

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 53 (1962)  
**Heft:** 11

**Artikel:** Sammelschienen mit fester Isolation für hohe Spannungen  
**Autor:** Kappeler, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916943>

#### **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:** 16.01.2026

**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)

## Sammelschienen mit fester Isolation für hohe Spannungen

Von H. Kappeler, Zürich

621.316.352.027.3

*Isolierte Sammelschienen für Nennspannungen von 100 kV und mehr stellen den Fabrikanten bezüglich Dimensionierung und Herstellung vor neue Probleme. Der Artikel befasst sich mit den Anforderungen und Prüfungen, denen solche Sammelschienen genügen müssen. Er gibt Bericht über die ausgedehnten Versuche, die an Schienen mit fester Isolation durchgeführt worden sind zum Zwecke, verlässliche Grundlagen für die Bemessung einer betriebssicheren Isolation zu erhalten. Die Versuche sind erfolgreich abgeschlossen und eine erste Anlage dieser Art mit 125 kV Nennspannung ist bereits in Betrieb gesetzt worden.*

*Les barres collectrices pour tensions nominales de 100 kV et plus posent aux fabricants de nouveaux problèmes de dimensionnement et de construction. L'auteur indique les exigences et les essais auxquels ces barres doivent satisfaire. Il décrit les essais approfondis auxquels des barres à isolation solide ont été soumises, afin d'obtenir des données précises pour le dimensionnement d'une isolation sûre. Ces essais ayant été achevés avec succès, une première installation de ce genre, pour tension nominale de 125 kV, a été mise en service.*

### 1. Einleitung

Es ist bekannt, dass Schaltanlagen in Luft infolge der grossen Abstände zwischen den Phasen und von Phase gegen Erde, speziell bei Nennspannungen über 100 kV sehr viel Platz beanspruchen. Auf die Möglichkeit und Notwendigkeit, diese Abstände zu verringern, d. h. Sammelschienen für hohe Spannungen anders als mit atmosphärischer Luft zu isolieren, ist schon mehrfach hingewiesen worden.

Bereits 1952 sah man beispielsweise bei der Transformatoren- und Schaltstation Lavorgo der Aare Tessin AG die Verkabelung der 380-kV-Sammelschienen vor, da wegen der beschränkten Platzverhältnisse im engen Tale eine Ausführung mit normalen Luftabständen nicht mehr möglich war [1] <sup>1)</sup>. Während in dieser Anlage die topographischen Verhältnisse die klassische Luftisolation verunmöglichen, sind es in der Nähe der Städte wirtschaftliche Gesichtspunkte, die zu neuen Lösungen drängen. Bei der Neuerstellung oder bei der Abänderung bereits bestehender Anlagen vermag die raumsparend isolierte Sammelschiene trotz ihrer relativ teuren Isolation die gesamten Anlagekosten beträchtlich zu reduzieren. Fig. 1 zeigt schematisch, welche Raumeinsparungen bei Verwendung von Sammelschienen mit fester Isolation gegenüber der klassischen Bauweise im Bereiche von 73...245 kV Nennspannung möglich sind.

Natürlich stellt die Verwendung einer isolierten Sammelschiene in Verbindung mit normalen Apparaten nur eine Lösung auf halbem Wege dar und die Raumeinsparung kann extrem getrieben werden, wenn es gelingt, alle Anlageteile zu kapseln und diese Teile auch gekapselt zu verbinden. Solche metallgekapselten Anlagen sind zwar schon lange bekannt und speziell in angelsächsischen Ländern stark verbreitet, doch betreffen sie nur niedere Spannungen (meist bis etwa 20 kV). Bei höheren Spannungen, insbesondere über 100 kV,

sind die Probleme der Kapselung weit schwieriger und es müssen zu ihrer Lösung neue Wege beschritten werden. Imhof [2] hat in einem wegweisenden Artikel die Möglichkeiten einer solchen totalen Kapselung der Anlage für hohe Spannungen auf der Basis der festen Kunstharz-Giessisolation vorgezeichnet und auch Teillösungen unter Verwendung allein der trockenisolierten Sammelschiene bereits beschrieben. Die fernere Zukunft wird sicher einer Lösung gehören, bei der die gesamte Hochspannungsanlage entweder mit fester oder nach andern Vorschlägen mit flüssiger oder am ehesten mit druckgasförmiger Isolation ausgeführt werden wird. Von der Zielsetzung bis zur Verwirklichung solcher Ideen werden aber vermutlich noch viele Jahre verstreichen. Es war deshalb naheliegend, die Lösung des einfacheren, einen raschen Erfolg versprechenden Teilproblems, nämlich das der isolierten Sammelschiene an die Hand zu nehmen.

### 2. Verschiedene Ausführungsmöglichkeiten isolierter Sammelschienen

Eine Reduktion der Phasenabstände luftisolierter Sammelschienen lässt sich bereits durch Umhüllen der nackten Leiter mit einer festen Isolation herbeiführen. Die Isolation von Leiter zu Leiter besteht dann teils aus Luft, teils aus festem Isolierstoff, die elektrisch in Serie geschaltet sind. Von dieser Teilisolation, die für niedere Spannungen einige Vorteile bringen kann, soll hier nicht die Rede sein, weil sie für Betriebsspannungen über 100 kV den Zweck nicht zu erfüllen vermag [3]. Bei den nachfolgend zu besprechenden Sammelschienen handelt es sich ausschliesslich um solche mit Vollisolation, bei der die feste, flüssige oder druckgasförmige Isolation die gesamte Spannung zwischen Pol und Erde aufnimmt.

Eine über viele Felder durchgehende Sammelschiene wird aus Gründen der Fabrikation und des Transportes zweckmässig unterteilt in Stücke von der

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

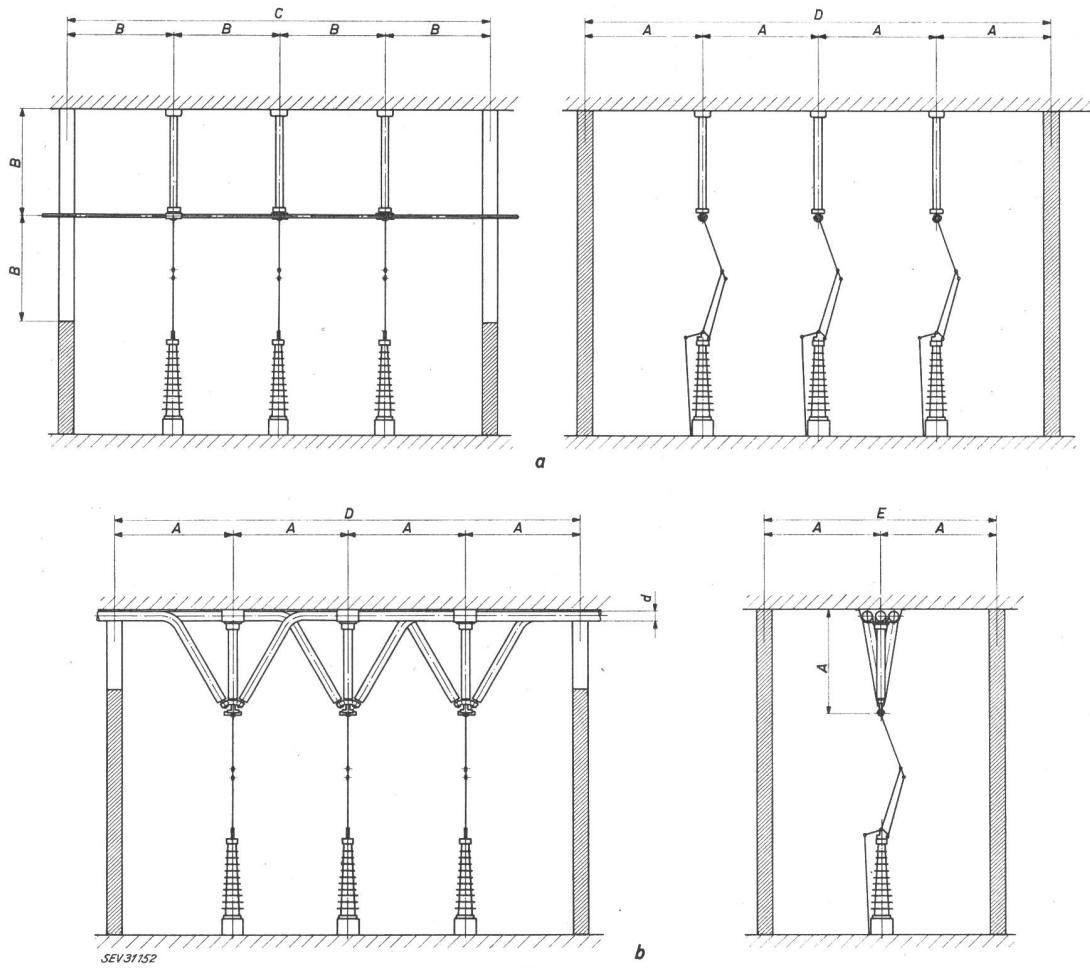


Fig. 1

Raumeinsparung in elektrischen Anlagen bei Verwendung isolierter Sammelschienen für verschiedene Nennspannungen  $U_n$   
 a Schaltfeld mit blanken Schienen in atmosphärischer Luft  
 b Schaltfeld mit isolierten Sammelschienen aus fester Isolation

Masse in mm

| $U_n$<br>[kV] | A    | B    | C    | D     | E    | d   |
|---------------|------|------|------|-------|------|-----|
| 73            | 900  | 750  | 3000 | 3600  | 1800 | 110 |
| 123           | 1350 | 1200 | 4800 | 5400  | 2700 | 132 |
| 170           | 1800 | 1650 | 6600 | 7200  | 3600 | 160 |
| 245           | 2500 | 2400 | 9600 | 10000 | 5000 | 220 |

**Länge der Feldteilung.** Ein solches Sammelschienenstück besteht dann aus einem geraden, mit einem geerdeten Mantel umgebenen Mittelstück und zwei rechtwinklig oder schräg abgebogenen, nicht geerdeten Enden. Zur Ausführung derartiger Sammelschienenelemente sind mehrere Lösungen vorgeschlagen worden, deren wichtigste in Fig. 2 dargestellt sind. Die zunächstliegende Idee besteht wohl in der Verwendung eines einadrigen Ölkabels mit geerdetem Mantel, beidseitig versehen mit Kabelendverschlüssen. Die Technik ist bekannt, aber teuer; es sind ferner Ölausdehnungsgefäße notwendig und die Isolation ist brennbar.

Auch die Schiene nach Fig. 2 b enthält als Isolation ölimprägnierte Papier, doch ist die Herstellung von der eines Kabels verschieden. Der feste Leiter wird mit Kraftpapier umwickelt und das Ganze in einem öldichten Gehäuse untergebracht, das aus einem Metallrohr mit beidseitig anschliessenden Isolierbechern besteht. Die Isolation wird evakuiert und mit Öl imprägniert. Eine derartige Lösung ist von *Haldimann* und *Richon* [4] beschrieben worden.

Die Variante in Fig. 2 c besteht im Mittelteil aus einem druckgasisolierten Leiter, der innerhalb eines geerdeten druckfesten Metallrohres durch Abstützringe zentrisch gehalten wird. In die Enden des Rohres sind gasdichte Hartpapierdurchführungen eingesetzt. Der grosse Vorteil dieser Sammelschiene liegt darin, dass sie demontierbar ist. Eine solche Lösung hat deshalb für höchste Spannungen sehr grosse Zukunft, weil dort eine Unterteilung in transportable kleinere Teilstücke wohl kaum zu umgehen ist. Ein Nachteil der Druckgasisolation liegt in der Abhängigkeit der Betriebssicherheit von der Gasdichtheit. Eine Überwachung des Gasdruckes ist deshalb unumgänglich.

Variante nach Fig. 2d stellt die Schiene mit durchgehend fester Isolation dar, wie sie in Anlehnung an die Technik der Hartpapierdurchführungen hergestellt werden kann, mit eingewickelten Steuereinlagen an den abgewinkelten Enden und durchgehendem Erdbelag im Mittelteil. Diese Variante besticht durch ihre Einfachheit; die isolierte Schiene bedarf keiner War-

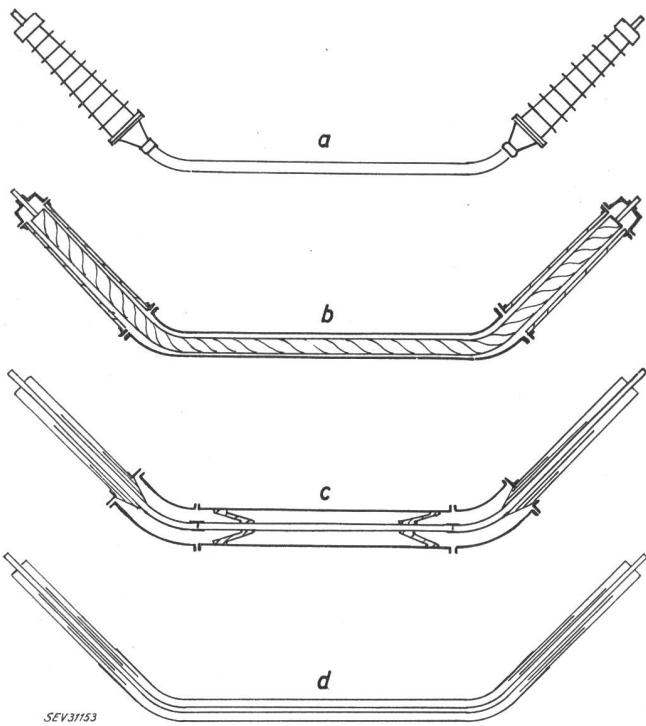


Fig. 2

**Verschiedene Möglichkeiten der Isolierung von Sammelschienen**  
 a Ölkabel mit Endverschlüssen; b Sammelschiene mit Ölspapier-Isolation. Starrer Behälter, bestehend aus Metallrohr mit beidseitigen Isolierbechern; c demontierbare Sammelschiene mit Gas-isolation. Abstützungen des Leiters und Durchführungen aus Hartpapier; d Sammelschiene mit durchgehender Hartpapierisolation, Enden gesteuert.

tung, enthält keine Dichtungen und brennt nicht, bietet deshalb den grössten Grad der Sicherheit.

Beim Abwägen der Vor- und Nachteile der verschiedenen möglichen Lösungen schienen die Vorteile der Variante nach Fig. 2d für den zunächst benötigten Anwendungsbereich von 123 und 170 kV Nennspannung so gross, dass der Entwicklung einer Sammelschiene mit fester Isolation der Vorrang eingeräumt wurde. Die folgenden Kapitel berichten über die sich stellenden Probleme und deren Lösung.

### 3. Problemstellung bei Schienen mit fester Isolation

Eine Sammelschiene nach Fig. 2d stellt im Grunde nichts anderes dar als eine Durchführung mit langem Erdbelag und es ist zunächst nicht einzusehen, weshalb neue Probleme auftreten sollen. Die klassische Durchführung mit fester Isolation (Phenolharz-Hartpapier) ist an sich genau bekannt und kann bis zu den höchsten Spannungen betriebssicher hergestellt werden. Bei näherer Betrachtung zeigt sich aber, dass die zwei wichtigsten Unterscheidungsmerkmale, nämlich die extreme Länge der Sammelschiene und die Abkröpfung ihrer Enden die Aufgabestellung wesentlich erschweren. Als erstes Problem war somit die Frage nach einem geeigneten Isoliermaterial, das die Herstellung sehr langer und gekröpfter Wickelkörper gestattet, zu beantworten.

Ein weiteres wichtiges Problem stellt die Feldsteuerung der Sammelschiene mittels leitender Kondensatoreinlagen dar. Diese Einlagen haben bei der klassischen Durchführung den Zweck, sowohl die radialen Feldstärken im Innern des Isoliermaterials als auch

die Längsfeldstärken auf der Oberfläche der Durchführungsenden zu egalisieren. Bei der Sammelschiene liegen die Verhältnisse anders und eine kurze Überlegung zeigt, dass die Anordnung durchgehender Kondensatoreinlagen bei sehr langen, geerdeten Mittelteilen praktisch wirkungslos bleibt, d. h. dass eine gleichmässige Verteilung der Gradienten auf der Oberfläche und im Innern der Isolation überhaupt nicht möglich ist. Um wenigstens die Oberfläche der freien Enden steuern zu können, muss man auf durchgehende Einlagen verzichten und man hat dann eine Sammelschiene vor sich, die aus einem ungesteuerten Mittelteil und zwei gut gesteuerten Schenkeln besteht. Die elektrische Beanspruchung in den Schenkeln ist derjenigen einer Durchführung gleich, die Beanspruchung im Mittelteil hingegen gehorcht den Kabelgesetzen. Da für das neue Material bis anhin die Bemessungsgrundlagen fehlten, war es nötig, für beide Arten der Beanspruchung elektrische Festigkeitsmessungen, vor allem Dauerversuche über lange Beanspruchungszeiten durchzuführen.

Neu und unbekannt war auch das Verhalten der langen und eng aneinanderliegenden Schienen im Kurzschluss, bei welchem starke elektromagnetische Kräfte und plötzliche Wärmespannungen auftreten, die die Isolation mechanisch beanspruchen. Die magnetischen Felder erzeugen zudem in den geerdeten Mänteln Wirbelströme, die namentlich an den Enden der Mäntel zusätzliche Erwärmungen zur Folge haben.

In den übrigen Bemessungsfragen unterscheiden sich die isolierten Schienen wenig von den Durchführungen. Bekannt sind wie bei jenen die Erwärmung infolge Stromdurchgang, der Verlauf der dielektrischen Verluste mit der Temperatur als Kriterium des Wärmegleichgewichtes sowie das Überschlagsverhalten der kondensatorgesteuerten Enden bei Prüf- und Stossspannungen, im trockenen Zustand sowohl wie unter dem Einfluss der Feuchtigkeit. Für alle diese bekannten Fragen musste lediglich an Hand ausgeführter Sammelschienen der Beweis erbracht werden, dass die elektrischen und mechanischen Festigkeiten auch bei betriebsmässiger Anordnung mit drei aneinanderliegenden Phasenleitern gewährleistet werden können.

### 4. Material und Fabrikation

Der klassische Isolierstoff für trockene Durchführungen, nämlich ein Hartpapier auf Phenolharzbasis, lässt sich aus verschiedenen Gründen für die Herstellung von isolierten Sammelschienen nicht verwenden. Mit phenolharz-imprägnierten Papierbahnen lassen sich nur zylindrische, etwa 3...4 m lange Wickelkörper herstellen. Längere Isolierkörper können durch Zusammensetzung kleinerer Teilstücke erzeugt werden. Ein solches Zusammensetzen, das an Ort und Stelle und eventuell sogar wieder lösbar durchgeführt werden müsste, stellt ein äusserst erstrebenswertes Ziel dar, bedingt aber das gleichzeitige Verbinden der stromleitenden wie der isolierenden Teile. Solche Steckverbindungen mit fester Isolationsfuge sind für kleine Mittelspannungen mit Erfolg ausgeführt worden, weil es sich dort um relativ kleine Isolationsdicken handelte. Bei Hochspannungsschienen jedoch, d. h. bei grossen Wanddicken gelang es bisher nicht, einwandfreie Doppelverbindungen herzustellen. Man kann das Zusammensetzen auch mit einer flüssigen Fugenisolierung herstellen — und die Fuge ist in diesem Fall auch wiederum lösbar —, aber damit verliert die Sammelschiene

schiene mit fester Isolation viel von ihrer Einfachheit. Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit gekrümmte, lange Leiter mit phenolharz-imprägnierten Papierbändern durchgehend zu isolieren, doch der Umstand, dass bei diesem Harz Druck und Hitze während des Umbändelns angewandt werden müssen, macht die Ausführung praktisch unmöglich.

Die genannten Schwierigkeiten können umgangen werden, wenn man ein Hartpapier auf Epoxybasis verwendet, bei dem nun das Harz in flüssigem Zustand appliziert werden kann, wodurch eine innige Durchtränkung der Papierisolation zustande kommt. Ein solches Hartpapier, das unter der Bezeichnung Resocel 99 bereits für die Fabrikation von Spezial-Durchführungen bekanntgeworden ist, stellt einen Hochspannungsisolierstoff mit bemerkenswerten Eigenschaften dar. Infolge seines hohen Harzgehaltes werden die nachteiligen Eigenschaften eines Schichtstoffes weitgehend unterdrückt. Der Isolierstoff ist selbst bei grösster Schichtdecke frei von Spalten und Rissen und zeichnet sich deshalb durch völlige Ionisationsfreiheit aus. Neben einer hohen Durchschlagfestigkeit, speziell auch in Schichtrichtung, weist er sehr kleine dielektrische Verluste auf, selbst bei Temperaturen um 100 °C. Das Material ist ferner vakuum- und druckfest und zeigt nur sehr geringe Wasser- und Ölaufnahme.

Bei der Fabrikation isolierter Sammelschienen mit Resocel 99 geht man vom abgekröpften Leiterrohr aus, auf das mit Spezialmaschinen in kontinuierlicher Umbändelung die Isolation aufgebracht wird. Die leitenden Steuereinlagen werden im Verlaufe des Wickelprozesses eingelegt. Nach erfolgter Aushärtung des Isolierstoffes liegt eine fertige Sammelschiene vor, die weder der Nacharbeit noch einer späteren Wartung bedarf. Die Schwierigkeiten der Fabrikation wachsen allerdings mit der Grösse der Objekte. Da die Isolation beim Transport, bei der Montage und bei Kurzschlüssen mechanisch sehr stark beansprucht wird, muss vor allem Gewähr geleistet werden, dass keine Risse entstehen und die Verbindung mit dem Leiterrohr den auftretenden Kräften standhält, da sonst eine Zerstörung durch Ionisation zu befürchten ist.

### 5. Ionisation an den Belagrändern

Bereits ist erwähnt worden, dass man bei isolierten Sammelschienen zwischen einem Kabelteil und einem Durchführungsteil unterscheiden muss. Der Durchführungsteil enthält eine Vielzahl leitender Einlagen und die Ränder dieser Einlagen stellen die Orte grösster elektrischer Beanspruchung dar. An ihnen setzt bei steigender Spannung die Ionisation zuerst ein und an ihnen wird der Durchschlag zuerst erfolgen. Für die Bemessung von Durchführungen und Sammelschienen ist es deshalb in erster Linie wichtig, die Verhältnisse an den Rändern der Kondensatoreinlagen genau zu kennen. Bei dem klassischen Hartpapier auf Phenolharzbasis sind die Gesetze der Randonisation und Randerosion seit langem bekannt [5] und es galt nun, zunächst zu untersuchen, ob die Einsatzspannungen der Ionisation bei dem neuen, epoxy-imprägnierten Hartpapier auf gleicher Höhe liegen oder ob man nicht, dank der guten Harzdurchdringung wesentlich höhere Werte erwarten durfte.

Da es sich beim Ionisationseinsatz bei sonst gleichen Verhältnissen auch um eine Materialeigenschaft handelt, ist es zum Verständnis der nachfolgenden Erscheinungen und der daraus zu ziehenden Schlüsse nötig,

die Materialzusammensetzung der zu vergleichenden Hartpapiere Resocel 91 und Resocel 99 näher zu definieren:

Unter «Resocel 91» sei ein gewickeltes Hartpapier verstanden, das einen Phenolharzgehalt von 40 Gewichtsprozenten aufweist. Es handelt sich um ein Zweischichtdielektrikum mit ausgeprägten Harz- und Papierschichten, wobei naturgemäß in den Papierschichten ein gewisser Anteil von sehr fein verteilter Luft enthalten ist. Dieses Material ist hoch beanspruchbar und hat sich als Baustoff für Durchführungen bis zu den höchsten Betriebsspannungen bestens bewährt.

Unter «Resocel 99» sei das neu zu untersuchende, auf Epoxydharz basierende Hartpapier verstanden, das einen Harzgehalt von etwa 70 Gewichtsprozenten aufweist und damit vollständig vom Harz durchdrungen ist. Es enthält keine Luft mehr und hat den Charakter eines Schichtstoffes weitgehend verloren.

Zur Untersuchung der Ionisation an den Belagrändern wurden wie bei früheren Arbeiten [6] kleine Elementar-Durchführungen hergestellt, die aus Hartpapierrohren bestanden, in die je zwei ungleich lange, leitende Belegungen eingewickelt worden waren. Die Belegungen bildeten die Spannungs- und Erdelektroden der aus je einer Dielektrikumschicht bestehenden Elementar-Durchführungen.

Das Einsetzen der Ionisation an den Belagrändern wurde mit einem Gerät beobachtet, das von Schühlein [7] beschrieben worden ist. Bei dieser Messmethode wird als Mass für die Intensität der Glimmentladung die an einem Messwiderstand von  $60 \Omega$  anliegende Impulsspannung in  $\mu\text{V}$  bei einer aus dem Frequenzspektrum herausgegriffenen Frequenz von 1,9 MHz gemessen.

In einer ersten Serie von Versuchen an Elementardurchführungen aus Resocel 99 wurde die Einsatzspannung der Randonisation in Funktion der Schichtdicke bestimmt. Zu diesem Zwecke ist die Ionisationsintensität bei steigender Spannung gemessen worden und es ergeben sich dann Kurven, wie sie in Fig. 3 aufgetragen

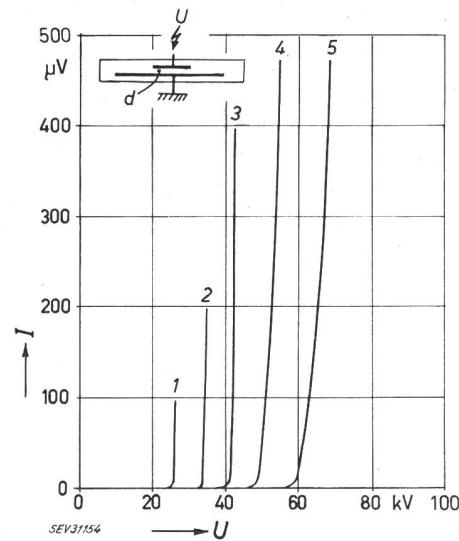


Fig. 3  
Ionisation an den Belagrändern von Elementar-Durchführungen aus Resocel 99

Ionisationsintensität  $I$ , gemessen als Impulsspannung in  $\mu\text{V}$  (Bamberg-Gerät 1,9 MHz,  $60 \Omega$ ) in Abhängigkeit von der angelegten 50-Hz-Wechselspannung  $U$

1 Schichtdicke  $d = 0,45 \text{ mm}$ ; 2 Schichtdicke  $d = 0,8 \text{ mm}$ ; 3 Schichtdicke  $d = 1,12 \text{ mm}$ ; 4 Schichtdicke  $d = 2,25 \text{ mm}$ ; 5 Schichtdicke  $d = 3,04 \text{ mm}$

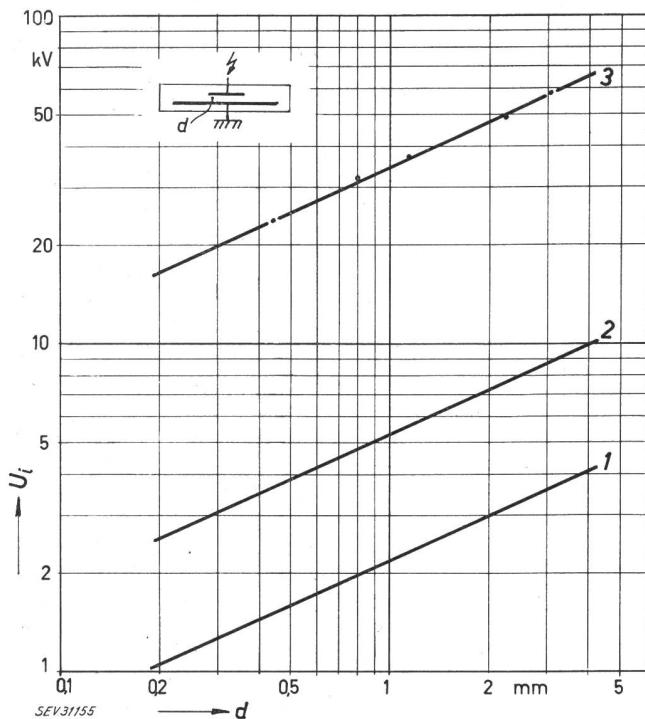


Fig. 4

Ionisations-Einsatzspannungen  $U_i$  an Belagrändern (Widerstands-ränder) von Kondensatordurchführungen

- 1 Ionisationseinsatz in lufthaltigem Hartpapier (Resocel 91), gleichzeitig Koronaeinsatz an freien Belagrändern in Luft;
- 2 Ionisationseinsatz in ölimprägniertem Papier, gleichzeitig Koronaeinsatz an freien Belagrändern unter Öl;
- 3 Ionisationseinsatz in luftfreiem Hartpapier (Resocel 99)

worden sind. Die Versuche zeigen, dass bis zu sehr hohen Gradienten überhaupt keine Ionisation vorhanden ist. Setzt bei weiterer Steigerung die Ionisation ein, so bedarf es nur noch einer kleinen, etwa 10 %igen Spannungserhöhung bis der Durchschlag eintritt.

Trägt man die Ionisations-Einsatzspannungen in Funktion der Schichtdicke auf (Fig. 4), so ergibt sich eine ähnliche Gesetzmässigkeit, wie sie an Durchführungen aus Resocel 91 oder aus ölimprägniertem Papier gefunden worden war [5], nämlich, dass die Einsatzspannungen etwa mit der Quadratwurzel aus der Schichtdicke ansteigen. Der frappante Unterschied gegenüber Resocel 91 liegt nun aber darin, dass die Absolutwerte, in kV ausgedrückt, bei Resocel 99 ungefähr das 16fache betragen. Dieses völlig verschiedene Verhalten weist darauf hin, dass es sich bei dem einen und bei dem anderen Material um zwei voneinander verschiedene Erscheinungen handeln muss. Bei Resocel 91 bezeichnet der Ionisationseinsatz den Beginn des Glimmens der an den Belagrändern unvermeidbaren Lufteinschlüsse. Die Spannung kann darüber hinaus aber um ein Vielfaches gesteigert werden bis der Durchschlag eintritt. Bei Resocel 99 hingegen ist die Ionisationseinsatzspannung praktisch identisch mit der Durchschlagsspannung. Hier handelt es sich also nicht um das Glimmen schon bestehender Hohlräume, sondern bereits um eine teilweise Zerstörung des Gefüges als Einleitung zum Durchschlag. Überschreitet man nämlich den Einsatzpunkt und nimmt die Spannung wieder zurück, so macht man die Beobachtung, dass der Einsatzpunkt auf einen Bruchteil des ursprünglichen Wertes abfällt, weil eben eine irreversible Veränderung stattgefunden hat.

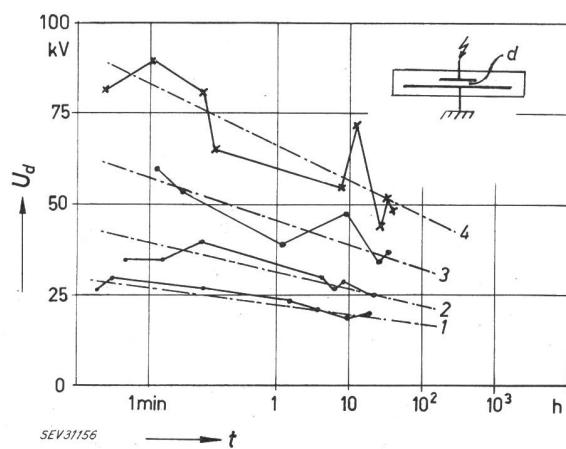
Die Versuche ergeben, dass bei ungefähr gleich hohen Durchschlagswerten beider Materialien dem epoxydurchtränkten Hartpapier infolge seiner Ionisationsfreiheit eine Vorzugsstellung eingeräumt werden muss. Erstaunlicherweise ist die Vorzugsstellung auch gegenüber dem ölimprägnierten Papier vorhanden, denn gemäss Kurve 2 liegt die Ionisations-Einsatzspannung in festem Resocel 99 immer noch bei etwa 6fach höheren Werten als bei ölumgebenen Belagrändern. Es bleibt nun noch zu untersuchen, ob dieser Vorteil auch zum Einsetzen höherer Dauergradienten und damit zu rationellerer Dimensionierung gesteuerter Wickelkörper berechtigt.

## 6. Zeitdurchschläge an den Belagrändern

Es ist bekannt, dass die Glimmeinsatzspannung von Elementardurchführungen mit Belagrändern in Luft (identisch mit Kurve 1 in Fig. 4) für ein Hartpapier vom Typ Resocel 91 einen Grenzwert darstellt in der Weise, dass jede Spannung, die unter diesem Glimmeinsatz liegt, vom Material beliebig lange und ohne die geringste Isolationseinbusse ertragen werden kann. Legt man höhere Spannungen an, so setzt infolge des Glimmens eine Erosion an den Rändern der Belegungen ein, die die Isolation allmählich schwächt und so deren Lebensdauer herabsetzt. Bei noch höheren Gradienten wird die kalte Erosion durch eine Randerwärmung abgelöst, die in relativ kurzen Zeiten zum Durchschlag führt. Jedes Material ist gekennzeichnet durch seine Zeitdurchschlag- oder Lebensdauerkurve, die diese Verhältnisse wiedergibt.

Die Versuche zur Ermittlung der Lebensdauerkurve für Elementardurchführungen aus Resocel 99 erlangten dadurch eine ganz besondere Bedeutung, weil nun erstmals abgeklärt werden konnte, ob ein Isoliermaterial, das in einem Spannungsbereich, in dem es nicht ionisiert, beliebig lange beansprucht werden kann. Wenn kein Glimmen möglich ist, sollte ja weder eine Erosion noch Erwärmung durch die Glimmentladung stattfinden.

Zur Abklärung dieser Frage wurde eine weitere Reihe von Durchführungen mit verschiedenen hohen Gradienten unter Spannung gesetzt. Die Zeiten bis zum Durchschlag, die im Bereich von einigen Sekunden bis zu etwa 100 h lagen, wurden notiert. Die Resultate



Durchschlagsspannung  $U_d$  an den Rändern von Elementardurchführungen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer  $t$

- 1 Schichtdicke  $d = 0,45$  mm;
- 2 Schichtdicke  $d = 0,82$  mm;
- 3 Schichtdicke  $d = 1,5$  mm;
- 4 Schichtdicke  $d = 3,1$  mm

dieser Versuche sind in Fig. 5 aufgezeichnet und zeigen nun überraschend, dass die Lebensdauer auch bei glimmfreiem Hartpapier mit höheren Gradienten stark sinkt und die Lebensdauerkurve damit einen ähnlichen Charakter annimmt wie bei Resocel 91. Die Ionisations-Einsatzspannung ist somit bei Resocel 99 kein Grenzwert, unter welchem man die Durchführung beliebig lang beanspruchen darf. Beispielsweise muss man die Spannung auf die Hälfte der Einsatzspannung senken um nur eine Lebensdauer von 100 h zu erreichen und weitere Reduktionen sind nötig, wenn man auf jahrzehntelange Bewährung dimensionieren will.

Über die Natur des glimmfreien Durchschlages konnten einige interessante Feststellungen gemacht werden. So wurde z. B. beobachtet, dass selbst bei sehr langen Versuchszeiten bis unmittelbar vor dem Zusammenbruch keine Ionisation einsetzte. Die dielektrischen Verluste des Materials waren ferner so gering, dass sich auch bei den hohen Gradienten das Material bis zum Durchschlag nicht erwärmt. Eine weitere Serie von Zeitdurchschlägen in 90 °C heissem Öl ergab denn auch nur wenig niedrigere Durchschlagswerte. Um den Einfluss der Erwärmung auszuschalten, wurde ferner bei den Langzeitversuchen die Spannung in Zyklen von je 1 h Dauer mit anschliessender Ruhepause von 5 h Dauer angelegt. Auch hier waren die aufsummierten Durchschlagzeiten nur unbedeutend länger als beim nicht unterbrochenen Dauerlauf.

Auf Grund dieser Versuche muss man annehmen, dass bei hohen Gradienten trotz fehlender Ionisation ein fortschreitender, akkumulierender Alterungsprozess stattfindet, z. B. Elektrolyse, Abbau der Zellulose, Depolymerisation des Harzes usw., der je nach Feldintensität früher oder später den Zusammenbruch der Isolation zur Folge hat.

Aus allen diesen Ausführungen geht als wichtige Erkenntnis hervor, dass die Ionisations-Einsatzspannung bei Resocel 99 kein Kriterium mehr für die zulässige Dauerspannung darstellt und dass auf Grund der Ionisationsfreiheit noch keine Garantie für eine lange Lebensdauer abgeleitet werden kann. An die Stelle der Einsatzspannung muss als neues Kriterium die genaue Kenntnis der Lebensdauer im Bereich jahrelanger Beanspruchung treten. Zu diesem Zwecke wurden grössere Durchführungen aus Resocel 99 mit verschieden hohen Gradienten bis zu Zeiten von über einem Jahr beansprucht. Es ergab sich, dass die Gradienten im Bereich von 100...10 000 h asymptotisch einem Grenzwert zustreben, der nun als sichere Bemessungsgrundlage für den Netzbetrieb eingesetzt werden konnte.

## 7. Zeitdurchschläge im Zylinderfeld

Der Kabelteil einer isolierten Sammelschiene wird elektrisch anders beansprucht als der Durchführungsteil und bedurfte deshalb einer separaten Untersuchung. Im Kabelteil herrscht ein reines Zylinderfeld, während das Randfeld völlig fehlt. Es stellte sich deshalb die Frage, ob nicht dadurch höhere Radialgradienten in Anwendung kommen konnten. Zur Abklärung wurden Rohre aus Resocel 99 in der Art der Elementardurchführungen, jedoch mit gerundeten Spannungselektroden hergestellt, so dass der Durchschlag im Zylinderfeld erzwungen werden konnte. Untersucht wurde wiederum die Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der Schichtdicke und in Abhängigkeit der Zeit. Die Resultate sind hier nicht wiedergegeben, weil sie sich nur wenig von denjenigen der Elementar-

durchführungen unterscheiden. Es ist eben so, dass bei Resocel 99, als Folge der sehr hohen Ionisations-Einsatzspannung, das Randfeld gegenüber dem Zylinderfeld keine wesentliche Mehrbelastung mehr darstellt und es folgt daraus, dass der Kabelteil somit nach den gleichen Prinzipien bemessen werden darf wie der Durchführungsteil.

## 8. Mechanische Beanspruchungen

Eine der grossen Unbekannten beim Problem der festen Isolation grosser Sammelschienen war der Einfluss der mechanischen Kräfte auf die elektrische Festigkeit. Mechanische Kräfte und Durchbiegungen treten beim Transport, bei der Montage, bei der Erwärmung und namentlich bei Kurzschlüssen auf und es wurde befürchtet, dass durch diese Beanspruchung Risse entstehen könnten, und dass dadurch die Lebensdauer der Isolation infolge des Glimmens stark herabgesetzt werden könnte. Am meisten gefährdet schien die Trennstelle zwischen Kupferrohr und Hartpapier zufolge der verschiedenen Wärmeeigenschaften der beiden Materialien. Man muss sich vorstellen, dass ein etwa 10 m langes Kupferrohr im Kurzschluss plötzlich eine relativ hohe Temperatur annimmt und sich um 1...2 cm ausdehnen möchte. Die Gefahr besteht, dass das Isolierrohr diesen plötzlichen Ausdehnungen nicht zu folgen vermag.

Zur Abklärung des Verhaltens hat man zwei Prinzipien verfolgt, einmal das Prinzip des völlig losen Rohres und zweitens das Prinzip des fest verbundenen Leiterrohres. Beim losen Rohr wird das Isoliermaterial mechanisch nicht beansprucht, doch stellen sich heikle fabrikatorische Probleme und es muss auch die Spannungselektrode ins Isoliermaterial verlegt werden.

Beim fest mit der Isolation verbundenen Leiterrohr wird im Kurzschluss das Rohr in der Länge gestaucht, die Isolation hingegen gestreckt. Die Festigkeitsrechnung zeigt nun, dass bei Erwärmung einerseits der Anpressdruck zwischen Kupferrohr und Isolierkörper ansteigt und der Trennung entgegenwirkt, und dass andererseits die dadurch auftretenden mechanischen Kräfte im Isoliermaterial und an der Trennfläche in den zulässigen Grenzen bleiben. Die Entscheidung fiel deshalb zugunsten des fest verbundenen Rohres, zumal auch die Fabrikation einfacher ist. Die Richtigkeit der Wahl wurde durch die im nächsten Kapitel beschriebenen Typenversuche bestätigt.

## 9. Typenversuche an einem ausgeführten Beispiel

Für die Typenerprobung wurden 3 Schienen nach Fig. 2d mit je einer gestreckten Länge von 7,5 m hergestellt. Als Stromleiter wurde ein Kupferrohr von 52/60 Durchmesser gewählt, die Isolation hatte einen Aussendurchmesser von 132 mm (Fig. 6).

Da die Schiene für eine maximale Betriebsspannung von 125 kV vorgesehen waren, wurden sie mit den üblichen Prüfspannungen von 262 kV, 50 Hz, während 1 min und mit positiven und negativen Stoßspannungen von 450 kV 1/50  $\mu$ s, ferner mit abgeschnittenen Stoß-Spannungen von 520 kV geprüft und zwar in der Anordnung mit aneinanderliegenden Mittelteilen wie sie dem tatsächlichen Betrieb entspricht. Alle diese Spannungen wurden anstandslos gehalten.

Die Messung des Verlustfaktors ergab im Spannungsbereich bis 150 kV den konstanten Wert von

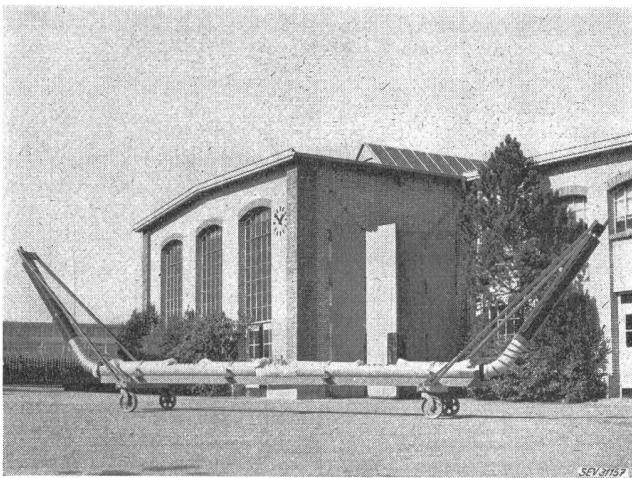


Fig. 6

Isolierte Sammelschiene für 125 kV und 1250 A, montiert auf fahrbarem Transportgestell

Trockene Isolation aus epoxyimprägniertem Hartpapier, Resocel 99

$\operatorname{tg} \delta = 0,47 \%$ . Bis zur gleichen Spannung war die Schiene ionisationsfrei.

Die Messung der Übertemperatur bei Nennstrom wurde ebenfalls mit aneinander liegenden Schienen ausgeführt. Beim Nennstrom von 1250 A stellte sich im heißesten Teil eine Übertemperatur gegen die Umgebung von 36 °C ein, die damit innerhalb des zulässigen Wertes von 40 °C lag.

Die Schienen wurden weiter einem Transport per Eisenbahn über 1000 km mit mehrmaligem Umladen auf Autos unterworfen, ferner wurde eine betriebsgerechte Montage ausgeführt. Die stärksten mechanischen Beanspruchungen entstanden aber bei den Kurzschlussversuchen, die in folgender Weise ausgeführt wurden:

Die Schienen wurden in der richtigen gegenseitigen Lage mit den vorgesehenen Briden und Stützisolatoren in ihrer Lage fixiert. Um die Wirkung der elektromagnetischen Kräfte allein erproben zu können, wurden nun sehr kurze Stöße von nur einigen Perioden Dauer mit überlagertem Gleichstrom appliziert. Die Scheitelwerte betrugen bei diesem Versuch bis zu 100 kA. Um die Auswirkung der plötzlichen Wärmeausdehnung, kombiniert mit den elektromagnetischen Kräften, festzustellen, wurden anschliessend Stoßströme von mehreren Sekunden Dauer erzeugt. Dabei sind Abschaltleistungen von 7500 MVA bei 5 s Dauer von den Sammelschienen anstandslos ertragen worden. Den Schluss der Versuche bildeten Dauerläufe mit verketteter Spannung über mehrere Wochen.

Der Isolationszustand wurde jeweils vor und nach den einzelnen Versuchen überprüft. Alle genannten Versuche vermochten keine Änderung von Kapazität,

Verlustfaktor und Ionisation zu bewirken und die Isolation durfte deshalb als noch völlig intakt bezeichnet werden.

## 10. Zusammenfassung

1. Zur Herstellung von isolierten Sammelschienen für Nennspannungen über 100 kV sind verschiedene Wege gangbar. Die Schiene mit einer festen Hartpapierisolation besticht durch ihre Einfachheit, Unbrennbarkeit und Wartungsfreiheit. Die Entwicklung einer solchen Schiene ist beschrieben worden.

2. Das Hauptproblem stellte das Material und dessen Herstellung dar, weil Form und Grösse der Sammelschienen die Verwendung des klassischen Hartpapiers nicht zulassen. Ein mit Epoxyharz reich durchtränktes Hartpapier (Resocel 99), wie es auch für Spezialdurchführungen verwendet wird, entsprach den Bedingungen.

3. Die Eignung des neuen Materials für den neuen Zweck musste untersucht werden. Es wurde die Ionisation an den Belagrändern und insbesondere der Langzeitdurchschlag im Rand- und Zylinderfeld gemessen, da diese Charakteristik für die Bemessung der Isolation auf Dauerbeanspruchung massgebend ist.

4. Die Sammelschiene mit fester Isolation ist starken mechanischen Beanspruchungen unterworfen, die vor allem bei Kurzschlüssen entstehen. Die Typenversuche an ausgeführten Sammelschienen haben gezeigt, dass alle beim Transport, bei der Montage und im Betrieb zu erwartenden mechanischen Kräfte keine Verminderung der Isolationsfestigkeit zur Folge haben.

5. Auf Grund der ausgedehnten Versuche ist eine erste, 21 Sammelschienen umfassende Anlage dieser Art mit 125 kV Nennspannung ausgeführt und in Betrieb gesetzt worden. Dem Erbauer von Schaltanlagen steht heute ein neues, raumsparendes Konstruktions-element zur Verfügung.

Der Verfasser dankt seinen Mitarbeitern, insbesondere *G. Rossi* und *W. Meyer*, für die Durchführung der Entwicklungsversuche.

## Literatur

- [1] Schiller, H.: Die Transformatoren- und Schaltstation Lavorgo. Bull. SEV 52(1961)13, S. 481...489.
- [2] Imhof, A.: Über neue Konzeptionen und Werkstoffe der Hochspannungstechnik. STZ 55(1958)6, S. 93...119.
- [3] Gutschmann, K. und G. Meiners: Isolationstechnische Probleme bei Verwendung von Kunststoffen in Hochspannungs-Schaltanlagen. ETZ-A 80(1959)20, S. 711...718.
- [4] Haldimann, R. und E. Richon: Isoliermaterial für Hochspannungs-Innenraumanlagen. Bull. SEV 52(1961)4, S. 121...126.
- [5] Kappeler, H.: Progrès réalisés dans la construction des isolateurs de traversée à condensateurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 11. Session 1946, Bd. 2, Rapp. 208.
- [6] Kappeler, H.: Hartpapierdurchführung für Höchstspannungen. Bull. SEV 40(1949)21, S. 807...815.
- [7] Schühlein, E.: Glimmessungen am Hochspannungsdielektrikum. ETZ-A 80(1959)22, S. 777...783.

## Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. H. Kappeler, Vizedirektor der Micafil AG, Postfach Zürich 48.