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: 74 (1983)

Heft: 24

Artikel: Konstruktionen und Herstellung von Mittelspannungskabeln

Autor: Borer, W. J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904902

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: 02.07.2025

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

Konstruktionen und Herstellung von Mittelspannungskabeln

W.J. Borer

Die Funktionen der Aufbauelemente von Mittelspannungskabeln werden erläutert. Es folgt ein kurzer historischer Rückblick auf die Energiekabel-Entwicklung. Dann werden die heute verwendeten Anlagen und Verfahren zur Herstellung von Energiekabeln im Mittelspannungsbereich beschrieben, gefolgt von einem Ausblick in die weiteren Entwicklungstendenzen.

Après avoir donné une description des fonctions des éléments de construction des câbles à moyenne tension, cet article présente un bref historique sur le développement des câbles d'énergie. Les matériels et les procédés utilisés aujourd'hui pour la fabrication des câbles d'énergie dans le domaine de la moyenne tension sont ensuite décrits. Pour terminer, l'article donne une vue des tendances de développement.

1. Die Komponenten des Energiekabels und ihre Funktionen

Die Hauptfunktionen eines Energiekabels bestehen in einem möglichst wirtschaftlichen Transport von Energie in beschränkten Raumverhältnissen (Primärfunktion) sowie den Stromleitungs-, Spannungshaltungs- und Schutzfunktionen (Sekundärfunktionen). Alle diese Funktionen müssen über die geforderte lange Lebensdauer des Kabels gewährleistet sein. Die Komponenten, aus welchen das Kabel aufgebaut ist, und die Funktionen, welche sie erfüllen, sind in Tabelle I aufgeführt.

Der *Leiter* muss eine möglichst verlustfreie Stromleitung und damit eine wirtschaftliche Leistungsübertragung erlauben. Zudem sollte er möglichst flexibel sein. Die am meisten verwendeten Leitermaterialien sind Kupfer und Aluminium, in der Schweiz vorwiegend Kupfer. Folgende Arten von Verlusten treten auf:

a) ohmsche Verluste: $I^2 \cdot R_{dc}$
b) Skineffekt: Dieser kommt dadurch zustande, dass bei höheren Frequenzen die Stromdichte im Leiter von aussen nach innen exponentiell abnimmt. Daraus ergibt sich, dass der Wechselstromwiderstand R_{ac} mit zunehmender Frequenz den Gleichstromwiderstand R_{dc} immer mehr übersteigt. Die entsprechenden Zusammenhänge zeigen die Figuren 1 und 2 [1]. Daraus ist ersichtlich, dass für 50 Hz erst ab R_{dc} = 0,05 Ω/km R_{ac}: $R_{dc} \geqq 1{,}05$ wird, d.h. ab einem Leiterquerschnitt von etwa 400 mm² Cu.

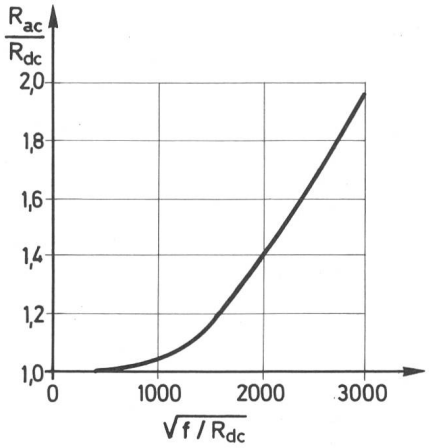

Fig. 1 Frequenzabhängigkeit des Wechselstromwiderstandes (Skineffekt) in runden Stäben f in [Hz], R_{ac} und R_{dc} in [Ω/m]

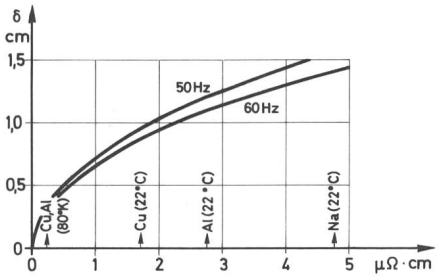

Fig. 2 Skintiefe bei 50 bzw. 60 Hz in Abhängigkeit vom spezifischen Leiterwiderstand

Komponenten von Energiekabeln und ihre Funktionen — Tabelle I

Komponenten des Kabels	Funktion
Leiter	*Stromleitung*
Innerer Halbleiter	Leiterglättung, Ionenfalle
Isolation/Dielektrikum	*Spannungshaltung*
Äusserer Halbleiter	Feldglättung → Erhöhung Durchschlagfestigkeit
Abschirmung	Ableiten von Erdschluss-Strömen, Berührungsschutz
Mantel	mechanischer und chemischer Schutz
Armierung	mechanischer Schutz (Verlegung)

Adresse des Autors:
W.J. Borer, Leiter Forschung und Entwicklung, Kabelwerke Brugg AG, 5200 Brugg.

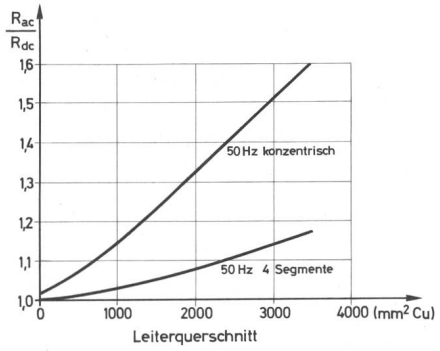

Fig. 3 Reduktion des Skineffekts durch Milliken-Leiter

Durch die Verwendung von sog. Milliken-Leitern aus einzelnen, voneinander isolierten, verseilten Segmenten kann das Verhältnis $(R_{ac} - R_{dc})/R_{dc}$ auf etwa ⅕ seines Wertes gesenkt werden, wie Figur 3 zeigt [2].

c) Proximity-Effekt: Der Wechselstromwiderstand eines Leiters erhöht sich auch durch den Einfluss von in der Nähe durch andere Leiter fliessenden Strömen. Der Proximity-Faktor wird wie folgt definiert [3]:

$$P = \frac{R_{ac} / R_{dc}}{(R_{ac} / R_{dc})_0}$$

Dabei bezieht sich der Index 0 auf den Fall ohne in der Nähe befindliche andere Leiter. Die Grösse des Proximity-Effekts ist aus Figur 4 zu entnehmen. Für 50 Hz ergibt sich, dass z.B. für einen Leiterquerschnitt von 120 mm² Cu, s/d grösser als 3 sein muss, damit P kleiner als 1,01 bleibt. Figur 4 stellt den Proximity-Effekt für runde Massivleiter dar; für verseilte Leiter ist er wesentlich geringer.

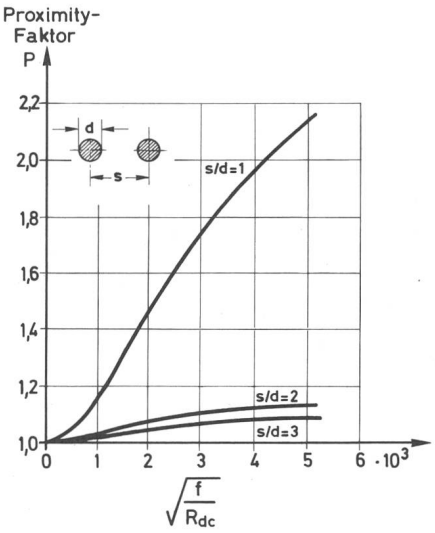

Fig. 4 Proximity-Faktor in Funktion der Frequenz für zwei parallele Leiter

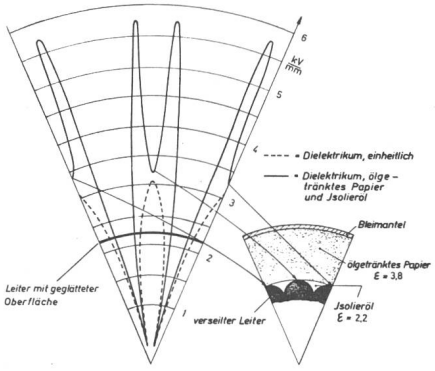

Fig. 5 Feldverteilung mit und ohne Leiterglättung nach Heumann [5] (10-kV-Massekabel mit mehrdrähtigem Leiter 120 mm² Cu)

Der *innere Halbleiter (Leiterglättung)* dient zur Verhinderung von lokalen Feldüberhöhungen, die durch den im allgemeinen mehrdrähtigen Aufbau des Leiters bedingt sind (Fig. 5). Zu diesem Zweck bringt man auf den Leiter eine halbleitende Zwischenlage auf, welche für eine radialsymmetrische Feldverteilung sorgt und zudem als Ionenfalle wirkt [4].

Die halbleitende Schicht erhöht zwar den $\tan\delta$, ist jedoch aus Gründen der Durchschlagfestigkeit der Isolation notwendig. Der Halbleitereffekt wird in der Regel durch Beimischen von Russ erreicht.

Die *Isolation* hat als Hauptfunktion die Spannungshaltung. Im Falle der *Polymerisolation* muss es sich um ein möglichst homogenes, von inneren Grenzflächen freies Material handeln. Diese Forderung kann weitgehend, aber nicht vollständig erfüllt werden. Erstens sind die Polymermaterialien teilweise von teilkristalliner Struktur und weisen somit im Mikrobereich statistisch verteilte innere Grenzflächen auf. Zweitens ist fabrikationstechnisch die Bildung von sehr kleinen Hohlräumen im Innern der Isolation nicht vollständig zu verhindern. Dadurch wird, zusammen mit der Anwesenheit von Wasser in der Isolation, deren Lebensdauer beeinflusst. Innere Feldinhomogenitäten können auch durch Verunreinigungen entstehen. Heute ist es jedoch möglich, durch Verwendung reinster Materialien und modernster Verfahrenstechnik Anzahl und Grösse der Hohlräume und Verunreinigungen sowie den Wassergehalt derart klein zu halten, dass Isolationen mit hoher Lebensdauer entstehen.

Bei der *Papierisolation* handelt es sich um ein Dielektrikum, welches auf Grund seiner feldsteuernden Schichtstruktur eine hohe Durchschlagfestigkeit erreicht. Probleme mit den Hohlräumen gibt es beim papierisolierten Kabel bei den üblicherweise kleinen Betriebsfeldstärken kaum. Im Gegensatz zur Polymerisolation muss jedoch die Papierisolation unbedingt durch einen absolut wasserdichten, d.h. metallischen Mantel geschützt werden.

Der *äussere Halbleiter* hat, wie auch der innere, die Funktion, das elektrische Feld radial-homogen auszubilden. Es ist deshalb wichtig, eine möglichst glatte, zylindrische Grenzfläche zwischen Isolation und äusserem Halbleiter zu erreichen. Auch hier werden in der Regel russgefüllte Materialien verwendet.

Die *Abschirmung* hat gleichzeitig eine Stromleitungs- und eine Schutzfunktion. Es geht dabei um das Ableiten von Erdschluss-Strömen sowie um den Berührungsschutz gegen Mantelüberspannungen. Durch den im Leiter fliessenden Strom werden in den Schirmen und (metallischen) Mänteln Längsspannungen induziert, die im Kurzschlussfalle einige kV betragen, sofern die Mäntel nicht beidseitig geerdet sind. Die Erdung wiederum bringt aber Zusatzverluste.

Mantel und *Armierung* des Kabels erfüllen verschiedene Schutzfunktionen. Die mechanische Schutzfunktion umfasst den Schutz vor Beschädigung bei der Verlegung und vor der Einwirkung von Druckkräften auf das Dielektrikum, das Aufnehmen der inneren Dilatationsdrücke sowie die Verhinderung des Ausfliessens von Isolierölen bzw. -massen.

Die «chemische» Schutzfunktion besteht in der Verhinderung der Diffusion von Flüssigkeiten und Gasen, welche die Alterung der Isolation beschleunigen würden. Die thermische Schutzfunktion umfasst zur Hauptsache das Ableiten der entstehenden Verlustwärme. Der Mantel des Kabels hat schliesslich auch eine elektrische Berührungsschutzfunktion. Je nach Art der Verlegung und der Bedingungen, denen das verlegte Kabel ausgesetzt sein wird, werden verschiedene Mantel- und Armierungskonstruktionen verwendet.

2. Historischer Rückblick auf die Entwicklung von Energiekabeln

Tabelle II gibt eine kurze Übersicht über die wesentlichsten Meilensteine

Rückblick auf die Entwicklung der Energiekabeltechnik Tabelle II

Jahr	Leiter/HL	Isolation	Mantel/Armierung
1839		Vulkanisierter Gummi, ölimprägnierte Jute	
1879		Guttapercha	
~1880			Bleimantelpresse (Borel)
1890		Ferranti-10-kV-Kabel, erdwachsgetränktes Papier	
1893		Bleikabel mit imprägnierter Papierisolation	
1900		Erstes 25-kV-Kabel (Minnesota)	
1906		Erstes 150-kV-Kabel (360 km) (Lyon)	
1910	Höchstädter-Papier, Dreibleimantelkabel 10–60 kV		
1917		Emanueli, 80-kV-Ölpapierkabel	
1925		Gasdruckkabel (Fischer/Atkinson)	
1931		Oilostatic-Kabel 66 kV	
1938		Erste MS-Kabel mit synthetischer Gummiisolation	
1944		PVC-Isolationen	
1947			Al-Presse (GB)
1947		20 kV PE (CH)	
~1950			Cu-Wellmantel (BRD)
1952		400-kV-Ölkabel	
1958		50–70 kV PE (CH)	
1958		MS-XLPE-Luftkabel	
1966		138 kV PE (USA)	
1967			Cu-Wellmantel auf Ölkabel (CH)
1969		220 kV PE	
1971		SF_6-Rohrleiter	

in der Entwicklung zu den heute üblichen Energiekabeltypen. Es zeigt sich, das das Dielektrikum neben der Manteltechnik das kritischste und wichtigste Element in der Entwicklung des Energiekabels darstellte.

3. Die heute verwendeten Kabel-Herstellungsverfahren und -maschinen

3.1 Leiter

In der Schweiz werden fast ausschliesslich verseilte *Leiter* aus Elektrolyt-Kupferdrähten hergestellt. Die Zahl der Drähte in den einzelnen Lagen ist normalerweise gleich 1 (Zentrum) bzw. ein Vielfaches von 6, die Gesamtzahl von Drähten im Leiter somit

$$N = 1 + 3n(n+1)$$

wobei $n = 1, 2, \ldots$ die Zahl der Lagen bedeutet [6]. Aufeinanderfolgende Lagen werden in entgegengesetztem Sinne schraubenlinienförmig aufgebracht. Figur 6 zeigt eine typische Korbverseilmaschine, wie sie heute verwendet wird.

Figur 7 zeigt den wesentlichen Teil der Maschine, den Verseilnippel. Für die Herstellung von hochverdichteten Sektorleitern werden auch Rollen statt des Nippels verwendet.

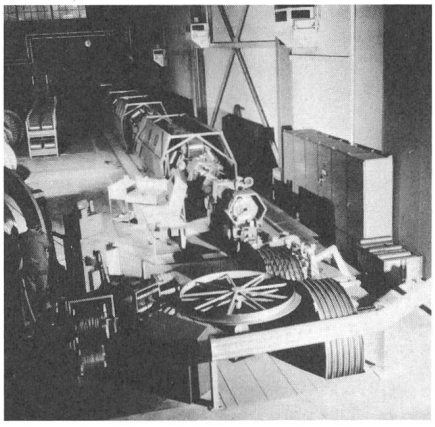

Fig. 6 61spulige Leiterverseilmaschine

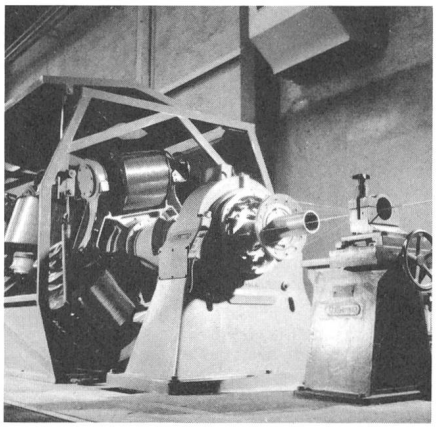

Fig. 7 Verseilnippel an Leiterverseilmaschine

3.2 Die Isolation und die Halbleiter

In der Regel werden heute die drei Schichten auf der gleichen Maschine aufgebracht. Je nach Art der Isolation werden dafür folgende Maschinen eingesetzt:

Papierisoliermaschinen: Diese bringen das in Form von Papierbändern vorliegende Isolationspapier (und auch die halbleitenden Papiere) in vielen aufeinanderfolgenden Lagen auf den Leiter. Die Maschinen (Fig. 8) bestehen aus einer Reihe von gleichartigen Wicklern, von welchen jeder eine gewisse Anzahl von Papieren spiralförmig auf den durchlaufenden Leiter aufwickelt.

Mit einer aus 20 Wicklern bestehenden Maschine können Isolationen für Kabel bis 400 kV Nennspannung in einem Durchgang aufgebracht werden. Für Mittelspannungskabel (Isolationsdicken 3 bis 8 mm) müssen nur einige wenige der vorhandenen Wickler eingesetzt werden. In der Regel wickelt man auf den Leiter zuerst 1–2 Lagen Halbleiterpapier. Dann folgen

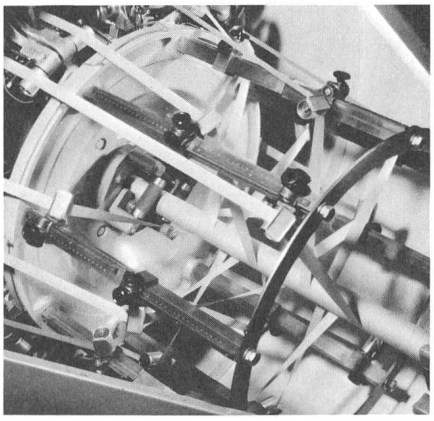

Fig. 8 Papierwickler (16 Papiere) einer Papierisoliermaschine

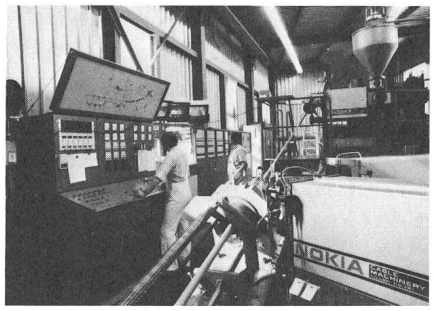

Fig. 9 Tandem-Extrusionsanlage

die vielen Lagen von Isolationspapieren – innen oft etwas dünnere als aussen – und schliesslich je eine Lage halbleitendes und Höchstädter-Papier (Laminat aus halbleitendem Papier und perforierter Alufolie).

Polymerisoliermaschinen: Im Mittelspannungsbereich werden heute die Isolationsmaterialien Polyäthylen (PE), vernetztes Polyäthylen (VPE) und vernetzter Äthylen-Propylen-Kautschuk (EPR) eingesetzt. Die Isolieranlage umfasst einen Extrusions- und (für VPE und EPR) einen Vernetzungsteil. Die innern und äussern Halbleiterschichten werden auf derselben Extrusions-/Vernetzungsanlage aufgebracht.

Für die *Extrusion* kommen folgende Verfahrensvarianten in Frage:

(a) Tandem-Extrusion: In einem ersten Extruder wird die innere Halbleiterschicht auf den Leiter extrudiert. Zwei weitere Extruder auf der gleichen Fabrikationsstrecke bringen in einem Zweifachspritzkopf die Isolation und den äusseren Halbleiter auf (Fig. 9).

(b) Dreifach-Extrusion aller drei Schichten in einem Spritzkopf (Fig. 10).

Dieses modernste Verfahren bringt gegenüber der Tandem-Extrusion folgende Vorteile:

- Keine Kontamination zwischen innerem Halbleiter und Isolation
- bessere Verklebung der halbleitenden Schichten mit der Isolation

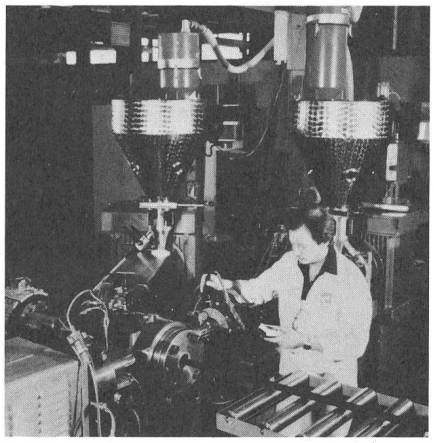

Fig. 10 Co-extrusion von Schichten in Dreifach-Spritzkopf

Die wichtigsten Kenngrössen eines Extruders, die dem verwendeten Material anzupassen sind, sind die Schneckengeometrie (Gangtiefe, Steigung, Länge/Durchmesser, Kompressionsverhältnis), die Spritzkopfgeometrie sowie die Temperaturen in den verschiedenen Zonen des Extruders. Die Maximaltemperaturen sind insbesondere bei den zu vernetzenden Materialien sehr exakt einzuhalten, um eine Vorvernetzung zu verhindern.

Da heute für MS-Kabel mit Polymerisolation vorwiegend VPE und EPR eingesetzt werden, soll nun noch auf die *Vernetzungsverfahren* eingegangen werden.

Folgende Vernetzungsverfahren werden heute eingesetzt:

(1) Chemische Vernetzung mit Peroxyd in einer Kettenlinie (trocken oder Dampf)
(2) Chemische Vernetzung mit Peroxyd in Kontaktrohr-Anlage (MDCV), trocken
(3) Silan-Vernetzung (Sioplas-Verfahren)
(4) Strahlenvernetzung mit Elektronenstrahlen

Die Vernetzungsarten (3) und (4) kommen heute vorwiegend für Niederspannungskabel zur Anwendung.

Das Silanvernetzungsverfahren, welches bis vor kurzem noch mit Erfolg auch für Mittelspannungskabel eingesetzt wurde, ist inzwischen auf Grund von wirtschaftlichen Überlegungen (kontinuierliche Vernetzung) durch die Vernetzungsverfahren (1) und (2) ersetzt worden.

Das heute am meisten verwendete Verfahren ist die Vernetzung in einer Kettenlinie (1). Dabei wird der extrudierte Kabelkern teilweise freihängend durch ein über 100 m langes Rohr gezogen, in welchem zuerst die Vernetzung in Stickstoffatmosphäre (400 °C, 10 bar) oder in Wasserdampfatmosphäre und anschliessend die Kühlung mit Stickstoff oder Wasser stattfindet (Fig. 11).

Die trockene Vernetzung und Kühlung werden angewendet, um den Wassergehalt des gefertigten Kabels und damit die Neigung zur Bildung der sog. Wasserbäumchen möglichst gering zu halten.

Die *Kontaktrohr-Vernetzungsanlage,* bei welcher die Vernetzung in einem geraden Rohr stattfindet, dessen Innendurchmesser nur wenig über

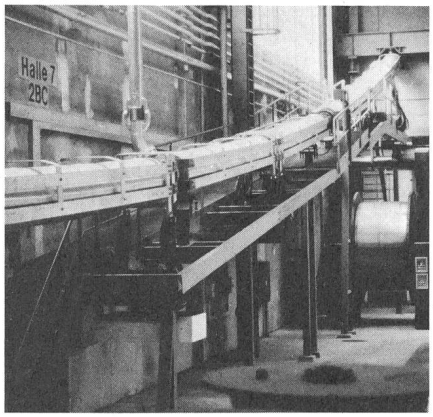

Fig. 11 Kettenvernetzungslinie

dem Aussendurchmesser des Kabelkerns liegt, ist für Hochspannungskabel konzipiert, für welche die Kettenlinie auf Grund des hohen Kabelgewichts nur noch bedingt einsetzbar ist. Sie kommt deshalb im Mittelspannungsbereich für 60-kV-Kabel mit grossen Leiterquerschnitten bis 2000 mm² zum Einsatz (Fig. 12) [7].

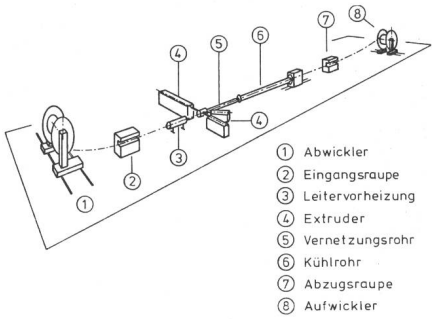

Fig. 12 MDCV-Kontaktrohr-Vernetzungsanlage

3.3 Abschirmungen, Mäntel, Armierungen

Für die über dem Kabelkern anzubringenden weiteren Aufbauelemente des Kabels kommen folgende Maschinen zum Einsatz:

a) *Ceandrieranlage*

Mit dieser Anlage werden die Kupferdrahtschirme sinusförmig auf den Kabelkern aufgebracht (Fig. 13).

Die an sich ursprünglich für Niederspannungskabel konzipierte Anlage wird auch für Mittel- und Hochspannungskabel eingesetzt, obwohl bei diesen der Drahtschirm auch spiralförmig aufgewickelt werden könnte. Die Anlage ist auch für das Anbringen eines Kupferbandes über dem Drahtschirm und des Kunststoffmantels einsetzbar. Zum Teil weisen solche Anlagen auch mehrere Wickler zwischen Ceandrierung und Polymerextruder auf, was das zusätzliche Anbringen von Bändern erlaubt.

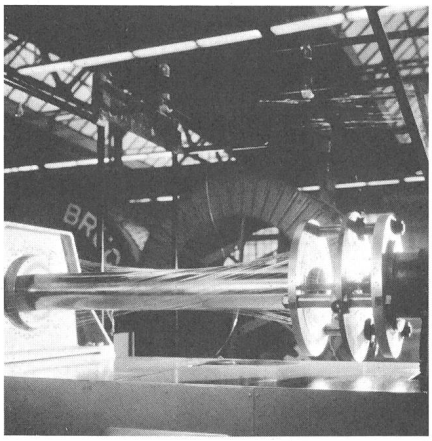

Fig. 13 Ceandrieranlage

b) *Armieranlagen*

Solche Anlagen werden für das Anbringen von leichten und schweren Band-, Flachdraht- und Runddrahtarmierungen eingesetzt (Fig. 14).

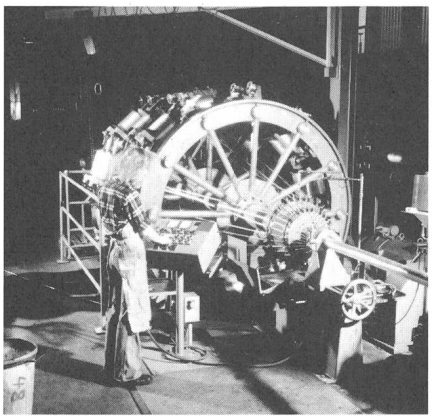

Fig. 14 48spulige Flachdrahtarmieranlage

c) *Mantelextruder für Polymermäntel*

d) *Anlage zur Herstellung längsverschweisster Metallmäntel*

Mit dieser Anlage (Fig. 15) werden nicht nur glatte, sondern insbesondere gewellte, längsverschweisste Metallmäntel über dem Kabelkern angebracht. Ein längseinlaufendes Metallband wird kontinuierlich um den Kabelkern herum geformt, längs unter Schutzgas zusammengeschweisst und anschliessend gewellt. Metallische Wellmäntel kommen im Mittelspannungsbereich vor allem bei papierisolierten Kabeln zum Einsatz, gelegentlich auch bei Polymerkabeln.

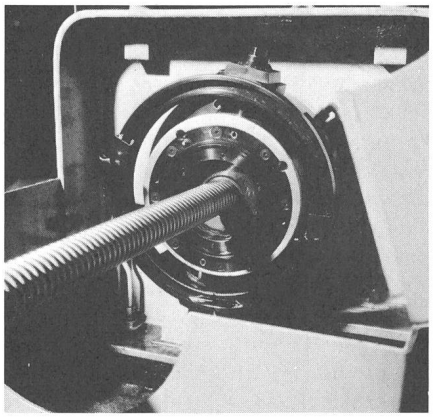

Fig. 15 Wellscheibe an der Wellmantelanlage

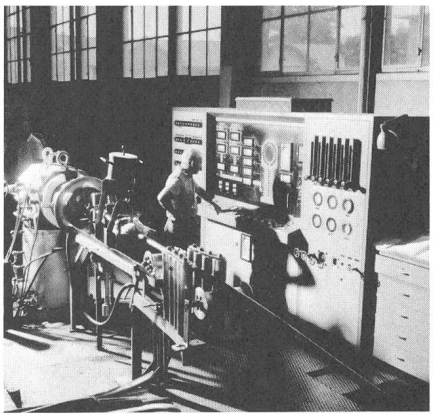

Fig. 16 Hansson-Bleipresse

e) *Blei- bzw. Aluminiumpressen*

Diese dienen zum Aufbringen von glatten und, im Falle von Aluminium, auch gewellten nahtlosen Metallmänteln.

Figur 16 zeigt eine Hansson-Bleipresse mit 1800 kg/h Kapazität, mit welcher Bleimäntel bis 110 mm Innendurchmesser gefertigt werden können. Statt dem früher verwendeten Weichblei wird heute legiertes Blei (Cu, Te) verwendet, um Rekristallisationsphänomene zu verhindern und damit die Alterungsbeständigkeit der Bleimäntel zu erhöhen.

4. Die heute in der Schweiz üblichen Mittelspannungs-Kabeltypen

Das übliche Angebot an Mittelspannungskabeln in der Schweiz kann nach folgenden Kriterien grob eingeteilt werden:

a) Einleiter- oder Dreileiterkabel
b) Nennspannung: 10, 20, 30, 45, 60 kV
c) Isolationstyp:
   - Papier/Haftmasse
   - Polymer (VPE, EPR, PE)
d) Mantel:
   - Polymer (PE, PVC)
   - Metall (Blei, Aluminium, Kupfer) glatt oder gewellt

Die Tabelle III zeigt eine Systematik der heute in der Schweiz üblichen MS-Kabeltypen, inkl. Bezeichnungen.

5. Ausblick, Entwicklungstendenzen

Für die *bestehenden Kabeltypen* gehen in der Fabrikation der Bestrebungen in Richtung kürzere Einrichtzeiten und höherer Automatisierung (z.B. Aufwickler).

Verfahrenstechnisch ist zu unterscheiden zwischen den Papier-Haftmassekabeln, bei welchen keine wesentlichen Entwicklungsanstrengungen mehr unternommen werden, und den Polymerkabeln, welche die ersteren in zunehmendem Masse verdrängen.

Die *Entwicklungstendenzen bei den Polymerkabeln* sind im wesentlichen bestimmt durch die Wünsche der Kunden an das Kabel von morgen einerseits und durch die heute noch anstehenden Probleme mit den bestehenden Kabeltypen andrerseits [8]:

- Aus der Erkenntnis heraus, dass bei gleichzeitigem Vorhandensein von Hohlräumen und Wasser oder von Feldinhomogenitäten und Wasser in der Isolation die bekannten Wasserbäumchen entstehen, die bekanntlich via die aus ihnen entstehenden elektrischen Bäumchen zur Verkürzung der Lebensdauer des Kabels führen können, werden *längs- und querwasserdichte* Kabelkonstruktionen entwickelt und geprüft, vor allem für Spannungen von 60 kV und mehr. Die Notwendigkeit solcher Kabelkonstruktionen im Mittelspannungsbereich ist noch umstritten. Die *Querwasserdichtheit* erreicht man durch eine der folgenden Massnahmen:

  a) Verwendung von Metallwellmänteln aus Aluminium oder Kupfer.
  b) Verwendung von metallischen Schichtenmänteln.
  c) Verwendung von Kunststoffmänteln mit gegenüber PE und PVC stark verminderter Permeabilität gegenüber Wasser bzw. Wasserdampf.

Die *Längswasserdichtheit* erfordert Massnahmen sowohl im Schirmbereich als auch im Leiterbereich, die verhindern, dass durch Mantelbeschädigung oder unsaubere Montage einmal eingedrungenes Wasser sich entlang dem Kabel ausbreiten kann.

Folgende Möglichkeiten bieten sich hier an und sind in Entwicklung bzw. bereits im Einsatz:

Systematik der heute in der Schweiz üblichen Kabeltypen Tabelle III

Anzahl Leiter	Isolation	Abschirmung	Mantel/Armierung	Nenn-spannung	Bezeichnung
1	Papier/ Haftmasse (P)	keine	Blei/Polymer	10 kV	PPb-T
		Höchstädter- und Halbleiterpapier	Blei/Polymer	20–60 kV	PPb-T
	Polymer (X, G, T)	Cu-Band	Polymer	10–30 kV	TT
		Cu-Drähte	Polymer	45–60 kV	TKT
				10–60 kV	XKT
				10–60 kV	GKT
3	Papier/ Haftmasse (P)	keine (Gürtelkabel)	Blei/Polymer	10 kV	PPb-T
			Blei/PP-Garn/ Flachdraht/Polymer	10 kV	PPb-JFT
		Höchstädter- und Halbleiterpapier (Dreileiter-H-Kabel)	Blei/PP-Garn/ 2 Stahlbänder/Polymer	20–60 kV	PPb-JCT
			Blei/Polymer/Flachdraht	20–60 kV	PPb-TF
			Stahlwellmantel/ Polyment/Polymer	20–60 kV	PFEW-T
		Höchstädter- und Halbleiterpapiere (Dreibleimantelkabel)	Blei (um jeden Leiter)/ Polymer (um jeden Leiter)/Spickel/ Flachdraht	20(30) kV	PPb-T-F
	Polymer (X, G, T)	Cu-Band	Polymer	10–30 kV	TT-T
			Flachdraht (m. Gegenspirale)	10–30 kV	TT-F(G)
			Flachdraht und Polymer	10–30 kV	TT-FT
			Doppelflachdraht	10–30 kV	TT-FF
			Doppelflachdraht/Polymer	10–30 kV	TT-FFT
		CU-Drähte	Polymer	45–60 kV	TKT-T
			Flachdraht	45–60 kV	TKT-F
			Flachdraht/Polymer	45–60 kV	TKT-FT
			Doppelflachdraht	45–60 kV	TKT-FF
			Doppelflachdraht/Polymer	45–60 kV	TKT-FFT
			Polymer	10–60 kV	GKT(XKT)-T
			Flachdraht	10–60 kV	GKT-F
			Flachdraht/Polymer	10–60 kV	GKT-FT
			Doppelflachdraht	10–60 kV	GKT-FF
			Doppelflachdraht/Polymer	10–60 kV	GKT-FFT

- Quellpulver im Schirmbereich
- Quellvliese im Schirmbereich
- kautschukartige Abdichtmasse im Schirmbereich
- Dichtungspropfen in regelmässigen Abständen im Leiter

- *«Wasserfeste» Isolierstoffmischungen* sind zurzeit weltweit in Entwicklung und Erprobung. Mit diesen wird versucht, das Problem an der Wurzel zu packen und die oben beschriebenen Massnahmen zur Verhinderung des Eindringens und der Längsausbreitung von Wasser überflüssig zu machen. Das Problem wird schon seit längerer Zeit von den Rohstofflieferanten intensiv bearbeitet, und erste sog. «tree retardant polymers» sind bei den Kabelherstellern versuchsweise im Einsatz.

- *Besseres Kabelzubehör*
  Hier geht es um die Entwicklung von möglichst montagefreundlichen Muffen und Endverschlüssen.

- *Energiekabel mit Lichtwellenleitern*
  Für einige Spezialanwendungen sind Energiekabel mit integrierten Glasfasern für optische Datenübermittlung von Interesse. Solche kombinierte Kabel sind am besten realisierbar, wenn es sich beim elektrischen Kabel um ein Dreileiterkabel handelt. Ein solches bietet nämlich für den Einbau von Lichtwellenleitern geometrisch besser Platz (Zentrum, Spickel) als ein Einleiterkabel. Solche Kabel sind machbar, jedoch ist der Bedarf für sie noch nicht sehr entwickelt.

- *Isolierte Freileitungen,* auch Luftkabel genannt, könnten im Mittelspannungsbereich bei Vorliegen spezieller Randbedingungen (Terrain, Umweltschutz, Kosten) evtl. in zunehmendem Masse zum Einsatz kommen. Die Vorteile gegenüber dem erdverlegten Kabel liegen in der Vermeidung der Grabarbeiten, während gegenüber der Freileitung der Vorteil im wesentlich kleineren Platzbedarf liegt, was speziell in Wäldern vorteilhaft ist.

6. Schlussbemerkungen

Die Hauptkomponenten der Mittelspannungskabel und ihre Funktionen wurden erläutert, gefolgt von der Beschreibung der Verfahren und Maschinen, welche zur Herstellung dieser Kabel verwendet werden. Die heute in der Schweiz üblichen Mittelspannungskabeltypen umfassen einerseits die bewährten papierisolierten Kabel und andrerseits die in zunehmendem Masse eingesetzten Polymerkabel. Ihr Anteil am gesamten Mittelspannungssortiment wächst ständig. Er beträgt heute etwas über 60%. Da die Polymerkabel in der Wachstumsphase sind, konzentrieren sich auch die Entwicklungsanstrengungen weitgehend auf diese Kabel. Es ist jedoch zu bedenken, dass alle wenn auch noch so eindrücklichen Neuentwicklungen nur dann für den Kunden interessant sind und sich demnach durchsetzen werden, wenn die zusätzlichen Qualitätsvorteile in einem gesunden Verhältnis zu den Mehrkosten stehen. Das Bestreben der Kabelhersteller geht aber nach wie vor dahin, den Kunden die bestmögliche Qualität zu einem möglichst günstigen Preis anzubieten.

Literatur

[1] *P. Graneau:* «Underground Power Transmission», Wiley 1979, S. 38...42.
[2] *P. Graneau:* (s.o.). S. 106.
[3] *P. Graneau:* (s.o.), S. 48...49.
[4] *H.W. Lücking:* «Energiekabeltechnik», Vieweg 1981, S. 81.
[5] *H. Heumann:* F&G-Rundschau (1952), S. 25...30.
[6] *S.Y. King:* «Underground Power Cables», Longman 1982, S. 8.
[7] *P.A. Moser:* Techn. Rundschau, 18.1.1983.
[8] Elektrizitätswirtschaft, 82(1983)16, S. 581...583 (Bericht über CIRED 1983).