als der besseren Bauart den Vorzug. Die Untersuchungen hatten gezeigt, dass das Oka-Ce-Kabel eine ganze Reihe von Nachteilen im Vergleich zum Ceanderkabel hat.

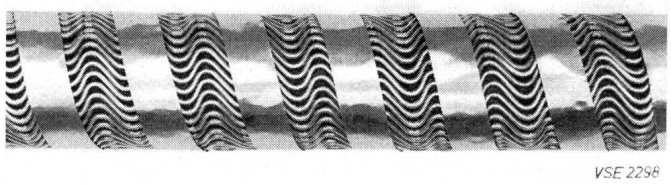

Fig. 9
Oka-Ce-Kabel

Beim Oka-Ce-Kabel sind die Schirmdrähte in Z-Form auf den Innenmantel aufgelegt. Das erfordert harte Drähte mit einer Vielzahl von Knickstellen, die bei der Montage von Hand wieder glattgezogen und gerichtet werden müssen. Weiter ist eine gleichmässige Lage der Schirmdrähte des Kabels fertigungstechnisch nur schwer zu erreichen. Die Gefahr, dass dadurch unzulässig grosse Lücken zwischen den einzelnen Drähten entstehen, ist sehr gross. Der erforderliche PVC-Innenmantel verschlechtert schliesslich die Längswasserdichtigkeit und macht das Kabel steif. Dadurch wird die Montage unnötig erschwert.

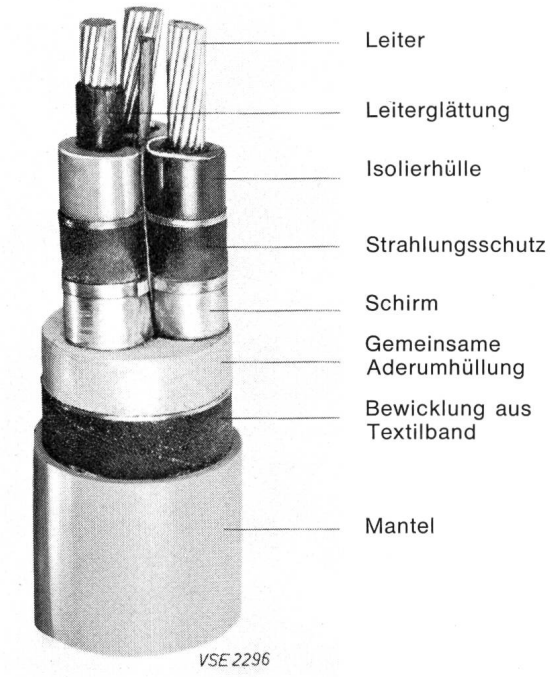

Fig. 7
10 kV-Kunststoffkabel mit Einzeladerabschirmung (NYCEY)

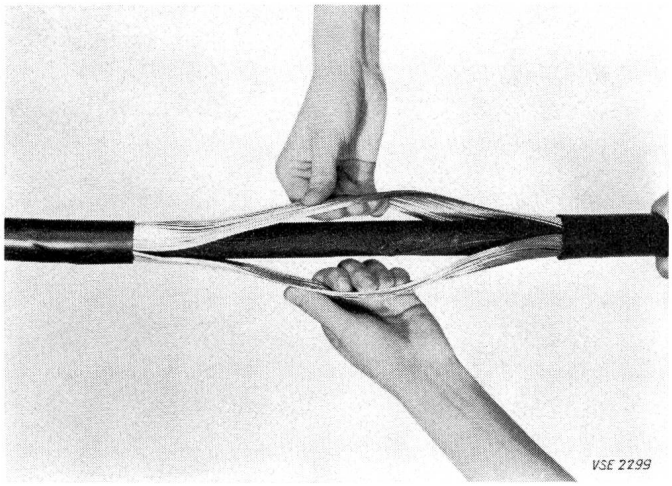

Fig. 10
Montage eines Ceander-Kabels

Beim Ceanderkabel dagegen können die Schirmdrähte vom weichen Innenmantel leicht abgehoben und ohne Verformung und ohne Ausrecken zusammengefasst und einfach und sicher montiert werden. Besonders dieser wichtige Vorteil gab den Anlass zu der Vereinbarung, auf die Fertigung und den Vertrieb des Oka-Ce-Kabels zu verzichten. Inzwischen wird das Ceanderkabel von allen namhaften Herstellern in Deutschland und insgesamt von 26 Kabelwerken in Europa in Lizenz gefertigt.

3. Betriebsverhalten papierisolierter und kunststoffisolierter Kabel

Bei einem Vergleich des Betriebsverhaltens von Kabeln müssen in erster Linie die Belastungen betrachtet werden, die ein Kabel in Fällen der Störung und bei elektrischer Überbeanspruchung erfährt. Daneben sind eine Reihe von anderen Eigenschaften wie Sicherheit gegen mechanische Beschädigung, Korrosionsbeständigkeit, Erdungsverhalten und Brennbarkeit von Interesse.

Belastbarkeit

Das Verhalten von papierisolierten Kabeln bei höheren Temperaturen ist durch einen erhöhten Massedruck in der Isolierung gekennzeichnet. Bei Kunststoffkabeln ist dagegen die eingetretene Formänderung der Isolierung und des Mantels in der Wärme bestimmend. Die zulässige Belastbarkeit hängt bei Kunststoffkabeln also weitgehend von der Veränderung der mechanischen Festigkeit seiner Isolierung ab. Chemische Veränderungen bei erhöhten Temperaturen geben dagegen sowohl für Kunststoffkabel als auch für Papierkabel eine weitere obere Grenze für die Belastung in bezug auf Temperatur und Zeit.

Die Erweichung von PVC verläuft abhängig von der Temperatur. Bei etwa 70 °C hat PVC unter normalen Umgebungsbedingungen noch eine ausreichende Lebensdauer. Erfahrungsgemäss haben PVC-Mischungen bei einer Wärmedruckprüfung nach VDE 0472 auch noch bis 90 °C ein ausreichendes Stehvermögen. Hinsichtlich ihres Verhaltens bei tiefen Temperaturen sind die Isoliermischungen aus PVC so eingestellt, dass die entsprechenden Kabel noch bei —40 °C betrieben werden können. Allerdings empfiehlt es sich aus mechanischen Gründen, PVC-Kabel grundsätzlich nicht bei Temperaturen unterhalb 0 °C zu verlegen, es sei denn, es handelt sich um Kabel mit Isolierung und Mantel aus besonderen Mischungen.

Bei Polyäthylen ist das Verhalten anders. Da der Erweichungspunkt je nach PE-Typ zwischen 110 und 135 °C liegt, können diese Kabel dauernd zwischen 75 °C und 85 °C belastet werden. Auch bei einer kurzzeitigen Leitertemperatur über 135 °C tritt noch keine Verlagerung des Leiters auf. Dies liegt im wesentlichen an der Halbleiterschicht, die bei den Hochspannungskabeln auf dem Leiter aufgebracht ist, und an den wesentlich günstigeren Wärmeleiteigenschaften des Polyäthylens im Vergleich zu Papier und Polyvinylchlorid. Vernetztes Polyäthylen, das ohne Zweifel in seinem Temperaturverhalten am günstigsten ist und aus diesem Grund beispielsweise in den USA für Nieder- und Mittelspannungskabel verstärkt eingesetzt wird, hat in Deutschland aus wirtschaftlichen Gründen bisher noch keinen Eingang gefunden.

Die Belastungsgrenzen von Nieder- und Mittelspannungskabeln sind nach den VDE-Bestimmungen für Papier- und Kunststoffkabel etwa gleich. Die zulässigen Leitertemperaturen liegen

bei Kabeln mit U_0 bis 3,5 kV bei 65...70 °C, und
bei Kabeln mit U_0 bis 5,8 kV bei 65...60 °C.

Dabei ist für die Papierisolierung ein Wärmewiderstand von 550 grd. cm/W und für die Kunststoffisolierung 500–650 grd. cm/W zugrunde gelegt.

Während man früher in einem EW-Betrieb mit einer Vollast von 8 Stunden am Tage rechnen konnte, sind durch die verstärkte Nachfrage nach elektrischer Energie im besonderen durch die Speicherheizung während der Nachtstunden die Abkühlzeiten für Kabel wesentlich kürzer geworden. Die starke und langzeitige Erwärmung der Kabel führt dadurch zu einer Austrocknung des Erdbodens, d. h. die Wärmeableitbedingungen werden ungünstiger. Dies wird in der neuen VDE-Bestimmung für Papierbleikabel, die ab 1. Januar 1968 gültig sein wird, entsprechend berücksichtigt. Für den spezifischen Wärmewiderstand des Bodens werden in dieser Bestimmung 100 grd. cm/W entgegen dem früheren Wert von 70 grd. cm/W angegeben. Bei den für Kunststoffkabel gültigen Vorschriften wird dagegen noch weiter mit 70 grd. cm/W gerechnet.

Eine Grenze für die Überlastbarkeit von Papierkabeln insbesondere bei Kurzschluss ist bekanntlich mehr durch die Endverschlüsse und Muffen als durch das Kabel selbst gesetzt. Neuzeitlich aufgebaute Papier-Masse-Isolierungen können kurzzeitige Temperaturspitzen bis etwa 180 °C ertragen, ohne dass es zu einer Störung kommt. Bei höheren Temperaturen besteht die Gefahr einer unmittelbaren, beträchtlichen Schädigung der Isolierung. Ausserdem muss mit Masseaustritt an den Endverschlüssen und einer Gefährdung der Muffenverbindungen gerechnet werden.

Kunststoffkabel mit einer Isolierung aus PVC können ohne Schädigung einige Stunden mit 120 °C beansprucht werden. Auch mehrfache Kurzschlüsse führen zu keiner sofortigen Störung des Kabels, wenn die Temperatur des Leiters 200 °C nicht überschreitet. Eine intensive thermische Zersetzung der Isolierung setzt bei kurzzeitigen Überlastungen erst bei Leitertemperaturen über 250 °C ein, wobei sich allerdings schon oberhalb 140 °C nachweisbar Chlorwasserstoff

abspaltet. Auf jeden Fall aber haben auch kurzzeitige Überlastungen sowohl bei Massekabeln als auch bei Kunststoffkabeln einen nachteiligen Einfluss auf die thermische Stabilität der Isolierung und damit auf die Lebensdauer dieser Kabel.

Wichtig ist bei 10 kV-Kunststoffkabeln das Spannungsverhalten nach einer Überlastung durch Kurzschluss. Versuche, die 1962 die Betriebsverwaltung Essen der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke AG an Kabeln aus normalen Lieferungen deutscher Hersteller mit zyklischen Kurzschlussbelastungen von 400 MVA über jeweils 1 sec. Dauer durchgeführt hat, haben zu der Erkenntnis geführt, dass das dreiadrige Kabel mit einem Kupferschirm über jeder Einzelader sich sowohl hinsichtlich des Anstieges des Verlustfaktors als auch der Glimmeinsatzspannung am günstigsten verhält. Bei den heute üblichen Bauarten für 10 kV-Kunststoffkabel erreicht man Glimmeinsatzspannungen, die weit über der Betriebsspannung liegen.

Die Abschirmung der Kunststoffkabel ist so ausgelegt, dass sie die in der Praxis zu erwartenden höchsten Erdschlußströme dauernd führen kann. Beim Doppelerdschluss kann jedoch theoretisch eine unzulässige Erwärmung der Schirme eintreten. Dies ist besonders dann der Fall, wenn die Erdschlusspunkte verhältnismässig nahe, d.h. näher als 1000 m beieinander liegen. Bisher sind keine Schäden bekannt geworden, die durch Doppelerdschluss verursacht worden sind. Bei den Papierbleikabeln ist diese Gefahr dagegen nicht gegeben.

Sicherheit gegen mechanische Beschädigung und Korrosionsbeständigkeit

Die Erfahrung hat gezeigt, dass das Kunststoffkabel bei einer Beschädigung von aussen etwa durch Hackenhiebe sich günstiger als das papierisolierte Blei- oder Aluminiummantelkabel verhält. Dies liegt insbesondere an dem elastischen Aufbau des Kunststoffkabels, der die Möglichkeit der Beschädigung des äusseren Mantels weitgehend abschwächt. Im unmittelbaren Zusammenhang mit der Sicherheit gegen mechanische Beschädigung ist die Korrosionsbeständigkeit zu sehen. Vom Bleimantel ist bekannt, dass er bei ständigen Erschütterungen zu Schwingungsbrüchen neigt. Auch gegen chemische Angriffe ist der Bleimantel nicht beständig. In jüngster Zeit sind in Deutschland wieder eine Reihe von Fällen bekanntgeworden, wo Bleimäntel durch Belüftungskorrosion zerstört worden sind. Weit stärker als Bleimäntel sind dagegen Aluminiummäntel anfällig gegen chemische Korrosion. Ein Aluminiummantel braucht deswegen in jedem Fall einen besonders sorgfältig und fest aufgebrachten zusätzlichen Korrosionsschutz aus Kunststoff. Auch hier ist das Kunststoffkabel überlegen. Aufgrund ihrer Eigenschaften sind Polyvinylchlorid und Polyäthylen weitgehend sicher gegen chemische Angriffe.

Erdungsverhalten

Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang ist der Erdübergangswiderstand, der sich bei Papierbleikabeln und bei Kunststoffkabeln erreichen lässt. Papierbleikabel ohne besonderen Korrosionsschutz über dem Bleimantel haben im allgemeinen bereits einige Wochen nach der Verlegung eine ausgezeichnete Erdfühligkeit. Dies ist bei Kunststoffkabeln nicht der Fall, da auch die Aussenmäntel dieser Kabel isolierend sind. Aus diesem Grunde werden in Deutschland auch für Kunststoffkabel die von der Massekabeltechnik her bekannten gusseisernen Verbindungsmuffen eingesetzt. Bei diesen Muffen wird das Gussgehäuse mit dem Nulleiter verbunden. Der Mittelwert der Erdübergangswiderstände gusseiserner Muffen beträgt etwa 60 Ohm. Damit kann in Niederspannungsnetzen bei einem mittleren Muffenabstand in dicht besiedelten Gebieten von 25 m mit etwa 1,5 Ω/km gerechnet werden. Dieser Wert ist in den meisten Fällen ausreichend.

Versuche mit halbleitenden Kunststoffmänteln zur Verbesserung der Erdungsverhältnisse haben in Deutschland noch zu keinem befriedigenden Ergebnis geführt. Die Frage der Lebensdauer dieser Mäntel insbesondere bei Beeinflussung durch vagabundierende Gleichströme ist noch weitgehend ungeklärt.

Brennbarkeit

Bei papierisolierten Kabeln ist die bitumengetränkte Jute feuergefährlich. Deshalb werden diese Kabel in Innenräumen ohne Juteumhüllung verlegt. Polyvinylchlorid ist im Gegensatz zu Polyäthylen als schwer entflammbar bekannt. Die Flamme von brennendem PVC nährt sich nicht selbst; ein Brand wird nicht weitergetragen. Dies war der Grund dafür, warum die Deutsche Bundespost lange gezögert hat, den äusseren Mantel ihrer Wellmantelkabel von Polyvinylchlorid auf Polyäthylen umzustellen. Wenn allerdings Polyvinylchlorid in die Flamme anderer brennender Stoffe gerät, dann besteht die Gefahr der Abspaltung von Chlorwasserstoffdämpfen, die sich als Salzsäure niederschlagen. Wie kürzlich bei einem Brand von grossen Mengen gelagerten PVC's in einem Berliner Kabelwerk festgestellt werden konnte, greifen diese Salzsäuredämpfe nicht nur die Oberfläche von Metallen an, sondern dringen auch in diese verhältnismässig tief ein. Dies trifft selbst für das zur Armierung in Spannbeton verwendete Eisen zu. Die Auswirkungen von PVC-Bränden werden z. Z. in Deutschland diskutiert. Zu einer abschliessenden Beurteilung der Gefährdung von und durch PVC-Kabel wird man allerdings erst kommen können, wenn man die wenigen bisher eingetretenen Schadensereignisse hinsichtlich Ursache und Auswirkung ausgewertet hat.

Aluminium als Leiterwerkstoff

Ausserhalb des Vergleiches von Papierkabeln mit Kunststoffkabeln soll die nicht weniger interessante Frage «Kupfer und Aluminium» behandelt werden. Die stark schwankenden und verhältnismässig hohen Kupferpreise sind in Deutschland der Grund dafür, warum Kupfer mehr und mehr in Kabeln, die in Verteilungsnetzen verwendet werden, durch Aluminium ersetzt wird. Während noch 1961 im Querschnittsbereich von 50 bis 120 mm² Kupfer und — entsprechend etwa leitwertgleich — von 70–185 mm² Aluminium die Kabel mit Aluminiumleiter mit 1800 km nur einen Anteil von 26 % am Gesamtumfang hatten, sind sie 1966 auf die fast dreifache Menge von 5250 km angestiegen und haben einen Anteil von 50 % an sämtlichen Lieferungen von kunststoff- und papierisolierten Kabeln in diesem Querschnittsbereich erreicht.

Auch für Kunststoffkabel wird Aluminium mehr und mehr verwendet. Unsicherheit besteht noch darüber, ob man

auch das nicht abgeschirmte Kunststoffkabel mit Kupfer- oder Aluminiumleiter in allen Fällen bedenkenlos einsetzen kann. Ohne Zweifel ist bei Verwendung von Aluminiumleitern das mit Kupferdrähten abgeschirmte Kunststoffkabel im Hinblick auf eine Unterbrechung des Schutzleiters sicherer als ein ungeschütztes Kunststoffkabel mit vier Aluminiumleitern, von denen ein Leiter die Aufgabe des Schutzleiters übernimmt. Die Diskussion dieser Frage wird z. Z. in Deutschland sehr heftig geführt, nicht zuletzt deswegen, weil das ungeschützte Vierleiterkabel mit mehrdrähtigen Aluminiumleitern preisgünstiger ist als das mit Kupferdrähten abgeschirmte Kabel mit drei Aluminiumleitern. Beide Kabeltypen sind nach VDE zugelassen. Unfälle mit dem Vierleiterkabel sind bisher nicht bekannt geworden, allerdings sind diese Kabel erst in jüngster Zeit und auch nur in begrenztem Umfange eingesetzt worden.

4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Für die Wirtschaftlichkeit von Kabelanlagen sind der Preis des Kabels, die Verlege- und Montagekosten und die während des Betriebes im Kabel auftretenden Verluste die bestimmenden Faktoren. Der Kabelpreis wird dabei weitgehend von den Werkstoffkosten und den Fertigungskosten bestimmt. Wenn man von den Preisbewegungen des Kupfers absieht, so kann man feststellen, dass die Preise für Polyäthylen, Polyvinylchlorid und Weichmacher in den letzten Jahren eine mehr oder minder fallende Tendenz gezeigt haben. Dies trifft allerdings nicht mehr für Papier zu. Offenbar sind dort die Möglichkeiten einer Rationalisierung der Fertigung schon weitgehend erschöpft. In der kunststoffherstellenden Industrie scheinen dagegen noch Möglichkeiten einer weiteren Herabsetzung der Herstellkosten zu bestehen. Auch hat dort die Schaffung zusätzlicher Kapazitäten und ein damit verbundener härterer Wettbewerb einen entsprechenden Einfluss auf die Verkaufspreise gehabt.

Die Löhne, ein wesentlicher Bestandteil der Fertigungskosten, sind auch in Deutschland in den letzten Jahren stark angestiegen. Im Vergleich zu den Werkstoffkosten haben sie aber nur einen verhältnismässig geringen Einfluss auf die Herstellkosten eines Kabels. So sind die Preise für Papierbleikabel durch die steigenden Lohnkosten bei gleichbleibenden Werkstoffpreisen kaum beeinflusst worden und nur leicht angestiegen. Dagegen hat das Absinken der Kunststoffpreise und die — im Gegensatz zur Schweiz — verstärkte Nachfrage nach dem Kunststoffkabel trotz der steigenden Lohnkosten eine fallende Tendenz der Preiskurve für diese Kabel ausgelöst (Fig. 11).

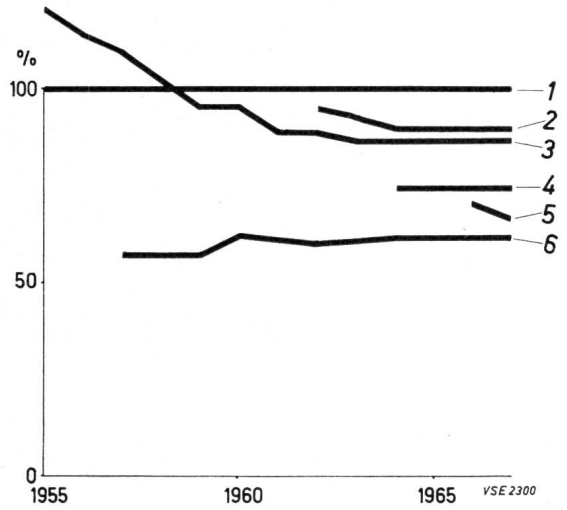

Fig. 11
Preisentwicklung bei Niederspannungskabeln (NKBA = 100 %)

1 NKBA 4×120 mm² (PPba) *4* NAYCWY 3×185/185 mm²
2 NYCWY 3×120/120 mm² *5* NAYY 4×185 mm²
3 NYY 4×120 mm² (Tdc) *6* NAKLY 3×185/185 mm²
Grundpreise Al 200 DM/100 kg
Cu 250 DM/100 kg

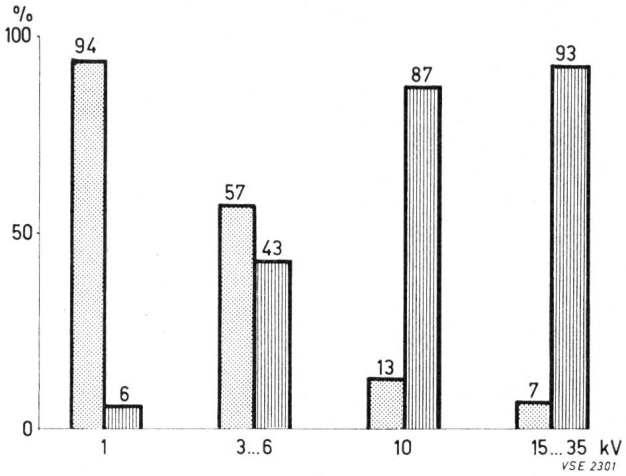

Fig. 12
Längenanteile der Kunststoff- und Papierkabel auf dem deutschen Starkstromkabelmarkt (1966)

Kunststoffkabel
Papierkabel

Wie bereits einleitend gesagt, werden im Niederspannungsbereich heute in Deutschland fast ausschliesslich Kunststoffkabel eingesetzt. Auch im Bereich von 3 bis 6 kV überwiegt das Kunststoffkabel, während für Spannungen von 10 kV und höher noch die papierisolierten Kabel vorgezogen werden. Die Entwicklung des Anteiles der Kunststoffkabel am deutschen Markt zeigt jedoch für alle Spannungen eine steigende Tendenz (Figuren 12 und 13).

In diesem Zusammenhang dürfte auch die Umsatzentwicklung des Ceanderkabels im Vergleich zu den übrigen abgeschirmten Kunststoffkabeln interessieren. Wie Fig. 14 zeigt, hat sich dieser Kabeltyp unter den abgeschirmten Kunststoffkabeln für 1 kV praktisch durchgesetzt. Die Zunahme der Ceanderkabel mit Aluminiumleitern von mehr als 30 % ist dabei auf die Entwicklung des Kupferpreises zurückzuführen und hat eine Reihe von namhaften Verbrauchern veranlasst, ganz vom Kupfer zum Aluminium überzuwechseln. Dabei wird der massive, eindrähtige Leiter bevorzugt.

Das nur langsame Eindringen der Kunststoffkabel in den Bereich der höheren Spannungen hat zwei Gründe. Einmal wirken sich bei Spannungen oberhalb 10 kV die bei PVC verhältnismässig hohen dielektrischen Verluste ungünstig auf die Wirtschaftlichkeit aus. Kunststoffkabel können in diesem Bereich wirtschaftlich also nur in kurzen Längen eingesetzt werden. Zum anderen hat das papierisolierte Kabel für diese Spannungen noch preisliche Vorteile. Die Verluste von PVC-Kabeln sollten jedoch nicht überbewertet werden.

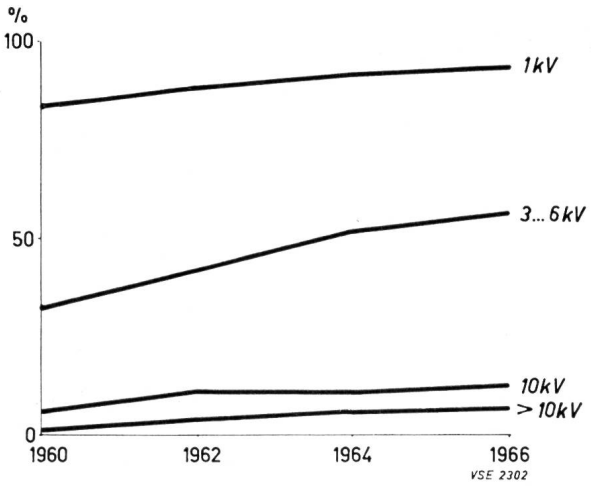

Fig. 13
Entwicklung des Längenanteiles der Kunststoffkabel in Deutschland

Wehn [1]) hat in diesem Zusammenhang einmal die Verlustarbeit von papierisolierten und kunststoffisolierten Kabeln miteinander verglichen. Das Ergebnis ist wert, hier wiedergegeben zu werden (Fig. 15). Bei 10 kV-Kabeln mit einem Querschnitt von 120 mm² betragen die dielektrischen Verluste bei einem Dreibleimantelkabel 80 W/km und bei einem Gürtelkabel 60 W/km. Die Verluste bei vergleichbaren Kunststoffkabeln sind dagegen um ein vielfaches höher und liegen bei 1760 W/km bzw. 900 W/km. Die dielektrischen Verluste dürfen jedoch nicht für sich allein betrachtet werden. Entscheidend ist die Summe aller Verluste, d. h. man muss neben den dielektrischen Verlusten auch die querschnitts- und belastungsabhängigen Leiterverluste und die Zusatzverluste wie Stromverdrängung im Leiter, Wirbelstromverluste im Bleimantel und Ummagnetisierungsverluste in der Eisenbandbewehrung berücksichtigen. Diese Verluste sind vom Kabelaufbau und von der Belastung des Kabels abhängig. Hier zeigt sich, dass das Papierbleikabel vom Typ NEKBA bei einer Belastung von 66 % der Nennlast Zusatzverluste von 1545 W/km und das vergleichbare Kunststoffkabel des Typs NYCEY in diesem Fall Zusatzverluste von nur 105 W/km hat. Bei Berechnung der Gesamtverluste wurde die Tagesbelastungskurve des Netzes eines städtischen Werkes zugrunde gelegt und mit einer Höchstbelastung von 66 % der Nennlast gerechnet. Setzt man die Verluste des Dreibleimantelkabels, die in dem betrachteten Fall 107 541 KWh/Jahr und km betragen mit 100 % ein, so zeigt sich, dass die Gesamtverluste des vergleichbaren Kunststoffkabels mit 115 118 KWh/Jahr und km um etwa 7 % höher liegen (Fig. 16).

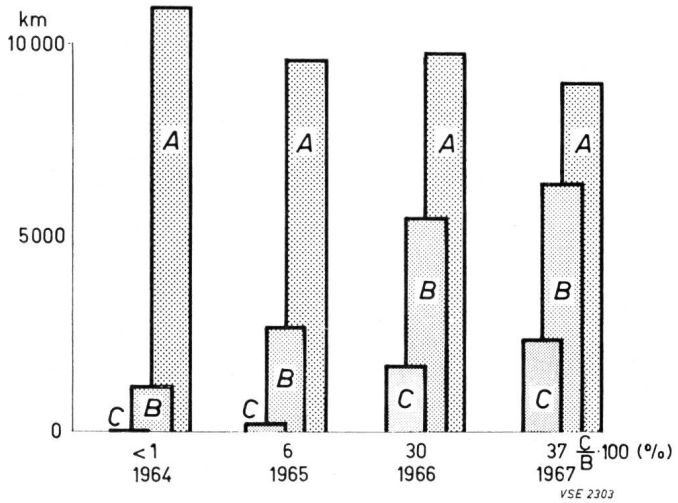

Fig. 14
Umsatzentwicklung in km bei geschirmten Niederspannungskabeln in Deutschland
A NYCY (Anteil NAYCY < 1 %)
B NYCWY Ceanderkabel
C NAYCWY

[1]) R. Wehn — Betriebserfahrungen mit Starkstromkabeln insbesondere Kunststoffkabeln bis 10 kV. Betriebstechnik 5(1964)7/8.

Ohne Zweifel geht dieser Vergleich von Voraussetzungen aus, die nicht für jedes Netz und nicht für jeden Betriebsfall zutreffen. Es zeigt sich aber deutlich, dass der Einfluss der wesentlich höheren dielektrischen Verluste bei Kunststoffkabeln für 10 kV auf die Wirtschaftlichkeit der Kabelanlage nicht überbewertet werden darf. Der zusätzliche Aufwand für Verlustarbeit liesse sich sicher über den Kapitaldienst ausgleichen, wenn auch 10 kV-Kunststoff-Kabel kostengünstiger als papierisolierte Kabel wären. Es ist anzunehmen, dass mit einem weiteren Absinken der Preise für Kunststoff dieses Ziel erreicht werden kann.

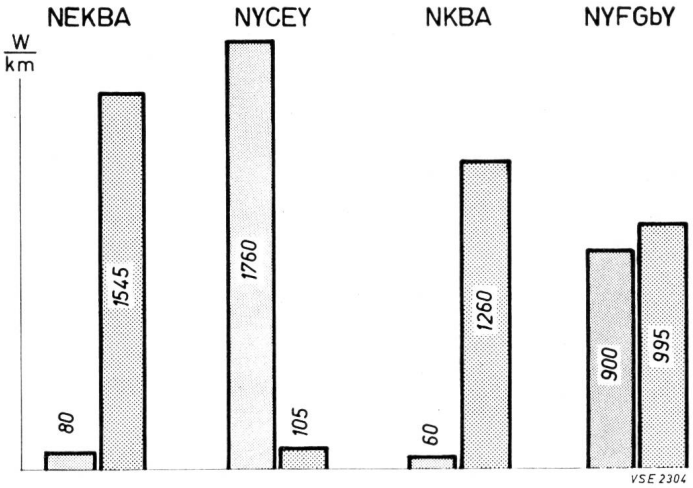

Fig. 15
Verluste und Zusatzverluste (nach Wehn)
Dielektrische Verluste — Zusatzverluste

$C_B = 0{,}6\ \frac{\mu F}{km}$	$C_B = 0{,}8\ \frac{\mu F}{km}$	$C_B = 0{,}45\ \frac{\mu F}{km}$	$C_B = 0{,}55\ \frac{\mu F}{km}$
$tg\delta = 0{,}004$	$tg\delta = 0{,}07$	$tg\delta = 0{,}04$	$tg\delta = 0{,}05$
$R_{zus} = 0{,}012\ \frac{\Omega}{km}$	$R_{zus} = 0{,}001\ \frac{\Omega}{km}$	$R_{zus} = 0{,}0012\ \frac{\Omega}{km}$	$R_{zus} = 0{,}0095\ \frac{\Omega}{km}$

5. Kunststoffkabel für höhere Spannungen

Wie wir gesehen haben, kann weichgemachtes Polyvinylchlorid als Isolierstoff für Kabel wirtschaftlich nur bis 10 kV eingesetzt werden. Für höhere Spannungen kommen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nur verlustarme Werkstoffe in Frage, wobei Polyäthylen z. Z. die besten Aussichten hat.

Eine andere wichtige Eigenschaft in diesem Zusammenhang ist die Durchschlagsfestigkeit des Werkstoffes, die die zulässige maximale Betriebsfeldstärke des Kabels mitbe-

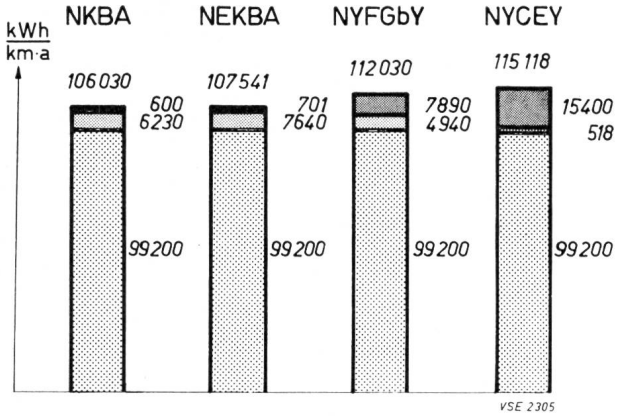

Fig. 16
Kabelverlustarbeit (nach Wehn)
Dielektrische Verluste Zusatzverluste
Kupferverluste

stimmt. Kunststoffkabel mit Isolierungen aus Polyvinylchlorid können 2...4 kV/mm beansprucht werden. Sie werden damit etwas dicker als papierisolierte Kabel, die man mit maximalen Feldstärken von 3...5 kV/mm betreibt. Polyäthylen dagegen lässt sich durch einen entsprechenden Zusatz von Additiven spannungsstabilisieren, d. h. die Durchschlagsfestigkeit wird durch diesen Zusatz beträchtlich erhöht (Fig. 17). Mit spannungsstabilisiertem Polyäthylen sind versuchsweise Kabel gebaut worden, die mit maximalen Feldstärken betrieben werden können, die wesentlich höher liegen und in die Nähe der für papierisolierte Höchstspannungskabel zulässigen Werte kommen.

Im Gegensatz zur Schweiz sind in Deutschland erst seit wenigen Jahren Kabel mit Isolierungen aus Polyäthylen in 20...30 kV-Netzen eingesetzt. Kabel mit einer Isolierung aus vernetztem Polyäthylen sind dagegen für diese Spannungen dort noch nicht in Betrieb. Diese Kabel sind zwar thermisch höher belastbar, aber wesentlich teurer, was auf die hohen Werkstoffkosten und den grösseren Aufwand in der Fertigung zurückzuführen ist. Die bisher mit Kunststoffkabeln für Spannungen von 20 und 30 kV in Deutschland gewonnenen Erfahrungen lassen noch keine abschliessende Stellungnahme zur Frage der Wirtschaftlichkeit zu. Erste Ergebnisse lassen

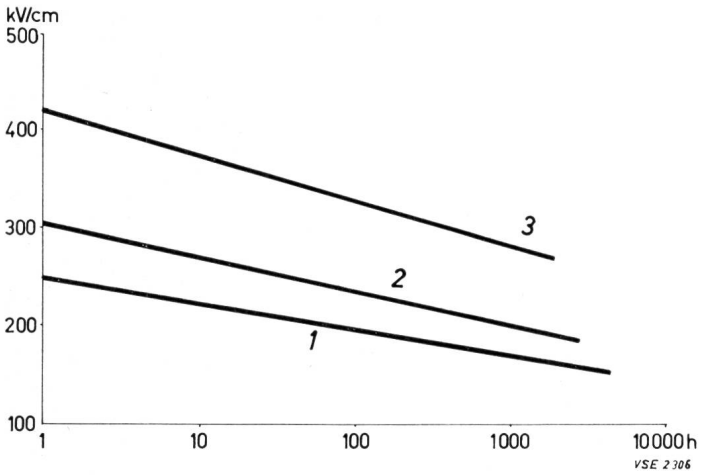

Fig. 17
Lebensdauer von Kabeln mit PE-Isolierung (nach Simplex)

1 PE ohne Stabilisator
2 PE mit Stabilisator B
3 PE mit Stabilisator C

jedoch erwarten, dass auch in diesem Spannungsbereich damit zu rechnen ist, dass das Kunststoffkabel in einen harten Wettbewerb zum papierisolierten Kabel treten wird.

Die Frage nach der oberen Spannungsgrenze für Kunststoffkabel ist in Deutschland noch völlig offen. Natürlich wird bei den namhaften deutschen Kabelwerken an diesem Problem sehr intensiv gearbeitet. Eine erste Versuchsstrecke mit einem 110 kV-Kabel mit einer Isolierung aus spannungsstabilisiertem Polyäthylen wurde vor einigen Wochen in Stuttgart in Betrieb genommen (Fig. 18). Polyäthylen-Kabel für Spannung von 110 kV sind deswegen noch verhältnismässig teuer, weil nur besonders ausgewählte Werkstoffe eingesetzt werden können und der Aufwand in der Fertigung unvergleichbar hoch ist. Vorteihaft dürften sich aber für die

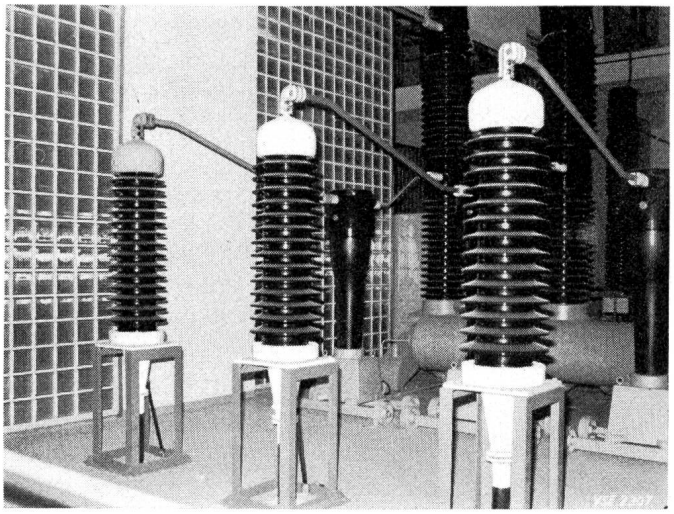

Fig. 18
110 kV-PE-Kabelanlage

Wirtschaftlichkeit dieser Kabel die bei hohen Spannungen stark in die Rechnung eingehenden dielektrischen Verluste, der im Vergleich zu Ölkabeln oder anderen Höchstspannungskabeln wesentlich niedrigere Aufwand für Muffen und Endverschlüsse und der völlig wartungsfreie Betrieb auswirken. Das Gebiet der Kunststoffkabel für höchste Spannungen ist Neuland, das sicher noch eine Reihe von Aufgaben an Hersteller und Verbraucher stellen wird, bevor man diese Kabel betriebssicher und wirtschaftlich einsetzen kann.

6. Zusammenfassung

Kunststoffkabel haben sich in Deutschland auf dem Niederspannungsgebiet wegen ihrer technischen und wirtschaftlichen Vorteile voll durchgesetzt. Papierisolierte Kabel werden dort praktisch nicht mehr eingesetzt. Auf dem Mittelspannungsgebiet nimmt das Interesse an Kunststoffkabeln trotz preislicher Vorteile der papierisolierten Kabel zu. Auf dem Höchstspannungsgebiet wurde 1967 die erste Versuchsanlage für 110 kV in Betrieb genommen.

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *G. Wanser,* Direktor der Kabel- und Metallwerke Gutehoffnungshütte AG, Vahrenwalder Strasse 271, D-3 Hannover.