Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 59 (1968)

Heft: 23

Artikel: Der heutige Stand der Starkstrom-Kunststoffkabel

Autor: Capol, B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916091

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

Der heutige Stand der Starkstrom-Kunststoffkabel

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 3. Juli 1968 in Neuchâtel,

von *B. Capol,* Brugg

061.3:621.315.2

1. Einleitung

In der rasanten technischen Entwicklung der letzten Jahrzehnte haben vor allem drei Gebiete das menschliche Leben tiefgehend beeinflusst:

Die Atomphysik, die der Menschheit den Segen der Kernenergie, aber auch den Fluch der Wasserstoffbombe und die Angst vor der totalen Vernichtung brachte. Dann die Elektronik, die eine Unzahl von Informationen in kaum vorstellbar kurzer Zeit zur Verfügung stellt und dem Menschen den Flug nach den Sternen ermöglicht. Eine ähnliche Revolution brachte die Kunststofftechnik, die dem Menschen eine ungeahnte Zahl neuer Werkstoffe mit fast beliebigen Variationsmöglichkeiten bescherte. Die Kunststoffe sind zu unserem täglichen Begleiter geworden.

Die Kabelindustrie steht mitten in den drei genannten Hauptentwicklungen: Einerseits muss die aus den Kernreaktoren stammende elektrische Energie zum Teil über Kabel bis zum Verbraucher verteilt werden, anderseits sind die von der Elektronik erschlossenen Informationen teilweise leitungsgebunden weiter zu übermitteln. Ganz besonders aber bieten die hervorragenden Isoliereigenschaften gewisser Kunststoffe neue Möglichkeiten für die Kabeltechnik.

Im folgenden soll der Einsatz von Kunststoffen im Gebiete der Starkstromkabeltechnik kurz umrissen und auf die dabei auftretenden Probleme hingewiesen werden. Dabei soll nur auf jene Kunststoffe eingegangen werden, die in der Praxis der erdverlegten Starkstromkabel bereits eine gewisse Wichtigkeit erlangt haben.

2. Übersicht über die in der Starkstromkabeltechnik verwendeten Kunststoffe

2.1 Polyvinylchlorid (PVC)

Wenn man von PVC spricht, so denkt man nicht in erster Linie an das Polymerisat für sich allein, als vielmehr an eine Mischung verschiedener Substanzen, die erst in ihrer Abgewogenheit jene Eigenschaften aufweist, die für Kabelisolationen bzw. für Kabelmäntel erforderlich sind.

Die Grundeigenschaften der PVC-Mischung werden hauptsächlich durch die Art und das Mengenverhältnis von PVC und Weichmacher bestimmt. Das PVC hat die Neigung, in der Wärme Salzsäure abzuspalten. Deshalb muss die PVC-Weichmachermischung stabilisiert werden. Im Hinblick auf die bessere Verarbeitbarkeit in den Produktionsmaschinen werden geringe Mengen Gleitmittel beigegeben, und schliesslich — und das ist ein hervorstechendes Merkmal der Kunststoffe — lässt sich die Mischung durch Zugabe von Pigmenten fast beliebig färben.

In der Regel werden PVC-Mischungen nicht vom Lieferanten des Polymerisates, sondern in den einzelnen Kabelwerken hergestellt, indem dort die Grundsubstanzen vorgemischt, geliert und granuliert werden (Fig. 1).

Die Eigenschaften der Isolier- und Mantelmischungen sind durch Änderungen im Mischungsaufbau in weiten Grenzen variierbar. Eine Reihe von in- und ausländischen Vorschriften und Prüfungsnormen sorgt dafür, dass ganz bestimmte Anforderungen eingehalten werden. Es werden z. B. festgelegt:

Elektrische Durchschlagsfestigkeit;
Isolationswiderstand bei verschiedenen Temperaturen;
Wärmebeständigkeit / Kältebeständigkeit;
mechanische Eigenschaften (Zugfestigkeit, Dehnung, Abriebfestigkeit);
Wasserbeständigkeit;
Brennbarkeit;
Lichtechtheit der Einfärbung;
Kontaktverhalten;
Änderung dieser Eigenschaften im Laufe der Zeit (Alterung).

Die Einhaltung all dieser Wünsche kann nur durch einen sorgfältig abgewogenen Mischungsaufbau gewährleistet werden. Das Hochzüchten einer einzelnen Eigenschaft ist meist nur auf Kosten anderer Eigenschaften zu erreichen.

Die Mischung wird im Extruder (Fig. 2) auf den Leiter bzw. auf das Kabel aufgepresst, wobei auf gleichmässige Wandstärken und auf die Vermeidung von Löchern und Einschlüssen geachtet werden muss (Fig. 3, 4).

Die PVC-Isolation hat sich für Niederspannungskabel bestens bewährt. Auch als Mantelwerkstoff liesse sich das PVC nicht mehr aus der Kabelfabrikation wegdenken.

Obwohl PVC vor allem in Deutschland auch für Hochspannungsisolationen bis 20 kV verwendet wird, vermochte es sich wegen der hohen dielektrischen Verluste im Hochspannungskabelgebiet nicht einzubürgern. Im Polyäthylen steht für diesen Zweck ein besser geeigneter Kunststoff zur Verfügung.

2484-2496

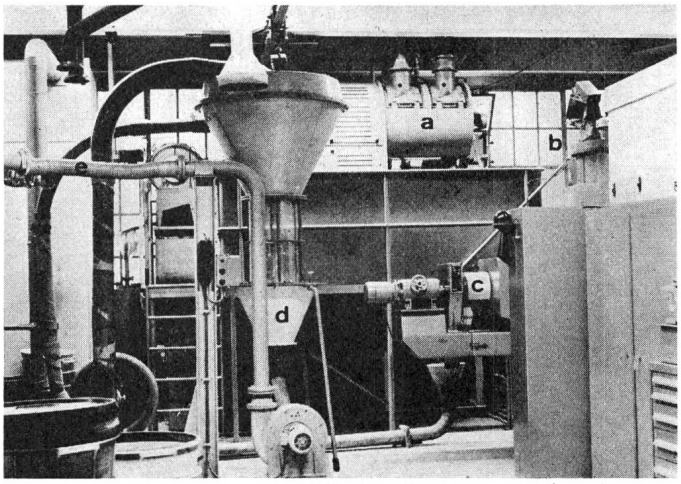


Fig. 1
Gelieranlage
a Vormischer zur Herstellung von Dry-Blend; *b* Beschickungsvorrichtung für die Geliermaschine; *c* Kopf der Geliermaschine mit Granulierapparat; *d* Kühlvorrichtung; *e* Leitung zu den Silos

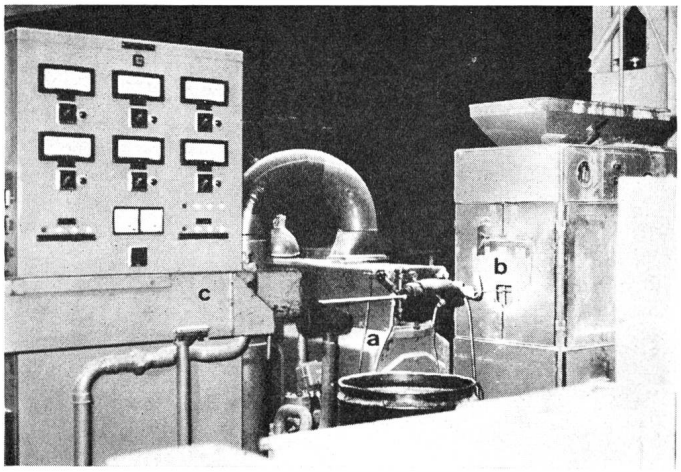


Fig. 2
Extruderanlage
a Spritzmaschine mit Spritzkopf; *b* Einlauf des verseilten Kabelkerns aus dem Puderkasten; *c* Kühltrog

2.2 Polyäthylen (PE)

Das Polyäthylen weist auf die Verwendung als Isoliermaterial nahezu ideale elektrische Werkstoffeigenschaften auf, vor allem dank der hohen elektrischen Festigkeit, der niedrigen Dielektrizitätskonstante und der unbedeutenden dielektrischen Verluste. Im Unterschied zum PVC wird Polyäthylen von der chemischen Industrie als verarbeitungsbereites Granulat angeliefert.

Die Eigenschaften des Polyäthylens liegen nach der Polymerisation fest. Bei der Auswahl und der Beurteilung dieses Kunststoffes spielen die Art der Polymerisation, die Dichte, die Molekulargewichtsverteilung, der Schmelzindex und die Kristallinität eine Rolle.

Polymerisationsart	Hochdruck...Niederdruck
Dichte	0,92...0,96
Kristallinität	50...70 %
Schmelzindex	0,2...2
Molekulargewichtsverteilung (Durchschnitt)	48,000...32,000
Dielektrizitätskonstante	2,2...2,3
Verlustfaktor	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Spez. Widerstand	$10^{17}\Omega$cm

Den besonderen Bedürfnissen der Kabelindustrie entsprechend werden Polyäthylentypen mit speziellen Zusätzen verwendet. Um die Oxydation des Polyäthylens bei erhöhten Temperaturen bzw. den Abbau des Polyäthylens bei Teilentladungen zu verzögern, werden Antioxidanten beigemischt, die gleichzeitig als sog. Spannungsstabilisatoren wirken.

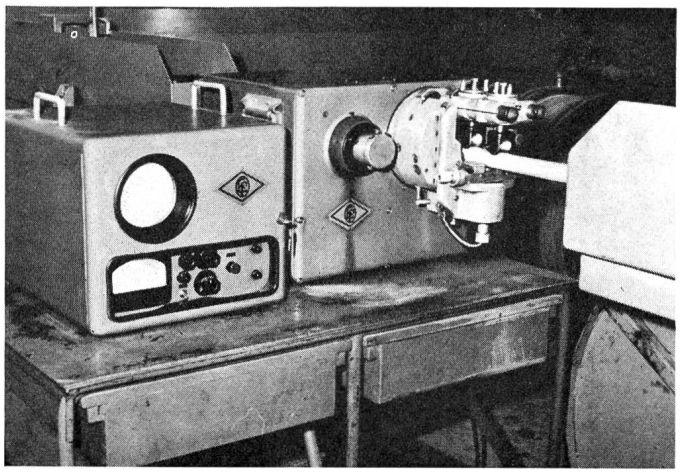


Fig. 3
Messgerät für Exzentrizität

Durch Beimischung von Vernetzungsmitteln kann das Polyäthylen so modifiziert werden, dass bei einer geeigneten thermischen Nachbehandlung eine chemische Vernetzung eintritt. Das Polyäthylen verliert dadurch die thermoplastischen Eigenschaften und geht in einen gummielastischen Zustand über. Vernetztes bzw. vulkanisiertes Polyäthylen weist eine bemerkenswert höhere Wärmefestigkeit auf als gewöhnliches Polyäthylen.

2.3 Weitere, für Starkstromkabel verwendete Kunststoffe

Auf die grosse Zahl weiterer Kunststoffe, die in der Starkstromkabeltechnik verwendet werden, soll hier nicht eingegangen werden, da sie im Bereich der erdverlegten Netzkabel untergeordnete Bedeutung haben. Der Vollständigkeit halber sei auf Butylkautschuk und auf Aethylen-Propylenkautschuk hingewiesen, die in erster Linie für flexible Starkstromkabel Verwendung finden.

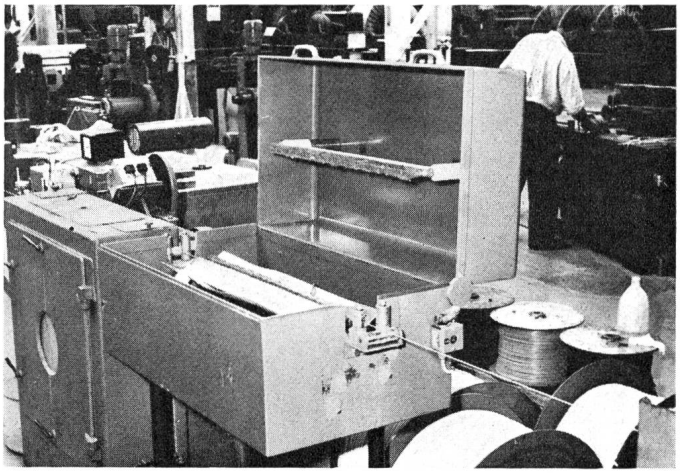


Fig. 4
Fehleranzeigegerät
(Deckel hochgeklappt)

3. Kabelkonstruktionen und Zubehör

3.1 Niederspannungskabel

Auf das Tdc-Kabel in allen Einzelheiten einzugehen, erübrigt sich, da dessen Konstruktion und Verwendungsmöglichkeit bekannt sind (Fig. 5).

Das Kabel mit Aluminiumleitern hat sich auf dem schweizerischen Markt noch nicht so eingebürgert, wie man es eigentlich im Lande mit dem höchsten Pro-Kopf-Verbrauch von Aluminium erwartet hätte. Das Aluminiumleiterkabel bringt im Niederspannungssektor bestimmt einen Preisvorteil. Dieser Preisvorteil ist am grössten bei unarmierten Kabeln, die nicht im Boden verlegt werden. Je grösser der nicht aus Aluminium bestehende Anteil einer Kabelanlage wird: Isolation, Mantel, Armierung, Muffen, Endverschlüsse, Grabarbeiten usw., umso kleiner wird der relative Preisunterschied. Dadurch wird natürlich der Anreiz zur Umstellung von Kupfer auf Aluminium kleiner. Die gemischte Verwendung von Kupfer und Aluminium im gleichen Netz wird zudem von zahlreichen Elektrizitätswerken im Hinblick auf die verschiedenen Leiterquerschnitte als nachteilig empfunden. Immerhin darf festgestellt werden, dass heute gegen das Aluminiumleiterkabel und die dazugehörenden Verbindungsmethoden bei sachgemässem Vorgehen keine technischen Einwände mehr vorgebracht werden können. Die wirtschaft-

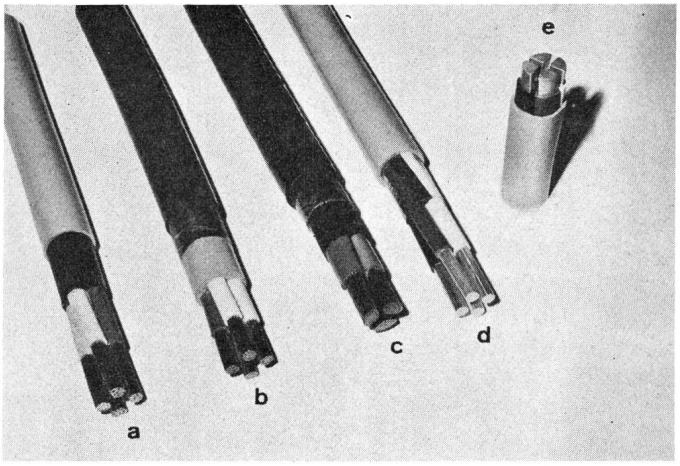


Fig. 5
TT (Tdc)-Kabel
a TT 4×50 rCu; *b* TT-CT 4×50 rCu; *c* TOT 3×95 sCu+95 kCu; *d* TT 4×70 rAl mit Massivleitern; *e* TT 4×95 sAl mit Massivleitern

lichen Vor- und Nachteile müssen von Fall zu Fall und in Abhängigkeit vom jeweiligen Kupferpreis beurteilt werden.

Eine interessante Entwicklung auf dem Gebiet der Niederspannungs-Kunststoffkabel stellt das Kabel mit dem dehnbaren konzentrischen Aussenleiter dar (Fig. 6): Bei diesen Kabeln ist der vierte Leiter mit dem aus Sicherheitsgründen geforderten elektrischen Schirm kombiniert. Der aus gewellten Drähten bestehende Aussenleiter kann vom Kabelkern abgehoben und muss bei der Montage nicht aufgetrennt werden. Das in Deutschland lancierte und auch in der Schweiz in Lizenz hergestellte Ceanderkabel benötigt aus fabrikatorischen Gründen eine plastische Einbettungsmasse. Nach der Entfernung dieser Zwischenschicht hat man freien Zugang zu den Kabeladern. Unter dem Namen ZET-Kabel wird zudem eine Variante auf den Markt gebracht, die ohne Einbettungsmasse auskommt, wobei der konzentrische Aussenleiter durch einen definierten Gürtel von den Adern getrennt ist. Der Vorteil des ZET-Kabels liegt darin, dass die in den Regeln für Niederspannungs-Netzkabel (SEV-Publikation 3062) empfohlene Isolationsdicke zwischen den Polleitern und dem als konzentrischer Aussenleiter ausgebildeten Null-Leiter unter den üblichen thermischen und mechanischen Prüfbedingungen gewährleistet bleibt, was beim deutschen Ceanderkabel nicht ohne weiteres der Fall ist. Der Vorteil der deutschen Lösung besteht dagegen in der Möglichkeit, die Innenleiter ohne Verwendung eines Schneidwerkzeuges freilegen zu können. Dadurch wird die Montage von Abzweigverbindungen unter Spannung erleichtert.

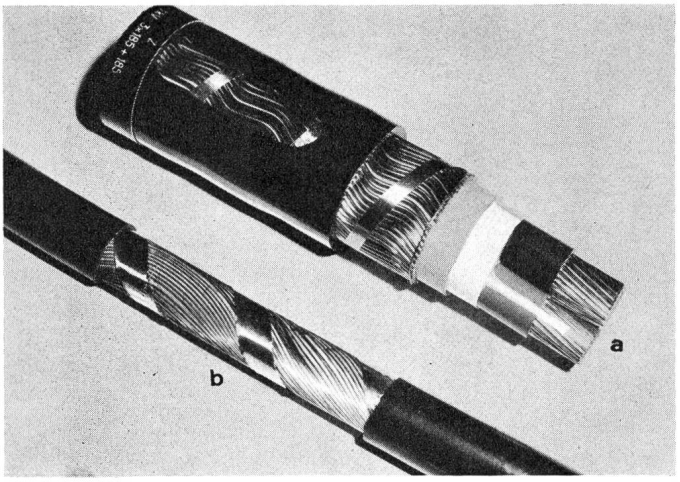


Fig. 6
Kabel mit konzentrischem Aussenleiter
a ZET-Kabel TOT 3×185 rCu+185 kCu; *b* Ceander-Kabel TOT 3×50 rCu+35 kCu

In diesem Zusammenhang soll noch erwähnt werden, dass der konzentrische Aussenleiter so beschaffen sein muss, dass seine Schutzfunktion dauernd erhalten bleibt, auch wenn der Schutzmantel verletzt ist. Da ein Aussenleiter aus Aluminium der Korrosion ausgesetzt ist, drängt sich die Ausführung des Aussenleiters aus Kupferdrähten auf, selbst wenn die Polleiter aus Aluminium bestehen.

Wie weit das Kabel mit konzentrischen Aussenleitern in der Schweiz auf Interesse stösst und welches der beiden Systeme von der Praxis her mehr Anklang findet, bleibt abzuwarten.

3.2 Zubehör für Niederspannungskabel

Bei den Ausführungen über das Kabel mit konzentrischem Aussenleiter wurde auf die Möglichkeit der Montage von Abzweigverbindungen unter Spannung hingewiesen.

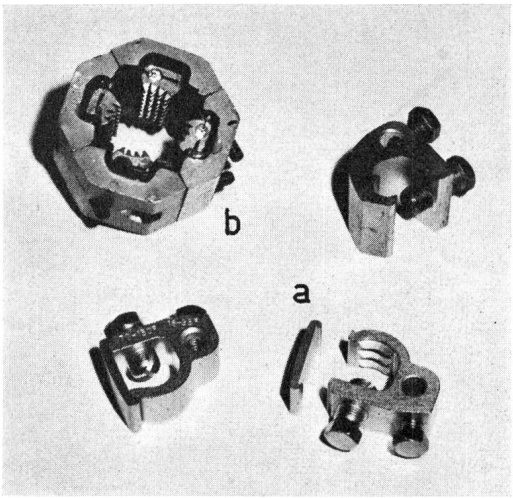


Fig. 7
Klemmen für Montage unter Spannung
a Frässchrauben-Klemmen; *b* Kompaktklemme für 4-Leiter-Kabel

Bei den in Fig. 7 gezeigten Klemmen, die auf die einzelnen Adern bzw. auf das ganze Aderbündel aufgesetzt und mit einem isolierten Schlüssel angezogen werden, fällt das Abisolieren und damit der direkte Kontakt des Monteurs mit dem spannungführenden Leiter weg. Über die Vor- und Nachteile dieser Klemmen liegen noch zu wenig Erfahrungen vor, um ein abschliessendes Urteil zu fällen.

Die Verbindungstechnik für Aluminiumleiterkabel gibt zu keinen Schwierigkeiten Anlass, sofern einige zusätzliche Massnahmen beachtet werden. Dies sind:

a) Abstimmung der Materialeigenschaften des Verbinders auf die Eigenschaften des Aluminiumleiters; Wärmeausdehnung, Kaltfluss, Verhindern von Kontaktkorrosion.
b) Entfernung der Oxydschicht auf den Aluminiumoberflächen.

Werden diese Massnahmen bei der Erstellung von Aluminiumleiterverbindungen nicht berücksichtigt, so muss im Laufe der Zeit mit einer Zunahme des Übergangswiderstandes und mit einer gefährlichen Erwärmung der Verbindungsstelle gerechnet werden. Auf dem Markt besteht ein reiches Angebot an verschiedenen Pressverbindern, die sich in der Praxis bewährt haben (Fig. 8).

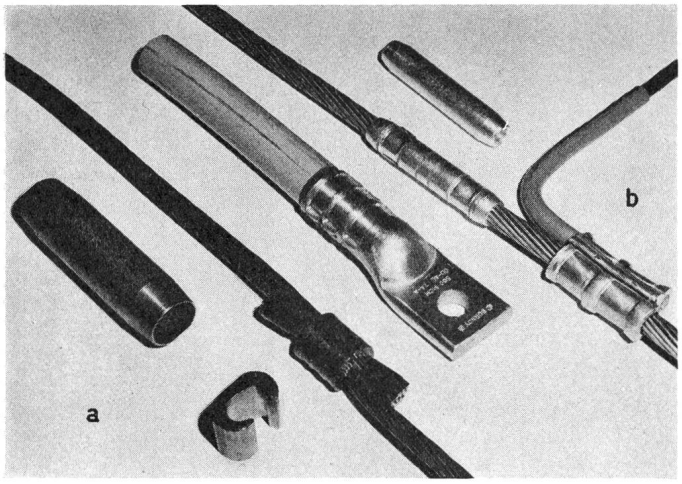


Fig. 8
Pressverbinder
a für Cu-Leiter; *b* für Al-Leiter

3.3 Ausgussmassen für Verbindungsmuffen

Im Zusammenhang mit den Kunststoffkabeln stellt sich das Problem der Ausgussmassen für Verbindungsmuffen neu, da die heiss eingegossene Masse, wie sie beim Papierbleikabel üblich ist, einem Kunststoffkabel nicht unbedingt zuträglich ist. Zudem ist eine schnelle Montage ohne lange Wartezeiten heute eine Frage des wirtschaftlichen Personaleinsatzes.

An eine Kabelvergussmasse werden folgende technischen Anforderungen gestellt:

a) Gute elektrische Isolierfähigkeit;
b) Geringe Feuchtigkeitsaufnahme;
c) Minimale Wärmeausdehnung;
d) Rasche und sichere Anwendung;
e) Einfache Entfernung bei einer Muffenmontage.

Am einfachsten in der Anwendung ist die Kaltpressmasse. Sie hat aber den Nachteil einer relativ grossen Wärmeausdehnung. Bei nicht sorgfältig abgedichteten Muffen kann durch die beim Wärmezyklus entstehende Pumpwirkung Wasser in die Muffe gesaugt werden.

Die aufgrund einer chemischen Reaktion vom dünnflüssigen in den starren oder halbstarren Zustand übergehenden Giessharze bzw. Zweikomponenten-Massen verlangen in der Verwendung besondere Sorgfalt, indem ein vorgeschriebenes Temperaturintervall eingehalten werden muss. Der Verlauf der Reaktion hängt von der Aussentemperatur und von der Wärmekapazität der Muffe ab.

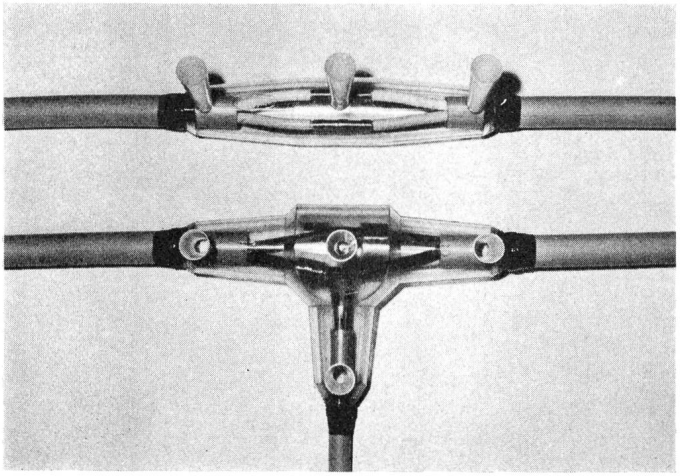


Fig. 9
Giessharzmuffen
vor dem Ausgiessen

Bei der Verwendung von Giessharzmuffen (Fig. 9) muss mit Erschwerungen bei einem allfälligen späteren Auspacken gerechnet werden. Wird eine Demontage in Betracht gezogen, so empfiehlt es sich, die zu verbindenden Kabel mit einer gewissen Längenreserve auszulegen. Beim Einsatz von Giessharzmuffen muss zudem auf die letzte Möglichkeit verzichtet werden, ein Kunststoffkabelnetz auf natürliche Weise über die Oberfläche der Gussmuffen zu erden.

Die besten Gesamterfahrungen beim Verbinden von Kunststoffkabeln in Niederspannungs-Netzen werden noch immer mit den altbewährten Gussmuffen erzielt, die mit bituminösen Massen ausgegossen werden. Aus Gründen der Wärmeempfindlichkeit der Kunststoffkabel müssen jedoch Ausgussmassen zur Anwendung gelangen, die bei niedrigeren Temperaturen schmelzen als die für Papierbleikabel verwendeten Massen, und die eine gute Haftung auf den Kunststoffoberflächen gewährleisten.

4. Kunststoff-Hochspannungskabel

Die Kunststoffe, allen voran Polyäthylen, dringen allmählich auch in das Gebiet der Hochspannungskabel ein. Es sind heute serienmässig hergestellte Kabel bis ca. 70 kV auf dem Markt. Für Versuchsstrecken wurden aber schon Kabel bis 138 kV verlegt.

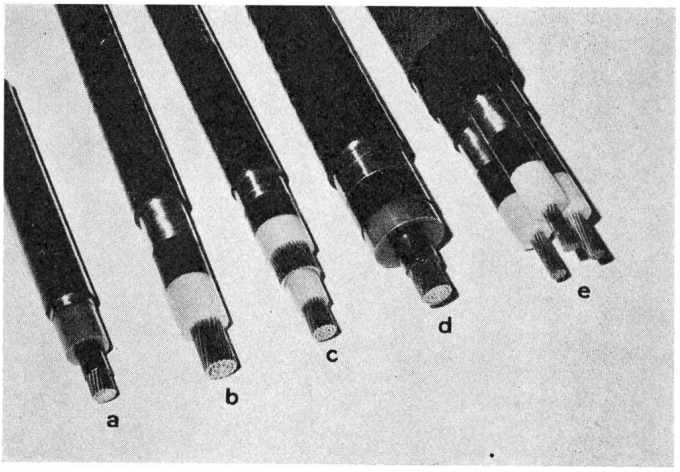


Fig. 10
Polyäthylenkabel
a 20 kV TT 1×120; *b* 16 kV TT 1×240; *c* konzentrisches 2-Leiter-Kabel 6 kV 2×150; *d* 60 kV TT 1×240; *e* 20 kV TT 3×95

Das mit gewöhnlicher Masse imprägnierte Papierbleikabel, das bis zu Spannungen von 60 kV verwendet wird, hat in Gefällstrecken den Nachteil des Abwanderns der Imprägniermasse in die tiefergelegenen Partien des Kabels. Das Polyäthylenkabel kennt diese Schwierigkeit nicht, da das Dielektrikum fest ist (Fig. 10).

Der in üblicher Weise verseilte Leiter ist von einer Schicht halbleitenden Materials umgeben, deren Aufgabe es ist, das elektrische Feld in der Nähe des Leiters zu glätten, d. h. tangentiale Feldkomponenten möglichst zum Verschwinden zu bringen. Über den Halbleiter wird das Dielektrikum gespritzt. Dieses kann in einer einzigen oder in mehreren Schichten aufgetragen werden, je nach Isolationsdicke und je nach Leistungsfähigkeit der Extrudieranlage. Zur Abgrenzung des

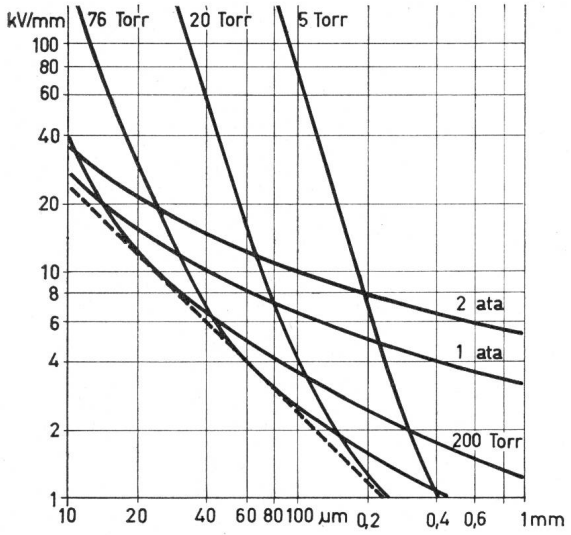


Fig. 11
Gesetz von Paschen
Glimmeinsatz in Porennachbildungen, in Abhängigkeit von der Feldstärke und vom Gasdruck (nach *H. F. Kreuger*)

Feldes nach aussen wird ein Schirm, meistens aus Kupferbändern, aufgebracht, wobei auch hier eine halbleitende Zwischenschicht nötig ist. Darüber folgt ein Schutzmantel aus Polyäthylen oder PVC.

Zur Herstellung des gewöhnlichen Einleiter-Polyäthylenkabels verwendet man in der Regel zwei hintereinandergeschaltete Extruder, die entweder mit zwei sich aufeinanderfolgenden getrennten Spritzköpfen oder mit einem Doppelspritzkopf arbeiten. Der erste Extruder umgibt den vorgewärmten Leiter mit der Halbleiterschicht und sogleich anschliessend wird im zweiten Extruder die Isolation aufgetragen. Die noch heisse Polyäthylenisolation muss nun sorgfältig, nach einem genau vorgegebenen Temperaturablauf, abgekühlt werden. Der äussere Halbleiter wird in einem getrennten Arbeitsgang aufgespritzt oder gleichzeitig mit der Kupferschirmung aufgewickelt.

Die Fabrikation eines Polyäthylenkabels scheint auf den ersten Blick viel einfacher zu sein als die eines Papierbleikabels. Auch sind die Eigenschaften des Polyäthylens im Vergleich zu jenen des masseimprägnierten Papierdielektrikums vielversprechend. Die Kabelindustrie erblickte im Polyäthylen eine echte Chance Hochspannungskabel herzustellen, welche die angeborenen Schwächen des Papierbleikabels überwinden würden. Umso grösser war die Ernüchterung, als sich im Zuge der Erfahrungen herausstellte, dass die nahezu idealen Eigenschaften des Polyäthylens bei der industriellen Fertigung von Kabeln nur zum Teil ausgenützt werden können, da infolge des Fabrikationsprozesses Erscheinungen auftreten, die bei den Papierbleikabeln eine nicht so ausschlaggebende Rolle spielen wie beim Polyäthylenkabel.

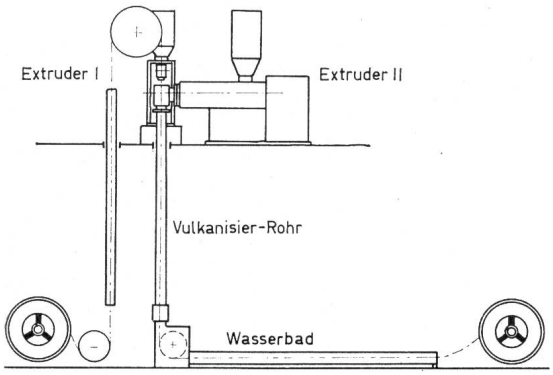


Fig. 12
CV-Vertikalanlage

Bei der Verarbeitung von Polyäthylen im Extruder ist das geschmolzene Material einem beträchtlichen Druck in der Grössenordnung von 100 atü und mehr ausgesetzt. Die bei diesem Druck vom Polyäthylen aufgenommenen Gase und die eventuell noch vorhandene Restfeuchtigkeit kommen nach dem Durchgang durch die Spritzdüse, wenn das Material vom Druck entlastet wird, wieder als kleine und kleinste Poren zum Vorschein. Als Vergleich diene der Vorgang, der sich beim Öffnen einer Mineralwasserflasche abspielt.

Die Mikroporenbildung kann nur dann völlig vermieden werden, wenn die im Polyäthylen gelösten Gase bzw. Feuchtigkeitsreste vollständig entfernt werden oder wenn das extrudierte Polyäthylen unter einem hohen, den Verhältnissen im Extruder entsprechenden Druck abgekühlt wird. Beide Bedingungen können im industriellen Fabrikationsprozess nur unvollkommen erreicht werden. Mit einer Porenbildung ist daher immer zu rechnen. Die Grössenverteilung der Poren ist mehr oder weniger zufällig und dürfte sich nach einem stochastischen Verteilungsgesetz richten.

Die in einem Dielektrikum vorhandenen, mit Gas gefüllten Hohlräume neigen zu Teilentladungen. Diese Neigung wird verstärkt durch die Erhöhung der Feldstärke im umgekehrten Verhältnis der relativen Dielektrizitätskonstante des festen Isolators zur relativen Dielektrizitätskonstante des ein-

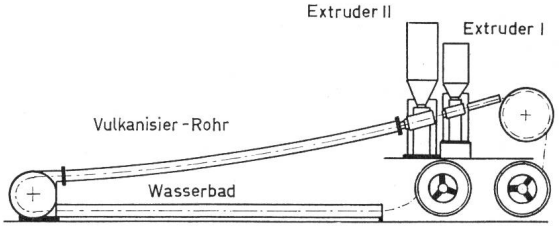


Fig. 13
CV-Schräganlage

geschlossenen Gases. Im Falle des Polyäthylenkabels steigt die Feldstärke in den Poren auf ungefähr das 2,3fache ihres Wertes im homogenen Dielektrikum an. Wenn die durch das Gesetz von *Paschen* umschriebenen Bedingungen erfüllt sind, tritt in den Poren Teilentladung auf (Fig. 11).

Die Erfahrung hat gezeigt, dass das Polyäthylen trotz aller guten Eigenschaften doch einen beachtlichen Nachteil aufweist: Seine Beständigkeit gegen Teilentladungen ist schlecht. Beim Auftreffen genügend stark beschleunigter Elektronen bzw. Ionen erleiden die Isolierstoffe verschiedene chemische Veränderungen, die den Reaktionen bei radioaktiver Bestrahlung entsprechen, nämlich:

a) Entwicklung von Gas;
b) Kettenbrüche;
c) Vernetzungsreaktionen.

Zahlreiche Forschungsarbeiten weisen darauf hin, dass ein Abbau des Polyäthylens stattfindet, sobald eine Teilentladung von genügender Stärke eintritt.

Welchen Einfluss die bei einer Teilentladung im Polyäthylen auftretenden Raumladungen auf den Durchschlagsmechanismus im Dielektrikum ausüben, ist noch nicht genügend abgeklärt.

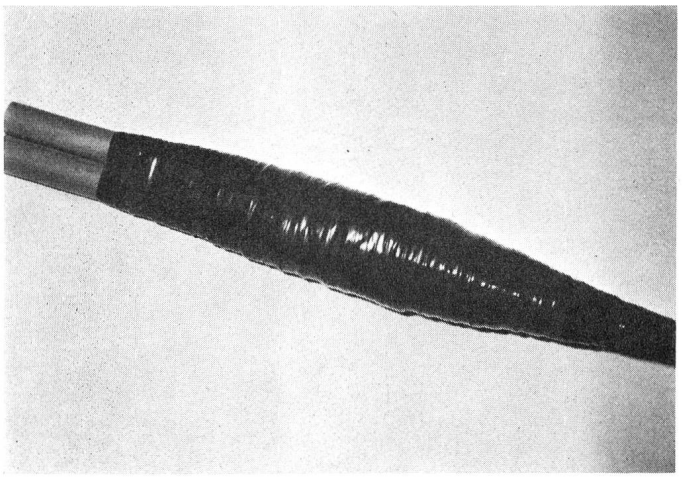


Fig. 14
PE-Wickelmuffe

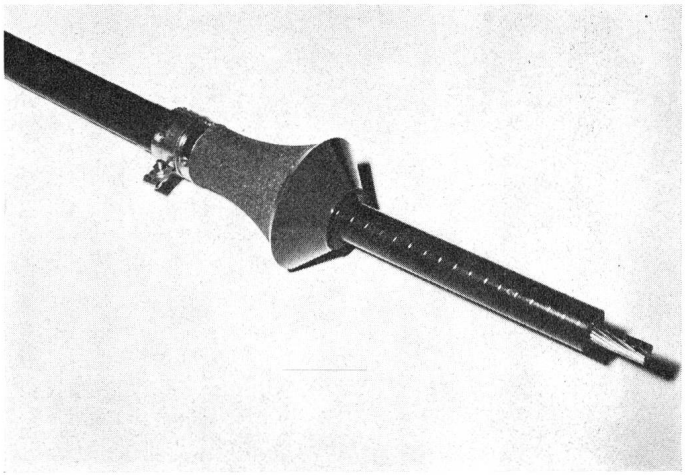


Fig. 15
Stress-Cone 20 kV

Das zentrale Problem und die grosse Sorge bei der Herstellung von Polyäthylenkabeln besteht somit in den folgenden vier Forderungen:

1. Einwandfreie Verbindung zwischen Halbleiter und Dielektrikum;
2. Beschränkung der Porenbildung auf ein Minimum;
3. Reduktion der Glimmempfindlichkeit des Polyäthylens;
4. Lokalisierung vorhandener Poren und Einschlüsse.

4.1 Vernetztes Polyäthylen

Da das Polyäthylen ein *thermoplastisches* Material mit einem Schmelzbereich von 110...115 °C ist, sollte der Leiter die Betriebstemperatur von 50...85 °C bzw. die Kurzschlusstemperatur von 150 °C nicht überschreiten. Bei höherer Erwärmung besteht die Gefahr, dass sich der Leiter aus dem Zentrum des Kabels heraus verlagert.

Durch das Beimischen von chemischen Vernetzungsmitteln (Peroxyde) kann das Polyäthylen nun derart modifiziert werden, dass es sich durch eine thermische Nachbehandlung vulkanisieren lässt. Im vernetzten bzw. vulkanisierten Zustand verlässt das Polyäthylen z. T. seine thermoplastischen Eigenschaften, wodurch es wärmebeständiger wird. Kabel aus vernetztem Polyäthylen können bei einer Leitertemperatur von 90 °C betrieben werden. Es sind Kurzschlusstemperaturen bis zu 250 °C zulässig. Da das vulkanisierte Polyäthylen mit höher werdendem Vernetzungsgrad zunehmend amorph wird, verbessern sich die auf der Kristallinität des Polyäthylens beruhenden nachteiligen Eigenschaften (z. B. Spannungsrisskorrosion).

Ein Nachteil des Vernetzungskatalysators besteht in der Herabsetzung der elektrischen Beanspruchbarkeit des Dielektrikums.

Um den Vernetzungsvorgang in der Praxis durchführen zu können, wird der umspritzte Leiter kontinuierlich in Sattdampf von 16...25 atü Druck aufgeheizt und nachher abgekühlt. Bei den hohen Temperaturen in der Gegend von 200...220 °C, die zum Anstossen der Vernetzungsreaktion notwendig sind, hat das Polyäthylen eine so geringe mechanische Festigkeit, dass die Kabelader nirgends berührt werden darf. Die Forderung des berührungslosen Durchlaufes durch das Vulkanisierrohr führte zu den zwei verschiedenen Typen von CV-Anlagen (CV = continuous vulcanising), von denen die eine vertikal, die andere in Form einer Kettenlinie (catenary type) ausgelegt ist (Fig. 12 und 13).

Die vertikale Bauweise ist speziell für schwere Kabel mit grossen Durchmessern geeignet. Wegen der beschränkten Länge des Druckrohres von ca. 40 m Länge ist die Arbeitsgeschwindigkeit langsamer als bei der Schräganlage, die in der Regel Druckrohrlängen von gegen 70 m aufweist.

4.2 Zubehör für Hochspannungskunststoffkabel

Die Muffen und Endverschlüsse für Kunststoffkabel bieten im Hochspannungsbereich keine Vorteile gegenüber den Papierbleikabelmuffen. Das stufenweise Absetzen der Polyäthylenisolation bei einer Verbindungsmuffe und das Aufwickeln und Tränken der Kunststoffbänder erfordern eine mindestens ebenso grosse Sorgfalt (Fig. 14).

Um die komplizierte Wickelarbeit bei Endverschlüssen zu umgehen, können Stress-Cones verwendet werden (Fig. 15). Bei der Montage ist besonders auf die Vermeidung von Lufteinschlüssen in der Trennfuge zu achten.

5. Schlussbetrachtungen

Das Kunststoffkabel hat sich im Niederspannungsbereich einen festen Platz erobert. Es weist gegenüber dem Papierbleikabel verschiedene Vorteile auf, wie z. B. geringeres Gewicht, höhere Flexibilität, Wegfall vergossener Endverschlüsse bei Innenraummontage usw. Wenn das Papierbleikabel trotzdem noch einen Teil des Feldes behaupten kann, so nicht zuletzt wegen der idealen Erdungsmöglichkeit, die durch den bejuteten Bleimantel gegeben ist. Tritt anstelle der Jute ein PVC-Mantel, so fällt dieser Vorteil dahin. In diesem Fall können die Gussmuffen einen Teil der Erdungsfunktion übernehmen.

Im Bereich der Hochspannung liegen die Verhältnisse für die Kunststoffkabel nicht so eindeutig, obwohl grosse Anstrengungen unternommen werden, dem Polyäthylenkabel zum Durchbruch zu verhelfen. Im Bereich unter 10 kV bzw. bei einer elektrischen Beanspruchung, die nicht über 3 kV/mm liegt, kann das Polyäthylenkabel ohne Bedenken eingesetzt werden. Ob bei höheren Spannungen die unbestreitbaren Vorteile des Polyäthylenkabels die in Kauf zu nehmenden Nachteile überwiegen werden, kann beim heutigen Stand der Fabrikationstechnik und der Betriebserfahrungen noch nicht mit genügender Sicherheit nachgewiesen werden.

Ein wichtiger Punkt, der vorläufig noch zugunsten des Papierbleikabels spricht, wird in der Diskussion oft vernach-

lässigt. Bei Erdschlüssen in einem Hochspannungsnetz fliessen bis 80 % des Kurzschlußstromes über den Bleimantel zurück. Bei den heute recht erheblichen Kurzschlussleistungen werden durch die gute Leitfähigkeit des Bleimantels gefährliche Potentialdifferenzen und Schrittspannungen stark vermindert.

Der Längswiderstand der metallischen Aussenschicht eines Kunststoffkabels ist, verglichen mit dem Bleimantel, 2...3mal grösser. Da der Bleimantel zudem über eine weit grössere Wärmekapazität verfügt, ist er besonders bei länger dauernden Kurzschlußströmen überlegen.

Die technische Diskussion über die artgemässe Eingliederung des Polyäthylenkabels in die Familie der Hochspannungskabel ist in vollem Gange. Das Kernproblem beim Einsatz von Kunststoffkabeln im Hochspannungsgebiet liegt jedoch weniger in der objektiven Abwägung der technischen Eigenschaften als in der Philosophie, die der Herstellung und der Verwendung von Hochspannungskabeln zugrunde gelegt werden soll.

Wenn eingangs auf die Revolutionen durch die Kerntechnik, die Elektronik und Kunststoffchemie hingewiesen wurde, so muss noch auf einen Umstand aufmerksam gemacht werden, der gerade für die Kabeltechnik wichtig ist. Dass die Kernphysik und die Elektronik die Denk- und Lebensweise des Menschen grundlegend geändert haben, ist unbestritten. Die Tatsache, dass aber auch die Kunststoffchemie einen bedeutenden Anteil an einer tiefgreifenden Änderung der menschlichen Verhaltensweise hat, ist weniger geläufig.

Vor allem die Kunststoffprodukte haben eine neue Philosophie des raschen Verbrauches und der Kurzlebigkeit aufkommen lassen. Der heutige Mensch wird systematisch zum Konsument erzogen. Ganze Industriezweige haben sich auf die Erzeugung kurzlebiger Güter spezialisiert. Verbrauchen und Wegwerfen ist die Parole!

Auch der Kabelfabrikant steht mitten in dieser Entwicklung. Wenn es früher ein ungeschriebenes Gesetz war, dass ein Kabel, bei der vorgesehenen Beanspruchung, keinen Tod haben durfte, so beginnt heute unter dem Einfluss der Kunststoffdenkweise die Lebensdauerkurve eine Rolle zu spielen. Da die Lebensdauer ein statistischer Mittelwert ist, der aus Zeitraffer-Versuchen ermittelt wird, muss man unterscheiden zwischen der mittleren bzw. wahrscheinlichen Lebensdauer und der sicheren Lebensdauer. Die Festlegung der Lebensdauergrenze ist eine Ermessensfrage.

Das sich Herantasten an die Grenze des gerade noch Erlaubten mag recht und gut sein für einen Massenverbrauchsartikel. Ein Hochspannungskabel ist aber ein Investitionsgut, dem das Bestreben nach maximaler Betriebssicherheit zugrunde liegen muss. Maximale Betriebssicherheit ist aber beim Kabel gleichbleibend mit maximaler Lebenserwartung. Wenn die Kunststoffe dem Kabelhersteller helfen, sichere, bessere und dazu noch preisgünstigere Kabel zu erzeugen, so sind ihrer Verwendung im Hochspannungskabelgebiet keine Grenzen gesetzt. Wenn jedoch der Einsatz von Kunststoffen auf Kosten der Lebensdauer geht, dann dürfte man wohl kaum von einem echten technischen Fortschritt sprechen.

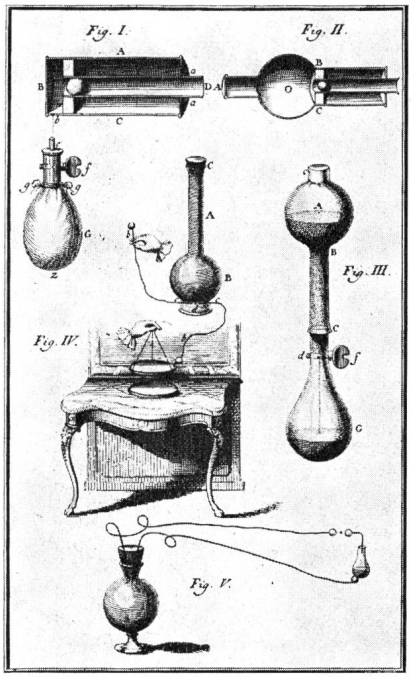
Um diese Klarheit zu erlangen, muss noch viel und intensiv gearbeitet werden.

Adresse des Autors:
B. Capol, dipl. Ingenieur, technischer Direktor der Kabelwerke Brugg AG, 5200 Brugg.

EIN BLICK ZURÜCK

Voltasche Pistole

(in Serie 2359-2362)



Deutsches Museum, München

Die erste elektrische Zündung eines Gas-Luft-Gemisches, ohne die unsere moderne Verbrennungsmotorentechnik nicht denkbar ist, wurde 1778 von dem italienischen Physiker *Alessandro Volta* ausgeführt. Damals war nur die statische Elektrizität bekannt, die ja ebenso wie die spätere galvanische Elektrizität durch *Volta* um manche Erkenntnis bereichert wurde. Als Quelle der für den elektrischen Funken benötigten Elektrizität diente *Volta* für seine elektrische Pistole ein Elektrophor (im Bild auf dem Tisch), der um die Mitte des 18. Jahrhunderts erfunden und von Volta verbessert wurde. Der Elektrophor ist heute wohl nur noch wenigen bekannt. Im Grunde genommen ist er ein Kondensator. Als Dielektrikum dient ein flacher Kuchen aus einem Gemisch von Harz und Wachs. Dieser sitzt auf dem unteren geerdeten Belag. Der obere Belag kann mit einem isolierten Griff abgehoben werden. Der Kuchen wird gerieben, dann kann man mit dem oberen Belag Elektrizität etwa auf Leidener Flaschen übertragen und diese allmählich aufladen oder irgendwelche Experimente durchführen.

Einen solchen Elektrophor benutzte *Volta* für den Zündfunken seiner Pistole. Die Pistole selbst war zuerst eine kleine Glasflasche mit langem Hals, wie man sie auch heute noch in chemischen Laboratorien als Glaskolben benutzt. Im Glas waren zwei Drähte eingeschmolzen, deren Enden im Innern der Flasche als Funkenstrecke einander gegenüberstanden. Die äusseren Enden dienten als Zuleitung. Die Flasche wurde mit einem Gemisch aus Sumpfgas und Luft gefüllt und verkorkt. Durch den elektrischen Funken wurde das Gemisch entzündet, und der Kork flog mit lautem Knall heraus. Es kam natürlich häufig vor, dass die Flasche zersprang. Man ging daher sehr rasch auf solidere Bauweisen über. Später verwendete man hiefür oft eine kleine Kanone aus Bronze, in deren Rohr die beiden Drähte isoliert eingeführt wurden. *A. Wissner*