Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 12

Artikel: Höchstspannungskabel für städtische und industrielle Verteilernetze

Autor: Heinemann, H.J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916374

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

Höchstspannungskabel für städtische und industrielle Verteilernetze

Von *H. J. Heinemann*, Köln-Mülheim

621.315.211 : 621.316.1

Der stetig ansteigende Energiebedarf hat zur Folge, dass in vielen grossen Städten in Europa Höchstspannungskabel eingesetzt werden. Diese Kabel sind Ölkabel, Druckkabel, Oilostatic-Kabel und Gasinnendruckkabel. Der Aufbau und das Funktionsprinzip jedes Typs werden geschildert und die elektrischen Eigenschaften erläutert. Hinsichtlich der elektrischen und mechanischen Eigenschaften ergeben sich spezielle Vor- und Nachteile einzelner Typen, welche bei der Auswahl eines Kabels für bestimmte Verlegeorte und Betriebsbedingungen gegeneinander abgewogen werden müssen. Einige Besonderheiten von Höchstspannungskabelgarnituren werden geschildert. Abschliessend wird auf das Verhalten der einzelnen Kabeltypen im Falle einer mechanischen Beschädigung während des Betriebes eingegangen.

L'augmentation continue des besoins en énergie électrique a eu pour conséquence que de nombreuses grandes villes d'Europe utilisent maintenant des câbles pour très haute tension, des types à huile, à huile sous pression, oléostatiques et à gaz sous pression. L'auteur décrit la constitution et le fonctionnement de chacun de ces types, de même que leurs propriétés électriques. En ce qui concerne les propriétés électriques et mécaniques, les divers types de câbles présentent des avantages et aussi des inconvénients, dont il faut tenir compte pour le choix du câble qui convient le mieux au mode de pose et aux conditions d'exploitation. L'auteur décrit également quelques particularités de garnitures de câbles pour très hautes tensions et termine en indiquant le comportement des divers types de câbles dans le cas d'un endommagement mécanique durant le service.

1. Einleitung

In allen Teilen der Welt steigt der Energiebedarf von Jahr zu Jahr an. Eine Folge dieses Anstieges ist oft, dass eine früher einmal ausgewählte Übertragungsspannung nicht mehr ausreicht, um in technisch vernünftiger und in wirtschaftlich befriedigender Weise die gewünschte Energiemenge zu übertragen oder zu verteilen. So wurden im Laufe der letzten Jahre viele Ortsnetze mit Spannungen zwischen 3 und 25 kV auf die jeweils nächst höhere Spannungsstufe umgestellt, um wachsende Energiemengen für den Bedarf der Haushalte und der gewerblichen Wirtschaft verteilen zu können. Den gleichen Anforderungen sahen sich auch die grossen Überlandnetze ausgesetzt. Die Übertragungsspannung ihrer Hauptversorgungsadern mussten in den letzten Jahrzehnten von 100 kV auf 400...500 kV heraufgesetzt werden.

Da die grossen Verbundleitungen als erste Fernverbindungen sehr hohe Spannungen erfordern, ist für die Kabel der jeweils höchsten Spannungsstufe ihr Hauptverwendungsgebiet vorgezeichnet: als Verbindungen zwischen den Ausgangstransformatoren der Kraftwerke und den Freileitungen bzw. zwischen den Freileitungen und den Abspannstationen. Für die Kabel der darunterliegenden Spannungsstufen, vorzugsweise im 100-kV-Bereich, tritt dagegen ein anderer Gebrauch immer mehr in den Vordergrund: die Verteilernetze der grossen Städte und der Industrie.

Einige der grössten europäischen Städte begannen mit dem Ausbau von Höchstspannungs-Verteilernetzen schon vor zwanzig und mehr Jahren. Die dabei bisher eingesetzten Kabel waren auf dem Kontinent vorzugsweise Ölkabel und Druckkabel, in England wurden daneben bis vor einigen Jahren auch Gasinnendruckkabel in grösserem Umfang eingebaut. Eine Sonderstellung nimmt das Stadtnetz von Paris ein, in welchem alle Typen von Höchstspannungskabeln verlegt sind, ausser den drei genannten Kabeltypen auch Oilostatic-Kabel [1] [1]).

In Nordamerika und in Kanada werden, mit wenigen Ausnahmen, alle Höchstspannungskabel in Stahlrohren verlegt und zwar zum überwiegenden Teil in der Ausführung als Oilostatic-Kabel, der Rest als Druckkabel und Gasinnendruckkabel [2].

Nicht nur bezüglich der Typenzahl, sondern auch hinsichtlich der Spannung und der verlegten Länge ist das Stadtnetz von Paris das bedeutendste in Europa. Die Spannungsstufen sind 63 kV und 245 kV. Mehrere hundert Kilometer Kabel dieser beiden Spannungen sind bisher verlegt worden.

In England haben grosse Städte wie London, Manchester, Birmingham, Portsmouth, Glasgow u. a. 132-kV-Netze. In London wurden während der letzten Jahre die ersten 275-kV-Kabel installiert.

In Westdeutschland besitzen einige Städte 110-kV-Netze mit Streckenlängen in der Grössenordnung von 100 km, wie Berlin, Hamburg, Köln, München [3] u. a. Daneben bestehen in einigen grossen Industriewerken ebenfalls ausgedehnte 110-kV-Netze und in einer Vielzahl von Städten mittlerer Grösse sind solche Netze im Aufbau begriffen.

Diese Entwicklung hat zur Folge, dass viele Ingenieure von Energie-Versorgungsunternehmen sich mit den Problemen von Höchstspannungskabeln befassen und nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine Auswahl unter diesen Kabeln treffen müssen. Dazu ist es wichtig, den Aufbau, die Wirkungsweise sowie die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der einzelnen Kabeltypen zu kennen.

2. Höchstspannungskabel

Der Begriff «Höchstspannungskabel» ist nicht allgemein gültig definiert. Um ihn von dem Begriff «Hochspannungskabel» klar abzugrenzen, sollen als Höchstspannungskabel alle jene Kabel verstanden werden, welche im Betrieb mit Maximal-Feldstärken in der Grössenordnung von 10 kV/mm betrieben werden können. Diese hohen Betriebsfeldstärken, deren Werte etwa das Dreifache derjenigen von Massekabeln betragen, sind zulässig auf Grund gewisser Funktionsprinzipien, die bei den einzelnen Kabeltypen durchaus verschieden sind, jedoch die gleiche Wirkung haben, Ionisierungen im Dielektrikum unter allen Betriebsbedingungen zu unterdrücken.

Wenn auch die gemeinsame Eigenschaft, selbst bei hohen Feldstärken noch ionisationsfrei zu sein, auf unterschiedliche Weise erreicht wird, so ist doch ein Aufbauelement für alle Höchstspannungskabel gleich: ihre Isolierung besteht aus gewickeltem, ölgetränktem Papier. Es gibt zur Zeit noch keinen anderen Stoff, der das Papier als Isoliermaterial verdrängen könnte. Auf Grund seines Verlustfaktors, dessen Höhe durch die Natur der Zellulose bedingt ist, setzt die Papierisolierung zwar dem Fortschreiten zu höheren Spannungen bei etwa

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

500 bis 600 kV eine Grenze, so dass man nach neuen Lösungen durch Verwendung von Kunststoff-Folien sucht. In dem hier betrachteten Bereich der Verteilerspannungen dürfte aber in absehbarer Zeit kein Wechsel des Dielektrikums zu erwarten sein. Die folgende Beschreibung der einzelnen Kabeltypen beschränkt sich auf solche Bauarten, welche sich in der Praxis bewährt haben und die in grösserem Umfang bereits für Spannungen über 100 kV installiert worden sind.

2.1 Ölkabel

Das erste eigentliche Höchstspannungskabel war das Ölkabel. Es wurde um 1917 von *Luigi Emanueli* in Italien entwickelt und wird heute, im wesentlichen unverändert, von fast allen führenden Kabelfirmen der Welt hergestellt. Die Papierisolierung eines Ölkabels ist mit einem dünnflüssigen Öl getränkt, welches sich bei der Erwärmung ausdehnt und durch Längskanäle im Kabel zu Ausdehnungsgefässen an den Enden der Kabelstrecke fliesst. Diese Ausdehnungsgefässe, Eisenbehälter mit gasgefüllten Metallzellen, werden so bemessen, dass sie eine Ölmenge aufnehmen können, die der Volumenänderung zwischen dem wärmsten und dem kältesten Betriebszustand des Kabels entspricht. Dabei ändert sich der Druck in den Ölgefässen und damit auch in der gesamten Anlage. Kühlt sich das Kabel ab, so drücken die komprimierten Zellen des Ölbehälters das vorher aufgenommene Öl wieder in das Kabel zurück. Dadurch wird verhindert, dass sich Hohlräume im Dielektrikum bilden, in denen Ionisierungen auftreten könnten.

Bei Strecken ohne grössere Höhenunterschiede liegt der Betriebsüberdruck normalerweise zwischen 0,5 und etwa 2...3 kp/cm². Sind Höhendifferenzen zu überwinden, so hat man die Wahl zwischen zwei Möglichkeiten: Man kann entweder die äussere Metallhülle so druckfest auslegen, dass auch an den tiefer gelegenen Stellen der Trasse eine ausreichende mechanische Sicherheit gegen den höheren Druck gegeben ist, oder man unterteilt die Strecke durch Sperrmuffen in mehrere Ölspeiseabschnitte. Eine solche Unterteilung muss bei langen Strecken ohnehin vorgenommen werden, um die plötzlichen Druckschwankungen beim Ein- bzw. Ausschalten der Last in bestimmten Grenzen zu halten.

In Sonderfällen kommen Hochdruckölkabel zum Einsatz, deren normaler Betriebsdruck bei 15 kp/cm² liegt. Der Unterschied zwischen normalen (Niederdruck-) Ölkabeln mit einem Öldruck von einigen Atmosphären und Hochdruckkabeln mit einem Betriebsdruck von 15 kp/cm² und mehr besteht im wesentlichen in der höheren Wechselspannungsfestigkeit des Hochdrucktyps. Dadurch lässt sich die Isolierungsdicke in manchen Fällen vermindern, was besonders bei sehr dicken und schweren Kabeln für höchste Spannungen von Vorteil sein kann [4].

In allen Fällen ist ein normaler Bleimantel allein nicht ausreichend, um die auftretenden Drücke zu beherrschen. Man bandagiert daher die Bleimäntel mit Metallbändern oder verwendet Aluminiummäntel von hoher Druckfestigkeit. Die gebräuchlichste Ausführung sind Einleiterkabel mit Bleimantel und einer Bandage aus Kupferbändern. Ein solches Kabel zeigt Fig. 1. Anstelle der früher üblichen Hülle aus Bitumen und Papier werden die Kabel heute durch einen nahtlos aufgepressten PVC-Mantel geschützt.

Dreileiterkabel kann man ebenfalls mit Bleimantel herstellen. Sie haben dann eine Bandage aus Stahlbändern. Moderner ist die Ausführung mit gewelltem Aluminiummantel gemäss Fig. 2, welche sich seit einigen Jahren gut bewährt hat [5]. Diese Bauform ist besonders hinsichtlich der Ölspeisung des Kabels günstig, da der Strömungswiderstand sehr klein ist und auch lange Strecken noch vom Ende aus zu speisen erlaubt. Über dem Aluminiummantel liegt ein zweischichtiger Korrosionsschutz, dessen innerer Teil aus Kunststoff-Folien mit plastischer Masse besteht, umhüllt von einem nahtlosen Aussenmantel aus PVC.

2.2 Druckkabel

Druckkabel wurden zu Ende der zwanziger Jahre in Deutschland entwickelt [6]. Parallel dazu entstanden durch Zusammenarbeit der Hersteller auch in England die ersten Druckkabel. Im Unterschied zu Ölkabeln ist die Isolierung mit einer Tränkmasse imprägniert, welche auf Grund ihrer hohen Zähigkeit nicht in Kabellängsrichtung strömen kann. Bei Erwärmung des Kabels wird der Mantel jeder Ader, im allgemeinen aus Blei, wie bei einem Massekabel aufgeweitet. Ein äusserer Gasüberdruck von 15 kp/cm² presst aber den Mantel so fest auf die Ader, dass er bei der Abkühlung vollkommen der Volumenänderung folgt und wieder seine ursprüngliche Lage einnimmt. Dadurch wird auch beim Druckkabel eine Hohlraumbildung absolut sicher unter-

33'314.50

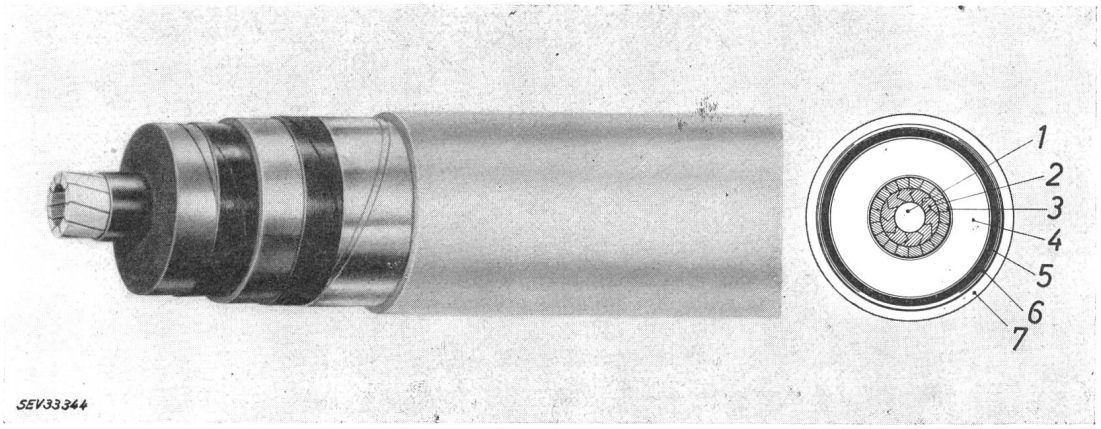

Fig. 1
Einleiter-Ölkabel
1 Ölkanal; *2* Leiter aus Profildrähten, *3* Leiterglättung (Russpapier); *4* Isolierung; *5* Bleimantel; *6* Druckschutzbandage; *7* Kunststoffmantel

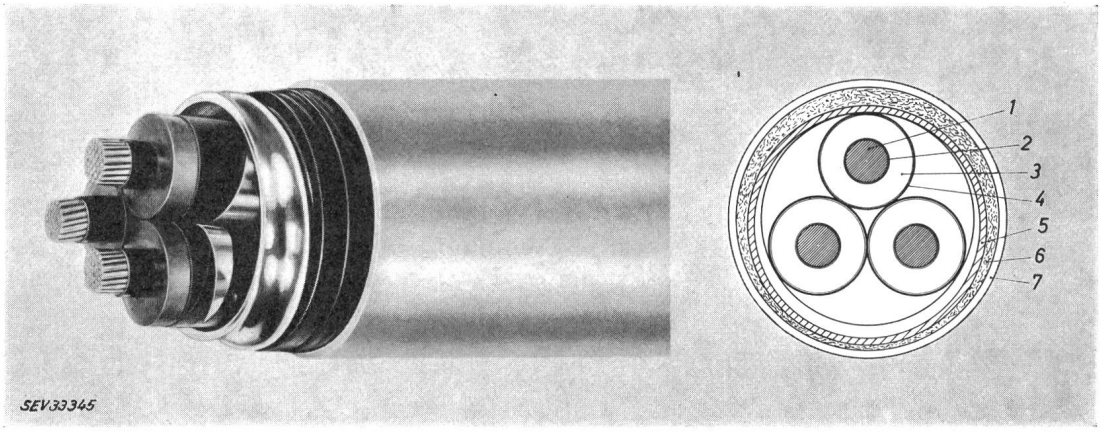

Fig. 2
Dreileiter-Ölkabel
1 Leiter; *2* Leiterglättung (Russpapier); *3* Isolierung; *4* Abschirmung; *5* gewellter Aluminiummantel; *6* Korrosionsschutz-Zwischenschicht; *7* Kunststoffmantel

drückt. Die Adern haben eine ovale Querschnittsform, die besonders günstig für das Atmen des Bleimantels ist.

Ist der Leiterquerschnitt eines Druckkabels nicht grösser als 500 mm², so werden die Adern miteinander verseilt und erhalten eine gemeinsame Bewehrung aus Flachdrähten. An dieser Flachdrahtbewehrung wird das Kabel in eine Stahlrohrleitung eingezogen, welche nach der Montage der Garnituren mit trockenem Stickstoff unter einem Überdruck von 15 kp/cm² gefüllt wird. Fig. 3 zeigt diese häufigste Ausführung eines Druckkabels für 110 kV [7]. Kabel mit grösseren Leiterquerschnitten haben in dieser Ausführung ein zu hohes Gewicht bzw. die Lieferlängen werden zu kurz. Um das zu verhindern, erhält jede Einzelader Gleitdrähte aus Hartkupfer. Man zieht die Adern dann unverseilt aber gleichzeitig in die Stahlrohrleitung ein.

2.3 Oilostatic-Kabel

Ein weiterer Höchstspannungskabeltyp ist das Oilostatic-Kabel. In Europa ist diese Kabelart nur wenig eingesetzt worden, in Nordamerika sind Oilostatic-Kabel jedoch seit ihrer ersten Verlegung im Jahre 1935 sehr häufig. Etwa 80 % aller Höchstspannungskabel sind dort Oilostatic-Kabel [8].

Dieses Kabel nimmt eine Mittelstellung zwischen Öl- und Druckkabel ein. In seinen elektrischen Eigenschaften entspricht es einem Druckkabel, hydraulisch einem Ölkabel. Seine Papierisolierung ist mit einer zähflüssigen Masse getränkt wie die eines Druckkabels. Die Adern sind jedoch nicht ummantelt, sondern besitzen nur einen elektrischen Schirm und darüber mehrere Gleitdrähte. Drei solcher Adern werden in ein Stahlrohr eingezogen und danach das Stahlrohr mit einem Öl von mittlerer Viskosität gefüllt (Fig. 4). Der Betriebsüberdruck liegt ebenfalls bei etwa 15 kp/cm².

Der Ölinhalt eines Oilostatic-Kabels ist fast um eine Zehnerpotenz grösser als der eines Ölkabels. Dadurch wird die Volumenänderung des Öles bei der Erwärmung so gross, dass sie von normalen Ölbehältern, wie man sie für Ölkabel verwendet, nicht mehr aufgenommen werden kann. Man installiert statt dessen an einem Ende der Kabelstrecke einen grossen Ölbehälter mit einer Pumpanlage, welche entweder ständig oder nur eine gewisse Zeit bei Bedarf Öl unter einem Überdruck von 15 kp/cm² in die Rohrleitung pumpt [9]. Ein parallel zur Pumpe liegendes Ventil öffnet sich bei einer bestimmten Druckdifferenz, so dass überschüssiges Öl aus der Rohrleitung in den Ölbehälter fliessen kann. Es ist ersichtlich, dass bei dieser Arbeitsweise auch in Oilostatic-Kabeln keine Hohlräume und damit auch keine Ionisierungen in der Isolierung auftreten können.

Den drei beschriebenen Kabeltypen, Ölkabel, Druckkabel und Oilostatic-Kabel, ist ein Grundprinzip gemeinsam: Unterdrückung von Ionisation durch die Vermeidung von Hohlraumbildung in der Isolierung.

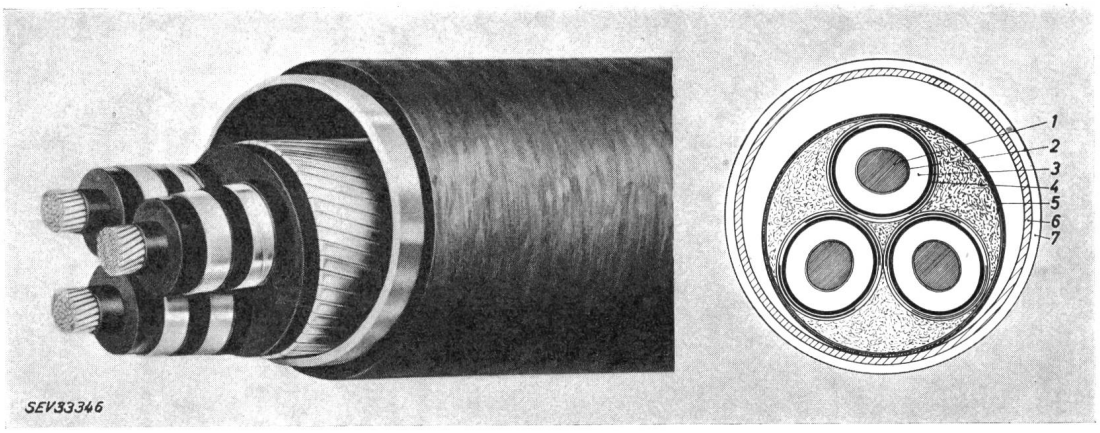

Fig. 3
Druckkabel
1 Leiter; *2* Leiterglättung (Russpapier); *3* Isolierung; *4* Bleimantel; *5* Flachdrahtbewehrung; *6* Stahlrohr; *7* Korrosionsschutz

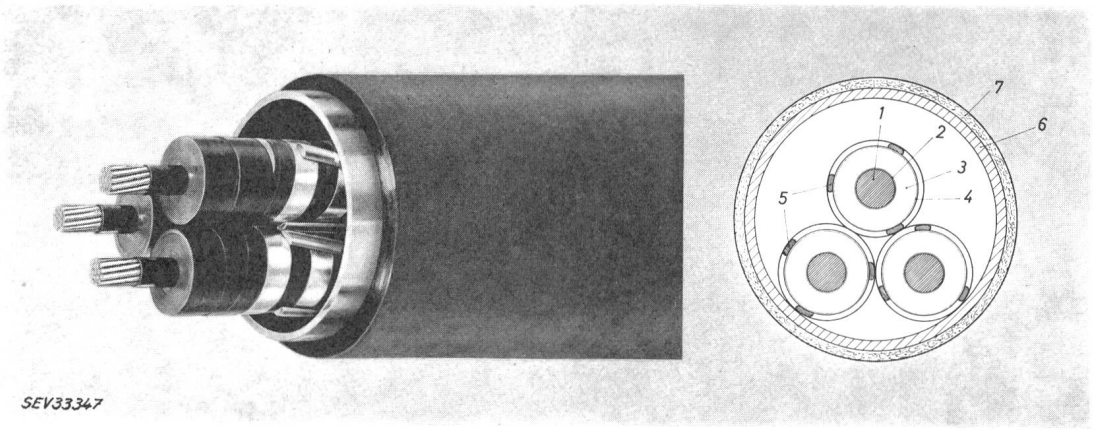

Fig. 4
Oilostatic-Kabel
1 Leiter; *2* Leiterglättung (Russpapier); *3* Isolierung; *4* Abschirmung; *5* Gleitdrähte; *6* Stahlrohr; *7* Korrosionsschutz

2.4 Gasinnendruckkabel

Einen anderen Weg zur Verhinderung von Glimmerscheinungen in der Isolierung hat man bei Gasinnendruckkabeln gefunden. Man versucht hier nicht die Entstehung von Hohlräumen zu unterdrücken, sondern lässt bewusst eine Hohlraumbildung zu, manchmal sogar schon während der Fertigung. So wird in der ursprünglichen Ausführung von *Beaver* und *Davey* [10] die Isolierung aus vorimprägnierten Papieren gewickelt. Die Stossfugen zwischen den einzelnen Papierwindungen sind dadurch völlig frei von Tränkmasse. Den gleichen Effekt erzielt man auch beim üblichen Imprägnierprozess, wenn man nach dem Tränken der Adern die überschüssige Masse abtropfen lässt. Um den Hohlräumen die erforderliche elektrische Festigkeit zu verleihen, wendet man ein inertes Gas unter hohem Druck an, im allgemeinen Stickstoff unter einem Überdruck von 15 kp/cm². Dieses Gas muss ungehinderten Zutritt zur Isolierung haben, so dass es alle Hohlräume ausfüllen kann. Es ist damit ein wesentlicher Bestandteil der Isolierung selbst und wirkt nicht, wie beim Druckkabel, lediglich als Druckmedium. Nach dem Gesetz von *Paschen* steigt die Ionisationseinsatzspannung in einem Hohlraum mit steigendem Druck an und die Folge davon ist, dass die Isoliereigenschaften des Druckgases nur voll wirksam sind, so lange es sich unter hohem Druck in der Isolierung befindet.

Um jeden Punkt der Isolierung erreichen zu können, benötigt das Druckgas Kanäle in Kabellängsrichtung ähnlich den Ölkanälen des Ölkabels. Dreileiterkabel besitzen solche Kanäle bereits in Form ihrer Zwickelräume. Bei Einleiterkabeln verwendet man Hohlleiter oder sorgt für einen gewissen Abstand zwischen der isolierten Ader und dem Mantel, entweder durch Abstandshalter oder durch die ovale Form der Ader und einen runden Querschnitt des Mantels.

Als Mantelwerkstoff kommt vorzugsweise Aluminium in Frage. Bleimäntel benötigen eine starke Bandage, welche entweder aus Hartkupfer oder Bronze besteht und damit teuer ist oder aus Eisenbändern, welche den gleichen hochwertigen Korrosionsschutz erfordern wie ein Aluminiummantel. Daher sind diese Ausführungen mit Bleimantel wirtschaftlich nicht interessant [11].

Auf dem europäischen Kontinent sind Gasinnendruckkabel nicht in nennenswertem Umfang installiert worden. In England, ihrem Ursprungsland, wurden sie etwa 25 Jahre lang gefertigt und auch in erheblichem Masse eingesetzt [12]. Ihre geringe elektrische Sicherheit war jedoch letztlich dafür verantwortlich, dass auch in England diese Kabel nur noch für Sonderzwecke, z. B. als Gleichspannungs-Seekabel, hergestellt werden. Einen gewissen Marktanteil von 20 % behaupten die Gasinnendruckkabel in Nordamerika und zwar in der dort für Höchstspannungskabel üblichen Ausführung im Stahlrohr. Es ist z. B. für Strecken von nur kurzer Länge sehr aufwendig, eine komplette Pumpanlage für ein Oilostatic-Kabel zu installieren. In solchen Fällen bieten dann Gasinnendruckkabel im Stahlrohr eine wesentlich preisgünstigere Lösung. Die Kabel gleichen in ihrem Aufbau weitgehend dem Oilostatic-Kabel (Fig. 4), nur wird die Rohrleitung statt mit Öl mit Stickstoff gefüllt. Auch in Deutschland, wo das Interesse an Druckkabeln im Stahlrohr schon immer sehr gross war, wurden in den letzten Jahren einige Anlagen als Gasinnendruckkabel im Stahlrohr ausgeführt.

3. Elektrische Eigenschaften

Die Verschiedenheiten im Aufbau und in den verwendeten Materialien bedingen Unterschiede in den elektrischen Eigenschaften der einzelnen Kabeltypen. Für die Mehrzahl der Eigenschaften sind diese Unterschiede jedoch nicht sehr gross.

Weitgehende Übereinstimmung besteht zwischen den Werten für den dielektrischen Verlustfaktor tg δ. Sie betragen für Spannungen bis zur doppelten Betriebsspannung und für Temperaturen bis zur maximalen Betriebstemperatur für alle Kabeltypen etwa $2{,}5 \cdot 10^{-3}$. Die daraus resultierenden dielektrischen Verluste betragen für Kabel von 110...138 kV mit normalen Leiterquerschnitten weniger als 5 % der Gesamtverluste.

Die Dielektrizitätskonstante ε, welche die Kapazität und damit den Ladestrom und die Blindleistung mitbestimmt, hängt von der Dichte der Papiere und der Art der Tränkmasse ab. Ölkabel, welche mit dünnflüssigem Öl imprägniert sind, haben eine Dielektrizitätskonstante von etwa 3,5, für die anderen Kabelarten, deren Tränkmasse zähflüssig ist, beträgt der Wert etwa 4. Auch die Stoßspannungsfestigkeit der einzelnen Kabeltypen ist nicht sehr unterschiedlich. Im kalten Zustand bestehen geringe Differenzen zwischen den Werten der einzelnen Kabeltypen, die von der Verschiedenheit in den Viskositätswerten herrühren. Im warmen Zustand haben aber alle Kabel etwa die gleiche Festigkeit von

ca. 100 kV/mm, welche vollkommen ausreichend ist, auch wenn die Kabel im Zuge einer Freileitung betrieben werden. Voraussetzung ist, besonders bei Kabeln über 200 kV, dass die anschliessenden Felder der Freileitung auf etwa 1...2 km Länge gegen direkten Blitzeinschlag durch doppelte Erdseile geschützt sind.

Der wesentliche Unterschied in den elektrischen Eigenschaften liegt in der Wechselspannungsdauerfestigkeit. Ölkabel, Druckkabel und Oilostatic-Kabel besitzen mit einer Durchschlagsfestigkeit von 40...50 kV/mm gegenüber Betriebsfeldstärken von ca. 10 kV/mm eine mehr als vierfache Sicherheit, während bei Gasinnendruckkabeln diese Sicherheit nur eine zweifache ist. In vielen Fällen hat das zur Folge, dass Gasinnendruckkabel dicker isoliert werden müssen als die anderen Kabeltypen. In gelöschten Netzen z. B. tritt im Erdschlussfall die 1,73-fache Betriebsspannung zwischen Leiter und Schirm auf. Berücksichtigt man dazu noch, dass die maximale dauernde Betriebsspannung die Nennspannung um einen bestimmten Betrag überschreiten darf (in Deutschland beispielsweise um 15 %), so wird in diesem Falle die Isolierung mit nahezu dem Doppelten der normalen Feldstärke beansprucht. Man muss die Isolierung von Gasinnendruckkabeln so auslegen, dass auch unter diesen ungünstigen Verhältnissen keine Ionisierung auftritt. Bei kleineren Querschnitten bedingt das eine Erhöhung der Isolierungsdicke gegenüber den anderen Kabeltypen bis zu 30 %.

Eine andere Eigenschaft, deren Werte stark vom Kabelaufbau abhängen, ist der Reduktionsfaktor, also die Grösse, welche die Beeinflussung benachbarter Fernmeldekabel mitbestimmt. Besonders in starr geerdeten Netzen ist er von Bedeutung für das zuverlässige Arbeiten von Kontroll- und Überwachungsanlagen. Bei Kabeln mit Bleimänteln beträgt seine Grösse je nach Manteldurchmesser und Mantelwanddicke ca. 0,4...0,8, d. h. die Wirkung eines Erdschlusses oder Doppelerdschlusses wird auf 40...80 % desjenigen Wertes herabgedrückt, welcher auftreten würde, wenn der Bleimantel nicht wirksam wäre. Kabel mit Aluminiummänteln haben kleinere Reduktionsfaktoren, bei grossen Durchmessern erreicht man Werte unter 0,1. Die kleinsten Werte ergeben sich mit etwa 0,02...0,04 bei Kabeln, welche in Stahlrohre eingezogen sind.

4. Mechanische Eigenschaften

In Europa werden, anders als in den USA, Höchstspannungskabel von den Herstellern verlegt und montiert. Infolgedessen interessieren hier den späteren Eigentümer von Höchstspannungskabeln gewisse Eigenschaften, wie Aussendurchmesser und Gewicht, also Eigenschaften, die einen Einfluss auf den Transport und die Verlegung haben, nur sekundär. Dagegen ist für jeden Kabeleigentümer, gleichgültig ob er seine Kabel selbst verlegt oder nicht, eine Eigenschaft von besonderer Bedeutung, nämlich die mechanische Widerstandsfähigkeit des verlegten Kabels. Gerade in städtischen und industriellen Gebieten, Orten häufiger Erdarbeiten, stellen die immer stärkeren und leistungsfähigeren Erdarbeitsmaschinen eine zunehmende Gefahr für die Kabel dar.

Unter diesem Gesichtspunkt betrachtet, bieten Stahlrohrkabel einen Vorteil gegenüber den anderen Kabeln. In Westdeutschland, wo über 700 km Druckkabel in Stahlrohren verlegt sind, wurden mehrfach die Stahlrohre durch Presslufthämmer, Bagger oder Räumfahrzeuge beschädigt. In der Mehrzahl der Fälle bestanden solche Beschädigungen nur in Deformationen des Rohres, das Kabel selbst wurde dabei nicht in Mitleidenschaft gezogen. Kommt es in schwereren Fällen zu einem Leck der Rohrleitung, so kann fast immer eine Ortung und Beseitigung des Fehlers vorgenommen werden, ohne dass ein Druckkabel abgeschaltet werden muss.

Fig. 5 zeigt eine kräftige Beschädigung durch einen Bagger in Form eines etwa 20 mm tiefen Eindruckes. Nach dem Öffnen des Rohres erwies sich das Kabel als unversehrt.

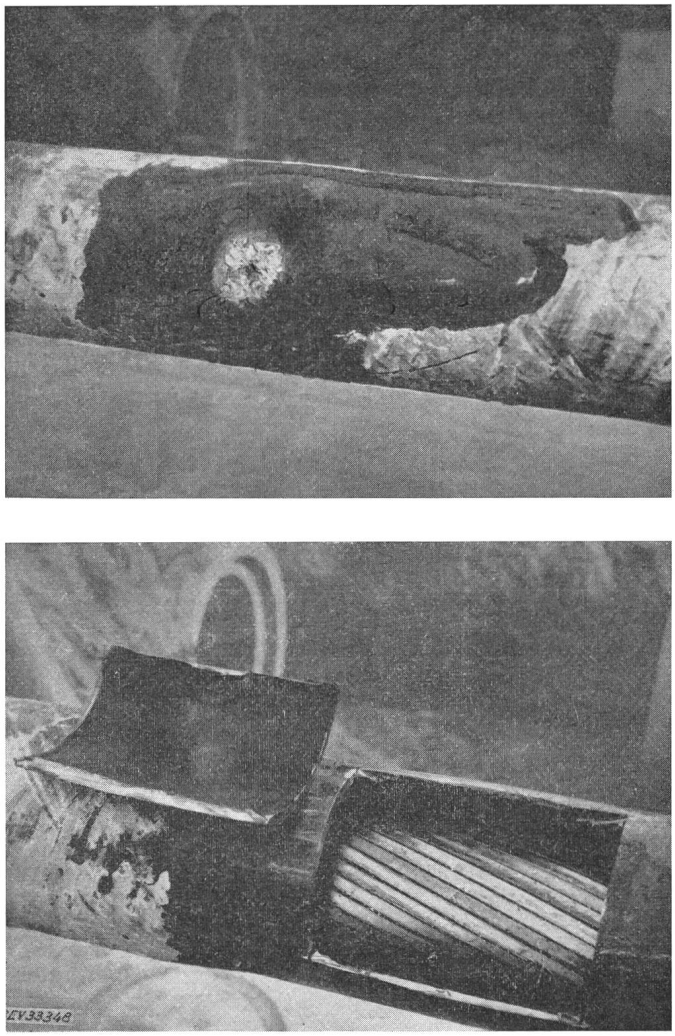

Fig. 5
Beschädigung eines Stahlrohres durch den Greifer eines Baggers
Die Flachdrahtbewehrung des Druckkabels ist unversehrt

Nach einer amerikanischen Statistik betrug die Schadensrate pro Jahr und Meile für Stahlrohrkabel nur 1/35 derjenigen des nächstgünstigen Kabels [13].

Ein weiterer Vorteil von Stahlrohrkabeln liegt in der Möglichkeit, bei der Verlegung eines Kabels ein zusätzliches Leerrohr mitzuverlegen, in welches später ein Parallelkabel eingezogen werden kann, ohne dass wieder ein Graben ausgeworfen werden muss. Bei der heutigen Höhe der Kosten für Erdarbeiten ist dieser Vorteil oft von wesentlicher Bedeutung.

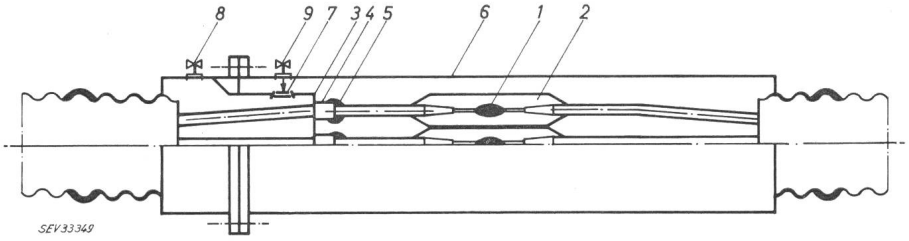

Fig. 6
Halbsperrmuffe für Dreileiter-Ölkabel und Dreileiter-Gasinnendruckkabel mit gewelltem Aluminiummantel
1 Leiterverbindung; *2* Isolierwicklung; *3* Aufteilungskopf; *4* Rohrstutzen; *5* Richtwinkel; *6* Muffengehäuse; *7* Gaskanal, durch Ventil *9* sperrbar, im Betrieb geöffnet; *8, 9* Anschlußstellen für Strömungsmessgerät, mit Ventilen

5. Garnituren

Der grundsätzliche Aufbau von Verbindungsmuffen lehnt sich an die von Massekabeln her bekannte Technik an. Die Leiter werden, wenn sie aus Kupfer bestehen, durch Löten oder Pressen miteinander verbunden; Aluminiumleiter werden zweckmässigerweise miteinander verschweisst. Über die Verbindungsstelle wird eine gewickelte Isolierung aus getränktem Papier aufgebracht. Ihren Abschluss bildet ein leitender Schirm, welcher mit der Abschirmung des Kabels verbunden wird.

Einige für Höchstspannungskabel typische Besonderheiten verdienen Erwähnung:

Bei Dreileiter-Ölkabeln ist im Falle eines kleinen Lecks eine Fehlersuche sehr schwierig und zwar einmal wegen des grossen Ölvolumens und zum anderen weil nicht, wie bei Einleiter-Ölkabeln, zwei gesunde Vergleichsadern zur Verfügung stehen. Deshalb bildet man zweckmässigerweise alle Verbindungsmuffen als Semi-Sperrmuffen aus: Die drei Adern werden durch einen Aufteilungskopf mit drei kurzen Rohrstutzen in die Muffe eingeführt und gegen die Rohrstutzen dicht gewickelt. Der Ölfluss erfolgt durch einen Ölkanal im Aufteilungskopf des Muffengehäuses. Dieser Ölkanal kann von aussen gesperrt und durch ein einfaches Messgerät überbrückt werden, welches die Strömungsrichtung des Öles anzeigt, so dass auf diese Weise ein Fehler schnell auf einen Abschnitt zwischen zwei Muffen eingegrenzt werden kann. Das gleiche Verfahren ist auch für Dreileiter-Gasinnendruckkabel mit gewelltem Aluminiummantel geeignet. Fig. 6 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Muffe.

Eine zweite Besonderheit ist der Aufbau der Verbindungsmuffen bei Druckkabeln. Da diese Kabel voll getränkt sind, atmet im Betrieb der Bleimantel entsprechend den Laschwankungen. In der gleichen Weise müssen auch die metallischen Umhüllungen der Muffenwicklungen auf den Einzeladern atmen. Es hat sich herausgestellt, dass dafür längs gewellte Kupferrohre in besonderem Mass geeignet sind.

In Fig. 7 sieht man eine 110-kV-Druckkabelmuffe mit den drei Kupferrohren, welche über die Muffenwicklung geschoben und an beiden Seiten mit den Bleimänteln verlötet sind.

Ausser Verbindungsmuffen benötigt man häufig bei Ölkabelstrecken noch Sperrmuffen. Bei Strecken mit grösseren Höhenunterschieden baut man Sperrmuffen ein, um den statischen Druck zu begrenzen, bei sehr langen Strecken sind sie erforderlich, damit beim Einschalten der Last in der Mitte der Strecke der Druck nicht unzulässig hoch ansteigt. Das Innere der Sperrmuffe besteht in seinem grundsätzlichen Aufbau aus zwei Endverschlüssen, die über ihre Durchführungsbolzen miteinander verbunden sind. Die Porzellane sind allerdings kleiner als normale Freiluft-Endverschlussporzellane, da sie in dem Muffengehäuse unter Öl liegen.

Die Endverschlüsse von Ölkabeln sind mit dem gleichen Imprägnieröl gefüllt wie das Kabel. Die beiden Ölräume stehen miteinander in Verbindung, so dass im Endverschluss immer derjenige Druck herrscht, welcher der Höhenlage entspricht. Bei Einleiterkabeln wird jede Einzelader unmittelbar in den Endverschluss eingeführt. Dreileiterkabel enden in Aufteilungsköpfen, von denen aus die Einzeladern in Kupferrohren zu den Endverschlüssen geführt werden.

Die Zuführung der Adern zu den Endverschlüssen erfolgt bei Gasinnendruckkabeln mit Aluminiummantel in der gleichen Weise wie bei Ölkabeln. Die Endverschlüsse sind aber nicht, wie die Zwickelräume des Kabels, mit Gas gefüllt, sondern mit Imprägniermasse, um eine hohe Stossfestigkeit der Endverschlüsse zu erzielen. Dadurch wird es erforderlich, den Ölraum des Endverschlusses von dem Gasraum des Kabels zu trennen. Mechanisch wird diese Trennstelle im Betrieb nicht beansprucht, da beide Räume unter dem gleichen Überdruck von ca. 15 kp/cm² stehen.

Die Stahlrohrleitung von Druck- und Gasinnendruckkabeln endet ebenfalls in einem Aufteilungskopf, von dem aus Kupferrohre zu den Endverschlüssen führen. Die Endverschlüsse der Gasinnendruckkabel im Stahlrohr haben den glei-

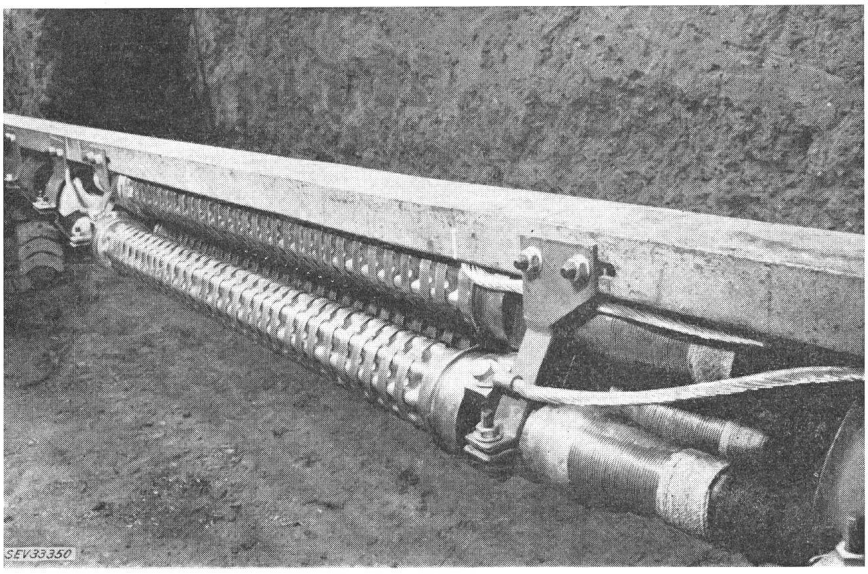

Fig. 7
Geöffnete Druckkabelmuffe

chen Aufbau wie die für Gasinnendruckkabel mit Aluminiummantel. Die Endverschlüsse der Druckkabel sind ebenfalls mit Masse gefüllt, jedoch steht die Masse wie bei Ölkabeln in unmittelbarer Verbindung mit der Kabelader. Ein Ausgleichsgefäss verbindet druckmässig den Gasraum der Rohrleitung mit dem Masseraum des Endverschlusses.

6. Leckortung

Bei jedem Kabel kann durch Korrosion oder mechanische Einflüsse die äussere Metallhülle beschädigt werden. Bei der Auswahl eines bestimmten Kabeltyps ist es daher wichtig zu wissen, wie sich in einem solchen Falle die einzelnen Kabel verhalten, d. h. ob abgeschaltet werden muss, zu welchem Zeitpunkt und wie lange.

Die Praxis hat gezeigt, dass im wesentlichen mit zwei Arten von Fehlern gerechnet werden muss. Mit relativ kleinen Fehlern, wie sie vorzugsweise durch Korrosion entstehen, welche nur einen langsamen Druckabfall zur Folge haben, und mit groben mechanischen Beschädigungen, welche bei Einleiterkabeln in der Regel auch eine elektrische Störung zur Folge haben, bei Dreileiter- und Stahlrohrkabeln zu einem plötzlichen Druckabfall führen können, ohne aber, dass eine elektrische Störung eintritt.

Leckstellen der ersten Art machen im allgemeinen eine Fehlersuche erforderlich. Bei Kabeln im Stahlrohr mit Stickstoff-Füllung, also bei Druckkabeln und Gasinnendruckkabeln, kann das während des Betriebes geschehen. Bei Druckkabeln wurden auch schon mehrfach solche Fehler beseitigt, ohne dass das Kabel abgeschaltet zu werden brauchte. Bei Kabeln mit Ölfüllung, also Ölkabeln und Oilostatic-Kabeln, muss zur Ortung des Fehlers an bestimmten Stellen die Ölfüllung eingefroren werden, wozu das Kabel für mehrere Tage abgeschaltet werden muss. Den Zeitpunkt des Abschaltens kann man jedoch frei wählen, da durch Nachspeisen von Öl das Kabel trotz des Lecks weiter in Betrieb gehalten werden kann.

Bei groben Beschädigungen mit raschem Druckabfall müssen Gasinnendruckkabel, Ölkabel und Oilostatic-Kabel sofort abgeschaltet werden. In den Hohlräumen der Isolierung von Gasinnendruckkabeln treten im drucklosen Zustand nämlich starke Ionisierungen auf, bei den ölgefüllten Kabeln besteht ohne Öldruck die Gefahr der Hohlraumbildung. Lediglich Druckkabel können infolge ihres Bleimantels auch ohne Druck noch 48 h mit 75 % ihrer Vollast betrieben werden. Da bei groben Beschädigungen meist Anhaltspunkte für die Lage des Fehlerortes gegeben sind, eine Fehlersuche sich also erübrigt, genügt dieser Zeitraum für die Beseitigung des Fehlers.

Literatur

[1] *R. Tellier:* «Past and Present Practice and Experience on High-voltage Underground Cable Systems in France». AIEE Trans. Pap. No. 57...740 (1957).

[2] Installations of high-pressure Pipe-Type Cable in the Western Hemisphere Operating at 69 kV and Above. AIEE Publ. S-110-A Nov. 1962.

[3] *E. Schulze:* Das 110 kV-Netz von West-Berlin. Elektrizitätswirtschaft 58 (1959), S. 313...318.

[4] *L. Domenach:* Cables for 220 to 400 kV. Cigre Ber. No. 217 (1954).

[5] *H. W. Lücking* u. *W. Ochel:* Experiences with super-high-voltage cables with corrugated aluminium Sheat. Cigre Ber. No. 224 (1960).

[6] *M. Höchstädter, W. Vogel* u. *E. Bowden:* Das Druckkabel, ein Fortschritt im Bau von Hochspannungs-Kabelanlagen. ETZ 53 (1932)7, S. 145...150 u. 8, S. 169...174.

[7] *H. W. Lücking:* Der Entwicklungsstand des Druckkabels nach 25jähriger Betriebsbewährung. ETZ A 79(1958)20, S. 761...768, 976.

[8] *L. J. Komives:* Modern Transmission Cable Practice in the USA. Cigre-Ber. No. 230 (1960).

[9] Underground Systems Reference Book 1957, Edison Electric Institute.

[10] *C. J. Beaver* u. *E. L. Davey:* The gas-filled cable. Cigre Ber. No. 204 (1931).

[11] *H. J. Heinemann:* Gasinnendruckkabel mit gewelltem Aluminiummantel. Elektrizitätswirtschaft 59(1960)8, S. 222...226.

[12] *E. P. G. Thornton* u. *D. H. Booth:* The design and performance of the gas-filled cable system. Proc. IEE A 106(1959), S. 207...230.

[13] AIEE-Report 60...33 (1960).

Adresse des Autors:

Dipl.-Phys. *Hans Josef Heinemann,* Felten & Guilleaume Carlswerk AG, D-5 Köln-Mülheim, Schanzenstrasse (Deutschland).

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Metallische Widerstandsmaterialien und ihre Eigenschaften

621.316.84

Für die Industrie steht eine grosse Anzahl verschiedener elektrischer Heizleiterlegierungen zur Verfügung, und die Wahl der geeigneten Legierung für eine bestimmte Aufgabe kann oft Schwierigkeiten verursachen. Das Sortiment auf dem Markt ist sehr gross, weil die Heizleiterstoffe vielen verschiedenen Zwecken dienen sollen. Studiert man die Auswahl näher, so ist ersichtlich, dass die Legierungstypen ziemlich ähnlich sind. Man hat also die Möglichkeit, die verschiedenen Heizleitermaterialien auf gewisse Typen zurückzuführen. Durch eine solche Einteilung erhält man eine wesentlich einfachere Übersicht über die Eigenschaften und besonderen Merkmale der Heizleitertypen.

Schliesst man die reinen Metalle, wie z. B. Molybdän, Platin, Tantal und Wolfram aus, können die Heizleiterlegierungen in folgende zwei Gruppen eingeteilt werden: Legierungen von Nickel-Chrom und Nickel-Chrom-Eisen, welche ein recht grosses Anwendungsgebiet haben und Eisen-Chrom-Aluminium-Kobalt-Legierungen, welche besonders für die Verwendung bei hohen Temperaturen geeignet sind. Als ein typisches Beispiel für die verschiedenen Heizleiterqualitäten ist in Tabelle I eine Übersicht über die Kanthal-Legierungen wiedergegeben. Ein Merkmal für die Beurteilung der Eigenschaften dieser beiden Gruppen ist u. a. das metallische Gefüge. Die Legierungen der ersten Gruppe weisen nämlich sämtlich ein austenitisches Gefüge auf, und die der anderen Gruppe ein ferritisches; man spricht daher oft von austenitischen oder ferritischen Heizleiterlegierungen, um die in Frage kommende Werkstoffkategorie zu bestimmen.

Für die beiden Gruppen von Heizleiterlegierungen kann man eine Reihenfolge der Eigenschaften nicht so leicht aufstellen, weil die Legierungstypen stark voneinander abweichen. Die verschiedenen chemischen Zusammensetzungen der Heizleiterlegierungen weisen eine ganze Reihe von Variationen betr. die Materialeigenschaften auf, wie z. B. Änderung der maximalen Verwendungstemperatur, der Lebensdauer, des spezifischen Widerstandes, des Temperaturkoeffizienten des Widerstandes, der Zunderfestigkeit, der Wärmefestigkeit und der Resistenz gegen Angriffe von korrosiven Gasen. Für den Verbraucher dieser Werkstoffe ist es allein von Wichtigkeit, zu erfahren, welche Qualität die gewünschten Materialeigenschaften am besten erfüllt. Um dieses zu erörtern, werden die Eigenschaften der verschiedenen Legierungstypen näher besprochen und miteinander verglichen, um dem