Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 4

Artikel: Symposium Elektrische Isolationstechnik 1972 : am 16./17. November 1972 in Zürich

Autor: Richard, R. / Held, F. / Michel, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915515

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: 26.07.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Symposium Elektrische Isolationstechnik 1972

am 16./17. November 1972 in Zürich

Allocution

Par M. *R. Richard,* président de l'ASE

Le comité de l'Association Suisse des Electriciens, sa commission des programmes ainsi que tous les collaborateurs ayant œuvré à la préparation des journées sur «la technique de l'isolation électrique» se joignent à moi pour vous souhaiter une très cordiale bienvenue à Zurich-Oerlikon et à notre manifestation.

Au nom du comité de l'ASE, je salue particulièrement ici:

- nos membres d'honneur
- les représentants de nos écoles techniques
- nos hôtes étrangers

qui, par leur présence, témoignent de leur intérêt au problème traité, de leur attachement à nos manifestations et contribuent à en assurer le succès et à en faire un moment important dans la vie technique de notre pays et de notre association.

J'ajouterai encore notre salut et nos remerciements aux représentants de la presse qui veulent bien assister à notre rencontre et donner un reflet des débats, faisant ainsi mieux connaître notre association en tant que société technique et scientifique embrassant tous les domaines de l'électricité.

363 participants de 12 pays différents se retrouvent ce matin pour émettre ou entendre les opinions, remarques et questions relatives à 776 pages de rapports, réparties en 6 groupes, englobant les matières, les propriétés, les utilisations, les méthodes d'essais des isolants. Cela montre l'ampleur du problème, l'intérêt qu'il soulève, sa complexité aussi. Remarquons, en passant, et par comparaison, qu'au début du siècle, quelques pages suffisaient à faire le tour du problème de l'isolation.

Les quelques chiffres évoqués démontrent l'utilité de ce symposium et sont une raison de satsifaction pour ceux qui en ont eu l'idée.

Lors de journées comme celles-ci, contribuer à la formation post-scolaire, permettre l'information réciproque de nos membres, favoriser les contacts humains entre représentants d'une même spécialité sont placés au premier rang des préoccupations et permettent ainsi de nous rapprocher des buts que nous nous sommes fixés, ce que le comité de l'ASE constate avec plaisir.

La force, le magnétisme, la conductibilité sont trois concepts physiques sur lesquels repose, en gros, l'électrotechnique. Notre symposium détache un aspect particulier de la conductibilité électrique: l'isolation.

La matière conductrice, la matière magnétique et la matière isolante sont les trois constituants essentiels de toute machine électrique. Autrement dit, l'isolation ne peut être ni ignorée, ni oubliée, ni même négligée car, sans elle, pas d'appareil ou de machine électrique.

Les matières bonnes conductrices de l'électricité économiquement utilisables sont en nombre restreint. Leurs caractéristiques sont bien connues depuis longtemps. Elles ont atteint un degré de préparation élevé. Ainsi, il est difficile d'accroître encore la pureté d'un cuivre électrolytique et cela n'ouvre pas de grandes perspectives. Il en est de même pour les matières ferromagnétiques. Celles qui sont utilisées en électrotechnique ont atteint un haut degré de perfection et leur amélioration semble désormais devoir rester modeste.

Les améliorations dans le domaine de la construction en revanche, pourraient peut-être permettre l'emploi de matériaux nouveaux. Ainsi, un meilleur refroidissement d'une machine permet d'abaisser sa température de fonctionnement, ce qui est susceptible d'abaisser le prix de revient, d'augmenter la durée de vie, d'améliorer le rendement, voire d'autoriser le choix d'un isolant ayant une température limite d'utilisation inférieure.

Tant en matière de transport du courant électrique qu'en matière de magnétisme, les améliorations possibles ne peuvent être réalisées qu'au sein même d'une gamme limitée de métaux. Le développement est quasi unidirectionnel.

En matière d'isolation, les améliorations peuvent intervenir au sein de la matière elle-même, dans la création et dans le choix de matières nouvelles, dans l'utilisation des matières par combinaison, par superposition de matières isolantes, c'est-à-dire par l'introduction de systèmes d'isolation. Le dé-

veloppement, dans le domaine de l'isolation, est en quelque sorte multidirectionnel.

Longtemps, on a admis que la détérioration d'un isolant ne commençait que lorsqu'une certaine température était dépassée. Or la complexité sans cesse croissante des matériels électriques (pensez à l'électronique) pose des exigences de fiabilité toujours plus élevées à leurs éléments, à l'isolation en particulier. D'importantes recherches sont conduites afin de déterminer la fiabilité des isolants. On a constaté que les isolants sont sensibles tant aux influences extérieures: humidité, température, vibrations, rayonnements, pollutions, qu'aux influences intérieures: stabilité de la matière, conductibilité thermique ou électrique ou encore à la combinaison de ces facteurs.

D'autre part, l'introduction des systèmes d'isolation a ouvert de nouveaux horizons aux spécialistes: les caractéristiques individuelles de chaque matière ont pu être combinées pour accroître les qualités globales de l'ensemble.

En bref, on peut affirmer que le développement des machines et appareils électriques dépend pour une part importante du développement de la technique de l'isolation.

Cette dernière évolue rapidement et aucun signe ne nous laisse entrevoir l'approche de quelque point de saturation. L'évolution se poursuit et devrait permettre aux constructeurs de réaliser des machines et appareils toujours plus sûrs et économiques.

Faire le point au cours d'une courte halte est donc indiqué.

C'est, pour nous, une grande satisfaction d'avoir pu mettre sur pied ces deux journées et, grâce à elles, permettre à près de 400 personnes d'avoir un échange d'idées aussi large que possible, réalisant ainsi un événement marquant dans le domaine qui nous occupe aujourd'hui.

Permettez-moi encore d'adresser mes remerciements aux auteurs des rapports, à tous ceux qui, par un complément d'informations ou quelques remarques pertinentes, voudront animer le débat, ainsi qu'aux collaborateurs de l'ASE qui ont mis sur pied ce symposium.

Enfin nous adressons nos vœux de prompte guérison à M. *Goldstein* qui, malade, n'a pu prendre la présidence de ces journées, contrairement à ce qui est prévu au programme. Il est remplacé, un peu au pied levé, par M. *Lutz,* ingénieur, Vice-Directeur au sein du département Transformateurs de BBC-Oerlikon, que nous remercions sincèrement de s'être ainsi mis à disposition.

Par ces quelques paroles, je déclare ouvert le «symposium 1972 de l'Association Suisse des Electriciens sur la technique de l'isolation électrique».

Einführungsreferat zu den Themengruppen A- bis C-1. Teil

Die Utopie des universellen Isolierstoffes

Von *F. Held*

Im Programm des Symposiums über Elektrische Isolationstechnik wird nach sog. Isolierstoffsystemen unterteilt. Isolierstoffsysteme bedeuten die Anwendung von Isolierstoffen und deren Kombinationen für einen definierten Zweck, also etwa Isolationssysteme für Hochspannungskabel, für Rotoren, Statoren oder für bestimmte elektrische Geräte.

Die Isolationssysteme beinhalten neben dem Stoff und den Applikationsmöglichkeiten die betrieblichen Bedingungen, insbesondere die gegenseitige Beeinflussung der Stoffe, die im System enthalten sind.

Die Kombination von Isolationssystemen führt zum Begriff der Isolation als Ganzes, z.B. die Isolation eines Transformators oder eines Turbogenerators.

Vom Isolierstoff über das Isolationssystem bis zur Isolation führt ein kontinuierlicher Weg, wobei die Parteien und die technischen Kommissionen, die die einzelnen Sparten verantwortlich betreuen, verschieden sind. Die Situation ist in Fig. 1 schematisch dargestellt. In der linken Kolonne sind die direkt interessierten Wirtschaftskreise angeführt; in der Kolonne rechts Beispiele von Isolierstoffen, Isolationssysteme (I. S.) und Isolationen mit den dazugehörenden technischen Kommissionen.

Die Auswahl der Isolierstoffe für bestimmte Isolationssysteme zur Herstellung einer gegebenen Isolation ist somit nur dann optimal, wenn alle Einflüsse von der Isolation und von den Systemen auf die verwendeten Isolierstoffe durch Versuche abgeklärt werden oder als Erfahrungswerte vorhanden sind. Als Beispiele könnten etwa die Einflüsse des Isolationssystems des aktiven Teils eines Transformators auf das Alterungsverhalten des Isolieröles erwähnt werden.

Am Anfang stehen die Isolierstoffe und die Isolierstoffkombinationen mit ihren spezifischen Eigenschaften sowie deren Applikationsmöglichkeiten. Bei den gasförmigen und flüssigen Isolierstoffen, wo die Applikation durch den Aggregatzustand stark eingeschränkt ist – Einschränkung bedeutet hier nicht etwa Problemlosigkeit –, kann die Zahl der heute verwendeten Stoffe noch gut überblickt werden. Obschon die vermehrte Anwendung elektronegativer Gase wie etwa

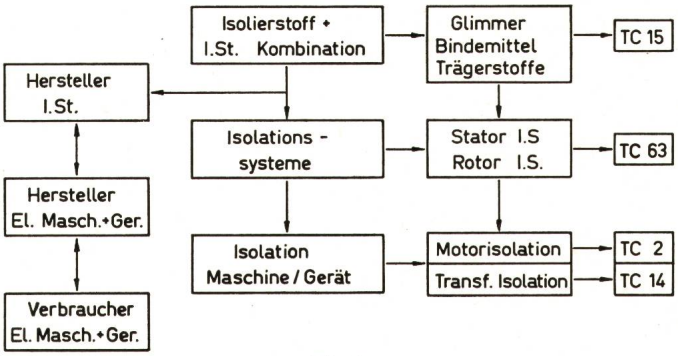


Fig. 1
Isolationstechnik
I.St. Isolierstoffe
I.S. Isolationssysteme

Schwefelhexaflorid im Hochspannungsbereich sowie die Verwendung chlorierter Diphenyle (Ascarels) im Kondensatorenbau bemerkenswerte Fortschritte darstellen, verläuft die Entwicklung durchaus normal.

Registriert man die Zahl der festen Isolierstoffe und ihrer Kombinationen, angefangen bei den keramischen Isolierstoffen, wobei Glimmer und Asbest hier miteingeschlossen sind,

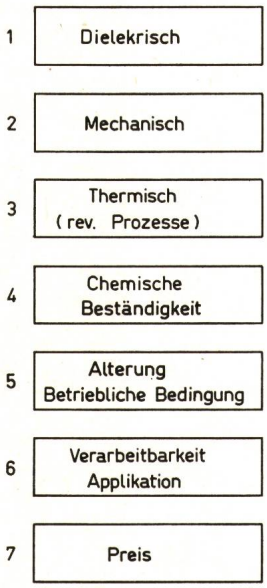


Fig. 2
Eigenschaftsgruppen

bis zu den organischen makromolekularen Werkstoffen mit all ihren Erscheinungsformen und ihren Applikationsmöglichkeiten, so muss sich vor allem der Verbraucher die Frage stellen, ob nicht weniger mehr wäre. Es ist für den Einzelnen kaum mehr möglich, auf allen Gebieten der festen Isolierstoffe, sowohl von der Material- wie von der Applikationsseite her, das gesamte Gebiet zu beherrschen.

Ich möchte versuchen, einige Gründe darzulegen, warum die Zahl der Isolierstoffe und der Isolationssysteme in den letzten 30 Jahren derart stark angestiegen ist und warum wir von einem idealen oder vielleicht besser noch universellen Isolierstoff weit entfernt sind. Ich möchte mit anderen Worten die Ursachen aufdecken, warum bis heute der Wettkampf der Systeme auf dem Wege zum Ideal noch keinen Sieger kennt.

Wenn wir uns einen idealen Isolierstoff ausdenken wollen, müssen wir kurz die wichtigsten generellen Eigenschaften erwähnen. Sie sind vereinfacht in Fig. 2 als sog. Eigenschaftsgruppen zusammengefasst.

Bereits bei dieser sehr groben Betrachtungsweise stellen sich Schwierigkeiten ein, weil je nach Verwendungszweck die Gewichtung der einzelnen Eigenschaftsgruppen eine ganz verschiedene ist und allein aus diesem Grunde eine erste Spezialisierung einsetzt.

Ich möchte für die folgende Betrachtung die Eigenschaftsgruppen 1, 2 und 6 etwas differenzierter behandeln, wobei die Annahme gemacht wird, dass die Eigenschaftsgruppen 3, 4 und 5 mehr oder weniger optimale Werte aufweisen sollen. Die Eigenschaftsgruppe 7 soll vorderhand ausgeklammert werden.

Für die beiden Eigenschaftsgruppen 1 und 2 lassen sich für ein ideales Dielektrikum je zwei Grenzfälle unterscheiden, die zu grundsätzlich verschiedenen Anwendungsgebieten führen. Sie sind schematisch in Fig. 3 festgehalten.

1. Dielektrisch

- Hoher Isolations-Widerstand (Vol./Oberfläche)
- Hohe Durchschlagsfestigkeit
- Hohe Kriechstromfestigkeit
- Geringer dielektrischer Verlustwinkel
  alles möglichst unabhängig von der Temperatur.
  Bei der rel. Dielektrizitätskonstanten sind grundsätzlich zwei Fälle möglich:
- Rel. Dielektrizitätskonstante soll hoch sein (Kondensatorbau und Ferro-Elektrika)
- soll klein sein (HF/Stark- und Schwachstrom-Technik).
  Die Temperaturabhängigkeit der rel. Dielektrizitätskonstanten soll in den überwiegenden Fällen klein sein. Es gibt allerdings auch hier Ausnahmen.

2. Mechanisch

- Hohe mechanische Festigkeit (Druck-, Zug-, Biege-Festigkeit), Dauerstandfestigkeit, alles möglichst unabhängig von der Temperatur.
  Beim E-Modul sind ebenfalls zwei Fälle möglich:
- Hoher E-Modul ergibt harte (steife), zähe Isolierstoffe, geeignet für Konstruktions-Werkstoffe.
- Niedriger E-Modul ergibt weiche (flexible), zähe Isolierstoffe, geeignet zur Isolation flexibler Leiter (Kabel-Isolation).

Zwischen den beiden skizzierten Grenzfällen der Eigenschaftsgruppen 1 und 2 sind die Übergänge fliessend, d.h., wir kennen feste Isolierstoffe beziehungsweise Kombinationen mit relativen Dielektrizitätskonstanten von 1,2...10 000 und Isolierstoffe bzw. Kombinationen mit E-Modul von 5 kp/mm² (Weich-PVC für Kabelisolationen) bis 5000 kp/mm² (glasfaserverstärkte Stoffe mit EP-Harz als Bindemittel).

Die Palette ist also bereits durch zwei Modifikationsparameter, nämlich:

- relative Dielektrizitätskonstante und
- E-Modul

verwirrend gross geworden.

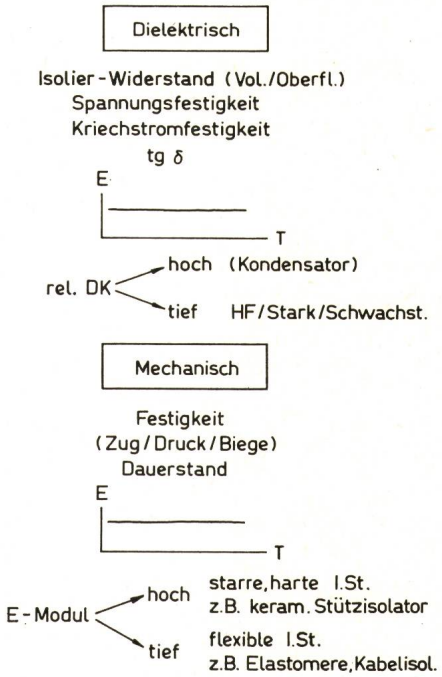


Fig. 3
E dielektrisch-mechanische Eigenschaften
T Temperatur

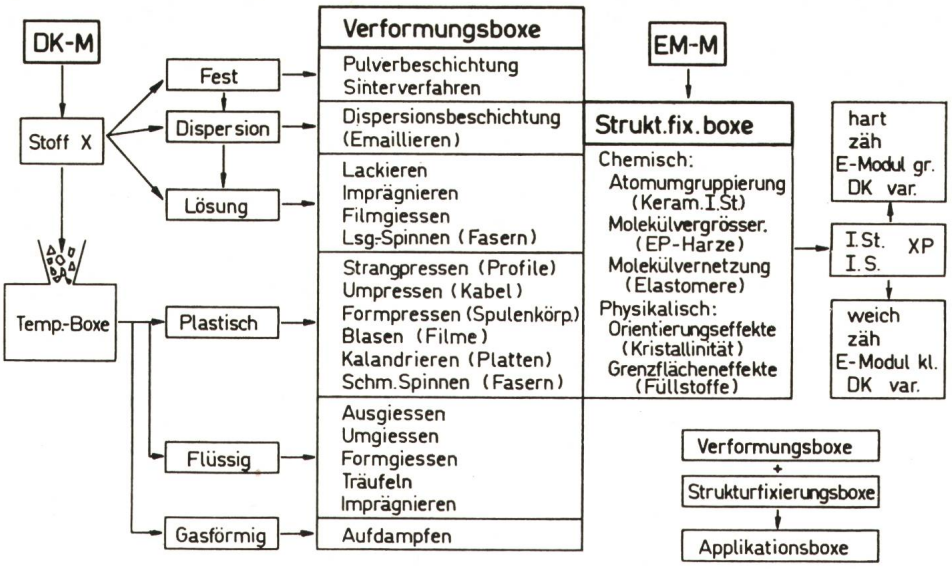


Fig. 4
I.St. Isolierstoffe
I.S. Isolationssysteme

Man kann aber trotz diesem etwas entmutigenden Bild versuchen, einen Universal-Isolierstoff zu charakterisieren, etwa mit Hilfe einer stark vereinfachten morphologischen Betrachtungsweise (morphologischer Kasten). Hierzu ist es nötig, dass wir die Eigenschaftsgruppe 6 «Verarbeitung und Applikation» mit in das Gedankenexperiment einbeziehen.

In Fig. 4 ist, bewusst unvollständig, ein Schema aufgezeichnet, das erlaubt, bestimmte Probleme der Isolierstofftechnik zu überdenken und von verschiedenen Standpunkten aus zu diskutieren. Wir gehen aus von einem Isolierstoff X, der in fester Form angeliefert wird und über vier Zustände – fest, plastisch, flüssig, gasförmig – appliziert werden kann. Zur Erreichung der letztgenannten Aggregatzustände müssen wir Energie aufbringen in Form von Wärme, d.h., wir führen den Stoff durch eine sog. Temperaturboxe. In einer zweiten Stufe soll der Isolierstoff in eine für die Applikation optimale Form gebracht werden; wir nennen dieses Instrument «Verformungsboxe». Und schliesslich soll der Stoff in seiner Struktur fixiert werden; wir nennen diese Einrichtung «Strukturfixierungsboxe».

Wir können nun die einzelnen Boxen mit uns heute bekannten Funktionen auffüllen und bekommen auf diese Weise ein Wegnetz, auf dem sich der Stoff X irgendwie bewegen kann, um schliesslich als Isolierstoff oder Isolationssystem XP mit ganz bestimmten Eigenschaften dem Verbraucher zur Verfügung zu stehen.

Die in unserer ersten Betrachtungsweise erwähnte Differenzierung bezüglich rel. Dielektrizitätskonstanten und E-Modul können wir ebenfalls in dieses Schema einführen. So müsste der DK-Moderator bereits am Anfang dem Stoff beigegeben werden (Stoffparameter), während der E-Modul-Moderator in jedem Fall der Strukturfixierungsboxe einzuführen ist, um die Beweglichkeit der Bausteine nach der chemischen Reaktion für das Gebiet der Gebrauchstemperatur (starr oder flexibel) zu fixieren (Strukturparameter).

Das Bild der Modifikatoren erscheint auf den ersten Blick etwas abstrakt. Es gibt aber doch Beispiele, wo durch Zugabe bestimmter Substanzen derartige Veränderungen möglich sind. Ich denke da vor allem an die keramischen Werkstoffe auf Basis der Titanoxyde, wo durch Wahl der Art und Menge der zweiwertigen Erd-Alkali-Metalle die rel. Dielektrizitätskonstante in sehr weiten Grenzen geändert werden kann. Ich denke aber auch an die Gruppe der Elastomeren, wo durch den Vernetzungsgrad der E-Modul ebenfalls in weiten Grenzen variabel ist, so etwa vom Weichkautschuk zum Hartkautschuk oder Ebonit.

Wenn wir unser Gedankenexperiment auf seine Tauglichkeit prüfen, so erkennen wir, dass es tatsächlich zahlreiche Stoffe gibt, die sich nach dem skizzierten Schema manipulieren lassen. Der Stoff sei beispielweise ein Polyäthylengranulat (PE). Fest, als Pulver, als Dispersion und in Lösung sind die Applikationsverfahren bekannt (z. B. Schaum-Polyäthylen aus Lösung als Isolation für Einzelleiter in der Telephonie).

Bei Temperaturen zwischen 130 und 180 °C können wir für PE die meisten der aufgezeichneten Verformungsprozesse ausführen; ausgenommen sind die eigentlichen Giessprozesse. Die verformten Teile können in der Strukturfixierungsboxe in ihrem E-Modul variiert werden, etwa durch chemische Vernetzung mit Peroxyden oder durch Strahlungsvernetzung mit Gamma- oder Elektronenstrahlen. Ähnlich verhalten sich andere Thermoplasten, Duroplasten und Elastomere, und dies ist wohl einer der wichtigsten Gründe, warum die Kunststoffe in der Elektrotechnik die dominierende Rolle spielen.

Doch schon beim bekannten Teflon werden wir eingeengt, und nur noch wenige der in der Verformungsboxe angeführten Prozesse sind durchführbar, nämlich Pulver-Sintertechnik, Pulver-Beschichtungstechnik, Dispersionstechnik.

Wenn wir Quarzpulver als Stoff X einspeisen, sind praktisch nur drei Wege durch die Verformungsboxe offen: Schmelzspinnverfahren, Blas- und Pressformverfahren und das Aufdampfverfahren. Das Schmelzspinnverfahren führt zu den Endprodukten Quarzfaser, Quarzvliese, Quarzgewebe, das Blas- und Pressformverfahren zu Formkörpern aus amorphem Quarz. Eine geringe E-Modul-Modifikation ist durch Orientierung beim Spinnprozess möglich. Erschwerend kommt dazu, dass wir die Temperaturboxe auf ca. 1700 °C erwärmen müssen, was technologisch und ökonomisch Probleme stellt. Beim Aufdampfen sind hohe Temperaturen und Hochvakuum erforderlich.

Als erste Erkenntnis dieser sicher zum Teil etwas ungewöhnlichen Betrachtungsweise könnte man festhalten, dass für den Verbraucher (Verarbeiter) diejenigen Isolierstoffe am günstigsten sind, die möglichst viele Funktionen der Verformungsboxe erfüllen. Nun müssen wir die andern Eigenschaftsgruppen mit in die Betrachtung ziehen. Es zeigt sich leider in der Praxis, dass universelle Verarbeitbarkeit nicht mit universell guten Eigenschaften gekoppelt ist. Werden beispielsweise optimale thermische, chemische und Alterungsbeständigkeiten verlangt, so kommen praktisch nur keramische Isolierstoffe in Frage. Sie stellen bezüglich Applika-

tionsmöglichkeiten auch heute grosse technologische und finanzielle Probleme. Aber auch bei den organischen Werkstoffen mit hoher thermischer Beständigkeit werden die Verarbeitungsprobleme schwieriger. Das Extrudieren von Fluorkarbonen, wie Teflon FEP oder Tefzel, verlangt bereits Spezialextruder in rostfreiem Stahl, die Herstellung von Formpreßstoffen aus Polyimiden (Vespel) Verformungstemperaturen zwischen 400 und 600 °C. Man kommt damit in die Nähe der thermischen Belastbarkeit der für die Formenherstellung verwendeten Stähle.

Je spezifischer die Eigenschaften des Isolierstoffes oder der Isolationssysteme sind, desto geringer ist die Zahl der möglichen Wege durch die Verformungs- und Strukturfixierungsboxe. Ein Beispiel dieser Art ist das Polyxylylen (Parylen N der UCC), das nur über die Dampfphase appliziert werden kann. Es wird verwendet zur Herstellung von Schutzschichten für integrierte Schaltungen, gedruckte Leiter und Kondensatoren. Parylen N zeichnet sich aus durch hervorragende dielektrische Eigenschaften, hohe mechanische Festigkeiten, optimale chemische Beständigkeit und geringe Gas- und Dampfdurchlässigkeit.

In Fig. 5 ist schematisch der Verarbeitungsablauf dargestellt.

Ist das verlangte Eigenschaftsbild des supponierten Isolationssystems XP so, dass durch die beiden Boxen keine oder nur sehr teure Wege zur Verfügung stehen, so finden Rückkopplungseffekte statt. Wir können drei Fälle unterscheiden:

1. Der Stoff X muss modifiziert oder neu konzipiert werden, damit man wieder auf einem gegebenen oder billigeren Weg durch die Applikationsboxe gelangt.

Als Beispiel einer Modifikation möchte ich die Polyfluorkarbone erwähnen. Am Anfang steht das Teflon mit sowohl dielektrisch, mechanisch und thermisch besten Eigenschaften. Die Verarbeitung ist nur nach dem Pulver-Sinterverfahren oder nach dem Dispersionsverfahren möglich. Durch Variation in der Grundstruktur des Makromoleküls wurde das Teflon modifiziert in Richtung auf bessere Verarbeitbarkeit. So lassen sich beispielsweise die Mischpolymerisate mit Äthylen bereits thermoplastisch verarbeiten. Sowohl an die dielektrischen Eigenschaften wie an die thermische Beständigkeit müssen gewisse Konzessionen gemacht werden, wogegen die mechanische Festigkeit nur geringfügig verändert wird. Aus einem Stoff sind in diesem Falle 5 Modifikationen entstanden, die heute alle technisch verwendet werden (Fig. 6).

Ein anderes Beispiel sind die hochtemperaturbeständigen Polyimide. Das Polyimid Pyre ML, Capton, Vespel, stellt in

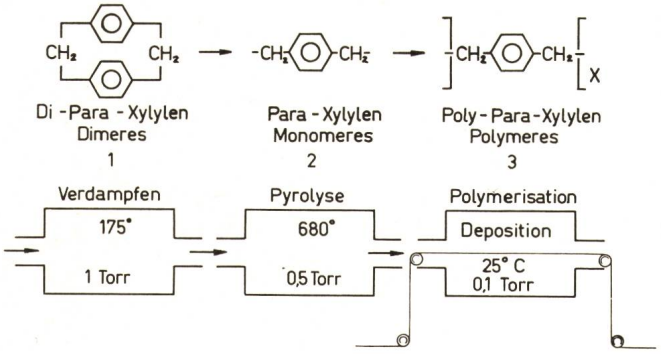


Fig. 5
Applikation Dampfphase

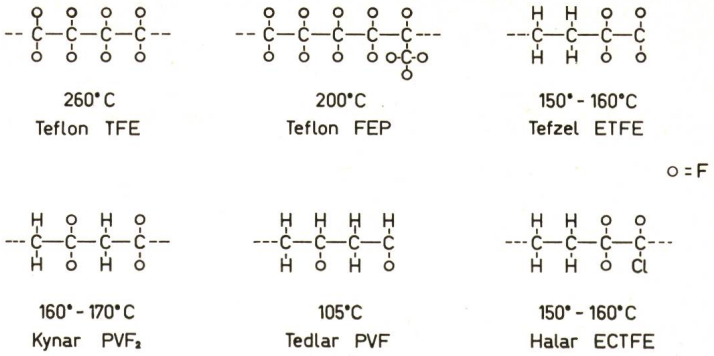


Fig. 6
Stoffvariation

der Verarbeitung enorme Probleme, die am Beispiel des Vespels bereits erwähnt worden sind (Fig. 7).

Durch Variation des Molekülaufbaus (andere Ausgangsmaterialien) wurden sukzessive neue Produkte geschaffen, die bezüglich Verarbeitung günstigere Voraussetzungen haben, in der Temperaturbeständigkeit allerdings etwas geringere Werte aufweisen, dafür aber auch billiger sind (Eigenschaftsgruppe 7).

2. Eine weitere Möglichkeit, die Funktionsparameter der beiden Boxen besser auszunützen oder andere Endeigenschaften zu erreichen, liegt in der Stoffkombination. Ein ein-

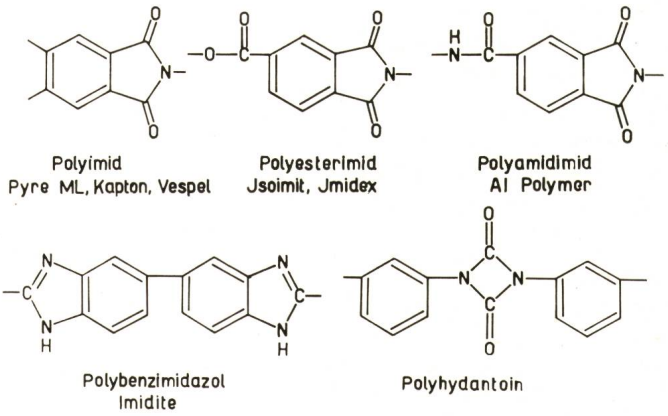


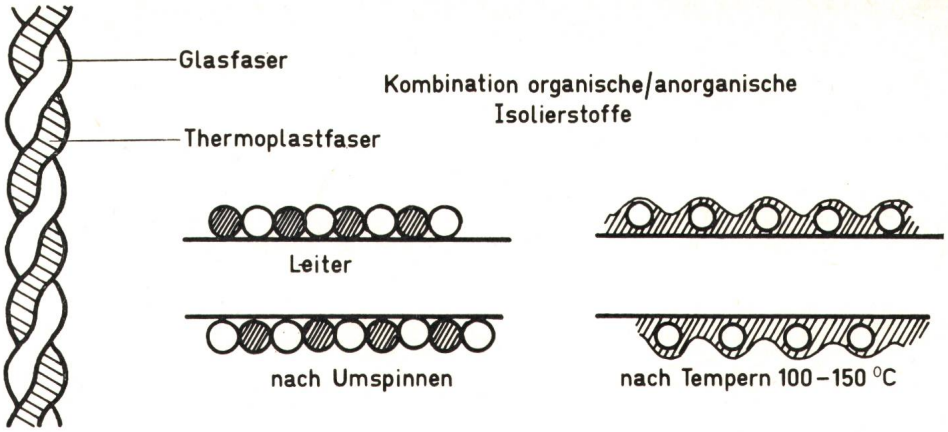
Fig. 7
Hochtemperaturbeständige aromatische Polyheterocyclen

faches und bekanntes Beispiel ist die Kombination von keramischen und thermoplastischen Fasern, wie es in Fig. 8 dargestellt ist. Bei der thermischen Behandlung schmilzt die synthetische Faser und wirkt als Bindemittel für die Glasfaser (plastische Verformung). Die harte, druckfeste Glasfaser wirkt dabei als Abstandshalter im Leiterbündel.

Ein analoges Beispiel bilden die sog. H-Folien (Polyimidfolien). Polyimide sind, wie bereits erwähnt, nicht mehr schmelzbar. Die aus der Lösung hergestellte Elektroisolierfolie wird mit Teflon FEP kaschiert. Die Folie als Ganzes wird damit bei Temperaturen von 260 °C heiss siegelbar (Verformung und Verklebung im plastischen Bereich des FEP).

Die wohl noch grösseren Entwicklungsmöglichkeiten liegen aber auf dem Gebiet der Verbundstoffe. Die verwendeten Füllstoffe, meist Fasern oder Whiskers (faserförmige Einkristalle) zeigen kombiniert mit einer Matrix aus meist härtbaren Kunststoffen im Endzustand erstaunliche mecha-

Fig. 8
Applikationskombinationen



nische, dielektrische und thermische Festigkeiten, wobei alle Prozesse der Strukturfixierungsboxe beteiligt sind, insbesondere auch die physikalischen Verstärkungseffekte an der Grenzfläche Faser/Matrix. Eigenschaftsmässig ersetzen diese Verbundstoffe in vielen Fällen die klassischen keramischen Isolierstoffe und Isolierstoffsysteme mit dem Vorteil einer wesentlich breiteren Applikationsbasis. Als bereits etabliertes Beispiel sollen hier die Druckkammern von Druckluftschaltern und Öldruckschaltern erwähnt werden. Als Stoffkombinationen müssen auch Mischungen von Isolierstoffen mit gewissen Zusätzen, meist in geringen Mengen, bezeichnet werden, die bestimmte Eigenschaften stark verbessern. Beispiele sind die Oxydationsinhibitoren und Kupfer-Passivatoren bei Isolierölen, Ozonschutzmittel bei Kunststoffen und Kautschuken, Antirads (Substanzen mit delokalisierten Elektronen, die die Strahlungsenergie über das ganze Molekül verteilen) für spezifisch strahlenbeständige Stoffe sowie Hochspannungsstabilisatoren (Erhöhung der Ionisationsspannung in Mikroporen) in der Hochspannungstechnik.

Wie derartige Substanzen wirken, soll am Beispiel des an sich ozonbeständigen Butylkautschuks demonstriert werden (Fig. 9). Es handelt sich bei den Proben eins bis sechs immer um das gleiche Butylkautschukvulkanisat, das sich nur durch Art und Menge der verwendeten Ozonschutzmittel unterscheidet. (Beanspruchung: 7 Tage, 200 pphm O_3, 20 % Dehnung.) Proben vier und fünf zeigen das günstigste Verhalten.

3. Die letzte Möglichkeit, von gegebenen Grundstoffen zu Isolierstoffen und Isolierstoffsystemen zu gelangen, ist die Kombination bekannter und das Ausdenken neuer Applikationsverfahren, d.h. die Erhöhung der Zahl der Wege durch die Applikationsboxe.

Das auf andern Gebieten bereits bekannte Verfahren, flüssige Harzsysteme mit Hilfe der Spritzgusstechnik zu verformen, dürfte in allernächster Zeit auch zur Herstellung von Isolierstoffen und Isolationssystemen Verwendung finden (z.B. Umspritzen von Spulenkörpern, Formspritzen von Isolatoren usw.).

In Weiterentwicklung sind ferner:

- das elektrostatische und elektrophoretische Auftragsverfahren;
- die Thermofixierung und Imprägnierung bei Wickeldrähten in einer Operation, ein Verfahren, das ein Nachimprägnieren der gewickelten Spulen zu ersetzen vermag;
- kurzzeitige Vernetzungsprozesse (Härtungsprozesse mit Hilfe von energetischen Strahlen oder UHF-Energie).

Für die Herstellung von Isolierstoffen und Isolationssystemen mit definierten Eigenschaften, die durch den Verwendungszweck diktiert werden, ergeben sich somit folgende Möglichkeiten:

- Änderung des Stoffes X in seinem Aufbau im Sinne von Modifikationen (Anpassung an die existierenden Applikationsverfahren).
- Synthese neuer Stoffe für die bekannten Applikationsverfahren.
- Synthese neuer Stoffe für neue Applikationsverfahren.
- Kombination bekannter Stoffe.
- Kombination bekannter Applikationsverfahren.
- Erfinden neuer Applikationsverfahren.

Die skizzierten Arbeitsrichtungen sind selbstverständlich eng miteinander gekoppelt. Beim heutigen Stand der Isolierstofftechnik lassen sich aber bestimmte Erfolgsprognosen der einzelnen Disziplinen festlegen. Die Synthese neuer Isolierstoffe hat sich vorwiegend auf sehr spezifische Gebiete verlagert (hohe thermische Beständigkeit, hohe chemische Beständigkeit); diese sind auf ganz spezielle Einsatzgebiete beschränkt, insbesondere dort, wo die Eigenschaftsgruppe 7 – der Preis – keine wesentliche Rolle spielt. Grob rechnet man heute, dass eine Erhöhung der Dauertemperaturbeständigkeit um 10 °C in der Regel eine Verdoppelung des Preises bedeutet. Es gilt hier ein ähnliches Exponentialgesetz wie zur Ermittlung der Dauertemperaturbeständigkeit selbst.

Die Modifikationen von Isolierstoffen oder allenfalls Zwischenprodukten im Hinblick auf bekannte oder neue Applikationsverfahren dürften für die nächste Zukunft der Isolierstofftechnik die grössten Erfolgsaussichten haben, wobei die Qualitätsmerkmale und der Preisfaktor in gleicher Weise richtungsbestimmend sein müssen.

Im Zusammenhang mit der Qualität darf auf ein sehr wichtiges Problem hingewiesen werden, das die Entwicklung neuer Applikationsverfahren und die Verbesserung bestehender wesentlich tangiert. Bei vielen Isolierstoffen werden durch die Applikation die Eigenschaften meist im negativen Sinne verändert, wobei viele Faktoren beteiligt sind, wie beispielsweise Mikroporen, Verunreinigungen, Zersetzungspro-

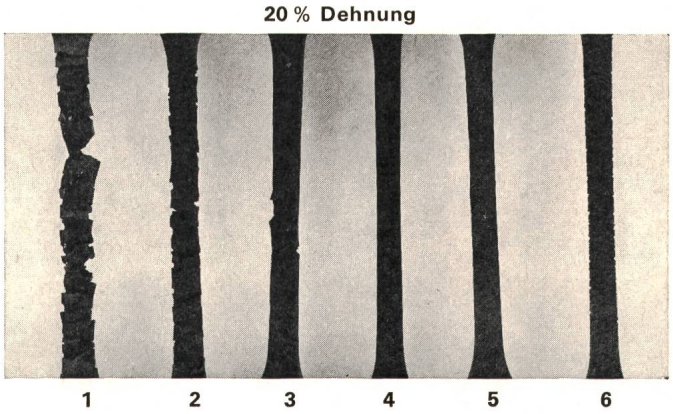


Fig. 9

dukte bedingt durch örtliche Überhitzung, Nebenprodukte chemischer Reaktionen, Orientierungseffekte im amorphen und kristallinen Bereich, Grenzflächeneffekte bei heterogenen Stoffen u. a. m. Diese Feststellung bedeutet aber nichts anderes, als dass das verwendete Applikationssystem noch verbesserungsfähig ist oder der verwendete Stoff noch besser angepasst werden muss. Die Überwindung dieser letzten Schwierigkeiten ist meistens nur in kleinen, mühsamen Schritten möglich. Sie bilden aber die Grundlage nicht nur eines wertvollen Know-how, sondern auch des wahren Fortschrittes. Gerade hier, sozusagen auf der Zielgeraden, sehe ich die reelle Chance der schweizerischen elektrotechnischen Industrie, sich auch für die Zukunft zu behaupten.

Eines können wir mit Sicherheit festhalten: Den idealen Isolierstoff, mit den dielektrischen Eigenschaften des Diamanten, der Zähigkeit des Stahls, der thermischen Beständigkeit des Korunds, der chemischen Beständigkeit des Platins, der Hochelastizität des Kautschuks und den Applikationsmöglichkeiten eines Polyäthylen wird es sicher nie geben.

Die skizzierten Beziehungen zwischen Stoff/Applikationseigenschaften/Isolationssystem führen zwangsläufig zu einer immer differenzierteren Spezialisierung. Aus diesem Grunde sind Fortschritte auf dem Gebiet der Isolierstofftechnik nur noch in einer sinnvollen Teamarbeit, in der die einzelnen Disziplinen vertreten sind, möglich.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *F. Held,* Huber + Suhner AG, Werk Pfäffikon, 8330 Pfäffikon.

Wir machen darauf aufmerksam, dass noch einige Exemplare der Texte sämtlicher Symposiumsbeiträge erhältlich sind. Sie können beim SEV, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich, zum Preis von Fr. 70.– bezogen werden.

Zusammenfassungen der Beiträge der Themengruppe A: «Isolationssysteme mit gasförmigen Isoliermedien»

Ein neues Kondensator-Dielektrikum mit Gasimprägnierung

Von *G. Georg*

Um das bereits bei niederer Spannung einsetzende Glimmen der in den Kondensatorwickeln eingeschlossenen Luft zu verhindern, wird mit einem Tränkmittel imprägniert. Kunststoffolien müssen von Papiereinlagen begleitet sein, damit die Flüssigkeit den Wickel voll durchdringt. Einfacher ist eine Imprägnierung mit SF_6 unter Überdruck. Um dem Gas zum Wickelinneren Zutritt zu verschaffen, wird in die Aluminiumfolie ein Raster paralleler Linien geprägt.

An kleinen, wenig gepressten Versuchswickeln wurde für die DK der Wert 1,32 gemessen. Bei SF_6 begann der TE-Einsatz bei 500 V und stieg mit dem Druck. Im Gegensatz zu einer N_2-Füllung wuchs die TE-Intensität bei SF_6 mit steigender Spannung nur langsam. Formieren bei N_2 führte zu einer erheblichen Verbesserung des TE-Verhaltens. 50-Hz-Durchschläge traten erst oberhalb 125 kV/mm auf.

Mit diesem Dielektrikum wurde ein Kondensator 400 V, 10 kvar gebaut. Trotz höherer Wickelpressung betrug die DK nur 1,39. Es muss noch besser, d. h. faltenfrei gewickelt werden. Dazu wurde gemessen: Verlustfaktor $< 0{,}3‰$, Übertemperatur 2 °C, 50-Hz-Durchschläge bei 120 kV/mm.

Das untersuchte Trockendielektrikum ist umweltfreundlich, erwärmt sich kaum und führt zu einem einfachen Gehäuse mit billiger Montage.

Adresse des Autors:
Gerhardt Georg, Oberassistent, Institut für Hochfrequenztechnik an der ETH-Z, 8006 Zürich.

SF_6-Isolation für Hochspannungsverbindungen und Hochspannungskabel

Von *H. U. Nabholz*

Ausgehend vom Stand der Entwicklung der gasisolierten Leitungen wird auf ihre Einsatzmöglichkeiten hingewiesen. Die Vorteile der Gasisolation kommen um so deutlicher zum Ausdruck, je höher Spannung und Strom sind. Bereits zeichnen sich auch verschiedene technische Ausführungen ab, die je nach Anwendungsfall die optimale Lösung darstellen. Es wird darauf hingewiesen, dass die notwendigen Zusatz- und Hilfseinrichtungen entwickelt worden sind. Aus all dem ergibt sich, dass gasisolierte Leitungen wohl bald ein fester Bestandteil der Elektrotechnik sein werden.

Adresse des Autors:
Dr. *H. U. Nabholz*, Micafil AG, 8048 Zürich.

Elektrische Festigkeit von verdichtetem SF_6-Gas in trockenem und feuchtem Zustand

Von *W. Schmidt*

Im Bericht werden Messungen über die elektrische Festigkeit von SF_6-Gas zwischen konzentrischen Zylindern im technisch relevanten Spannungsbereich bei Drücken von 1 bis 5 at für Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen dargestellt, ferner der Einfluss von Wasserdampfzusätzen zum Gas auf das Überschlagsverhalten der reinen Gasstrecke wie auch bei Anwesenheit von Epoxidharzstützern. Aus den Untersuchungen ergeben sich nachstehende Schlussfolgerungen:

a) Die elektrische Festigkeit von SF_6-Gas ist bei den untersuchten, mässig inhomogenen Anordnungen konzentrischer Zylinder bei negativer Polarität der Versuchsspannung kleiner als bei positiver Polung des Innenleiters. Für unterschiedliche Spannungsarten ist die Reihenfolge von höherer zu tieferer Festigkeit: Normstoss, Gleichspannung und betriebsfrequente (1 min-)Spannung. Für unipolare Schaltspannstösse liegt die Festigkeit für die negative Polarität nur wenig über dem Scheitelwert der Wechselspannung oder fällt mit diesem zusammen.

b) Unabhängig von der Spannungsform bleibt die Festigkeit der freien Gasstrecke solange vom jeweiligen Feuchtigkeitsgehalt im Gas praktisch unbeeinflusst, als kein freies Wasser an den Hochspannungselektroden und Leitern ausfällt.

c) In den Isolationssystemen gekapselter SF_6-Anlagen darf mit Rücksicht auf die Feststoffisolationen die relative Feuchtigkeit beim Gefrierpunkt des Wassers (0 °C) höchstens $\Psi_r = 50\ \%$ erreichen, sofern die Isolation der Anlage auch unter tiefen Temperaturen sicher aufrechterhalten bleiben soll. Feuchtigkeitskonzentrationen dieser Grössenordnung werden jedoch bei sorgfältigem Evakuieren und Gaseinfüllen in SF_6-Anlagen bei weitem nicht erreicht.

Adresse des Autors:
Walter Schmidt, Ingenieur, Hochspannungslaboratorium, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

Über den Einfluss von in elektrischen Entladungen zersetztem Schwefelhexafluorid auf die dielektrischen Eigenschaften von gemagerten Giessharzen

Von *F. Bachofen*

Bei der Zersetzung von SF_6-Gas im Lichtbogen und bei Glimmentladungen entstehen chemisch aggressive Produkte, insbesondere Fluorwasserstoff, welche die Isolierfähigkeit von Isolierstoffen beeinträchtigen können. Über das Ausmass dieser Beeinträchtigung sind bis jetzt nur wenige Angaben veröffentlicht worden.

Eigene Untersuchungen des Autors werden mitgeteilt, welche an gemagerten Giessharzen vorgenommen wurden. Sie zeigen, dass sowohl die Art des Giessharzes und des Füllstoffes einen gewissen Einfluss auf das Verhalten des Isoliermaterials in einer Zersetzungsprodukte enthaltenden SF_6-Atmosphäre hat wie auch der Feuchtigkeitsgehalt des Gases.

Adresse des Autors:
F. Bachofen, dipl. Ing. ETHZ, Sprecher & Schuh AG, 5036 Oberentfelden.

Zusammenfassung des Diskussionsleiters, L. Erhart, zur Themengruppe A: «Isolationssysteme mit gasförmigen Isoliermedien»

A) Allgemeines

Die Gasisolation (Luft) kann als weitgehend erforscht betrachtet werden und wird heute in grossem Umfang in der Hochspannungs-Technik verwendet. Luft- und Stickstoff-Isolationen unter Überdruck werden ebenfalls als genügend bekannt betrachtet. Die seit mehr als 15 Jahren entwickelten Gasisolationen, wobei die Halogene einige besonders günstige Eigenschaften aufweisen, sind vor allem in das Interesse der neueren Forschung und Applikation getreten. Aus dieser Gruppe hat das SF_6-Gas mit seinen spezifisch guten Eigenschaften eine spezielle Bedeutung erlangt. Die Erforschung der Isolationssysteme mit SF_6–Gas als Füllmittel wurde in zahlreichen Publikationen bekannt gemacht und ist ferner an den verschiedenen Konferenzen, wie z.B. an IEEE-Meetings, am Internationalen Symposium für Hochspannungs-Technik in München im März 1972 und an der CIGRE in Paris im September 1972 besonders hervorgetreten.

Wie erwartet, wurden für dieses Symposium ausschliesslich Arbeiten eingereicht, die sich in dieser Themengruppe mit dem SF_6-Gas als Isoliermaterial beschäftigen.

B) Berichte

Die eingereichten Berichte können in 2 Gruppen unterteilt werden:

Die *erste Gruppe* befasst sich mit der praktischen Anwendung des SF_6-Gases: speziell im geschichteten Dielektrikum bei Kondensatoren, sowie in der Anwendung bei SF_6-gefüllten Rohrkabeln.

In der *zweiten Gruppe* befassen sich die beiden Berichte mit grundlegenderen Problemen, nämlich mit der dielektrischen Festigkeit im feuchten und trockenen Zustand und dem Einfluss des zersetzten Gases auf die Isoliereigenschaft von Epoxidharz-Mischungen.

Nun zu den einzelnen Berichten:

1. Bericht von *Gerhardt Georg:*

«Ein neues Kondensator-Dielektrikum mit Gas-Imprägnierung»

Zur Diskussion stehen folgende Fragen:

1.1. Können gasgefüllte Kondensatoren im Vergleich zu Papier/Öl- bzw. Papier/Chlordiphenyl-Kondensatoren eine wirtschaftliche und technische Bedeutung erhalten?

1.2. Kann die vorgeschlagene Isolations-Technik für andere Hochspannungsapparate von Bedeutung sein, wie z.B. bei Transformatoren, Wandlern, Kabeldurchführungen usw.?

1.3. Ist es möglich, die Dielektrizitätskonstante anzuheben und damit auch den Raumfaktor?

1.4. Ist die Lebensdauer solcher gasisolierter Kondensatoren weiter untersucht worden?

2. Bericht von *Dr. H. Nabholz:*

«SF_6-Isolation für Hochspannungsverbindungen und Hochspannungskabel»

Aus der reinen Gasisolation sind bekanntlich ganze Anlagensysteme entwickelt worden, die aus verschiedenen Publikationen allgemein bekannt sein dürften. Zu der speziellen Anwendung bezüglich der Energieübertragung mit Rohrkabeln möchte ich die folgenden Fragen zur Diskussion stellen:

2.1. Können praktische Realisationen von Rohrkabeln und deren Verlegung näher erläutert werden, unter Berücksichtigung der Verlegungsprobleme, Korrosionsschutz, Prüfung und anderen praktischen Problemen?

2.2. Können wirtschaftliche Vergleiche mit Ölpapier oder Gaskabel neuerer Technik genannt werden inkl. der Installationskosten?

3. Bericht von *F. Bachofen:*

«Über den Einfluss von in elektrischen Entladungen zersetztem Schwefelhexafluorid auf die dielektrischen Eigenschaften von gemagerten Giessharzen»

Die aufgeworfenen Probleme betreffen vor allem Isolationssysteme von SF_6-Schaltern, in denen zwangsläufig feste Isolierstoffe angewendet werden müssen. Es können folgende Fragen genannt werden:

3.1. Liegen Versuchsergebnisse vor, in denen andere Isolierstoffe geprüft worden sind?

3.2. Können auch andere Prüfmethoden von Isolierstoffen in zersetztem SF_6-Gas genannt werden?

4. Bericht von *W. Schmidt:*

«Elektrische Festigkeit von verdichtetem SF_6-Gas im trokkenen und feuchten Zustand»

Aus dieser Arbeit können ebenfalls einige Fragen abgeleitet werden:

4.1. Können bezüglich der erwähnten Vergrösserung der zulässigen Verunreinigungen von Isolationsanordnungen schon Ergebnisse mitgeteilt werden?

4.2. Haben die verwendeten festen Isolierstoffe einen Einfluss auf die Durchschlagfestigkeit bei feuchtem Gas?

Diskussionsbeiträge der Themengruppe A «Isolationssysteme gasförmiger Isoliermedien»

Prof. Dr.-Ing. W. Zaengl, Laboratorium für Hochspannungstechnik der ETH, Zürich (zum Bericht von G. Georg): Zweifellos besitzen Kondensatoren mit einem Dielektrikum aus verlustarmen Kunststoff-Folien und einer Gasimprägnierung dann Vorteile, wenn der Verlustfaktor dadurch sehr klein gehalten werden kann. Dies setzt voraus, dass die Gaskomponente frei von Vorentladungen bleibt. Nun zeigt aber G. Georg in seinem Vortrag einen mit der Spannung mehr als linear ansteigenden tan δ und weiterhin wird sowohl im Vortrag als auch in einer Figur darauf hingewiesen, dass die TE-Einsatzspannung nur relativ wenig mit dem absoluten Gasdruck ansteigt. Ich glaube, dass diese Erscheinungen unmittelbar mit der Dicke der Gashohlräume zusammenhängen und folgendermassen theoretisch erklärt werden können:

In stark vereinfachter Weise wollen wir die Schichtung Kunststoffolie–Gas in der Art von Fig. 1 auffassen: Die Isolierstoffdicken der einzelnen Komponenten seien also mit $a_1 + a_2 = a$ konstant, was in Wirklichkeit für die Gasschicht a_1 nicht zutrifft. Eine endliche Gasschichtdicke a_1 ist aber für den Imprägnierprozess notwendig, sie liegt sicher in der Grössenordnung der Prägetiefe der Elektrodenfolien von 6 µm.

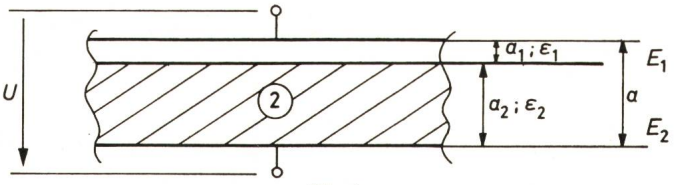


Fig. 1

Liegt eine Wechselspannung U an dieser Schichtung, so wird bekanntlich die Feldstärke im Gas wegen der kleineren relativen Dielektrizitätskonstanten grösser als im Feststoff. Die bekannte Berechnung liefert für diese Feldstärke E_1:

$$E_1 = \frac{U}{a} \cdot \frac{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}{\frac{a_1}{a}\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - 1\right) + 1} \tag{1}$$

Sie wird bei somit konstanten Parametern um so grösser, je kleiner der Gasspalt a_1 wird. Natürlich ist deshalb ein kleiner Gasspalt nicht unbedingt von Nachteil, da die Zünd- oder Durchbruchfeldstärke des Gases E_D mit abnehmendem a_1 stark zunimmt. Für die Berechnung dieser Zündfeldstärke möchte ich auf die für Stickstoff N_2 qualitativ gültige Abhängigkeit zurückgreifen, die sich aus der kinetischen Gastheorie ergibt: Bekanntlich kann hierfür aus dem Clausius-Weglängengesetz der Verlauf des Ionisationskoeffizienten α in der allgemeinen Form

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{\frac{E}{p}}\right) \tag{2}$$

angeschrieben werden. Die Zündfeldstärke im Gasspalt errechnet sich dann unter Annahme des hier auf jeden Fall gültigen Townsend-Mechanismus zu:

$$E_{D1} = \frac{B\,p}{\ln\left[\frac{A\,p\,a_1}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)}\right]} = \frac{B\,p}{\ln\left[\frac{A\,p\,a_1}{k}\right]} \tag{3}$$

Der Ausdruck $\alpha\, a_1 = k = \ln(1/\Gamma + 1)$ stellt die Zündbedingung dar, mit der Rückwirkungsausbeute Γ als Sekundärprozess-Grösse, welche schliesslich die Zündung einleitet.

Der Durchschlag des Gasspaltes a_1 tritt somit ein, wenn $E_1 \geqq E_{D1}$ wird. Aus den Gln. (1) und (3) erhält man somit die TE-Einsatzspannung $U = U_D$ zu

$$U_D = \frac{B}{\beta} \frac{p\,[\beta a_1 + a_2]}{\ln(A\,p\,a_1) - \ln k} \tag{4}$$

$$\text{mit } \beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}; \qquad k = \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$$

Man erkennt sofort die Ähnlichkeit dieser Abhängigkeit mit der sog. Paschenkurve, also der allgemeinen Abhängigkeit $U_D = f(p\,a)$, die bekanntlich ein Minimum besitzt, welches etwa zwischen $p\,a \approx (0{,}1 \ldots 1)$ cm · Torr liegt. Unterhalb dieses Durchschlagminimums steigt die Zündspannung sehr stark an, oberhalb nimmt sie zunächst aber mit $(p\,a)$ nur langsam zu, und es liegt die Vermutung nahe, dass man sich bei den hier diskutierten Vorgängen in der Nähe dieses Bereiches befindet.

Zum Beweis dafür sei eine kleine, quantitative Abschätzung für die N_2-Füllung angeführt, da die Zahlenwerte der Faktoren in Gl. (4) angenähert bekannt sind:

$$\left.\begin{aligned} A &\approx 1{,}2 \cdot 10^{-3}\ (\mu\text{m} \cdot \text{Torr})^{-1} \\ B &\approx 3{,}42 \cdot 10^{-2}\ \frac{\text{V}}{\mu\text{m} \cdot \text{Torr}} \end{aligned}\right\} \text{ siehe [1]}$$

$\beta = 2{,}2$ (Polypropylen-Gas)

$a_2 = 15$ µm (Dicke der Polypropylen-Folie)

$\ln k = 1{,}5 \left(\text{entsprechend } \Gamma = \frac{1}{90}\right)$

Für $p = 1$ ata (= 760 Torr) lässt sich aus Gl. (4) zunächst sofort die Zündspannung U_D in Abhängigkeit der Gasspaltdicke a_1 ausrechnen. Man erhält die Zahlenwertgleichung

$$U_D = \frac{11{,}8\,(2{,}2\,a_1 + 15)}{\ln(0{,}91\,a_1) - 1{,}5} \text{ in V} \qquad a_1 \text{ in } \mu\text{m}$$

Die Auswertung liefert die Zahlenwerte:

a_1 in µm	5	7,5	10	15	20	25	30	40
U_D in V	15 300	881	615	508	497	509	529	580

Der kleinste Wert von U_D liegt somit unter 500 V und steht in guter qualitativer Übereinstimmung mit dem Messwert (TE-Einsatzspannung) des Vortrages von G. Georg. Er tritt bei einer Spaltdicke von ca. 20 µm auf, die zweifellos im Kondensator möglich sein könnte, wenn man die angegebene resultierende Dielektrizitätskonstante von $\varepsilon = 1{,}32$ betrachtet. Es muss aber auch darauf hingewiesen werden, dass die Gl. (3) nur angenähert gültig ist, also das wirkliche Paschen-Minimum nicht exakt quantitativ nachbildet.

Betrachtet man die Druckabhängigkeit von U_D, so wäre es sicherlich falsch, diese für eine feste Spaltdicke a_1 zu berechnen, da diese Grösse ja in Wirklichkeit statistisch verteilt ist. Vielmehr wird die Teilentladung dann einsetzen, wenn das Produkt (pa_1) am ungünstigsten ist. Dieses Minimum von U_D berechnet sich mit Gl. (4) aus:

$$\frac{dU_D}{d(p\,a_1)} = 0$$

Führt man die entsprechenden Zahlenwertrechnungen zunächst unter der Annahme, dass sich der Wert von k nicht ändert, aus, so erhält man etwa folgende Werte:

p in ata	1	2	3	4
U_D in V	496	617	724	823
$(a_1)_{min}$ in µm	19	11,8	9,2	7,8

Die Zunahme von U_D mit dem Druck wird also auch hier recht bescheiden, wenn auch grösser als den Messwerten von Fig. 5 entspricht. Dies mag daran liegen, dass sich die Rückwirkungsausbeute Γ und damit auch der Wert von k ändert. Wird beispielsweise Γ doppelt so gross ($\Gamma = 1/45$), d. h. wird beim Lawinenprozess im Gas pro 45 Ionenpaare nur 1 Anfangselektron erzeugt, so wird $\ln k = 1{,}35$. Die Zahlenwerttabelle ändert sich nun wie angegeben:

p in ata	1	2	3	4
U_D in V	445	562	665	760
$(a_1)_{min}$ in µm	17	10,8	8,6	7,4

Dass eine Füllung mit SF_6 eine Verbesserung bringen muss, ergibt sich aus der prinzipiellen Ähnlichkeit der Vorgänge. Man erkennt schon beim Stickstoff, dass bei $p = 1$ ata die Zündeinsatzspannung etwa in der Grösse der Minimalspannung des Gases liegt. Diese ist aber beim SF_6 wesentlich höher, wie der folgende Zahlenwertvergleich zeigt [2; 3][1]):

Minimalspannung:

N_2: $(U_D)_{min} = 251$ V; $(p\,a)_{min} = 0{,}67$ Torr · cm

SF_6: $(U_D)_{min} = 507$ V; $(p\,a)_{min} = 0{,}26$ Torr · cm

Aus all diesen Überlegungen ergibt sich, dass eine Füllung des Dielektrikums mit komprimiertem Gas nicht unbedingt grosse Vorteile bringt.

Literatur

[1] *E. Nasser:* Fundamental of gaseous ionization and plasma electronics. New York a.o., Wiley-Interscience, 1971.

[2] *G. Oppermann:* Die Paschenkurve und die Gültigkeit des Paschen-Gesetzes für Schwefelhexafluorid. In: Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Technische Universität München, 9. bis 14. März 1972. Wissenschaftliche Beiträge, S. 378...385.

[3] *J. D. Cobine:* Gaseous conductors; theory and engineering applications. Republication of the first edition. New York, Dover Publications, 1958.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Diskussionsbeitrages.

Dr. J. Moeller, Messwandler-Bau GmbH, Bamberg (zum Bericht von G. Georg): Die Beschreibung eines SF_6-imprägnierten Kondensators mit Kunststoffolienisolation im Bericht von G. Georg hat den Diskussionsleiter in seiner Zusammenfassung zu der hochinteressanten Frage 1.2 nach bekanntgewordenen anderen Hochspannungsgeräten mit vergleichbarem Isolationssystem veranlasst.

Diese Frage kann zumindest für einen Teil der aufgeführten Apparate positiv beantwortet werden. Die Messwandler-Bau GmbH, Bamberg, hat einen induktiven Spannungswandler zum direkten Anschluss an gekapselte Schaltanlagen für die Spannungsebenen $U_m = 245$ kV und $U_m = 300$ kV (höchste dauernd zulässige Betriebsspannung; highest voltage for equipment) entwickelt. Die Lagenisolation des gekapselten Spannungswandlers besteht aus Kunststoffolie, die von dem die Hauptisolation bildenden SF_6-Isoliergas imprägniert wird. Der Nennisoliertdruck des Gases beträgt in Anpassung an die Gasdrücke der grossen Mehrzahl der bekannten SF_6-isolierten gekapselten Schaltanlagen der verschiedensten Hersteller 3,5...4 bar bezogen auf 20 °C. Hierbei werden in Übereinstimmung mit den VDE- bzw. CEI-Vorschriften für Betriebsmittel mit $U_m = 245$ und $U_m = 300$ als Prüfspannungen folgende Werte zugrunde gelegt:

Wechselprüfspannung	460 kV (eff.)/min
Steh-Schaltstoßspannung	850 kV
Steh-Blitzstoßspannung	1050 kV

Die weiteren Daten des Spannungswandlers sind:

Summen-Messleistung	120 VA / Kl. 0,2 bzw. 300 VA / Kl. 0,5
thermische Grenzleistung	2000 VA
grösster Gehäusedurchmesser	< 700 mm
Einbaulänge	< 900 mm
Innendurchmesser des Anbauflansches anpassbar, ca.	350 mm

Über den Entwicklungsstand des beschriebenen Gerätes ist zu berichten, dass ein fertigungsreifes Produkt in verschiedenen Ausführungsdetails bezüglich des Hochspannungsspulenaufbaues erprobt wurde. Bisher wurden beispielsweise durchgeführt: 460 kV Wechselspannungsprüfung zweimal 5 min, Dauerprüfung mit 250 kV entsprechend $1{,}75 \times U_m/\sqrt{3}$ für $U_m = 245$ kV sowie um 10 bzw. 20 % erhöhte anteilige Wechselspannungs- und Blitzstoßspannungsprüfwerte an Spulen des Originalaufbaues mit halber Wicklungshöhe.

Die derzeitige Endphase der Entwicklung gilt einer echten Dauererprobung und letzten technischen sowie wertanalytischen Verbesserungen des praktisch einsatzbereiten Gerätes.

G. Georg, Institut für Hochfrequenztechnik der ETH, Zürich: Die erste Frage des Diskussionsleiters richtet sich auf die technisch-wirtschaftliche Bedeutung des vorgeführten Gasdielektrikums. Das Motiv, den Gedanken zu verfolgen, lag in dem stark diskutierten ungünstigen Umweltverhalten des Polychlordiphenyls. Auf der Suche nach anderen Möglichkeiten stellte das Gasdielektrikum zwei bedeutende technologische Vereinfachungen in Aussicht:

1. Der konstruktive Aufbau des Kondensators wird einfacher, weil die Erwärmung unbedeutend bleibt und weil die Veränderung eines Flüssigkeitsvolumens mit der Umgebungstemperatur nicht mehr aufgefangen werden muss.
2. Die Nassimprägnierung mit ihren kostspieligen Anlagen und den langen Durchlaufzeiten entfällt.

Dagegen muss in Kauf genommen werden, dass die erreichbare Dielektrizitätskonstante (DK) niedrig ist. Während ein mit Polychlordiphenyl imprägniertes Papierdielektrikum eine DK von 5,9 hat, beträgt sie beim Gasdielektrikum nur ca. 1,4. Daraus folgt, dass sich das Leistungs–Volumen-Verhältnis bei diesen beiden Dielektriken wie 3 zu 1 verhält. Es hat sich herausgestellt, dass die Einsparungen die Folgen dieses ungünstigen Verhältnisses nicht aufzuwiegen vermögen. Vorerst ist also nicht daran zu denken, den Leistungskondensator der heutigen Bauweise zu ersetzen.

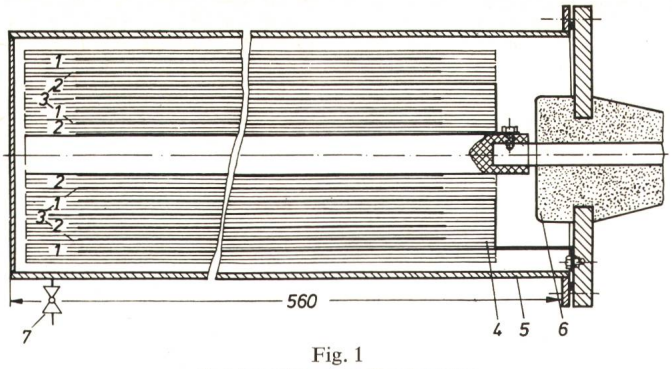


Fig. 1
Induktivitätsarmer Kondensator
25 kV, 800 pF, 1 MHz, tan $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$

1 Niederspannungsbeläge
2 Hochspannungsbeläge
3 Potentialsteuerung
4 Polyäthylen-Dielektrikum
5 Gehäuse
6 Durchführung aus Epoxidharz
7 Druckgasventil

Unter diesen Umständen hat die Frage Bedeutung, ob die DK verbessert werden kann. Dies kann im Prinzip durch Wahl eines Kunststoffes mit höherer DK (z. B. Polyäthylen mit 3,3) und durch Reduktion des Raumfaktors durch besseres Wickeln ohne Falten geschehen. Dabei ist zu beachten, dass ein solches Vorgehen das elektrische Feld im Gasspalt nennenswert erhöht. In diesem Zusammenhang sind die Ausführungen von Prof. W. Zaengl bedeutungsvoll. Sie können noch durch Angabe einer Zahl aus der Paschenbeziehung ergänzt werden. Und zwar liegt das Minimum von 507 V bei $3{,}5 \cdot 10^{-4}$ bar · cm [1][1]. Wenngleich sich die Distanzen in der Grössenordnung von einigen Mikron bewegen, wird es doch schwierig sein, Unterdrücke zu erzeugen und zuverlässig aufrechtzuerhalten, die den Betrieb im Bereich des linken Astes der Paschenbeziehung sicherstellen.

Über allen Erwägungen darf nicht übersehen werden, dass der letzte Satz des Berichtes ausdrücklich festhält: «Folgende Punkte sind noch abzuklären: ... Untersuchung der Lebensdauer in Abhängigkeit des Formierungszustandes.» Leider hat der Berichterstatter am Orte seiner gegenwärtigen Tätigkeit keine Möglichkeit, die Arbeit praktisch fortzusetzen. Er ist aber der Meinung, dass der vorgelegte Gedanke dieser Art einer Gasisolierung in Verbindung mit Kunststoffolien nicht völlig abwegig ist.

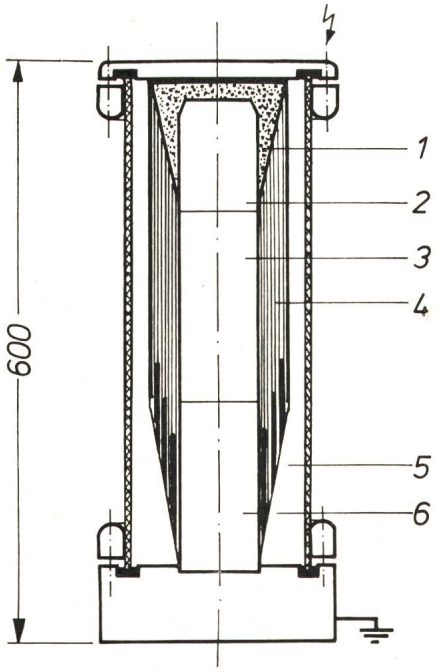


Fig. 2
Normalkondensator
100 kV, 50 pF, 50 Hz, tan $\delta = 10 \cdot 10^{-5}$

1 Epoxi-Konus
2 Leitelektrode
3 Messelektrode
4 Polyäthylen-Dielektrikum mit Hochspannungselektrode
5 Potentialsteuerung

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Diskussionsbeitrages.

Dr. Moeller war bereits so liebenswürdig, das ausgeführte Beispiel eines Wandlers 245 kV zum Anschluss an eine SF_6-Anlage vorzuführen. Ausserdem sind aus etwa gleichzeitigen Arbeiten an der Technischen Universität Braunschweig Ergebnisse veröffentlicht worden [2]. U. Brand und Prof. D. Kind bauen von der Isolationstechnik für hohe Spannungen her kommend die Isolationsdistanzen aus vielen Schichten locker gewickelter Kunststoffolie auf und füllen die Zwischenräume mit SF_6. Die Autoren von [2] sind in der Lage, Konstruktionsentwürfe vorzulegen und Prototypen vorzuweisen. Sie waren so liebenswürdig, die Fig. 1 bis 3 zur Verfügung zu stellen.

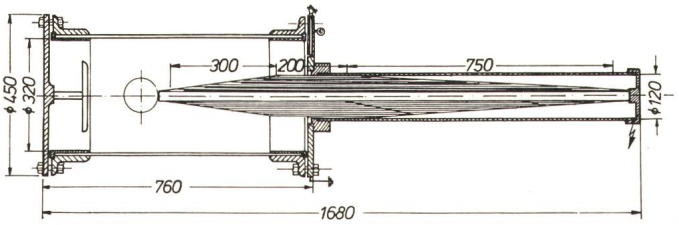


Fig. 3
Versuchsanordnung mit einer gasimprägnierten Kunststoffolie
Isolation für eine Durchführung. Prüfspannung 230 kV, 50 Hz, 1 min.

Literatur

[1] *G. Oppermann:* Die Paschenkurve und die Gültigkeit des Paschen-Gesetzes für Schwefelhexafluorid. In: Internationales Symposium Hochspannungstechnik. Technische Universität München, 9. bis 14. März 1972. Wissenschaftliche Beiträge. S. 378...385.

[2] *U. Brand* und *D. Kind:* Feuilles plastiques à imprégnation gazeuse pour l'isolement à haute tension, Rapport Cigré N° 15-02, 1972.

Dr.-Ing. J. Artbauer, Kabel- und Metallwerke Gutehoffnungshütte AG, Hannover: Im Bericht von Dr. H. U. Nabholz wurden die Vorteile des flexiblen gasisolierten Kabels gegenüber einer aus starren Rohren aufgebauten Leitung erwähnt (Fig. 1). Wie die Figur eines flexiblen Kabels zeigt, unterscheiden sich alle drei Grundbauelemente von denen, die bei starren Leitungen verwendet werden. Im Rahmen der Entwicklung eines flexiblen Kabels wurde die Auswirkung dieser Unterschiede auf die Durchschlagfestigkeit des Kabels untersucht. Bei den in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hochspannungs- und Messtechnik der Technischen Hochschule Darmstadt durchgeführten Untersuchungen hat die Feldberechnung gezeigt, dass die Feldstärke am Aussenleiter durch die Wellung nicht unzulässig erhöht wird.

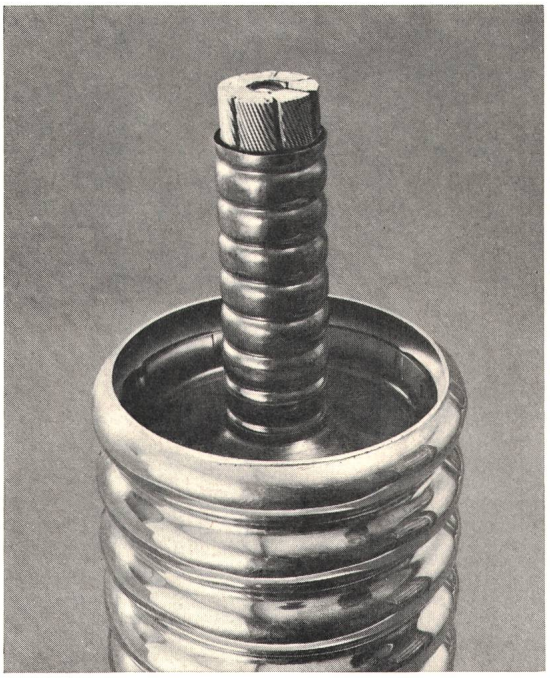


Fig. 1
Flexibles Kabel

Die Messungen haben bestätigt, dass die Durchschlag- bzw. die Stoßstehspannung beim gewellten Mantel ebenso hoch liegen wie bei glattem Rohr. Durch geeignete Form der Wellung des Wellrohres über dem Innenleiter, das als Leiterglättung dient, konnte auch hier dieselbe Durchschlagspannung erreicht werden wie bei einem glatten zylindrischen Innenleiter. Schliesslich wurde auch das dritte Bauelement, der Abstandshalter, so entwickelt, dass mit ihm praktisch dieselbe Durchschlagspannung erreicht wird wie bei reiner Gasisolierung zwischen Innen- und Aussenleiter.

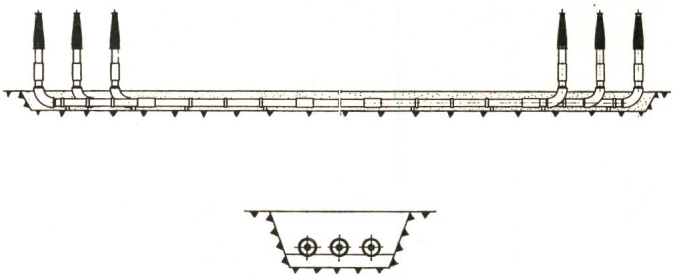


Fig. 1

F. Bachofen, dipl. Ing., ETHZ, Sprecher & Schuh AG, Oberentfelden (zur Frage 2.1 des Diskussionsleiters, L. Erhart): Im Zusammenhang mit dem Beitrag von Dr. H. U. Nabholz möchte ich über ein SF_6-isoliertes 345-kV-Leitungsstück berichten, das in den USA seit mehr als neun Monaten in Betrieb steht. Dieses Leitungsstück wurde von der Firma ITE Imperial Corporation in Zusammenarbeit mit Sprecher & Schuh für die Schaltstation Buchanan nördlich von New York City der Consolidated Edison geliefert. Der Grund für die Wahl von SF_6-Isolation war die Tatsache, dass die betreffende Leitung vier Freileitungen zu kreuzen hatte.

In Fig. 1 ist schematisch der Aufbau dieses Leitungsstücks zu erkennen. Die drei Phasen sind in separaten Rohren auf gleicher Höhe in Sand verlegt. An beiden Enden befinden sich gas-isolierte Durchführungen. Die Länge des Leitungsstücks beträgt ca. 200 m.

Da es sich um die erste Anlage dieser Art handelte, mussten mit vielen Versuchen technische und fabrikatorische Details abgeklärt werden. Zu erwähnen ist zum Beispiel ein Erwärmungsversuch im Maßstab 1 : 1 (Fig. 2), mit dem bewiesen wurde, dass die Anlage ihren vollen Nennstrom von 3350 A ohne unzulässige Erwärmung führen kann, oder ein Schweissversuch im Freien, der abzuklären half, ob die einzelnen Transporteinheiten unter Einhaltung der rigorosen Sauberkeitsbedingungen auf dem Bauplatz miteinander verschweisst werden können.

Die Leitung wurde in Abschnitten von ca. 12 m in der Fabrik vormontiert, die einzelnen Abschnitte einer dielektrischen Stückprüfung unterzogen und mit einem Korrosionsschutz versehen. Dieser besteht aus mehreren Bitumen-Epoxy-Anstrichen. Zudem ist die ganze Leitung kathodisch geschützt. Der die Leitung aufnehmende Graben musste teilweise aus dem Fels gesprengt werden. Fig. 3 zeigt den Zustand der Baustelle, nachdem ungefähr die Hälfte der Leitung montiert war. Zum Schutz vor Witterungseinflüssen wurden die Verbindungsstellen zweier Abschnitte beim Schweissen von einer Art Zelt überdacht. Schwierigkeiten ergaben sich, als infolge überdurchschnittlicher Regenfälle die ganze Baugrube überschwemmt wurde und ganze Abschnitte zwecks Reinigung in die Fabrik zurückgenommen werden mussten.

Vor der Inbetriebnahme wurde die Anlage mit Gleich- und Wechselspannung geprüft. Nachdem der Graben zugedeckt worden ist, sind von der ganzen Anlage nur noch die Durchführun-

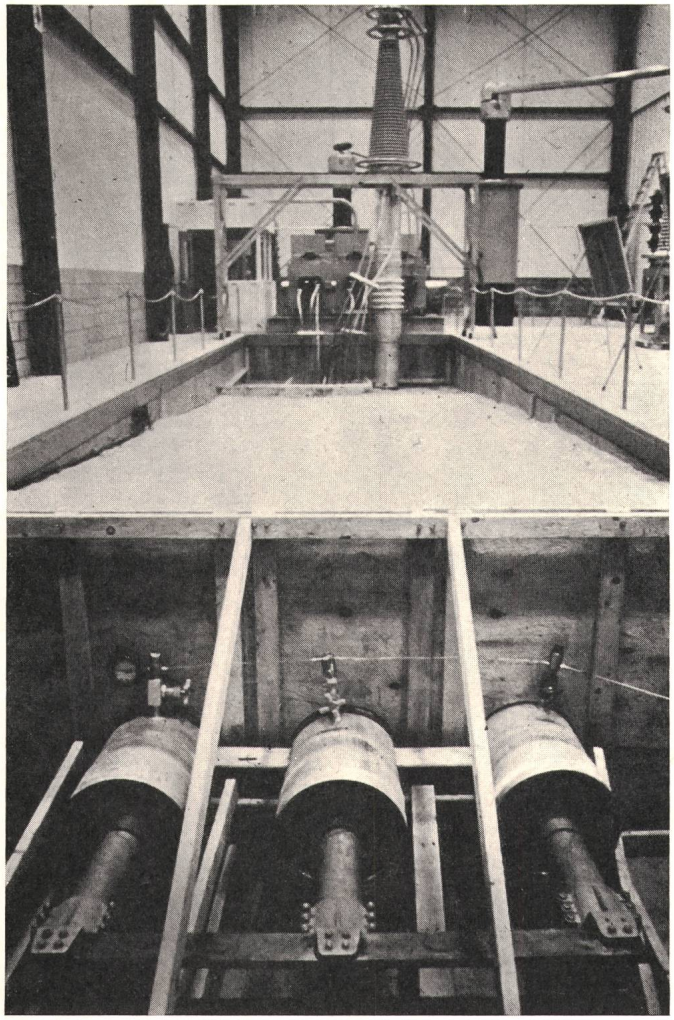


Fig. 2

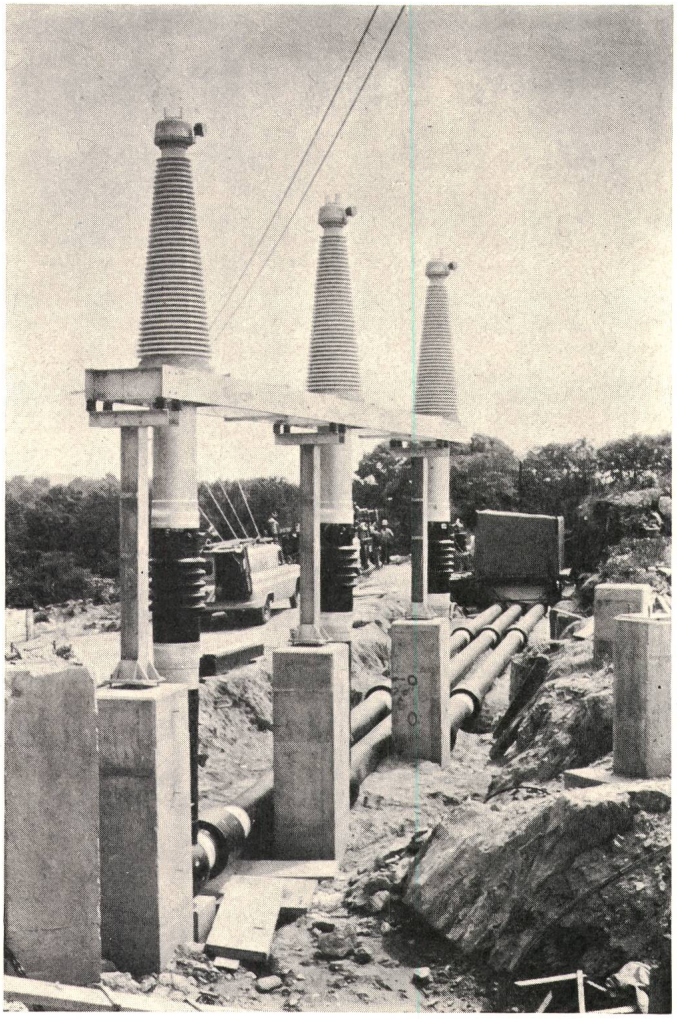


Fig. 3

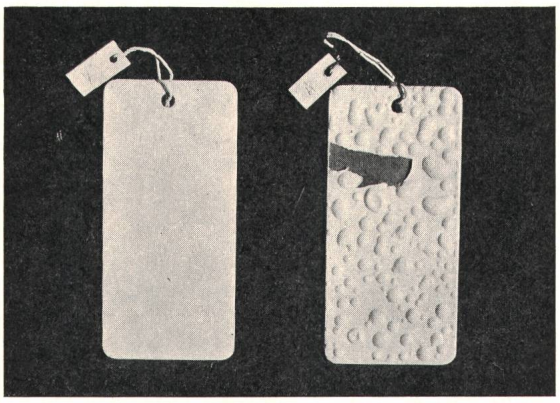


Fig. 4

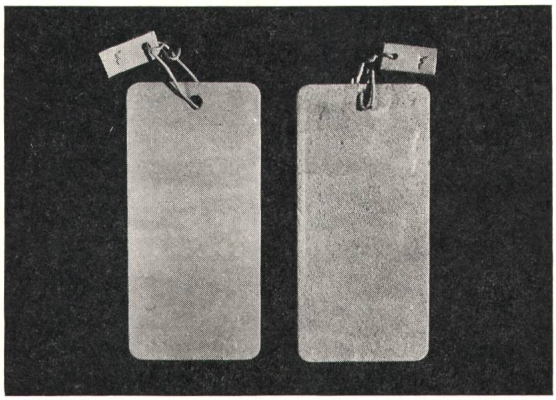


Fig. 5

gen mit den Gasüberwachungs-Einrichtungen zu sehen (Fig. 3). Von der gleichen Firma wurde seither eine ganze Anzahl ähnlicher Leitungsstücke erstellt. Als Beispiel sei eine 345-kV-Anlage in Cleveland erwähnt. Im Unterschied zur vorher gezeigten Anlage ist diese oberirdisch verlegt, womit das Korrosionsproblem sehr vereinfacht wurde. Als Besonderheit mündet dieses Leitungsstück an einem Ende direkt in einen SF_6-Leistungsschalter. Mit dieser Lösung konnten pro Phase zwei Durchführungen eingespart werden.

Ich möchte noch kurz unsere Einrichtung zur Prüfung des Verhaltens von Isoliermaterialien gegenüber Zersetzungsprodukten von SF_6 vorstellen.

Sie besteht aus einem Plexiglaszylinder, in dessen Innern eine Mehrfach-Spitzen-Platte-Funkenstrecke für die Erzeugung von Zersetzprodukten sorgt. Die Prüflinge sind in der Nähe der Funkenstrecke auf einem drehbaren Teller so angeordnet, dass jeder Prüfling an eine Durchführung angeschlossen werden und so sein Oberflächenwiderstand gemessen werden kann.

Die ganze Einrichtung wird über einen als Hochspannungstransformator betriebenen Spannungswandler gespeist.

In meinem Beitrag habe ich über unsere Messungen an gemagerten Giessharzen berichtet. Als wichtigstes Resultat dieser Messungen dürfte wohl der grosse Einfluss der Feuchtigkeit sein, sei es als Feuchtigkeit im Gas, welche eine starke anfängliche Reduktion des Oberflächenwiderstandes bewirken kann, sei es als Luftfeuchtigkeit bei einer simulierten Schalterrevision.

Wir haben in letzter Zeit die Resultate auch auf andere Materialien als Giessharze ausgedehnt und dabei ganz ähnliches Verhalten festgestellt. Unter anderem waren Materialien darunter, welche im Zersetzungsversuch mit feuchtem SF_6 keine, bei Zutritt von normal feuchter Luft jedoch eine starke, irreversible Abnahme des Oberflächenwiderstandes zeigten. Dieses Beispiel demonstriert, wie wichtig es ist, dass man das Verhalten der Prüflinge auch über den eigentlichen Zersetzungsversuch hinaus weiter verfolgt.

Zum Schluss möchte ich noch zwei Bilder von Lackproben zeigen, welche ebenfalls in der Zersetzungskammer untersucht wurden. Von total 16 verschiedenen, ausgewählten Lacken haben nur zwei ein genügendes Verhalten gezeigt. Das erste, Fig. 4, ist ein Beispiel eines ungenügenden Lackes. Er hat grosse Blasen gebildet und ist teilweise abgeblättert. Der Lack in Fig. 5 zeigt wohl eine Veränderung der Oberflächenstruktur, blättert jedoch nicht ab und darf deshalb als genügend beurteilt werden.

Dr. A. Eidinger, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (zum Bericht von H. U. Nabholz): Freileitungen, Kabel und Rohrgaskabel (RGK) haben recht verschiedene Übertragungseigenschaften, so dass ein objektiver, wirtschaftlicher Vergleich, der nicht nur die Anschaffungskosten berücksichtigt, ausserordentlich schwierig ist.

Die Blindleistungskennlinie eines RGK mit vollem Mantelrückstrom entspricht recht genau der Kennlinie von 4 parallelen Freileitungen gleicher Spannung (Fig. 1). Die natürliche Leistung (Schnittpunkt mit Nullinie) liegt damit ebenfalls viermal höher als bei einer Freileitung. Demgegenüber stellt das Kabel im gesamten Belastungsbereich eine nahezu konstante, hohe kapazitive Last dar.

Weiters sind die möglichen und die aus konstruktiven Gründen notwendigen Leiterquerschnitte – besonders bei hohen Spannungen – beim RGK grösser als bei Freileitungen und Kabeln. Auch aus diesem Grunde ist das RGK prädestiniert für die Übertragung hoher Ströme. Der Einsatz von RGK kann daher nur bei hohen Übertragungsleistungen sinnvoll und wirtschaftlich sein. Fig. 2 zeigt eine Gegenüberstellung der üblichen Leiterquerschnitte von Kabeln und RGK.

Die von der Eidg. Kommission für elektr. Anlagen im Bull. SEV 6(1970)15, S. 689...695 publizierte detaillierte Kostengegenüberstellung für die Errichtung von Übertragungen mit Freileitungen und Kabeln ergibt für 380 kV ein Kostenverhältnis von 1 : 10. Für eine Übertragungsleistung von 3000 MVA wäre dagegen ein RGK nur dreimal teurer als Freileitungen. Bei kleineren Übertragungsleistungen wird aber dieses Verhältnis ungünstiger sein, so dass der Faktor 3 etwa als unterer Grenzwert angesehen werden darf.

Es wurde die Frage gestellt, ob die notwendige Sauberkeit bei der Verlegung von RGK gewährleistet werden kann. In den USA sind seit einiger Zeit zwei RGK in Betrieb, und die Inbetriebsetzungsschwierigkeiten wurden an der IEEE-Conference 1972 in N. Y. [1]) ausführlich diskutiert. Bei Einhaltung entsprechender Vorsichtmassnahmen ergeben sich bei der Verlegung keine unerwarteten Schwierigkeiten. Dass die Prüfspannung in beiden Fällen zuerst doch nicht gehalten wurde, lag an Nebeneffekten wie sie bei Erstausführungen offenbar zwangsläufig auftreten müssen. Im einen Fall hatte man vergessen, auch die Gaszuleitungen für das Einfüllen des SF_6 entsprechend zu reinigen, und damit wurden einige Isolatoren unzulässig verschmutzt. Im anderen Fall war die Schweissverbindung im vertikalen Leitungsteil vor der Freiluftdurchführung so ungünstig ausgebildet, dass Schweissperlen auf den ersten, horizontal liegen-

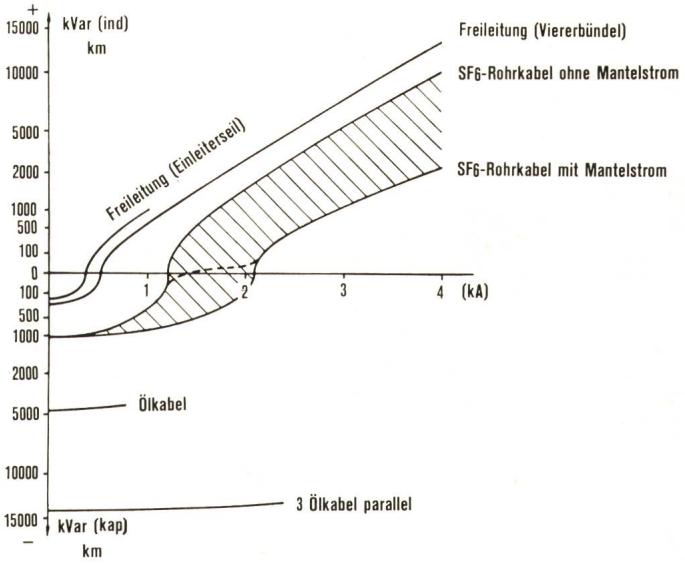


Fig. 1
Blindleistungsbedarf verschiedener 220-kV-Übertragungsleitungen

[1]) IEEE-Winter Meeting 1972, C 72 117-5 Williams, Fischer, Koehler: Installation of 345 kV-SF_6-Insulated, Phase Isolated Underground Bus.

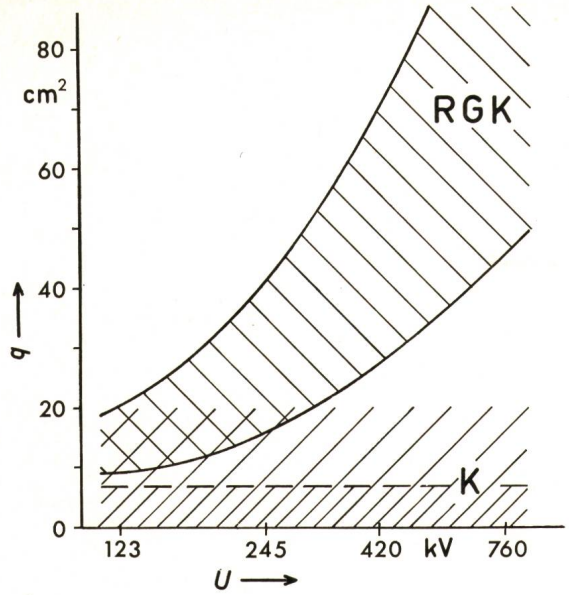


Fig. 2

den Scheibenisolator fallen konnten. Beide Fehler lassen sich künftig leicht vermeiden. Natürlich darf ein RGK nicht auf physikalische Grenzwerte bei klinischer Sauberkeit dimensioniert werden. Wird dies jedoch beachtet, so können die Probleme beherrscht werden.

Hans-Joachim Vorwerk, dipl. Ingenieur, Bernische Kraftwerke AG, Bern: In der sehr interessanten Arbeit von W. Schmidt über einige wichtige Grundlagen der SF_6-Isolationstechnik wird die obere Grenze der zulässigen Feuchtigkeit im SF_6-Gas bei 0 °C mit 50 bis 60 % angegeben, was gegenüber trockenem Gas eine Festigkeitseinbusse von immerhin rd. 20 % ausmacht. Diese Folgerung basiert teilweise auf den Temperaturzyklen zwischen ± 40 °C, + 20 °C und – 29 °C.

Bei SF_6-Freiluftanlagen ohne besondere Vorkehrungen dürfte mit der angegebenen Feuchtigkeit bei tieferen Temperaturen mit Eisbildung zu rechnen sein. Wenn nun nach kalter Nacht mit sowieso in der Regel niedrigen Verlusten in den Strombahnen durch Sonneneinstrahlung eine Erwärmung von aussen her erfolgt, so dürfte der Feuchtigkeitsniederschlag an der Kapselung wenigstens teilweise verdunsten und sich im Innern, also auch auf den Isolatoren, niederschlagen. Mit einer gewissen Überschlagsgefahr ist dann u. U. zu rechnen.

In diesem Zusammenhang wäre interessant, vom Autor zu erfahren, mit welcher Geschwindigkeit oder in welchen Zeiten die von ihm angegebenen Temperaturzyklen abliefen und ob er den geäusserten Befürchtungen beipflichten kann.

Walter Schmidt, Hochspannungslaboratorium und -Prüffeld der AG Brown, Boveri & Cie., Baden (zur Frage von H.-J. Vorwerk): Die in der Arbeit angegebene im äussersten Fall noch zulässige relative Feuchtigkeit von 50 % bei 0 °C Umgebungstemperatur stellt einen Grenzwert dar, bei dessen Überschreitung eine gekapselte Anordnung ausser Betrieb genommen werden sollte. Doch wird dieser Grenzwert natürlich nicht allen verschärften Anforderungen wie z.B. den vom Fragesteller genannten Rechnung tragen. Daher sind in einzelnen Fällen für bestimmte gekapselte Anordnungen im Normalbetrieb auch strengere Forderungen zu stellen [1][1]. So müsste im angenommenen Fall, der auf die Aufstellung von SF_6-Anordnungen im Freien abzielt, sichergestellt werden, dass der reversible Vorgang des Auskristallisierens bzw. Verdampfens von Feuchtigkeit nicht zu unzulässig hohen Konzentrationen im SF_6-Gas nahe an oder auf Isolieroberflächen führt. Deshalb sind, sofern der Betrieb stets mit gewohnter Zuverlässigkeit aufrechterhalten werden soll, vielleicht zwei Arbeitsbereiche [3] mit den nachfolgenden Grenzwerten z.B. bei $p = 4$ ata anzunehmen:

Arbeitsbereich der Anlage Umgebungstemperaturbereich	Zulässiger Feuchtigkeitsgehalt
+ 10... + 40 °C	≦ 200 ppm (Gewicht)
– 5... – 40 °C	≦ 65 ppm (Gewicht)

Erreicht wurden aber, wie im Bericht gezeigt wird, an im Betrieb stehenden Anlagen im Mittel 18...20 ppm, im Höchstfall gegen 40 ppm.

Im Modellversuch lag die Zeitkonstante der Temperaturzyklen bei der Abkühlung bei 2 h, die der Erwärmung bei 0,75 h. Diese Zeiten dürften den in der Natur zu erwartenden Temperaturänderungszeiten recht nahe kommen.

Die unter Berücksichtigung der wesentlichen Parameter durchgeführten Modellversuche haben im Hinblick auf die Betriebsführung von SF_6-Anlagen erwiesen, dass bezüglich Feuchtigkeitseinfluss übertriebene Befürchtungen nicht gehegt werden müssen.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Diskussionsbeitrages.

Literatur

[1] *P. Hoegg, W. Schmidt* et *H. Strasser:* Conception de l'appareillage blindé, isolé au SF_6 pour atteindre une haute sureté de service. Rapport Cigré N° 23-10, 1972

B. Gänger, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (zum Bericht von H. U. Nabholz): Meine Bemerkungen beziehen sich auf die Spannungsprüfung fertiggestellter SF_6-Anlagen. Im Artikel von H. U. Nabholz ist ausgeführt, dass «man nicht gerne mit Gleichspannung prüfe, weil Ladungen, die sich auf einem Stützer absetzen, zu Beanspruchungen führen können, wie sie im Wechselspannungsbetrieb nie auftreten». Dieser Aussage vermag ich nicht zuzustimmen. Bei Anlagen der hier betrachteten Art mit im wesentlichen koaxialen Zylinderelektroden ist der Inhomogenitätsgrad des elektrischen Feldes mässig, und es darf damit gerechnet werden, dass bis zu hohen angelegten Spannungen es zu keinen Vorentladungen kommt, die ja Voraussetzung für das Auftreten aufgesprühter Ladungen wären. Selbst wenn beim weiteren Erhöhen der Spannung vor dem Durchschlag sich eine stabile Entladung ausbildete, so wäre dies vermutlich knapp unter dem Durchschlag-Spannungswert und sicherlich nicht mehr im Bereich der anzuwendenden Prüfspannungen.

Das erhöhte Risiko eines Durch- oder Überschlages im Gasraum oder an Isolier-Grenzflächen bei einer Prüfung mit hoch angesetzter Gleichspannung dürfte meiner Auffassung nach von der sehr viel stärkeren Sammel- und Ausrichtwirkung des Gleichfeldes auf nicht völlig vermeidbare Fremd-(Staub-)Teilchen herrühren. Um dem zu begegnen, darf die Gleichspannung nicht etwa auf gleiche Höhe wie der Scheitelwert der Wechselspannungsprüfung angesetzt werden, sondern ist wesentlich tiefer zu wählen. Überdies handelt es sich auf der Baustelle nur um eine Nachkontrolle auf grobe Mängel, die sich beim Transport und Zusammenbau der Teile eingestellt haben könnten; die jeweiligen Apparate und Transporteinheiten sind nämlich samt und sonders in der Fabrik der regulären Stückprüfung und meist noch weiteren Prüfungen unterzogen worden. Eine Absprache zwischen Kunde und Hersteller über die Höhe der anzuwendenden Gleichspannung bei der Kontrolle vor Inbetriebnahme der Anlage sollte demnach auf keine zu grossen Schwierigkeiten stossen. Von seiten des Kunden sollte sowieso keine Veranlassung bestehen, die eher schärfere Gleichspannungsprüfung von vornherein abzulehnen, nachdem bei den anzunehmenden grossen Isolierzeitkonstanten des Festmaterials und den doch relativ kurzen Prüfzeiten das Feld nicht erheblich von dem bei Wechselspannung abweichen kann.

Die sonstigen sich vielleicht noch bietenden Möglichkeiten zur Kontrolle an Ort und Stelle auf Betriebsbereitschaft – und eine solche Überprüfung halten wir für durchaus empfehlenswert – sind eher beschränkter Art. In vielen Fällen müssen der Leistungs- und Platzbedarf sowie die Kosten einer Prüfeinrichtung für betriebsfrequente Wechselspannung als unangemessen bezeichnet werden, ähnliches gilt wohl auch für die Prüfung mit Impulsspannung, und die seit einiger Zeit eingesetzten Erörterun-

gen über eine Prüfung mit Wechselspannung ausserordentlich kleiner Frequenz scheinen sich mir zu einem guten Teil mehr am Wunschdenken als den real verfügbaren Mitteln zu orientieren.

Max Schmid, Câbleries & Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare (zur Frage 1.2 des Diskussionsleiters, L. Erhart): Die Anwendung von SF_6 als «Imprägniermittel» gestattet auch bei gewissen heute verwendeten Kabeltypen erhebliche Verbesserungen; dies im besonderen bei den Gasinnendruckkabeln mit Papier- oder Polyäthylenisolation. Im folgenden sind einige Angaben über das Verhalten von extrudierten Polyäthylenkabeln mit SF_6-Imprägnierung gemacht.

Durch die SF_6-Imprägnierung wird bei niedrigem Druck hauptsächlich die 50-Hz-Festigkeit beeinflusst. Es ergeben sich

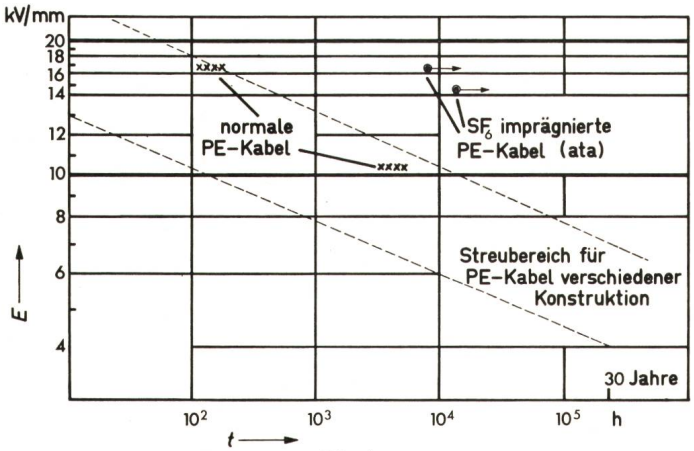


Fig. 1
50-Hz-Zeitstandfestigkeit von normalen und SF_6-imprägnierten Kabeln

dabei für das Mischdielektrium Festigkeit, die weder von SF_6 noch von unter normalen Fabrikationsbedingungen verarbeitetem Polyäthylen allein erreicht werden. Fig. 1 zeigt, wie die Zeitstandfestigkeit von aus der normalen Fertigung stammenden 20/1,5-kV-PE-Kabeln verbessert wird (bis heute ist noch kein Durchschlag aufgetreten). Zum Vergleich sind einige Durchschlagswerte (χ) von aus der gleichen Fertigung stammenden normalen Kabeln für Dauerprüfspannungen von 40 kV (10,8 kV/mm) und 60 kV (16,2 kV/mm) aufgetragen. Praktische Versuche mit PE-Kapeln höherer Spannung sind ebenfalls im Gange und zeigen ähnliche vielversprechende Ergebnisse (siehe auch CIGRE 1970, 21–02).

Die mittlere Lebensdauer wird für normale PE-Kabel der Einfachheit halber meist durch die Relation

$$t = \frac{3{,}1 \cdot 10^{11}}{E_{max}^{8,5}}$$

dargestellt; dies würde für die SF_6-imprägnierten Kabel mindestens eine Verdoppelung der zulässigen Betriebsfeldstärke bedeuten. Aus theoretischen Überlegungen und Versuchen geht jedoch hervor, dass eine Lebensdauercharakteristik mit einem vom Druck abhängigen Schnellwert, wie sie für Gasinnendruckkabel bekannt ist (Fig. 2), zutreffender sein dürfte. Es werden dadurch Betriebsfeldstärken möglich, wie sie für 220- und 400-kV-Kabel

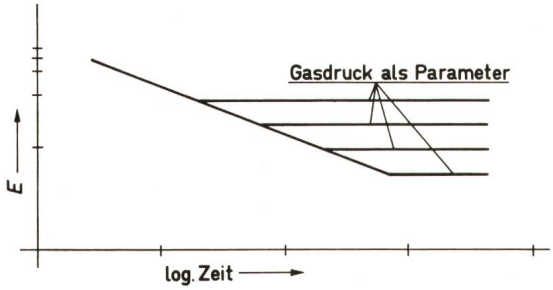


Fig. 2

notwendig sind. Durch die Verwendung von wärmebeständigeren Polyäthylenarten lässt sich dabei auch die heute noch etwas tief liegende Grenztemperatur beträchlich nach oben verschieben.

Diese vielversprechenden Eigenschaften sind speziell im Zusammenhang mit den immer häufiger in städtischen Netzen verwendeten SF_6-Schaltstationen interessant, da sich bei den hier notwendigen Kabeleinführungen ganz bedeutende Vereinfachungen realisieren lassen.

Walter Schmidt, Hochspannungslaboratorium und -Prüffeld der AG Brown Boveri & Cie., Baden (zur Frage 4.1 des Diskussionsleiters, L. Erhart, sowie zur Frage von Dr. Moeller):

Bezüglich Untersuchungen über den Einfluss einer bestimmten Partikelgrösse, deren Form und Stoffart auf die elektrische Festigkeit bei SF_6-Anlagen wird auf Veröffentlichungen der letzten Zeit verwiesen [1, 2][1]). Im vorliegenden Fall möchte ich den Begriff der technischen Reinheit etwa so definieren: Die technische Reinheit ist eine unter technischen Fabrikationsbedingungen bei Reinigung unter Verwendung von sauberen nichtfasernden Tüchern und wohl auch mit rückstandsfreien Flüssigkeiten erzielbare Sauberkeit, die unter Wahrung wirtschaftlicher Aspekte noch erreichbar ist. Die nachfolgenden Ausführungen sollen jedoch noch zeigen, dass man Mittel und Wege gefunden hat, die für die Hersteller von SF_6-Apparaten damit sich stellenden Aufgaben zu lösen.

Unter technischen Bedingungen kann an den erstellten Bauteilen mit wirtschaftlichen Mitteln nicht der Grad von Reinheit und Staubfreiheit erreicht werden, um die Streuungen der dielektrischen Festigkeit auf den unter idealen Bedingungen zu erwartenden Wert von nahezu Null zu reduzieren. Dabei ist zu unterscheiden zwischen passiven Bauteilen wie Sammelschienen und Verbindungsstücken und aktiven Bauteilen wie Leistungs- und Trennschaltern. In den letztgenannten Apparaten mit bewegten Teilen ist zusätzlich mit etwas Metallabrieb wie auch mit Reaktionsprodukten unter Lichtbogeneinwirkung zu rechnen. Diese werden allerdings zum grössten Teil durch geeignete Massnahmen reduziert und unwirksam gemacht. Beispielsweise können Metallteilchen durch Zurückhalten oder Auffangen in feldfreien Bereichen unschädlich gemacht werden. Die Auswirkungen der verbleibenden Restverunreinigungen sind, wie die nachfolgend beschriebene Untersuchung an einem 245 kV-SF_6-Leistungs-

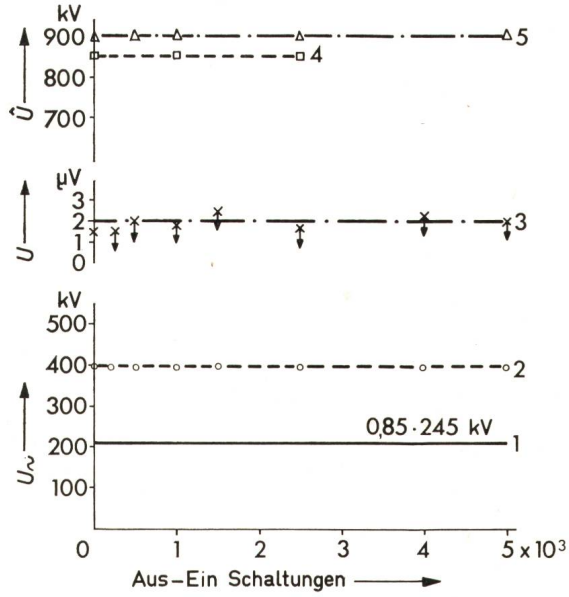


Fig. 1
Dauerversuch- und Prüfspannungen

1 Dauerversuch-Spannung 210 kV
2 Prüfspannung 50 Hz/1 min, 395 kV
3 Umweltstörpegel ohne und beim Dauerversuch mit Hochspannung
4/5 Prüfspannungen:
Stoss 1,2|50 μs, ±900 kV; Stoss 250|1700 μs, ±850 kV

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Diskussionsbeitrages.

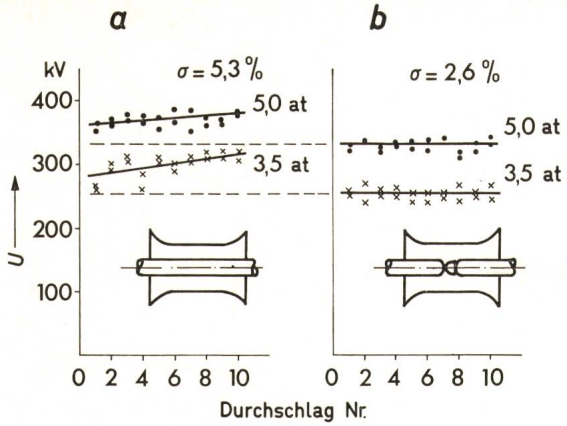


Fig. 2
Radialfeld

a ohne Feldstörung
b mit Kupplungsstelle
U Durchschlagspannung

schalter zeigt, bei geeigneten Vorkehrungen durchaus zu beherrschen. Die Fig. 1 zeigt das Resultat eines Dauerversuches, in dessen Verlauf der Schalter bis zu 5000 mal mechanisch unter Spannung geschaltet wurde. In regelmässigen Abständen wurden dabei auch die spezifizierten Prüfwerte mit Wechsel- und Stossspannung nachgewiesen. Die beim Dauerversuch durchgeführte Überwachung des Teilentladungsverhaltens bei sehr empfindlicher Messung ergab keine die Höhe des angegebenen Umweltpegels übersteigende Intensität.

Bei den Teilen einer gekapselten Anlage, die als passive Bauelemente gelten, liegt vielleicht bei jedem Teil eine spezifische Schwachstelle vor, welche für die Spannungsfestigkeit als Dimensionierungskriterium bestimmend wird. Für eine Kupplungsstelle zweier Leiter soll dies die Fig. 2 demonstrieren. Die 50 %-Durchschlagspannung an der sonst gleichen konzentrischen Anordnung wurde durch die Feldstörung an der Kupplungsstelle um 10 bis 15 % herabgesetzt. Die elektrische Festigkeit der Gesamtanordnung wird also durch die Kupplungsstelle bestimmt, wie dies durch die strichlinierten Linien angedeutet ist. Das Beispiel verdeutlicht aber auch die grössere oder kleinere Empfindlichkeit verschiedener Anordnungen auf den Einfluss von Fremdteilchen. Die Festigkeit der gleichförmigen ungestörten Anordnung nimmt bereits bei mässigem Gehalt an staubförmigen Partikeln mit der Anzahl der Durchschläge auf Grund einer Art Konditionierungsprozess zu. Für die nur in einem kleinen Bereich ihrer Oberfläche höherbeanspruchte Kupplungsanordnung besteht naturgemäss eine geringere Empfindlichkeit, was durch die im Mittel nur halb so grosse Standardabweichung zum Ausdruck kommt.

Die angeführten Beispiele zeigen, dass man Mittel und Wege gefunden hat, die von geringen Restverunreinigungen noch ausgehenden Isolationsminderungen zu beherrschen. Die im Entwicklungs- und Prototypstadium gekapselter Bauteile an kompletten Feldern durchgeführten Untersuchungen erwiesen darüber hinaus ausreichende Isolierfestigkeit auch der kompletten Anlagen. Die Fig. 3 zeigt ein solches Fabrikationsprototypfeld für eine Nennspannung von 245 kV, an dem neben einer ausführlichen Dauererprobung auch die entsprechenden Prüfspannungen: Normstoss ± 1050 kV und betriebsfrequente Wechselspannung 460 kV während 1 min verifiziert wurden.

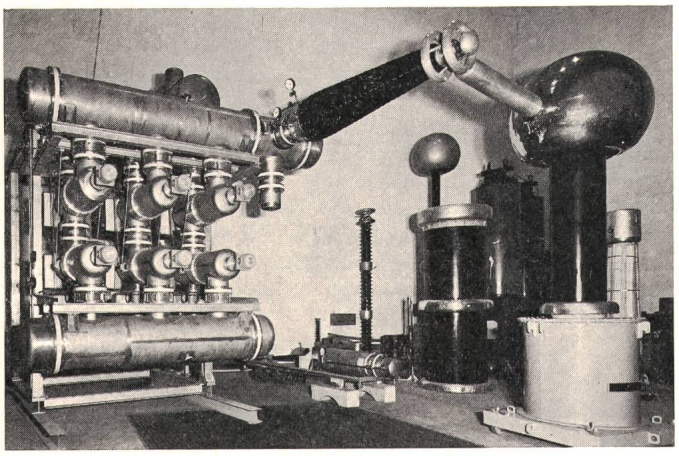


Fig. 3
245-kV SF_6-Schaltfeld im Dauerversuch

Literatur

[1] *A. Diessner* und *J. G. Trump:* Free conducting particles in a coaxial compressed-gas-insulated system. Trans. IEEE PAS 89(1970)8, p. 1970...1978.

[2] *A. H. Cookson* and *O. Farish:* Particle-initiated breakdown between coaxial electrodes in compressed SF_6. In: Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Technische Universität München, 9. bis 14. März 1972. Wissenschaftliche Beiträge, p. 343...349.

D. König, Calor-Emag AG, Ratingen: Gestatten Sie mir drei Bemerkungen zu den hier angeschnittenen Fragen:

1. Zur Frage «Prüfung von SF_6-isolierten Hochspannungsanlagen» vor der Inbetriebnahme möchte ich mitteilen, dass sich in der BRD ein Arbeitskreis gebildet hat, dem Vertreter aus allen hieran interessierten Bereichen angehören. Der Bildung dieses Arbeitskreises liegt die Erkenntnis zugrunde, dass es sich hierbei um eine recht bedeutsame Frage für die neue Technik der SF_6-isolierten Hochspannungs-Schaltanlagen handelt und ein intensiver Kontakt sowie nach Möglichkeit eine gemeinsame Meinungs- und Willensbildung für alle Beteiligten nur von Vorteil sein kann. In diesem Arbeitskreis sind bisher vertreten: von der Seite der Hersteller die Firmen AEG, BBC, Calor-Emag und Siemens, von der Seite der Anwender die Firmen RWE, BEWAG und HASTRA, ferner die Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen (SfH) sowie die Hochspannungsinstitute der Technischen Universitäten bzw. Hochschulen Berlin, Braunschweig und Darmstadt. Auf sachlicher Grundlage werden in diesem Arbeitskreis Fragen der Prüfung von SF_6-isolierten Hochspannungs-Schaltanlagen sowie Rohrgaskabeln untersucht. Hierzu gehören eine Tatbestandsaufnahme der bisherigen Praxis, eine Sammlung von Informationen über vorhandene Prüfspannungserzeuger sowie arbeitsteilige Untersuchungen zur Weiterentwicklung einer angemessenen Prüftechnik. Von vornherein wird keine der möglichen Spannungsformen (Gleichspannung, extrem niederfrequente Wechselspannung, Wechselspannung, Blitzstossspannung, Schaltspannung) ausgeschlossen. Im Rahmen der CIGRE 1972 ist auf das Bestehen dieser Arbeitsgruppe bereits hingewiesen worden.

2. Zu der Bemerkung von B. Gänger möchte ich ausführen, dass wir seinen Überlegungen nicht folgen können, wonach eine Gleichspannungsprüfung als akzeptable Hochspannungsprüfung einer SF_6-Anlage anzusehen sei. Im Falle, dass keine Teilentladungen in einer SF_6-Anlage vorhanden seien, was man auf Grund der Elektrodenanordnungen hier ja unterstellen dürfe, bereite eine Gleichspannungsprüfung keine Schwierigkeiten. Hierzu ist zu bemerken, das diese spezielle Voraussetzung der Teilenladungsfreiheit und der damit zusammenhängenden Spannungsfestigkeit ja gerade durch die Hochspannungsprüfung nachzuweisen ist und nicht von vornherein unterstellt werden darf. Mehr oder weniger grobe Montagefehler, bis hin zu dem berühmten, in die Anlage gefallenen Schraubenschlüssel, sollen ja gerade durch die Hochspannungsprüfung vor Ort erfasst werden. Wie durch unsere langjährigen Erfahrungen gezeigt wird, kommt hier der Gleichspannungsprüfung kein wesentlicher Aussagegehalt zu. Da bei der Gleichspannungsprüfung nicht die kapazitiven, sondern die ohmschen Widerstände schliesslich für die Spannungsverteilung massgebend sind, und es je nach der Zeitkonstante der inneren Bauteile mehr oder weniger lange dauert, bis sich die eigentliche Gleichspannungsverteilung im Innern der Anlage eingestellt hat, ist das Ergebnis der Prüfung im Falle der charakteristischen Isolieranordnungen in einer SF_6-Anlage zeitabhängig. Das Dilemma ist, hier kurz gesagt, dies: Prüft man zu kurz, findet man keine Fehler, die möglicherweise doch vorhanden sind. Prüft man zu lang, können auch einwandfreie Isolierelemente überschlagen. Eine offene Frage ist ferner, welche Höhe der Prüfgleichspannung im Vergleich zum Scheitel-

wert der Prüfwechselspannung sinnvoll zu wählen ist. Aus all diesen Gründen stehen wir der Gleichspannungsprüfung trotz ihrer einfachen Durchführbarkeit für den Fall der SF_6-Anlagen sehr skeptisch gegenüber und halten ihren Aussagewert für zu gering.

3. F. Bachofen, den Autor des 4. Berichtes der Themengruppe A möchte ich beglückwünschen für die hier vorgelegte gründliche Untersuchung, die in wirklich sehr umfassender Weise einen bisher in der öffentlichen Diskussion etwas zu kurz gekommenen Fragenkreis in schöner, systematischer Form behandelt. Es wird hier wieder einmal offenkundig, dass die Schaffung einwandfreier technischer Unterlagen zum Teil emotional aufgeladene Diskussionen entschärfen und objektivieren kann. Die in dem Beitrag gezogenen Schlussfolgerungen stimmen mit unserer Sicht des Problems überein. Die Frage der Feuchte im SF_6-Isoliersystem einer gekapselten Schaltanlage ist eine zwar sehr wichtige und bedeutende Frage, darf jedoch in ihrem Gewicht nicht so stark überschätzt werden, dass aus Furcht vor möglichen Komplikationen zu unwirtschaftlichen Lösungen gegriffen wird. Die Tatsache, dass dieses Faktum bisher hinter dem Nebel der Meinungen etwas zu kurz gekommen ist, hat bedauerlicherweise bei den Betreibern von SF_6-Schaltanlagen in einigen Fällen zu einer Unsicherheit geführt und daraus resultierend zu überspitzten Forderungen. Dies ist im Zeichen eines immer stärker werdenden wirtschaftlichen Druckes zu bedauren und nützt schliesslich keinem der Beteiligten. Der vorliegende Beitrag erfüllt also auch in diesem Sinne eine wertvolle Funktion.

Lassen Sie mich Ihnen zum Abschluss noch zwei Figuren zeigen, von denen die erste bereits bei der Tagung der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen im Herbst 1971 in Mannheim gezeigt wurde (Fig. 1). Sie sehen in dieser Figur den typischen Verlauf des Taupunktes im Gasraum eines SF_6-isolierten, ölarmen Leistungsschalters. Kurve 1 gibt den typischen Verlauf des Taupunktes mit der Zeit wieder. Der Anstieg hängt mit der Herstellung eines Gleichgewichtzustandes zwischen der in der Kapselung an den Wandungen trotz Evakuierens verbliebenen Restfeuchte und dem eingefüllten trockenen SF_6-Gas (Taupunkt ca. – 60 °C) zusammen. Anschliessend ergibt sich kein weiterer Anstieg des Taupunktes mehr. Die Darstellung hatte das weitere Ziel, nachzuweisen, dass diese Aussage auch für den Fall der Aluminiumgusskapselung zutrifft und dies selbst für den Fall einer relativen Feuchte von 100 % in der Umgebung des Schalters, der zu diesem Zweck mehr als ein Jahr lang in eine Kunststoff-Folie eingeschweisst war, innerhalb der diese Bedingung von 100 % relativer Feuchte vorlag (Kurve 3). Kurve 2 zeigt eine weitere Messung aus der Praxis, bei der die Evakuierzeit verlängert wurde, was sich an einer Verschiebung der sonst im Verlauf der gleichartigen Kurve 2 gegenüber Kurve 3 nach unten ausdrückt [1][1]).

Figur 2 gibt einen Begriff von den H_2O-Mengen/m in einem Sammelschienen-Rohr mit den angegebenen Abmessungen. Hierzu noch folgende Überlegung:

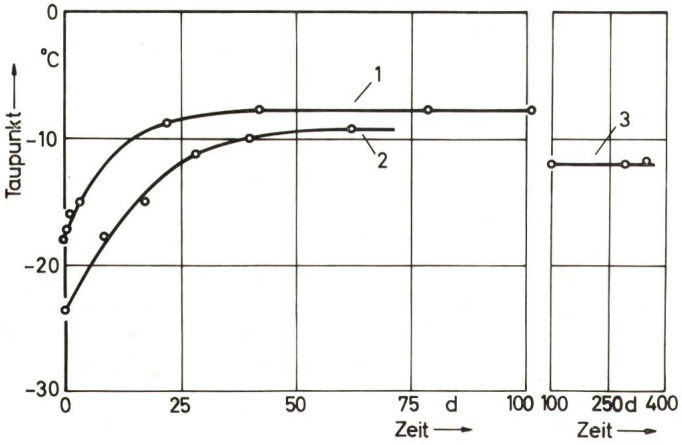
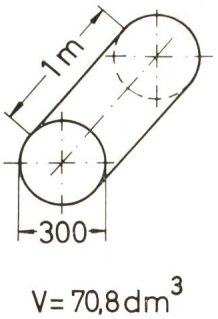


Fig. 1
Taupunktmessungen an SF_6-isolierten 110-kV-Schaltanlagen
Erläuterungen siehe im Text

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Diskussionsbeitrages.



τ	H_2O	Humidity		ppm_V
°C	g/m	1 bar	1,5 bar	3 bar
+10	0,643	12 200	8 180	4 090
+5	0,457	8 680	5 810	2 905
0	0,320	6 100	4 070	2 035
-5	0,210	4 010	2 670	1 335
-10	0,136	2 590	1 720	865
-20	0,054	1 030	688	344

Fig. 2
Zusammenhang zwischen Taupunkttemperatur τ [°C] und Wassermenge [g/m] in einem abgeschlossenen System
Erläuterungen siehe im Text

Eine SF_6-Schaltanlage stellt für die Betrachtung der hier interessierenden Vorgänge ein «abgeschlossenes» System dar. Für Kondensationsvorgänge steht nur der im Isoliergasraum eingeschlossene Wasserdampf zur Verfügung. Gekapselte SF_6-isolierte Schaltanlagen unterscheiden sich hierin grundsätzlich von konventionellen Schaltanlagen, die sich in einem «offenen» System befinden. In einem offenen System ist die Menge des für Kondensationsvorgänge zur Verfügung stehenden Wassers nicht begrenzt, da die umgebende Atmospäre ein praktisch unbegrenztes Wasserdampf-Reservoir darstellt.

In der Tabelle von Fig. 2 ist daher zur Veranschaulichung der bei SF_6-Anlagen relevanten Grössenordnungen zusammengestellt, welche Wassermengen sich bei bestimmten Taupunkt-Temperaturen in dem von einem Rohr von 300 mm ⌀ und 1 m Länge eingeschlossenen Gasraum überhaupt befinden. Wie die Tabelle zeigt, befinden sich bei einem Taupunkt von – 5 °C in diesem Rohrstück 0,210 g Wasser, bei einem Taupunkt von 0 °C dagegen 0,320 g und bei einem Taupunkt von + 5 °C 0,457 g.

Bei einer Temperatur des Gasraumes oberhalb des Taupunktes liegt dieses Wasser in gasförmiger Phase vor. Beim Unterschreiten des Taupunktes wird ein Teil in flüssiger oder fester Phase – je nach Tiefe der Temperatur – als Kondensat ausgeschieden. Kühlt z. B. bei einem gemessenen Taupunkt von + 5 °C das 1 m lange Rohr auf 0 °C ab, so wird die Differenz der Wassermengen entsprechend den Taupunkten von + 5 °C und 0 °C ausgeschieden, d. h. 0,457 g – 0,320 g = 0,137 g Wasser, entsprechend 0,137 cm^3 fallen als Kondensat aus. Dieses Volumen entspricht etwa drei Wassertropfen.

Denkt man sich hingegen dieses Volumen als Wasserfilm gleichmässig auf die Innenoberfläche eines Sammelschienenelementes verteilt, so ergäbe sich hierbei eine Filmdicke von 0,1 μm. Man erkennt an dieser Rechnung deutlich, um welch geringe Feuchtemengen es sich in SF_6-Anlagen auch bei verhältnismässig hohen Taupunktwerten handelt.

Aus Sicherheitsgründen sollte jedoch die Empfehlung, Taupunkt-Temperaturen von 0 °C in SF_6-Isoliersystemen nicht zu überschreiten, aufrechterhalten bleiben [2].

Ergänzend sei bemerkt, dass die Feuchte nicht nur als druckunabhängige Kenngrösse «Taupunkt», sondern häufig auch als relative druckunabhängige volumetrische Einheit ppm_V angegeben wird. Bei dieser Angabe bezieht man die in einem bestimmten Volumen vorhandenen Wasserdampfmoleküle auf die Zahl der ebenfalls in diesem Raum befindlichen SF_6-Moleküle. Eine Erhöhung des Druckes in diesem Raum bei gleicher Feuchte, d. h. gleichem Taupunkt, bedeutet daher Erhöhung der Zahl der SF_6-Moleküle und Sinken der ppm_V-Werte. Die angezeigte Tabelle enthält zur Ergänzung auch diese Feuchteangaben.

Literatur

[1] *W. Heise:* Isolationsprobleme in mit Schwefelhexafluorid isolierten Anlagen. ETZ-A 92(1971)12, S. 702...708.

[2] *H. Troger* e. a.: Résumé de l'expérience internationale sur l'installation et l'exploitation des postes blindés. Rapport Cigré N° 23-04, 1972.

Zusammenfassungen der Beiträge der Themengruppe B: «Isolationssysteme mit flüssigen Isoliermedien»

Überwachung von Öltransformatoren durch Gasanalyse

Von *E. Dörnenburg*

Mängel in Transformatoren verursachen, dass die Isolation zersetzt wird und Gase entstehen. Diese können entweder restlos im Isolieröl in Lösung gehen, so dass das Gassammelrelais (Buchholzschutz) den Fehler nicht anzeigen kann, oder sie können bis zum Buchholzschutz aufsteigen, der dann signalisiert, dass etwas Ungewöhnliches im Innern des Transformators vorsichgeht. Durch chemische Analyse der Gase, die im Öl gelöst sind und die im Buchholzschutz aufgesammelt sind, lässt sich nach einer im Zentrallaboratorium der AG Brown, Boveri & Cie. entwickelten Methode erkennen, ob wirklich ein Fehler vorliegt und welcher Art er ist. Die Grundlagen des Diagnoseverfahrens werden erörtert und die so erzielten Ergebnisse belegt.

Adresse des Autors:
Eberhard Dörnenburg, Abt. ZLC, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

Fortschritte in der Behandlung der Öl-Papier-Isolation

Von *H. U. Nabholz, G. Oesch* und *P. Gmeiner*

Drei Methoden zur Trocknung von Papierisolationen beim Bau von Grosstransformatoren sind heute üblich. Die Warmlufttrocknung, das Oil-spray- und das Kerosindampfverfahren. Strebt man eine Verkürzung des Trocknungsprozesses an, so zeigt sich, dass die Warmlufttrocknung für Vorbehandlung geeignet ist. Die Trocknung mit Kerosindampf hat sich durchgesetzt, wo grosse Massen auf weniger als 0,5 % Wassergehalt getrocknet werden sollen. Das Oil-spray-Verfahren eignet sich besonders für eine eventuell notwendige Nachtrocknung unmittelbar vor dem Imprägnieren.

Die Oil-spray- und Kerosindampfverfahren können auch zur Regenerierung gealterter Isolation eingesetzt werden.

Soll Öl aufbereitet werden, ist es oft nötig, den Wassergehalt zu überwachen. Es wird darauf hingewiesen, dass sich dazu neben der bekannten Karl Fischer-Methode auch die von der Panametrics entwickelte Sonde eignet.

Adresse der Autoren:
Dr. *H. U. Nabholz, G. Oesch* und *P. Gmeiner,* Micafil AG, 8048 Zürich.

Flüssige Isolierstoffe, heutiger Stand und Entwicklungstendenzen

Von *J. Schober*

Von der chemischen und petrochemischen Industrie wird heute eine Vielfalt von Flüssigkeiten angeboten, die durch ihre elektrischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften auch auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik interessante Anwendungsmöglichkeiten bieten.

Ein Vergleich mit den «klassischen» Isolierölen auf Mineralölbasis zeigt jedoch, dass dem Einsatz synthetischer Flüssigkeiten zumindest im Transformatorenbau vor allem wirtschaftliche Grenzen gesetzt sind, so dass auch für die Zukunft dem Mineralöl als flüssiges Isolier- und Kühlmedium eine führende Rolle vorausgesagt werden kann.

Anhand der Entwicklung der letzten Jahre sowie der erkennbaren Tendenzen für die Zukunft wird gezeigt, dass die Isolieröle an die ständig wachsenden Anforderungen, die an sie gestellt werden, angepasst werden konnten, so dass sie auch in technischer Hinsicht ihrer weiteren dominierenden Rolle gerecht werden können.

Adresse des Autors:
Johannes Schober, Ressortchef im Zentrallaboratorium, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

Kondensator-Mischdielektrikum aus Papier/Polypropylen-Folien

Von *D. Schlicht* und *G. Sharma*

Es werden die elektrischen Eigenschaften der trockenen biaxial gereckten Polypropylen-Folie beschrieben. Die Verträglichkeit dieser Folie mit Trichlordiphenyl und Mineralöl und die hohe Durchschlagsfestigkeit, sowohl der trockenen als auch der mit den genannten Flüssigkeiten imprägnierten Polypropylen-Folie, lässt diese Kunststoff-Folie für das Kondensatoren-Dielektrikum besonders geeignet erscheinen. Auf die Dielektrikums-Systeme Polypropylen-Folie/Papier, entweder mit Trichlordiphenyl oder mit Mineralöl imprägniert, wird ausführlich eingegangen. Die Trichlordiphenyl-Imprägnation des Polypropylen-Folien/Papier-Systems hat sich seit einigen Jahren im Leistungskondensatorenbau bewährt, die Imprägnation des gleichen festen Dielektrikums mit Mineralöl für spezielle Kondensatoren wird sich – nach Überzeugung der Verfasser – in Zukunft durchsetzen.

Adresse der Autoren:
Dr. *D. Schlicht* und *G. Sharma,* Micafil AG, 8048 Zürich.

Zusammenfassung des Diskussionsleiters, B. Gänger, zur Themengruppe B: «Isolationssysteme mit flüssigen Isoliermedien»

Die zu betrachtende Themengruppe beschäftigt sich mit den Eigenschaften und den Anforderungen an die hauptsächlichen Isolierstoffe der Transformatoren, also den Isolierölen und den Zelluloseprodukten sowie einem neuartigen Kondensatordielektrikum aus Kunststoffolie.

Zum Bericht von *E. Dörnenburg:*

In ölgefüllten Transformatoren können selbst schwache elektrische Entladungen im Innern durch eine Ionisations- (Teilentladungs-) Messung unter geeigneten Versuchsbedingungen mit grosser Sicherheit nachgewiesen werden. Im Herstellerwerk oder in einem Hochspannungslaboratorium kann man wohl immer mit solchen guten Messumständen rechnen, nicht jedoch am Aufstellungsort des Transformators, im Kraftwerk oder der Schaltstation. Dort sind erfahrungsgemäss die von den Leitungen und den Apparaten ausgestrahlten hochfrequenten Störimpulse so intensiv, dass schwächere Signale aus dem Transformator nicht mehr mit der gewünschten Sicherheit erfasst werden. Hier hat nun die erst in den letzten Jahren entwickelte Analyse der aus der Ölfüllung extrahierten Zersetzungsgase neue Möglichkeiten erschlossen; es werden dabei nicht nur die durch feine elektrische Entladungen in Spalten der Festisolation, im freien Ölraum oder an der Isolationsoberfläche geschaffenen Zersetzungsgase erfasst, sondern auch die durch thermische Überbeanspruchungen verursachten. Eine zeitliche Verschiebung zwischen Verursachung und Analyse muss allerdings in Kauf genommen werden.

Der Autor des Aufsatzes «Überwachung von Öltransformatoren durch Gasanalyse» hat selber in diesem Bereich wesentliche Forschungsarbeit geleistet und Fortschritte in der Messtechnik und der Diagnose erzielt.

Die Gründe für Gasbildung mögen nicht nur in Mängeln der Konstruktion, Werkstoffauswahl und Herstellung liegen, sondern oftmals auch in Mängeln beim Versand und der Montage in der Anlage. Grosse Transformatoren werden vielfach ohne Ölfüllung spediert und müssen dann am Aufstellungsort oft mit weniger vollkommenen Hilfsmitteln als in der Werkstätte des Herstellers betriebsbereit gestellt werden. Es hat sich gezeigt, dass gemeinhin das erste Betriebsjahr für einen Transformator am kritischsten ist und im weiteren sehr viel weniger für ihn befürchtet werden muss.

Als neu hat die Feststellung des Autors zu gelten, dass ausser etwas Luft auch noch Spuren anderer Gase sich immer in den Ölfüllungen völlig gesunder Transformatoren vorfinden. Sind diese nur auf die natürliche Alterung der Isolationen oder vielleicht auch auf gewisse Umstände bei der Fabrikation zurückzuführen? Die Grenzkonzentrationen reichen bis in den Bereich von Bruchteilen eines Promille oder teils sogar bis zu 1 %. Diese Angaben scheinen aus der Durchmessung von 72 Transformatoren erhalten worden zu sein. Summiert man anderseits die berichteten Fehlerfälle, so kommt man auf eine Zahl von rund 25. Muss daraus der Schluss gezogen werden, dass sich im Durchschnitt bei einem Viertel aller gelieferten Grosstransformatoren Schwierigkeiten durch schleichende Fehler ergeben haben?

Die vom Autor gegebenen Regeln zur Diagnose des Fehlers aus den Mischungsverhältnissen von je zwei Zersetzungsgasen stellen offensichtlich das Ergebnis einer langwierigen Auswertarbeit dar. Hier sei aber darauf verwiesen, dass von anderer Seite [1]) angegeben wurde, dass zur Kennzeichnung des Alterungsverhältnisses allein schon die Auswertung bezüglich CO_2 hinreichenden Aufschluss vermittle. Sind dazu Stellungnahmen möglich?

Zum Bericht von *H. U. Nabholz, G. Oesch* und *P. Gmeiner:*

Zur Erlangung eines hochwertigen dielektrischen Zustandes müssen die feuchtigkeitsaufnehmenden Isoliermaterialien getrocknet werden. Für solche aus Zellulose wird dabei ein Trocknungsgrad von ca. 0,3...0,5 % angestrebt; der bei Raumtemperatur gemessene Verlustfaktor von Isolierpapier hat dann auf rund 0,2 % abgenommen. Die bis vor wenigen Jahren fast ausschliesslich übliche Warmlufttrocknung zusammen mit Vakuumphasen führt aber wegen der nur langsamen Erwärmung sehr grosser Magnetgestelle auf störend lange Behandlungszeiten bei sehr grossen Einheiten. Eine Verkürzung der Durchlaufzeit und damit eine rationellere Fertigung ist möglich bei Anwendung der heute viel beachteten Kerosindampftrocknung oder auch nach dem etwas weniger bekannten Ölsprühverfahren; diese beiden werden im Bericht dargestellt. Vorteilhaft ist ferner, dass selbst ölige Aktivteile auf diese Weise getrocknet werden können und damit die Möglichkeit besteht, die vorgetrockneten Wicklungsblöcke noch vor dem Aufsetzen auf den Kern mit Öl zu imprägnieren und sie schliesslich ohne jede Nachteile nachzutrocknen. Dadurch ist die Feuchtigkeitsaufnahme während der Montage nur gering und es werden Längenänderungen des Blockes, die ein spezielles Nachstellen der Pressung erforderten, verhindert.

Es stellen sich folgende Fragen:

- Mit welchem Gewinn an Trocknungszeit kann im Vergleich zur klassischen Trocknung gerechnet werden?
- Wäre eine weitere Abkürzung der Trocknungsdauer durch eine weitere Erhöhung der Kerosindampftemperatur zulässig?
- Kann etwas darüber ausgesagt werden, ob die eine oder andere Trocknungsart schonender ist?
- Bestehen Bedenken wegen des Arbeitens mit dem Dampf einer leicht siedenden Flüssigkeit?
- Könnte die Kerosindampftrocknung oder das Ölsprühverfahren besondere Vorteile bei im Betrieb gealterten Transformatoren bieten, weil die Behandlung zu einem weitgehenden Entzug von Alterungsstoffen in der Isolation führen könnte?
- Sind die neuen Verfahren auch auf dem Montageplatz anwendbar?
- Im Bericht wird ein neuartiges Feuchtigkeitsmessgerät angeführt. Wie arbeitet dieses?

[1]) *P. Stoll, C. Vuilleumier:* Eine chromatographische Methode zur Absolutbestimmung von CO_2 in Transformatorenölen, Bull. SEV 62(1971)23, S. 1113...1115.

Zum Bericht von *J. Schober:*

Der Bericht «Stand und Entwicklungstendenzen bei Isolierflüssigkeiten» befasst sich mit den bei Isolierölen erreichten oder angestrebten Verbesserungen bezüglich niedriger Viskosität zur verbesserten Kühlwirkung, dem Alterungsschutz durch Inhibieren und Passivieren, sowie mit den sog. gasfesten Ölen, ferner mit den chlorierten Diphenylen, auch als Askarels bezeichnet. In Transformatoren mit erhöhten Brandschutzanforderungen bei Betriebsspannungen meist nicht über 30 kV haben diese sich gut eingeführt, in sehr viel stärkerem Masse jedoch bei Leistungskondensatoren, weil dabei der Vorteil der höheren Dielektrizitätskonstante von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Wenn die Alterungsbeständigkeit zur Diskussion steht, so denkt der Betriebsmann an das Verhalten der Isolation im Betrieb des Gerätes während langer Zeit, während der Laboringenieur dabei meist das Verhalten des betreffenden Stoffes unter speziellen Prüfbedingungen im Auge hat, die naturgemäss von denen des Betriebes abweichen.

Frage: Wie weit darf der Laborversuch als repräsentativ gelten?

Als Bewertungsmerkmal ist im Bericht die Säurezahl gewählt worden. Im speziellen Fall ergibt sich danach durch die Inhibierung eine nur 25%ige Verlängerung der Gebrauchsdauer des Öles. Verglichen mit Angaben von anderer Seite ist dies wenig.

Frage: Wird von einer Inhibierung nicht wesentlich mehr erwartet? Ist die Inhibierung mit Nachteilen verbunden? Kann sie ohne Einschränkung empfohlen werden?

Als gasfest pflegt man gemeinhin ein Öl zu bezeichnen, wenn es bei einer dauernd bestehenden Entladung in einem angrenzenden, vielleicht auch einem von ihm umschlossenen Gasraum etwas vom Gas aufzehrt. (Der Autor setzt allerdings eine etwas engere Definition an.) Dieses spezielle Vermögen hängt aber von den Begleitumständen, so etwa der Temperatur, der Art des Gases, der Höhe der angelegten Spannung, dem Volumen des glimmenden Gasraumes, der Dauer der Einwirkung und manchen anderen Faktoren ab. Da aber all diese Einflüsse im gegebenen Fall recht unterschiedlich sein können, ist zu fragen, ob der Begriff «Gasfestigkeit» nicht bloss ein Versprechen darstellt, das gar nicht eingehalten werden kann.

Zum Bericht von *D. Schlicht* und *G. Sharma:*

Im Fortschrittsbericht über die Verwendung von Polypropylenfolien in Verbindung mit Papier als Kondensatordielektrikum werden die günstigen Eigenschaften einer solchen Lagenisolation behandelt, nämlich gute Beständigkeit auch in warmem Isolieröl oder in Askarel, äusserst kleine dielektrische Verluste bei hoher Durchschlagfeldstärke sowie sehr gute Gleichmässigkeit selbst bei sehr kleinen Dicken. Dadurch lassen sich Grösse und Gewicht der Kondensatoren erheblich verringern und somit der Preis pro kvar. Die Papierbeigabe scheint erforderlich zu sein, um das Imprägniermittel auch in feine Zwischenräume zwischen Belag und Folie hinzubringen.

Frage: Bringt der niedrige Verlustfaktor nur den technischen Vorteil der höheren spezifischen Belastbarkeit ohne Risiko des Wärmekippens oder wirkt er sich auch nennenswert auf die eingesparten Jahres-Wattverluste aus?

Die Dauerstandfestigkeit der neuen Ausführung wird anhand einer empirischen Formel abgeschätzt. In dieser wurde vermutlich auch die Grösse der Dielektrikumsfläche berücksichtigt. Trifft dies zu? Bestehen noch sonstige Unterlagen über die zu erwartende Mindest-Lebensdauer?

Es wurde auch schon die Verwendung von anderen Kunststoffolien vorgeschlagen.

Frage: Können dazu Aussagen gemacht werden?

In der Literatur wurde auch über ca. 30 % höhere zulässige Feldstärken bei Verwendung eines Askarels als Imprägniermittel im Vergleich zu einer Mineralölfüllung, dann auch meist mit Zusatz eines stabilisierenden Mittels berichtet. Abgesehen vom Effekt der günstigeren Spannungsaufteilung, ist die höhere Beanspruchbarkeit vermutlich durch das Ausbleiben einer Nachwirkung nach einer elektrischen Überbeanspruchung bedingt.

Frage: Trifft diese Erklärung zu?

Wegen seines inhomogenen Aufbaues und der Gefahr von Fremdeinschlüssen muss Papier als Dielektrikum von Kondensatoren stets in mehr als nur einer Lage verwendet werden.

Frage: Ist diese Gefahr einer lokalen dünnen Stelle oder das Vorhandensein von Staubkörnchen usw. bei einer Kunststoffolie weniger gross?

Diskussionsbeiträge der Themengruppe B: «Isolationssysteme mit flüssigen Isoliermedien»

R. Müller, Nürnberg: Das von E. Dörnenburg entwickelte Auswertungsschema für im Öl gelöste Gase ist ein sehr wertvolles Hilfsmittel zur Interpretation von Fehlergasanalysen. Zu den Ausführungen über die Gleichgewichtszustände für die aus der Atmosphäre gelösten Komponenten der Luft und die in der Transformator-Isolierung durch thermische oder elektrische Ursachen gebildeten Zersetzungsgase ist zu bemerken: Die Unterschreitung des statischen Sättigungswertes für Luft, wie man sie bei Betriebsölen häufig feststellt, rührt nicht allein vom Sauerstoffverbrauch infolge der Oxydation der Isolierstoffe her, sondern wird auch durch Betriebseinflüsse des Gerätes (Vibrationen) merklich beeinflusst. Das Aufnahmevermögen des Öles für Fehlergase ist nicht durch den Spielraum der Sättigungsunterschreitung begrenzt. Die praktisch auftretende Fehlergaskonzentration ist wesentlich durch die Austrittsarbeit durch die Öloberfläche bestimmt. Daher ist die konstant bleibende Fehlergaskonzentration keine Anzeige dafür, dass die Gasquelle versiegt ist, d. h. der Fehler nicht mehr existiert.

Falls die Gasentwicklung zum Stillstand gekommen ist, muss es im Laufe der Zeit zu einer Konzentrationsabnahme kommen.

Die für den störungsfreien Betrieb eines Transformators angegebenen charakteristischen Grenzwerte der Gaskonzentration können nur als erste Orientierungshilfe dienen. Sicherlich sind diese Konzentrationen auch von der Belastung der Geräte und ihrer Betriebsdauer abhängig. Durch eine erweiterte Statistik wird man mehr Sicherheit in diesen Fragen erlangen können.

Zum Bericht von H. U. Nabholz und G. Oesch:

Der durch Anwendung der Vaporphase-Trocknung erzielbare Zeitgewinn liegt zwischen 50 und 70 % des mit dem konventionellen Heissluft-Vakuum-Verfahren erforderlichen Zeitaufwandes. Eine weitere, ins Gewicht fallende Zeitverkürzung durch Erhöhung der Kerosindampf-Temperatur ist nicht zu erwarten, da die übertragene Wärmemenge hauptsächlich aus der Kondensationswärme des Dampfes stammt. Ausserdem sind der Temperaturhöhe durch die Zellulose-Isolierstoffe und Zubehörteile des Transformators Grenzen gesetzt.

Die Vaporphase-Trocknung bei üblichen Dampftemperaturen zwischen 125 und 130 °C ist zweifellos schonender als die Heissluft-trocknung, da die Einwirkzeit der Temperatur wesentlich kürzer und der Sauerstoff weitgehend ausgeschlossen ist.

Bedenken wegen des Arbeitens mit dem Dampf leicht siedender Flüssigkeiten bestehen nicht, wenn entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Es kommt im wesentlichen darauf an, den Prozess so zu steuern, dass der Bereich explosiver Gemische mit Luft möglichst schnell durchlaufen wird und die Entstehung von Zündfunken in den Steuerungs- und Messvorrichtungen ausgeschlossen ist. Mit der Vaporphase-Behandlung ist eine wirksame Reinigung gealterter Transformatoren möglich. Bei Anwenden des Verfahrens auf Wicklungen alter Transformatoren liess sich der Verlustfaktor der ölgetränkten Isolierstoffe auf die Hälfte der mit konventionellen Reinigungsverfahren erreichbaren Werte senken.

Die Anwendung des Vaporphase-Verfahrens am Montageplatz von Transformatoren erfordert für die Schlussvakuumphase eine zusätzliche Heizung des Gerätes, um der Abkühlung bei der Verdampfung der Restfeuchtigkeit und des Wärmeübertragungsmittels entgegenzuwirken.

Zum Bericht von J. Schober:

Durch eine Inhibierung lässt sich die Lebensdauer von Transformatorenölen mindestens verdoppeln. In Europa liegen inzwischen praktische Erfahrungen mit inhibierten Transformatorenölen über zwei Jahrzehnte vor, die das günstige Betriebsverhalten dieser Öle bestätigen. Als Beispiel sei der Vergleich zweier 75-MVA-Maschinentransformatoren für 110 kV angeführt, die in Parallelschaltung etwa 16 Jahre lang mit gleicher Belastung in Betrieb sind.

Einer dieser Transformatoren hat eine normale, der andere eine inhibierte Ölfüllung. Vor einiger Zeit wurden folgende Alterungskennzahlen gemessen:

	Transformator mit: normalem Öl	inhibiertem Öl	
1. Neutralisationszahl	0,36	0.03	mgKOH/g Öl
2. Verlustfaktor bei 90 °C	660.10^{-3}	22.10^{-3}	mgKOH/g Öl

Um die Lebensdauer inhibierter Öle voll auszunutzen, erscheint es zweckmässig, sie in Verbindung mit wärmestabilisiertem Papier und Preßspan anzuwenden.

Zur Frage, inwieweit Laboralterungsprüfungen eine Vorhersage über das betriebliche Alterungsverhalten ermöglichen, kann gesagt werden, dass die in Deutschland seit Jahrzehnten angewendete Methode nach Baader (DIN 51 554) in ihrem Aussagewert durch die praktische Erfahrung der letzten 20 Jahre in hervorragender Weise bestätigt worden ist.

H. Grieder, AG Brown, Boveri & Cie., Baden: Wie im Bericht von H. U. Nabholz, G. Oesch und P. Gmeiner erwähnt ist, kommt für eine Transformator-Haupttrocknung praktisch nur das Heissluft-Vakuum- oder das Vaporphase-Verfahren in Frage.

Beim Vaporphase-Verfahren werden die vertikalen Partien des Aktivteiles «abgewaschen». Nach der Trocknung können bedeutende Mengen von Staub und Fasern in den Filtern der Trocknungsanlage gefunden werden, die bei der konventionellen Heissluft-Vakuum-Trocknung im Transformator verbleiben würden. Hinsichtlich der dielektrischen Qualität der Transformator-Isolation sind beide Verfahren zumindest ebenbürtig. Eine gewisse Überlegenheit des Vaporphase-Verfahrens ist zu vermuten. Aus Erfahrung von BBC kann mit einer Reduktion der Trocknungszeit um ca. 50 % gerechnet werden.

Durch eine höhere Aufheiztemperatur kann die anschliessende Vakuumdauer nur bedingt verkürzt werden, da sich in der Vakuumphase der Feuchtigkeitsgleichgewichtszustand einfach auf ein tieferes Niveau einstellt (von ca. 0,5 % auf ca. 0,2 %). Mit den heutigen Kriterien für das Beenden der Trocknung, wie Wasseranfall, tgδ und Druck, kann nicht direkt abgelesen werden, wann ein Feuchtigkeitsgehalt von ca. 0,5 % erreicht worden ist, weshalb die Trocknungsdauer auf Sicherheit ausgelegt wird.

Durch die höhere Temperatur, 130, 140 °C statt 120 °C, würden verschiedene Materialien stärker angegriffen, vor allem Kunststoffe, Farbe, Leime. Zudem würde der Vorteil der geringeren Depolymerisation der Zellulose durch die Trocknung unter Vakuum geschmälert, wenn der heisse Transformator noch für gewisse Zeit der Umgebungsluft ausgesetzt werden muss, sei es zum Verschrauben des Aktivteiles in den eigenen Kasten, sei es zum Nachziehen der Wicklungspressung usw.

Vom verfahrenstechnischen Standpunkt aus gesehen ist eine Vaporphase-Trocknung auf dem Montageplatz möglich und würde vor allem bei Transformatoren mit hohem Feuchtigkeitsgehalt eine bedeutende Trocknungszeitverkürzung bringen gegenüber den heute angewendeten Verfahren.

Hans-Joachim Vorwerk, Bernische Kraftwerke AG, Bern: Im Beitrag von H. U. Nabholz und G. Oesch wird das Kerosindampf-Verfahren zur Trocknung von Grosstransformatoren als zeitsparend erwähnt. Vergleicht man mit der Warmlufttrocknung, so wird der Vorteil der Zeitersparnis zumindest teilweise mit höheren Aufheiztemperaturen erkauft. Es wird eine Temperatur von ungefähr 125 °C genannt, die damit deutlich über dem bei Warmlufttrocknungen zu erwartenden Wert liegt.

Bei Grosstransformatoren wird heute ein beachtlicher Anteil Transformerboard verwendet. Im Beitrag von H. P. Moser (Heutiger Stand der Anwendung von Transformerboard in Leistungstransformatoren höchster Spannung) wird mit Rücksicht auf die Alterung und vor allem auf die thermische Beanspruchung des Transformerboards vor Trocknungstemperaturen oberhalb 110...120 °C gewarnt.

Für den Betreiber von Transformatoren ergeben sich daraus folgende Fragen:

1. Wird im Hinblick auf Transformerboard und Isolierpapier mit der Kerosintrocknung bereits eine obere zulässige Temperaturgrenze erreicht oder vielleicht sogar bereits überschritten und gibt es zu dieser Frage bereits schlüssige Versuchsresultate oder Erfahrungswerte?
2. Es wurde auf einige Vorteile der Kerosintrocknung beim Fabrikationsprozess hingewiesen. Welches sind nun die Vor- bzw. Nachteile dieser Trocknungsart im Vergleich mit der Warmlufttrocknung hinsichtlich des Betriebes und der Lebensdauer eines Transformators?

H. U. Nabholz und G. Oesch, Micafil AG, Zürich (zu Fragen von B. Gänger):

1. Die bemerkenswerte Verkürzung der Trocknungszeit beim Übergang von einer gut durchdachten Luft-Pulsationstrocknung zur Trocknung mit Kerosindampf hat 3 Hauptgründe:

a) Der Wärmeübergang bei der Kondensation ist viel grösser als beim Anblasen mit heisser Luft.

b) Mit dem Aufheizen beginnt gleichzeitig die Trocknung.

Die Punkte a) und b) ergeben eine Verkürzung der Aufheizzeit.

c) Da mit Kerosin, ohne Schädigung der Papierisolation, höher aufgeheizt werden kann als mit Luft, wird der stark temperaturabhängige Diffusionskoeffizient von Wasser in Papier grösser. Daraus resultiert eine Verkürzung der Vakuumphase.

Der Beitrag dieser 3 Punkte zur Verkürzung der Trocknungszeit ist vom Aufbau des Objekts abhängig. Die vorliegenden Erfahrungen zeigen, dass bei Grosstransformatoren die Trocknungszeit um 45...70 % zurückgeht. Für Objekte mit sehr dicker Isolation und wenig Eisen (Wandler) liegt die Einsparung zwischen 25 und 45 %.

2. Die heute übliche Temperaturgrenze von 125 °C ist wegen den Giessharzbauteilen (Schalter) im Transformator festgelegt worden. Höhere Temperaturen sind anzustreben, ergäben sie doch eine weitere Verkürzung der Vakuumphase.

3. Messungen haben gezeigt, dass die Papierdepolymerisation während der Trocknung mit Kerosindampf trotz der hohen Temperatur (125 °C) nicht grösser ist als bei der Lufttrocknung.

4. Die in einer Kerosinanlage vorkommenden Temperaturen reichen nicht aus, um Kerosin zu entzünden. Es braucht also neben einem Lufteinbruch noch eine Zündung, um eine Explosion auszulösen, und zudem müsste das entstehende Luft-Kerosindampf-Gemisch in dem relativ schmalen Bereich zwischen zu viel bzw. zu wenig Luftanteil liegen, damit ein Funken die Explosion auslösen kann.

Da in der Anlage immer Unterdruck herrscht, kann man die Verriegelung so auslegen, dass bei einem Rohrbruch nicht Kerosindampf austritt, sondern Luft eingesogen wird. Selbstverständlich sind theoretisch Umstände denkbar, die zu einer Explosion führen. Sie sind jedoch reichlich unwahrscheinlich. Darum bestehen solche Anlagen mühelos die amtlichen Zulassungsprüfungen.

5. Vorversuche mit gealterter Papier-Öl-Isolation haben gezeigt, dass durch die Trocknung mit Kerosin ein guter Waschefekt erzielt werden kann. Gut gegenüber Ölspray oder der Umwälzung von heissem Öl.

6. Die Ölspray- oder die Kerosindampfbehandlung kann auf dem Montageplatz erfolgen. Handelt es sich um nur oberflächlich feuchte Papierisolation, so kann das weniger aufwendige Ölsprayverfahren zu befriedigenden Resultaten führen.

K. Roewer, Egerpohl (zum Bericht von D. Schlicht und G. Sharma): Kunststoffolien werden neuerdings auch für kleine Kondensatoren der Niederspannungstechnik, z.B. für die Kompensation von Leuchtstofflampen und für die Unterdrückung der Störungen des Fernseh- und Rundfunkempfanges verwendet. Dabei ergeben sich folgende Probleme:

Welche Temperaturen und welcher Erhöhungsfaktor gegenüber der Nennspannung sollten für Lebensdauerprüfungen zur Ermittlung der Zuverlässigkeit zugrunde gelegt werden?

Welche Prüfungen sollten als Stückprüfung verwendet werden, um fehlerhafte Stücke einer Fertigung auszusondern (z.B. Verletzung der Folie durch scharfkantige Anschlusstreifen)?

D. Schlicht und G. Sharma, Micafil AG, Zürich: Die vom Diskussionsleiter aufgeworfenen Fragen möchten wir wie folgt beantworten:

1. Es sind eine ganze Reihe von Kunststoffolien im Kondensatorenbau bekannt. Siehe hierzu z. B. CIGRE-Bericht 15-04, 1970.

2. Es ist richtig, dass der niedrigere Verlustfaktor bei den Kunststoffolien/Papier-Kondensatoren nicht nur den technischen Vorteil der höheren spezifischen Belastbarkeit bringt, sondern auch für den Anwender einige Ersparnisse erbringt. In Fig. 1 sind die Verluste in W/kvar in Abhängigkeit von der Betriebsdauer für Papier/Askarel- und PP-Film/Papier/Askarel-Kondensatoren (Micovar) aufgetragen. Die anfängliche Differenz der Verluste beträgt ca. 1 W/kvar – nach längerer Betriebszeit wird dies noch günstiger bis zu einer Differenz von rund 1,4 W/kvar.

An einem Beispiel soll dies noch verdeutlicht werden:

Nimmt man eine 5 Mvar-Hochspannungs-Batterie, die 6000 h/a im Betrieb ist, an, und setzt man einen Preis der kWh von 3 Rp. an, so werden Energiekosten von rund Fr. 1080.– pro Jahr eingespart, d.h. ca. 2,5 % des Verkaufspreises. Betrachtet man hingegen die kapitalisierten Kosten pro Jahr, so kommt man auf Energiekosten-Einsparungen pro Jahr von ca. 20 % des Verkaufspreises.

3. Die nächste Frage betrifft ein schwieriges Thema, nämlich die Lebensdauer von Kondensatoren. Hierzu möchten wir in der Fig. 2 Ergebnisse zeigen, wie sie besonders in den USA gefunden wurden. Die Lebensdauer von Papier/Askarel- und PP-Folie/Papier/Askarel-Kondensatoren in Abhängigkeit von den die Lebensdauer stark beeinflussenden Faktoren Gradient × Temperatur ist im logarithmischen Maßstab aufgetragen. Diese beiden Kurven wurden an kleinen Musterkondensatoren ermittelt. Die untere Kurve wurde durch viele ausgeführte Leistungskondensatoren in den letzten Jahrzehnten bestätigt. Ergebnisse bis heute von im Betrieb befindlichen PP-Folie/Papier/Askarel-Kondensatoren zeigen, dass die obere Kurve auch für grössere Batterien gilt. Nach der heutigen Dimensionierung sollte sich bei den Micovar-Kondensatoren ca. die dreifache Lebensdauer ergeben.

Ein weiterer Hinweis, dass die Betriebssicherheit der PP-Folie/Papier/Askarel-Kondensatoren höher ist als diejenige der Kondensatoren ohne PP-Folie, ist die Ausfallrate, die man im 1. Betriebsjahr statistisch ermittelt hat:

Papier/Askarel-Kondensatoren	100 kvar	0,4 % Ausfallrate
Micovar-Kondensatoren	150 kvar	0,16 % Ausfallrate

Aus der Erfahrung heraus scheint der Flächeneffekt von untergeordneter Bedeutung gegenüber dem Produkt Gradient × Temperatur zu sein.

4. Eng an die letzte Frage schliesst sich die Frage nach der 30 % höheren zulässigen Feldstärke bei Verwendung des Askarels als Imprägniermittel im Vergleich zu einer Mineralölfüllung an. Die Erklärung in der Diskussionsübersicht trifft zu.

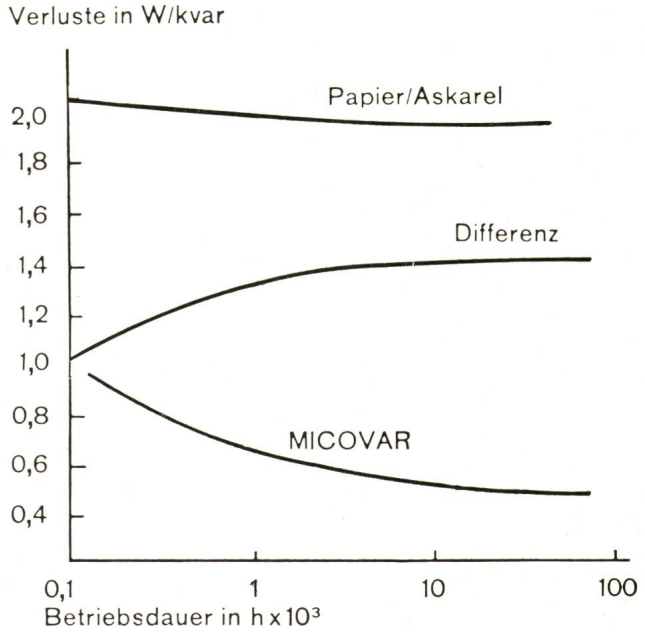


Fig. 1
Spezifische Leistungsverluste in Kondensatoren

Askarel zeigt kaum «Hysterese-Verhalten» der Ionisation, wie es Mineralöl hat. Darüber hinaus ist die DK des Askarels relativ gross und damit sehr günstig, die Stabilität, die Schwer-Brennbarkeit und die Flammwidrigkeit allgemein bekannt, so dass das Askarel im Leistungskondensatorenbau echte Vorteile, technischer und finanzieller Art, gegenüber anderen heute bekannten Imprägniermitteln bietet.

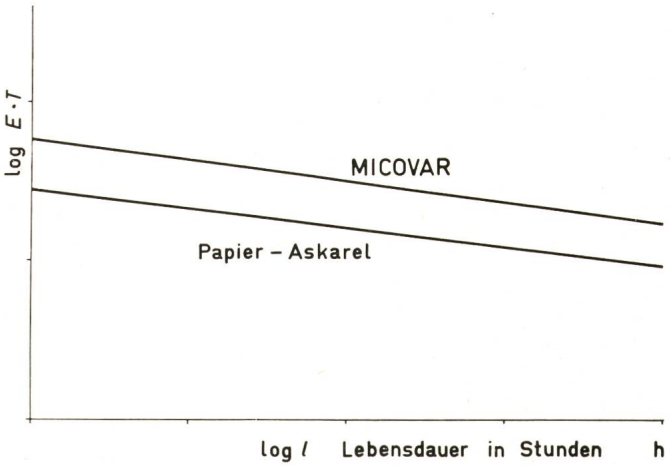


Fig. 2
Beziehung zwischen der Lebensdauer zweier Kondensatortypen und der Beanspruchung durch Temperatur und elektrisches Feld

5. Schliesslich sei noch kurz die letzte Frage beantwortet:

Die Gefahr von Fehlstellen oder das Vorhandensein von Staubkörnern ist bei Kunststoffolien weniger gross als beim Papier, aus folgenden Gründen:

a) Die Ausgangsstoffe der PP-Folien können reiner hergestellt werden.

b) Von der Struktur und der Herstellung her sind weniger Fehlstellen zu erwarten.

c) Das Imprägniermittel vermag etwaige Schmutz-Teilchen aus der PP-Folie herauszulösen.

d) Durch das Imprägniermittel quillt die PP-Folie, so dass Fehlstellen geschlossen werden.

Es ist selbstverständlich, dass die Herstellung und Verarbeitung der Kunststoffolien in besonders sauberen und klimatisierten Räumen erfolgen muss und auch erfolgt.

G. Georg, Institut für Hochfrequenztechnik der ETH, Zürich: Ich möchte mich zur Frage des Diskussionsleiters über die Verwendung anderer Kunststoffolien als Polypropylen äussern. In der Tat sind solche schon länger bekannt und z.B. als Polystyrol-Isolation bei Kondensatoren für hohe Frequenzen bis 10 kHz verwendet worden. Sie sind aber nicht billig und sind schon deshalb beim 50-Hz-Leistungskondensator eindeutig überrundet worden. So ist der Tabelle I in [4] aus der Literatur des Berichtes von D. Schlicht zu entnehmen:

	Preis pro kg	Preis pro m²
Zellulosefaser	100 %	100 %
Polystyrol	310 %	330 %
Polypropylen	130...230 %	117...207 %

Der wesentliche Unterschied liegt aber in einer ganz anderen Richtung. Polypropylen ist die einzige Kunststoffolie, die aus zwei Modifikationen des Polypropylens aufgebaut ist, und zwar in einem gezielt herbeigeführten Verhältnis. Durch Herauslösen eines Teiles der ataktischen Modifikation aus dem Kristallgerüst der isotaktischen Modifikation wird Raum geschaffen für das Eindringen der Imprägnierflüssigkeit in die Folie. Die Folie ist also durchimprägnierbar. Nicht nur werden Fehlstellen aufgefüllt und unschädlich gemacht, zugleich mit dem Imprägniermittel dringt auch dessen Epoxy-Zusatz in die Folie ein. Dort neutralisiert er die störenden Fremdionen der Folienzusätze und allfälliger Verunreinigungen. Das bedeutet, dass durch die Imprägnierung der Kunststoffolie deren elektrische Qualität verbessert wird. Durch Messung der Durchschlagspannung an trockener und an imprägnierter Folie lässt sich dieses Verhalten leicht nachweisen.

Das Interesse, andere Kunststoffolien im Leistungskondensator zu verwenden, ist nicht nur wegen der Preisunterschiede gering. Polypropylen ist als einzige eine Zweikomponentenfolie, die sich durch Imprägnieren in ihrer elektrischen Qualität verbessern lässt.

Zusammenfassungen der Beiträge der Themengruppe C, 1. Teil: «Aufbau und Eigenschaften von Isolationssystemen fester Isolierstoffe»

(Giess-Pressharze sowie Schichtstoffe)

Langzeitverhalten von Epoxidgiessharzen

Von *M. Vogelmann* und *J. D. Henny*

Die Einsatzmöglichkeiten von Giessharzen werden in vielen Fällen durch das Langzeitverhalten dieser Produktklasse eingeschränkt. Es sind dabei zwei grundsätzlich verschiedene Vorgänge zu unterscheiden: chemische Alterung und physikalische Alterung. Beide Prozesse, die sehr komplex sind, führen zu Eigenschaftsänderungen in elektrischer und mechanischer Hinsicht. Im Bericht werden Beispiele für die erwähnten Alterungsvorgänge, wie z. B. Oxidationsvorgänge, Relaxationsvorgänge, Nachwirkungsvorgänge u. a. besprochen sowie ihre Folgen beschrieben.

Adresse der Autoren:
Dr. *M. Vogelmann* und Dr. *J. D. Henny*, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

Neuere Epoxidharz/Glas-Schichtstoffe für hochbeanspruchte Isolierteile der Starkstromtechnik

Von *H. Fuchs* und *M. Liserani*

Lastaufnehmende und elektrisch isolierende Bauelemente für elektrische Maschinen wurden bis jetzt zum überwiegenden Teil aus teuren Glasseidengewebe-Laminaten gefertigt. Mit zunehmendem Erfolg sind in den letzten Jahren Schichtstoffe aus Glasmatten und vermehrt auch aus Rovinggeweben verwendet worden. Durch Einbettung dieser relativ preisgünstigen Trägerstoffe in eine Matrix aus cycloaliphatischen Epoxidharzen erhält man kriechstromfeste Isolierstoffe. Die Untersuchung der zur Bauteildimensionierung wichtigen mechanischen Eigenschaften in den drei Hauptebenen von hochfaserverstärkten Glaslaminaten – unter variablem Belastungswinkel – vertieft die Vorstellung des Konstrukteurs über «Möglichkeiten und Grenzen» dieser interessanten Werkstoffe. Aus der Praxis herausgegriffene Bildbeispiele sollen zur zuversichtlicheren Anwendung des Werkstoffes GFK im Maschinen- und Apparatebau anregen.

Adresse der Autoren:
Heinz Fuchs und *M. Liserani*, Micafil AG, 8048 Zürich.

Einfluss der natürlichen Verunreinigungen im Glimmer auf dessen dielektrisches Verhalten

Von *E. Diehl*

Es wird sowohl die Natur der dem Elektriker wohlbekannten schwarzen, braunen und roten Flecken (Bezeichnung: gefleckter Glimmer, stained mica usw.) untersucht und ihr Einfluss auf das dielektrische Verhalten des Muskowit-Glimmers (weitere Bezeichnungen Ruby-Glimmer, heller Glimmer, indischer Glimmer usw.) gezeigt.

Adresse des Autors:
Dr. *Ernst Diehl*, Leiter des Anwendungstechnischen Laboratoriums, Schweiz. Isola-Werke, 4226 Breitenbach.

Ausgewählte Probleme bei der Herstellung von neuen Isoliermaterialien aus Feinglimmerpapier

Von *R. Sauvin*

Das Feinglimmerpapier hat sich für die Isolierung der elektrischen Maschinen bewährt, als Ersatz der früher verwendeten Spaltglimmer-Folien. Es werden einige wichtige Produkte erwähnt, die für die Herstellung der Isoliermaterialien massgebend sind, insbesondere die Wichtigkeit einer richtigen Harzdosierung, die Notwendigkeit einer luftfreien Imprägnierung sowie der Einfluss des Harzzustandes für die Verarbeitung der thermohärtenden Produkte.

Adresse des Autors:
René Sauvin, Micafil AG, 8048 Zürich.

Polyurethan-Giessharz in der Hoch- und Niederspannungstechnik

Von *G. Rossi*

In neuerer Zeit sind die Polyurethan-Harze für die Bedürfnisse der Elektrotechnik weiter entwickelt worden und dürften dank ihrer vorzüglichen Eigenschaften auch in den Hochspannungsapparaten vermehrt Eingang finden. Die Giesstechnik gestattet die Anwendung billiger Formen, das Giessen unter Öl und die Herstellung sehr grosser Giesskörper. Im Bau von Hochspannungsdurchführungen kann das Polyurethan-Harz als Ersatz für Porzellan dienen. Als weitere Anwendungen werden Umgiessungen von Hochspannungskondensatoren, von Hochspannungsspulen beschrieben, ferner Stützer, Stützelemente und Schirmkörper.

Adresse des Autors:
Guido Rossi, Micafil AG, 8048 Zürich.

Zusammenfassung des Diskussionsleiters, W. Dieterle, zur Themengruppe C-1. Teil: «Aufbau und Eigenschaften von Isolationssystemen fester Isolierstoffe»

Die Themata dieser Gruppe sind so verschieden und streuen inhaltlich so breit, dass eine allgemein gültige Zusammenfassung nicht möglich ist, es sei denn, man stütze sich auf die Aussage hinsichtlich mechanischer Eigenschaften. Jede feste Isolation ist – je nach ihrer Funktion in mehr oder weniger ausgeprägter Weise – auch mechanisch in irgendeiner Weise beansprucht, und so werden in einigen Vorträgen die mechanischen Eigenschaften bevorzugt behandelt, wobei meines Erachtens die elektrischen Eigenschaften leider sogar etwas in den Hintergrund treten mussten.

Zu den einzelnen Aufsätzen möchte ich mit einem kurzen allgemeinen Teil Stellung nehmen und dann eventuell noch auf besondere Punkte und offene Fragen und die Notwendigkeit ihrer Abklärung hinweisen.

Zum Bericht von *M. Vogelmann* und *J. D. Henny:*

Dieser Artikel – von Chemikern geschrieben – behandelt in überlegener, klarer Weise die Probleme von Struktur und mechanischem Verhalten.

Zu begrüssen ist die Klarstellung des Begriffes der Grenztemperatur und der Versuch einer Trennung zwischen chemischer und physikalischer Alterung. Obwohl wir alle wissen, dass diese in ihrer Erscheinung und Auswirkung miteinander verkoppelt sind und sich überlagern, sind ihre Ursachen doch ganz verschiedener Natur.

Die Begriffe der Spannungsretardation und der Spannungsrelaxation hat man sich zu merken, sie sind für die Auswirkungen der Alterung fester Isolationen nützliche und deshalb wichtige und unentbehrliche Kriterien.

Die Frage des Einflusses von Nachschwund und mechanischen Spannungen auf die elektrischen Eigenschaften bleibt offen, und es wäre interessant, hierüber Aufschluss zu erhalten, denn der Konstrukteur elektrischer Apparate und Maschinen wird zwangsläufig auch mit diesen Fragen konfrontiert.

Es kann jedoch meines Erachtens mit Sicherheit festgestellt werden, dass – optimale Verarbeitung vorausgesetzt – das System, und damit denke ich vor allem an die Glasum-

wandlungstemperatur (GUT) und den Härtungsgrad, einen grösseren Einfluss auf das Verhalten (z. B. auf die Zeitbruchlinie) des Fertigproduktes hat als die Art der Verarbeitung.

Eine weitere, sehr wichtige Frage, die ganz allgemein, d. h. sowohl für elektrische wie aber auch für mechanische Beanspruchungen Gültigkeit hat und noch in keiner Weise befriedigend gelöst wurde, ist die nach der Übertragbarkeit der am Probekörper ermittelten Daten auf Formkörper oder fertige Objekte der Praxis.

Zur Frage der Messung innerer Spannungen – welche im besprochenen Bericht aus Relaxationsmessungen ermittelt wurden – wäre generell die Möglichkeit und Nützlichkeit der Anwendung anderer Methoden zu erwähnen. Als solche kommen in Frage:

a) Verwendung von Strain-gages;
b) Spannungsoptik;
c) Eingiessen elektrischer Bauteile, die bei mechanischer Belastung und Deformation ihre Charakteristik ändern, woraus auf den Spannungszustand ihrer Umgebung geschlossen werden kann.

Wo liegen die Vor- und Nachteile, kann überhaupt eine solche Aussage generell gemacht oder muss von Fall zu Fall die bestgeeignete Methode gesucht werden? Unter Umständen wären hierüber weitere systematische und vergleichende Versuche notwendig.

Als Alterungskriterium werden in diesem Aufsatz die mechanischen Nachwirkungserscheinungen erwähnt. Lediglich der Vollständigkeit halber möchte ich aber auch auf die elektrischen Nachwirkungserscheinungen – erfassbar z. B. durch Widerstandsmessungen, unter Umständen auch durch Verlustmessungen – hinweisen.

Liegen Erfahrungen unter Zugrundelegung beider Alterungskriterien vor?

Um die Anwendung der Giessharze zu optimieren – letzten Endes also um eine kostspielige Überdimensionierung zu vermeiden, eine sehr notwendige und für alle Giessharze berechtigte Forderung –, hat man sich zu überlegen, welche Versuche am Objekt notwendig sind. Entsprechende Vorschläge, möglichst untermauert durch praktische Resultate, wären ebenso nützlich wie erwünscht.

Damit komme ich zur abschliessenden Frage nach entsprechenden Versuchresultaten, die an anderen Giessharzen ermittelt wurden.

Können bereits Resultate vorgelegt werden?

Zum Bericht von *H. Fuchs:*

Dieser Bericht – hinter dem ein sehr grosser Arbeitsaufwand steckt – trägt speziell dem heterogenen Aufbau bei Verwendung der verschiedenen Trägermaterialien Rechnung.

Interessant sind die Anwendungsbeispiele und die aufgezeigten Tendenzen, nämlich:

a) Die Erzielung optimaler Festigkeiten bei Mattenlaminaten mit höheren Glasgehalten (höher, als dies in der bisherigen Literatur angegeben wurde), was offenbar eine Folge neuerer Verfahrenstechnik ist;
b) Kostensenkung der Produkte durch Anwendung preisgünstiger Glasfaserprodukte (Matten, Roving-Gewebe);
c) Erstaunlicherweise wird die Anwendung des billigsten Glasfaserproduktes, nämlich von Rovings im Filamentwindingverfahren, nicht erwähnt.
d) Den Prüfer interessiert die Frage nach der Reproduzierbarkeit der Resultate, an welcher Probenzahl wurden diese ermittelt?

Alle durchgeführten Versuche sind solche mit einachsiger Beanspruchung, schief zu den Hauptfaserrichtungen. Eine solche Beanspruchung kommt aber in Konstruktionsteilen kaum vor, sondern meist eine in der Schichtebene wirkende «ebene Beanspruchung».

Naturgemäss sind die Festigkeiten von Schichtstoffen in der Richtung zu ihrer Schichtebene niedrig, weil sich Verstärkungsfasern nur in der Schichtebene anordnen lassen. Man konstruiert deshalb von vorneherein so, dass keine nennenswerten Beanspruchungen vertikal zur Schichtebene auftreten. Die Untersuchungen unter schiefen Winkeln zur Schichtebene sind deshalb – mindestens aus der Sicht des Praktikers – von eher untergeordnetem Interesse.

Es wäre nützlich, und ich möchte mit dieser Feststellung versuchen, entsprechende Versuche anzuregen:

a) Festigkeiten in den Hauptrichtungen, und zwar z. B. bei Zimmertemperatur und einer höheren Temperatur (z. B. bei 150 °C?) sowie
b) Zeitstand- und Wechselfestigkeit von Laminaten.
c) Es ist bekannt, dass bei GFK schon bei Spannungen, die weit unter der Bruchgrenze liegen, Schädigungen in Form von Rissbildung (Mikrorisse in der Matrix oder an der Glas-Harz-Grenzfläche) oder Delamination aufgetreten sind. Der Einfluss solcher Schäden – insbesondere auf die elektrischen Eigenschaften – ist meines Wissens noch recht wenig untersucht.

Zum Bericht von *E. Diehl:*

Diese Arbeit gibt eine nützliche und übersichtliche Darstellung des recht komplexen Zusammenhangs zwischen dem mineralogischen und chemischen Aufbau und dem elektrischen Verhalten der – erstaunlich vielen und vielfältigen – Glimmerarten und deren Vorkommen. Es ist die erste mir bekannte brauchbare Abklärung über die Natur von Flekken und Verunreinigungen im Glimmer.

Dazu einige Fragen:

a) Gibt es eine Möglichkeit, das verschiedene dielektrische Verhalten (etwa relative Dielektrizitätszahl ε_r, dielektrischer Verlustfaktor tg δ) aus dem Kristallaufbau zu erklären?
b) Besteht die Möglichkeit, die z. T. widersprechenden Aussagen über die Durchschlagsfestigkeit von klarem und geflecktem Glimmer zu deuten, wenn man die Leitfähigkeit der Einschlüsse berücksichtigt?

Zum Bericht von *R. Sauvin:*

Diese Arbeit gibt einen ausgezeichneten Überblick über die bei der Verwendung von Glimmerpapier mit thermohärtbaren Harzen auftretenden Schwierigkeiten. Ausser dem Harzgehalt im Glimmerpapier sind alle anderen Parameter von der Qualität des Harzes abhängig.

a) Die in einer Figur dargestellten Verhältnisse gelten m. E. nur, wenn das Bindemittel eine relativ niedrige Wärmestandfestigkeit erreicht im Vergleich zur Alterungstemperatur.
Wurden Versuche mit höher wärmebeständigen Harzen durchgeführt, und welche Verhältnisse haben sich gezeigt?
b) Kann für eine bestimmte Anordnung die optimale Fliesszähigkeit des Harzes zahlenmässig festgelegt werden? Welches sind diesbezügliche Erfahrungen?

Zum Bericht von *G. Rossi:*

Die Verwendung von PUR-Harzen in der Elektrotechnik, z. B. als Kabelvergussmasse, kalthärtende Mischungen zur Isolation von Klein-Transformatoren, Spulen und dergleichen, ist schon seit längerer Zeit bekannt. Relativ neu ist die Anwendung von PUR-Harz-Systemen für Freiluftanwendungen. Meines Wissens wurden erstmals PUR-Isolatoren anläss-

lich der Kunststoffmesse 1971 in Düsseldorf propagiert und gezeigt.

Im Vergleich zu Epoxidharzen, die nun schon seit gut 25 Jahren in der Elektroindustrie bekannt sind, müssen PUR-Harze noch als ein relativ junges Isoliermaterial der Elektrotechnik bezeichnet werden. Der Vergleich mit den bisher erfolgreich verwendeten Giessharzen wird sich deshalb für fast alle Anwendungen aufdrängen.

Im Bericht möchte ich die folgenden Gedanken als neu bezeichnen und deshalb besonders hervorheben:

a) Die Verwendung von verlorenen Formen und damit die Möglichkeit der einfachen Verarbeitung von elektrisch hochbeanspruchten Teilen;
b) Das Giessen in Kontakt mit Isolieröl.

Es wäre wertvoll und für vergleichende Anwendungen ausserordentlich nützlich, wenn die für die Verarbeitung besonders wichtigen Eigenschaften – etwa in Form einer Tabelle – denen anderer und bisher mit grossem Erfolg verwendeter Giessharze gegenübergestellt würden.

Eine weitere, vergleichende Gegenüberstellung wäre erwünscht zu den Aussagen bezüglich Freilufttauglichkeit unter Gleichspannung.

Das Problem der Aussenbewitterungs- oder Freiluftbeständigkeit ist sehr komplexer Natur. Eingehendere Auskunft über die Art der Durchführung solcher Versuche wäre erwünscht:

a) Wie wurden diese Prüfungen durchgeführt?
b) Wurden auch andere Beanspruchungen als «Industrie-Atmosphäre Zürich» gewählt?
c) Sind die Resultate statistisch untermauert, d. h. an welcher Probenzahl wurde geprüft?
d) Welche Eigenschaften wurden als Prüfkriterien den Versuchen zugrunde gelegt?
e) Welche Resultate der bekannten Laborprüfungen bezüglich Kriechstromfestigkeit, Lichtbogenbeständigkeit und Erosion wurden an entsprechenden Materialproben erhalten? (Eventuell ebenfalls eine vergleichende Zusammenstellung.)

Die Propagierung von PUR – besonders für Freiluftanwendungen – ist interessant, bedarf aber sicher, wie dies auch für die anderen Kunststoffe der Fall ist, noch weiterer gründlicher Vorarbeit.

Bei Vorliegen günstiger Resultate werden die PUR-Harze ganz allgemein dazu beitragen, den Durchbruch der Kunststoffe für Freiluftanwendungen zu beschleunigen, wobei aber ein eventuelles Versagen keinesfalls auf andere Kunststoffklassen übertragen werden dürfte.

Diskussionsbeiträge der Themengruppe C-1. Teil: «Aufbau und Eigenschaften von Isolationssystemen fester Isolierstoffe»

D. König, Calor-Emag AG, Ratingen (zum Bericht von M. Vogelmann und J. D. Henny): Auf die Frage nach dem Teilentladungsverhalten von Epoxid-Giessharzen möchte ich zu dieser Frage sowie zu dem Beitrag von M. Vogelmann und J. D. Henny kurz Stellung nehmen. Dem Beitrag könnte man entnehmen, als sei es bedenklich, Epoxid-Giessharz für elektrisch hoch beanspruchte Bauelemente zu verwenden, da jedoch im Einzelfall nicht immer genau übersehbare Langzeiteffekte vorliegen können. Hierzu gehört auch die Befürchtung eines Abschrumpfens des Epoxidharzes von Eingusselektroden. Daher wohl auch die besorgte Frage nach dem Langzeit-Teilentladungsverhalten, von Epoxidharz-Isolierungen.

Von unseren langjährigen Betriebserfahrungen mit Epoxidharzen her können wir aus der Praxis heraus diesen Befürchtungen entgegenhalten, dass zumindest für den Bereich der von uns verwendeten Epoxidharz-Systeme derartige Langzeiteffekte nicht bekannt sind.

Die genannten Befürchtungen waren vor einem reichlichen Jahrzehnt bei einer Reihe von Anwendern in der Tat vorhanden, haben sich jedoch als nicht berechtigt erwiesen. Wir haben eine Reihe von Schaltgeräten nach fast zehnjährigem Einsatz in der Praxis im Werk genaustens untersucht und dabei festgestellt, dass sich an den entscheidenden Punkten keinerlei Veränderungen im Laufe der Betriebszeit ergeben haben. Als Nachweis hierfür diente uns die elektrische Teilentladungs-Messung, die an den betreffenden Bauteilen nach Ablauf der Betriebszeit exakt die gleichen Werte ergab wie bei Auslieferung. Voraussetzung hierfür ist allerdings Teilentladungsfreiheit bei Betriebsspannung am ausgelieferten Teil.

G. Hux, Sprecher + Schuh AG, Oberentfelden (zum Bericht von M. Vogelmann und J. D. Henny): Aus zahlreichen Publikationen ist bekannt, dass seit geraumer Zeit Anstrengungen unternommen werden, um Freiluft-Hochspannungsisolatoren aus gefüllten cycloaliphatischen Epoxidharzen anstelle von Porzellan einzusetzen. Dabei handelt es sich meist um Vollkörper wie Stützisolatoren, Langstäbe usw., die nach einer Laborphase in die Erprobung des Langzeitverhaltens im Hochspannungsnetz übergegangen sind.

Zusätzliche Anforderungen an das Giessharz treten aber bei der Verwendung für innendruckbeanspruchte Hohlkörper, wie zum Beispiel bei glasgewebearmierten Schaltkammern, auf wie

a) Energieaufnahmevermögen für die Innendruckstösse;
b) Elektrische Längsdurchschlagfestigkeit an der Grenzfläche zwischen Giessharz und Armierung, u. a.

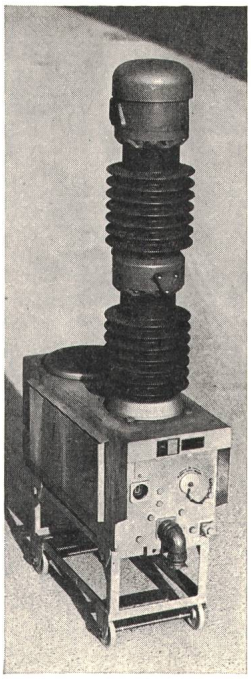
Nach vorangegangenen längeren Laborversuchen zur Bestimmung der optimalen Giessharz-Füllstoff-Formulierung haben wir im Jahre 1970 einen 17-kV-Streckenschalter für die SBB mit derartigen Isolatoren ausgerüstet und Langzeitversuche im Netz gestartet (Fig. 1). Erste Zwischenresultate sind in der Tabelle zusammengestellt.

Parallel zu diesen betriebsmässigen Prüfungen kontrollieren wir seit mehr als 10 Jahren Materialmuster und realistische Ge-

Vergleichsmessungen im Rahmen eines Langzeitversuches	Neuzustand November 1970 (sauber)	1. Zwischenmessung Februar 1972 (verschmutzt) [1]
Oberflächenwiderstand, Phase–Erde		
– auf zylindr. Fläche, 10 mm Länge	$11 \cdot 10^6$ MΩ	$3{,}0 \cdot 10^6$ MΩ
– über eine Schirmteilung	$25 \cdot 10^6$ MΩ	$22 \cdot 10^6$ MΩ
Glimmeinsatz	> 60 kV	> 60 kV
Prüfspannung 1 min, 50 Hz, trocken		
– Eingang – Ausgang	138 kV	133 kV
– Phase – Erde	132 kV	124 kV
Stosshaltespannung		
– Eingang – Ausgang	244 kV	244 kV
– Phase – Erde	211 kV	211 kV

[1]) Verschmutzung durch «Bahnhofatmosphäre» (z. B. Bremsstaub). Alle Messwerte liegen innerhalb der zulässigen Grenzen.

Fig. 1



räteteile bei Industrieatmosphäre und unter spezifisch erhöhter elektrischer Beanspruchung auf Dauerprüfständen.

Die heutige Kenntnis des Materialverhaltens und die laufenden Fortschritte in der Verarbeitungstechnik lassen erwarten, dass nach weiteren Erprobungen auch innendruckbeanspruchte Giessharzisolatoren für Hochspannungsschalter erfolgreich eingesetzt werden können.

M. Vogelmann, AG Brown, Boveri & Cie., Baden. Zu den aufgeworfenen Fragen sei folgendes festgestellt:

a) Der Einfluss mechanischer Spannungen auf das elektrische Verhalten von Epoxidgiessharzen ist bekannt und bereits auch näher untersucht. Auf welche Art die Spannungen in ein Teil gebracht werden, sei es z. B. durch Reaktionsschwund oder thermische Einwirkung, ist meiner Meinung nach nicht von Bedeutung.

b) Die Frage der Übertragbarkeit von an Probekörpern ermittelten Daten auf das fertige Teil ist bis heute noch nicht gelöst. Rechnerische Methoden können nicht alle Parameter erfassen bzw. sie werden so kompliziert, dass es vernünftiger erscheint, am fertigen Formteil oder eventuell an einem Modell die entsprechenden Werte zu ermitteln. Wie stark die an Stäben im Zugzeitstandversuch gewonnenen Werte von den an Formteilen gemessenen abweichen, haben Vergleichsversuche an einem Modellzylinder mit eingegossenen Armaturen gezeigt. Die an Normstäben erreichten Langzeitfestigkeiten konnten am Modell nur zu ca. 30% ausgenützt werden. Die meisten aus Stabversuchen erhaltenen Resultate haben Vergleichscharakter oder sind als Richtwerte zu betrachten. Die echte Beanspruchbarkeit eines Teiles ist direkt am Formling zu ermitteln.

c) Im Rahmen eines Messprogrammes sind bei BBC neben mechanischen Nachwirkungseffekten auch elektrische Nachwirkungen gemessen worden (tg δ).

d) Welche Methode zur Messung der inneren Spannungen bzw. zur Messung des Abbaus innerer Spannungen zur Anwendung kommt, ist meines Erachtens von sekundärer Bedeutung. Es muss nur sichergestellt sein, dass die Messeinrichtungen den Spannungszustand nicht beeinflussen. Vergleichende Untersuchungen sind mir im Moment nicht bekannt. Sie wären sicher für die Beurteilung von Daten, die von verschiedenen Autoren stammen, interessant.

H. Fuchs, Micafil AG, Zürich. Zur Zusammenfassung von W. Dieterle nehme ich wie folgt Stellung:

Präzisierung

Im Beitrag soll gezeigt werden, dass im Grossmaschinen- und Apparatebau anstelle von teuren Glasseidengewebelaminaten vorteilhaft preisgünstige, kriechstromfeste Glasmatten- und Roving-gewebelaminate eingesetzt werden können. Allseitige Festigkeitsuntersuchungen sollen das Material-Feeling des Konstrukteurs fördern.

Einschränkend werden im Beitrag nur Plattenlaminate der Isolationsklasse F behandelt. Diese Platten werden im Heissverfahren hergestellt und haben üblicherweise Schichtdicken zwischen etwa 5 ... 200 mm. (Es gibt selbstverständlich eine Reihe anderer Verfahren, um Glaslaminate herzustellen. Diese sollen aber im Sinne des Beitrages nicht behandelt werden.)

Bauteile für die Hochspannungstechnik werden deshalb aus Platten herausgearbeitet, weil wegen der üblichen kleinen Seriengrössen gleicher Bauteile andere Herstellungsverfahren in der Regel unwirtschaftlich sind. Aus diesem Grunde werden oft auch Teile zusammengeklebt und verstiftet.

Bemerkungen zu den einzelnen Diskussionspunkten

Filamentwinding-Verfahren. Es ist richtig, dass bei diesem Verfahren billige Rovings verwendet werden. Rotationskörper stehen aber nicht zur Diskussion, sondern der reine Vergleich verschiedenartig aufgebauter GFK-Platten der Isolationsklasse F.

Stellt man GFK-Platten nach dem Filamentwinding-Verfahren her, was grundsätzlich möglich ist und für Sonderanwendungen gelegentlich auch gemacht wird, so halten diese «Filament-Platten» kaum einen Preisvergleich mit solchen aus Glasmatten stand. Problematisch ist auch die Herstellung dicker Platten sowie die «interlaminare Haftung».

Probenzahl und Reproduzierbarkeit. In den drei Hauptachsen wurden mindestens 6 Prüfkörper pro Wert geprüft und mit Werten aus anderen Versuchsreihen verglichen. Für die Bestimmung der Werte schief zu den Hauptachsen wurden pro Prüfwinkel mindestens 3 Körper geprüft und durch Aufzeichnen der sich ergebenden Funktion in Abhängigkeit des Belastungswinkels graphisch gemittelt. Die Angaben sind vorsichtig ausgedrückt, man findet bei Nachmessungen eher bessere Werte.

Beanspruchung der Laminate schief zur Hauptfaserrichtung und schief zur Schichtebene. In diesem Punkt liegt offenbar auch die Sicht des einen Praktikers nicht in der gleichen Ebene wie die Sicht des anderen Praktikers, nämlich bezüglich des praktischen Wertes einer solchen Untersuchung.

Ich persönlich meine, dass Bauteile, wie sie jährlich in einigen 10 t in der Schweiz in Elektromaschinen eingebaut werden, gelegentlich auch schief zur Faserrichtung oder Schichtebene beansprucht werden müssen und dass die genaue Kenntnis des spezifischen Werkstoffverhaltens dem Maschinenbauer ein wertvolles Konstruktionsmittel ist. Ein Teil der Problematik liegt darin, dass konventionelle Maschinenelemente aus Metall mit solchen aus GFK kombiniert werden müssen und dass die Krafteinleitung nicht immer in idealer Weise erfolgen kann.

Ein kleiner Beitrag zur Schulung des GFK-Denkens soll der Hauptzweck meiner Arbeit sein.

Beispiele

1. Ca. 20 t Abstützplatten sind im Supraleitermagnet der CERN eingebaut. Ursprünglich stand die Verwendung von Glasseidengewebelaminat zur Diskussion mit den in Kett- und Schussrichtung bevorzugten Eigenschaften. Bessere Allroundeigenschaften insbesondere bei sehr tiefen Temperaturen und günstigerer Preis führten zur Verwendung von Mattenlaminat.

2. Abstützwinkel für Statorwickelkopf. Die Platte kann im Betrieb bis zu 20° schief zur Schichtebene beansprucht werden. Die entsprechenden Werte $x \ldots z$ oder $y \ldots z$ können jetzt bereits vom Konstrukteur den vorliegenden Tabellen entnommen werden zur richtigen Bauteildimensionierung.

3. Schraube. Die Schraube oder Gewindestange ist ein unerhört praktisches Bauelement. Beim Betrachten der Spannungstrennlinien für Zug- und Druckbeanspruchung im Gewindekopf wird ersichtlich, dass man Beanspruchungen schief zur Faserrichtung und zur Schichtebene in Kauf nehmen muss, will man diesen Teil aus GFK herstellen.

Will man ein Magnetblechpaket antimagnetisch und elektrisch isolierend zusammenspannen, so ist eine GFK-Gewindestange, mittels Muttern in der Länge verstellbar und mittels dehnungsaufnehmenden GFK-Federscheiben ausgerüstet, ein universelles Spannelement, das kaum durch ein GFK-gerecht-konzipiertes Element ersetzt werden kann.

G. Liptàk, Brown, Boveri & Cie., Baden: E. Diehl kommt in seinem interessanten Bericht zur Schlussfolgerung, dass der Einfluss von Einlagerungen in Glimmersplittings auf die elektrische Festigkeit für die praktische Anwendung kaum von Bedeutung sei. Dies deckt sich nicht ganz mit unseren Erfahrungen. Bei der Fabrikationskontrolle (Spannungsprüfung) von mit Asphalt-Micafolium isolierten Wicklungsteilen kam es nämlich zu einer gewissen Zeit zu einer ungewohnten Häufigkeit von Durchschlägen der Stabisolation am Nutaustritt, also im Bereich, wo sowohl eine Spannungsbeanspruchung in Quer- als auch in Längsrichtung besteht. Die Untersuchungen haben damals recht eindeutig gezeigt, dass überdurchschnittlich starke Verunreinigungen in den einzelnen Splittings den Durchschlag begünstigten. Fig. 1 zeigt, dass der Defektverlauf eindeutig entlang der Einschlüsse verlief. Nach Beschaffung von neuem Material mit klarem Glimmer und gleichzeitiger verschärfter Kontrolle der verwendeten Glimmerqualitäten traten späterhin ähnliche Ausfälle nicht mehr auf. Auf Grund dieser Erfahrungen scheint uns eine sorgfältige Kontrolle auf Glimmerverunreinigungen nach wie vor angezeigt, was bei Splittings auch auf einfache Weise möglich ist. Weil bei meiner Firma heute jedoch ausschliesslich Glimmerpapiere zur Verwendung gelangen, möchte ich noch die folgenden Fragen stellen:

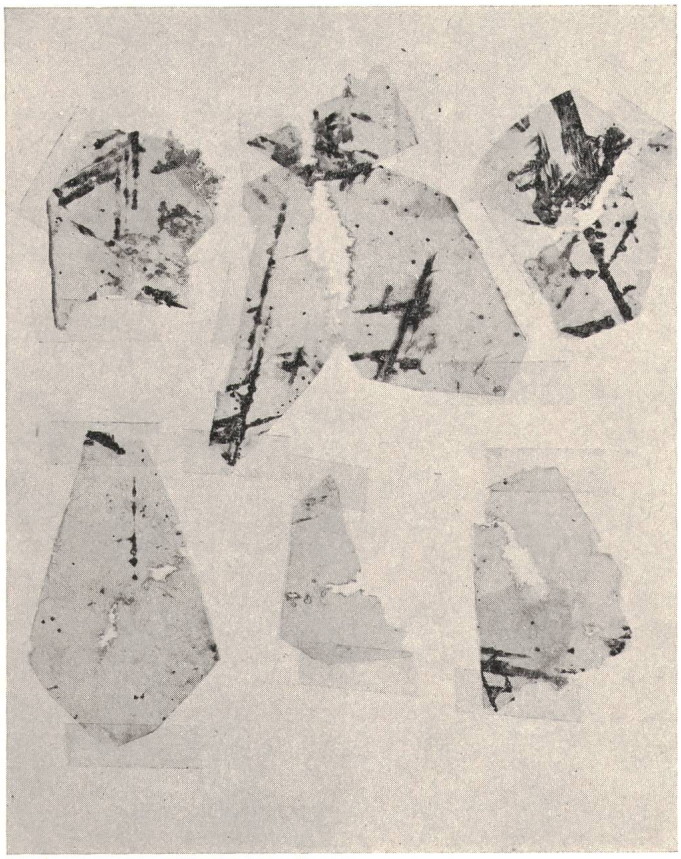


Fig. 1
Typische Beschädigung entlang der Einlagerungen stark gefleckten Glimmersplittings einer Asphalt-Micafolium-Generatorisolation

1. Wurde auch der Einfluss von Verunreinigungen im Glimmervlies auf dessen Eigenschaften untersucht?
2. Welche Kontrollmethoden können für Glimmerpapiere zum Auffinden unzulässiger Einlagerungen empfohlen werden?

R. Sauvin, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (zum Bericht von E. Diehl):

Der Bericht gibt eine sehr interessante Zusammenstellung über den Aufbau des Glimmers und dessen Verunreinigung.

Ueber die widersprechenden Einflüsse auf die Durchschlagspannung von klarem oder geflecktem Glimmer kann folgende Erklärung gegeben werden:

Spaltet man ein geflecktes Glimmersplitting auf, so findet man im gleichen Paket schöne und klare Folien neben gestreiften oder gefleckten. Selten befinden sich die Flecken übereinander. Dies erklärt, warum die Durchschlagspannung quer durch die Glimmerschichten, wie sie im Aufsatz behandelt wurde, nur wenig durch die Verunreinigungen beeinflusst ist, da praktisch immer noch eine reine Glimmerschicht als Barriere besteht.

In Längsrichtungen dagegen können zusammenhängende Verunreinigungen (Streifen) katastrophale Folgen haben. Bei einem Elektrodenabstand von 10 mm sinkt zum Beispiel die Festigkeit von über 10 kV beim klaren Glimmer (Überschlag) auf 3 kV und weniger beim gefleckten Glimmer, wobei die Durchschläge stets bei den Flecken erfolgen. Punktförmige, nicht durchgehende Flecken dagegen setzen die Durchschlagspannung nicht herab und können zugelassen werden.

Glimmersplitting werden heute weitgehend durch Feinglimmerpapier verdrängt. Trotz strengen Kontrollen der Rohmaterialien können Unreinheiten nicht vermieden werden. Sie erscheinen aber als einzelne verteilte Flecken, so dass die gefürchteten durchgehenden Streifen nicht vorkommen und dank der günstigen Wahrscheinlichkeitsverteilung bei mehrschichtigen Isolationen diese Unreinheiten nicht zu befürchten sind.

G. Rossi, Micafil AG, Baden: Die erste Frage von W. Dieterle möchte ich wie folgt beantworten:

Ausgangspunkt für die Entwicklung, die mit den PUR-Massen durchgeführt wurde (wie man aus dem Bericht entnehmen kann, handelt es sich hauptsächlich um eine technologische Entwicklung), bildeten die erwähnten und schon bekannten Eigenschaften der Polyurethane. Wenn man den Einsatz von den PUR für Giessanwendungen in Erwägung zieht, so sind vor allem folgende Eigenschaften hervorzuheben:

- Kalthärtend;
- Geringe Exothermie, daher Möglichkeit, grosse Objekte zu giessen;
- Günstiger Viskositätsverlauf während des Gelierungsprozesses;
- Unkomplizierte Automatisierungsmöglichkeiten;
- Vorzügliche mechanische und elektrische Eigenschaften.

Eine Gegenüberstellung der technologischen und Endeigenschaften von verschiedenen Kunststoffklassen wäre zwar von grossem Interesse, übersteigt jedoch den Rahmen unseres Betriebes, vor allem wegen den grossen Variationsmöglichkeiten, die mit PUR und den anderen Kunststoffen denkbar sind.

Die Entwicklung bestand:

1. In einer chemischen Entwicklung, deren Zweck hauptsächlich darin bestand, bestimmte Eigenschaften zu erreichen, die für den speziellen Anwendungsfall notwendig waren;
2. in der Anpassung der Verfahrenstechnik an die Eigenschaften der PUR-Massen zwecks einer rationelleren Herstellung und zur Realisierung neuer technischer Konzeptionen.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen an Prüfkörpern und an Objekten lassen den Einsatz der Polyurethane in der Hoch- und Niederspannung als vielversprechend erscheinen. Dies zumindest auf den im Bericht erwähnten Anwendungsgebieten. Damit steht, als Ergänzung zu den bewährten EP- und UP-Harzen, ein neues Material der Elektrotechnik zur Verfügung.

Im Hinblick auf den Freilufteinsatz haben wir nur einzelne Versuche, über 5 Jahre dauernd, durchgeführt. Sie sollen nur mögliche Entwicklungsrichtungen zeigen und nicht darüber entscheiden lassen, ob ein Produkt für die Freiluftanwendung generell eingesetzt werden kann oder nicht. In unserer Wechsel- und Gleichspannungs-Freiluftprüfanlage läuft seit über 5 Jahren ein Versuch, wobei Isolatoren, hergestellt aus verschiedenen, von den chemischen Industrien empfohlenen Formulierungen, miteinander verglichen werden.

Beurteilt werden die Isolatoren nach:

- Kriechspuren;
- Erosion;
- Oberflächenveränderung;
- Ausfall.

Ein fünfjähriger Dauerversuch scheint mir auch für einen Vergleich zwischen den verschiedenen Formulierungen eine noch zu geringe Aussagekraft zu haben. Immerhin weisen heute die Isolatoren aus der PUR-Masse ein Verhalten auf, das zu einer

Fortführung und Intensivierung der Versuche und einer Auswertung der Versuchsergebnisse im Sinne meines Berichtes berechtigt.

R. Sauvin, AG Brown, Boveri & Cie., Baden: Auf die Frage von W. Dieterle möchte ich wie folgt antworten:

Die Versuche wurden mit einem Epoxy-Novolack und Bortrifluoridkomplex als Härter durchgeführt. Es handelt sich also um ein hochtemperaturbeständiges Harz.

Das schlechte Alterungsverhalten muss eher auf eine schlechte Einbettung und Verklebung der Glimmerschuppen sowie durch Lufteinschlüsse infolge ungenügender Füllung der im Feinglimmer vorhandenen Poren zurückzuführen sein.

Auf der anderen Seite ergibt ein zu hoher Harzgehalt Harzansammlungen, die infolge der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Harz und Glimmer zu Spannungen und Rissen führen können und sich wiederum als ungünstig erweisen.

Die optimale Fliesszähigkeit kann leider zahlenmässig nicht ermittelt werden. Durch gewisse Prüfverfahren, wie z. B. durch Ermittlung der Durchbiegung (Flexibilität) eines eingespannten Stückes sowie durch die Erfahrung können zu weiche bzw. zu steife Bänder eliminiert werden. Es muss aber noch bestimmt werden, wie das Material durch eine thermische Behandlung gerettet werden kann, was zu erheblichen Schwierigkeiten führt. Durch Erweiterung der Verarbeitungszone fallen diese Probleme zum grössten Teil weg.

Einführungsreferat zu den Themengruppen C-2. Teil bis F

Stand und Entwicklungstendenzen der internationalen Normung auf dem Isolationsgebiet

Von *K. Michel*

Der Aufsatz orientiert über die Entwicklung der Normung von Isolierstoffen und Isolationssystemen durch die CEI. Mit der Terminologie und Klassifikation von Isolierstoffen, der Festlegung von Prüfmethoden und Isolierstoffspezifikationen befasst sich insbesondere das CE 15, Isolierstoffe, mit seinen Sous-Comités 15 A, 15 B und 15 C. Die Verantwortung für die systematische Erfassung von Isolationssystemen liegt beim CE 63. Ausgehend von der heute in der CEI-Publikation 85 verankerten thermischen Klassifikation der Isolierstoffe zeichnen sich neue Konzepte zur Kennzeichnung und Auswahl von Isolierstoffen und Isolationssystemen ab, welche ausser der Temperatur auch den weiteren Einflussgrössen Rechnung tragen. Über spezielle Gebiete der Isolationsnormung und Querverbindungen zu weiteren internationalen Fachgremien wird ein Überblick gegeben.

Grundlage und Anfänge der internationalen Normung

In einer Botschaft zum Welttag der Normung, dem 14. Oktober 1970, erklärte Bundespräsident Tschudi: «Die Normung ist eines der besten Mittel zur Verwirklichung von Ordnung, Wirtschaftlichkeit und Harmonie, denn sie ist ihrem Wesen nach gegen Willkür, Masslosigkeit und Verschwendung gerichtet.» Prosaischer umschreibt die Internationale Organisation für Normung, die ISO, als Zweck und Ziel der Organisation die Förderung der Entwicklung von Normen in der Welt, um den internationalen Austausch von Gütern und Dienstleistungen zu erleichtern. Unter diesem Gesichtspunkt ist es auch verständlich, dass die Elektroindustrie, die schon in ihrer Frühzeit wesentlich auf technische und wirtschaftliche Beziehungen über Landesgrenzen hinweg angewiesen war, eine internationale Normung aufnahm – lange vor ähnlichen Bestrebungen in andern Bereichen der Technik.

Die internationale Normung in der Elektrotechnik setzte ein mit der Gründung der Commission Electrotechnique Internationale (CEI), der Internationalen Elektrotechnischen Kommission, im Jahre 1906 mit Lord Kelvin als ihrem ersten Präsidenten. Als Aufgabe der CEI wurde festgelegt, die Zusammenarbeit und Vereinheitlichung auf dem Gebiet der Normen für die Elektrotechnik zu erleichtern. Zu diesem Zweck gibt die CEI Publikationen in Form von Empfehlungen, Regeln und Vokabularien heraus, welche die erreichte internationale Übereinstimmung zum behandelten Gegenstand zum Ausdruck bringen. Die Mitglieder der CEI sind gehalten, ihre nationalen Normen mit den CEI-Publikationen in Übereinstimmung zu bringen.

In den Anfängen der CEI lag das Schwergewicht der Tätigkeit auf der Schaffung einer einheitlichen Nomenklatur, gemeinsamer Masseinheiten und Symbole und in der Festlegung von Dimensionen, Kennwerten und Qualitätsvorschriften auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen, Transformatoren und der Kraftmaschinen.

Bereits in den ersten Jahren der Tätigkeit der CEI beschäftigte das thermische Verhalten der Isolation in elektrischen Maschinen die Experten. 1911 wurde ein Spezialkomitee der CEI ins Leben gerufen zur Aufstellung von Regeln für elektrische Maschinen. Im Anschluss an eine Tagung dieses Komitees im Januar 1913 in Zürich, also vor 60 Jahren, wurde ein Bericht veröffentlicht, der Vorschläge für eine Zuordnung von zulässigen Wicklungstemperaturen zu bestimmten Kategorien von Isolierstoffen bzw. Isolierstoffkombinationen enthielt. Dieser erste Versuch zu einer Klassifikation der Isolation nach ihrer thermischen Beständigkeit, der aber erst viele Jahre später in den Publikationen 34 und 85 seinen konkreten Niederschlag fand, war der Beginn einer Auseinandersetzung, die sich seither wie ein roter Faden durch die CEI-Arbeiten auf dem Gebiet der elektrischen Isolation zieht und weitgehend den Verhandlungsgegenstand des kürzlich in Zürich zusammengetretenen Comité d'Etudes (CE) 63 der CEI, Isolationssysteme, bildet.

Bildung und Entwicklung des CE 15, Isolierstoffe der CEI

In den ersten Jahrzehnten der Aktivität der CEI wurde die Isolation nur in sehr allgemeiner Form als Bestandteil elektrischer Maschinen und Apparate berücksichtigt. Die vom Maschinenkomitee, CE 2, 1930 herausgegebene und 1935 revidierte Publ. 34 mit Regeln für elektrische Maschinen enthielt die 4 Klassen O, A, B und C von Isolierstoffkombinationen, eingeteilt nach ihrer unterschiedlichen Wärmebeständigkeit. Noch während des Krieges und vor allem in den Jahren nach dem Krieg führten die Fortschritte in der Chemie der Kunstharze zu einer sprunghaften Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Isolierstoffe. Neben die organischen und mineralischen Naturstoffe, die der Klassifikation in der Publ. 34 zugrunde lagen, traten neue, verschiedenartigste synthetische Werkstoffe. Die Diskussion um die Revision dieser Publikation anfangs der fünfziger Jahre zeigte, dass die Maschinenbauer, die sich im CE 2 bisher mit dieser Materie befasst hatten, die Unterstützung eigentlicher Werkstoffexperten benötigten. Es war nicht mehr möglich, die neuen Werkstoffe einzubeziehen und sich bei der Zuteilung zu den Wärmeklassen wie bei den altbewährten Isolierstoffen rein auf die praktische Erfahrung zu stützen. Zur objektiven Erfassung und Festlegung von Qualitätsmerkmalen wurden anerkannte und allgemeinverbindliche Prüfmethoden benötigt.

Mit der Aufgabe, allgemein anerkannte Prüfverfahren zu entwickeln und in Zusammenarbeit mit dem für die Maschinenisolation zuständigen Sous-Comité (SC) 2C eine zeitgemässe Klassifikation der Isolierstoffe zu schaffen, wurde 1952 das CE 15, Matériaux Isolants (Isolierstoffe), gegründet.

Von den ursprünglichen 7 Arbeitsgruppen befassten sich 6 mit Prüfverfahren für Isolierstoffe. Daneben wurde im Hinblick auf die Klassifikation die Arbeitsgruppe «Enzyklopädie

der Isolierstoffe» geschaffen. Für die mit der Ausarbeitung von Prüfmethoden betrauten Gruppen war die Aufgabe klar vorgezeichnet: sie konnten in der Regel von bereits bestehenden nationalen Vorschriften ausgehen und ihre Arbeit beschränkte sich im wesentlichen darauf, einen für alle Mitgliedsländer akzeptablen Kompromiss zu finden. Unter wesentlich schwierigeren Voraussetzungen nahm die Gruppe Enzyklopädie unter ihrem Schweizer Vorsitzenden, Dr. *G. de Senarclens,* die Arbeit auf.

Die Isolierstoffklassifikation der Publ. 34 wurde inzwischen im Rahmen des SC 2C erweitert, aus den 4 Klassen wurden 7; neue Werkstoffe wurden mitberücksichtigt. Als Kompromiss zwischen divergierenden Bestrebungen und Ansichten wurde in der 1957 veröffentlichten Publ. 85 einerseits eine Reihe von Isolationsklassen durch Grenztemperaturen definiert – wobei die Zuordnung der Isolierstoffe zur jeweiligen Klasse von der Erfahrung oder von anerkannten Prüfverfahren abhängig gemacht wird –, andererseits wurden als unverbindliche Richtlinien in einem Anhang Materiallisten zu den einzelnen Klassen aufgeführt.

Nach Ansicht der Arbeitsgruppe Enzyklopädie bot diese Publ. 85 zwar ein Einteilungsschema für die thermische Auslegung von Maschinen und Apparaten, stellte aber keine Klassifikation der Isolierstoffe – wie ihr Titel verspricht – dar, die den Konstrukteur in der Wahl der zweckmässigsten Isolierstoffe unterstützen könnte.

Eine Isolierstoffklassifikation im weiteren Sinne sollte über die thermische Beständigkeit hinaus die dielektrischen, mechanischen und auch chemischen Eigenschaften gebührend berücksichtigen. Im Schweizerischen Fachkollegium 15 des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES) wurde ein Konzept ausgearbeitet zu einer Enzyklopädie der Isolierstoffe, die im Endausbau

- eine systematische Klassifikation der Isolierstoffe,
- Übersichtsblätter oder -tabellen der einzelnen Stoffgruppen mit einer knappen Charakterisierung,
- Monographien mit zuverlässigen Angaben über einzelne Werkstoffe

enthalten sollte. In mehrjähriger Arbeit im Schweizerischen Gremium wurden das Klassifikationssystem, die Sammlung der Gruppenübersichten und Beispiele von Monographien aufgestellt und dem CE 15 vorgelegt.

International wurde der Wert dieses einzigartigen Werkes anerkannt, doch wurde bezweifelt, ob eine derartige Enzyklopädie Aufgabe der CEI sein könne. Von den massgebenden im CE 15 vertretenen Ländern waren die wenigsten bereit, konkrete Beiträge in Form von Monographien zu leisten. So konnte mangels aktivem Interesse und zum Bedauern weiter Kreise in der Fachwelt das begonnene Werk nicht weitergeführt werden. Es wurde im Zusammenhang mit einer Reorganisation des CE 15 aus dem Pflichtenheft des Komitees als undurchführbar gestrichen.

Die Diskussion über Mittel und Wege zu einer Klassifikation der Isolierstoffe führte schliesslich zum Entschluss, an Stelle einer rein informativen Enzyklopädie mit der Ausarbeitung von verbindlichen Isolierstoffspezifikationen zu beginnen. Dazu erfolgte 1964 eine Reorganisation des CE 15 unter Bildung von 3 Sous-Comités; SC 15A für die Ausarbeitung von Kurzprüfmethoden, SC 15B für Langzeitprüfungen und SC 15C für die Aufstellung von Isolierstoffspezifikationen.

In entsprechender Weise ist übrigens das Fachkollegium 15 des CES organisiert mit den Fachkollegien 15A, 15B und 15C.

Arbeiten des SC 15A

Tabelle I

SC 15A, Kurzzeitprüfungen	CEI-Publ.	Schweiz. Norm
Durchschlagfestigkeit fester Isolierstoffe	Publ. 243 (1967)	
Spezif. Durchgangs- und Oberflächenwiderstand	Publ. 93 (1958)	VSM 77125[2])
Isolationswiderstand (Stöpselmethode)	Publ. 167 (1964)	SEV 3072[1])
Isolationswiderstand bei erhöhter Temperatur	Publ. 345 (1971)	
Normalbedingungen (Klima, Temperatur) für Prüfungen	Publ. 212 (1966 rev. 1971)	VSM 77098
Kriechwegindex (Tropfenmethode)	Publ. 112 (1959 rev. 1771)	VSM 77114
Dielektr. Verlustfaktor und relative Permittivität	Publ. 250 (1969)	
Dielektr. Eigenschaften bei Frequenzen über 300 Hz	–	
Elektrolytische Korrosion	(bereit zur Publ.)	
Polymerisationsgrad von Cellulose in Papier (viskosimetr.)	–	
Verhalten unter erschwerten klimatischen Bedingungen	–	
Brennbarkeit fester Isolierstoffe	(an ISO TC 61 übergeben)	
Lichtbogenbeständigkeit	–	

[1]) Einführungsblatt
[2]) VSM = Verein Schweiz. Maschinenindustrieller

Diese nationalen Gremien gelangen über das CES mit Vorschlägen und Stellungnahmen an die entsprechenden CEI-Komitees, beteiligen sich durch Delegierte an deren Tagungen und bereiten die Übernahme der internationalen Publikationen in Schweizer Normen vor.

Der heutige Stand der Arbeiten im CE 15 ist, aufgeteilt nach den 3 Sous-Comités, in den Tabellen I, II und III wiedergegeben.

Tätigkeit des SC 15A, Kurzzeitprüfungen von Isolierstoffen

Als Kurzzeitprüfungen werden die wichtigsten allgemein anwendbaren elektrischen Messungen und Prüfverfahren für Isolierstoffe festgelegt, die inzwischen durch Übernahme in nationale Normen allgemeine Verbreitung gefunden haben. Für die Durchführung der elektrischen Messungen mussten einheitliche Bedingungen für die Konditionierung vor und während der Prüfung vereinbart werden. Obwohl man sich bei der kürzlich erfolgten Revision der Publ. 212 bemühte, verwandte Vorschriften, wie z. B. die CEI-Publ. 68, zu berücksichtigen, ist man von einer umfassenden Vereinheitlichung auf diesem Gebiet noch weit entfernt. Um Überschneidungen und Doppelspurigkeiten zu vermeiden, werden bestimmte Fragen mehr und mehr auch in Verbindung mit andern internationalen Stellen behandelt. So wurde ein Auftrag zur Ausarbeitung von Brennbarkeit-Prüfmethoden an das ISO-Komitee[1]) TC 61, Kunststoffe, weitergeleitet, das sich bereits mit derartigen Verfahren befasst. Anderseits wurde die Bestimmung des Polymerisationsgrades von Cellulose, die für die Erfassung des Alterungszustandes von Papierisolationen wertvoll ist, auf

[1]) ISO = International Organization for Standardization.

Grund von Vorarbeiten im CIGRE-Komitee[2]) 15 in das Arbeitsprogramm von SC 15A des CE 15 der CEI übernommen.

Tätigkeit des SC 15B, Langzeitprüfungen von Isolierstoffen

Die Aufgaben des SC 15B, Langzeitprüfungen, erstrecken sich auf die drei Gebiete: Elektrische Alterung im Hinblick auf das Dauerverhalten gegen Glimmentladungen, thermische Alterung und Verhalten bei langdauernder Strahlungseinwirkung.

Im Mittelpunkt des Interesses stand seit der Gründung des CE 15 das Problem der thermischen Beständigkeit von Isolierstoffen. Die seinerzeit aus praktischer Erfahrung heraus reichlich willkürlich festgelegten thermischen Klassen, wie sie in der Publ. 85 niedergelegt sind, sollten durch eine objektive und systematische Erfassung des thermischen Verhaltens der Isolierstoffe abgelöst werden. Die Berechtigung einer starren Klassierung durch eine höchstzulässige Grenztemperatur wird bestritten, da sich für ein und denselben Isolierstoff je nach der Beanspruchung in einem Isolationssystem Unterschiede in der thermischen Beständigkeit ergeben können. Nach den heute im CE 15 vertretenen Ansichten müssen das thermische Verhalten der Isolierstoffe und die thermische Klassifikation der vollständigen Isolationssysteme klar auseinandergehalten werden, was bisher in der Publ. 85 nicht der Fall war. Es wurde daher empfohlen, den Begriff der Wärmeklassen im Sinne von höchstzulässigen Grenztemperaturen auf die kompletten Isolationssysteme zu beschränken, aber nicht weiter auf die einzelnen Isolierstoffe anzuwenden, um Missverständnisse zu vermeiden.

Arbeiten des SC 15B

Tabelle II

SC 15B, Langzeitprüfungen	CEI-Publ.	Schweiz. Norm
Elektrische Beanspruchung:		
Beständigkeit gegen oberflächliche Glimmentladungen	Publ. 343 (1970)	
Beständigkeit gegen innere Entladungen	–	
Thermische Beanspruchung:		
Thermische Alterungsbeständigkeit (Richtlinien)	Publ. 216 (1966)	
Revision der Richtlinien: «Temperatur-Index»	in Revision	
Thermische Beständigkeit von lackisolierten Drähten	Publ. 172 (1966)	VSM 23722
Thermische Beständigkeit von Isolierlacken		
Methode:		
Abnahme der Durchschlagspannung	Publ. 370 (1971)	
Klebefestigkeit an Drahtwendeln	Publ. 290 (1969)	
Klebefestigkeit an Drahtbündeln	–	
Thermische Beständigkeit von flexiblen Isolierstoffen (Lacke, Harze)	–	
Thermische Beständigkeit von Isolierklebebändern	–	
Strahlungsbeanspruchung:		
Beständigkeit gegen energiereiche Strahlung Übersicht, Wegleitung	–	
Erfassung durch Änderung der Zugfestigkeit	–	

Arbeiten des SC 15C

Tabelle III

SC 15C, Spezifikationen	Stand der Arbeit
Glimmerprodukte	
Allgemeines (Terminologie, Abmessungen, allgemeine Anforderungen)	Publ. 371–1 (1972)
Prüfmethoden	–
Teilspezifikation	–
Lackierte Gewebe	
Allgemeines	Publ. 394–1 (1972)
Prüfmethoden	Publ. 394–2 (1972)
Spezifikationen einzelner Typen	–
Isolierklebebänder	
Allgemeines	–
Prüfmethoden	–
Spezifikation einzelner Typen	–
Isolierlacke	
Prüfmethoden	–
Lösungsmittelfreie, polymerisierbare Harzmischungen	
Allgemeines	–
Prüfmethoden	–
Isolierpapier	
Prüfmethoden	–
Isolierpreßspan	
Mineralische Isolierstoffe (Keramik, Glas)	
Lichtbogenfeste Isolierstoffe	

Zur Charakterisierung des Temperatur-Zeit-Verhaltens der einzelnen Isolierstoffe wurde der Begriff des «Temperaturindex» eingeführt. Dieser Temperaturindex kann im Wärmealterungsversuch unter definierten Prüfbedingungen und mit definierten Endpunktkriterien eindeutig ermittelt werden. Je nach den angewandten Kriterien können für den gleichen Isolierstoff verschiedene Temperaturindices resultieren. Wie viele andere Werkstoffdaten stellt der Temperaturindex eine Vergleichsgrösse dar, die etwa als Bestandteil einer Materialspezifikation die Überprüfung der Gleichmässigkeit der Werkstoffqualität erlaubt. Dem Konstrukteur geben diese Indices Hinweise für das thermische Verhalten unter bestimmten Bedingungen; sie dürfen aber nicht einer maximalzulässigen Betriebstemperatur in der praktischen Anwendung automatisch gleichgesetzt werden.

Mit der Revision der Publ. 216 bemüht sich das SC 15B, eine umfassende Grundlage für die Ermittlung des thermischen Langzeitverhaltens zu schaffen. Darüber hinaus wird versucht, für die Erfassung des Dauerverhaltens der Isolierstoffe gegenüber den verschiedenen auftretenden Beanspruchungen, wie Temperatur, elektrische Spannung, Strahlung, chemische und mechanische Beanspruchung, ein generelles System und Konzept zu entwerfen.

Tätigkeit des SC 15C, Spezifikationen von Isolierstoffen

Die Aufgabe des SC 15C war von Anfang an klar: Die Aufstellung von Werkstoffspezifikationen für Isolierstoffe. Die Auswahl für die Bearbeitung richtet sich nach dem Bedürfnis und anderseits auch nach dem Vorhandensein geeigneter na-

[2]) CIGRE = Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques.

tionaler Vorschriften. Stoffgruppen, mit welchen sich international bereits andere Stellen befassen, wie die reinen Kunststoffprodukte, werden nicht berücksichtigt.

Die Isolierstoffspezifikationen werden in drei Teile gegliedert:

Im Teil 1 werden Terminologie und Systematik, Abmessungen und allgemeine Anforderungen dargelegt. Teil 2 enthält die benötigten Prüfmethoden und Teil 3 stellt die eigentliche Materialvorschrift mit verbindlichen Anforderungen für die einzelnen Stofftypen dar. Das grosse Interesse an internationalen Isolierstoffspezifikationen fördert die raschen Fortschritte in den Arbeiten des SC 15 C und es wird erwartet, dass die Spezifikationen mit ihrem weiteren Ausbau eine Alternative zu der aufgegebenen Enzyklopädie der Isolierstoffe bringen können.

Isolierstoffnormung ausserhalb des CE 15

Neben dem CE 15, das sich ausschliesslich mit festen Isolierstoffen befasst, beschäftigen sich weitere CEI-Komitees mit besonderen Anwendungsgebieten der Isolation (s. Tab. IV).

Das CE 10 ist mit seinen 3 Sous-Comités zuständig für Mineralisolieröle, für andere flüssige und für gasförmige Dielektrika. Es hat Publikationen herausgegeben mit Spezifikationen von Transformatoren- und Schalterölen (Publ. 296) und mit Methoden zur Bestimmung der Oxydationsbeständigkeit (Publ. 74) und der Durchschlagfestigkeit (Publ. 156) von Isolierölen.

Mit der Normung der Isolierstoffe ergeben sich weitere wichtige Kontakte und Beziehungen zu andern internationalen Stellen ausserhalb der CEI. Eine mehr oder weniger enge Zusammenarbeit besteht mit den in Tabelle V aufgeführten Organisationen und Fachgremien.

Besonders eng sind die Beziehungen zur ISO, die in ihrer heutigen Form seit 1946 besteht als Spitzen- und Dachorganisation der gesamten internationalen Normung. Die CEI, obwohl 40 Jahre älter, hat sich 1947 der ISO als ihr elektrotechnischer Sektor angegliedert, wenn auch unter Wahrung ihrer finanziellen und technischen Unabhängigkeit.

An den Tagungen der ISO TC 61 und CEI CE 15 nehmen gegenseitig Beobachter teil, um die Zusammenarbeit sicherzustellen. Für die Aufstellung von Spezifikationen, Isolierstoffe allgemein bei CE 15, Kunststoffe bei ISO TC 61, werden Prüfmethoden gegenseitig übernommen.

Normung auf verschiedenen Isolierstoffgebieten

Tabelle IV

CEI-Komitees für verschiedene Isolierstoffgebiete		CEI-Publikanten
SC 2C	Klassifikation der Isolierstoffe für rotierende Maschinen	Publ. 85
CE 10	Flüssige und gasförmige Isolierstoffe	Publ. 156, 74, 296
CE 15	Feste Isolierstoffe	(s. Tab. II, III u. IV)
CE 20	Elektr. Kabel (Vorschriften für PVC-isolierte Leiter, gummiisolierte Leiter, Prüfmethoden)	Publ. 227, 245, 330
CE 50	Klimatische und mechanische Prüfung von Bauelementen und Geräten	Publ. 68
CE 52	Gedruckte Schaltungen (Prüfmethoden, Anforderungen)	Publ. 326
CE 55	Wicklungsdrähte (Prüfmethoden, Spezifikationen)	Publ. 251 Publ. 317–1...6

Die CEE, deren Mitgliederkreis sich auf etwa ein Dutzend europäischer Länder beschränkt, hat sich zur Aufgabe gestellt, Sicherheitsbestimmungen für elektrisches Material festzulegen im Hinblick auf Gesundheit und Leben der Benützer elektrischer Einrichtungen. Sie stellt Sicherheitsanforderungen auf für elektrische Geräte, Installationsmaterial und Einrichtungen für den allgemeinen Gebrauch und arbeitet zum Beispiel auf dem Gebiet der Installationsleiter eng zusammen mit dem Kabelkomitee der CEI.

Die CIGRE ist eine internationale Vereinigung mit dem Zweck, den Austausch von technischem Wissen und von technischen Informationen auf dem Gebiet der Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie zu fördern. Zu diesem Zweck veranstaltet sie internationale Diskussionstagungen; in verschiedenen Studien-Komitees und Studiengruppen werden technische Fragen aus ihrem Interessenbereich beraten.

Die CIGRE stellt keine Normen oder Vorschriften auf, sie steht aber in engem Kontakt mit entsprechenden CEI-Komitees, wodurch die Ergebnisse ihrer Arbeiten in den CEI-Empfehlungen für flüssige oder feste Isolierstoffe ihren Niederschlag finden.

Bestrebungen zur Normung von Isolationssystemen

Als Ergänzung und Weiterführung der vielschichtigen Normungsbestrebungen auf dem Gebiet der Isolierstoffe und einfachen Isolierstoffkombinationen ist in den letzten Jahren eine intensive Diskussion um die internationale Normung von vollständigen Isolationssystemen in Gang gekommen. Die Auseinandersetzungen mit der CEI-Publikation 85 führten, stark beeinflusst durch amerikanische Arbeiten und Konzepte, zur Forderung, das thermische Verhalten der einzelnen Isolierstoffe vom Verhalten kompletter Isolationssysteme gesondert zu betrachten. Das Ergebnis von Wärmealterungsprüfungen an Isolierstoffen, ausgedrückt durch einen Temperaturindex, soll eindeutig unterschieden werden von funktionellen «Lebensdauer»-Versuchen an Isolationssystemen mit dem Ziel, dieser Isolation eine verbindliche Grenztemperatur bzw. eine bestimmte Wärmeklasse zuzuordnen. Die Folgerung, dass die Publikation 85 in zwei unabhängige Teile, für Isolierstoffe einerseits und Isolationssysteme anderseits, aufzuteilen sei, führte 1968 zur Bildung eines neuen CEI-Komitees, dem CE 63, Isolationssysteme, neben dem CE 15, Isolierstoffe.

Mit der Aufnahme der Arbeit durch das CE 63 wurde dessen Tätigkeitsbereich jedoch bald über die ursprünglich vorgesehene Aufgabe heraus erweitert. Das CE 63 beschäftigt sich heute in weitestem Sinne mit der Charakterisierung und Bewertung von Isolationssystemen. Es arbeitet an der Aufstellung von Richtlinien für Prüfprogramme und Prüfverfahren zur objektiven Beurteilung der Eignung von Isolationssystemen in Maschinen oder Apparaten. Mit diesen Prüfungen soll das Verhalten der Isolation unter den verschiedenen Bedingungen, welchen sie unter Betriebsverhältnissen ausgesetzt sein kann, also nicht nur unter thermischer Beanspruchung, erfasst werden. Weiter wurde die Aufstellung eines universellen Klassifizierungsschemas unter Berücksichtigung aller wichtigen Beanspruchungsgrössen vorgesehen. Diese Aufgabe erwies sich jedoch in Anbetracht der fast unbeschränkten Möglichkeiten verschiedener Isolationssysteme als derart komplex, dass man sie vorläufig einmal zurückstellte. Als Vorarbeit zu einer derartigen Klassifizierung wurde die Ausarbeitung eines universellen Kodifizierungsverfahrens für Isolationssysteme in An-

Weitere internationale Verbindungen auf dem Isolationsgebiet

Tabelle V

ISO = International Organization for Standardization	
TC 6	Papier
TC 35	Lacke, Anstrichfarben
TC 45	Kautschuk
TC 56	Glimmer
TC 61	Kunststoffe
CEE = Internationale Kommission für Regeln zur Begutachtung elektrotechnischer Erzeugnisse	
CT 031:	Allgemeine Anforderungen, z. B. Beständigkeit von Isolierstoffteilen gegen Hitze und Feuer
CT 10:	Isolierte Kabel
CIGRE = Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques	
SC 15:	Isolierstoffe, Studiengruppen für Papier-Öl-Isolation, Askarels, Isoliergase, feste Isolierstoffe

griff genommen. Die wichtigsten Merkmale eines Isolationssystemes sollen in einer Kode-Bezeichnung verschlüsselt werden. Die vorgesehene Kode-Bezeichnung besteht im wesentlichen aus einer siebenstelligen Nummer. Jede Stelle dieser Nummer repräsentiert eine bestimmte Einflussgrösse wie elektrische, thermische, mechanische, umgebungsbedingte Beanspruchung. Die 5. Stelle kann nach Bedarf verwendet werden, in der 6. Stelle wird die Betriebsart des Gerätes verschlüsselt, die 7. Stelle gibt Aufschluss über das erwartete zeitliche Verhalten, wie z. B. die Mindestlebensdauer unter den gegebenen Bedingungen. In jeder Stelle können durch die Ziffern 1...9 bis zu 9 Beanspruchungsstufen spezifiziert werden. Beispielsweise könnten die bisherigen Wärmeklassen Y bis C durch die Ziffern 1 bis 7 in der 2. Stelle der Kode-Nummer zum Ausdruck gebracht werden. Das Kode-Schema wird durch das CE 63 aufgestellt. Die quantitative Festlegung der Beanspruchungsstufen würde individuell für jeden Bereich der Technik, wie rotierende Maschinen, Transformatoren oder Kabel durch das zuständige technische Komitee erfolgen. Mit diesem Vorgehen soll eine ausreichende Flexibilität des Systems gesichert sein. Das Kodifizierungsverfahren dient der Verständigung zwischen Hersteller und Verbraucher von elektrischem Material und gibt eine Grundlage für die zukünftige Klassifizierung der Isolationssysteme in verschiedenen Bereichen. Als Grundlage für die Kodifizierung sollen mit der Zeit die funktionellen Prüfverfahren dienen und als Endziel sieht man konkrete Spezifikationen für die kodifizierten Isolationssysteme in jedem Bereich.

Die gestellte Aufgabe ist sehr kompliziert und es dürfte noch einige Zeit verstreichen, bis greifbare Ergebnisse dieser Arbeiten vorliegen. Die nun schon seit vielen Jahren unter Beschuss stehende Publikation 85 wird vermutlich noch nicht so bald zurückgezogen werden können.

Zum Schluss sei noch darauf hingewiesen, dass einer allgemeinen Tendenz folgend auch auf dem Isolationsgebiet das Schwergewicht immer mehr von der nationalen auf die internationale Normung verlagert wird. Die zunehmende internationale Integration der Wirtschaft erfordert weltweite einheitliche Normen und zudem ist es bei dem heutigen Umfang an Normungsaufgaben auch für bedeutende Industriestaaten kaum mehr möglich, aus rein eigenen Kräften ein ausreichendes Normenwerk aufzubauen. Die Normungstätigkeit konzentriert sich zunehmend auf die internationale Arbeit. Dabei hat sich gezeigt, dass es auch für Kleinstaaten wie die Schweiz, wenn sie sich aktiv und initiativ beteiligen, möglich ist, ihren Standpunkt und ihre Interessen zu wahren.

Adresse des Autors:
Dr. *K. Michel,* AG Brown, Boveri & Cie, Abt. ZLC, 5400 Baden.

Wir machen darauf aufmerksam, dass noch einige Exemplare der Texte sämtlicher Symposiumsbeiträge erhältlich sind. Sie können beim SEV, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich, zum Preis von Fr. 70.– bezogen werden.

Zusammenfassungen der Beiträge der Themengruppe C-2. Teil: «Aufbau und Eigenschaften von Isolationssystemen fester Isolierstoffe»

(Neue Draht- und Kabelisolationen)

Moderne Wicklungsdrähte

Von *W. Marti*

Bei der Auslegung von elektrischen Motoren, Generatoren und Apparaten kommt der Auswahl der einzusetzenden Wicklungsdrähte eine mitbestimmende Bedeutung zu. Der Technik stehen heute Wicklungsdrähte mit hervorragenden Isolationen zur Verfügung, welche sowohl hinsichtlich dem Verhalten unter Betriebsbedingungen als auch bei der Verarbeitung hohe Anforderungen erfüllen.

Im allgemeinen Teil des Berichtes wird auf die hauptsächlich heute verwendeten Isolationen von Wicklungsdrähten verwiesen, wobei auch die Forderungen, die zu erfüllen sind, kurz gestreift werden. Im Anschluss daran werden drei ausgewählte moderne Typen von Wicklungsdrähten und ihre Anwendungsmöglichkeiten beschrieben.

Adresse des Autors:
Werner Marti, Produktionschef Wicklungsdrähte, Schweiz. Isola-Werke, 4226 Breitenbach.

Neues Prüfgerät zur kontinuierlichen Überwachung der Qualität von Lackdrähten

Von *P. Bommer*

Die Eigenschaften der Lackdrähte wurden in den letzten Jahren wesentlich verbessert. Die erstaunlichen Fortschritte sind der modernen Kunststoff-Chemie zu verdanken. So entscheidend diese Leistungen auch sind, so darf aber nicht übersehen werden, dass sie nur einen Teil zur Lackdrahtqualität beitragen. Ebenso massgebend ist eine gründlich beherrschte Technik des Lackauftrages und Einbrennens. Jeder Hersteller von Lackdraht weiss, dass gerade hier viel «know-how» entscheidet und dass aber auch diese Seite noch der Entwicklung bedarf.

Im Bericht wird über die Gedanken und Vorversuche berichtet, die massgebend waren für die Entwicklung eines kontinuierlich arbeitenden Gerätes, das die Fabrikationsgüte jedes einzelnen Ganges überwacht. Es wird dargelegt, wie mit einem neuen Verfahren die auftretenden Fehler registriert werden und sich damit eine erstmalige Sicht in das Fehlerentstehen auftut.

Adresse des Autors:
P. Bommer, dipl. Phys., Leiter der Entwicklungsabteilung Drähte und Kabel, Schweiz. Isola-Werke, 4226 Breitenbach.

Verhalten von Kabelisolierstoffen im Langzeitversuch

Von *R. Furter* und *J. Wittweiler*

Im Bericht wird über Ergebnisse und Erfahrungen bei der Langzeitprüfung von Kabelisolierstoffen berichtet. Im besonderen wird die thermische Beständigkeit einiger Isoliermaterialien nach der Extrapolationsmethode, wie sie beispielsweise für Lackdrähte (IEEE 57) angewendet wird, untersucht. Ferner werden Ergebnisse der Ölbeständigkeitsprüfung im Langzeittest und Ergebnisse der Bewitterungsprüfung von Isolierstoffen bekanntgegeben. Die Ergebnisse der Bewitterungsprüfung werden mit jenen einer Ozonkurzzeitprüfung verglichen.

Adresse der Autoren:
R. Furter und *J. Wittweiler,* Huber + Suhner AG, 8330 Pfäffikon (ZH).

Der Einsatz von vernetztem Polyäthylen als Isolationsmaterial für Niederspannungnetzkabel

Von *R. Kurz*

Ausgehend vom Papier-Masse-Kabel und dem PVC-Kabel wird untersucht, inwieweit und welche Vorteile sich durch den Einsatz von Kabeln mit vernetzter Polyäthylen-Isolation in europäischen Niederspannungsnetzen ergeben. Daran anschliessend werden die in diesem Zusammenhang relevanten Eigenschaften des vernetzten Polyäthylens (XLPE) sowie die Verfahrenstechnik und die Fertigung des XPLE-Nsp-Netzkabels kurz beschrieben. Es werden verschiedene Kabelkonstruktionen vorgestellt, der Leistungsstandard des XPLE-Nsp-Netzkabels besprochen und eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsrechnung mit dem PVC-Kabel vorgelegt. Zum Abschluss werden verschiedene Prüfresultate von XLPE-Nsp-Netzkabeln diskutiert und ein Ausblick auf die weitere Entwicklung im Nsp-Netzkabelbereich versucht.

Adresse des Autors:
Rainer Kurz, Leiter der Verfahrenstechnischen Laboratorien, Dätwyler AG, 6460 Altdorf (UR).

Das Brandverhalten von Kabelisolierstoffen

Von *H. Briker*

Im Bericht werden die gebräuchlichen Kabelkunststoffe, Thermoplaste und Elastomere, vorgestellt. In der Folge wird dann auf die Brandgefährdung von Kabelsystemen eingegangen. Anschliessend wird das Brandverhalten von Kabelkunststoffen und Kunststoffkabeln in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften, vom Kabelaufbau und von den Brandbedingungen behandelt. Es folgt ein Überblick über die wichtigsten Prüfmethoden. In einem weiteren Abschnitt werden die Eigenschaften der Kabelkunststoffe unter besonderer Berücksichtigung des Brandverhaltens einander gegenübergestellt.

Adresse des Autors:
Hans Briker, Leiter des Isolierstofflaboratoriums, Dätwyler AG, 6460 Altdorf (UR).

Vergleich von Polyvinylchlorid und vernetztem Polyvinylchlorid für die Isolation von Drähten

Von *M. Th. Schuler*

Nach eingehender Beschreibung der seit vielen Jahren zur Isolation gebräuchlichen PVC-Compounds und der Funktion ihrer hauptsächlichsten Bestandteile werden deren mechanische sowie dielektrische Eigenschaften dargelegt und die Einsatzgrenzen aufgezeigt. Konventionelle PVC-Isolationen sind schwer entflammbar und besitzen eine gute Kombination von Eigenschaften, wie Zähigkeit und Flexibilität bei niedrigen Kosten. Erwünscht wären vor allem erhöhte Lösungsmittel- und Wärme-Formbeständigkeit. Die Weiterentwicklung bringt hier sehr beachtliche Fortschritte durch vernetzbare PVC-Compounds. Es werden Voraussetzungen, Vernetzungsarten sowie Vernetzungsvorgang und verbesserte Eigenschaften ausführlich besprochen. Durch Vernetzung lassen sich Löslichkeit und Kriechen bei hoher Temperatur vermindern, während die übrigen ausgezeichneten Eigenschaften erhalten bleiben. Die Variabilität von Formulierung und Bestrahlungsdosis ermöglicht, gewünschte Eigenschaften wie thermische Stabilität, dielektrische Werte, Härte, Flexibilität, Ölbeständigkeit und Tieftemperaturzähigkeit hervorzuheben.

Adresse des Autors:
Dr. *M. Th. Schuler,* Kunststoffdepartement, Lonza AG, 4002 Basel.

Die für Hochspannungskabel und ihren Zubehör verwendeten modernen synthetischen Isoliermaterialien

Von *R. Mühlethaler*

Im Bericht werden die Struktur und hauptsächlichste Eigenschaften des Polyäthylens, des vernetzten Polyäthylens, des Äthylen-Propylen-Kautschuks und des Äthylen-Propylen-Terpolymer-Kautschuks besprochen. Auch der Grund für ihre Verwendung in Hochspannungskabeln und deren Zubehör werden behandelt. Zuletzt werden Erfahrungen in der Schweiz bis 60 kV und im Ausland bis 225 kV mitgeteilt.

Adresse des Autors:
Roger Mühlethaler, S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, 1303 Cossonay-Gare.

220-kV-Gasaussendruckkabel – Versuchsanlage Birrfeld

Von *E. Buchmann* und *B. Weber*

In Stahlrohre eingezogene 150-kV-Gasaussendruckkabel werden in der Schweiz seit 1964 hergestellt. In Zukunft wird man auch mit höheren Spannungen in dicht besiedelte Gebiete eindringen, wo Rohrkabel mit Vorteil eingesetzt werden. Daher wurde das 220-kV-Gasaussendruckkabel mit dem nötigen Zubehör entwickelt. Da auch im Ausland für diese Spannungsebene nur wenig Betriebserfahrungen über dieses Kabel vorliegen, erstellten die drei Kabelwerke Brugg, Cortaillod und Cossonay eine Versuchsanlage auf dem Birrfeld. Eine dreiphasige Kabelleitung $3 \times 1 \times 400$ mm² mit Aluminiumleitern und einer Länge von 100 m kann bei max. 250 kV gegen Erde und 600 A betrieben werden. Die wichtigsten Daten werden auf einem 12-Kanal-Schreiber registriert. Die Versuche, die zwei Jahre dauern sollen, begannen im Januar 1972. Im Bericht werden die Versuchseinrichtungen beschrieben und wird über die ersten Zwischenresultate berichtet.

Adresse der Autoren:
Ernst Buchmann und *Bernhard Weber,* Kabelwerke Brugg AG, 5200 Brugg.

Comparaison des isolations rubanées et extrudées dans les câbles à haute tension

Par *G. de Montmollin*

Im Bericht werden die elektrischen Eigenschaften von bandierter und extrudierter Isolation analysiert und verglichen. Speziell werden imprägniertes Papier und Polyäthylen verglichen. Die Vor- und Nachteile der beiden Techniken für die Spannungen von 20 bis 30 kV, 50 bis 60 kV und über 100 kV werden aufgezählt.

Adresse des Autors:
Gérald de Montmollin, Société d'Exploitation des Câbles Electriques, 2016 Cortaillod.

Moderne Systeme zur Isolation von Kabelverbindungen und Kabelenden

Von *W. Kälin*

Die immer stärkere Verbreitung von kunststoffisolierten Stark- und Schwachstromkabeln liess ein Bedürfnis nach moderneren Verbindungssystemen wach werden. Heute stehen neben den konventionellen, mit Bitumenmassen gefüllten Gussarmaturen folgende Systeme zur Verfügung.

1. *Wickelverfahren.* Bei diesem wird die Isolation durch Aufwickeln von entsprechenden Bändern aufgebaut.
2. *Schrumpfverfahren.* Es werden vorgedehnte Halbfabrikate aus verschiedensten Kunststoffen unter Anwendung von Wärme auf die zu isolierende Stelle aufgeschrumpft.
3. *Vorfabrizierte steckbare Armaturen.* Im Mittelspannungs-Bereich 10...30 kV stehen heute für PE- oder VPE-isolierte Kabel aufsteckbare Fertigarmaturen aus EPDM-Elastomer zur Verfügung, bei welchen der Feldsteuerungskonus voll integriert ist.
4. *Giessharz-Kabelarmaturen.* Im Spannungsbereich bis 10 kV gelten diese heute als die eigentlichen Nachfolger der Gussarmaturen. Modernste UV-stabilisierte Giessformen zusammen mit speziell modifizierten elastischen PUR-Harzen mit sehr geringer Wärmetönung erlauben die universelle Anwendung auf ölgefüllten Papierblei- und Haftmassekabeln sowie auf PVC-, PE- oder VPE-isolierten Kabeln. Die Erfahrungen mit diesem System gehen auf 20 Jahre zurück.

Adresse des Autors:
Walter Kälin, Leiter der Abt. Elektroprodukte, Cellpack AG, 5610 Wohlen.

Zusammenfassung des Diskussionsleiters, H. Rohrer, zur Themengruppe C-2. Teil: «Aufbau und Eigenschaften von Isolationssystemen fester Isolierstoffe»

Die 10 Rapporte dieser Themengruppe betreffen folgende 4 Hauptgebiete:

1. Wickeldrähte;
2. Allgemeines über Kabelisolierstoffe;
3. Niederspannungs-Kabel und Zubehör;
4. Hochspannungs-Kabel.

1. Wickeldrähte

An die Wickeldrähte aller Dimensionen werden in Anwendung und Verarbeitung immer höhere und vielseitigere Anforderungen gestellt. Leider existiert bis heute noch kein sog. Universaldraht, der all diesen Beanspruchungen genügt. Es existieren vielmehr eine Reihe spezieller Drahttypen, die den wachsenden Anforderungen entsprechend immer höher gezüchtet werden.

Der erste Rapport dieser Gruppe, von W. Marti, gibt vorerst eine Übersicht über die heute gebräuchlichen Wickeldrähte und beschreibt dann 3 neu entwickelte Produkte, nämlich einen lötbaren lackisolierten Draht für Temperatur-Index 155 °C, einen lackisolierten Draht mit nachhärtbarer Klebeschicht, welche ein Imprägnieren der Wicklungen erübrigt, und einen Polyimidbandierten Draht, der trotz der teuren Isolation für thermisch hochbeanspruchte Wicklungen wirtschaftlich ist.

Um die Forderung nach einem qualitativ gleichmässigen lackisolierten Draht zu erfüllen, entstand der Wunsch, durch kontinuierliche, während der Fabrikation durchgeführte Prüfungen die Qualität überwachen zu können. Im zweiten Rapport von P. Bommer wird ein neues Gerät beschrieben, das sich einfach in Lackdrahtmaschinen einbauen lässt und das die Fehlerzahl auf eine neue Art kontinuierlich registriert. Damit ist sowohl für den Hersteller wie für den Verbraucher eine neue Möglichkeit der Qualitätsverbesserung bzw. des Qualitätsnachweises lackisolierter Drähte gegeben.

Frage 1: Wie weit kann die Imprägnierung der Wicklungen durch die Verwendung von klebbaren Drähten ersetzt werden? Lässt sich insbesondere angeben, bis zu welchem Durchmesser die Verklebung anstelle der Imprägnierung möglich ist?

Frage 2: Welche praktischen Erfahrungen wurden mit Verklebung anstelle der Imprägnierung gemacht?

Frage 3: Kann das Nachhärten auch mit Stromstössen erfolgen, ohne dass die Hauptisolation Schaden nimmt?

Frage 4: Besteht eine Relation zwischen der Fehlerzahlprüfung nach VSM und der beschriebenen neuen Methode?

Frage 5: Findet durch die zur Prüfung angelegte Gleichspannung keine Schwächung der Lackisolation statt?

Frage 6: Wie hat die Wahl der Prüfspannung in Funktion von Drahtdurchmesser und Isolationsauftrag zu erfolgen?

2. Allgemeines über Kabelisolationen

Kabel sind für eine lange Lebensdauer bestimmt. Für neue Kabelisolationen besteht daher das Bedürfnis, durch abgekürzte «Alterungsversuche» zuverlässige Angaben über das Langzeitverhalten zu bekommen. Im Bericht von R. Furter und J. Wittweiler werden für einige Kabelwerkstoffe, vor allem Kautschuke, die thermische Beständigkeit, die Ölbeständigkeit und das Bewitterungsverhalten in Langzeitversuchen beschrieben.

Ein weiteres allgemeines Problem bildet das Brandverhalten von Kunststoffkabeln. Der Bericht von H. Briker bildet eine sachliche Diskussionsbasis. Es wird gezeigt, dass neben den verwendeten Kunststoffen auch Kabelaufbau, Verlegeart und Umgebung mitbestimmend sind. Die zahlreichen an ein Kabel gestellten Forderungen lassen sich nur durch Kompromiss lösen. Solange der ideale flammwidrige und im Brandfall keine Folgeschäden verursachende Kunststoff nicht gefunden ist, helfen nur direkte und indirekte Schutzmassnahmen.

Frage 7: Sind Bruchdehnung und Zugfestigkeit als Kriterien für die Ermittlung der mittleren Lebensdauer von Kabelisolationen genügend? Welche zusätzlichen Kriterien sind evtl. nötig
a) für Niederspannungskabel?
b) für Hochspannungskabel?

Frage 8: Jedes Kabel stellt ein Isolationssystem dar. Lebensdaueruntersuchungen an der Leiterisolation allein sind nicht genügend.
a) Bestehen zuverlässige Prüfmethoden zur Lebensdauerbestimmung ganzer Kabel?
b) Existieren Methoden, um die Lebensdauer von Kabeln anhand einer Systemprüfung (analog Motorett-Prüfung) zu ermitteln?

Frage 9: Sind die Bedürfnisse der Praxis bezüglich Ölbeständigkeit von Kabeln genügend bekannt, und entsprechen die heute angewendeten Prüfmethoden diesen Anforderungen?

Frage 10: Bestehen praxisnahe Prüfmethoden über das Brandverhalten von Kabeln?

3. Niederspannungskabel und Zubehör

Unter den Kunststoffen, die in der Kabelindustrie verwendet werden, sind Weich-PVC und PE die wichtigsten. Dank ihrer hervorragenden Eigenschaften sind sie seit Jahrzehnten für Leiter und Kabel der Starkstrom- und Nachrichtentechnik in zunehmendem Masse im Einsatz. Ihre Temperaturbeständigkeit ist aber für gewisse Anwendungen nicht genügend.

Durch Verwendung höher molekularer PVC-Sorten, polymerer Weichmacher und besserer Stabilisierung kann das Verhalten von PVC-Isolationen bei höheren Temperaturen verbessert werden. Auch beim PE werden Typen mit höherer kristalliner Schmelztemperatur entwickelt. Ein entscheidender Fortschritt im Verhalten bei höheren Temperaturen kann durch Vernetzung erreicht werden.

Der Bericht von R. Kurz beschreibt einleitend die Entwicklung der Niederspannungs-Kabelisolationen von Papier über PVC zum vernetzten PE. Für einige Kabeltypen mit XLPE als Aderisolation werden die zulässige Belastbarkeit und die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu PVC-Kabeln dargelegt. Auf Grund ausgedehnter zyklischer Belastungsversuche an Kabeln mit konzentrischem O-Leiter werden Angaben über die Lebensdauer dieser Kabel abgeleitet. Schliesslich wird im Rapport über die Entwicklungsmöglichkeiten in Konstruktion und Verfahrenstechnik hingewiesen.

Im Bericht von Th. Schuler werden vorerst die Eigenschaften der gebräuchlichen PVC-Kompounds und deren Einsatzgrenzen dargelegt. Eine wesentliche Verbesserung der Lösungsmittelbeständigkeit und vor allem der thermischen Eigenschaften kann durch die Strahlenvernetzung erreicht werden. Das strahlenvernetzte PVC steht damit im Wettbewerb mit vernetztem PE.

Parallel mit der Entwicklung der Kabel und insbesondere mit der Anwendung von Kunststoffen zur Kabelherstellung, mussten auch die Muffen und Endverschlüsse materialmässig und konstruktiv angepasst werden. Im Rapport von W. Kälin wird vorerst ein Überblick über die heute im Nieder- und Mittelspannungsbereich zur Verfügung stehenden Systeme gegeben und dann eingehender die Giessharzarmaturen beschrieben, wobei besonders auf die Vorteile der modifizierten Polyurethanharze hingewiesen wird.

Frage 11: Wie lassen sich auf dem Gebiet der Niederspannungskabel die Anwendung von vernetztem PVC und vernetztem PE abgrenzen?

Frage 12: Bei welcher Wandstärke liegt die technische und wirtschaftliche Grenze der Strahlenvernetzung?

Frage 13: Wie steht es mit der Möglichkeit der chemischen Vernetzung von PVC in den bekannten CV-Anlagen?

Frage 14: Im Gegensatz zum Ausland werden in schweizerischen Niederspannungsnetzen noch mehrheitlich Papierbleikabel verwendet. Es drängt sich daher vor allem ein Vergleich der XLPE-Kabel mit PPb- oder PiPb-Kabel auf. Ist das XLPE-Kabel technisch und wirtschaftlich geeignet, die papierisolierten Kabel zu ersetzen?

Frage 15: Liegen Untersuchungen vor über das Langzeitverhalten von XLPE-Kabeln bei stationärer thermischer Beanspruchung?

Frage 16: Genügen die in den Regeln des SEV festgelegten Prüfmethoden, um Kabel aus vernetztem PE auf Qualität und langdauernde Betriebssicherheit zu prüfen?

Frage 17: Wie verhalten sich Kunststoffendverschlüsse und Muffen bei dynamischer und thermischer Kurzschlussbeanspruchung?

Frage 18: Existieren Kunststoffmuffen, die sich einfach, und ohne das Kabel zu beschädigen, wieder öffnen lassen?

Frage 19: Sind die Kunststoffarmaturen bei wechselnder thermischer Belastung genügend feuchtigkeitssicher?

4. Hochspannungskabel

Nachdem im Bereich der Niederspannungskabel die Kunststoffe auf breiter Basis eingeführt sind, finden sie in zunehmendem Masse auch Eingang im Gebiet der Hochspannungskabel. Verbesserte und neue Kunststoffe, sowie die Einfachheit der Herstellverfahren haben diese Entwicklung beschleunigt. Heute sind Versuchskabel bis zu 225 kV Nennspannung und Betriebsfeldstärken bis 10 kV/mm in Betrieb.

Im Rapport von R. Mühlethaler werden Eigenschaften und Anwendung der im Bereich der Hochspannungskabel eingesetzten Kunststoffe beschrieben. Während bis heute PE niederer Dichte bis zu höchsten Spannungen verwendet wurde, gehen neue Entwicklungen in Richtung des wärmebeständigeren PE niederer Dichte und des vernetzten PE. Probleme stellen vor allem die im PE enthaltenen Verunreinigungen, die Spannungsrisskorrosion und innere Materialspannungen. Für besonders biegsame Kabel wird auf die Möglichkeit von EPR und EPDM hingewiesen.

Der Rapport von G. de Montmollin schafft eine gute Diskussionsbasis für den Vergleich der papierisolierten und der polythenisolierten Hochspannungskabel. Nach einer kurzen Gegenüberstellung der für den Durchschlag charakteristischen Merkmale der bandierten und der extrudierten Isolation werden einige Vor- und Nachteile dieser Isolationsarten für verschiedene Spannungsbereiche angegeben.

Im Bereich 150 kV und höher werden neben den klassischen Ölkabeln seit einigen Jahren Gasdruckkabel vorgeschlagen. Der Bericht von E. Buchmann und B. Weber beschreibt ein Gas-Aussendruckkabel für 220 kV, an welchem in einem Langzeitversuch Betriebserfahrungen gesammelt werden sollen. Der Bericht wird in der Gruppe F behandelt.

Frage 20: Bis zu welcher Betriebsspannung lassen sich Kabel mit XLPE-Isolation herstellen?
Welche max. Betriebsfeldstärken werden zugelassen?

Frage 21: Haben die von Vernetzungsmitteln herrührenden Rückstände keinen nachteiligen Einfluss auf die übrigen Komponenten des Kabels, insbesondere auf die Leiter?

Frage 22: Wie weit sind die Probleme des «treeing» bei Hochspannungskabeln aus XLPE gelöst?

Frage 23: Wie weit lassen sich die Eigenschaften der XLPE-Isolationen durch Füllmittel weiter verbessern?

Frage 24: Im Bericht von G. de Montmollin werden die Eigenschaften der imprägnierten Papier-Isolationen und der PE-Isolationen verglichen. Es wäre wünschenswert, diesen Vergleich auf das vernetzte PE auszudehnen.

Frage 25: Wie weit sind die Konstanten *k, a* und *b* der Formeln 2 und 3 des Berichts von G. de Montmollin durch praktische Versuche an verschiedenen Kabeltypen zahlenmässig ermittelt?

Frage 26: Grundwassergefährdung und statische Druckprobleme bei Ölkabeln haben das Interesse an sog. «trockenen Kabeln» geweckt. Wie weit lassen sich bei den Kabeln mit gewickelter Isolation Kabelmassen und Öl durch Gas oder Druckgas ersetzen?

Diskussionsbeiträge der Themengruppe C-2. Teil: «Aufbau und Eigenschaften von Isolationssystemen fester Isolierstoffe»

W. Marti, Schweiz. Isola-Werke, Breitenbach (zu den Fragen 1, 2, und 3 des Diskussionsleiters, H. Rohrer):

Frage 1: Es handelt sich um ein verhältnismässig junges Produkt. Die vorliegenden praktischen Erfahrungen sind deshalb noch nicht sehr umfangreich. Es zeigt sich jedoch, dass derartige Drähte in Statorwicklungen von Kollektor- und Asynchronmotoren, wie sie etwa in Haushaltungsmaschinen und Handwerkzeugen eingesetzt werden, ohne zusätzliche Imprägnierung verwendet werden können. Die dicksten Drähte, die meines Wissens bis jetzt mit Erfolg verwendet wurden, haben einen Durchmesser von 0,60 mm. Auf Grund von Laborversuchen kann man annehmen, dass sich, je nach Form und Aufbau der Wicklung, Drähte bis ca. 1,0 mm Durchmesser einsetzen lassen.

Frage 2: Das praktische Verhalten von Wicklungen aus solchen Drähten ist bis jetzt sehr gut. Es ist jedoch einzuschränken, dass bei den bis jetzt bekannten Anwendungen eine abnormale Verschmutzung und Feuchtigkeitseinwirkung nicht stattfindet. Ebenso ist festzustellen, dass die Drähte nicht bei rotierenden Teilen eingesetzt wurden.

Frage 3: Das Nachhärten kann mit Stromstössen erfolgen. Die Hauptisolation nimmt keinen Schaden, sofern die für sie zulässige Temperatur dabei nicht überschritten wird. Ich habe bereits in meinem Rapport darauf hingewiesen, dass es möglich wäre, Kleber mit höherer Verklebe- und Nachhärtetemperatur mit besserer Klebewirkung und höherer Wiedererweichungstempratur zu ververwenden, wenn nicht die Hauptisolation dadurch beschädigt würde.

Allgemein ist festzustellen, dass die Verarbeitungstechnik angepasst werden muss. Diese Anpassung war jedoch auch bei den bisher bekannten, in der Wärme bei niedrigerer Temperatur verklebbaren Drähten erforderlich. Es ist besonders bei wilden Wicklungen darauf zu achten, dass keine losen Windungen entstehen. Praktisch wird bei Statorwicklungen die Verbackung gleichzeitig mit dem Pressen und Dressieren der Wickelköpfe vorgenommen.

R. Kurz, Dätwyler AG, Altdorf (zu den Fragen 11 und 13 des Diskussionsleiters, H. Rohrer): Chemisch und strahlenvernetzte PVC-Kabelmischungen dürfen, analog den Verhältnissen beim PE, in erster Näherung als in ihren Endeigenschaften gleich vorausgesetzt werden. Die Applikationsabgrenzung zwischen XL-PE und XL-PVC sei anhand einiger in Tabelle I zusammengestellter relevanter Qualitätsmerkmale vorgenommen. Danach weist das XL-PVC im Vergleich zum XL-PE mit Ausnahme der Flexibilität durchweg etwas schlechtere, in allen Belangen für das Nsp-Kabel jedoch ausreichende Eigenschaften aus. Vor allem bezüglich der Dauerwärmebeständigkeit muss das XL-PVC jedoch hochgezüchtet werden (Weichmacher). Dadurch verliert es aber ein gut Stück seiner Variationsbreite – den Hauptvorteil, den das unvernetzte PVC anderen Thermoplasten voraus hat. Zudem wirkt sich dies ungünstig auf den Preis aus. Da auch mit entsprechenden thermoplastischen PVC-Mischungen verglichen sich kein wirklich prägnanter Vorteil ergibt, wie Tab. II ausweist, darf der Einsatz von XL-PVC auf dem Nsp-Kabel-Gebiet nur in einem relativ schmalen Bereich von Sonderanwendungen (evtl. Steuerkabel, Schaltdrähte usw.) erwartet werden.

Vergleich von chemisch vernetztem Polyvinylchlorid XL-PVC mit chemisch vernetztem Polyäthylen XL-PE

Tabelle I

Eigenschaften		XL-PVC	XL-PE
Dauerwärmebeständigkeit	°C	70–90 w	90
Wärmedruckfestigkeit		gut	gut
Kältebruchtemperatur	°C	–30 w	–60 f
Flexibilität		gut w	ungünstig
mechanische Festigkeit		gut	gut
spez. Durchgangswiderst. bei 20 °C	Ω cm	10^{14} w	10^{15} f
spez. Durchgangswiderst. bei 90 °C	Ω cm	10^{40} w	10^{14} f
DK bei 20 °C		4–6 w	2.5–4 f
Verlustfaktor tan δ bei 20 °C 50 Hz		0.05 w	0.005 f
Flammwidrigkeit		gut	ungünstig
Einsatzbereich		NSP	NSP–MSP
Preis Fr./l		3.–	2.50

w = stark von Weichmacherart und -menge abhängig
f = stark von Füllstoffart und -menge abhängig

Vergleich XL-PVC mit entsprechenden PVC-Thermoplastmischungen

Tabelle II

XL-PVC mit Normalweichmacher, z. B. DOP
↑ Wärmedruckfestigkeit
= Dauerwärmebeständigkeit max. 70 °C
= Kältebeständigkeit
= Flexibilität
= El. Eigenschaften
↓ Verarbeitung
↓ Preis

XL-PVC mit Spezialweichmacher, z. B. Trimellitat
↑ Wärmedruckfestigkeit
= Dauerwärmebeständigkeit max. 105 °C
= Kältebeständigkeit
= Flexibilität
= El. Eigenschaften
↓↓ Verarbeitung, schwierig
↓ Preis

↑ bessere Werte
= gleiche Werte
↓ ungünstigere Werte

Die Aufbereitung und Verarbeitung von chemisch vernetztem PVC bietet insofern gewisse Schwierigkeiten, als bei Verwendung tief- und schnellreagierender Peroxide schon beim Geliervorgang die Gefahr des Anspringens besteht, andererseits aber bei Wahl Peroxiden mit hoher Anspringtemperatur bzw. Halbwertszeit eine wirtschaftliche Fertigung in der CV-Anlage erschwert wird.

R. Kurz, Dätwyler AG, Altdorf (zu den Fragen 12, 14, 15, und 16 des Diskussionsleiters, H. Rohrer):

Zur Frage 12: Grundsätzlich können auch dicke PE-Isolationen auf grossen Leiterquerschnitten, wie sie zum Beispiel bei Msp-Kabeln üblich sind, strahlenvernetzt werden. Wie Abb. 1 zeigt, sind hierfür jedoch grosse Energiemengen bis etwa 4 MeV und mehr (bei Dosen bis ungefähr 15 Mrad) nötig und die notwendigen Abschirmmassnahmen entsprechend aufwendig. Die Investitionskosten für komplette Strahlenvernetzungsanlagen dieser Grösse betragen deshalb bis 4 Mio. Franken und mehr. Ausser dem sehr grossen investiven Aufwand besteht bei dicken Isolationen und grossen Leiterquerschnitten ausserdem das Problem der Vernetzungshomogenität, das sich im allgemeinen nur durch eine weitere erhebliche Steigerung des Aufwandes befriedigend lösen lässt.

Technisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar scheint deshalb die Anwendung der Strahlenvernetzung nur bei relativ dünnen Isolationen (etwa 0,3–1,0 mm) auf dünnen Leitern (ca. 1,0–4,0 mm ⌀) zu sein. Auch hier liegt allerdings auf Grund der noch immer sehr grossen Investitionskosten (etwa 1 Mio Fr.) die zu produzierende Menge, bei der die Strahlenvernetzung sich als wirtschaftlicher erweist als die chemische Vernetzung, im Bereich sehr grosser Aderlängen, wie eine grobe Abschätzung in Abb. 2 ausweist. Es wurde dabei davon ausgegangen, dass für die Herstellkosten bei der Strahlenvernetzung infolge des 5...10mal grösseren Investitionsaufwandes hauptsächlich die Fixkosten verantwortlich, bei der chemischen Vernetzung hingegen das Hauptelement die variablen Kosten sind. Man darf deshalb davon ausgehen, dass sich das Interesse für die Strahlenvernetzung auf dem Kabelgebiet auch in Zukunft in relativ engen Grenzen halten wird.

Anzumerken wäre noch, dass den vorgelegten Angaben die Verhältnisse bei maschinellen Elektronenbeschleunigern zugrunde liegen (Dynamitron, Resonanzumformer, van-de-Graaf-Generator). Mit Isotopen werden grössere Eindringtiefen erreicht (zum Beispiel Kobalt 60: 432 mm/MeV), ihr Nachteil besteht jedoch in der niedrigen, mit der Zeit abnehmenden Dosisleistung und dem sich daraus ergebenden Zwang zur jährlichen oder halbjährlichen Erneuerung.

Zur Frage 14: Das PVC-Kabel stellt gewissermassen eine Weiterentwicklung des Papier-Blei-Kabels dar. Seine Vorteile kommen bei folgenden Punkten zum Ausdruck: Gewicht, Verlegung, Muffen, Endverschlüsse, mechanische Robustheit, Korrosionsbeständigkeit (siehe hierzu auch Tab. 1, S. 4, des Berichtes). Als in etwa gleich werden in Deutschland, dem Ursprungsland des PVC-Kabels, PVC- und PPb-Kabel hinsichtlich ihrer thermischen Belastbarkeit angesehen.

Das XL-PE-Kabel stellt quasi eine Weiterentwicklung des PVC-Kabels dar (obwohl es aus den USA stammt und nicht im direkten Zusammenhang mit dem PVC-Kabel entwickelt wurde). Es hat gegenüber dem PPb-Kabel alle Vorzüge des PVC-Kabels plus den zusätzlichen Vorteil einer höheren thermischen Belastbarkeit.

Technisch gesehen, kann deshalb bereits das PVC-Kabel das PPb-Kabel ersetzen. Erst recht natürlich das XL-PE-Kabel, das diesem und dem PPb-Kabel thermisch weit überlegen ist. Aber auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten schneidet das XL-PE-Kabel recht günstig ab: Wenn man nämlich dem ca. 10 % höheren Preis die niedrigeren Verlustkosten, die grössere Belastungs- und Überlastungsreserve sowie die grössere Sicherheit im Kurzschlussfall gegenüberstellt.

In der Schweiz besteht eine besondere Situation. Auf Grund der Literaturangaben und der Praxis im Ausland darf man annehmen, dass das PVC-Kabel dem PPb-Kabel thermisch mindestens gleichwertig oder sogar überlegen ist. Die Ansicht einiger schweizerischer Elektrizitätswerke schliesst sich dieser Beurteilung jedoch nicht an. Das PPb-Kabel wird gegenüber dem PVC-Kabel höher eingestuft, und Kurzschlusstemperaturen bis 200 °C werden für PPb-Kabel als zulässig betrachtet. Dem Autor stehen keine Versuchsresultate an PPb-Kabeln zur Verfügung. Es lässt sich aber vermuten, dass Temperaturüberschreitungen noch nicht zu einer vollständigen Zerstörung des PPb-Kabels führen, dieses jedoch schwächen (Bleimantelblähungen, Austrocknung der Papierisolation); zudem wird das Trasse (zum Beispiel Gefälle) den zulässigen Grenzwert beeinflussen. Die Bevorzugung des PPb- gegenüber dem PVC-Kabel dürfte in erster Linie darauf zurückzuführen sein, dass bei einer allfälligen thermischen Überlastung über die zulässigen Grenzwerte hinaus die Folgeschäden beim PVC-Kabel gravierender sind: Es treten Leiterverlagerungen auf, was schliesslich zu einem Phasenkurzschluss führen kann; ausserdem können die Aderisolationen miteinander auf grosse Strecken verkleben, so dass das Kabel nicht mehr abisoliert werden kann. Beim PPb-Kabel treten diese Phänomene nicht auf. Die Papierisolation trocknet aus und kann verkohlen, der Bleimantel wird gedehnt und kann reissen. Vielfach wird aber die Betriebsspannung noch gehalten. Zum Durchschlag kommt es dann erst später, zum Beispiel wenn atmosphärische Überspannungen auftreten. Diese Gesichtspunkte, die gegen das PVC-Kabel und für das PPb-Kabel ins Feld geführt werden – wobei man sich aber fragen muss, ob sie ganz reell sind, da ein wie zuvor erwähnt malträtiertes PPb-Kabel kaum noch als voll betriebstauglich bezeichnet werden darf –, treffen auf das XL-PE-Kabel nicht zu, da dessen Grenzwerte bedeutend höher liegen.

Summa summarum kann die Frage deshalb nur mit einem eindeutigen Ja beantwortet werden.

Zur Frage 15: Derartige Untersuchungen sind dem Autor unbekannt. Es sei jedoch folgender Hinweis erlaubt: Die im Bericht (S. 74 ff) beschriebene Prüfung mit intermittierender Belastung ist auf Grund der durch das Temperaturspiel verursachten dauernden Volumenänderung und der damit verbundenen laufenden Änderung von mechanischem Spannungszustand und -grösse aller am Kabel beteiligten Bauelemente wie Leiter, Isolation, Mantel usw. wesentlich strenger als eine etwaige stationäre thermische Belastungsprüfung.

Zur Frage 16: Die vorhandenen SEV-Regeln *entsprechen* nicht dem Kabel mit XL-PE-Isolation (sie entsprechen Kabeln mit PPb-, PVC- und Gu-Isolationen für eine Betriebstemperatur von 60 °C). In die Regeln müssten daher zum Beispiel zusätzliche Belastungstabellen für 90 °C und 150 °C aufgenommen werden unter Abklärung aller die Umgebung, die Betriebsdauer usw. betreffenden Fragen. Die Belastungstabelle für 60 °C sollte auch für das XL-PE-Kabel beibehalten werden. Dabei sollte man dessen Belastungsverhältnisse unter folgenden Aspekten sehen: Standard-Dauerbelastung: 60 °C, Extrem-Dauerbelastung: 90 °C, Notbetrieb: 150 °C.

Ob die vorhandenen Regeln *genügen* hinsichtlich der Beurteilung auf Lebensdauer, ist auch für die ihnen heute entsprechenden Kabel mit PPb-, PVC- und Gu-Isolation schwer zu sagen, da diesbezüglich spezifische Prüfungen darin fehlen. Die Praxis spricht jedoch dafür. Unter dieser Voraussetzung darf aber angenommen werden, dass die SEV-Regeln, sofern sie wie vorgeschlagen ergänzt und die darin vorgesehenen Prüfungen, insbesondere die Alterungsprüfungen, auf die höheren Gebrauchstemperaturen hin modifiziert werden, auch dem XL-PE-Nsp-Netzkabel genügen können (siehe hierzu auch Normierungsvorschlag Tab. 8, S. 43, im Bericht).

P. Bommer, Schweizerische Isola-Werke, Breitenbach (zu Fragen des Diskussionsleiters H. Rohrer):

Zur Frage 4: Eine Relation zwischen der Fehlerzahlprüfung nach VSM und der neuen Methode besteht, aber nicht als einfache Proportionalität. Die neue Methode zeigt bei grossen Fehlerzahlen verhältnismässig mehr Fehler an als das VSM-Gerät. Es reagiert also empfindlicher auf eine Verschlechterung des Drahtes (Fig. 1).

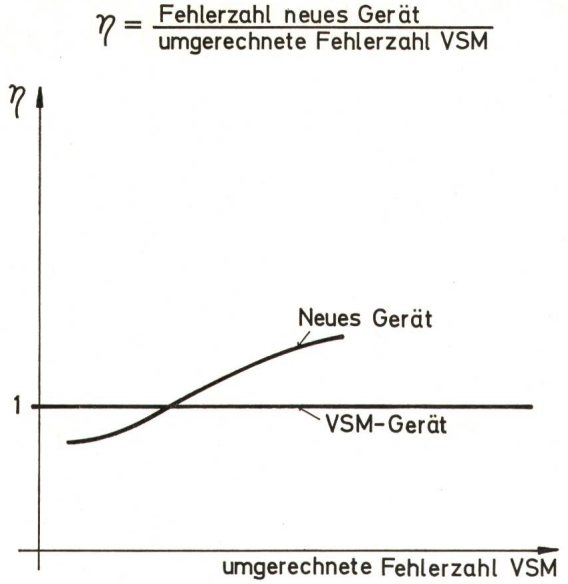


Fig. 1

Massgebende Ursachen sind:

– Die VSM-Methode bildet das Zeitintegral des Fehlerstromes. Isolationsfehler-Messgeräte, die nur auf diskrete Fehlerstellen ansprechen (durch einen Impuls), berücksichtigen die Grösse des Fehlerstromes nicht. Hier besteht also eine prinzipielle Abweichung.

Viel wichtiger ist aber der Unterschied in der dielektrischen Beanspruchung:

– VSM-Gerät: Prüfzeit ca. 250 ms, Prüfgleichspannung 150...500 V. Neue kontinuierliche Methode: Prüfzeit ca. 10 ms, Prüfgleichspannung 1000...2000 V. Die Beanspruchung ist also bei der neuen Methode mehr stossartig.

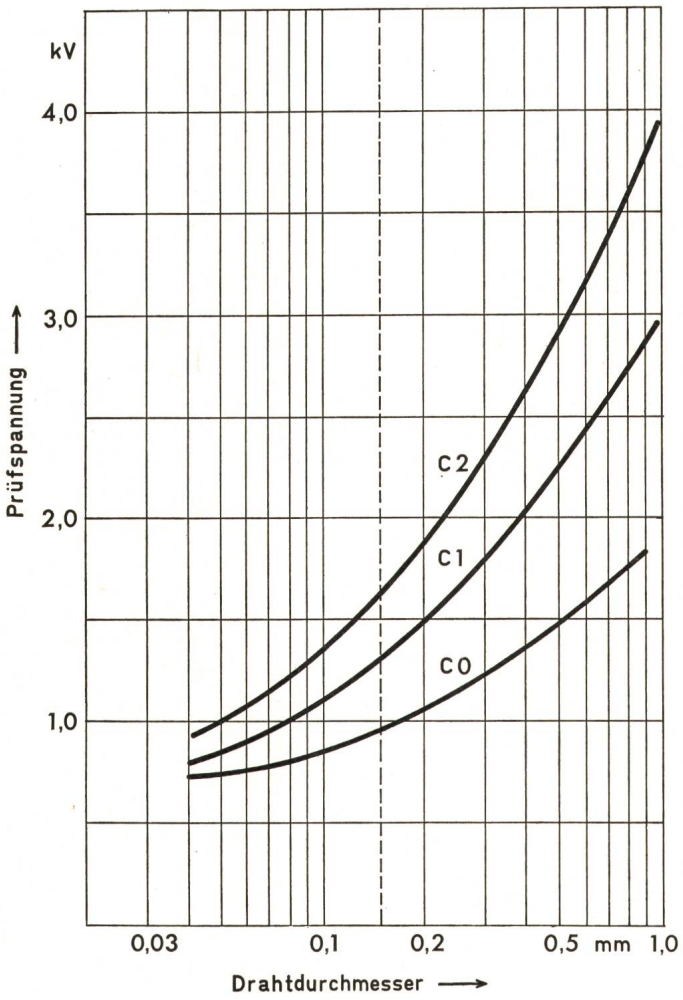


Fig. 2

Man stellt dabei fest: Ein auf Grund der neuen Methode als gut befundener Draht besteht die VSM-Prüfung sicher. Bei einer mit dem neuen Gerät maximal erfassbaren Fehlerzahl von 50 pro Messlänge (normalerweise 100 m) ist ein Draht mit einer Fehlerzahl von 5...10 Fehlern pro Messlänge als gut zu bezeichnen. Wesentlich ist aber, dass auf Grund der Ergebnisse des neuen Gerätes ein neues Fehlerdenken Platz greifen sollte. Der Hersteller wird über ein allfälliges Ansteigen der Fehlerzahlen sofort informiert. Er sollte deshalb nicht warten, bis die zulässige Fehlergrenze von ca. 10 Fehlern pro Messlänge erreicht wird, sondern er soll unverzüglich die notwendigen Massnahmen ergreifen, um die Fehlerzahl wieder auf annähernd Null zu bringen. Nachdem er einige Erfahrungen über mögliche Fehlerquellen gesammelt hat, wird er dazu leicht in der Lage sein.

Die Frage nach der Übereinstimmung der Fehlerzahlen verschiedener Prüfmethoden verliert aus den angegebenen Gründen ihre Bedeutung.

Zur Frage 5: Die Beanspruchung des Drahtes bei der neuen Methode ist stossartig. Bei dieser Beanspruchung stellt sich in der Tat immer wieder diese Frage. Rein überlegungsmässig lautet die Antwort:

– Anhand den im Anfang des Berichtes beschriebenen Durchschlagsprüfungen stellt man fest, dass in den Diagrammen die Zahl der Durchschläge in Funktion der Prüfspannung nach einem flach verlaufenden Teil schroff ansteigt. Dieser starke Anstieg deutet darauf hin, dass nicht mehr diskrete Fehlerstellen, sondern gesunde Isolation durchschlagen wird. Das Verhältnis der Spannungen an den Knickstellen zu den Spannungen, die wir für die Prüfung mit dem kontinuierlichen Gerät festgelegt haben, erreicht überall mindestens den Wert 2. Zusätzlich mildernd wirkt die Anwendung von Gleichspannung, während die in den Diagrammen angeschriebenen Werte effektive Wechselspannungswerte sind. Die Differenz zwischen Durchschlagsspannung und Prüfspannung dürfte gross genug sein, um eine Schädigung der gesunden Isolation mit Sicherheit auszuschliessen. Diese Aussage haben wir auch mit Versuchen belegt:

– Grosse, erst einmal geprüfte Drahtlängen wurden hinterher mehrmals unter gleichen Bedingungen nachgeprüft. Die nachträglich registrierten Fehlerzahlen waren nur unwesentlich erhöht und bestätigten somit den oben gezogenen Schluss.

Zur Frage 6: Die Frage hängt eng mit der vorherigen Frage zusammen. Die Wahl der Prüfspannung bei der beschriebenen Methode kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Sie ergeben ein genügend breites Band, innerhalb welchem die Spannung ohne nachteilige Folgen gewählt werden kann. Als Kriterien gelten:

– Das Glimmlicht soll den Draht völlig umschliessen.

– Ein Draht wird abwechslungsweise während einer Prüflänge mit nur einer, während einer weiteren Prüflänge mit zwei einander gegenüberstehenden Prüfrollen getestet. Die richtige Spannung ist dann erreicht, wenn beide Prüfungen wiederholt dieselben Fehlerzahlen ergeben.

– Der Draht wird kontinuierlich auf Durchschlag geprüft. Der Verlauf der Durchschlagszahl pro Prüflänge zeigt den beschriebenen Knick. Die anzulegende Prüfgleichspannung soll nicht höher sein als die Hälfte dieser Knickspannung.

Aus Fig. 2 sind die in Frage stehenden Prüfspannungen bei verschiedenen Lackaufträgen ersichtlich. Den damit festgelegten Zusammenhängen soll aber noch kein definitiver Charakter beigemessen werden, da noch nicht überall genügend Erfahrungen vorliegen.

T. Schmollinger, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (zum Beitrag von P. Bommer): Die Vorteile dieser Methode sind bestechend; es wird endlich das elektrische Spannungsverhalten der Isolation einer ganzen Lieferung bereits während der Fabrikation erfasst.

Im Referat wird die Methode jedoch nur an dünnen Drähten expliziert; Fragen:

– Lässt sich diese Methode für alle Runddrahtdimensionen einführen?
– Kann diese Methode auch für Flachdrähte modifiziert werden?
– Wird der Hersteller garantieren können (wenn sich die Überwachungsmethode einführen sollte), dass Drahtabschnitte mit hoher Fehlerzahl innerhalb einer Spulenlänge tatsächlich herausgeschnitten werden?

- Kann diese Methode auch beim Verbraucher als «zerstörungsfreie» Eingangskontrolle oder Überwachung beim Wickeln von Spulen eingesetzt werden?
- Wäre es vorteilhaft, für diese Methode eine VSM-Prüfvorschrift aufzustellen beziehungsweise die Aufnahme als CEI-Prüfmethode vorzuschlagen?

In den Materialvorschriften wird das elektrische Verhalten einer Isolation u. a. durch Prüfung der Durchschlagspannung an *kurzen* geraden (beziehungsweise verdrillten) Drahtabschnitten ermittelt. Dabei müssen 4 von 5 Proben die geforderte Durchschlagspannung erreichen; die 5. Probe darf «ausreissen». Daraus ergibt sich, dass praktisch nach jedem Meter Drahtlänge eine Schwachstelle in der Isolation auftreten darf, die nicht begrenzt ist. Erst durch eine anschliessende Fehlerzahlprüfung nach CEI im Durchzug durch ein Hg-Bad mit 50 V Prüfspannung wird die untere Grenze einer Schwäche der Isolation erfasst, wobei wiederum eine Anzahl Fehler zugelassen wird, bei denen es sich theoretisch um «blanke» Stellen handeln könnte.

Für die Beurteilung von Qualitäten (Vergleich verschiedener Fabrikate), des Gütegrades oder zur Qualitätssicherung lassen sich die Resultate der oben genannten Prüfungen für das elektrische Verhalten nur unsicher interpretieren.

Um zwischen Aufwand und Ergebnis eine bessere Relation zu finden, haben wir für die interne Kontrolle die Fehlerzahlmethode modifiziert. Wir ziehen den zu prüfenden Draht durch ein Kugelbad (VSM), an das die vorgeschriebene Mindest-Durchschlagspannung angelegt wird. Die Messlänge im Kugelbad beträgt 10 mm. Die Anzahl Durchschläge wird registriert (mit 1 Durchschlag pro cm).

Prüfungsbeispiel: Rd Cu C 2.2 1.05 mm ϕ

Fehlerzahl n. CEI (Hg), 50 V, pro 30 m	3 × 0 Fehler
Fehlerzahl BBC/ZLC, 1900 V, pro 30 m	22...33 Fehler
Durchschlagspannung n.VSM (gerade) (Probenlänge 250 mm)	1. Serie: *1.5*-3.5-*1.4*-4.5-4.5 kV
	2. Serie: 5.0-*0.9*-*1.5*-4.0-4.0 kV
	3. Serie: 3.0-3.5-3.0-4.5-4.5 kV
	4. Serie: 2.5-3.5-3.0-4.0-5.5 kV
	5. Serie: 3.0-3.5-4.5-*1.2*-*1.3* kV
	6. Serie: 4.5-3.0-2.5-3.0-3.5 kV
	7. Serie: *0.7*-2.5-4.4-3.0-*1.2* kV
	8. Serie: 6.0-3.0-3.5-3.5-1.5 kV
	9. Serie: 5.5-2.5-4.0-*0.9*-3.5 kV
	10. Serie: 2.5-3.0-*1.4*-3.0-*1.5* kV

Die Isolation dieser überprüften Lieferspule ist nach CEI-Fehlerzahl völlig in Ordnung. Die Fehlerzahl nach BBC-Methode ergibt kritische Werte, das heisst, die geforderte Mindest-Durchschlagspannung wird vermutlich nicht erreicht. Die Kontrolle zeigt, dass von 10 Serien à 5 Proben die Hälfte der Serien «bestanden beziehungsweise nicht bestanden» haben. Je nachdem, was nun der Prüfer bei der Prüfung der Durchschlagspannung am Anfang des Drahtes vorfindet, wird er entscheiden.

Der dargestellte Vergleich lässt auch noch andere Schlussfolgerungen zu, die aber nicht näher diskutiert werden müssen. Offensichtlich ist, dass das bisher genormte Vorgehen keine qualitative Gewichtung erlaubt.

Die referierte Methode von P. Bommer kann erheblich zur Qualitätssicherung beitragen.

W. Marti, Schweiz. Isola-Werke, Breitenbach (zu den Fragen 1 und 2 des Diskussionsleiters H. Rohrer):

Zur Frage 1. Versuche zur Herstellung von flachen lackisolierten, in der Wärme verklebbaren Drähten wurde noch nicht eingeleitet. Es wird mindestens noch ein Jahr dauern, bis solche Produkte bis zu einem Querschnitt von etwa 10 mm² fabrikationsreif sind.

Zur Frage 2. Es ist möglich, Drähte mit beidseitig mit FEP beschichtetem Imidband zu isolieren. Mit solchen Drähten könnten die einzelnen Windungen einer Wicklung miteinander verklebt werden. Bei der Herstellung solcher Wicklungen muss die verhältnismässig hohe Temperatur, bei welcher ein Verkleben möglich ist, beachtet werden. Ob die erzielbare Klebewirkung den Bedürfnissen genügt, muss noch untersucht werden.

P. Bommer, Schweiz. Isola-Werke, Breitenbach (zum Diskussionsbeitrag von T. Schmollinger): Die Methode lässt sich voraussichtlich mit modifizierten Prüfelektroden auf alle Runddrähte, ja sogar auf Flachdrähte anwenden.

Die kontinuierliche Registrierung erlaubt, alle notwendigen Massnahmen zu ergreifen, seien es nun sofortiges Beseitigen der Fehlerursache oder auch das Herausschneiden fehlerhaften Drahtes. Es ist Sache einer Vereinbarung zwischen Hersteller und Verbraucher, unter welcher Voraussetzung die fehlerhaften Drahtabschnitte herausgeschnitten werden sollen. Aufgrund der vollständigen Kontrolle kann man deshalb an gewisse Garantien denken, die über das hinausgehen, was bis heute üblich war. Die Geräte für die neue Prüfmethode werden im Handel erhältlich sein und es jedem Drahthersteller ermöglichen, diese Kontrolle anzuwenden.

Es bestehen keine prinzipiellen Schwierigkeiten, die neue kontinuierliche Prüfmethode auch beim Verbraucher einzusetzen. Sollte dies an schnell laufenden Wickelmaschinen geschehen, so ist allerdings zu überprüfen, ob das Gerät bei extrem hohen Abzugsgeschwindigkeiten noch anspricht. Diese überschreiten ja oft erheblich die Fabrikationsgeschwindigkeiten.

Als Eingangskontrolle eingesetzt, müsste für die neue Prüfmethode wohl eine etwas modifizierte Arbeitsweise geschaffen werden. Als Elektroden kämen einander gegenüberliegende Prüfrollen in Frage. Die Abzugsgeschwindigkeit müsste vorgeschrieben sein, damit die stossartige Prüfung erhalten bleibt. Bevor eine solche Methode offiziell eingeführt werden kann, müssen aber genügend Erfahrungen im Prüflabor gesammelt werden.

A. Küng, Société d'Exploitation des Câbles Electrique, Cortaillod: Zugfestigkeit und Bruchdehnung geben Auskunft über das mechanische Verhalten des Prüflings im Moment der Prüfung. Bei einer Alterung, das heisst einer Schädigung eines Werkstoffs durch einen bestimmten, lange einwirkenden Effekt, z. B. Alterung durch Temperatur, Alterung durch chemische Agenzien usw. werden nun meistens alle seine Eigenschaften verändert, man kann deshalb oft irgend eine bequem zu messende Eigenschaft als Indiz des zeitlichen Ablaufs der Werkstoffänderung heranziehen. Dabei können sich aber die verschiedenen Eigenschaften gegensinnig ändern, z. B. kann die Quellung eines Kunststoffes durch ein nichtpolares Lösemittel gleichzeitig eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften und eine Verbesserung der elektrischen Eigenschaften bewirken.

Bei Niederspannungskabeln sind die elektrischen Eigenschaften, z. B. Durchschlagsfestigkeit des Isoliermaterials, nicht bis zum Grenzwert ausgenützt, das Betriebsverhalten kann also ohne weiteres stärker durch andere, z. B. mechanische Eigenschaften, bestimmt werden. Beim Hochspannungskabel stehen naturgemäss die elektrischen Eigenschaften stärker im Vordergrund, die natürliche oder künstlich beschleunigte Alterung muss deshalb mittels der Änderung der elektrischen Eigenschaften, wie Verlustwinkel, Teilentladungsstrom, Durchschlagsfestigkeit, gemessen oder auf Grund der Ionisationsspuren wie X-Wachs- oder «Bäumchenbildung» festgestellt werden. Aber auch beim Hochspannungskabel entscheidet nur die Änderung der Summe aller Eigenschaften über die Alterung und damit über die Lebensdauer eines Kabels.

R. Mühlethaler, S.A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare (zur Frage 10 des Diskussionsleiters, H. Rohrer): Zahlreiche Länder haben Prüfmethoden über das Verhalten der Kabel bei einem Brand unter praxisnahen Bedingungen studiert. Im Gegensatz zu den klassischen Versuchen, die sich nur mit einem Draht oder einem Kabel befassen, basieren diese neuen Methoden auf Versuchen mit Kabelbündeln, wie man sie in der Praxis häufig antrifft.

In den USA ist z. B. der von der Philadelphia Electric entwickelte Vertical Tray Flame Test der bekannteste Versuch dieser Art. Eine durch General Electric verbesserte Version wurde vor kurzem in der Literatur beschrieben [1][1]). Bei diesem Versuch

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Diskussionsbeitrages.

legt man eine Serie von Kabeln vertikal auf ein 30 cm breites und ca. 2 m hohes Gestell, das die Form einer Leiter hat. Diese Kabel werden Flammen ausgesetzt, die durch das Anzünden von vereinheitlichten, mit Öl durchtränkten und unter dem Gestell plazierten Lappen erzeugt werden.

Die verschiedenen in Europa in Betracht gezogenen Lösungen wurden an dem von der Electrical Research Association (ERA) organisierten Symposium on Fire Protection of Cables am 9. Mai 1972 in London diskutiert.

Bei dieser Gelegenheit wurde viel vom italienischen Versuch gesprochen, der vom Centro Elettrotecnico sperimentale Italiano (C.E.S.I.) in Zusammenarbeit mit dem Ente Nazionale Energia Elettrica (E.N.E.L.) entwickelt wurde, sowie von einem sehr ähnlichen, in England durch das Central Electricity Generating Board (C.E.G.B.) ausgearbeiteten Versuch. Diese Versuche wurden an sehr langen Kabeln (25 à 50 kg Isolationsmaterial) vorgenommen, die in Bündeln gruppiert und in sehr grossen Kaminen (C.E.S.I.: 2,5 × 2, 5 × 5, 4 m) plaziert sind.

Diese sehr interessanten, aber auch sehr teuren Versuche (Installation ca. Fr. 40 000.– + Fr. 2000.– bis Fr. 3000.– pro Versuch gemäss BICC: British Insulated Callender's Cables Ltd) erfordern eine enge Zusammenarbeit zwischen den Fabrikanten und den nationalen Kontrollverbänden.

Was das Verhalten der Kabel bei Bränden betrifft, müssen die Anstrengungen der Fabrikanten von Isolationsmaterialien und der Kabelhersteller hervorgehoben werden, um selbstverlöschende Kabel, die keine oder sehr wenig korrosive Gase absondern, auf den Markt zu bringen. Als Beispiel seien die Mischungen von PVC [2] und Chloroprene-Kautschuk [3] erwähnt, die Füllstoffe enthalten, welche die säurehaltigen Dämpfe absorbieren, sowie einige gefüllte XLPE-Mischungen [4].

Literatur

[1] *J. W. Robertson:* New flame tests for control and power cable. Wire and Wire Products 47(1972)2, p. 49...56.

[2] *O. Leuchs:* Eine neue, selbstverlöschende und Chlorwasserstoff bindende PVC-Mischung für Kabelmäntel. Kunststoffe 61(1971)1, S. 40...45.

[3] *C. E. McCormack:* Flame resistance of compositions of neoprene and hypalon via the oxygen index method indicate that both polymers have a high degree of flame resistance. Pyrolysis and combustion tests shows that hydrogen chloride evolution from these materials can be minimized by compounding. Rubber Age 104(1972)6, p. 27...36.

[4] *L. Hagan, C. W. Kuckro* and *G. E. Lorand:* Flame retardant compounds based on peroxide-crosslinkable polyolefins offer a high degree of flame-resistance for electrical insulation applications. Formulations based on ethylene-vinyl acetate and polyethylene offer useful end properties comparable or superior to the other compounds finding current use. Rubber Age 103(1971)10, p. 81...90.

E. Buchmann, Kabelwerke Brugg AG, Brugg: Im Beitrag von R. Kurz sind die angewandten Berechnungsgrundlagen für die Ermittlung der angegebenen Vergleichsfaktoren X recht ausführlich wiedergegeben. Der Wärmewiderstand von Kabelisolation und Kabelumgebung wurde mit Faust-Formeln berechnet, die für den Praktiker sehr nützlich sind und gute Richtwerte ergeben. Es wäre zu begrüssen, wenn bei Typenvergleichen die genaueren Berechnungsgrundlagen verwendet würden, wie sie in der CEI-Publikation 287 international anerkannt vorliegen.

Für die praktische Anwendung der angegebenen Berechnungsgrundlagen möchte ich deshalb ergänzen, dass für den Wärmewiderstand der Kabelisolation von 1-, 3- und 4-Leiter-Kabeln nicht eine einzige einfache Berechnungsformel als Grundlage dienen kann. Aus Fig. 6 der CEI-Publikation 287 ist ersichtlich, dass der spezifische Wärmewiderstand der Umgebungsluft des Kabels für genauere Berechnungen nicht generell mit 1000 °C cm/w eingesetzt werden kann. Die Wärme-Emissionskonstante und damit der Wärmewiderstand ist von Verlegeart, Oberflächenbeschaffenheit und Farbe des Kabelmantels abhängig.

Mit diesem Beitrag möchte ich die sehr nützlichen Angaben von R. Kurz ergänzen und auf einige Probleme der Erwärmungsberechnungen hinweisen.

R. Kurz, Dätwyler AG, Altdorf (zur Frage von E. Buchmann): Da es nicht Ziel des Berichtes war, die genauen, von den örtlichen Bedingungen und einiger weiterer Parameter abhängigen Belastungsverhältnisse im Netz zu berechnen, sondern den Leistungsstandard des XL-PE-Kabels demjenigen des PVC- (und PPb-) Kabels gegenüberzustellen, wurden der besseren Übersichtlichkeit und der schnelleren Handhabung wegen die angewandte Berechnungsmethode bewusst gewählt und für die benötigten physikalischen Grössen jeweils ein allgemein typischer Wert eingesetzt – zumal auf diesem Weg ein für die angestrebten Vergleichszwecke hinreichend aussagefähiges Ergebnis erzielt werden konnte.

R. Vetter, Schweiz. Isola-Werke, Breitenbach: Im Bericht von R. Kurz wird eingehend über die vorzüglichen thermischen Eigenschaften des XLPE-Kabels berichtet. Die neue Isolation erlaubt offenbar, ein preiswertes Kabel zu fabrizieren, welches geeignet ist, das Papierbleikabel im Niederspannungsbereich zu ersetzen. Die Probleme, welche Bleimäntel sowohl in der Fabrikation und später zum Teil im Betrieb gebracht haben, fallen mit diesem neuen Kabel dahin.

Die Kunststoffisolation erlaubt zudem, Netzkabel in Ceander-Bauweise auszuführen. Diese Kunststoffkabel sind gegenüber Bleikabel wesentlich flexibler und montagetechnisch einfacher.

Trotz den Vorteilen des XLPE-Kabels, wie sie im Bericht ausführlich dargelegt sind, wäre es falsch, im Bereich der Niederspannungsnetze das konventionelle PVC-Kabel völlig auszuschliessen.

Wenn man bedenkt, dass in der Schweiz EW existieren, welche seit 30 Jahren PVC-Netzkabel mit Erfolg anwenden, so darf man behaupten, dass das PVC-Netzkabel seine Erwartungen erfüllt hat. In ausländischen Niederspannungsnetzen werden seit Jahren praktisch nur noch PVC-isolierte Netzkabel verwendet. Es ist kaum anzunehmen, dass die ausländischen Verteilnetze weniger betriebssicher aufgebaut sind als die schweizerischen Netze.

In Netzen mit richtigem Überlast- und Kurzschlußschutz darf das PVC-isolierte Kabel ohne Bedenken installiert werden. Nur kurzzeitige Überlast wird auch vom PVC-Kabel ausgehalten. Bei starker Überlast und langer thermischer Kurzschlussbeanspruchung ist das XLPE-Kabel vorzuziehen.

C. Oester, Elektrizitätswerk der Stadt Bern (zum Bericht von R. Kurz): Kann wegen der besseren mechanischen Festigkeit des Isolationsmaterials beim XL-PE-Nsp-Netzkabel auf eine Zugarmierung verzichtet werden? Des weitern wurde im Bericht davon ausgegangen, dass die Verluste im Mehrleiterkabel grösser sind als beim Einleiterkabel. Dies deckt sich jedoch nicht mit der Ansicht des Fragestellers, dessen Erfahrungen entgegengesetzt sind.

R. Kurz, Dätwyler AG, Altdorf (zur Frage von C. Oester): Die mechanische Festigkeit des XL-PE ist nur so geringfügig besser als die von entsprechenden PVC-Kabelmischungen, dass beide Materialien, wie im Bericht (S. 40 ff.) ausgewiesen wurde, in dieser Hinsicht als gleichwertig zu betrachten sind. Unter diesem Aspekt allein kann deshalb auf eine Zugarmierung dort, wo sie vonnöten ist, nicht verzichtet werden. Eine Alternative besteht jedoch im XL-PE-Ceanderkabel.

Was die Verluste betrifft, so dürften diese bei Einleiterkabeln nur dann höher sein als bei Mehrleiterkabeln, wenn – von der Verlegeart abhängig – hohe Mantelströme auftreten. Diese durch

die Verlegung bedingten Sonderfälle konnten hier jedoch nicht berücksichtigt werden. Sie hätten den Rahmen des vorliegenden Berichtes gesprengt.

E. Altermatt, Schweizerische Isola-Werke, Breitenbach: Im Bericht von Rainer Kurz wird dargelegt, dass bei XLPE-Aderisolationen mit einem kleineren Wärmewiderstand gerechnet werden kann als bei PVC. Daraus ergibt sich ebenfalls für das gesamte Kabel ein geringerer Wärmewiderstand. Die theoretische

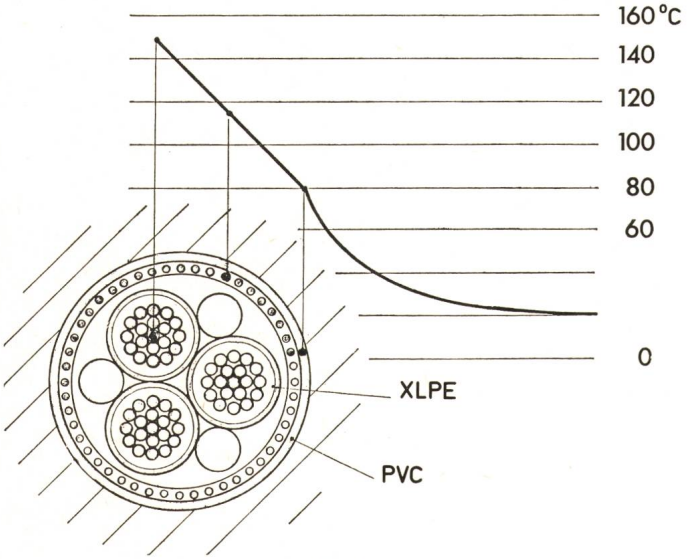


Fig. 1
Temperaturverlauf eines CEANDER-Kabels bei Verlegung in Sand

Folge sind tiefere Leitertemperaturen und geringere Stromwärmeverluste und damit eine grössere Belastbarkeit der Kabel.

Die Belastbarkeit von Netzkabeln hängt jedoch ausser vom Leiterquerschnitt und den Materialeigenschaften der Isolation ganz wesentlich von der Art der Verlegung ab. Wir haben an verschiedenen verlegten Kabeln Erwärmungsversuche durchgeführt. Wie gross der Einfluss der Verlegeart ist, möchte ich am Beispiel eines CEANDER-Kabels 3×50+50 mm² Querschnitt mit XLPE-Adern und PVC-Mantel zeigen:

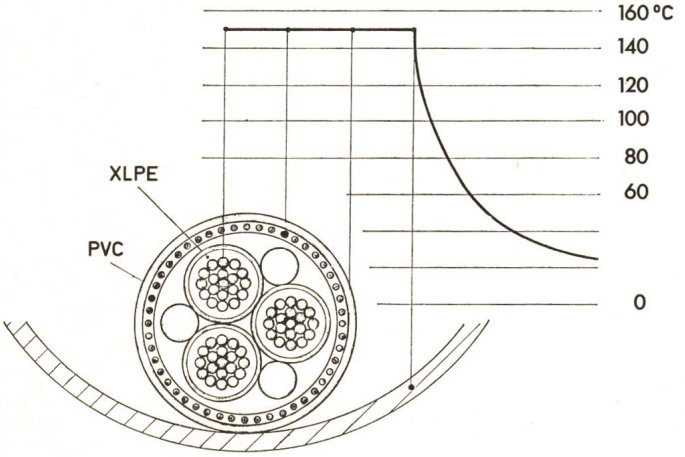


Fig. 2
Temperaturverlauf eines CEANDER-Kabels bei Verlegung in Hart-PVC-Rohr von 100 mm ϕ in Erdboden

Fig. 1 zeigt den Temperaturverlauf bei Verlegung in Sand.

Leitertemperatur	150 °C	Temperaturgefälle im Kabel 70 °C
Temperatur Ceanderdrähte	118 °C	
Aussenmantel	80 °C	

Fig. 2 zeigt den Temperaturverlauf bei Verlegung in Hart-PVC-Rohr von 100 mm ϕ im Erdboden

Leitertemperatur	150 °C	Temperaturgefälle im Kabel 0 °C
Temperatur Ceanderdrähte	150 °C	
Aussenmantel	150 °C	
Rohr	150 °C	

Diese Versuche zeigen deutlich, wie bei schlechter Wärmeableitung durch die Umgebung das Temperaturgefälle im Kabel praktisch auf Null zurückgeht. Dass in diesem Falle die Wärmeleitfähigkeit der Leiterisolation unbedeutend wird, ist offensichtlich. Gleichzeitig zeigt dieser Versuch, was die Verlegung von Kabeln in Hart-PVC-Rohren für Folgen hat und wie die Belastbarkeit bei dieser Verlegeart stark zurückgeht. Bei Bündelung solcher Rohre können die Verhältnisse, infolge ungenügender Wärmeableitung, noch schlimmer werden.

Nach diesen Überlegungen müssen die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen des Berichtes zweifellos überprüft werden.

E. Homberger, Eidg. Starkstrominspektorat, Zürich: An einer am 24. Oktober 1972 vom Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) durchgeführten Brandschutztagung wurde das Starkstrominspektorat aufgefordert, sich dafür einzusetzen, dass in Bälde Niederspannungs- und Schwachstromkabel mit schwerbrennbarer, nichthalogenhaltiger Isolation und gleichartigem Schutzmantel hergestellt werden. Anlass zu dieser Aufforderung gaben wohl die katastrophalen Auswirkungen von Bränden im Kraftwerk Pleinting (Bayern) und im Atomkraftwerk Mühleberg. Hinweise auf die Möglichkeit der Unterschottung von Kabelkanälen und des Auftrages von Brandschutzmitteln auf die Kabel konnten die Antragsteller nicht befriedigen, weil diese Massnahmen in der Regel erst nach Fertigstellung von Kraftwerk- und Verteilanlagen getroffen werden können und zudem die Belastbarkeit der Kabel herabmindern. Gerade aber der Brand in Mühleberg hat gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit eines Brandausbruchs durch äussere Einflüsse während des Bau- und Probezustandes gross ist.

Ich habe mich deshalb schon vor dieser Tagung mit der Dätwyler AG und insbesondere mit dem Berichterstatter, H. Briker, in Verbindung gesetzt, um zu erfahren, ob Möglichkeiten bestehen, den Wünschen der Elektrizitätswerke zu entsprechen. Dabei habe ich erfahren, dass tatsächlich gewisse Aussichten bestehen, Kunststoffkabel ohne die bekannten, gefährlichen Nebenerscheinungen bei Bränden herzustellen, dass aber noch viel und langwierige Forschungsarbeit notwendig ist, um dieses Ziel zu erreichen. Um Fehlentwicklungen nach Möglichkeit zu vermeiden, scheint es mir notwendig, dass die Brandschutzorganisationen und die Elektrizitätswerke vorerst festlegen, welche Anforderungen an die gewünschten Kabelarten gestellt werden müssen. Inzwischen vorgenommene Sondierungen haben ergeben, dass in den interessierten Kreisen die Bereitschaft besteht, an der Verwirklichung einer zweckmässigen Lösung mitzuhelfen.

Da nach meinen Erkundigungen das Problem weltweit besteht, wäre es sinnvoll, die Kontakte über die Grenzen hinweg aufzunehmen. Es bestünde so die Möglichkeit, rascher zu einem greifbaren Ergebnis zu gelangen und die Erfahrungen eines breiteren Kreises verwerten zu können.

H. Briker, Dätwyler AG, Altdorf (zum Beitrag von E. Homberger): Die Entwicklung von neuen Materialien, die Ausarbeitung von Prüfmethoden und die Durchführung von Grossversuchen übersteigen die technischen und personellen Mittel einer einzelnen Firma. Eine Zusammenarbeit aller interessierten Stel-

len wie Starkstrominspektorat, Brandverhütungsdienst, Feuerversicherungen, Materialhersteller, Kabelfabriken und Elektrizitätswerke wäre wünschenswert und für die Beteiligten auch tragbar.

K. Michel, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (zum Beitrag von H. Briker): Die Flammwidrigkeit der Kabelisolation aus Weich-PVC genügt zwar den Vorschriften wie z. B. Publ. 1004 des SEV. In der Praxis, d. h. wenn ganze Kabelbündel durch äussere Feuereinwirkung betroffen werden, kommt es bei den heutigen PVC-Mischungen doch zum selbständigen Weiterbrennen des Kabelbündels mit entsprechenden Primär- und häufig noch schlimmeren Sekundärschäden.

Welche praktischen Möglichkeiten bestehen heute, die Brennbarkeit wirksam einzuschränken, ohne die übrigen Eigenschaften der Isolation (mechanische und elektrische Eigenschaften, Beständigkeit der Farbe) unzulässig zu verschlechtern? Ein vermehrter Einsatz von chlorierten Weichmachern scheint nicht erwünscht im Hinblick auf die dadurch noch vermehrte Bildung von korrosiven Zersetzungsprodukten. Warum werden kaum Phosphatweichmacher in Kabelmischungen angewendet?

Besteht andererseits eine Chance, durch Verwendung der erwähnten neutralisierenden Zusätze die Freisetzung des korrosiven Chlorwasserstoffes wirksam zu unterbinden? Da diese Bindung von HCl nur in einem gewissen Temperaturbereich (erwähnt wurden 300...600 °C) funktioniert, ist zwar eine graduelle Verbesserung, aber kein vollständiger Schutz zu erwarten. Dabei ist in Betracht zu ziehen, dass bereits relativ geringe Mengen Chlorwasserstoff durch Einwirkung auf empfindliche elektrische und mechanische Geräte (Elektronik-Steuereinrichtungen) schwere Schäden hervorrufen können.

K. Michel, AG Brown, Boveri & Cie., Baden: Der Bericht H. Briker über das Brandverhalten gibt eine sehr breite Information über die möglichen Kabelisolierstoffe und die für das Brandverhalten massgeblichen Faktoren. Trotz der Feststellung, dass der ideale, flammwidrige, billige Isolierstoff ohne schädliche Nebenwirkungen im Brandfall noch nicht gefunden ist, muss man sich doch fragen, ob die heutige Praxis mit der fast ausschliesslichen Verwendung von Weich-PVC für das Nieder- und Mittelspannungsgebiet das Optimum darstellt. Im Atomkraftwerk Mühleberg wurden noch während des Versuchsbetriebes im Juli 1971 durch einen lokalen Ölbrand Kabelbündel, die zur Hauptsache Steuerkabel mit PVC-Isolation enthielten, in Brand gesetzt. Der Brand pflanzte sich in den Kabelbündeln fort. Ca. 50 km Kabel mit rund 3000 kg PVC verbrannten und entwickelten dabei etwa 1000 kg reinen Chlorwasserstoff. Die Sekundärschäden durch Salzsäureeinwirkung auf elektrische Ausrüstungen betrugen mehrere Millionen Franken.

Die Flammwidrigkeit der PVC-Isolation reichte nicht aus, um eine Brandausbreitung zu verhindern. Wenn also die Brandausbreitung ohnehin durch bauliche und brandschutztechnische Massnahmen (Schaffung beschränkter Brandabschnitte, Löschanlagen, Schottungen) verhindert werden muss, warum nicht noch etwas weitergehende Konzessionen an die Brennbarkeit der Isolation machen und dafür radikal die Folgeschäden durch Halogene ausschliessen? Ich denke dabei vor allem an den Ersatz von PVC durch vernetztes Polyäthylen. Für Niederspannungskabel werden heute stark mit Russ gefüllte XLPE-Mischungen verwendet. In den Berichten von R. Kurz und H. Briker vermisse ich einen Hinweis darauf, dass diese Russfüllung einen eindeutig flammhemmenden Effekt zeigt und dass zwischen der Brennbarkeit von Russ-XLPE-Mischungen und üblicher Weich-PVC-Isolationen vielleicht ein gradueller aber kein grundlegender Unterschied besteht.

Wenn in den USA gegen 90 % der Niederspannungsnetz-Kabel mit XLPE isoliert sind und in Europa die Tendenz zum Übergang von PVC zu XLPE deutlich zunimmt, scheint es nicht abwegig, diese Kabelisolation auch für die Niederspannungsinstallationen in Kraftwerken und Industrieanlagen einzusetzen.

H. Briker, Dätwyler AG, Altdorf (zum Beitrag von K. Michel): Die Frage betreffend korrosive, salzsaure Nebel bei einem PVC-Brand ist aus dem Kreis der Teilnehmer beantwortet worden. Ein Herr aus dem Auditorium will die Anschrift des Herstellers eines solchen Mittels ausfindig machen.

Bemerkung: Ein solches Neutralisationsmittel müsste unseres Erachtens im Überschuss angewandt werden können, und die Reaktionsprodukte dürften keine korrosiven Salze sein.

C. Oester, Elektrizitätswerk der Stadt Bern, Bern: Im Anschluss an den Beitrag von H. Briker über das Brandverhalten von Kabelisolierstoffen brennen dem Betriebsmann noch einige weitere Probleme auf den Lippen:

Bekanntlich spaltet das PVC durch seinen Chloranteil bei Entzündung Salzsäuregas ab. Am Brandobjekt werden diese Säuredämpfe durch den thermischen Auftrieb nach oben getrieben. An den Decken kühlen sie sich ab und fallen wie Tau – der sich über den ganzen Raum verteilt – auf alle Objekte des Raumes. Schalttafeln, die oben nicht vollständig abgedeckt sind, und offene Anlageteile werden durch diese Salzsäuregase angeätzt. Kann dieser Ätzprozess nicht innerhalb zweier Stunden neutralisiert werden, so gehen diese Anlageteile in kurzer Zeit defekt. Der Brandfolgeschaden, welcher in einem heute mit PVC verkabelten Kabelboden eines Unterwerks entsteht, ist um so grösser, weil er auch Anlageteile in Mitleidenschaft zieht, die mittelbar mit dem Brand nicht in Berührung gekommen sind.

Es existieren folgende Abhilfe- und Milderungsmassnahmen:

a) Anstelle der PVC vernetzte Polyäthylenkabel verlegen (keine Abspaltung von Salzsäuregasen bei Brand);

b) PVC-Böden und Anstriche auf PVC-Basis möglichst vermeiden;

c) Alle Zuglöcher von Kabelkanälen gut gegen Sauerstoffzufuhr abdichten;

d) Bestehende PVC-Kabelanhäufungen mit «Flamastic» (flammabsorbierendes Material) bespritzen.

Wie hat man sich nach einem PVC-Brand zu verhalten?

a) Sofort offene, mit Säuredämpfen in Berührung gekommene elektromechanische Teile mit Spraymittel desinfizieren. Der Zeitfaktor spielt eine sehr wichtige Rolle;

b) Ist kein Neutralisationsspraymittel vorhanden, sind alle mit Säuredämpfen in Berührung gekommenen, offenen Apparateteile auszubauen und in einem warmen Raum trocknen zu lassen.

Meine Frage ist: Gibt es noch andere Abbhilfe- und Milderungsmassnahmen zur Verhütung der PVC-Brandfolgeschäden?

H. Briker, Dätwyler AG, Altdorf (zum Beitrag von C. Oester): Wir kennen die näheren Bedingungen des Brandes im Atomkraftwerk Mühleberg nicht und können deshalb nur sehr schwer Stellung nehmen. Die Auswahl der bestgeeigneten Isoliermaterialien muss von Fall zu Fall entschieden werden, wobei es durchaus Lösungen geben kann, bei denen auf Schwerbrennbarkeit verzichtet werden kann, z. B. bei Kabeln in Anlagen mit sehr teuren, korrosionsempfindlichen Apparaturen. Russgefülltes XLPE zeigt kein wesentlich besseres Brandverhalten als ungefülltes; beide Materialien sind brennbar.

W. Hofmann, Kabelwerke Brugg AG, Brugg: Als Ergänzung zum Bericht von H. Briker möchte ich das Kolloquium über Brandverhütung in Erinnerung rufen, welches am 7. März 1972 bei BBC in Baden stattfand. Dort wurde anhand von eindrücklichem Filmmaterial gezeigt, dass Kabelsysteme durch einen Anstrich mit Flammastik AP weitgehend vor Feuer geschützt werden können. Aus wirtschaftlichen Gründen kann dieser Flammschutz jedoch nur an zum vorneherein exponierten Stellen angebracht werden.

Dem Kabelhersteller wird immer wieder die Frage über das Wärmeleitfähigkeitsverhalten solcher flammhemmenden Stoffe gestellt. Eigene Versuche haben gezeigt, dass bei gleicher Strom-

belastung bei mit PVC isolierten Kabeln, welche mit einer 2...3 mm Flammastikschicht oder mit einer von F & G stammenden Flammschutzschicht behandelt waren, keine stärkere Erwärmung des Leiters eintrat wie bei unbehandelten Kabeln.

Dank der guten Wärmeleitfähigkeit dieser Stoffe sowie der grösseren Oberfläche war die Leitertemperatur im Gegenteil um einige Grade tiefer.

Während beim Flammastik die Brennbarkeit durch einen speziellen Füllstoff erschwert wird, bildet der F & G-Flammschutz durch starkes Aufschäumen eine Hitzebarriere zwischen Flamme und der Kabelisolation. Schäumbare Massen haben jedoch den Nachteil, dass sie hygroskopisch sind. Sie zersetzen sich im Laufe der Zeit und werden inaktiv. Sie eignen sich deshalb nur für trockene Räume.

R. Kurz, Dätwyler AG, Altdorf (zur Frage von W. Hofmann): Nach den Angaben des Herstellers ändert sich die maximale Strombelastbarkeit eines mit Flammastik behandelten Kabels nur geringfügig. Flammastik soll bei einer Brandeinwirkung von aussen einen bis zu 30 min anhaltenden, wirksamen Feuerschutz bieten. Über die Intensität der Hitzeeinwirkung werden keine Angaben gemacht. Wir glauben, dass eine gute Wärmeleitfähigkeit in Kombination mit der Forderung nach einer sogenannten «Wärmebarriere» kaum vereinbar ist. Anderseits besitzen unsere Energiekabel-Systeme normalerweise noch eine gewisse Temperaturreserve, und ein Anstieg der Leitertemperatur um einige Grade kann evtl. in Kauf genommen werden. Kritisch dürfte dieser Wärmestau erst bei hochbelasteten Kabelbündeln werden. Diesbezügliche Messungen konnten von uns bis heute noch nicht durchgeführt werden.

H. Briker, Dätwyler AG, Altdorf (Antwort auf Frage 10 des Diskussionsleiters H. Rohrer): Das Kabel stellt eine Kombination von Materialien dar. Das Brandverhalten muss deshalb zumindest am fertigen Produkt geprüft werden. Die diesbezüglichen Prüfmethoden, z. B. CEI 332, beruhen auf der Einwirkung einer definierten Gasflamme auf einen Kabel-Prüfling während ca. 30...60 s (je nach Kabelquerschnitt). Diese Prüfbedingungen liegen ziemlich weit vom Praxisfall entfernt. Dementsprechend ist die Aussagekraft für die Praxis begrenzt. Für die Prüfung des gesamten Fragenkomplexes sind Grossversuche notwendig, bei denen verschiedene Kabelkonstruktionen, Betriebsbedingungen, Umgebungseinflüsse usw. untersucht und verglichen werden können.

R. Kurz, Dätwyler AG, Altdorf (zur Frage von E. Altermatt): Solche praxisnahen Untersuchungen sind sehr wichtig und nützlich. Sie zeigen, dass zwischen den simulierten Bedingungen im Versuchsfeld und den tatsächlichen Verhältnissen in der Praxis mitunter grosse Unterschiede herrschen können, die unter Umständen den Leistungsstandard des Kabels wesentlich herabzusetzen vermögen. Was jedoch die Schlussfolgerungen hinsichtlich der im Bericht ausgewiesenen wirtschaftlichen Vorteile des XL-PE-Kabels angeht, so treffen diese nicht ganz zu. Hierfür ist nämlich nicht die Grösse des Temperaturgradienten massgebend, sondern das Niveau der Leitertemperatur, dem die Stromwärmeverluste adäquat sind und das beim PVC- (bzw. PPb-) Kabel bei gleicher Strombelastung und sonst gleichen Bedingungen stets höher sein wird als beim entsprechenden XL-PE-Kabel.

B. Schmidt, S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare: Je voudrais brièvement relever quelques éléments de comparaison entre les différents types de câbles à basse tension pour compléter les informations apportées aujourd'hui.

Nous avons fait une série d'essais pour vérifier les températures maximum admissibles en court-circuit. Le but était d'essayer de voir s'il existe un effet cumulatif lorsque les échauffements se répètent. Un câble complet était successivement chauffé à des températures croissantes, en le laissant refroidir entre chaque essai.

Pour les câbles isolés au PVC, la résistance d'isolement mesurée pendant tout le cycle, varie avec une dispersion assez faible. On voit (fig. 1) que la température de 150 °C donne une limite de sécurité suffisante, même pour la qualité normale de PVC pour isolation.

Pour le câble au papier imprégné (fig. 2) la dispersion est encore plus faible et l'isolation garde une valeur acceptable même après plusieurs échauffements à des températures de 260 à 280 °C. Il ne s'est pas produit de court-circuit entre les conducteurs. On voit ici que la température de 200 °C est une valeur extrêmement prudente, d'autant plus que la migration de masse n'est pas un problème en basse tension.

Le polyéthylène réticulé montre un phénomène particulier: la résistance d'isolement qui était d'environ 10 MΩ au premier cycle à 270 °C de cet essai descendue graduellement pour se stabiliser pratiquement après quelques échauffements à la même valeur que le câble au papier. La température de 250 °C donné pour le court-circuit est ici une limite qu'il ne serait pas prudent de dépasser.

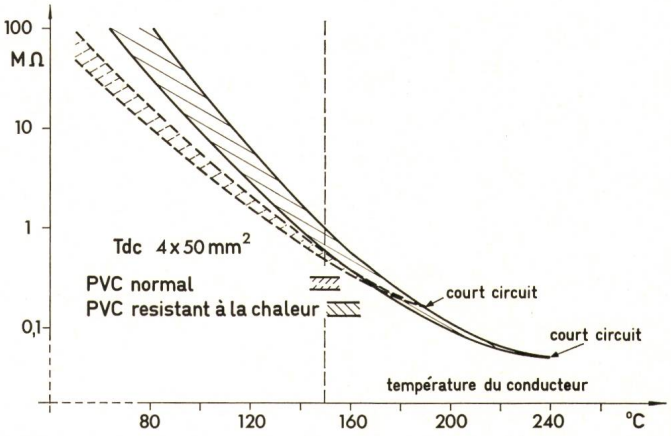


Fig. 1
Résistance d'isolement lors d'échauffements successifs

En terminant, permettez-moi de rappeler encore une différence essentielle entre ces câbles: la conductibilité de la gaine de plomb permet de transporter des courants de défaut appréciables et d'assurer la continuité des mises à terre. Pour des raisons économiques, on ne peut malheureusement pas avoir cet avantage avec les câbles à basse tension isolés au PVC ou au polyéthylène réticulé.

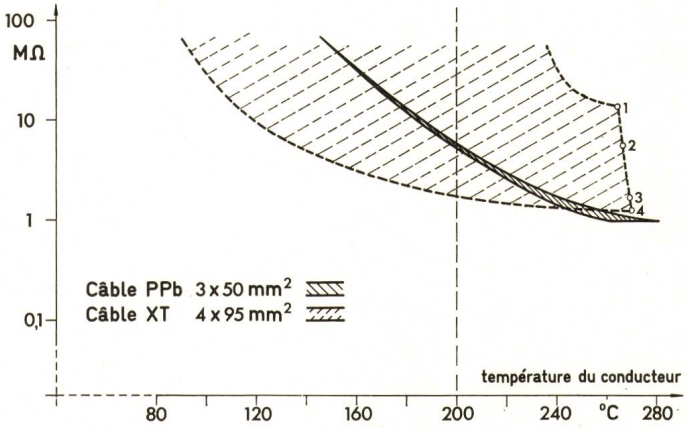


Fig. 2
Résistance d'isolement lors d'échauffements successifs

J. Goebell, Minnesota Mining & Manufacturing Co. mbH., Hamburg (zum Beitrag von W. Kälin): Beim Studium des Beitrages entsteht der Eindruck, dass PUR-Harze für das Giessverfahren das zurzeit modernste und beste Harzsystem seien. Ich möchte betonen, dass PUR-Systeme keinen Ersatz für EP- und PEUR-Harze darstellen. Diese beiden Harzsysteme weisen nicht nur gleichwertige, sondern in den meisten Fällen wesentlich bessere mechanische und elektrische Werte auf. Darüber hinaus besitzen sie nicht den gravierenden Nachteil der hydrolytischen Instabilität, den die PUR-Harze infolge ihrer Rohstoffbasis (Alkohole, Rizinusöle) und der dadurch bedingten chemischen Bindungen aufweisen. Hinsichtlich der aufgeführten Werte ist zu bemerken, dass schlechthin ein ungefülltes mit einem gefüllten Giessharz nicht verglichen werden sollte. Dies wird schon bei einem Vergleich des spez. Gewichtes ersichtlich, wobei ein ungefülltes EP-Harzsystem ein spez. Gewicht von nur 1,1 (nicht 1,2) gegenüber mindestens 1,3 eines gefüllten Systems hat (Nachteil bei Volumenfüllung). Alle übrigen Vergleichswerte des aufgeführten EP-Harzes weisen nur sehr mittelmässige Werte auf. Bei einem guten Markenprodukt sollten in etwa folgende Werte vorhanden sein:

Schlagzähigkeit:	grösser als 10 (bis 60 kpcm/cm² je nach Anwendungszweck)
Zugfestigkeit:	550 kp/cm²
Längenausdehnungskoeff.:	$70 \cdot 10^{-4}$ mm/mm/°C
Durchschlagfestigkeit:	55...70 kV/mm (dickenabhängig)
Dielektr. Verlustfaktor:	20 °C 0,07 50 °C 0,26 80 °C 0,13
Dielektrizitätszahl:	20 °C 3,3 50 °C 3,5 80 °C 5,15

In der Vergleichstabelle fehlen einige für ein Giessharz sehr charakteristische Werte. Auch hier würden die reinen PUR-Harze schlechter abschneiden, beispielsweise liegt die Grenztemperatur bei guten EP-Systemen etwa um 30 °C höher. Leider kann ich aus Zeitmangel auf PEUR-Harze nicht eingehen.

Zum Schluss noch ein Wort zu dem erwähnten Einguss der Strahlungstrichter. Langzeiterfahrungen haben gezeigt, dass eingegossene Strahlungstrichter auf Kunststoffkabel im Bereich über 15 kV aus verschiedenen Gründen nicht zu empfehlen sind. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass es hier eine bessere und sichere Methode gibt, und zwar die Potentialsteuerung mit selbstverschweissenden Bändern mit sehr hoher DK. Bei besonderer Beanspruchung werden diese Potentialsteuerungen zusammen mit EP- bzw. PEUR-Harzen eingesetzt – ein Grund mehr, modernen Systemen der EP- und PEUR-Harze weiterhin grosse Aufmerksamkeit zu schenken.

W. Kälin, Cellpack AG, Wohlen (zu seinem Bericht in der Themengruppe C - 2. Teil):

1. Niederspannungs-Armaturen

1.1 Zu den von J. Goebbel aufgeworfenen Punkten bezüglich Unterschiede zwischen Epoxy- und Polyurethanharzen ist folgendes zu ergänzen:

PUR-Harze sind für das Vergiessen von Kabelarmaturen aus folgenden Gründen prädestiniert:

– Die Dauerelastizität verhindert auch bei tiefen Temperaturen von zum Beispiel –30 °C Risse im Giessling, die bei starren Harzen durch mechanische Einwirkungen wie Vibrationen, Schläge usw. entstehen können.

– Die niedrige exotherme Aushärtetemperatur von max. 65 °C ermöglicht auch ein Vergiessen von PVC- und PE-isolierten Kabeln ohne Beeinträchtigung der Molekularstruktur dieser Kunststoff-Isolationen.

– PUR-Harze sind in der Reaktion beim Vergiessen bedeutend unabhängiger von Aussentemperatur und Volumen, das heisst, sie können auch bei Temperaturen unter 0 °C vergossen werden.

– Die Wasseraufnahme des ausgehärteten Giesslings ist geringer als bei EP-Harzen. Die bekannte Feuchtigkeitsempfindlichkeit der einzelnen Komponenten im flüssigen Zustand wird durch den im Beitrag gezeigten Spezial-Mischbeutel unwirksam gemacht.

Die erwähnte hydrolytische Instabilität bezieht sich auf Prüfungen im Wasserdampf, das heisst bei ca. 130 °C. Kabelarmaturen für Niederspannungen sind solchen Anforderungen überhaupt nie ausgesetzt. Sollte es zu Temperaturen von 130 °C kommen, was bei XLPE-isolierten Kabeln denkbar wäre, ist sicher die Umgebung (Erdreich) ausgetrocknet.

Giessharze für solche Spezialanwendungen, wie zum Beispiel für das Vergiessen von Kabelarmaturen, werden deshalb genau auf den Verwendungszweck modifiziert, um bei den wirklich gefragten Anforderungen optimale Werte zu erreichen.

2. Mittelspannungs-Armaturen

In meinem Beitrag habe ich sowohl die Wickelmethode wie auch die Verwendung von fertigen vorfabrizierten Endverschlüssen aus EPDM-Elastomer beschrieben. Von einer Verwendung von Giessharzen für die Spannungsreihen 20 und 30 kV habe ich auf Grund ausgedehnter Versuche abgeraten, da es ausserordentlich schwierig ist, einen Metalldeflektor absolut blasenfrei einzugiessen. Die spezielle geometrische Form dieser Trichter erschwert dies selbst bei Anwendung von Druck derart, dass in der Praxis nicht mehr mit genügend Sicherheit gerechnet werden kann.

Abgesehen davon erlauben die neuen steckbaren Endverschlüsse eine erhebliche Reduktion der Montagezeit, verglichen mit dem Wickelverfahren.

K. H. Meyer, Raychem AG, Baar (zum Bericht von W. Kälin): Schrumpfschläuche und Schrumpfformteile aus XLPE werden seit 15 Jahren hergestellt. Sie fanden vorerst dort Anwendung, wo höchste Anforderungen an die elektrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften gestellt werden, wie z. B. in der Flugzeugtechnik.

Heute steht ein breites Programm von Schrumpferzeugnissen zur Verfügung, die speziell für die Starkstromtechnik geschaffen wurden. Es sind dies Endverschlüsse, Muffen, Isolierteile usw. aus strahlungsvernetzten, wärmeschrumpfenden Thermoplasten und Elastomeren.

Durch die Strahlungsvernetzung und die spezielle Formulierung dieser Kunststofferzeugnisse konnten folgende Eigenschaften erzielt werden:

- Schrumpfvermögen: Die Teile lassen sich aus der ursprünglich gefertigten Form soweit expandieren, dass sie sich schnell und einfach auf den zu umhüllenden Gegenstand aufschieben lassen. Durch Erwärmen mit dem Gasbrenner schrumpfen die Teile in ihren ursprünglichen Fertigungszustand zurück. Das Schrumpfvermögen kann 85 % erreichen.
- Kaltflussbeständigkeit: Als vernetzte Kunststoffe sind wärmeschrumpfende Erzeugnisse kaltflussbeständig.
- Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse: Die in der Starkstromtechnik verwendeten Schrumpferzeugnisse sind beständig gegen Ozon, UV-Strahlung, gegen die meisten Öle und Lösungsmittel. Durch die Unempfindlichkeit gegenüber grossen Temperaturschwankungen und Feuchtigkeit haben sich diese Materialien auch für Freiluft und Erdverlegung bewährt.
- Dauertemperaturbereich: – 55 °C bis + 135 °C, kurzfristig bis 300 °C. Das Material behält seine Elastizität auch bei tiefen Temperaturen, wodurch eine Spaltbildung zwischen Schrumpfprodukt und Kabelmantel ausgeschlossen wird.
- Bruchdehnung: je nach Materialtyp 350...550 %.

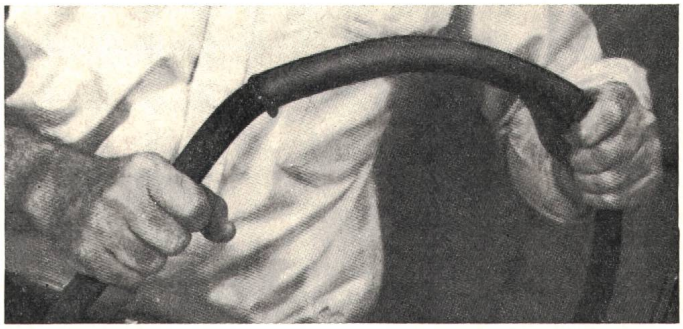


Fig. 1
Flexible Thermofit-Verbindungsmuffe (0,6/1 kV)

– Durchschlagfestigkeit: je nach Materialtyp 20...60 kV/mm
– Durchgangswiderstand: je nach Materialtyp 10^{12}...10^{17} Ωcm

Die Möglichkeit, mit Hilfe wärmeschrumpfender Erzeugnisse den Kabelaufbau nachzubilden, gestattet es, Muffen und Endverschlüsse den Eigenschaften (thermisch, elektrisch und mechanisch) des Kabels optimal anzugleichen.

R. Kurz, Dätwyler AG, Altdorf (zur Frage 10 des Diskussionsleiters, H. Rohrer): Das Kabel stellt eine Kombination von Materialien dar. Das Brandverhalten muss deshalb zumindest am fertigen Produkt geprüft werden. Die diesbezüglichen Prüfmethoden, zum Beispiel EC 332, beruhen auf der Einwirkung einer definierten Gasflamme auf einen Kabel-Prüfling während ca. 30...60 s (je nach Kabelquerschnitt). Diese Prüfbedingungen liegen ziemlich weit vom Praxisfall entfernt. Dementsprechend ist die Aussagekraft für die Praxis begrenzt. Für die Prüfung des gesamten Fragenkomplexes sind Grossversuche notwendig, bei denen verschiedene Kabelkonstruktionen, Betriebsbedingungen, Umgebungseinflüsse usw. untersucht und verglichen werden können.

J. Hoigné, AG für Industrielle Forschung und Strahlennutzung, Schwerzenbach (zur Frage 12 des Diskussionsleiters, H. Rohrer): Diese Frage kann nur für einen genau definierten Fall beantwortet werden, denn für den Vergleich der Gesamtwirtschaftlichkeit des Verfahrens sind entscheidend: Abschreibungsrate, Raumersparnis, Verkürzung der Anlaufs- und Produktions-Umstellungszeiten, Verminderung des Ausschusses, Auslastungsgrad der Anlage etc.

Grobe Anhaltspunkte für eine Kostenabschätzung gibt Tab. 1: Je nach Kabelart (Fig. 1) kommen beispielsweise Beschleuniger von 0,5 oder 2,0 MeV in Frage (s. Zeile b). Das Materialdurchdringungsvermögen der Strahlung beträgt entsprechend 2 oder 7 mm, falls beidseitig bzw. rundherum bestrahlt wird (s. Zeile a). Die Anlagenkosten steigen jedoch mit der Beschleunigungs-Spannung sehr rasch an. In der Zeile d) sind einige Daten für die Kosten der Beschleuniger inkl. Abschirmung und Transportvorrichtung angegeben. (Mittelwerte aus Angaben verschiedener Firmen.) Die Anlagenkosten fallen, falls über 5 Jahre abgeschrieben wird, für die Betriebskosten mit etwa 75% ins Gewicht.

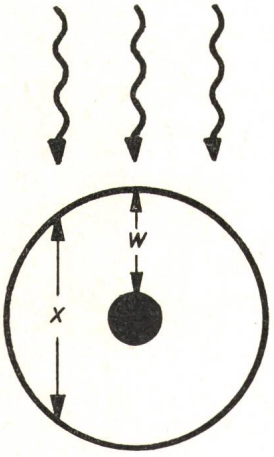


Fig. 1

Eine Produktionssteigerung kann durch Erhöhung des Strahlstromes erreicht werden. Dabei steigen die Anlagenkosten nicht direkt mit den Stromstärken an. In Tabelle 1 sind jedoch für die verschiedenen Beschleuniger typische Zahlen angegeben (s. Zeile c). Die Produktionsgeschwindigkeit sinkt mit steigender Kabeldicke natürlich enorm, denn je grösser die Kabeldicke, um so grösser wird auch die pro Kabellänge belegte Fläche (s. Fig. 2). Es kann eine Produktionsgeschwindigkeit pro Minute angegeben werden, die sich aufgrund der Leistungsfähigkeit der Maschine ergibt (Zeile e). Die jährliche Produktionsmenge wird jedoch weitgehend durch andere Faktoren, wie Umstellungszeiten, gegeben. Die in der Zeile f) aufgeführten Produktionsmengen basieren auf der Annahme, dass eine 60%ige Ausnutzung der Maschinenzeit möglich ist.

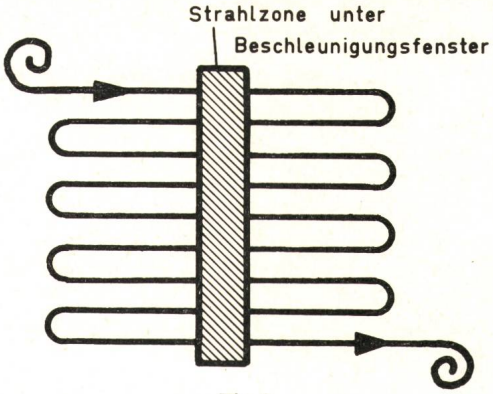


Fig. 2

In unserer Firma steht für Service-Bestrahlungen ein 400 kV/10 mA-Beschleuniger zur Verfügung, der auch für Kabelbestrahlungen geeignet ist, falls x 1,2 mm nicht übersteigt. Der Aufbau einer zentralen Bestrahlungs-Dienstleistung für stärkere Kabel kommt bei genügender Nachfrage in Frage.

Tabelle I

a) x bzw. W (mm)	$x < 1$	$x < 2$	$W < 7$	$W < 30$
b) Beschleuniger (MeV)	0,3	0,5	2	10
c) Beschleuniger (m)	-25-	-25-	-20-	-1-
d) Anlagenkosten (Fr.)	$0{,}6 \cdot 10^6$	$0{,}7 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$>4 \cdot 10^6$
e) Produktion*) (m/min)		700 ($x = 2$)	16 ($x = 20$)	
f) Produktion*) (γ = 60 %) (km/4000 h)		100 000	2 400	

*) Annahme: 10 Mrad

K. H. Meyer, Raychem AG, Baar (zu den Fragen 12, 17, 18 und 19 des Diskussionsleiters, H. Rohrer):

Frage 12: Wir stellen zurzeit durch Bestrahlung mit Beschleunigern XLPE-Produkte her, die Wandstärken bis zu 7 mm aufweisen. Mit denselben Anlagen wären wirtschaftlich auch 10 mm möglich. Unter Verwendung von Co 60 als Strahlenquelle wurden in unseren Labors Materialdicken von über 10 mm vernetzt.

Frage 17: Die unter Verwendung von vernetzten Schrumpfmaterialien hergestellten Kabelmuffen verhalten sich bei dynamischem und thermischem Kurzschluss weitgehend wie das Kabel selbst, da der Muffenaufbau dem Aufbau des Kabels entspricht und die Schrumpfmaterialien wie die Kabelisolation auf Thermoplasten basieren.

Frage 18: Thermofit-Schrumpfmuffen lassen sich ohne Beschädigung des Kabels wieder öffnen. Sie werden auf dieselbe Weise entfernt, wie ein Kabel abisoliert wird. Ein Reinigen der Muffe entfällt, da keine Füllmassen oder Harze verwendet werden.

Frage 19: Zur Prüfung der Feuchtigkeitssicherheit unserer wärmeschrumpfenden Thermofit-Armaturen führen wir unter Druck thermische Zyklen durch. Ähnliche Prüfungen werden oft von Kunden verlangt. So wird mit der Thermofit-Endkappe (auch

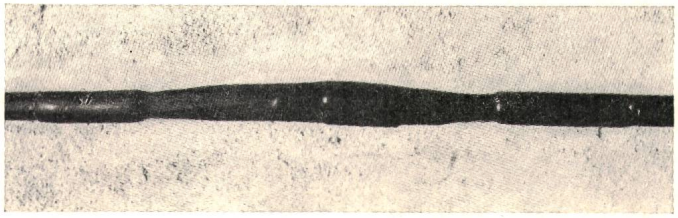


Fig. 1
Thermofit-Verbindungsmuffe (0,6/1 kV)

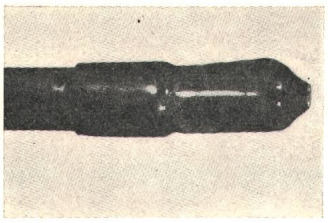


Fig. 2
Thermofit Endmuffe (0,6/1 kV)

als Endmuffe verwendbar) folgende, von der Deutschen Bundespost vorgeschriebene Prüfung bestanden:

min. 10 Zyklen 6 h –30 °C / 6 h +70 °C

bei einem konstanten Innendruck von 1,5 atü.

W. Kälin, Cellpack AG, Wohlen (zur Frage 17, 18 und 19 des Diskussionsleiters, H. Rohrer): Für Kunststoff-Kabelarmaturen bestehen keine Prüfvorschriften. Auch nicht im VDE Arbeitsausschuss 0250-0 «Kabelvergussmassen». Beim Elektr. Prüfamt 3 in München wurden thermische Kurzschlussfestigkeits-Versuche durchgeführt mit Giessharzarmaturen, die eindeutig zeigten, dass die Armaturen den dort verwendeten PVC-isolierten Kabeln überlegen waren. Dies auf Grund der weit höheren Grenztemperaturen der Giessharze. Wird dazu ein elastisches Giessharz mit einem der Leiterisolation angeglichenen Wärmeausdehnungskoeffizienten verwendet, liegen die Verhältnisse naturgemäss noch günstiger. Zusammen mit XLPE isolierten Kabeln sind bei einem schweizerischen Kabelwerk Kurzschlussfestigkeits-Versuche angelaufen. Prüfungen hinsichtlich dynamischer Kurzschlussfestigkeit wurden nicht durchgeführt, da diese wenig sinnvoll erscheinen, nachdem die meisten Armaturen von der Konstruktion her in mechanischer Hinsicht überlegen sind. Auch hier spielt die Elastizität des Giessharzes eine wichtige Rolle.

Wenn man das Öffnen einer Gussarmatur, die mit Bitumenmasse gefüllt ist, als einfach bezeichnen will, kann ich die Frage 18 durchaus positiv beantworten. Früher wurden Giessharz-Armaturen durch Absprengen der Formschalen und anschliessendes Zuschlagen des Harzkörpers geöffnet. Dies ist natürlich nur möglich bei starren Giessharzen. Die elastischen PUR-Harze können mit dem Kabelmesser abgeschält werden. Alle diese Methoden sind relativ zeitraubend und es ist deshalb wirtschaftlicher, eine zweite Armatur daneben zu setzen. Sowohl der günstige Preis wie auch die sehr kleinen Abmessungen rechtfertigen dieses Vorgehen.

Giessharze weisen eine ausgezeichnete Haftung auf sauberen Metallen auf, wie Blei, Alu, Kupfer, usw. Von einer eigentlichen Haftung auf PVC und vor allem auf Polyäthylen kann nicht gesprochen werden, sondern eher von einer innigen Umschliessung.

Um auch bei wechselnder thermischer Beanspruchung ein Eindringen von Feuchtigkeit längs des Kabelmantels zu verhindern, wird dieser mit einem dauerelastischen, selbstverschweissenden Polyolefin-Band umwickelt, was einer mechanischen Dichtung gleichkommt.

Um den höheren thermischen Anforderungen gerecht zu werden, die bei XLPE-Kabeln auftreten können, kann ein Polsterband aus vernetztem PE eingesetzt werden.

Prüfungen bei der KEMA, Prüfamt 3 München sowie in vielen anderen Ländern haben bei bis zu 100 Lastwechseln bei 60...80 °C Leitertemperatur und 5 atü Wasserdruck hervorragende Resultate ergeben.

B. Capol, Kabelwerke Brugg AG, Brugg (zur Frage 22 des Diskussionsleiters H. Rohrer): Das Problem des Treeing im Polyäthylen ist insofern ein heisses Eisen, als es – je nach dem marktpolitischen Standpunkt des Betrachters – Gefahr läuft, hochgespielt oder verniedlicht zu werden.

Wenn ich mir erlaube, zum Problem des Treeing im Polyäthylen einige Gedanken zu äussern, so möchte ich mich ausdrücklich von marktpolitischen Zweckmässigkeitserwägungen distanzieren und im Sinne einer Arbeitshypothese versuchen, einen Einstieg in die Problematik des Treeing zu finden. Dies soll gleichzeitig als rudimentäres Beispiel dienen, wie man die Betrachtungsweise der Elektrotechnik mit jener der Polymerchemie und der Physik der viskoelastischen Körper im Sinne der morphologischen Betrachtungsweise zu einer interdisziplinären Fragestellung kombinieren sollte.

Polyäthylen ist ein polymerer Isolierstoff, der in bezug auf die Verlustziffer $\varepsilon_r \cdot \mathrm{tg}\ \delta$ eine Spitzenstellung einnimmt. Geht man von der Tatsache aus, dass die elektrische Festigkeit eines Isolationssystems vom Anteil, von der Teilchengrösse und vom Verhalten der darin vorhandenen Fremdsubstanzen bestimmt wird und zieht man in Betracht, dass die Differenz in den elektrischen Eigenschaften zwischen Grundmaterial und Fremdsubstanzen im Polyäthylen offenbar grösser ist, als in anderen, weniger guten Isolierstoffen, so liegt es auf der Hand, dass das Polyäthylen auf Fremdsubstanzen empfindlicher reagieren muss als Isolierstoffe mit höherer Verlustziffer.

Da Polyäthylen ein viskoelastischer Stoff ist, der unter mechanischer Beanspruchung – besonders bei erhöhter Temperatur, wenn auch äusserst langsam – zum Fliessen neigt, so ist zu vermuten, dass Fremdsubstanzen von geeigneter Teilchengrösse unter der Einwirkung der Feldkräfte sehr langsam durch das Polyäthylen in Richtung eines benachbarten Bezirkes mit höherer Feldstärke hindurchwandern können. Sind die Teilchen gross genug, so können sie dendritenartige Spuren im Grundmaterial hinterlassen. Diese sind z. B. nach Angaben der Union Carbide (Kabelitems Nr. 145/1972, S. 13) meistens mit Fremdmaterial gefüllt.

Die Dendriten bilden ihrerseits wieder Stellen erhöhter Feldstärke und beschleunigen den geschilderten Prozess. Werden die Dendriten gross genug, so kann Teilentladung auftreten. Erst mit der Teilentladung beginnt die Zerstörung des Dielektrikums.

Aus der Sichtung und kritischen Beurteilung zahlreicher Versuche und Literaturstellen drängt sich mir die Vermutung auf, dass das Treeing aus zwei zeitlich getrennten Prozessen besteht, nämlich aus einer durch Wanderung von Fremdsubstanzen verursachten und zunächst elektrisch noch unschädlichen Dendritenbildung, der unter Umständen – aber nicht zwingend – eine Teilentladung folgt.

In dem Masse, wie nun das Polyäthylen vernetzt wird, nimmt im Polymerisat der viskose Anteil ab. Der elastische Anteil nimmt zu. Dadurch steigt der Widerstand des Polyäthylens gegen das Fliessen und damit auch gegenüber der Dendritenbildung.

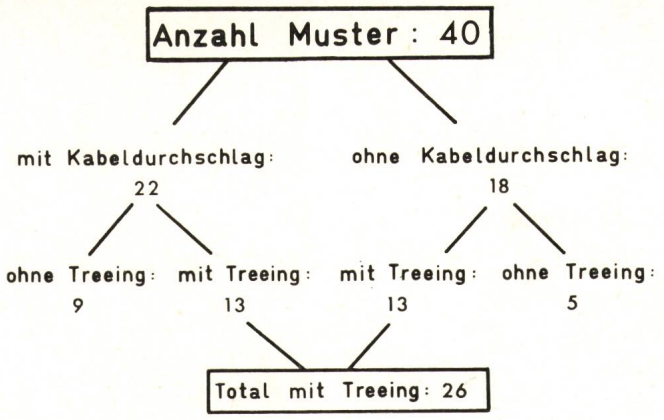
Sie sehen, dass das Treeing jedenfalls ein äusserst komplexes und nicht einfach zu lösendes Problem darstellt, das erst dann ad acta gelegt werden darf, wenn sich die mit der heutigen Technologie in der Praxis gemachten recht guten Erfahrungen weiter erhärten, oder wenn von der Chemie her ein sicheres Mittel gegen die Dendritenbildung gefunden wurde.

H. Schenk, Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden: Darf ich folgende zusätzliche Fragen stellen als Ergänzung zur Frage 22 betreffend die Rapporte von R. Mühlethaler, E. Buchmann und G. de Montmollin:

1. Kann das «treeing» (Bäumchenbildung) bei PE-Kabeln ganz allgemein physikalisch erklärt werden?
2. Mit welchen Methoden wird das «treeing» bei PE- und bei XLPE-Kabeln verhindert resp. reduziert?

G. Martin, S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare (zur Frage 22 des Diskussionsleiters H. Rohrer): Unter «Treeing» oder Verästelung versteht man mikroskopisch feine Röhrchen, die sich in Isolierstoffen im elektrischen Feld unter verschiedenen Einflüssen bilden können. «Treeing» wurde ganz besonders in Amerika als ein wichtiger Grund für das Versagen von PE- und XLPE-Kabeln angegeben. In Europa ist man dieser Erscheinung viel weniger oft begegnet, daher wurde sie auch als weniger wichtig erachtet.

In vielen Fällen sind diese Röhrchen nicht leitend, es können aber Gase oder Feuchtigkeit durch sie diffundieren und eine chemische Zersetzung anstiften.



Ursache:

Halbleitendes Band auf dem Leiter	6
Unreinheiten	17
Blasen	2
Unbekannt	1

Fig. 1
Angaben von W. Vahlstrom of Pacific Gas and Electric Company at the 1971 IEEE UD Conference

Der Mechanismus, der zu «Treeing» führt, ist sehr komplex und kann noch nicht vollständig erklärt werden. Es ist aber möglich, die Faktoren, die einen Einfluss haben, zu nennen:

a) Das elektrische Feld durch seine Stärke, seine Art (Gleich-, Wechsel- oder Stoßspannung) und seine Frequenz;

b) Die mechanische Beanspruchung. (Innere Spannungen begünstigen das «Treeing»);

c) Die Temperatur. (Es ist möglich, dass lokale Erwärmungen infolge von dielektrischen Verlusten in Unreinheiten einen Einfluss haben);

d) Die Umgebung. (Feuchtigkeit sowie Schwefelverbindungen haben einen sehr grossen Einfluss.)

Andere Faktoren haben einen günstigen Einfluss. Zuerst die Kabelkonstruktion und die Reinheit des Dielektrikums. Die Angaben des Berichtes von W. Vahlstrom of Pacific Gaz and Electric Company at the 1971 IEEE UD Conference sind lehrreich (Fig. 1).

Die Verwendung einer gespritzten Halbleiterschicht aus PE auf dem Leiter unter vollständiger Verschweissung mit dem Dielektrikum und peinlichste Sauberkeit sind die besten Mittel, um das «Treeing» zu verhüten.

Es besteht noch ein weiterer Unterschied zwischen den europäischen und amerikanischen Kabeln. Bei uns werden hauptsächlich Kabel hergestellt, dessen äusserer Schirm mit überlappenden Weichkupferbändern und einem Thermoplastmantel versehen sind. Diese Konstruktion ist ein wertvoller Schutz gegen das Eindringen von Feuchtigkeit. In den USA werden viele Kabel nur mit einem gespritzten halbleitenden äusseren Schirm und verzinnten Kupferdrähten direkt in Erde verlegt.

Jede Massnahme, die die Diffusion von Wasserdampf im PE verhindert, verbessert den Widerstand gegen «Treeing».

Das XLPE ist durch seine besseren mechanischen Eigenschaften, seine kleinere Kristallinität und durch den Einfluss von gewissen Rückständen der Vernetzung der Gefahr des «Treeing» weniger ausgesetzt als normales PE. Man darf aber nicht vergessen, dass es «Treeing» ohne Durchschlag und Durchschlag ohne «Treeing» gibt und dass es nur ein kleiner Punkt einer sehr komplexen Frage ist.

R. Mühlethaler, S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare (zu Fragen 20...22 des Diskussionsleiters W. Rohrer): Zurzeit werden Kabel mit XLPE-Isolation in den USA bis 138 kV und in Japan bis 154 kV fabriziert. Die bei diesen Spannungen hauptsächlich angewendeten Betriebsfeldstärken liegen zwischen 6,5 und 7,0 kV/mm.

Wie beim PE werden auch beim XLPE gewisse Zusätze verwendet und ausprobiert. Die Verwendung von Spannungsstabilisatoren in der Masse und die Imprägnierung des Kabels mit Silikonöl [1][1] oder mit SF_6 erlaubt, den maximal zulässigen Gradienten zu erhöhen. Dank diesen Zusätzen wie auch den Verbesserungen im Fabrikationsprozess und vor allem bei der Vernetzung kann man damit rechnen, dass Hochspannungskabel für Spannungen von mehr als 154 kV mit XLPE-Isolation fabriziert werden. Dies unter der Voraussetzung, dass das für die chemische Vernetzung des Polyäthylen verwendete Peroxid die Qualitäten des Isolationsmaterials nicht vermindert.

In Wirklichkeit reagiert das Peroxid in zwei verschiedenen Arten:

1. Während der Vernetzung sondert es Nebenprodukte ab, die in die Isolation diffundieren. Einige dieser Nebenprodukte, zum Beispiel das Acetophenon (abgespalten vom Dicumylperoxid), werden als Spannungsstabilisatoren betrachtet, deren Einfluss sich günstig auswirkt.

2. Um eine genügende Vernetzungsdichte zu erhalten, ist es nötig, einen schwachen Peroxidüberschuss zu verwenden, dessen Einfluss in den Hochspannungskabeln noch nicht sehr bekannt ist.

Man könnte befürchten, dass das Peroxid und seine Nebenprodukte eine Oxydation der Kupferleiter hervorrufen. Dieser Punkt wurde durch folgenden Versuch kontrolliert: XLPE-Platten, die blanke Kupferbänder enthielten, wurden unter den gleichen Bedingungen wie die Kabel vulkanisiert; es wurde dabei keine Kupferoxydation festgestellt.

Einige Kabelfabrikanten verwenden XLPE, das eine wesentliche Menge heller mineralischer Füllstoffe wie geglühtes Kaolin enthält, um gewisse Eigenschaften, wie Wärmeformbeständigkeit, Beständigkeit gegen «Treeing» und Durchschlagsfestigkeit, zu verbessern. Es muss noch festgehalten werden, dass das Hinzufügen dieser Füllstoffe gewisse dielektrische Eigenschaften wie zum Beispiel die Dielektrizitätskonstante ε_r und den Verlustfaktor $tg\delta$ des XLPE so verändert, dass ihre Verwendung auf Isolationsmischungen für Kabel mittlerer Spannung beschränkt ist. Anderseits können diese Füllstoffe Quellen für zusätzliche Unreinheiten sein, und das langfristige Verhalten dieser Mischungen unter Betriebsbedingungen ist für Mittelspannungskabel noch nicht völlig bekannt.

Literatur

[1] *T. Hayami:* Development of liquid filled type cross-linked polyethylene cable. Trans. IEEE PAS 88(1969)6, p. 897...904.

A. Küng, Société d'Exploitation des Câbles Electriques, Cortaillod (zur Frage 26 des Diskussionsleiters, H. Rohrer): Das Problem des Ausfliessens der Imprägnierung bei den Massekabeln ist heute durch die in der Schweiz allgemeine Verwendung von stabilisierter Haftmasse gelöst. Die darin enthaltenen mikrokristallinen Wachse bleiben bis über die maximale Betriebstemperatur fest und verhindern das Wandern der Masse, das stabilisierte Haftmassekabel ist deshalb unempfindlich gegen Höhenunterschiede und stellt keine Probleme der Umweltverschmutzung, ein Ersatz durch Gasdruckkabel würde deshalb in diesem Spannungsbereich keine Vorteile bieten.

Die Qualitäten des Isoliersystems «Papier-dünnflüssiges Öl» sind gut bekannt, sie ergeben sich vor allem aus der vollständigen, hohlraumfreien Durchtränkung der Isolation. Diese ist auch gewährleistet im Gasaussendruckkabel, beschrieben im Beitrag von E. Buchmann. Das Gasaussendruckkabel hat deshalb praktisch die gleichen vorzüglichen elektrischen Eigenschaften wie das Öldruckkabel, es enthält aber ein sehr viel dickflüssigeres Imprägnierungsmittel, weshalb im Schadenfall keine Verschmutzungsgefahr besteht.

Betrachten wir nun das vorimprägnierte Gasinnendruckkabel. Dieses entspricht weitgehend den in der Frage gestellten Forderungen. In diesem Kabel ist der Leiter von einer Papierisolation umgeben, deren Papierbänder mit einer zähflüssigen Masse vorimprägniert sind. Unter Druck stehendes Stickstoffgas wird unter den Mantel (aus Blei mit Druckbewehrung oder aus gewelltem

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Diskussionsbeitrages.

Metall) eingepresst. Das Gas füllt die Hohlräume der Isolation und des Leiters aus. Selbst bei stärkstem Gefälle oder starker Überbelastung ist eine Wanderung der Masse unmöglich.

Der Ausgleich eines allfälligen Gasverlustes wird durch Gasdruckflaschen gesichert, die mit dem Kabel über ein Reduzierventil verbunden sind. Dank der Drucküberwachung ist die Betriebssicherheit sehr hoch.

Zum Abschluss ist noch zu bemerken, dass die statischen Druckprobleme die gleichen sind, welches Druckmedium wir auch verwenden. Mit Stickstoff wird normalerweise bei 12 bis 18 atü gearbeitet, es muss deshalb eine gleichstarke Druckarmierung aufgebracht werden wie in einem Öldruckkabel mit einem Höhenunterschied von 200 m.

K. Dahinden, Dätwyler AG, Altdorf: Der Bericht von G. de Montmollin enthält u. a. einen Vergleich zwischen PPb- und PE-Kabeln hinsichtlich Kurzschlussfestigkeit. In Übereinstimmung mit dem CEI-Entwurf für Mittelspannungskabel mit Massivisolation wird dem PE-Kabel eine Grenztemperatur von 150 °C zugeordnet. Wie Versuche bestätigt haben, lässt sich dieser Wert durch besondere Massnahmen jedoch beträchtlich erhöhen, da die Kurzschlussfestigkeit des Kabels nicht allein durch die thermischen Eigenschaften des Isoliermaterials bestimmt wird. Um möglichst hohe Kurzschlusstemperaturen zulassen zu können, sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen: Der Leiter muss mit einem Leiterschirm ausreichender Dicke umspritzt sein, und das hiefür verwendete halbleitende Material muss eine entsprechend hohe Wärmestandfestigkeit aufweisen.

Derart ausgebildete PE-Kabel wurden Kurzschlussversuchen unterworfen (Fig.1), wobei die Bedingungen zur Ermittlung der zulässigen Grenzwerte stufenweise verschärft wurden. Nach mehreren Kurzschlussbelastungen, die den Leiter auf 230 °C erwärmten, sind selbst in engen Biegeradien des Kabels keine Leiterverlagerungen aufgetreten. Insbesondere haben auch Teilentladungsmessungen, Verlustfaktormessungen und Durchschlagsversuche gezeigt, dass die Kabelqualität durch die Kurzschlüsse nicht beeinträchtigt worden ist. Dieses positive Ergebnis ist auf das starke Temperaturgefälle über dem Leiterschirm und dessen Druckfestigkeit bei kurzzeitiger Einwirkung hoher Temperaturen zurückzuführen. Bei einer Leiter-Endtemperatur von 230 °C wurde an der Leiterschirmoberfläche ein Maximalwert von 120 °C registriert. Das Schnittbild eines solchen Kabels unter polarisiertem Licht betrachtet zeigt denn auch, dass eine dünne Zone der PE-Isolation kurzzeitig aufgeschmolzen war, eine Deformation jedoch noch ausblieb (Fig. 2). Es bedurfte Kurzschlusstemperaturen von über 300 °C, um massive Leiterverlagerungen herbeizuführen, welche zudem auf starke Kabelkrümmungen beschränkt blieben. Aus den Versuchen darf daher die Folgerung gezogen werden, dass für PE-Kabel eine Kurzschlusstemperatur von 200 °C bedenkenlos zugelassen werden kann, allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die eingangs erwähnten Bedingungen erfüllt sind.

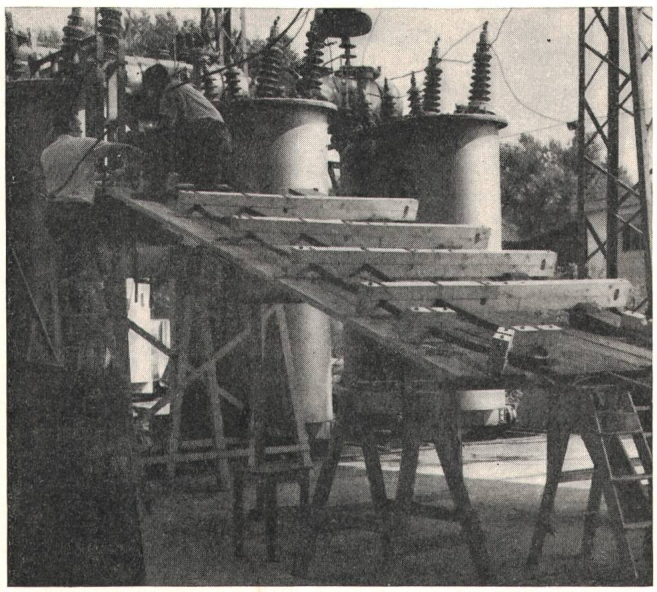


Fig. 1
Kurzschlussversuche an PE-Kabeln (zwei U-förmig ausgelegte Einleiterkabel bilden eine Schleife)

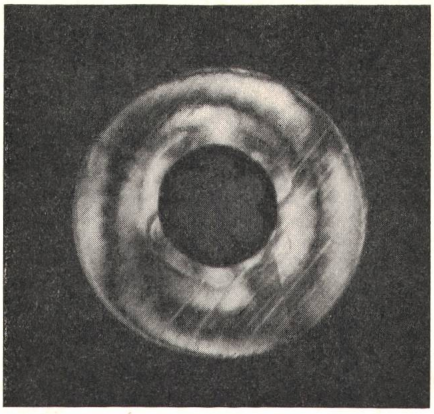


Fig. 2
Schnittbild eines PE-Kabels unter polarisiertem Licht nach Kurzschlussversuchen mit 230 °C Leitertemperatur

B. Capol, Kabelwerke Brugg AG, Brugg (zum Bericht von G. de Montmollin): Wenn die Eigenschaften der gewickelten und imprägnierten Isolationen jenen der extrudierten Isolationen gegenübergestellt werden, so scheint es mir wichtig, auf einen grundsätzlichen Unterschied im physikalischen Verhalten beider Isolationstypen aufmerksam zu machen.

Im Falle des gewickelten und imprägnierten Dielektrikums haben wir es mit einem Zweiphasensystem Flüssigkeit/Festkörper zu tun, das in besonderer Weise räumlich strukturiert ist. Im Falle der extrudierten Isolation liegt dagegen ein viskoelastischer Festkörper vor – ohne Anteil einer flüssigen Phase.

Es ist bekannt, dass reine Kohlenwasserstoffe theoretisch eine extrem hohe elektrische Festigkeit aufweisen. Dies gilt sowohl für Imprägnieröle, als auch für Polyäthylen. In der Praxis ist aber immer mit einer beträchtlichen Menge von Fremdsubstanzen zu rechnen, wobei unter Fremdsubstanzen alle Teilchen bis hinunter zur molekularen Grössenordnung zu verstehen sind, die sich in Dielektrizitätskonstante, Leitfähigkeit, Struktur usw. vom Grundmaterial unterscheiden. Diese Fremdsubstanzen können die elektrische Durchschlagsfestigkeit beträchtlich reduzieren. Ganz allgemein gilt, dass die elektrische Festigkeit jedes Isoliersystems letztlich von der Menge, von der Teilchengrösse und vom Verhalten der darin vorhandenen Fremdsubstanzen abhängt. Dabei können grosse Mengen von Fremdsubstanzen unter Umständen weniger schädlich sein als kleine Mengen.

Im flüssigen Dielektrikum verschieben sich Fremdteilchen unter der Einwirkung der Feldkräfte so lange, bis die Summe der Feldkräfte im Gesamtvolumen ein Minimum erreicht hat. Dies ist der Fall, wenn sich die Teilchen an einer Oberfläche anlagern, oder wenn sie sich in der Linie der grössten Feldstärke brückenförmig aufreihen. Dadurch nähert sich die Feldstärkeverteilung dem Idealfeld. Diese Feststellung gilt sowohl für das Gleich- als auch für das Wechselfeld. Der zeitliche Verlauf dieses Ausgleichs hängt u. a. von der Viskosität der Flüssigkeit bzw. von der Diffusionsgeschwindigkeit der Fremdsubstanzen ab.

Bei extrudierbaren thermoplastischen Dielektrika handelt es sich um viskoelastische Isolierstoffe. Die Teilchen von darin vorhandenen Fremdsubstanzen können sich wegen der sehr hohen Reibung nur langsam bewegen. Dadurch richtet sich das elektrische Feld über eine lange Zeit nach diesen Störstellen aus, d. h. das Idealfeld wird von einem Störfeld überlagert. Dies hat eine nicht ideale, von Zufälligkeiten abhängige Feldverteilung mit möglicherweise hohen Feldkonzentrationen zur Folge.

Aus dem Gesagten kann abgeleitet werden, dass im Dielektrikum mit einer flüssigen Phase die Möglichkeit und die Tendenz besteht, eine gestörte Feldverteilung zu korrigieren, d. h. etwaige lokale Überbeanspruchungen laufend auszugleichen. Im extrudierten Dielektrikum dagegen kann sich eine gestörte Feldverteilung nur sehr langsam ausgleichen. Lokale Überbeanspruchungen bleiben während wesentlich längerer Zeit bestehen.

Diese Betrachtungsweise ermöglicht es, verschiedene Erscheinungsformen wie z. B. den Unterschied zwischen elektrischer Kurzzeit- und Langzeitfestigkeit, die nachträgliche Verbesserung des Verlustfaktors von Haftmassekabeln oder die Bildung von Entladungsfiguren im Polyäthylen zu deuten.

Zusammenfassungen der Beiträge der Themengruppe D: «Neue Verfahren zur Applikation von Isolierstoffen»

Fortschritte in der Grundisolation und Träufel-Imprägnierung von Motoren

Von *A. Pölzbauer*

Seit elektrische Maschinen gebaut werden, ist man bemüht, die Leistung je kp Motorgewicht zu erhöhen. Neben anderen Faktoren war die Entwicklung besserer Isolierwerkstoffe und eine bessere Durchimprägnierung der Wicklungen von Rotor und Stator der Motoren eine Voraussetzung für die erzielten Erfolge. Es sollen in diesem Bericht die in der Fabrikation von Motoren – im besonderen Kleinmotoren – eingesetzten neuzeitlichen Verfahren erläutert werden.

Adresse des Autors:
Alfred Pölzbauer, Chefingenieur, Micafil AG, 8048 Zürich.

Sammelschienen-Isolation im Tauchverfahren

Von *H. Zahner*

Einleitend werden die bekannten Isoliertechniken für die Sammelschienenisolation besprochen. Hernach wird anhand der Forderungen in mechanischer und isoliertechnischer Hinsicht die Materialfrage gestreift.

Ein neu entwickeltes Tauchharz, welches den notwendigen Anforderungen entspricht, wird eingehend behandelt. Die Verfahrenstechnik wird aufgezeigt und anhand einiger Bilder das applizierte Produkt beschrieben. In Tabellen werden die geprüften mechanischen und elektrischen Eigenschaften bekanntgegeben. Schliesslich wird auch auf die Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens hingewiesen.

Adresse des Autors:
Dr. chem. *H. Zahner,* Leiter des Chemie- und Kunststofflabors, Sprecher & Schuh AG, 5036 Oberentfelden.

Verschiedene neue Produkte, Anwendungen und Verarbeitungsverfahren von Epoxidharzen in der Elektroindustrie

Von *W. Dieterle, E. Hubler, J. Wagner* und *J. Maurer*

Epoxid-(EP)-Harze haben in fast allen Bereichen der Technik Eingang gefunden. Ihr Anwendungsbereich ist aber besonders breit auf dem Gebiet der Elektroindustrie. EP-Harze eignen sich für Applicationen mit Stückgewichten von wenigen Grammen bis 500 kg. Die an sie gestellten Anforderungen in elektrischer, mechanischer, thermischer und chemischer Hinsicht sind hoch und werden weiterhin gesteigert. Dem Langzeitverhalten bestimmter Eigenschaften als Mass für erhöhte Sicherheit im Betrieb einerseits, guter Verarbeitbarkeit andererseits kommt – neben allgemein guten Daten – vermehrte Bedeutung zu.

Durch die Weiterentwicklung neuer Produktetypen und moderner technologischer Verarbeitungsverfahren können anspruchsvolle Anwendungen mit Erfolg getätigt werden. Dem Rentabilitätsdenken mit der Tendenz zur vermehrten, rationellen Serienfabrikation – ergänzt auch optimale Neukonstruktionen – kommt deshalb grosse Bedeutung zu.

Der optimale Einsatz eines breiten Angebotes von Einzelprodukten kann oft nur noch von spezialisierten Experten beurteilt werden.

Auf dem Gebiet der Giessharze werden – je nach Anwendung – konventionelle oder cycloaliphate Systeme angeboten und – nebst Hinweisen für zweckmässige Konstruktion – die von Fall zu Fall geeigneten neuen, modernen Verarbeitungsverfahren beschrieben.

Die als hochwertige Isolierstoffe bereits bekannten und erprobten EP-Pressmassen konnten im Verlauf der letzten 2 Jahre hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit noch verbessert werden. Es wurden neue, lagerstabile und sehr schnell härtende Typen geschaffen. Mit dem Spritzgiessen von EP-Pressmassen konnte eine für diese Harzklasse neue Verarbeitungstechnologie erfolgreich eingeführt werden. Dadurch wird dem Verarbeiter ermöglicht, hochwertige Duroplast-Isolationsteile in Zykluszeiten analog denen von Thermoplasten herzustellen.

Die Verarbeitungstechnologie von Kunststoffpulvern, insbesondere von EP-Sinterpulvern, ist in den letzten Jahren stark verbessert worden. Dies gilt vor allem für elektrostatische Verarbeitungsmethoden und für automatische Methoden der Wirbelsinter- und Sprühtechnik. In der Pulvertech-

nologie kommt der Qualität der Sinterpulver besondere Bedeutung zu. Der Einfluss des Härters (seiner chemischen Zusammensetzung), der Füllstoffe und der Körnung auf die Eigenschaften des Pulvers (Reaktivität) und der gehärteten Überzüge, auf Verarbeitung, elektrische Eigenschaften und Glasumwandlungstemperatur – um nur die wichtigsten zu nennen – wird eingehend behandelt. Typische neuere Anwendungsbeispiele folgen.

Adresse der Autoren:
Dr. *W. Dieterle*, Leiter des Mess- und Prüfwesens, *E. Hubler*, Leiter des Techn. Verkaufs, Elektrogruppe, *J. Wagner*, Techn. Verkauf, Pressmassen, und *J. Maurer*, Produkte-Entwicklung Sinterpulver, Ciba-Geigy AG, 4000 Basel.

Zusammenfassung des Diskussionsleiters, R. Stierli, zur Themengruppe D: «Neue Verfahren zur Applikation von Isolierstoffen»

Die drei Beiträge in der Themengruppe D befassen sich mit neuen Verfahren zur Applikation von Isolierstoffen. Die Aussagen und Untersuchungen betreffen nur Isolierstoffe auf Basis von Epoxidharzen und von ungesättigten Polyesterharzen, obwohl die Elektroindustrie auch eine grosse Zahl anderer Isolierstoffe einsetzt. Diese Polarisierung der Beiträge auf zwei Systeme aus der Gruppe der vernetzbaren Kunststoffe (auch Duroplaste genannt) lässt sich dadurch erklären, dass

a) die Herstellung von Isolierteilen aus Porzellan oder Glas nicht durch die Elektroindustrie, sondern durch Spezialfirmen erfolgt;
b) für thermoplastische Kunststoffe seit geraumer Zeit rationelle semikontinuierliche oder automatisch einrichtbare Verarbeitungsmethoden und -maschinen bekannt und eingeführt sind (Spritzgiessen);
c) die Verarbeitung der Systeme auf Basis von Epoxidharzen bisher weitgehend in diskontinuierlichen Verfahren (Giessen, Kompressionspressen) erfolgte, die arbeitsintensiv sind und infolge der rapiden Lohnkostensteigerungen immer teurer werden.

Die drei Beiträge zeigen klar und anschaulich, dass neue Verarbeitungsmethoden auch für Duroplaste entwickelt und bereits in der Praxis verwendet werden.

Die klare Darstellung der Probleme und Lösungen von *A. Pölzbauer* ist auch für den Nichtfachmann gut verständlich. Es wird gezeigt, wie sowohl bei der Grundisolation von Läufern und Ständern mit Epoxidharzpulvern durch Sprühautomaten als auch bei der Träufelimprägnierung im Elektromotorenbau durch Wahl geeigneter Harz-Härter-Systeme und darauf abgestimmter Verarbeitungsautomaten ausser einer Qualitätsverbesserung noch Einsparungen bei den Fertigungskosten von 30...35 % möglich sind.

Die angeführten Vorteile führen zu der Frage, weshalb insbesondere das Verfahren zum Auftragen der Grundisolation mittels Sprühautomaten sich nicht so schnell durchsetzt wie erwartet. Erfüllen die Systeme nicht alle Anforderungen oder bestehen in einzelnen Ländern Norm-Vorschriften, welche die Einführung verzögern oder verhindern?

H. Zahner berichtet über eine Anwendung von Isoliermaterial, bei welcher ebenfalls wirtschaftliche Erwägungen die Applikationsmethode bestimmen. Hierbei steht aber nicht die Frage der Automation im Vordergrund. Die beschränkte Stückzahl und die wechselnden Dimensionen der Sammelschienen führten zur Wahl des Tauchverfahrens, da es mit einfachen und preisgünstigen Einrichtungen die geforderte hohe Qualität ermöglicht.

Die Tauchlackierung mit lösungsmittelhaltigen Systemen ist ja längst bekannt. Problematisch und schwierig ist jedoch das Aufbringen von lösungsmittelfreien Epoxidharz-Systemen in einer Schichtdicke von mehreren Millimetern in einem Tauchprozess. Diese Methode dürfte auch für andere Anwendungen interessant sein. Deshalb bitte ich Herrn Zahner um Auskunft, welche Schwierigkeiten z. B. beim Überziehen von Metallteilen verschiedener Dimensionen zu erwarten sind.

Im dritten Beitrag dieser Themengruppe orientieren *W. Dieterle, E. Hubler, J. Maurer* und *J. Wagner* über Anwendungen und neuere Verarbeitungsverfahren mit Epoxidharzen in der Elektroindustrie. Die Elektroindustrie verarbeitet heute Epoxidharze auf Grund ihrer ausgewogenen elektrischen, mechanischen, thermischen und physikalischen Eigenschaften für Anwendungen in der Hochspannungs- und der Starkstromtechnik, aber auch in der Elektronik. Dieser vielfältige Einsatz bedingt auch verschiedene Applikationsmethoden, welche in letzter Zeit wesentlich verbessert und rationalisiert wurden. Besonders hervorzuheben sind folgende neuen Verarbeitungsverfahren:

a) In der schweizerischen Elektroindustrie wurden seit 20 Jahren Epoxid-Giessharze verarbeitet. Die Technologie des Giessens durchläuft gegenwärtig eine zweite Entwicklungsphase. Neue Methoden und Einrichtungen erlauben, die Konstanz der mechanischen Eigenschaften der Formstoffe zu verbessern und die Stundenleistung pro Beschäftigten zu vervierfachen.
b) Bei den Epoxid-Pressmassen tritt neben das Kompressions- und Transferpressen (Spritzpressen) neu das Spritzgiessen. Die kurzen Zykluszeiten ermöglichen die rationelle Herstellung von Artikeln in Gross-Serie.
c) Zum Aufbau von Isolationsschichten aus Epoxidharzpulver eignen sich verschiedene Methoden, wobei das elektrostatische Spritzen die interessantesten Möglichkeiten zeigt.

Für den Nichtspezialisten ist es recht schwierig, die für einzelne Anwendungen optimale Applikationsmethode zu finden. Einerseits lassen sich mit Epoxid-Pressmassen Formteile von wenigen Grammen bis zu 10 kg rasch herstellen. Andererseits eignen sich die Giessharze zur Herstellung von Formteilen von wenigen Grammen bis 500 kg. Es stellt sich deshalb die Frage, ob für die Auswahl der bestgeeigneten Systeme und Applikationsverfahren Richtlinien zu finden sind (z. B. Isolierteile aus Giessharz oder Pressmasse? Isolierschicht aus Pressmasse, Sinterpulver oder Tauchharz?).

Diskussionsbeiträge der Themengruppe D: «Neue Verfahren zur Applikation von Isolierstoffen»

R. Stierli, Ciba-Geigy AG, Basel: Die im Bericht von A. Pölzbauer erwähnten Vorteile führen zu der Frage, weshalb insbesondere das Verfahren zum Auftragen der Grundisolation mittels Sprühautomaten sich nicht so schnell durchsetzt wie erwartet. Erfüllen die Systeme nicht alle Anforderungen oder bestehen in einzelnen Ländern Norm-Vorschriften, welche die Einführung verzögern oder verhindern?

Karl Roewer, Egerpohl (zum Bericht von A. Pölzbauer): Schwierigkeiten bei der Anwendung von Grundisolationen aus Kunstharzen führten in der BRD bereits vor einer Reihe von Jahren zur Einfügung einer Prüfvorschrift für solche Ausführungen in den Bestimmungen VDE 0730, die im folgenden aufgeführt sind. Es zeigte sich, dass die Grundisolation versagte, wenn dauernd Spannung zwischen der Wicklung und dem Eisenkörper lag. Dieser normalen Beanspruchung, der die klassischen Isoliermaterialien, wie Preßspäne, Ölleinen usw. ohne jede Beanstandung standhielten, waren nur besondere und mit besonderer Sorgfalt aufgebrachte Kunstharzüberzüge gewachsen. Über einige der während der Erarbeitung der Vorschriften gemachten Erfahrungen berichtete M. Voss in der ETZ-B, Bd. 22 (1970) H.13, S. 279–281.

Die Vorschrift wurde so abgefasst, dass sie auch für die Kontrolle von vollständigen Isoliersystemen höherer Temperaturklassen verwendet werden kann; bei Grundisolationen aus Kunststoffüberzügen beschränkt sie sich auf die Klassen A und E nach der CEI-Publikation 85.

Die Vorschrift ist bereits in der einschlägigen Arbeitsgruppe des TC 61 der CEI diskutiert worden. Da sie im Gegensatz zu den in den USA üblichen bei vier Temperaturen durchzuführenden Isolationssystem-Alterungsprüfungen nur eine Kontrollprüfung bei nur einer Temperatur ist, konnten sich die nordamerikanischen Experten noch nicht für diese Prüfung entscheiden.

Es erhebt sich nun folgende Frage:

Welche System-Prüfungen wurden bei der Untersuchung von Grundisolationen aus Kunststoffüberzügen bislang in der Schweiz angewendet?

Welche Stückprüfungen zur Aussonderung fehlerhafter Exemplare der Fertigung können angewendet werden?

(Hierbei ist zu bedenken, dass moderne lackisolierte Wicklungsdrähte bei Raumtemperatur Prüfspannungen bei 1 s Dauer von 2...5 kV aushalten und man somit bei den üblichen Hochspannungsprüfungen von 1,3 kV...1,8 kV keine Aussage über die Fehlerfreiheit der Grundisolation machen kann.)

A. Pölzbauer, Micafil AG, Zürich: Die Normenstellen der Länder, vor allem der BRD, haben lange Zeit dieses Verfahren für Motoren des Haushaltgeräte-Sektors mit Nennspannung 220 V abgelehnt. Es wurde lediglich für Niederspannungsmotoren bei Automobilen und Spielzeugen angewendet (24 V). Erst im Mai 1972 wurden vom VDE mit der Normung «Bestimmungen für Isolierstoffbeschichtungen» VDE 0368/9.72 die Qualitätsforderungen dieses Verfahrens freigegeben und so der Weg für die industrielle Anwendung für Haushaltgerätemotoren geebnet.

Weiters ist auch die Eignungsprüfung fertig hergestellter Rotoren für Geräte mit elektromotorischem Antrieb, die eine Pulverharzbeschichtung des Blechpakets besitzen, Gegenstand der VDE-Vorschrift 0730 Teil 1 (Änd. f). Untersuchungen nach § 12 dieser Vorschrift an Rotoren mit Harzpulver-Grundisolation und Wicklungen aus Polyurethan- oder Terephtalat-lackierten Cu-Drähten haben gezeigt, dass diese die Anforderungen der Isolierung für Klasse E mit mehr als der zweifachen Dauer für Temperatur und Spannungsbelastung von 500 V erfüllten. Es sei noch erwähnt, dass Motoren für eine Dauertemperaturbelastung von 130 °C geprüft und freigegeben wurden und selbst Motoren der Isolierstoffklasse F mit Erfolg eingesetzt werden (155 °C).

Das Problem der Kantendeckung war immer der Hauptpunkt der Ablehnung des Verfahrens. Vor allem beim Vorhandensein von Stanzgraten der Bleche des Rotor- und Statorpaketes war an diesen Stellen nach der Beschichtung die Durchschlagsgefahr sehr gross. Durch das jedoch erst aus Prototypen geprüfte Verfahren des Sandstrahlens der Blechpakete vor der Beschichtung konnten die Kanten abgerundet und die Stanzgrate als auch im Paket zwischen den Einzelblechen eingeklemmte Späne und Metallteile beseitigt werden.

Diese Anlage geht zurzeit in einen Fabrikationsbetrieb für Universalmotoren und wird dort ihre Bewährung beweisen müssen.

Prüfungen nach VDE 0368 ergaben mehr als ausreichende Reserven gegenüber den Mindestforderungen. So beträgt z. B. die Kantendeckung im Wirbelsinterverfahren rund 45 %. Gefordert werden nach § 10 der Vorschrift 30 %. Die tatsächlich erreichte Kantendeckung im Sprühverfahren bei vorher sandgestrahlten Blechpaketen liegt bei rund 75 %. Auch im Hinblick auf den Harzpulververbrauch ist dies sehr vorteilhaft. Die Kanteneinschneidtemperatur wurde mit 250 °C gemessen, bei geforderten 180 °C gemäss § 19 der Vorschrift.

R. Stierli, Ciba-Geigy AG, Basel (zum Bericht von H. Zahner): Die Tauchlackierung mit lösungsmittelhaltigen Systemen ist ja längst bekannt. Problematisch und schwierig ist jedoch das Aufbringen von lösungsmittelfreien Epoxidharz-Systemen in einer Schichtdicke von mehreren Millimetern in einem Tauchprozess. Diese Methode dürfte auch für andere Anwendungen interessant sein. Deshalb bitte ich Herrn Dr. Zahner um Auskunft, welche Schwierigkeiten z. B. beim Überziehen von Metallteilen verschiedener Dimensionen zu erwarten sind.

H. R. Zahner, Sprecher & Schuh AG, Oberentfelden: Wie R. Stierli erwähnte, waren es vor allem wirtschaftliche Überlegungen, die zur Entwicklung der Sammelschienen-Isolation im Tauchverfahren führten, denn der Trend zu immer kleineren Abmessungen im Schaltanlagenbau fordert eine Feststoff-Luft-Isolation stromführender Teile.

Die Anforderungen, die an eine solche Isolation gestellt werden, weisen in Richtung vernetzender Produkte. Von der Verfahrenstechnik her bot sich die in der Lacktechnik bekannte, einfache Tauchmethode an.

Die Schwierigkeiten, in einem Arbeitsgang die notwendige Schichtdicke zu erreichen, konnte mit einer speziellen Formulierung der Tauchmasse gelöst werden. Die mechanischen und elektrischen Werte entsprechen den Anforderungen.

Bezüglich der zu erwartenden Schwierigkeiten beim Überziehen von Metallteilen verschiedener Dimensionen ist meines Erachtens nur die Lage der entstehenden Tropfkante zu beachten. Es muss darauf geachtet werden, dass diese schon bei der Konstruktion der zu überziehenden Teile miteinbezogen wird, dass also tauchgerecht konstruiert werden muss. So sind Hinterschneidungen möglichst zu vermeiden, um ein gleichmässiges Abfliessen des nicht gelierten Materials zu begünstigen.

Wie ich in meinen Ausführungen erwähnt habe, ist es grundsätzlich möglich, jedes Material, das der notwendigen Vorwärme- bzw. Aushärtetemperatur standhält, zu überziehen. So hat uns das Tauchverfahren beispielsweise ermöglicht, die Hauptstromspulen von Primärauslösern wirtschaftlich zu isolieren, bei gleichzeitiger Erhöhung der Kurzschlussfestigkeit.

Man darf nicht die Auffassung haben, alle Isolierprobleme mit der Tauchisolation lösen zu wollen; gezielt eingesetzt bietet das Verfahren einen technologischen Fortschritt.

K. von Angern, Materialprüfanstalt des SEV, Zürich (zum Bericht von W. Dieterle u. a.): Bei all diesen Verfahren sind die mechanischen, chemisch-physikalischen und elektrischen Eigenschaften stark abhängig vom Aushärtungsgrad. Ferner ist feststellbar, dass der Polymerisationsgrad insbesondere das viskoela-

stische Verhalten des harten Harzes bestimmt, was sich anderseits auf die elektrischen Eigenschaften bei Dauerbeanspruchung während längerer Zeit auswirkt. Mit den rationellen Verfahren wird dieser Punkt zu wenig berücksichtigt, und es erhebt sich die Frage, mit welchen Mitteln man heute auf einfache Art den Polymerisationsgrad feststellen kann, um dadurch über das Verhalten des Stoffes etwas aussagen zu können.

E. Hubler, Ciba-Geigy AG, Basel (zur Frage von K. von Angern): In der Praxis sind mechanische und elektrische Messungen an den fertigen Formteilen üblich. Besonders bei niederreaktiven Giessharzmassen ist die Bedeutung des Aushärtungsgrades und dessen messtechnische Erfassung von besonderer Wichtigkeit. Bei hochreaktiven Systemen ist die Härtungszeit speziell bei erhöhter Temperatur kurz, wodurch vielfach der durch die chemische Reaktion ausgelöste Wärmestau im Innern der Formteile durch sorgfältige, thermisch isolierte Aufstellung nach dem Entformen noch für die Nachhärtung ausgenützt werden kann. Zur Überwachung des Härtungsgrades empfiehlt es sich besonders bei der Serienfabrikation, unter Produktionsbedingungen hergestellte Prüfkörper auf den Martenswert oder die Umwandlungstemperatur zu überwachen.

Die physikalische und labormässige Überprüfung des Schubmoduls in Funktion der Temperatur kann mit Hilfe speziell geeigneter Präzisionsgeräte vorgenommen werden. Diese Art der Nachkontrolle ist auch dann interessant und zweckmässig, wenn nur wenig Material (einige mm^3) von einem fertigen Formteil weggenommen werden können, und daran der Umwandlungspunkt [1]) resp. die Umwandlungstemperatur ermittelt werden soll.

R. Stierli, Ciba-Geigy AG, Basel (zum Bericht von W. Dieterle u. a.): Für den Nicht-Spezialisten ist es recht schwierig, die für einzelne Anwendungen optimale Applikationsmethode zu finden. Einerseits lassen sich mit Epoxid-Pressmassen Formteile von wenigen Gramm bis zu 10 kg rasch herstellen. Andererseits eignen sich die Giessharze zur Herstellung von Formteilen von wenigen Gramm bis 500 kg. Es stellt sich deshalb die Frage, ob für die Auswahl der bestgeeigneten Systeme und Applikationsverfahren Richtlinien zu finden sind.

Hier interessiert auch eine Antwort auf die Frage nach den Vor- und Nachteilen von Giessharz-Systemen gegenüber Pressmassen.

J. Wagner, Ciba-Geigy AG, Basel: Zur Frage von R. Stierli betreffend Auswahl der bestgeeigneten Systeme und Applikationsverfahren lassen sich folgende Richtlinien aufstellen:

1. Bei einer Produkteempfehlung ist in erster Linie darauf zu achten, welche Verarbeitungseinrichtungen beim Kunden bereits vorliegen. Je nachdem wird diese Vorsondierung den Einsatz von Flüssigharzen oder Pressmassen oder andere Systeme bestimmen.

2. Muss der Kunde von Null an beginnen, sind bei eventuellen Investitionen für Pressmassenverarbeitung folgende Punkte massgebend:

a) Stückzahl der zu fertigenden Teile;
b) Gewicht und Grösse der zu fertigenden Teile;
c) Technische Anforderungen an den Fertigteil;
d) Anzahl vorhandene Arbeitskräfte.

3. In der Regel empfiehlt es sich, Pressmassen einzusetzen, wenn:

a) das Gewicht des zu fertigenden Artikels zwischen 2 und 1000 g beträgt;
b) eine Serienfertigung von über 10 000 Einheiten vorliegt;
c) extrem kurze Zykluszeiten verlangt werden (Anwendung des Injektionsverfahrens);
d) die Einsparung menschlicher Arbeitskräfte wichtig ist (Injektionsspritzgiessen im Automaten).

[1]) Der Umwandlungspunkt entspricht dem Dämpfungsmaximum bei der Bestimmung des Schubmoduls.

E. Hubler, Ciba-Geigy AG, Basel (zur Frage von R. Stierli): Die Wahl zwischen Giess- und Pressverfahren richtet sich zum Hauptteil nach den bereits vorhandenen Einrichtungen in einem Produktionsbetrieb. Die Herstellung von Giessformteilen erscheint von Vorteil für die Prototypenserienproduktion. Die weitgehende Unabhängigkeit der Giessverfahren von dem Volumen der herzustellenden Giessformteile und die grosse Auswahl der Endeigenschaften gestatten den Verarbeitern, einen ausgedehnten Anwendungsbereich zu erschliessen. Besonders wenn die strenge Forderung nach minimaler Ionisation bei sehr hohen Feldstärken gestellt wird, sind ausgewählte Giess-Systeme zusammen mit geeigneten Giessverfahren der richtige Weg für die Erreichung optimaler elektrischer Endeigenschaften von Formteilen.

Bei dem Aufbau einer Produktion können durch verhältnismässig niedrige Investitionen und die Möglichkeit der geeignetsten Giessverfahrenstechnik bereits äusserst rentable Herstellungsmöglichkeiten auch von komplizierteren Konstruktionselementen gefunden werden. So gelingt es, die Vergussmenge von 3 kg pro Mann und Stunde durch die Anwendung des Druckgelierverfahrens gegenüber der konventionellen Giesstechnik auf mindestens 12 kg pro Mann und Stunde zu erhöhen, wobei einzig die Forderung nach einer rationellen Öffnungs- und Schliessvorrichtung für Giessformen zu erfüllen ist. Durch eine weitere Automatisierung des gesamten Giessprozesses dürfte es durchaus möglich werden, mehr als 50 kg Vergussmasse pro Mann und Stunde zu verarbeiten, resp. fertige kaum mehr einer Nachbearbeitung zu unterziehende Formteile herzustellen.

R. Stierli, Ciba-Geigy AG, Basel (zum Beitrag von W. Dieterle u. a.): Beim Problem, Isolierschichten aus Epoxidharz auf verschiedene Substrate aufzubringen, stehen dem Anwender verschiedene Applikationsmethoden und Produkte (Pressmassen, Giessharze, Sinterpulver, Tauchharze) zur Verfügung. Es interessieren nun Vergleiche über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Applikationsverfahren.

J. Maurer, Ciba-Geigy AG, Basel (zur Frage von R. Stierli): Dem Praktiker stehen heute ein halbes Dutzend Applikationsverfahren für das Aufbringen von Isolier-Beschichtungen und das schützende Ummanteln von Teilen zur Verfügung:

- Umgiessen, zum Beispiel für Elektronik-Bauteile
- Wirbelsintern (normal und elektrostatisch)
- Tauchen mit Spezialharzen[1])
- Elektrostatisches Pulverspritzen, zum Beispiel für Wicklungsenden sowie flächige Teile
- Pulversprühen mit Luft, zum Beispiel für die Grundisolation von Kleinmotoren,
- Transferpressen zum Beispiel für Elektronikteile.

Mit diesen Verfahren bietet die Kunststoff-Industrie eine Vielzahl geeigneter Stoff-Systeme an, Kunststoffe, die es erlauben, je nach Anforderung flexibel, wärme- und feuchtebeständig zu sein. Bewährt haben sich Epoxidharz-Systeme – sowohl flüssige wie auch feste – für die genannten Verfahren.

Welche Auswahl-Kriterien muss der Verarbeiter beachten bei der Rationalisierung in seinem Betrieb?

Zu nennen sind hier vorab:

- Stückzahl, Formenvielfalt und Aussendimensionen, Einfachheit, Automatisierbarkeit;
- Für massdefinierte Beschichtungen in hoher Stückzahl ist das Transfer-Pressen zu empfehlen;
- Bei *kleineren Stückzahlen* in vielfältigen Abmessungen sind Beschichtungen aus flüssigen Harzsystemen (Giess- oder Tauchharze) günstig;
- Für Beschichtungen auf temperaturempfindlichen Substraten sind ebenfalls Giess- oder Tauchsysteme von Vorteil;
- Bezüglich Einfachheit und Automatisierbarkeit sind Wirbelsintern und Tauchen an erster Stelle zu erwähnen.

[1]) zum Beispiel für Sammelschienen und Elektronik-Bauteile.

Zusammenfassungen der Beiträge der Themengruppe E: «Anwendung neuerer Isolationssysteme bei Maschinen und Apparaten»

Erfahrungen mit Kunstharzisolationssystemen für Statorwicklungen von rotierenden Hochspannungsmaschinen

Von *R. Schuler*

Nach einer Übersicht über die Entwicklung der Isolationstechnik von rotierenden Hochspannungsmaschinen wird auf die seit 1955 von Brown Boveri verwendete Kunstharzisolation Micadur eingegangen. Deren Aufbau und Herstellungsprozess werden beschrieben und vor allem gezeigt, welchen Vorzügen es zu danken ist, dass die auf Glasgewebe/Glimmerpapier aufgebaute und in einem Kunstharz unter Vakuum imprägnierte Isolierung über den ganzen Bereich vom Hochspannungsmotor mässiger Leistung bis zu den grössten Turbo- und Hydrogeneratoren Eingang fand und die frühere Asphaltmicafolium-Isolierung vollständig verdrängte.

Auf breiter Basis wurden Betriebserfahrungen mit Kunstharzisolierungen gesammelt; dabei wurden die in umfangreichen Laboruntersuchungen gewonnenen sehr günstigen Resultate voll und ganz bestätigt. Mit dem heutigen Stand der Isoliertechnik ist es demnach möglich, auch die in nächster Zukunft zu bauenden Maschinen bis zu den höchsten Leistungen und Spannungen betriebssicher zu isolieren, wobei bei modernen Maschinen aus isolationstechnischer Sicht das Hauptgewicht heute weniger bei den Isolationsmaterialien und dem Fertigungsprozess, sondern in erster Linie bei der zweckmässigen konstruktiven Ausbildung des Wicklungs- und Isolationssystems liegt.

Adresse des Autors:
Roland Schuler, Chef des Ressorts Isolationssysteme rotierender elektrischer Maschinen, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

Gesteuerte Hartpapierisolation für Steuersäulen von Thyristorventilen

Von *G. Krasser*

Es wird über eine neue Anwendung von gesteuerter Hartpapierisolation berichtet, die durch die Entwicklung elektromagnetisch gesteuerter Thyristorventile für die Energieübertragung mit Gleichstrom hoher Spannung möglich geworden ist. In den Grundzügen beschrieben werden Aufbau und Wirkungsweise von «Steuersäulen», das sind jene Bauteile solcher Ventile, deren Aktivteile aus gesteuerter Hartpapierisolation hergestellt werden. Ihre Abmessungen lassen sich in weiten Grenzen den von Fall zu Fall recht verschiedenartigen Wünschen der Ventilbauer anpassen. Diese Flexibilität findet ihre Grenzen einerseits bei sehr hohen Ventilspannungen, andererseits bei Anordnungen in Luft statt unter Öl. Beides führt zu sehr langen, unter Umständen in Längsrichtung zusammengesetzten Steuersäulen. An mehreren Anwendungsbeispielen wird erläutert, wie sich Anpassungsprobleme dieser Art lösen lassen.

Abschliessend wird auf die Betriebs- und Prüfanforderungen für solche Steuersäulen eingegangen. Es ergibt sich, dass sich diese sowohl für die betrieblichen Beanspruchungen (Gleichspannung mit bedeutender überlagerter Wechselspannungskomponente) gut eignen als auch mit rationellen Prüfmethoden geprüft werden können. In einem beschriebenen Anwendungsfall konnte auf zeitraubende Gleichspannungs- und Umpolprüfungen wie auf besonders aufwendige Teilentladungsmessungen mit Gleichspannung bei den Stückprüfungen verzichtet werden.

Adresse des Autors:
Gustav Krasser, Micafil AG, 8048 Zürich.

Heutiger Stand der Anwendung von Transformerboard in Leistungstransformatoren höchster Spannung

Von *H.-P. Moser*

Nach einem historischen Überblick über den Ersatz der Hart- und Weichpapier-Isolationen durch Transformerboard werden die Gesichtspunkte für die Auslegung und Materialauswahl einer betriebssicheren, teilentladungsfreien Isolation erläutert. Im Hinblick auf die Kurzschlussfestigkeit wird auf das günstige Druckverhalten von heissgepresstem Transformerboard, vor allem bei Wechsel- und Dauerlast, hingewiesen. Das dielektrische Verhalten hängt neben der Verwendung reiner Sulfatzellulose vor allem von der Trocknung und Ölimprägnierung ab. Die wesentlichen Probleme der Aufbereitung werden diskutiert.

Adresse des Autors:
Hans-Peter Moser, H. Weidmann AG, 8640 Rapperswil.

Anwendung neuer Isoliersysteme im Bau von Durchführungen

Von *G. Rossi*

Ölimprägnierte Papierwickeldurchführungen stellen bei ultrahohen Spannungen beträchtliche Fertigungsprobleme. Anhand eines Beispiels für 1200 kV Nennspannung wird gezeigt, wie die Schwierigkeiten überwunden werden konnten. Bei der äusseren Isolation von Mittelspannungsdurchführungen sind die Porzellanmäntel erfolgreich durch Kunstharzüberwürfe ersetzt worden. Ferner wird über Versuche berichtet, bei denen die Hauptisolation entweder aus Kunstharzfolien, aus geschleudertem Giessharz oder aus Isoliergas bestand.

Adresse des Autors:
Guido Rossi, Micafil AG, 8048 Zürich.

Heutige und prognostizierte Anwendungen von hochtemperaturbeständigen Isoliermaterialien im elektrischen Maschinen- und Apparatebau

Von *W. Rozner*

Für den Einsatz und die Anwendung von hochtemperaturbeständigen Isolierstoffen im elektrischen Maschinen- und Apparatebau sind mehrere wichtige Gesichtspunkte massgebend. Die rasche Entwicklung in der chemischen Kunststoffindustrie beeinflusst Zusammensetzung und Einsatzmöglichkeit der elektrischen Isoliermaterialien. Durch Neuentwicklungen mit wesentlich verbesserten Eigenschaften ist ein Wechsel von Isolierstoffsystemen in wesentlich kürzeren Zeitabständen als früher erforderlich. Die fortschreitende Rationalisierung und Automatisierung stellt zusätzliche und besondere Forderungen an die Qualität und an die Verarbeitungseigenschaften von Isoliermaterialien. Seit dem industriellen Einsatz der Elektrotechnik ist eine ständige Verminderung des Leistungsgewichtes im elektrischen Maschinen- und Apparatebau zu beobachten; dies bedingt eine laufende Erhöhung der thermischen Beständigkeit der elektrischen Isolierstoffe. Die rationelle Fertigung bei stetig steigenden Stückzahlen – man denke z. B. nur an die grossen Stückzahlen von elektromotorischen Antrieben für Haushaltgeräte und Kraftfahrzeuge – erfordert eine Beschränkung auf bestimmte Isolierstoffsysteme und deren Zusammensetzung. Ausserdem darf auch der Einfluss auf die Herstellungskosten beim Übergang auf hochtemperaturbeständige Isoliermaterialien nicht ausser acht gelassen werden.

Adresse des Autors:
Walter Rozner, Textile Fibers Departement, Du Pont de Nemours International S. A., 1200 Genève.

Zusammenfassung des Diskussionsleiters, H. Kappeler, zur Themengruppe E: «Anwendung neuerer Isolationssysteme bei Maschinen und Apparaten»

In der vorliegenden Themengruppe sind Beiträge zusammengefasst, die sich mit der Anwendung neuerer Isolierstoffsysteme bei Maschinen und Apparaten befassen. Vier Beiträge berichten über die Isolation rotierender Maschinen, vor allem über die Anwendung der Glimmer-Kunstharzsysteme und über den möglichen Ersatz durch neue hochwärmebeständige Kunststoffe. Die übrigen Berichte betreffen Isoliersysteme auf der Basis von Zellulose für Leistungstransformatoren und Durchführungen. Auf den zukünftigen Einsatz von Kunststoff-Folien, Kunstharzen und von Isoliergas, als Hauptisolation bei Durchführungen, wird nur am Rande hingewiesen.

Der Beitrag von R. Sauvin[1]) befasst sich mit Isoliersystemen für rotierende Maschinen. Ausgangspunkt einer modernen Maschinenisolation ist stets ein auf einen Träger kaschiertes Feinglimmervlies in Bandform. Je nach der Technologie der weiteren Verarbeitung wird entweder ein poröses, imprägnierfähiges Band, praktisch ohne Bindemittel, oder ein mit einem Harz durchtränktes Band hergestellt. Wiederum kann in dem harzdurchtränkten Band das Harz völlig auspolymerisiert oder nur vorpolymerisiert sein. Die richtige Dosierung des Harzanteiles ist entscheidend für die Qualität der fertigen Isolation. Der Autor untersucht deshalb den Einfluss des Harzgehaltes auf die Güte der fertigen Glimmer-Harzisolation. Wesentlich ist auch, dass das Harz das Glimmervlies luftfrei durchdringt. Bei den Bändern, die später keiner Vakuumbehandlung unterzogen werden, kann dies durch spezielle Tränkmethoden erreicht werden. Bei Arbeiten mit Bändern, die ein vorpolymerisiertes Harz enthalten, ist ferner ein Harz mit breiter Verarbeitungszone notwendig, um den Einfluss der Lagerung und der Vorhärtung zu neutralisieren. Frage: Wenn ein Optimum der Eigenschaften bei einem Harzgehalt von 30...35 g/m² genannt wird, so scheinen für das oft verwendete 160 g/m² schwere Vlies keine Nachteile bei höheren Harzgehalten zu bestehen. Verbieten andere Gründe eine harzreichere Isolation? Ist die sehr hohe Durchschlagfestigkeit von 84 kV/mm realistisch?

Im Beitrag von E. Diehl[1]) wird der Naturglimmer näher untersucht. Als elektrisches Isoliermaterial sind nur der Muskovit (Kaliglimmer) und der Phlogopit (Braunglimmer) von Bedeutung. Von diesen beiden Glimmersorten werden die hauptsächlichsten elektrischen Eigenschaften angegeben. Den Autor interessieren die chemische Natur der im Glimmersplitting enthaltenen natürlichen Verunreinigungen und insbesondere ihr Einfluss auf das elektrische Verhalten. Es

[1]) Siehe die Zusammenfassung in der Themengruppe C1.

wird festgestellt, dass die gefleckten Stellen im Muskovit eine kleinere Durchschlagfestigkeit und einen wesentlich schlechteren Verlustfaktor haben können als die klaren Stellen, doch seien diese Unterschiede ohne praktische Bedeutung. Hier erhebt sich die Frage nach den Betriebserfahrungen mit Einschlüssen im Spaltglimmer. Kann nicht die sehr reduzierte elektrische Festigkeit in Längsrichtung der Schicht die Isolation am Nutaustritt gefährden?

Es werden mit Erfolg Glimmervliese aus Muskovit und Phlogopit für Motorisolationen verwendet. Wie wirken sich hier die beträchtlichen Unterschiede in den Eigenschaften aus? Werden die Untersuchungen über den Einfluss der Verunreinigungen in den Glimmersplittings nicht gegenstandlos, wenn nach Berichten von R. Sauvin und R. Schuler nur Feinglimmerpapier verwendet wird?

Der Beitrag von R. Schuler betrifft die unter dem Namen Micadur bekannt gewordene Isolierung für Statorwicklungen rotierender Hochspannungsmaschinen. Die Isolation ist aufgebaut auf einem Feinglimmerpapier (Samica oder Romica) mit einem Träger aus Glasgewebe, das in einem Vakuum/Druckprozess mit einem thermohärtenden Kunstharz imprägniert wird. Langjährige Dauerversuche, Funktionsprüfungen an Ständermodellen mit betriebsfertig eingebauten Wicklungen, thermische Zyklenprüfungen, Prüfung bei Lagerung in Salzwasser, haben die Überlegenheit dieses Isolationssystems dargetan. Kriterien, die geeignet sind, Veränderungen der Isolation erkennen zu lassen, sind: Verlustfaktor, Verlustfaktoranstieg mit der Spannung, Teilentladungsintensität und Widerstand bei Wechselspannung, ferner Widerstand und Polarisationsindex bei Gleichspannung. Als wesentlich wird hervorgehoben, dass heute die Nachmessungen an Wasserkraft- und Turbogeneratoren mit über 10jähriger Betriebszeit vorliegen, so dass die Weiterführung der Langzeitversuche nicht mehr nötig sei. Das Augenmerk muss in erster Linie auf die Nutverkeilung und Wickelkopfabstützung gerichtet werden.

Im Zusammenhang mit den Berichten von *R. Sauvin* und *R. Schuler* erhebt sich die Frage, ob der Glimmersplitting in der Motorisolation ganz durch das Feinglimmerpapier verdrängt worden ist. Hat ferner das Imprägnierverfahren mit Vakuum und Druck die andern Verfahren verdrängt? Ist nicht eine ebenbürtige Isolation zu erhalten mit einem porenfrei durchtränkten Band, trocken oder nass, das bei der Weiterverarbeitung keiner Imprägnierung mehr bedarf? Deutet der stetige Anstieg des Verlustfaktors nicht doch auf eine wesentliche Veränderung der Isolation hin? Genügt nicht dieses Kriterium allein für die Beurteilung der Isolation?

Der Bericht von *G. Krasser* behandelt eine neuartige Anwendung der Hartpapierisolation für Hochspannungsventile, die aus einer Reihenschaltung vieler Thyristoren bestehen. Zur Zündung dieser Thyristoren werden von einem niederspannungsseitigen Zündkabel über hochspannungsseitig gelegene Übertragerringkerne Impulse erzeugt. Zwischen Zündkabel und Ringkernen wird deshalb eine Isoliersäule benötigt, die einerseits das Kabel gegen Hochspannung isoliert und anderseits ein künstliches Schirmfeld erzeugen soll.

Der Verfasser beschreibt die charakteristische Beanspruchung dieser Isolation mit Mischspannungen. Bedingt durch die sehr langen Steuerventile entstehen Probleme bei der Zusammensetzung der Wickelkörper mittels Edelfugen. Es erhebt sich die Frage, aus welchen Gründen nicht ölimprägnierte Kondensatorwickelkörper mit sehr grossen Wickelbreiten hergestellt werden können, die dann keine Edelfugen benötigen.

Im Beitrag von *H.-P. Moser* wird eingehend über Transformerboard als Isolation für Öltransformatoren höchster Ansprüche berichtet. Dieses Material hat das Hartpapier und den Weichpapierwickel weitgehend zu verdrängen vermocht. Zylinder, Winkelringe, Distanzierungen, Abstützungen und sogar kompliziert geformte Ableitungen sprechen für seine vielseitige Anwendbarkeit. Die Bedürfnisse der Grosstransformatoren konnten nur befriedigt werden durch grossflächige Platten aus einem vorverdichteten, heiss gepressten, harten Material mit grosser Formstabilität, kleiner Schrumpfung und hohen mechanischen Eigenschaften. Die Probleme in der Anwendung verraten den Zellulosecharakter der Isolation. Nötig sind: sorgfältige Trocknung und Entgasung vor der Imprägnation, Vermeidung von Entladungen, Schutz vor Feuchtigkeit. Als neu darf gelten, dass die Trocknung und Regenerierung mit Kerosindampf keine Schwierigkeiten verursacht.

Es stellt sich die Frage, ob die im Bericht erwähnten geräuschvollen Entladungen wirklich ungefährlich sind. Inwieweit hat die Transformertechnik das Hartpapier und das Weichpapier als Hauptisolation ersetzt? Die doch relativ hohe Dielektrizitätskonstante des Transformerboards ($\varepsilon_r > 4$) verhindert eine volle elektrische Auslastung der Ölspalte, besonders bei den Distanzierungen. Sind keine neuen Ansätze von Isoliersystemen auf Kunststoffbasis vorhanden, die ein dem Mineralöl ähnliches ε_r haben und auch die Nachteile der Zellulose nicht aufweisen?

Im Beitrag von G. Rossi werden Isoliersysteme für Durchführungen beschrieben. Für grösste Durchführungen kommen Wickel aus ölimprägniertem Papier in Frage, die aber wegen ihrer enormen Grösse die Gefahr des Teleskopierens aufweisen. Mit einer leichten Kunstharzklebung kann dies vermieden werden. Ölimprägnierte Wickelkörper können auch mit Kunstharz umgossen werden und sind dann im Freien verwendbar. Der Autor berichtet von Versuchen mit Wickelkörpern aus gewickelten und gesinterten Folien, von geschleuderten Giessharzkörpern mit Kondensatoreinlagen und schliesslich von Durchführungen mit einer Füllung von SF_6-Gas.

Als neu zu bewerten sind die Verwendung von Folien und Giessharzen für die Hauptisolation und die Umgiessung von Wickelkörpern mit Harz. Es interessiert, ob anderorts ebenfalls Entwicklungen in ähnlicher Richtung im Gange sind. Nähere Angaben über die Technologie wären wünschenswert. Wie können ölimprägnierte Wickel entladungsfrei mit Harz umgossen werden? Ist etwas über die Freiluftbewährung der Giessharzmäntel bekannt?

In seinem Bericht behandelt W. Rozner den Aufbau von Isoliersystemen für Drehstrommotoren auf der Basis der neuen hochtemperaturbeständigen Kunststoffe. Es kommen vor allem die folgenden zum Einsatz: Papiere und textile Gebilde aus aromatischem Polyamid (Nomex), Folien und Lackierungen aus Polyesterimiden (Kapton), Silikonharze und -Elastomere, Mylar und Teflon. Mit einer sorgfältigen Auswahl können die Temperaturklassen F, H und C (230 °C) überstrichen werden. Der Autor weist auf die er-

heblichen Materialeinsparungen bei Rotoren und Statoren hin, die die Anwendung der teuren Isolierstoffe rechtfertigen. An einem Beispiel schlägt er ein integriertes Isoliersystem der Klasse F vor, das zu einer Kostensenkung um 11 % führt. Es stellt sich die Frage, wie weit diese Gedanken bereits verwirklicht worden sind.

Diskussionsbeiträge der Themengruppe E: «Anwendung neuerer Isolationssysteme bei Maschinen und Apparaten»

W. Zwicknagl, Österreichische Draukraftwerke AG, Klagenfurt (zum Bericht von E. Schuler): Die Angaben einiger Hersteller, dass sie bei der Einführung der Nennspannung von 21 kV die Betriebsfeldstärke von bisher rund 2 kV/mm auf rund 2,5 kV/mm angehoben haben, führt zur Frage nach der erzielbaren Lebensdauer, die auf folgender Grundlage abgeschätzt werden kann:

Fig. 1 zeigt den aus dem Schrifttum bekannten Zusammenhang zwischen der Durchschlagsfeldstärke E_D und der Beanspruchungszeit t. Reziprok zur Zeit kann auch die elektrische Alterungsgeschwindigkeit v_{el} skaliert werden. Diese Alterungsgeschwindigkeit steigt nun bei der genannten Anhebung der Betriebsfeldstärke an, und zwar von 1%/a auf rund 1,6%/a; die Differenz beträgt also 0,6%/a (Lebensdauerverbrauch pro Jahr).

Zu dieser elektrischen Alterung kommt natürlich noch die thermische und einige andere Alterungsarten hinzu. Die gesamte mittlere Alterungsgeschwindigkeit v_{ges} wurde bei Untersuchungen im Rahmen der Kraftwerk-Fehlerstatistik in Österreich aus der mittleren Zeit bis zum ersten Durchschlag von 21 Jahren mit rund 4,8%/a gefunden. Kommt noch obige Differenz von 0,6%/a hinzu, so würde die gesamte Alterungsgeschwindigkeit (additive Zusammensetzung vorausgesetzt) um über 10% ansteigen oder die für einen Betreiber interessante und bewertbare mittlere Zeit bis zum ersten Durchschlag würde auf unter 19 Jahre absinken, sofern nicht nachgewiesen werden kann, dass die Lebensdauerkurve der Isolierungen, die einer Betriebsfeldstärke von 2,5 kV/mm ausgesetzt sind, auch im hohen Zeitbereich um den Faktor 1,25 über den bisher angegebenen Lebensdauerkurven liegt.

Ähnliche Überlegungen wurden bei der Österreichischen Draukraftwerke AG anlässlich des Übergangs von Isolierstoffklasse B auf F für die thermische Beanspruchung angestellt. Sie haben ergeben, dass man bei Lauf-Wasserkraftgeneratoren, bei denen man die Erwärmung ausnutzen könnte, auch unter Berücksichtigung der Betriebsweise die Grenztemperatur – so wie man es auch bei der Isolierstoffklasse B bisher zumeist getan hat – vorerst nicht mit 140 °C voll ausnutzen, sondern erst um etwa 10 °C kleiner wählen soll, um eine ausreichende Lebensdauer erwarten zu können.

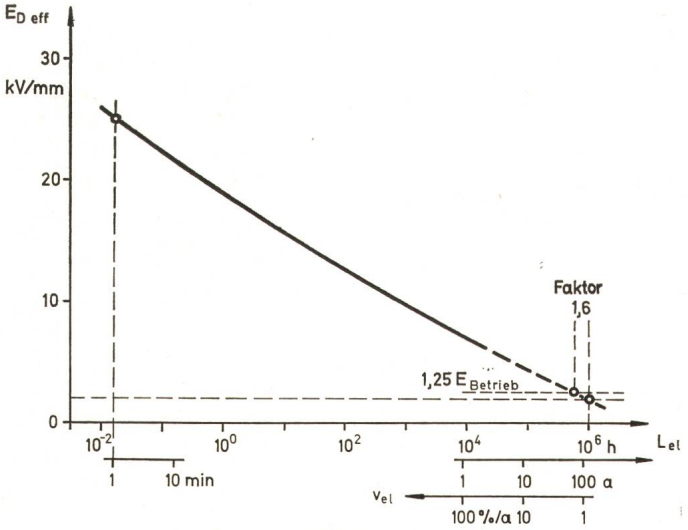


Fig. 1
Durchschlagfestigkeit von Generator-Wicklungsisolierungen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer

Bezüglich der Überwachung der Isolierung möchte ich mich der Meinung anschliessen, dass die zerstörungsfreien Messungen wohl einen Anhalt über den Allgemeinzustand der Wicklung geben können, aber nur Spannungsprüfungen eine hohe Sicherheit für die nachfolgende Betriebsperiode bieten. Einige Elektrizitätsversorgungsunternehmungen in Österreich führen daher periodisch Spannungsprüfungen aus, und zwar des geringeren Geräteaufwandes wegen mit Gleichspannung in der Höhe von $U_{p-} = 1{,}5\,U_n\,1{,}6 = 2{,}4\,U_n$ mit einer Prüfdauer von 10 min an jedem Wicklungsstrang. Es wurden damit sehr gute Erfolge erzielt, d. h. es erfolgen wohl Durchschläge bei den Prüfungen in der jährlichen Revisionszeit, aber die Betriebszeit bleibt auch bei Generatoren, bei denen zuvor im Betrieb wiederholt Isolationsfehler auftraten, nun fehlerfrei.

G. Krasser, Micafil AG, Zürich: Wie in meinem Bericht ausgeführt, stösst man beim Bau von Steuersäulen für sehr hohe Ventilspannungen an die Grenze der Papierbreite und damit der Länge von einteilig herstellbaren Wickelkörpern aus Hartpapier. Um dieses Hindernis zu umgehen, gibt es zunächst den Weg, Hartpapierkörper in Längsrichtung zusammenzusetzen. Die Zusammensetzstellen werden in diesem Fall als sog. Edelfugen ausgeführt, die im Falle hoher elektrischer Beanspruchung bei der Herstellung grosse Präzision verlangen, eine Art handwerklicher Sorgfalt, die heute an vielen Stellen unserer Fabrikationsstätten nicht mehr vorausgesetzt werden kann. Will man die Potentialsteuerung über die Zusammensetzstelle hinaus fortsetzen, d. h. kann man sich mit einer partiellen Aussteuerung von vielleicht 65...70 % der Steuerstrecke nicht begnügen, so lässt sich die Zusammensetzstelle als mögliche Schwachstelle bei dieser Lösung nicht umgehen.

Eine grundsätzlich andere Lösung bietet sich mit der Verwendung von gesteuerter Ölpapierisolation an Stelle von Hartpapier an. Wickel dieser Art können bis zu 5 m Länge einteilig ausgeführt werden und lassen daher auch die Möglichkeit entsprechend langer Steuerstrecken offen. Allein, gesteuerte Ölpapierisolation in ihrer heutigen Ausführung weist einige Nachteile auf, die zwar bei ihrer üblichen Anwendung z. B. in Transformatordurchführungen kaum stören, für Steuersäulen aber umso stärker ins Gewicht fallen. Diese Eigenheiten und ihre Folgen für Steuersäulen seien hier kurz erwähnt.

Ölpapierwickel hoher Qualität müssen von einer festen Hülle (gewöhnlich aus Porzellan) umgeben und gegen ihre Umgebung hermetisch abgedichtet werden. Zwischen Wickel und Porzellan ist ein Ölspalt unvermeidlich, der schon wegen der materialbedingten grossen Porzellantoleranzen eine bestimmte Mindestbreite nicht unterschreiten kann. Für die beträchtliche Ölmenge, die sich aus Füll- und Imprägnieröl zusammensetzt, müssten wegen der thermischen Ausdehnungen eigene Öldehnräume geschaffen werden, und diese wären am Ende der Säule anzuordnen. Dadurch würden die sog. nutzlosen Längen, die den Ventilbauern heute schon unerwünscht sind, da sie die Bauhöhe der Ventile beträchtlich in die Höhe treiben, noch um einiges grösser. – Nicht nur die Länge, auch der Durchmesser der Steuersäulen würde bei gleicher elektrischer Ausnützung um den doppelten Ölspalt plus die doppelte Wandstärke des Porzellans wachsen und dementsprechend grössere und teurere Ringkernwandler verlangen. Ferner lägen die potentialsteuernden Kondensatorbeläge viel tiefer im Innern der Säule als bei der Ausführung in Hartpapier, was die Wirksamkeit der Steuerung zweifellos schwächen würde. Abgesehen von diesen technischen Nachteilen lägen Steuersäulen auf Ölpapierbasis auch

preislich viel ungünstiger. Wohl könnte der Aktivteil als solcher mit tieferen Gestehungskosten hergestellt werden als bei Hartpapier. Doch würde dieser Vorteil durch die hinzukommenden Porzellan- und Metallarmaturen und durch die viel aufwendigere Montage bei weitem in eine massive Verteuerung umschlagen.

Für die Lösung der hier genannten Probleme bieten sich allerdings ganz neue Aussichten, wenn man an die Möglichkeit denkt, Wickelkörper aus Ölpapier nicht mehr mit Porzellan zu umhüllen, sondern mit einer geeigneten Kunstharzmasse direkt zu umgiessen. In den Beiträgen der Gruppen C und E dieses Symposiums, von G. Rossi, wird auf solche Möglichkeiten hingewiesen. Sollte es gelingen, derart neue Techniken auf Steuersäulen rationell anzuwenden, so könnte man in der Tat im mit Polyurethan umgossenen Ölpapierwickel wesentliche Vorteile sowohl der Hartpapier- als auch der Ölpapierausführung miteinander vereinigen, ohne die entsprechenden Nachteile in Kauf nehmen zu müssen. Im Hinblick auf mehrere erfolgreiche Vorstösse in dieser Richtung scheinen mir die Aussichten dafür durchaus realistisch. Ob und wann und für welche Anwendungen freilich derartige Objekte auch fabrikatorisch rationell hergestellt werden können, darüber möchte ich mich jeder Voraussage enthalten.

R. Müller, Nürnberg: In modernen Leistungstransformatoren ist Hartpapier und Weichpapier als Hauptisolation durch Preßspan praktisch vollständig verdrängt worden. Ein Ersatz von Preßspan durch Schichtstoffe auf Kunststoffbasis mit niedrigerer Dielektrizitätskonstante wäre möglich, scheitert jedoch zurzeit noch an der erheblichen Preisdifferenz.

Frage 1: Wie verhalten sich die auf unterschiedliche Weise mechanisch stabilisierten Preßspäne hinsichtlich ihrer Kompressilität bei höheren Drücken bis zu etwa 400 kp/cm²?

Frage 2: Wie ist die Dauerstandfestigkeit von heissgepresstem Preßspan über lange Zeit unter den Betriebsbedingungen von Transformatoren?

K. Lennarz, Weidmann AG, Rapperswil. Wie man dem Bericht von H.-P. Moser entnehmen kann, ist die Herstellung von kompletten Bauelementen aus Transformerboard ein bedeutender Teil der Weidmann Gesamtproduktion. Eine Entwicklung, die sich seit einigen Jahren abzeichnet, ist der Einsatz von Transformerboard in grossen Dicken als Druckringe, Druckplatten, Drucksegmente und ähnliches.

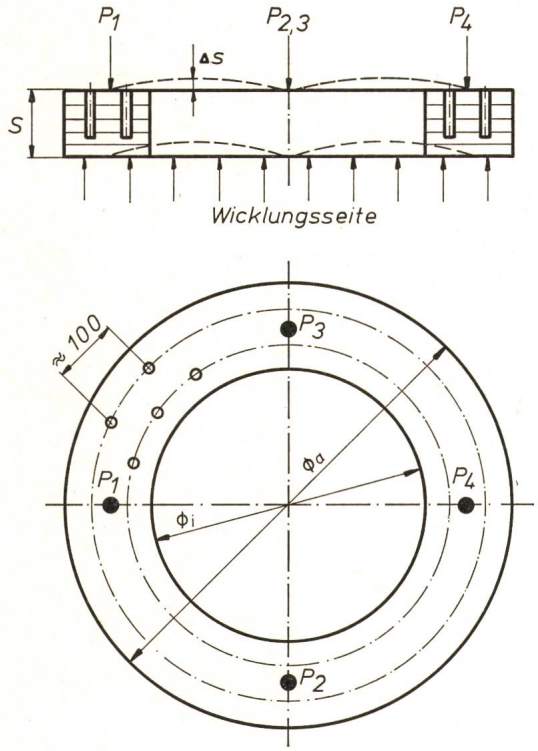


Fig. 1

Mit den schnell steigenden Grenzleistungen und -spannungen werden neben anderen zwei besondere Forderungen an das Isoliermaterial gestellt, welches im Abstützungsbereich grosser Leistungswicklungen liegt:

1. Hohe Druck- und Biegefestigkeit;
2. Vollständige Ölimprägnierbarkeit als Voraussetzung für TE-freies Verhalten unter hohen Feldstärken.

Um diesen Forderungen gerecht zu werden, haben wir zur Herstellung von Druckringen ein Material entwickelt, welches seit ca. 1 Jahr verfügbar ist. Es handelt sich hierbei um ein hartes Transformerboard aus Schichten von je 5 mm aufgebaut, mit einem Feuchtegehalt von $< 3\,\%$ mit der Bezeichnung «Transformerboard TX».

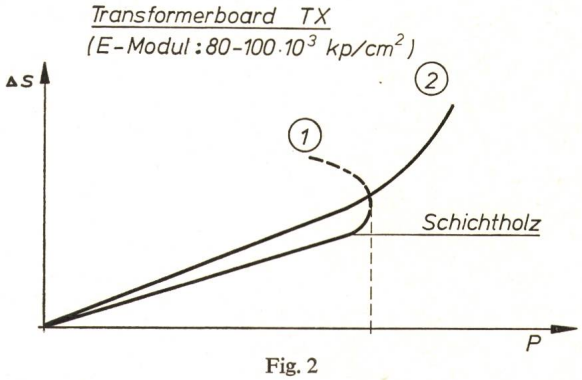


Fig. 2

Auf Grund des niedrigen Feuchtegehaltes ergeben sich keine Trocknungsprobleme unter Berücksichtigung der Konditionen gemäss den Ausführungen im Bericht von H.-P. Moser.

Da die Trocknung und anschliessende Ölimprägnierung ausschliesslich parallel zur Schichtrichtung erfolgen, empfehlen wir bei breitflanschigen Ringen zur Verkürzung von zu langen Trocknungs- und Imprägnierzeiten Bohrungen gemäss Fig. 1. Im allgemeinen können diese Sacklöcher auch als Durchgangslöcher gebohrt werden. Interessant ist das Druckverhalten solcher Ringe aus TX im Vergleich zum konventionellen Schichtholz, harzgebunden (Fig. 2).

Während der Schichtholzring bei seiner Grenzbelastung senkrecht zu den Holzschichten bricht und damit die Festigkeit dieses Elementes auf praktisch 0 zurückgeht (Kurve 1), ist der Transformerboardring aus TX weiter beanspruchbar, wenn auch zu Lasten einer überproportionellen Durchbiegung (Kurve 2). Grund ist eine teilweise Delaminierung der vergautschten Schichten. Die parallel geschalteten Einzelschichten behalten jedoch noch eine beträchtliche Festigkeit.

Was die TE-Freiheit bis zu sehr hohen Feldstärken anbelangt, so ist TX dem harzgebundenen Holz sowie Hartpapier und ähnlichem Material weit überlegen. Die Ölimprägnierung ist vollständig, so dass Prüfungen im homogenen Feld mit Gradienten parallel zur Schichtrichtung immer Überschläge an der Grenzschicht Öl/TX ergeben, ohne vorherige TE-Anzeige.

Gemäss dem E-Modul, gemessen aus dem Biegeversuch von $80\text{–}100 \cdot 10^3$ kp/cm² ergibt sich eine geringe Durchbiegung Δs der Abstützung.

Ein Grossversuch an einer Wicklungsnachbildung gemäss Fig. 1 ergab für einen Ring mit den Dimensionen 1600/800 mm $\phi \times 50$ mm zulässige Druckkräfte bei einseitiger 4-Punkt-Abstützung von $4 \times 15\,\text{t} = 60\,\text{t}$.

Zur Abrundung hierzu möchte ich nicht unerwähnt lassen, dass wir eine grosse Anzahl von solchen Druckringen für eine grosse Serie von Hochleistungs-Kurzschlussprüftransformatoren geliefert haben.

A. Imhof, Zürich (zum Beitrag von E. Rossi): Einen Beitrag zu diesem Thema bietet ein Aufsatz, der einen Vortrag des Unterzeichneten an der ETH aus dem Jahre 1955 wiedergibt: «Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der elektrischen Isolationstechnik» in Scientia Electrica Bd. II, Heft 1, Seiten 37–45. Das Kapitel B «Imprägnierte Papierisolation» beginnt mit dem Satz: «Ein wesentlich anderer, neuartiger Weg wurde durch die Kombination des ölimprägnierten Papiers mit dem Giessharz gefunden. Ein er-

ster Testversuch bestand darin, einen Papierwickelkörper von ziemlich beträchtlicher Schichtdicke zu umgiessen, darnach durch Bohrungen hindurch die Vakuumtrocknung vorzunehmen und Öl unter Vakuum eindringen zu lassen. Der Schnitt zeigt, dass die Harzumhüllung auf dem imprägnierten Papier nicht nur sehr satt aufliegt, sondern dies mit erheblichem radialem Druck tut. Die Trocknung und Imprägnierung vollzieht sich dann auch nicht mit dem gewohnten Zeitdiagramm, sondern langsamer. Das Harz dringt frontseitig etwas in den Papierwickelkörper ein, mit diesem einen dicht zusammenhängenden Gesamtkörper bildend».

Die Imprägnierung fand mit drei verschiedenen Flüssigkeiten statt: Mineralöl – Chlordiphenyl – ein Fluorcarbon. Letzteres hat eine DK von nur 1,8 und einen Verlustfaktor tg δ = 0,0005. Die Durchschläge darin bilden nicht Russ. Die Viskosität ist sehr niedrig und die Benetzbarkeit der flüssigen Phase recht hoch.

Unter Anwendungen zeigt der genannte Aufsatz Kondensatordurchführungen, Stabstromwandler mit extrem kleinem Durchmesser des im Giessharz eingebetteten Ringkerns und isolierte Hochspannungsschienen. Schienenisolierungen dieser Art hatten den Namen «Epolpa-Isolation» (Epoxidharz-Öle). Die weitere Entwicklung unterblieb damals zugunsten einer vollständig trokkenen Schienenisolierung.

R. Walser, AG Brown, Boveri & Cie., Baden: Zum Beitrag von W. Rozner scheint mir folgendes Bedenken erwähnenswert:

W. Rozner beschreibt im Abschnitt Anwendungsbeispiele zwei verschiedene Möglichkeiten, die hochtemperaturbeständigen Isolierstoffsysteme in Zukunft bei den Drehstrom-Norm-Motoren mit Käfigläufer einzusetzen.

a) Erstens geht er von den bisherigen nach Gesichtspunkten der Isolations-Klassen E oder B ausgelegten Motoren aus, die also eine zulässige maximale Temperatur am heissesten Punkt der Statorwicklung von 120 °C respektive 130 °C erreichen dürfen. Für diese Motoren zeigt er verschiedene Möglichkeiten auf, wie erschwerte Betriebsbedingungen durch Einsatz der Isolations-Klasse F bewältigt werden können.

b) Zweitens erläutert W. Rozner die Möglichkeit von Kosteneinsparungen, wenn die Norm-Motoren schon bei der heute zugeordneten genormten Dauerleistung nach den Möglichkeiten der Isolations-Klasse F ausgelegt werden, also dabei im heissesten Punkt der Statorwicklung 155 °C erreichen dürfen und somit in den elektrisch aktiven Teilen kleiner ausfallen.

Meine Bedenken gelten nun folgendem Umstand: Beim meistverbreiteten geschlossenen Käfigmotor mit Rippenkühlung, Schutzart IP 44, bedeutet eine hohe Temperatur der Statorwicklung bei Ausnützung der zulässigen Temperaturen der Isolations-Klassen F, H und C auch hohe Temperaturen der Gehäuseaussenfläche und der Rippen. Dies ist besonders kurz nach Ausschalten des Motors der Fall, wenn die erzwungene Kühlung durch den rotierenden Ventilator ausfällt und die Wärme weiterhin über das Statorblechpaket an die Rippen abfliesst. Hier sind für die Berührung durch menschliche Körperteile unzulässig hohe Temperaturen zu erwarten. Es müssen zusätzlich konstruktive Massnahmen getroffen werden, um Verbrennungen zu verhindern, z. B. eine die Rippen umhüllende Aussenhaut, was jedenfalls wieder eine Kostensteigerung zur Folge hat und zudem in diesem Fall die Sauberhaltung der Rippen erschwert.

Ich bin nun durchaus der Meinung, dass die hier zuerst beschriebene Lösung – mit thermischer Ausnützung E oder B bei Norm-Leistung – richtig und ratsam ist, indem bei den relativ wenigen Fällen der höheren Ausnützung der Benützer über diese höhere Rippentemperatur vorweg informiert werden kann, oder der Einsatzort des Motors die Berührung ausschliesst.

Ich möchte aber in Frage stellen, ob sich nicht im zweiten Fall, wo schon jeder Norm-Motor mit Temperaturwerten der Isolations-Klasse F arbeitet, dieses natürliche Hindernis der Einführung entscheidend entgegenstellen wird, weil jedem Konstrukteur von vorneweg die bisherige billige konstruktive Gestaltung des Gehäuses verwehrt wird. Dies inbesondere auch darum, weil dann die Tendenz besteht, die erschwerten Betriebsbedingungen mit Einsatz der Isolations-Klasse H oder gar C zu lösen.

Es ist meine Meinung, dass dieses Problem bis zu der von der CEI in den späten 70er Jahren ins Auge gefassten Leistungszuordnung zu Norm-Motoren sehr sorgfältig abgeklärt werden muss.

K. Roewer, Egerpohl (zum Beitrag von W. Rozner): Nach den Empfehlungen der CEE-Publikation 10 und der CEI-Publikation 335-1 können ohne besonderen Nachweis nur Isolationssysteme der Klassen A (bei CEE auch E) nach CEI-Publikation 85 verwendet werden. Für andere Isolationssysteme (z. B. der Klassen B, F, H, C) ist ein Nachweis durch eine Prüfung erforderlich.

Insbesondere verlangen die nordamerikanischen Vorschriften der CSA und UL einen solchen Nachweis, der meist an Wicklungsmodellen («Motoretten») bei 4 Temperaturstufen gegenüber einem bekannten Kontroll-Isolationssystem (meist der Klasse A) durchzuführen ist.

Es erhebt sich die Frage, ob für die im Beitrag erwähnten Isolationssysteme solche Nachweise für die Zulässigkeit der in Anspruch genommenen Wicklungstemperaturen durchgeführt worden sind, bei welchen Prüftemperaturen und nach welchem Verfahren. Es geht dabei nicht um die Prüfung der einzelnen Komponenten wie Flächenisolierstoffe, Leiterisolierung und Tränkmittel, sondern um die vollständigen aus der Fertigung des Anwenders kommenden Systeme.

R. Schuler, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (zu Fragen von H. Kappeler): Es wurde vom Diskussionsleiter die Frage gestellt, ob das Glimmerpapier bei der Isolierung von rotierenden Maschinen ganz die früher ausschliesslich verwendeten Glimmersplittings verdrängen konnte. Für meine Firma lautet die Antwort: Wir haben diese Frage bereits vor vielen Jahren – nach ausgedehnten Vergleichsversuchen – eindeutig mit Ja beantwortet. Seit dieser Entscheidung wurden die Statorwicklungen von allen Hochspannungsmaschinen bis zu den höchsten Nennspannungen von 28 kV ausschliesslich mit dem Feinglimmer isoliert. Heute liegen über 15jährige Betriebserfahrungen auf breitester Basis mit so aufgebauten Isolierungen vor, die eindeutig bezeugen, dass diese Umstellung richtig war. Allerdings musste mit der Umstellung auf Glimmerpapiere auch das gesamte Fertigungsverfahren umgestellt und den besonderen Eigenschaften des neuen Materials angepasst werden. Nur dann können die sich bietenden Vor-

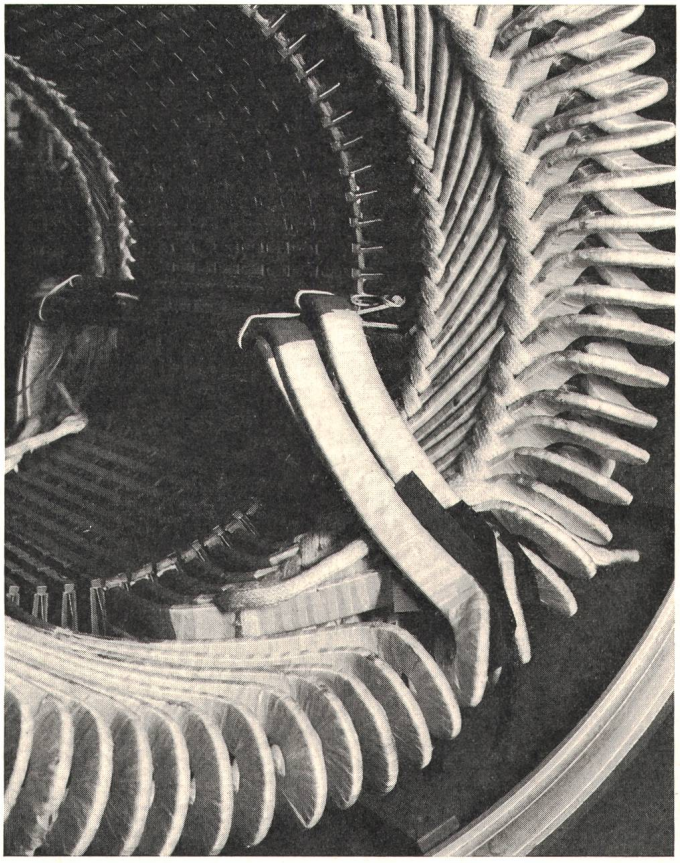


Fig. 1
Einbau von isolierten, aber noch nicht imprägnierten Spulen in das Eisenpaket

teile eines sehr homogenen, praktisch hohlraumfreien Isolationsaufbaues voll genutzt werden.

Die Frage nach dem zweckmässigsten Imprägnierverfahren – es stehen hier vor allem das Verfahren, bei dem ein aus Bändern aufgewickelter Isolierwickel unter Vakuum mit einem Kunstharz imprägniert wird, dem Verfahren wo das Imprägnierharz bereits in den aufzuwickelnden Bändern enthalten ist, gegenüber – muss heute wohl recht eindeutig zu Gunsten des Vakuumverfahrens beantwortet werden. Die Entwicklung bei den Grossgeneratoren verläuft bekanntlich zu immer grösseren Leistungen, was zwangsläufig auch zu höheren Maschinennennspannungen zwischen 20...30 kV führte. Dazu ist aber ein sehr homogener Isolationsaufbau von besonderer Wichtigkeit, der unserer Auffassung nach nur durch ein sehr sorgfältiges Imprägnierverfahren unter Vakuum mit einer anschliessenden Überdruckperiode erhalten werden kann.

Das Vakuumimprägnierverfahren bietet aber noch weitere Vorteile, wenn man das gesamte Wicklungssystem betrachtet. Wird nämlich nicht nur die Isolierung um die Leiter, sondern gleichzeitig auch die gesamte Wickelkopfabstützung mitimprägniert (System Micadur-Compact), so erhält man auf diese Weise eine spielfreie Wickelkopfabstützung, was die Betriebssicherheit des gesamten Wicklungssystems ausserordentlich erhöht, wie dies mit den bisherigen Verfahren nicht möglich war. Gestatten Sie mir, dies anhand der Fig. 1...3 zu erläutern.

Die Messung der dielektrischen Verluste betrachten wir auch weiterhin als wertvoll. Sie kann jedoch keinesfalls alleiniger Maßstab sein zur Beurteilung der Betriebstüchtigkeit einer Isolation.

Bei der Entwicklung und Erprobung eines Isoliersystems können nach unserer Erfahrung nur Langzeitversuche – zunächst an einfachen Modellanordnungen, im weiteren an ganzen Isoliersystemen bei möglichst maßstabgetreuen Statormodellen wie sie z. B. in meinem Beitrag sind – Aufschluss geben über das tatsächliche Betriebsverhalten. Hier wird die Verlustfaktormessung, neben anderen Kontrollen, wertvolle Informationen liefern über mögliche Veränderungen in der Isolierung.

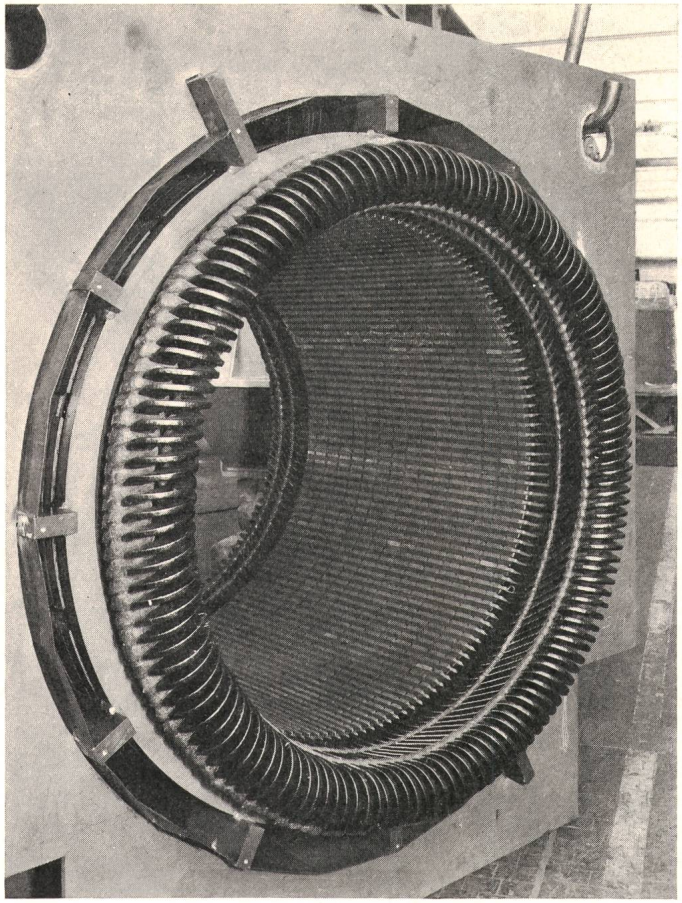


Fig. 3
Im Ganztränkeverfahren Micadur-Compact hergestellte Statorwicklung, mit speziell angepasster Wickelkopfabstützung

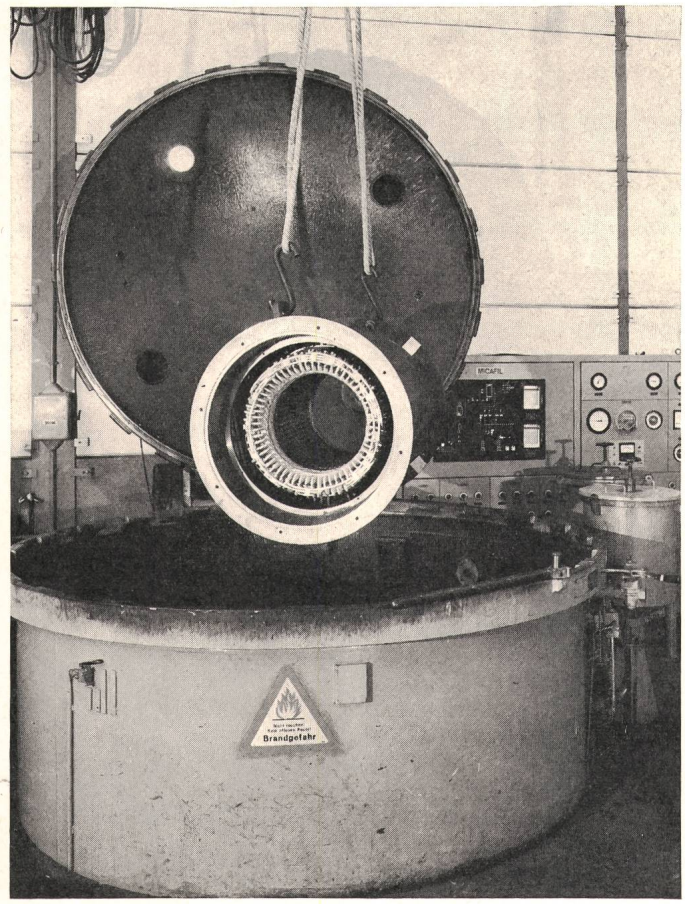


Fig. 2
Einfahren des gewickelten Ständers in das Imprägniergefäss

Eine weitere wohl in diesem Zusammenhang noch bekanntere Anwendung ist die im Zusammenhang mit der Fertigungskontrolle von Wicklungselementen. Dabei handelt es sich darum, die Gleichmässigkeit der Herstellung einzelner Stäbe oder Spulen zu überprüfen. Dazu wird der Verlustfaktor bis mindestens zur Nennspannung bestimmt und in erster Linie die Verlustfaktorzunahme als Mass für die Hohlraumfreiheit bewertet. Bezüglich der Anstiegswerte sind heute in verschiedenen nationalen Vorschriften Grenzwerte festgelegt. Dabei ist in letzter Zeit die nach dem heutigen Erfahrungsstand nicht ohne weiteres verständliche Tendenz zu erkennen, dass immer noch kleinere Anstiegswerte gefordert werden. Nicht verständlich scheint mir dies deswegen, weil einerseits zur Genüge bewiesen wurde, dass der heutige Stand der Isoliertechnik ausserordentlich betriebssichere Isolierungen garantiert, und zudem, wie schon erwähnt, auf Grund der Verlustfaktormessung allein nicht auf die Lebensdauer geschlossen werden kann; ferner mögen durch solche überscharfen Forderungen neue Entwicklungen stark gehemmt werden. Es bleibt daher zu hoffen, dass im Rahmen der angelaufenen Arbeiten in den entsprechenden CEI- und CIGRE-Arbeitsgruppen zu diesem Thema auch diese Gesichtspunkte genügend berücksichtigt werden.

Ich danke W. Zwicknagel für seine sehr interessanten Bemerkungen. Tatsächlich ist mit der Erhöhung der Betriebsfeldstärke eine entsprechende Abnahme der Lebensdauer einer Isolierung zu erwarten, das gleiche gilt auch bezüglich einer höheren thermischen Ausnutzung gemäss Klasse F. Anderseits ist zu beachten, dass das Micadur-System sehr hochwertige Eigenschaften hat und von Anbeginn an für eine höhere Ausnutzung konzipiert und im Labor geprüft wurde. Die seither gewonnenen langjährigen guten Erfahrungen an zahlreichen in Betrieb stehenden Maschinen beweisen, dass auch unter den genannten Bedingungen eine völlig ausreichend lange Lebensdauer garantiert werden kann. Die in Österreich gemachten günstigen Erfahrungen mit Spannungsprüfungen anlässlich von Wicklungsrevisionen können wir nur bestätigen. Allerdings empfehlen wir nach Möglichkeit die

Verwendung von betriebsfrequenter Wechselspannung; bei der gelegentlichen Verwendung von Gleichspannung verwenden wir einen um den Faktor 1,7 höheren Spannungswert.

R. Sauvin, Micafil AG, Zürich (zu den Fragen von H. Kappeler): Die Durchschlagsfestigkeiten wurden an flexiblen imprägnierten und auspolymerisierten Folien ermittelt und wurden jeweils an einer Lage gemessen, was bekanntlich tiefere Werte ergibt, als bei mehreren aufeinanderliegenden Schichten. Ein Harzgehalt von 30...35% bildet ein Optimum. Kleinere und höhere Werte können selbstverständlich gewählt werden, zum Beispiel aus Preisgründen oder wenn eine hohe Beständigkeit gegen Feuchtigkeit verlangt wird. Bei ausgehärteten steifen Isolationen sollten dagegen höhere Harzmengen vermieden werden, da Harzansammlungen leicht zu Rissen führen können, infolge der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Harz, Glimmer und Glas innerhalb der Isolation.

Die Durchschlagsfestigkeit der Proben wurden an imprägnierten härtbaren Folien ermittelt, und zwar an warm gepressten Platten aus je drei Lagen mit je einer Dicke von ca. 0,4 mm. Eindeutig ist die nachteilige Wirkung der eingeschlossenen Luft. Die gewählte Anordnung bietet ideale Verhältnisse und ich muss gestehen, dass die gemessene Durchschlagsfestigkeit von 84 kV/mm kaum an in der Praxis isolierten Leitern oder Spulen erreicht werden kann.

G. Rossi, Micafil AG, Zürich (zu den Fragen des Diskussionsleiters, H. Kappeler): Angaben über die Technologie des Umgiessens von Wickelkörpern mit einer Harzmasse könnten gemacht werden, allerdings nicht in der kurzen, hiefür verfügbaren Zeit. Interessenten in dieser Sache werden gebeten, sich an mich zu wenden.

Zur Entladungsfreiheit harzumgossener, ölimprägnierter Wickel: Ein von uns entwickeltes Verfahren erlaubt, bereits mit flüssigen Imprägnierstoffen (z. B. Öl) imprägnierte Wickel mit einer dafür formulierten Polyurethanmasse direkt und vollständig zu umgiessen. Der Umguss erfolgt unter Öl, wobei letzteres im Bereich der Umgusshülle durch das Harz verdrängt wird. Während des Umgiessens kommt der Wickel mit Luft überhaupt nicht in Berührung, wodurch die Entladungsfreiheit der Objekte gewährleistet wird.

Zur Freiluftbeständigkeit der Giessharzmäntel kann ich auf mein Diskussionsvotum zum Beitrag von G. Rossi in der Themengruppe C verweisen: 2 derartige Objekte wurden in einem Langzeitversuch 5 Jahre lang in Freiluft aufgestellt und haben sehr gute Resultate ergeben.

H. P. Moser, H. Weidmann AG, Rapperswil: Die Fragen von H. Kappeler möchte ich wie folgt beantworten:

a) Betreffend der Trocknung mit Kerosindampf möchte ich betonen, dass nur bei richtigem Vorgehen Schäden an der Isolation vermieden werden. Folgende zwei Punkte sind zu beachten:

a) Solange grössere Mengen Wasser anfallen, empfehlen wir, die Temperatur nicht über 100 °C zu steigern.

b) Wie die langjährigen Erfahrungen in den USA und Kanada zeigen, sollte die Endtemperatur 120 °C nicht wesentlich übersteigen.

b) Die im Bericht erwähnten geräuschvollen Oberflächenentladungen sind nicht völlig ungefährlich, wie die Werte in Abb.7 meines Berichtes zeigen. Sie erweisen sich jedoch wesentlich harmloser als die punktförmigen Erosionsentladungen mit wesentlich geringerer Intensitätsanzeige auf den diversen Messinstrumenten. Allerdings können die Oberflächenentladungen, ähnlich wie die Erosionsentladungen, zu Sekundär-Überschlägen führen, wenn sich das entwickelte Gas an einem anderen Ort sammelt und eine u. U. gefährliche Gasblase bildet.

c) Bezüglich des Ersatzes der Weichpapierisolation durch Winkelringe und Zylinder aus Transformerboard lässt sich ein weltweiter, man darf ruhig sagen, fast abgeschlossener Trend zum Transformerboard feststellen. Die gegenüber Papier geringfügig höhere Dielektrizitätskonstante von Transformerboard (die Werte für Zylinder liegen bei 4, diejenigen für Winkelringe und geformte Teile bei nur 3,5) wird durch die Verwendung dünnwandiger und trotzdem formstabiler Zylinder und Formteile mehr als kompensiert.

Das Problem der Distanzierung bleibt gegenüber Papier gleich. Die Lösung besteht in der Verwendung von Wellboard. Wo dies der Kurzschlusskräfte wegen nicht möglich ist, sind sorgfältig gefräste und gerundete Leisten zu verwenden.

d) Selbstverständlich untersuchen wir als Kunststoff verarbeitende Firma immer wieder, ob die Verwendung von Kunststoffen Vorteile bringt. Leider waren die bisherigen Ergebnisse entmutigend. Die Schwierigkeiten, die Zellulose zu ersetzen, bestehen darin, dass es schwierig ist, einen Kunststoff zu entwickeln, der bei über 100 °C formbeständig und druckfest und nicht wesentlich teurer als das relativ preisgünstige Transformerboard ist. Zudem bestanden bisher, d. h. bis zur Nennspannung 1,5 MV keine unüberwindlichen Schwierigkeiten, den durch die Kurzschlussspannung gegebenen Hauptstreuspalt mit genügender Sicherheit zu isolieren.

Zusammenfassungen der Beiträge der Themengruppe F: «Prüfverfahren von Isolierstoffen und Isolationssystemen»

Teilentladungsmessungen an Hochspannungsapparaten mit der Brückenschaltung

Von *Th. Praehauser*

Der Aufbau des Teilentladungs-Messkreises als Brückenschaltung geschah ursprünglich mit der Absicht, den Einfluss äusserer Störungen auf die eigentliche Teilentladungsmessung am Prüfobjekt abzuschwächen, wenn möglich auszuschalten. Die Brückenschaltung ist aber ausserdem ein Hilfsmittel zur Lokalisierung von Teilentladungen, indem man neben den Impulsgrössen auch die Impulsrichtungen der Teilentladungen in den Brückenzweigen bestimmt.

Adresse des Autors:
Dr. *Thomas Praehauser*, Abteilungsleiter für Prüffeld und für Kondensatoren, E. Haefely + Cie. AG, 4028 Basel.

Teilentladungsmessung an kunststoffisolierten Hochspannungskabeln

Von *A. Smajler*

Bei der Beurteilung von Kunststoff-Hochspannungskabeln kommt der Teilentladungsmessung ausserordentliche Bedeutung zu, da sie die Möglichkeit bietet, lokale Fehlerstellen im Dielektrikum nachzuweisen. Das Prinzip dieser Messmethode wird beschrieben, und die bei Kabeln zur Anwendung gelangenden Verfahren werden einander gegenübergestellt. Die Isolation von Polyäthylenadern wurde zu Versuchszwecken absichtlich mit zahlreichen Fehlern versehen. Der weitaus überwiegende Teil der Fehlerarten erwies sich als glimmfähig und konnte mittels Teilentladungsmessung im Durchlaufverfahren einwandfrei nachgewiesen werden. Die schädigende Wirkung von Teilentladungen ist zwar allgemein bekannt, doch sind die Zusammenhänge zwischen Teilentladungscharakteristik und Lebensdauer noch nicht restlos erforscht. Erkennbare Tendenzen werden aufgezeigt und Folgerungen für die Qualitätskontrolle abgeleitet.

Adresse des Autors:
A. Smajler, Entwicklungsabteilung der Dätwyler AG, 6460 Altdorf (UR).

Beitrag zur Frage der Ionisationsprüfung an Leistungstransformatoren und Messwandlern zur Bewertung des Isolationssystems Papier-Preßspan/Öl

Von *E. Sarbach*

Es zeigt sich immer mehr, dass die Teilentladungsmessung an Leistungstransformatoren und Messwandlern eine wertvolle Hilfe bieten kann, wenn das Isolationssystem beurteilt werden soll. Wie sind die Messergebnisse zu interpretieren, wenn die gemessene Störgrösse weder sehr klein noch sehr gross ist? Diese Frage ist nicht eindeutig zu beantworten, aber es ist zu hoffen, dass sie um so eher erhellt wird, je mehr allgemein zugängliche Erfahrung vorliegt. Die im Bericht beschriebenen Beispiele sind als diesbezügliche Anregung zu verstehen.

Nach einigen kurzen Hinweisen zur Frage der Teilentladungsmessung werden Störspannungsmessungen an einem 500-kV-Leistungstransformator und an 2 Stromwandlern für 300 kV beschrieben. Der Schadenbefund wird anhand von Bildern kommentiert. Die Interpretation der Ergebnisse am Leistungstransformator bestätigt die vielerorts gemachte Feststellung, dass es vorteilhafter wäre, die Höhe der induzierten Prüfspannung zu reduzieren (z. B. auf das 1,5fache der höchsten Betriebsspannung), aber dafür die Prüfdauer ganz wesentlich zu verlängern (bis etwa eine Stunde) und den Nachweis der Teilentladungsfreiheit zu fordern.

Adresse des Autors:
E. Sarbach, AG Brown, Boveri & Cie., Werk Oerlikon, 8000 Zürich.

Zusammenfassung des Diskussionsleiters, W. Zaengl, zur Themengruppe F: «Prüfverfahren von Isolierstoffen und Isolationssystemen»

Von *W. Zaengl*

Alle für diese Themengruppe bis Redaktionsschluss eingereichten drei Beiträge befassen sich mit dem wichtigen Gebiet der Teilentladungsmessung. Da im zweiten Abschnitt des Beitrages der Themengruppe C von E. Buchmann einige im Zusammenhang mit der Dauerprüfung eines Hochspannungskabels stehende Untersuchungen beschrieben sind, wird auch dieser Teil hier behandelt.

Teil I: Teilentladungsmessungen und ihre Anwendung auf Kabel und Transformatoren

In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden mehrere Messmethoden und entsprechende Geräte zur Erfassung von Teilentladungen entwickelt, die allgemein bekannt sind. Das übergeordnete Ziel dieser Entwicklungen war die Erfassung einer Kenngrösse der vielfältigen Teilentladungsarten, welche möglichst gesicherte Rückschlüsse auf die Dauerfestigkeit der Isoliermaterialien bzw. auf die Lebensdauer von Hochspannungsapparaten zulässt.

Mehrere grundlegende wissenschaftliche Arbeiten haben gezeigt, dass ein eindeutiger und einfacher Zusammenhang zwischen der einzelnen TE-Messgrösse und der elektrischen Dauerfestigkeit nicht existiert. Trotz dieses Mangels lassen sich aber sehr wertvolle Rückschlüsse auf gefährliche Fehlerstellen im Isolationssystem eines Gerätes ziehen, nicht zuletzt auf Grund langjähriger Betriebserfahrungen. So vermischen sich heute noch grössere Unsicherheiten mit teilweise recht gesicherten Aussagen über diese Messmethoden, und jede neue Untersuchung trägt dazu bei, diese Unsicherheiten zu verkleinern.

Beitrag von Th. Praehauser: Die TE-Messung ist eine zerstörungsfreie Prüfung und daher gefahrlos anwendbar. Teilentladungen können aber sowohl in den zu prüfenden Objekten als auch unerwünschterweise im sonstigen Prüfkreis auftreten. Die Lokalisierung der TE gehört daher zum schwierigsten Problem dieser Messmethode; sie erfordert manchmal sehr viel Zeit und kann erfolglos sein, wenn es nicht gelingt, den äusseren Störpegel zu unterdrücken. Im Beitrag wird u. a. eine neuartige, bei Brückenschaltungen anwendbare «Impulsrichtungsmethode» erläutert, die eine sehr wertvolle Ergänzung zu den bekannten Diagnoseverfahren dar-

stellt. Voraussetzung für deren Anwendung ist ein TE-Messgerät, dessen oszillographisch zu beobachtender Anzeigeimpuls einen eindeutigen Zusammenhang mit der TE-Impuls-Polarität besitzt.

Frage 1: Diese Impulsrichtungsmethode erfordert eine wechselweise Umschaltung des TE-Messgerätes auf die beiden Ankopplungsvierpole, wodurch der eventuell vorhandene hohe Störpegel der äusseren Störungen voll in Erscheinung tritt, den man ja gerade mit der Brückenschaltung unterdrücken will. Dieser Nachteil kann durch die Verwendung einer «Lupe» (verzögerte Zeitachse) des Oszillographen, wie im Beitrag von Th. Praehauser beschrieben, vermieden werden, vorausgesetzt, dass die zeitliche Lage des zu messenden TE-Impulses in bezug auf den Nulldurchschlag der Prüfwechselspannung angenähert konstant bleibt. Ist diese Voraussetzung im allgemeinen erfüllt?

Die Problematik der Aussagefähigkeit einer TE-Messung bezüglich der zu erwartenden Lebensdauer von Isolationssystemen wird in den Beiträgen von A. Smajler und E. Sarbach behandelt.

Beitrag von A. Smajler: Bei kunststoffisolierten, insbesondere PE-isolierten Hochspannungskabeln wird heute die TE-Messung als wichtige, ja unumgängliche Voraussetzung für den Qualitätsnachweis der Fertigung betrachtet. Der einfache Isolationsaufbau einerseits und die eindeutigen Ausbreitungserscheinungen von Stromimpulsen bei Kabeln andererseits sind die Ursachen dafür, dass die Messgrössen einen recht einfachen Zusammenhang mit der Originalgrösse des TE-Vorganges an der Fehlerstelle besitzen. So bleibt als Unsicherheit nur die Relation zwischen der Messgrösse, üblicherweise der scheinbaren Ladung der TE-Impulse, und der Lebensdauer, wofür aber recht befriedigende Abhängigkeiten gefunden wurden. Der Verfasser dieses Beitrages berichtet sehr erschöpfend über die bekannten Messmethoden und über erste Teilergebnisse von Versuchen an absichtlich fehlerbehaftet hergestellten PE-Kabeln, welche schon wertvolle Zusammenhänge zwischen der Fehlerart und dem gemessenen TE-Wert erkennen lassen.

Frage 2: Sind noch weitere Messergebnisse oder Erfahrungen an in Betrieb befindlichen Kunststoffkabeln vorhanden, welche auf den zulässigen TE-Pegel schliessen lassen?

Zu den grossen Vorteilen der TE-Messung beim Durchlaufverfahren gehört die eindeutige Fehlerortung; sie setzt aber noch unabgeschirmte Kabel voraus, also eine Prüfung am Halbfabrikat. Eine Messung an der ganzen Fabrikations- bzw. Lieferlänge ist jedoch ebenfalls notwendig; sie ist sogar unumgänglich, wenn die Kabel einschliesslich dem halbleitenden Schirm in einem Arbeitsgang gefertigt werden, einer Technik, die bei einem Übergang auf Kabel-Betriebsspannungen von mehr als 100...150 kV unbedingt notwendig sind, wie die Erfahrungen aus dem Ausland beweisen.

Frage 3: Liegen positive Erfahrungen für eine befriedigende TE-Ortung auch an abgeschirmten Kabeln vor?

Beitrag von E. Sarbach: Obwohl die TE-Messungen an Leistungstransformatoren und Messwandlern bereits vielfach im Rahmen von Abnahmeprüfungen vorgenommen werden, ist es bei diesen Objekten wohl am schwierigsten, einen die Gefährlichkeit der Störstelle eindeutig charakterisierenden, zulässigen TE-Pegel anzugeben, da durch den komplizierten Wicklungsaufbau die aussen am Objekt messbare Grösse sehr stark vom wirklichen TE-Vorgang an der Fehlerstelle abweicht. So bleibt beim Transformator oder Wandler, im Gegensatz zum Kabel, eine wesentlich grössere Unsicherheit bezüglich der zulässigen TE-Pegel, die in diesem Beitrag durch die Störspannungen in µV (selektive Messung mit Störspannungsmessgerät) angegeben werden.

Sicher ist es dringend notwendig, die Ursachen dieser Unsicherheiten genauer zu untersuchen. Vielleicht ist der hier meist noch gemessene Pegel der «Störspannungen» wegen der bekannten Bewertung der Teilentladungen nach CISPR wenig dazu geeignet, die zerstörende Wirkung der TE-Impulse in einen direkten Zusammenhang mit dieser Kenngrösse zu bringen, und sehr richtig weist der Verfasser darauf hin, dass man noch weitere Informationen (TE-Impulse pro Zeiteinheit, Amplitude und Form der Impulse usw.) wird heranziehen müssen, um bessere Ergebnisse zu erhalten.

Frage 4: Liegen weitere Untersuchungen oder Erfahrungen vor, welche einen Zusammenhang zwischen der wirklichen Schädlichkeit von Teilentladungen im Transformator oder Wandler und den gemessenen TE-Kennwerten erkennen lassen?

Teil II: Dauerversuche an Hochspannungskabeln

Die in den einschlägigen Vorschriften festgelegten Prüfbedingungen an neuen und frisch verlegten Kabeln garantieren in der Regel deren Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb, wie die Erfahrungen bei den seit vielen Jahren verwendeten Kabeltypen beweisen. Werden neue Kabeltypen entwickelt, so fehlen jedoch dem Hersteller diese Betriebserfahrungen, und da der Zusammenhang zwischen dem Dauerbetriebsverhalten und den kurzzeitigen Abnahmeprüfungen teilweise recht unsicher ist, kann nur ein Dauerversuch unter erschwerten Betriebsbedingungen den wirklichen Nachweis für die Betriebstüchtigkeit erbringen.

Beitrag in der Themengruppe C von E. Buchmann: Hier wird von den ersten Versuchsergebnissen eines derartigen Langzeitversuches an einem 220-kV-Gasaussendruckkabel berichtet. Eine ca. 100 m lange, dreiphasige Kabelstrecke mit Verbindungsmuffe und Endverschlüssen wurde in einem U-förmigen Stahlrohr so verlegt, dass möglichst alle Betriebsbeanspruchungen auftreten. Insbesondere werden auch Lastwechselzyklen durchgeführt, welche allein über die thermische Stabilität des Kabels Auskunft geben können.

Folgende Grössen werden teilweise registrierend gemessen: Betriebsspannung, Kapazität und Verlustwinkel, Temperaturen an verschiedenen Stellen der Kabeloberfläche, mittlere Leitertemperatur, Temperaturen der Muffenoberfläche, des Stahlrohres, des neutralen Bodens und der Umgebungsluft, die Drücke im Stahlrohr und in den Endverschlüssen sowie die Verdrängung der Isoliermasse. Die dazu notwendigen Messapparaturen stellen keine besonderen Probleme.

Sicherlich sind hier nicht alle Messungen angeführt, die am Kabel selbst bereits labormässig durchgeführt wurden, insbesondere also die Wechsel-, Stoßspannungs- und eventuell auch TE-Messungen.

Frage 1: Welchen Prüfungen wurde das Kabel vor dem Dauertest unterworfen, wie waren die Ergebnisse, und ist beabsichtigt, diese Prüfungen nach dem Dauerversuch zu wiederholen?

Frage 2: Kann nach den Erfahrungen des Herstellers auch eine TE-Messung Auskunft über das Betriebsverhalten dieses Kabeltyps geben? Warum werden insbesondere keine

TE-Messungen beim Langzeitversuch und während der Temperaturzyklen gemacht, wo diese doch möglicherweise einen Hinweis für die Bildung von Hohlräumen bringen könnten?

Mit Recht weist übrigens der Verfasser auf die grossen Kabelprüfanlagen im Ausland hin; wie schnell wertvolle Erkenntnisse aus derartigen Anlagen gewonnen werden können, beweisen die erst kürzlich veröffentlichten Ergebnisse an 138-kV-Kunststoff-Kabelsystemen, die in der Versuchsanlage von Waltz Mill geprüft wurden (IEEE-Transactions, PAS-91, July/August 1972).

Diskussionsbeiträge der Themengruppe F: «Prüfverfahren von Isolierstoffen und Isolationssystemen»

B. Schmid, S.A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare (zu den Berichten von Th. Praehauser und A. Smajler): Die Messung im Durchlaufverfahren ist für die Entwicklung äusserst nützlich, leider kann sie nicht am fertigen Kabel vorgenommen werden und ist zudem sehr zeitraubend. Die Messung der TE an fertigen Kabeln gibt eine wirklichkeitsnähere Kontrolle des Endproduktes. Deshalb werden seit ungefähr drei Jahren bei uns alle fertigen PE-Hochspannungskabel auf TE

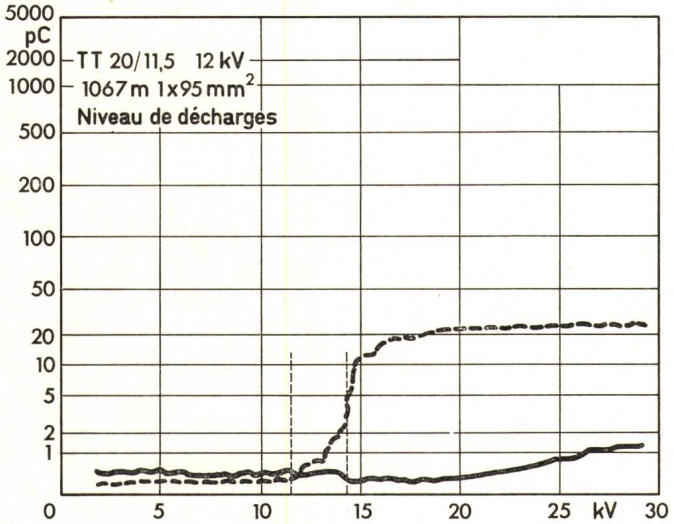


Fig. 1

untersucht. Seit eineinhalb Jahren werden die Kurven der TE-Pegel in Abhängigkeit der Spannung automatisch aufgezeichnet und stehen zu späteren Vergleichen und Untersuchungen zur Verfügung. Diese Aufzeichnung wird vor und unmittelbar nach der Spannungsprüfung vorgenommen. In der Tat kann die Löschspannung der TE vor und nach der Spannungsprüfung verschieden sein, was interessante Rückschlüsse auf Art und Gefährlichkeit eventueller Inhomogenitäten zulässt. Wir werden versuchen, mittels statistischer Methoden eventuell vorhandene Korrelationen zwischen Kurvenform und Lebensdauer zu ermitteln.

Die Form der Kurve ist in der Tat bedeutend aufschlussreicher als der TE-Pegel allein bei einer gewissen Spannung. Fig. 1 zeigt als Beispiel die TE-Kurve eines 1 km langen gesunden Kabels. Die punktierte Linie zeigt die TE-Kurve des gleichen Kabels nach Entfernen der äusseren Halbleiterschicht auf 1 cm². Das Vorhandensein dieses kleinen Fehlers ist somit klar ersichtlich.

Was den zulässigen TE-Pegel betrifft, sieht das CEI-Projekt des Jahres 1971 40 pC bei 1,25 U_0 vor. Die Arbeitsgruppe der CEI (in der ich Mitglied bin), hat 1972 vorgeschlagen, dieses Niveau auf 20 pC festzulegen. Bei uns gilt seit Einführung der TE-Messung ein Niveau von 10 pC, wobei noch zusätzlich die Kurvenform als Kriterium verwendet wird. Die in den USA-Normen vorgeschriebenen 5 pC sind für schmalbandige Messmethoden vorgesehen und können nicht direkt mit den CEI-Werten verglichen werden. Wir denken, dass in Zukunft auch die Kurvenform als Kriterium in den Regeln Eingang finden wird.

Die TE-Messung an fertigen Kabeln erlaubt bis heute noch keine eindeutige Fehlerortbestimmung. Da solche Fehler jedoch selten auftreten, geht es meist schneller, das Kabel in Stücke zu schneiden, um die fehlerhafte Partie zu eliminieren.

M. Schmid, S.A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare (zum Bericht von A. Smajler): Entsprechend unseren Erfahrungen mit PE-Kabeln ist es nicht möglich, einem bestimmten TE-Pegel eine von der Feldstärke gesetzmässig abhängige Lebensdauer zuzuordnen. An einer grösseren Anzahl von PE-Kabeln, welche verschiedene TE-Pegel aufweisen, wurden bei uns Lebensdauerprüfungen durchgeführt. Auf der dem Rapport entnommenen graphischen Darstellung haben wir einige der von uns gemessenen Werte eingetragen (Fig. 1). Es lässt sich daraus deutlich erkennen, dass hier keine direkte Abhängigkeit zwischen Feldstärke und Lebensdauer mit TE-Pegel als Parameter besteht. Bis jetzt ist es uns nur gelungen, für einen bestimmten Typ von Inhomogenität einen gewissen Zusammenhang zu finden, nämlich für Hohlräume ohne zusätzliche Fremdeinschlüsse. Dieser Typ von Inhomogenität wurde durch geeignete Fabrikationsmethoden allerdings so vermindert, dass heute meist andere Arten überwiegen.

Man muss bei der Interpretation von TE-Messungen folgende Gesichtspunkte nicht ausser acht lassen:

a) Je nach Art des Fremdeinschlusses (Luft, Metall, oxyd. PE usw.) ergibt sich im Laufe der Zeit ein völlig anderer Anstieg des TE-Pegels, das heisst die Zerstörung der Isolation schreitet mehr oder weniger

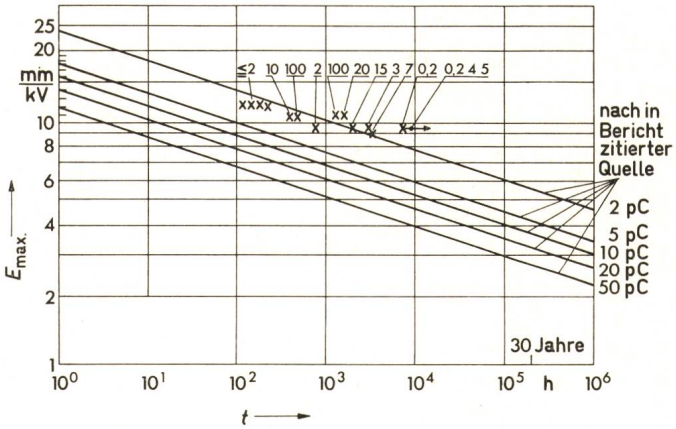


Fig. 1
Lebensdauer in Abhängigkeit von Feldstärke und TE-Pegel

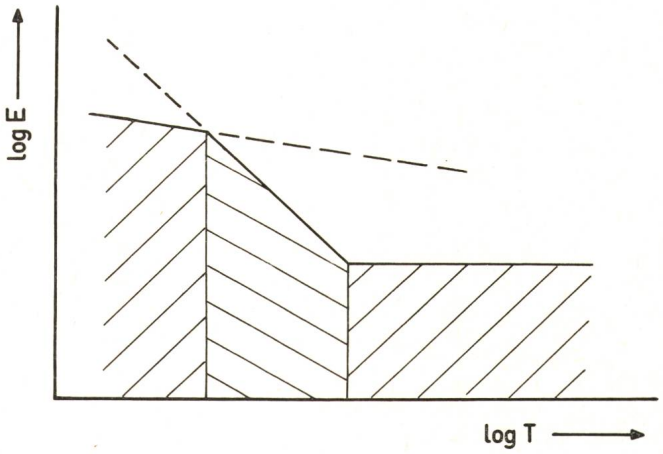


Fig. 2

rasch fort und hängt somit mehr von der Art des Einschlusses als vom Anfangs-TE-Pegel ab.

b) Der Einfluss von sogenannten Spannungsstabilisatoren trägt ebenfalls dazu bei, dass nicht eine allgemeine Aussage über TE-Pegel/Lebensdauer gemacht werden kann. Für verschiedene Spannungsstabilisatoren können sich somit völlig verschiedene Lebensdauern bei gleichen Anfangs-TE-Pegel ergeben.

Im weitern ist zu bemerken, dass die im Rapport zitierte Abhängigkeit zwischen Lebensdauer und Feldstärke ($t \cdot E^k = c$) nach neuesten Erkenntnissen (CIGRE 1972, 21-07) nur für beschränkte Zeiträume zutrifft. Diese Abhängigkeit ist bedeutend komplexer, da in Wirklichkeit je nach Feldstärke verschiedene Durchschlagsmechanismen auftreten. Es ergibt sich dadurch eine Abhängigkeit nach Fig. 2. Da jedoch die Bestimmung der dazu notwendigen Parameter sehr aufwendig ist, wird heute meist noch der vereinfachte Ausdruck $t \cdot E^k = c$ für die Extrapolation auf lange Zeiträume gebraucht.

R. Kurz, Dätwyler AG, Altdorf (zum Bericht von A. Smajler): Der Diskussionsleiter, Prof. W. Zaengl, hat in seiner Zusammenfassung die Frage nach weiteren Messergebnissen aufgeworfen. Da es sich bei meinen Untersuchungen um Langzeitversuche mit sehr komplexen Zusammenhängen handelt, kann aus einzelnen Messresultaten, die zurzeit vorliegen, noch keine gültige Aussage abgeleitet werden. Zur Frage der TE-Ortung an abgeschirmten Kabeln sind mehrere Vorschläge veröffentlicht worden: *Galand* beschreibt die sogenannte Stehwellenmethode, die zur Lokalisierung von TE-Stellen in Kabeln benutzt werden kann, welche bereits mit einer äusseren Metallhülle versehen sind. Die erforderliche Instrumentierung ist allerdings recht aufwendig, und der Erfolg scheint fragwürdig, falls es sich darum handelt, Fehlerstellen mit einer scheinbaren Ladung von wenigen pC zu orten. In der Regel beschränkt man sich deshalb darauf, das Kabel zu zerschneiden und die Teillängen erneut zu prüfen. Für Kabel mit feldbegrenzender, halbleitender Aussenschicht beschreibt *Kreuger* eine Durchlaufmethode, bei der Hochspannungs- und Erdpotential dem Kabel über Rollen zugeleitet werden. Zwei andere Verfahren sind patentiert. Das erste unterscheidet sich von der bei ungeschirmten Kabeln angewandten Durchlaufmethode dadurch, dass mittels Impulserregung die Verlustwärme in der äusseren Halbleiterschicht klein gehalten wird. Das zweite Verfahren verwendet zur örtlich begrenzten Anregung von Entladungen im unter Spannung stehenden Kabel energiereiche Strahlung.
Schliesslich sind auch noch Ultraschallmethoden bekanntgeworden, wie sie *F. Bachofen* in seinem Diskussionsbeitrag beschrieb. Ob damit bei der TE-Ortung in Kabeln positive Ergebnisse zu erreichen sind, scheint allerdings noch nicht gesichert.

Der fundierte Diskussionsbeitrag von *B. Schmidt* bestätigt erfreulicherweise meine Feststellung, dass bei der Qualitätskontrolle von PE-Kabeln auf die TE-Messung nicht verzichtet werden sollte. Es erscheint richtig, das Problem hinsichtlich Festsetzung der zulässigen Grenzwerte sowohl auf nationaler wie internationaler Ebene eingehend zu diskutieren.

M. Schmid hat in seinen Ausführungen auf den CIGRE-Bericht 21-07/1972 hingewiesen, worin glaubhaft dargelegt ist, dass im Lebensdauerverhalten von PE-Kabeln 3 verschiedene Teilbereiche mit eigener Charakteristik zu unterscheiden sind. Mein Bericht über TE-Messungen konnte sich auf den mittleren dieser Sektoren beschränken, da allein dieser durch TE beeinflusst wird. Die Theorie von *Jocteur* und *Osty* vermag allerdings noch zu verdeutlichen, welche grosse Bedeutung der TE-Einsatzspannung zugemessen werden muss. Trotzdem die einzelnen Versuchsresultate von *M. Schmid* keine Gesetzmässigkeit erkennen liessen, muss angenommen werden, dass der in Fehlerstellen auftretende TE-Pegel das Lebensdauerverhalten wesentlich beeinflusst. Wie in meinem Bericht angedeutet worden ist, erscheint es allerdings unerlässlich, hinsichtlich Ort, Lage und insbesondere bezüglich Anzahl und Ausdehnung der vorhandenen Entladungsstellen zu differenzieren. Derartige Zusammenhänge aufzudecken ist denn auch Zweck der eingeleiteten systematischen Untersuchungen.

M. Pieper, AG Brown, Boveri & Cie., Baden: Zu dem Beitrag von E. Sarbach möchte ich noch etwas hinzufügen.

Dass die Ionisationskontrolle bei der Beurteilung einer Öl-Papierisolation heute eine wesentliche Rolle spielt, ist sowohl vom Hersteller als auch vom Kunden unbestritten. Während man jedoch bis vor etwa 10 bis 20 Jahren zur Feststellung von Teilentladungen während der Spannungsprüfungen nur unvollkommene Mittel wie zum Beispiel das am Transformatorkessel angesetzte Höhrrohr hatte, stehen uns heute mehr als 1000fach empfindlichere Nachweismethoden zur Verfügung. Dieser Fortschritt ist sehr zu begrüssen, doch werden von vielen Kunden nun Forderungen gestellt, die über den eigentlichen Sinn, nämlich der Nachweis der Betriebstüchigkeit eines Apparates unter praxisnahen Bedingungen, hinausgehen. Ich meine damit die Forderung bei Transformatoren und Messwandlern die Teilentladungsmessung mit der Wechselspannungsprüfung zu koppeln. Da diese heute je nach Reihenspannung das 2,5- bis 4fache der im Betrieb auftretenden maximalen Spannung beträgt, muss das Prüfobjekt, welches beim Absenken der Prüfspannung in den Bereich der Betriebsspannung teilentladungsfrei sein soll, auf Grund des allgemein bekannten Hysteresisverhaltens von kompakten Öl-Papierisolationen bei einmal gezündeter Ionisation, auch praktisch bei der hohen Prüfwechselspannung teilentladungsfrei sein. Das bedeutet aber, dass der Konstrukteur den Apparat nicht für die Betriebsbeanspruchung, sondern für die mehrfach höhere 1-min-Prüfspannung dimensionieren muss. Dieses erfordert eine stärkere Isolation, was wiederum infolge schlechterer Wärmeabfuhr von den Aktivteilen deren Vergrösserung und damit insgesamt zur unnötigen Verteuerung des Produktes führt.

Als Alternative für die hohen 1-min-Prüfwerte wird in neuerer Zeit vermehrt die Reduzierung der Prüfspannung in Erwägung gezogen, wobei jedoch die Prüfdauer verlängert werden soll und Ionisationsfreiheit vorausgesetzt wird. E. Sarbach gibt als Richtwert zum Beispiel das 1,5fache der Betriebsspannung an. Diesen Spannungswert halten aber manche Kunden vielleicht nicht für ausreichend, da durch Schalthandlungen wesentlich

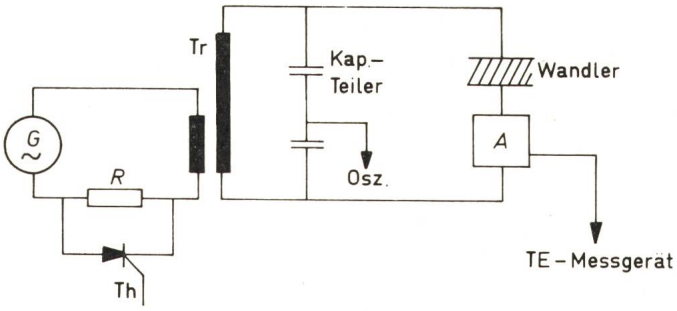


Fig. 1
Prüfschalter für Messwandler

höhere innere Überspannungen auftreten können, die eventuell Teilentladungen hervorrufen, welche dann bei der anschliessend noch anliegenden Betriebsspannung bestehen bleiben könnten.

Um nun diesen Betriebsfall nachzubilden, wurde von uns die in den BBC-Mitteilungen 1971, Heft 6, publizierte und im folgenden kurz erläuterte Prüfschaltung, welche eine Kombination aus Wechsel- und Schaltspannungsprüfung darstellt, entwickelt (Fig. 1).

In den Primärkreis des Prüftransformators wird in Serie zur speisenden Spannungsquelle ein Ohmscher Widerstand eingeschaltet, welcher mittels Thyristoren während einer halben Periode kurzgeschlossen wird. Mit dieser Schaltung lassen sich je nach Grösse des Widerstandes Überspannungen beliebiger Höhe erzeugen. Die Spannung wird mittels Oszillographen und kapazitivem Teiler gemessen. Vor und sofort nach der Überspannung darf die Störgrösse den Umweltstörpegel nicht überschreiten, das heisst das Objekt soll bei der dauernd anliegenden maximalen Betriebsspannung (plus einem festzusetzenden Sicherheitsfaktor) teilentladungsfrei sein.

In den letzten Jahren wurden von uns Hunderte von Messwandlern, vielfach in Form von Abnahmeprüfungen für Kunden in Europa und Übersee, auf diese Art geprüft. Fig. 2 zeigt zum

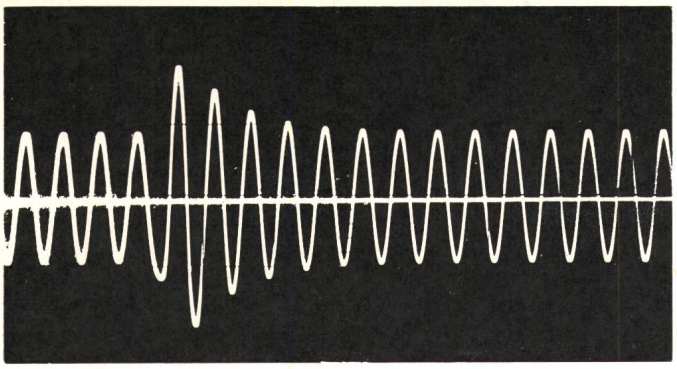


Fig. 2
Spannungsverlauf bei der Prüfung eines kV-Wandlers

Beispiel den Spannungsverlauf, der bei der Prüfung eines 770-kV-Wandlers für Kanada oszillographiert wurde. Die anliegende Wechselspannung von 485 kV (Eff.-Wert) (1,1 × 707 kV/$\sqrt{3}$ wird kurzzeitig auf 1400 kV Scheitelwert (ca. Scheitelwert der Wechselprüfspannung) erhöht und klingt dann wieder auf ihren ursprünglichen Wert von 485 kV ab.

Übersteht der Wandler diese Prozedur ca. 3 mal, ohne anschliessend Teilentladungen aufzuweisen, so ist mit Sicherheit zu erwarten, dass er auch den späteren Betriebsanforderungen genügt. Wir empfehlen daher sehr ein Vorgehen nach dieser Art.

G. Georg, Institut für Hochfrequenztechnik an ETH-Z (zum Beitrag von E. Sarbach): Im Laufe dieser Tagung war immer wieder von der Messung der Ionisation oder der TE-Einsatzspannung die Rede. Erstmals erwähnte Prof. W. Zaengl die dabei verwendeten Geräte.

Dazu gehören als Schmalbandgeräte die sogenannten Störspannungsmessgeräte. Sie haben den Vorteil der Anzeige auf einem Zeigerinstrument, den man besonders bei der Abnahme schätzt. Die andere Gruppe ist die der Breitbandgeräte. Bekannt sind das ERA-Gerät und das Nonius-Gerät nach F. H. Kreuger. Diese bieten mehr Aussagen, haben aber auch Grenzen. Zum Beispiel wird oberhalb gewisser Grenzen das Impulspaket nicht mehr aufgelöst. Dazu wird im Bericht von A. Smajler gezeigt, wie sich die scheinbare maximale Impulsladung auf einem XY-Schreiber über der Spannung aufzeichnen lässt. Weiter ermöglicht die Spannungslupe nach dem Bericht von T. Praehauser im Prinzip die Untersuchung von Impulsformen. Mehr Kenngrössen stehen derzeit nicht zur Verfügung.

In diesem Zusammenhang wird auf einen Vorschlag von E. Lemke [1][1]) aufmerksam gemacht. Ausgehend von einem TE-Messgerät und einem Spannungsmessgerät wird ein Gerätesystem aufgebaut, bei dem abzulesen ist, registriert und ausgedruckt wird. Beachtenswert ist die folgende auf einem KO gezeigte Darstellung (Fig. 1). Nach einem sample-hold-Verfahren werden während einer Halbperiode die Impulse fortlaufend zu einer Summenladung aufsummiert. Wird nun über der Spannung die Summenladung aufgezeichnet, entsteht während einer Halbperiode das Bild von Fig. 1, das keineswegs symmetrisch sein muss. Eine differentielle Fläche ist proportional dq_s oder der scheinbaren Ladung eines Einzelimpulses q_i mal der Spannung

$$dF \approx q_i u_p$$

Sie hat die Dimension einer Energie, also der Energie des Einzelimpulses. Da die Zeitzusammenhänge bekannt sind, ergibt sich auch die Impulsleistung. Es wird ausgeführt, dass dieses Diagramm sehr aussagekräftig sei. Mit seiner Hilfe erzielte Ergebnisse werden jedoch noch nicht vorgelegt.

Die Forderung von E. Sarbach zu Ausgang seines Berichtes nach besserer und weiter gehender Auswertung der Impulsbilder muss voll unterstützt werden. Es ist sicher, dass der Informationsinhalt, der in diesen Impulstelegrammen steckt, heute noch keineswegs ausgewertet ist.

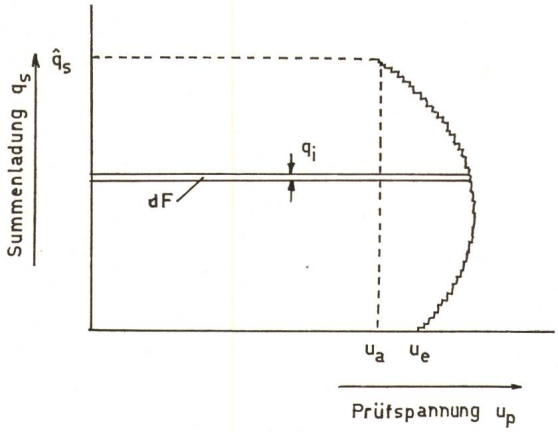


Fig. 1
Summenladung in Abhängigkeit von der Prüfspannung während einer Halbperiode

$q_s = f[u_p(t)]$

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Diskussionsbeitrages.

Literatur

[1] *E. Lemke:* Gerätesystem zur Messung von Teilentladungen. Elektrie 26(1972)6, S. 165...167.

Th. Praehauser, E. Haefely & Cie. AG, Basel (zum Beitrag von E. Sarbach):

1. *Dauer und Höhe von Prüfspannungen:* Prüfspannungen sollen Schwachstellen in der Isolation aufdecken, indem sie die Betriebsbeanspruchungen abgekürzt und verdichtet vorwegnehmen, um die Betriebssicherheit unter den tatsächlichen Betriebsbedingungen zu gewährleisten. Zu diesen Betriebsbedingungen gehören neben der einigermassen gleichmässigen Dauerbelastung kurzzeitige Überspannungen. Diese kurzzeitigen Überspannungen können Teilentladungen auslösen, die bei der normalen gleichmässigen Dauer-Betriebsspannung eventuell weiterbrennen. Unterschreiten die kurzzeitigen Überspannungen eine bestimmte Schwelle, so wirken sie nicht mehr teilentladungsauslösend. Die 1-min-Prüfspannung war bei ihrer Einführung gleichsam das geringste Übel zwischen Kontrolle auf Betriebssicherheit und Beschädigung durch die Prüfung. Mit der Einführung der Teilentladungs-Messung hat man eine feinere Kontrollmöglichkeit in der Hand, so dass man die 1-min-Prüfspannung durch eine kurzzeitige Überspannung bei gleichzeitiger Teilentladungs-Kontrolle ersetzen könnte. Die Höhe dieser Überspannung muss aber auf die im Betrieb tatsächlich auftretenden Überspannungen abgestimmt sein – diese Überspannungen sind durch das Schutzniveau des betreffenden Netzes und die in diesem Netz auftretenden Schaltspannungen gegeben. Wendet man geringere Überspannungen an und verlängert dafür deren Dauer, so besteht Gefahr, dass diejenigen TE, welche durch Betriebsüberspannungen ausgelöst würden, gar nicht mehr auftreten, so dass die Betriebssicherheit nur vorgetäuscht wird.

Wenn eine einstündige TE-Prüfung mit dem 1,5fachen der höchsten Betriebsspannung eine weitere bessere Kontrolle auf Betriebssicherheit ermöglicht, so nicht als Ersatz der 1-min-Prüfspannung, sondern als Ergänzung. Die 1-min-Prüfspannung wird ja schon lange angegriffen und ein Ersatz zum Beispiel im Diskussionsbeitrag von M. Pieper angeführt.

2. *Wirtschaftliche Gesichtspunkte bei Teilentladungs-Prüfungen:* Der Vorschlag einer einstündigen TE-Prüfung könnte auch für andere Apparategruppen als grosse Leistungstransformatoren zur Nachahmung anregen.

Es muss hier aber ausdrücklich davor gewarnt werden, für Massenartikel – relativ zur Stückzahl grosser Leistungstransformatoren – wie Durchführungen, Kopplungskondensatoren für HF-Telephonie, Steuerkondensatoren, usw. TE-Stunden-Prüfungen als Stückprüfung einzuführen. Dies würde für einen Kopplungskondensator zum Beispiel eine Erhöhung der Prüfzeit von 6 min auf 1 h 6 min bedeuten. Dies kann niemand bezahlen, vor allem deswegen, weil die Kapazität der Prüffelder ganz krass zusammenschmelzen würde (im erwähnten Beispiel auf circa 10 %). Für Apparate mit grossen Stückzahlen können länger dauernde TE-Prüfungen höchstens als Typenprüfungen zugelassen werden.

H. Michel, Bernische Kraftwerke AG, Bern (zum Beitrag von E. Sarbach): Ich möchte einige Gedanken aus der Sicht des Praktikers zur TE-Messung vorbringen:

Als Betreiber von Transformatoren und andern Hochspannungs-Apparaten begrüssen und fördern wir alle Bestrebungen, die TE-Messung, soweit zweckmässig, als zerstörungsfreie Stückprüfung durchzuführen. Wir sind denn auch der Ansicht, dass grundsätzlich alle Hochspannungsapparate bis zur 1,2fachen maximalen Betriebsbeanspruchung teilentladungsfrei sein müssen. Dies sowohl bei der Abnahme wie auch nach mehreren Betriebsjahren.

Im Beitrag von E. Sarbach schlägt der Autor vor, im Zusammenhang mit einer zeitlich verlängerten aber spannungsmässig verringerten induzierten Spannungsprüfung die TE-Freiheit von Transformatoren nachzuweisen. Wir können uns der Verknüpfung dieser zwei Prüfbedingungen aus zwei Gründen nicht vorbehaltlos anschliessen:

1. Wir sollten eine Spannungsprüfung finden, die den im Betrieb auftretenden Spannungsbeanspruchungen – also Blitz- und Schaltüberspannungen – nahe kommt. Die vorgeschlagene verlängerte Spannungsprüfung entspricht dieser Bedingung nur teilweise.

2. Die Bestrebungen nach einer zweckmässigeren Spannungsprüfung dürfen u. E. kein Vorwand sein, nicht schon heute TE-freie Transformatoren zu konstruieren und deren TE-Freiheit auch zu belegen. Hierbei sei festgehalten, dass wir uns bewusst sind, wie schwierig gerade bei Transformatoren die Interpretation der TE-Messung ist.

Gestatten Sie abschliessend folgende Frage aufzuwerfen:

Welchen Wert der Störgrösse in μV oder pC, unter Berücksichtigung des Messkreises sowie bekanntem Störpegel, bezeichnet der Autor noch als TE-frei:

a) bei Transformatoren
b) bei Wandlern
c) bei anderen Hochspannungs-Apparaten?

Th. Praehauser, E. Haefely & Cie. AG, Basel (zur Frage des Diskussionsleiters, W. Zaengl):

1. *Der Einsatz der Lupe bei der Teilentladungs-Lokalisierung:* Unter Lupe versteht man an einem Oszillographen eine Zusatzeinrichtung für die Vergrösserung eines Oszillogrammteils. Das bedeutet z. B., dass aus einer beliebigen Phasenlage der 50-Hz-Periode (die Schirmbreite entspreche 20 ms) ein Stück von 0,2 ms für sich betrachtet werden kann, so dass diese 0,2 ms die ganze Schirmbreite einnehmen. Diese Möglichkeit der Vergrösserung ist dann wichtig, wenn man vorgetäuschte Entladungen von echten unterscheiden will. Solche vorgetäuschte Entladungen sind z. B. Störungen aus der Speisung mit einer Frequenz in der Grössenordnung von 10 kHz. Derartige Verzerrungen werden durch Teilentladungs-Breitbandmessgeräte besonders verstärkt; in einem Oszillogramm mittels eines normalen Teilers sind sie in der Regel nicht sichtbar. Solche Stromverzerrungen können z. B. Teilentladung von 50 pC vortäuschen.

2. *Der Einsatz der Lupe bei der Impulsrichtungsmethode:* Durch die Brückenschaltung werden äussere Störungen abgeschwächt. Misst man nur mit einem Brückenzweig, so werden die äusseren Störungen stärker sichtbar sein. Es kann nun sein, dass die zu untersuchende Teilentladung in der Brückenschaltung gut sichtbar ist, aber im nun verstärkt auftretenden äusseren Störpegel untergeht. Bei der normalen Betrachtung – eine 50-Hz-Periode nimmt die Schirmbreite des Oszillographen ein – erscheint die äussere Störung als ein verhältnismässig gleichbleibend breites Band von z. B. 5 mm Höhe. Mittels der Lupe kann dieser äussere Störpegel aber in ein Linienfeld auseinandergezogen werden, in welchem die Impulsrichtungen dann sehr oft festgestellt werden können, auch wenn ihre absolute Höhe unterhalb derjenigen des gleichmässigen Störpegels liegt. Es muss dazu noch gesagt werden, dass schon aus der Änderung der Impulsgrösse durch Umschalten der Brücke auf einen Messzweig oft geschlossen werden kann, ob es sich um äussere oder innere Entladungen handelt: äussere Entladungen sind in der Brückenschaltung meist kleiner. Leider bleiben die wenigsten Teilentladungen starr in einer bestimmten Phasenlage. Es empfiehlt sich daher, das Erscheinungsbild der Teilentladungen schon in der Brückenschaltung genau zu beobachten.

Auf den ersten Blick mag die Impulsrichtungsmethode zur Lokalisierung von Teilentladungen kompliziert erscheinen. Für eine störungsfreie Teilentladungs-Messung ist sie jedenfalls nicht nötig; wer aber die mühselige Suche nach Störungen im Laufe einer Teilentladungs-Messung aus eigener Erfahrung kennt, wird eine wesentliche Zeiteinsparung feststellen.

Treten zum Beispiel in einem Transformator Teilentladungen längs eines Stützers gegen Kessel auf, so lässt sich dies mittels der Impulsrichtungsmethode sehr leicht feststellen: liegt der Kessel an Erde und die Wicklung an einem Brückenzweig, so erscheint diese Teilentladung als äussere Entladung; legt man anschliessend den von Erde isolierten Kessel mit der Wicklung zusammen an denselben Brückenzweig, so erscheint die Teilentladung als innere Entladung, die Impulsrichtung ist umgekehrt.

E. Buchmann und B. Weber, Kabelwerke Brugg AG, Brugg (zu Fragen des Diskussionsleiters, W. Zaengl): Selbstverständlich sind vor der Planung der Dauerversuchsanlage im Labor mehrere Kabelabschnitte mit Zubehör den Typenversuchen nach der CEI-Publikation 143-3 sowie weiteren, uns nützlich scheinenden Zusatzprüfungen unterzogen worden. Es sind dies im wesentlichen die folgenden Versuche:

- Dauerspannungsprüfung 50 Hz mit 2,5 · E_0 während 24 h;
- Stoßspannungsprüfungen kalt und warm bis 1200 kV;
- 1-min.-Spannungsproben bis 500 kV, 50 Hz.

Als Nachweis eines möglichen Notbetriebes der Kabel ohne Gasdruck während einiger Stunden sind folgende Tests ausgeführt worden:

- Erwärmungszyklus ohne Gas-Überdruck;
- Nach Abkühlung auf Raumtemperatur bei 0 atü: Stossprüfung 1050 kV, Spannungsprobe 500 kV, 50 Hz sowie Dauerspannungsprüfung 2,5 · E_0 während 4 h.

Auf Fig. 1 sind einige tg δ-Verläufe bei diesen Versuchen aufgezeichnet. Die Kurven 1 und 4 fallen angenähert zusammen, was darauf schliessen lässt, dass die Qualität der Kabelisolation durch diese Versuche nicht wesentlich beeinflusst worden ist.

Nach Beendigung der Dauerversuche ist vorgesehen, die Typenversuche zu wiederholen, um allfällige Alterungserscheinungen und die Lebenserwartung mit elektrischen Messwerten in Zusammenhang zu bringen.

Weder bei den Typenprüfungen noch beim Dauerversuch sind TE-Messungen ausgeführt worden.

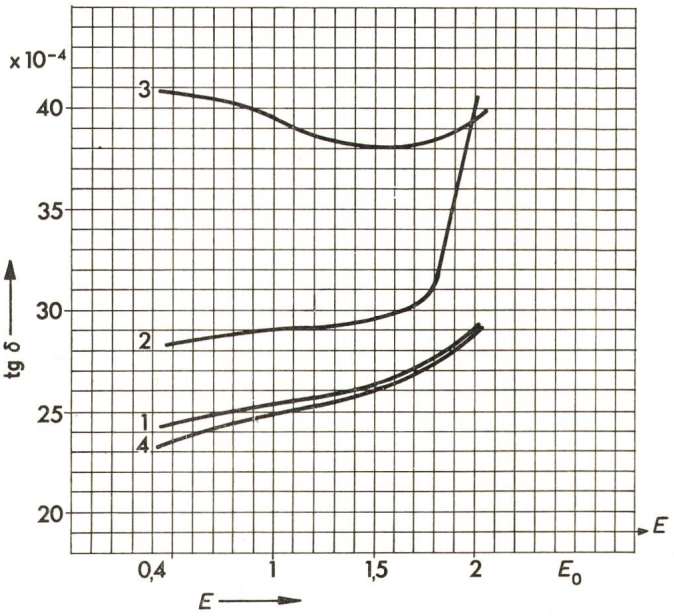


Fig. 1

Gasdruckkabel	220/127 kV	1 × 300 mm²
1 ϑ_c = 20 °C	p = 12 atü	Ausgangszustand
2 ϑ_c = 19 °C	p = 0 atü	nach Stromzyklus mit ϑ_c = 65 °C
3 ϑ_c = 19 °C	p = 0 atü	nach Stoss 1050 kV und 500 kV~
4 ϑ_c = 18 °C	p = 12 atü	nach 10 min Druckeinwirkung

Auf Grund jahrzehntelanger Erfahrungen kann festgestellt werden, dass Papier-Masse-Isolationen auf Teilentladungen viel weniger empfindlich reagieren als gewisse feste Kunststoff-Isolationen. Darin dürfte auch der Grund liegen, weshalb in Kabel-Fachkreisen die TE-Messungen vorläufig nur für Kunststoffkabel in Betracht gezogen werden.

Die tg δ-Kurven der Fig. 1 lassen darauf schliessen, dass eine Hohlraumbildung in der Isolation durch den äussern Gasdruck wirksam unterbunden werden kann. Auch in Ausnahmefällen dürfte eine zeitlich begrenzte Einwirkung von TE die Isolation kaum nachhaltig schädigen.

E. Sarbach (zur Frage des Diskussionsleiters, W. Zaengl): An einer Kompensationsdrosselspule (45 Mvar) für eine 500 kV Übertragung stellte man bei 120 % Nennspannung im NEMA-Kreis einen TE-Pegel von ca. 2000 µV (selektive Messung mit Störspannungsmessgerät, Bewertung nach NEMA) fest. Es folgten verschiedene Abklärungsversuche und ein 10stündiger Dauerversuch bei 120 % Nennspannung. Die dabei gemessene Störspannung schwankte zwischen 2000 und 4000 µV. Es folgte ein Ortungsversuch mit der Ultraschall-Methode und einem elektrischen Ortungsverfahren (beide Methoden sind im Aufsatz von T. T. Tan: Lokalisieren von Teilentladungen in Transformatoren und Reaktoren, Brown Boveri Mitt. 1972, 59 (8), 399–403, beschrieben). Beide Verfahren ergaben in diesem Fall, dass der Störherd an der Verbindung zwischen Wicklung und Durchführung zu erwarten sei. Die Demontage bestätigte diese Vermutung. An der Aussenfläche einer Abschirmelektrode, die mit Transformerboard isoliert war, zeigten sich metallseitig kleine runde Vertiefungen, die als Teilentladungsfusspunkte gedeutet wurden. Am Transformerboard zeigten sich feinste Spuren einer beginnenden Schwärzung. Der Grund lag vermutlich in ungenügender Imprägnierung (Imprägnationsfehler). Nach Ersetzen der Isolation der Abschirmelektrode und Neuimprägnation, war das Teilentladungsverhalten einwandfrei.

Meistens sind die Verhältnisse bei Transformatoren und Reaktoren nicht so einfach wie in diesem Fall, und es lässt sich heute noch nicht einen die Gefährlichkeit der Störstelle eindeutig charakterisierenden TE-Pegel angeben.

F. Bachofen, Sprecher & Schuh AG, Oberentfelden (zu Fragen des Diskussionsleiters W. Zaengl): Mein Beitrag hat keinen direkten Zusammenhang mit der Prüfung konventioneller Kabel; das im folgenden angedeutete Verfahren könnte jedoch auch zur Prüfung abgeschirmter Kabel verwendet werden.

Unsere Erfahrungen bei der Entwicklung von SF_6-isolierten Schaltanlagen und Hochspannungsverbindungen haben gezeigt, dass eine empfindliche Teilentladungsmessung den grössten Teil aller möglichen Fehler erfassen kann. Will man nun solche Anlagen am Aufstellungsort prüfen, wird die Teilentladungsmessung wegen der fehlenden Abschirmung ein Problem.

Wie schon im Bericht von H. U. Nabholz in der Themengruppe A erwähnt worden ist, kann dieses Problem umgangen werden, wenn die TE-Messung durch eine Ultraschallmessung ersetzt wird. Dabei werden die von einer Störstelle ausgehenden hochfrequenten akustischen Signale mit einem Gerät in niederfrequente hörbare Signale umgewandelt. Das Verfahren wird schon einige Zeit erfolgreich zur Ortung von Glimmstellen in Luft, neuerdings auch zur Ortung von Störstellen in Transformatoren angewendet.

Aber auch für SF_6-isolierte Anlagen lässt sich die Methode gut anwenden. Mit einem richtungsempfindlichen Mikrophon konnten wir bei den Entwicklungsprüfungen schon mehrmals glimmende Kanten nicht nur feststellen, sondern auch orten. Mit einer Kontaktsonde gelingt es auch, freie leitende Teilchen im Innern der Kapselung nachzuweisen. Hingegen ist es uns bis jetzt noch nicht gelungen, Fehler in Giessharzabstützungen, welche sich mit der TE-Messung eindeutig nachweisen liessen, auch mit Ultraschallmessung festzustellen. Unsere Versuche stecken jedoch noch in den Anfängen, und wir hoffen, mit Verbesserungen des Verfahrens auch noch diese Störstellen erfassen zu können.

M. Th. Schuler, Lonza AG, Basel (zu Fragen des Diskussionsleiters, W. Zaengl): Das Temperaturverhalten von vernetztem PVC ist besser als dasjenige von vernetztem PE. Vernetztes PE reicht bis etwa 145 °C; vernetztes PVC wesentlich höher – es ist stundenweise bis 175 °C belastbar. Im Vergleich zu PE ist vernetztes PVC ferner schwer brennbar. Zurzeit werden vernetzte PVC-Kabel vorwiegend im Flugzeugbau verwendet. Wenn aber wegen der Abgase in den zukünftigen Automotoren höhere Temperaturen nötig sind, so kann sich der Absatz vernetzter PVC-Kabel enorm erweitern.

Wie ich in meinem Bericht, im Kapitel «Thermische Vernetzung», Seite 13, erwähnt habe, sind zwar schon Versuche zur chemischen Vernetzung unternommen worden, aber eine technische oder kommerzielle Verwertung gibt es kaum. Zudem würde eine chemische Vernetzung während Minuten hohe Temperaturen erfordern, wo die gut dosierbare Bestrahlung in Sekunden vernetzt.

Das polare PVC dürfte bei den zur chemischen Vernetzung notwendigen Peroxid-Zusätzen andere Verhältnisse aufweisen als das unpolare PE.

J. Hoigné, AG für Industrielle Forschung und Strahlennutzung, Schwerzenbach (zur Frage des Diskussionsleiters, W. Zaengl): Diese Frage, bei welcher Wandstärke die technische und wirtschaftliche Grenze der Strahlenvernetzung liegt, kann nur für einen genau definierten Fall beantwortet werden, denn für den Vergleich der Gesamtwirtschaftlichkeit des Verfahrens sind entscheidend: Abschreibungsrate, Raumersparnis, Verkürzung der Anlaufs- und Produktions-Umstellungszeiten, Verminderung des Ausschusses, Auslastungsgrad der Anlage usw.

Grobe Anhaltspunkte für eine Kostenabschätzung gibt Tabelle I: Je nach Kabelart kommen beispielsweise Beschleuniger von 0,5 oder 2,0 MeV in Frage (s. Zeile b). Das Materialdurchdringungsvermögen der Strahlung beträgt entsprechend 0,3 bis 50 mm, falls beidseitig bestrahlt wird (s. Zeile a). Die Anlagenkosten steigen jedoch mit der Beschleunigungsspannung sehr rasch an. In der Zeile d sind einige Daten für die Kosten der Beschleuniger inkl. Abschirmung und Transportvorrichtung angegeben. (Mittelwerte aus Angaben verschiedener Firmen.) Die Anlagenkosten fallen, falls über 5 Jahre abgeschrieben wird, für die Betriebskosten mit etwa 75 % ins Gewicht.

Eine Produktionssteigerung kann durch Erhöhung des Strahlstromes erreicht werden. Dabei steigen die Anlagenkosten nicht direkt mit den Stromstärken an. In der Tabelle sind jedoch für die verschiedenen Beschleuniger typische Zahlen angegeben (s. Zeile c). Die Produktionsgeschwindigkeit sinkt mit steigender Kabeldicke natürlich enorm, denn je grösser die Kabeldicke, um so grösser wird auch die pro Kabellänge belegte Fläche. Es kann eine Produktionsgeschwindigkeit pro Minute angegeben werden, die sich auf Grund der Leistungsfähigkeit der Maschine ergibt (Zeile e). Die jährliche Produktionsmenge wird jedoch weitgehend durch andere Faktoren, wie Umstellungszeiten, gegeben. Die in der Zeile f aufgeführten Produktionsmengen basieren auf der Annahme, dass eine 60%ige Ausnutzung der Maschinenzeit möglich ist.

In unserer Firma steht für Service-Bestrahlungen ein 400-kV/10-mA-Beschleuniger zur Verfügung, der auch für Kabelbestrahlungen geeignet ist, falls X 1,2 mm nicht übersteigt. Der Aufbau einer zentralen Bestrahlungs-Dienstleistung für stärkere Kabel kommt bei genügender Nachfrage in Frage.

Tabelle I

a) x bzw. W (mm)	$x < 1$	$x < 2$	$W < 7$	$W < 30$
b) Beschleuniger (MeV)	0,3	0,5	2	10
c) Beschleuniger (m)	-25-	-25-	-20-	-1-
d) Anlagenkosten (Fr.)	$0{,}6 \cdot 10^6$	$0{,}7 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$>4 \cdot 10^6$
e) Produktion*) (m/min)		700 ($x = 2$)	16 ($x = 20$)	
f) Produktion*) (γ = 60 %) (km/4000 h)		100 000	2 400	

*) Annahme: 10 Mrad