

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	66 (1975)
<b>Heft:</b>	22
<b>Artikel:</b>	Verwendung von Kunststoffen für die Freiluftisolation
<b>Autor:</b>	Dieterle, W.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-915319">https://doi.org/10.5169/seals-915319</a>

### **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:** 26.01.2026

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

## Elektrotechnik – Electrotechnique



### Internationales Symposium Hochspannungstechnik 1975

Im folgenden werden die drei am ISH 1975 in Zürich gehaltenen Übersichtsvorträge veröffentlicht, ferner Zusammenfassungen der einzelnen Themengruppen unter Berücksichtigung der Diskussionsbeiträge. Die vollständigen wissenschaftlichen Beiträge sind alle im Konferenzband enthalten, der beim Administrativen Sekretariat des SEV, Postfach, 8034 Zürich, zum Preis von Fr. 120.– (+ Versandspesen) bezogen werden kann.

### Verwendung von Kunststoffen für die Freiluftisolation

Von W. Dieterle

Die Erprobung und Verwendung von Kunststoffen als Freiluftisolation wird weltweit mit Erfolg durchgeführt. Bisher haben sich speziell modifizierte Giessharze und – in Kombination mit diesen – Silikonelastomere SE und Polytetrafluoraethylen PTFE bewährt. Die Verwendung von Kunststoffen für Freiluftisolation ist sowohl eine Frage des Materials als der Konstruktion, d. h. der optimalen, «kunststoffgerechten» Formgebung.

Die aus vielen Versuchen und langer Erfahrung über das Fremdschichtverhalten erarbeiteten Resultate bzw. die entsprechenden Folgerungen werden beschrieben. Deren optimale Erfüllung kann nur durch Kunststoffe erreicht werden. Es wird über Kurz- und Langzeiterfahrungen berichtet.

#### 1. Einleitung

Wer sich mit Fragen der Freiluftbeständigkeit von Isolationen zu befassen hat, weiß, wie außerordentlich breit und vielschichtig dieses ganze Gebiet ist. Die bisher gemachten Erfahrungen mit Freiluftversuchen sind sehr vielfältig und je nach Art des verwendeten Kunststoffes, des Konstruktionsprinzips, der Formgebung, dem Aufstellungsort – um nur einige wenige der Beeinflussungsfaktoren zu nennen – sehr unterschiedlich.

Seit vielen Jahren wird weltweit, sowohl von Kunststoffherstellern als auch von Kunststoffverbrauchenden Firmen der Elektroindustrie versucht, diese Werkstoffe für Freiluftisolationen zu verwenden. Mit den Problemen der Freiluftbeständigkeit befassen sich verschiedene Gremien, so z. B. die Gruppe 15-06 der CIGRE auf internationaler Ebene.

Die Probleme der Freiluftbeständigkeit sind bei Isolatoren (Stützer oder Hängeisolatoren) am meisten ausgeprägt und die Anforderungen ganz besonderer Art. Da Isolatoren zudem beim praktischen Einsatz weitaus häufiger sind als andere mögliche Freiluftanwendungen (Wandler, Schalter, Kabelendverschlüsse und Durchführungen), sollen die not-

621.315.616.9  
Les essais et l'utilisation de matières plastiques pour l'isolation extérieur s'effectuent à l'échelle mondiale et sont réalisés avec succès. Jusqu'à ce jour des résines de coulée spécialement modifiées ont fait leur preuve et, en combinaison avec celles-ci, des siliconeélastomères et des polytetrafluoréthylènes ont été employés. L'emploi de matières plastiques pour des isolements extérieurs est aussi bien une question de matériaux que de construction, soit du façonnage optimum résultant d'une utilisation correcte des matières plastiques.

Les résultats et les conclusions correspondantes sont décrits à la suite de nombreux essais et de longues expériences relatifs au comportement de couches étrangères. La réalisation optimale ne peut être atteinte qu'avec des matières plastiques. Les expériences à court et à long termes sont expliquées.

wendigen Überlegungen und Versuche am Beispiel von Isolatoren angestellt werden. Der Aufsatz soll über die derzeitige Situation und die Aussichten von Kunststoffen für Freiluftisolationen orientieren.

Dank allseitig intensiver Forschung und Entwicklung neuer Kunststoffe, Modifikation bestehender Kunststoffe, «Kunststoffe nach Mass», verbesserter Verarbeitungsverfahren, neuer Konstruktionen haben sich die Chancen für die Bewahrung ausgewählter Kunststoffe für Freiluft in den letzten Jahren stark verbessert (Fig. 1). Welches sind die Ursachen, die zu dieser Entwicklung geführt haben, warum werden Kunststoffe für Freiluftisolationen verwendet?

Einerseits sind hierfür die positiven Erfahrungen mit Kunststoffen, vor allem Giessharz-Systemen, bei Aufstellung in trockenen bis feuchten Innenräumen als Anreiz auch für Freiluftanwendungen zu werten. Anderseits haben die Nachteile der bisher verwendeten Werkstoffe Porzellan und Glas die Versuche zur Verwendung im Freien kräftig angeregt. Es ist nicht verwunderlich, dass schon relativ früh versucht wurde, gewisse Nachteile von Porzellan durch dessen Kombination mit Kunststoffen zu beheben, indem ein Porzellans-

Isolator (Schirm) durch einen Kern aus GFK (Glas + Epoxidharze EP) verstärkt wurde oder später, dass Porzellan-Isolatoren einen Überzug mit Silikonharzen erhielten.

Als nächster Schritt hat sich dank einer Reihe interessanter Eigenschaften und offensichtlicher Vorteile die ausschliessliche Verwendung von Kunststoffen angeboten:

- grosse Möglichkeiten der Gewichtersparnis, bis 1 : 10 bei 145-kV-Isolatoren und noch mehr bei höheren Spannungen [1]<sup>1)</sup>
- leichte Formgebung, bessere Dimensionsstabilität, engere Toleranzen
- einfache Herstellung, kurze Fertigungszeiten bei minimalem Ausschuss
- mechanisch hohe Belastbarkeit, besonders bei Verwendung eines GFK-Kernes
- schlanke und damit ästhetische Bauweise
- dank leichterer Formgebung und damit Gewichts- bzw. Materialersparnis und einfacherer Herstellungsmöglichkeiten eventuell günstigerer Preis und leichtere, einfachere Installation
- das Einkleben von Armaturen fällt weg

Neuerdings werden auf Grund der intensiv vorangetriebenen Entwicklung als weitere Vorteile von Kunststoff-Isolatoren genannt:

- deren extreme mechanische Festigkeit, was besonders für UHV-Übertragung eine wesentliche Voraussetzung ist; Kunststoff-Isolatoren bieten ganz neue Möglichkeiten der Dimensionierung für Dauer-, Ausnahme- und Katastrophenlast

1) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

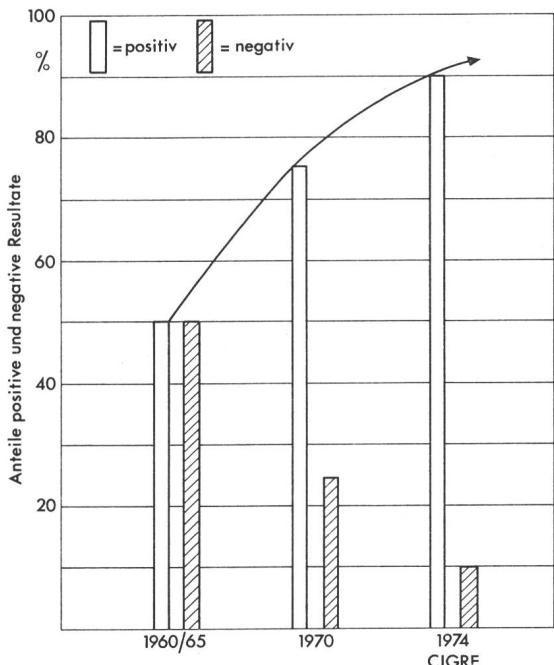


Fig. 1 Entwicklung von Kunststoffisolatoren für Freiluft, umfassend alle Arten von Werkstoffen und Formen (Schätzung)

Zunahme der positiven Resultate

- Abbau der Vorbehalte, mehr Versuche
- Zwang wegen Trend zu UHV
- Neue Kunststoffe bzw. Formulierungen
- Neue Verarbeitungsmethoden (Systeme)
- Konsequente Ausnutzung aller Vorteile von Kunststoffen
- Ausfälle durch
  - Mechanisches Versagen
  - Thermisches Versagen (dielektrische Breakdowns)
  - Kriechen
  - Erosion
  - Überschlag
  - Ungeeignete Kunststoffe
  - Ungeeignete Verarbeitung
  - Althergebrachte (nicht materialgerechte) Formgebung

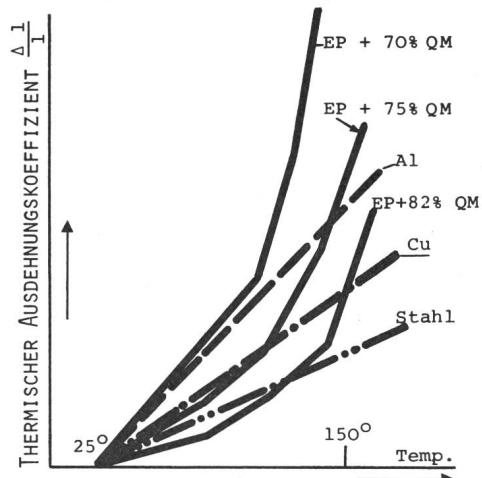


Fig. 2 Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\Delta l/l$  von EP-Harz, gefüllt mit Quarzmehl QM [2]

– die Möglichkeit der Erstellung einer einheitlichen Bauform bis zu grossen Baulängen; 8...10 m lange Isolatoren wurden bereits realisiert

– die Möglichkeit des Einbaues in neuartige, kompakte Freileitungen, was den Umbau von Freileitungen auf höhere Spannungsebenen ohne Verbreiterung des Trassees ermöglicht, wodurch die spezifische Übertragungsleistung wesentlich gesteigert werden kann

– die vollständige Bruchsicherheit dank hoher Schlagfestigkeit sowie die Sicherheit gegen Beschuss und Lichtbogen, was sich letzten Endes als erhöhte Betriebssicherheit auswirkt

– die Tatsache, dass kurzzeitige hohe Belastungswerte ohne Schaden aufgenommen werden können

Neben diesen offensichtlichen Vorteilen, welche Kunststoffe bei richtiger Anwendung zu bieten vermögen, scheinen sich noch weitere günstige Eigenschaften vorteilhaft auszuwirken. Erwähnt seien:

– die Möglichkeit leichter und schneller Reparaturen oder Ausbesserungen von beschädigten Giessharz-Schirmen unter Verwendung kalthärtender Systeme

– die Möglichkeit der Herstellung einer guten Verbindung mit den metallischen Armaturen und des Einbaues von Steuerbelägen

– dank der geringeren spezifischen Wärme und Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe ist die Kondenswasserbildung, die z. B. bei einem Wetterumsturz eine grosse Gefahr darstellen kann, wesentlich reduziert

– durch Verwendung geeigneter Füllmittel ist es insbesondere bei EP-Giessharzen möglich, Werte des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu erreichen, die demjenigen von Kupfer oder Aluminium nahekommen (Fig. 2), womit mechanische Spannungen um ein- oder angegossene Metallteile (Armaturen) und damit Teilentladungen vermieden werden können [2]

– aus verschiedenen vergleichenden Versuchen ging hervor, dass Kunststoff-Isolatoren weniger Unterhalt benötigen als Porzellan-Isolatoren. Bei guter Materialauswahl und Formgebung ergaben die Versuche, dass die bei Porzellan-Isolatoren notwendigen periodischen Unterhaltsarbeiten (Reinigung, Oberflächenbehandlung) bei Kunststoff-Isolatoren entfallen [3; 4]

– bessere elektrische Eigenschaften; Versuche ergaben, dass Kunststoff-Isolatoren eine geringere spezifische Kriechweglänge benötigen.

Falls sich diese bemerkenswerten Feststellungen in weiteren Versuchen erhärten, dürfen sie als weitere gewichtige Vorteile von Kunststoff-Isolatoren gewertet werden.

Neben dieser imposanten Liste von Vorteilen von Kunststoffen für deren Anwendung als Freiluftisolation tritt aber

Messung	Fe	Cu	Zn	Mg	Ca	SiO <sub>2</sub>	S	Na	Co
in %									
Isolator									
1	14	0,2	0,5	0,3	0,6	56	1,4	0,1	0,15
2	35	0,3	0,45	0,75	0,5	23	6,1	0,15	0,20

deren wohl einziger Nachteil, ihr weniger gutes Verhalten unter dem Einfluss von Klima und Verunreinigungen. Diesem nachteiligen Umstand muss durch sorgfältige Materialauswahl und Formgebung Rechnung getragen werden. Die optimale Formgebung folgt aus den Erkenntnissen aus vielen Versuchen über das *Fremdschichtverhalten*. Diese müssen bei der Verwendung von Kunststoffen konsequent und optimal ausgenutzt werden.

## 2. Freiluftbedingungen und Fremdschichtverhalten

Ein im Freien zur Aufstellung bzw. Aufhängung gelgender Isolator ist sowohl der Verschmutzung als auch der ganzen Palette möglicher klimatischer Einflüsse (Temperatur, Feuchtigkeit, Nebel, Regen, Wind usw.) ausgesetzt, wobei diese Einflüsse – je nach geographischer Lage, Umgebung, Jahres- und Tageszeit – ganz beträchtlichen Schwankungen unterworfen sind. Als Ursachen oder Quellen möglicher Verschmutzungen kommen in Frage:

- die *Industrie*, vor allem die chemische Industrie, Zementfabriken, Stahlwerke und Minen
- die Ablagerung von *Salz* bei Aufstellung in Meereshöhe
- *Staub und Abrieb* (traffic pollution) bei Aufstellung in der Nähe von Autobahnen.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass Industrieverschmutzung die schlimmsten Folgen hat, weil sie hartnäckiger an der Isolatoroberfläche haftet.

Über die Mengen von Ablagerungen als Folge der Luftverschmutzung verschiedenster Art liegen Zahlen vor. In besonders gefährdeten Gebieten sind es besorgniserregende Werte. Hier einige Zahlen:

In der BRD werden pro Jahr  $20 \cdot 10^6$  t (800 000 Güterwagen) Staub, Abgase, Russ und Giftstoffe ausgestossen und abgelagert. In Clayton (UK), wo sich eine Freiluft-Prüfstation befindet, misst man pro m<sup>3</sup> Luft etwa 300 mg Schwefeldioxyd und 300 mg Rauchgase. Als feste Ablagerungen (Staub) wurden 500 kg/km<sup>2</sup>/Monat ermittelt.

Leider bestehen über die auf *Isolatoren* effektiv abgelagerten Mengen wenig Unterlagen, dagegen ist die Art der Verschmutzung meist bekannt. Als hauptsächliche Bestandteile werden Schwefeldioxyd, Kohlenstaub, Eisenoxide, Streugut (Natrium-Calciummischungen) und Abrieb von Strassen und Autobahnen festgestellt.

Aus Messungen, die 1969 in Finnland an Ablagerungen auf Isolatoren durchgeführt wurden, sind die Zahlen der Tabelle I bekannt. Aus langjährigen Untersuchungen (1933–1952) über den Einfluss des Abstandes vom Aufstellungsort bis zur Quelle der Verschmutzung konnten für verschiedene Verschmutzungsarten die Gefahrenzonen für Überschläge als Folge der Verschmutzung nach Tabelle II gebildet werden.

Für das Freiluftverhalten eines Isolators ist aber nicht in erster Linie Menge und Art der Ablagerung sondern die

unter dem zusätzlichen Einfluss von Feuchtigkeit sich bildende Oberflächen- oder *Fremdschichtleitfähigkeit* verantwortlich. Die klimatischen Bedingungen sind außerordentlich verschieden. So können Temperaturen im Bereich von etwa –65 bis +58 °C (Schweiz –41 bis +39 °C), relative Luftfeuchtigkeiten von 3 bis 100 % und Regenmengen bis zu 50 mm/h und mehr auftreten.

Ein direkter, chemischer Angriff durch eine oder mehrere der möglichen Ablagerungen, auch unter dem Einfluss von Feuchtigkeit, Temperatur und Sonneneinstrahlung (UV) darf sowohl für konventionelle Isolationsmaterialien als auch für die in Frage kommenden Kunststoffe ausgeschlossen werden. Die Fremdschichtleitfähigkeit darf deshalb unter Berücksichtigung des jeweiligen Feuchtigkeitsgehaltes auch als Mass für die Verschmutzung der Isolatoroberfläche betrachtet werden.

Die an verschiedenen Stellen der Isolatoroberfläche vorliegende Fremdschichtleitfähigkeit schwankt, da Verschmutzung und Benetzung nicht gleichmässig erfolgen. Die Schwankungen sind im allgemeinen nicht sehr gross. Schmidt und Schwab [4] haben durch viele Messungen festgestellt, dass z. B. 70 % aller gemessenen Einzelwerte der Leitfähigkeit zwischen 4 und 15 µS lagen. Unter dem Einfluss von Lage, Wind und Feldkonzentrationen können sich wesentlich grössere Unterschiede der Ablagerungen und damit der Fremdschichtleitfähigkeit ergeben. Auch ist zu berücksichtigen, dass die natürlichen Fremdschichtbedingungen selbst am gleichen Aufstellungsort sehr vielfältig sein können, was u. U. durch Erfassung des Gesamtverhaltens der verschiedenen Bedingungen während einer grösseren Zeitspanne (z. B. eines Jahres) zu berücksichtigen wäre.

Dass rasche Änderungen der klimatischen Verhältnisse, insbesondere rasche Temperaturänderungen (z. B. bei Föhn-einbruch) mit ihren Folgen von Kondenswasserbildung (Tau), das plötzliche Auftauen eines Rauhreifbelages oder plötzlich eintretende hohe Niederschlagsmengen nach langer Trockenzeit (Wüstenverhältnisse) die Fremdschichtverhältnisse im Sinne einer grossen, meist unzulässigen Erhöhung der Fremdschichtleitfähigkeit gefährlich beeinflussen können, ist durch unliebsame Ausfälle von Isolatoren mehrfach

Art der Verschmutzung	Gefahrenzone, Radius in km
Chemie und Metallurgie	1,5
Chemie	1,2
Chemie und Fernheizungen	0,8
Heizungen	0,5
Metallurgie	0,6
Gaswerke	0,8
Zementfabriken	0,5
Minen	0,1

Tabelle III

Aufstellungsart	Fremdschichtleitfähigkeit μS bei RT (Raumtemperatur)
in ländlicher Gegend	2
in städtischer Agglomeration	5
Rand- und Industriezonen	10
Industriezone	20
Industriezone mit schwerer Verschmutzung	40

bewiesen worden. Über die Werte der Schichtleitfähigkeit gibt Tabelle III [5] einen Anhaltspunkt.

Für verschiedene Arten und Mengen der Verunreinigung wurden Werte der Fremdschichtleitfähigkeit nach Fig. 2 [6] gemessen. Man sieht daraus, dass die Schichtleitfähigkeit bei den üblichen Schichtdicken hauptsächlich von der Menge und erst in zweiter Linie von der Art der Verunreinigung (Salz) abhängig ist. Bei hohen Werten von Salzablagerungen in Meeresnähe und genügend Feuchtigkeit können aber auch wesentlich höhere Werte der Schichtleitfähigkeit gemessen werden.

Dass für die Ausbildung einer Fremdschicht, deren Verteilung, Leitfähigkeit und Gleichmässigkeit, aber auch die Oberflächenbeschaffenheit des Isolators massgebend ist, darf nicht ausser acht gelassen werden. Hier spielen Fragen der Rauhigkeit (und damit des Verhaltens gegen UV-Einwirkung) sowie der Benetzung eine Rolle. Unzulässig hohe Fremdschichtleitfähigkeit führt zur Zerstörung der Isolatorfläche, zum teilweisen oder totalen Überschlag des Isolators. Es fehlt daher nicht an Massnahmen, um die Leitfähigkeit in Grenzen zu halten:

– Aerodynamisch günstige Formgebung des Isolators (Windkanalversuche), um Ablagerungen bei Windeinfluss gering zu halten.

– Waschen der Isolatoroberfläche, wobei sowohl Waschen unter Betriebsverhältnissen mittels automatischer Anlagen als auch nach Ausserbetriebsetzung gebräuchlich ist. Kräftiger Regen kann eine erwünschte Wirkung auf die Schichtleitfähigkeit des Isolators ausüben. Da aber die vor dem Wind geschützten Stellen des Isolators eine höhere Verschmutzung aufweisen und durch den Regen bei gleichgerichtetem Wind nicht genügend gewaschen werden, ist die Reinigungswirkung durch Regen allein doch eher fraglich. Besonders gefährlich ist – bei bereits vorhandener Schmutzschicht – der erste Moment eines relativ stark einfallenden Regens, wo hohe Verunreinigung und viel Wasser zusammenwirken, ein Reinigungseffekt aber noch nicht stattgefunden hat.

– Bei den klassischen Isolatoren wurde zuweilen versucht, durch geeignete Behandlung die Isolatoroberfläche wasserabstossend zu machen. Als geeignete Materialien haben sich Wachse und Silikonfette bewährt. Vor Aufbringen eines Schutzüberzuges muss die Oberfläche gut gereinigt werden. Der Schutzfilm hat die Aufgabe, die Bildung einer zusammenhängenden Wasserkontur zu verhindern, damit sich kein leitender Pfad über die Isolatoroberfläche ausbilden kann.

– Für das Waschen von Isolatoren unter Spannung wird Wasser geringer Leitfähigkeit und eine bestimmte, minimale Strahlänge benötigt. Für Isolatoren einer 500-kV-Leitung z. B. muss die Strahlänge  $\geq 12$  m und der spezifische Widerstand des Wassers  $\geq 400 \Omega \text{ cm}$  betragen.

Bei zu hoher Fremdschichtleitfähigkeit findet als Folge eines erhöhten Oberflächenstromes eine Temperaturerhöhung der Fremdschicht und damit ein teilweises Verdampfen deren Feuchtigkeit statt. Da weder die Verunreinigungen noch der Oberflächenstrom sich gleichmässig über die

Isolatorenoberfläche verteilen, trocknet die Oberflächenschicht ungleichmässig. Es entstehen trockene und nasse Bereiche. Die nassen Bereiche (hohe Leitfähigkeit) wirken wie vorgeschoßene Teilelektroden und können Teilentladungen auslösen, die schliesslich zum Totalüberschlag führen. Sind jedoch schon vor Anlegen der Spannung eine oder mehrere Trockenstellen auf der Isolatorfläche vorhanden, so können bereits diese Stellen einen Teillichtbogen zünden. Stellen hohen Oberflächenstromes und damit rascher Trocknung sind die Strunkpartien mit relativ kleinem Durchmesser, ferner solche in der Nähe der Elektroden, wo der Übergangswiderstand zum Oberflächenbelag gross sein kann. Hier entstehen die ersten Trockenstellen und werden durch Teilentladungen überbrückt. Aber gerade an solchen Stellen (Armaturen) kann als Folge von Feldverzerrungen die Feldstärke extrem hoch werden. Vom Strunk wandern die Entladungen zu den Schirmrändern. Nach mehreren Halbschwingungen kann sich dann eine Entladung zwischen den Schirmrändern einstellen, was eine weitere Verkürzung der totalen Kriechweglänge und damit den totalen Überschlag bedeutet.

Eine weitere Ursache erster Teilentladungen scheint die durch das elektrische Feld ausgelöste Bewegung der in Nähe der Elektroden vorhandenen Wasserteilchen zu den Elektroden hin zu sein. Auch diese verursacht eine ungleichmässige Verteilung der Oberflächenleitfähigkeit.

Die Fusspunkte von Teillichtbogen erreichen hohe Temperaturen, sie sind von einer Art «Dampfblase» umhüllt und anfänglich von der Fremdschicht getrennt. Über dieser Dampfblase liegt ein grosses Temperatur- und Spannungsgefälle, so dass sie ionisiert. Der Fusspunkt wandert und der Vorgang der Teilentladung kann sich wiederholen. Wenn der Strom der Teilentladungen einen gewissen Wert überschreitet, wandert der Fusspunkt so schnell, dass nicht genügend Zeit zur Verfügung steht, um den Isolierstoff an seiner Oberfläche zu zerstören. Bei kleineren Teillichtbogenströmen kann jedoch die Lage des Fusspunktes stabil bleiben, was eine Zerstörung des Isolierstoffes zur Folge haben kann.

Anteil der Störungsursachen pro 100 km Freileitungslänge [7]

Tabelle IV

Ursache	1967	1968
Gewitter	2,6	1,3
Sturm	2,3	1,1
Fremdschicht	0,7	0,5
Zusatzzlast	0,03	0,18
Feuchtigkeit	0,11	0,1
Kälte	0,02	0,06
Hitze	0,03	0,05
Andere	0,05	0,03

Anzahl Ausfälle als Folge von Fremdschichteneinflüssen [8]

Tabelle V

Übertragungs-Spannung (kV)	vor 1965	1965	1966	1967	1968
12	0	4	87	105	–
27	1	41	44	56	–
115	6	4	66	89	–
138	3	33	80	27	–
230	8	58	83	194	34
345	–	3	4	3	1
500	–	–	–	2	84

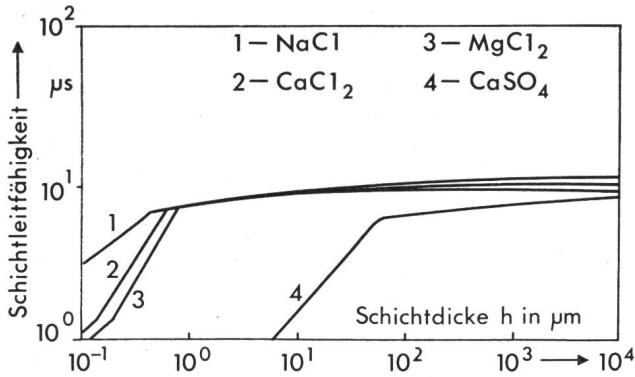


Fig. 3 Fremdschichtleitfähigkeit in Abhängigkeit der Schichtdicke für verschiedene Verunreinigungen, gemessen bei 18 °C, Salzbelag 0,1 g/m<sup>2</sup> [6]

Die Teillichtbögen schalten sich mit den verbliebenen, nassen und damit noch leitfähigen Stellen, die als vorgeschoßene Elektroden wirken, elektrisch in Serie. Unter geeigneten Bedingungen können sie sich verlängern, was zu einer weiteren Verkürzung der totalen Kriechweglänge und damit schliesslich zum Überschlag des Isolators führen kann. Man erkennt daraus, dass eine Fremdschicht mit trockenen Unterbrechungsstellen die Isolierfähigkeit eines Isolators in höherem Masse vermindern kann als eine homogene, zusammenhängende Schicht.

Die Bedeutung der Fremdschicht für Störungen geht aus Tabelle IV hervor. Eine weitere Statistik [8] macht Angaben über die Zahl von Ausfällen als Folge von Fremdschichteneinflüssen in Funktion der Spannung (Tabelle V). Die Fremdschicht-Überschläge längs, auf oder nahe der Isolatoroberfläche werden praktisch nur von Formgebung und Fremdschicht beeinflusst. Das Isoliermaterial selbst spielt dabei eine untergeordnete Rolle, nämlich nur insofern, als es für die Ausbildung einer Fremdschicht bezüglich Oberflächenbeschaffenheit, Rauigkeit und Benetzbarkeit verantwortlich ist.

### 3. Resultate der Fremdschichtversuche

Die Zusammenhänge zwischen Fremdschicht-Überschlag, Verschmutzungsgrad und Feuchtigkeit sind heute weitgehend bekannt. Die entscheidende Grösse ist dabei die Oberflächen- oder Fremdschicht-Leitfähigkeit. Diese hängt einerseits von der Schichtdicke der Verschmutzung (Fig. 3) ab. Ferner nimmt sie mit wachsendem Schirmdurchmesser stark ab (Fig. 4).

Besonders interessant sind die Resultate von Messungen über Leitfähigkeit und Zeit der Trocknung durch die Oberflächenströme, sowohl am Kern oder Strunk des Isolators als auch an den Schirmen, und zwar jeweils in Funktion deren Durchmesser (Fig. 5). Der Trocknungseffekt kann recht bedeutend sein, weil sich durch den Oberflächenstrom die Temperatur in der Fremdschicht und damit rückwirkend wieder die Leitfähigkeit erhöht. Als Folge kann z. B. beim Messen der Fremdschicht-Überschlagsspannung ein höherer Wert erhalten werden, weil dabei der Isolator rascher trocknen kann und seine Fremdschicht-Leitfähigkeit abnimmt.

Schliesslich interessiert aber das Spannungsverhalten des Isolators: Die Fremdschicht-Überschlagsspannung nimmt mit zunehmender Fremdschicht-Leitfähigkeit oder Verschmutzung exponentiell ab (Fig. 6).

Fig. 7 zeigt Resultate von Versuchsreihen der University of Manchester, Institute of Science and Technology [9]. Danach nehmen der kritische Ableitstrom wie auch die kritische Kriechweglänge mit zunehmendem Schirm-Durchmesser ab, was eine Erhöhung der Fremdschicht-Überschlagsspannung bewirkt.

Eine allgemeine Darstellung der Abhängigkeit des Fremdschicht-Überschlags von Verschmutzung und Feuchtigkeit ist im dreidimensionalen Diagramm Fig. 8 [10] enthalten. Ferner ist die von Verma [11] aus einer grossen Zahl von Versuchen an verschiedenen Langstab-Isolatoren über die Häufigkeit des Fremdschicht-Überschlags durchgeführte Messreihe von besonderem Interesse (Fig. 9).

### 4. Folgerungen für Konstruktion und Formgebung

Das Fremdschichtverhalten eines Isolators ist weitgehend eine Frage der Oberflächenbeschaffenheit und der Formgebung. Aus den vorstehenden Resultaten lassen sich einige nützliche Folgerungen ziehen: Die Oberfläche eines Isolators soll glatt und schlecht benetzbar sein; damit wird die Ablagerung von Schmutz erschwert. Was die Formgebung betrifft, ist ersichtlich, dass

- eine hohe Kriechweglänge bei sonst «vernünftigen» Isolatordimensionen anzustreben ist
- einmal abgelagerter Schmutz leicht und gründlich, möglichst natürlich, d. h. durch Regen, abwaschbar sein soll
- die Trocknung oder die Bildung trockener Stellen erleichtert werden soll

Diese Forderungen können durch die folgenden konstruktiven Massnahmen erfüllt werden:

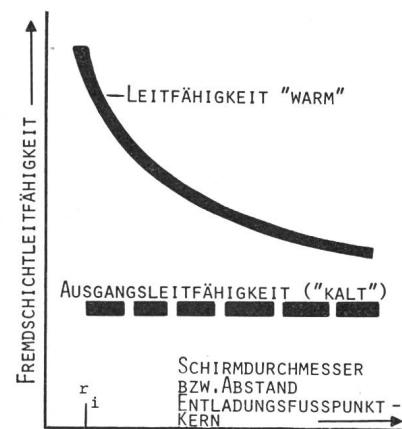


Fig. 4 Oberflächenleitfähigkeit in Abhängigkeit des Schirmdurchmessers  
Die Fusspunkte der Entladung wandern nach dem Rand der Schirme, wo es u. U. zum Überschlag von Schirm zu Schirm kommen kann.

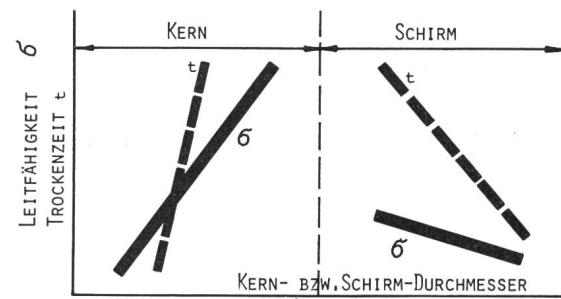


Fig. 5 Fremdschichtleitfähigkeit  $\sigma$  und Trocknungszeit  $t$  von Kern und Schirmen als Funktion deren Durchmesser

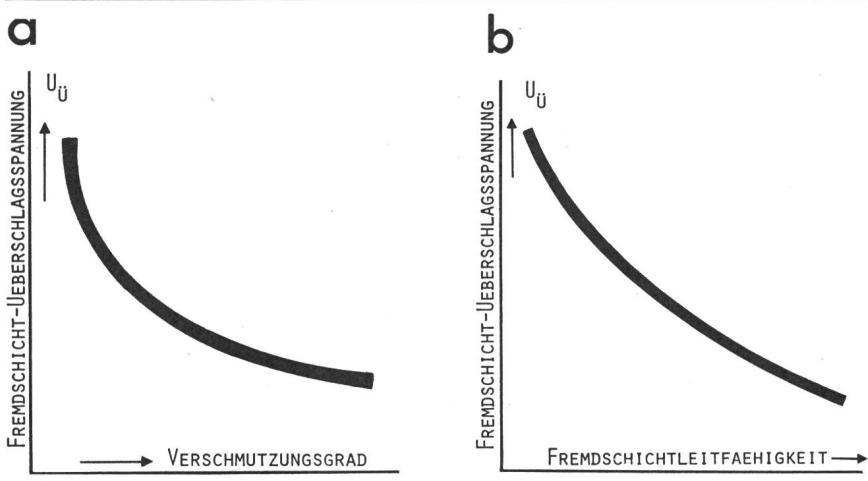


Fig. 6  
Fremdschicht-Überschlagsspannung  
a) in Funktion des Verschmutzungsgrades  
b) in Funktion der Fremdschicht-Leitfähigkeit

- Kleine Strunk-Durchmesser
- Unterteilung der Isolatoren durch viele Schirme
- Große, eventuell unterschiedliche Schirm-Durchmesser
- Flache, dünne Schirme  
(besseres Selbstreinigungsvermögen)
- Geneigte Schirme

Die Frage der Notwendigkeit geneigter Schirme oder gar des optimalen Neigungswinkels scheint noch nicht restlos abgeklärt zu sein. Tatsächlich stehen sich hier verschiedene Anforderungen, wie z. B. Fragen der Verschmutzung bzw. der Bildung von Schutzräumen und des Selbstreinigungsvermögens sowie solche der Herstellung entgegen. Die jeweilige Aufstellungsart bzw. Betriebsbedingung wird zu berücksichtigen sein, was auch für die wechselweise Verwendung von Schirmen mit großem und kleinerem Durchmesser zutrifft. Es scheint ein optimaler Wert des Schirmabstandes bzw. für das Verhältnis Schirmausladung zu Schirmabstand zu bestehen.

##### 5. Oberflächennahe Vorgänge bei Kunststoffen

Neben der Gefahr der Entstehung eines Fremdschicht-Überschlages besteht die Gefahr der Zerstörung des Isoliermaterials. Dies kann eintreten als Folge einer Temperatursteigerung durch zu hohen Kriechstrom oder wenn die Teillichtbögen über entstandenen Trockenstellen ihre Fußpunkte nicht schnell genug wechseln. Bei dieser Beanspru-

chung sind organische Materialien mehr gefährdet, da durch die lokale Überhitzung Zersetzung der Moleküle oder Verkohlungen entstehen. Nicht flüchtige Zersetzungprodukte können mit den Verkohlungen zusammen einen Kriechweg bilden. Es ist aber auch möglich, dass der

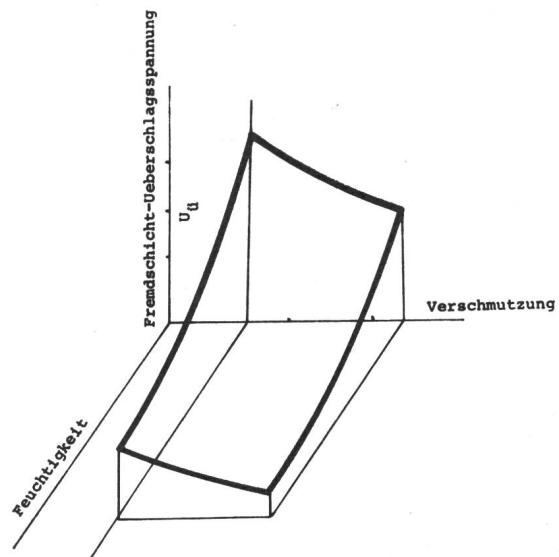


Fig. 8 Dreidimensionale Darstellung des Fremdschichtverhaltens einer Isolatoreneinheit [10]

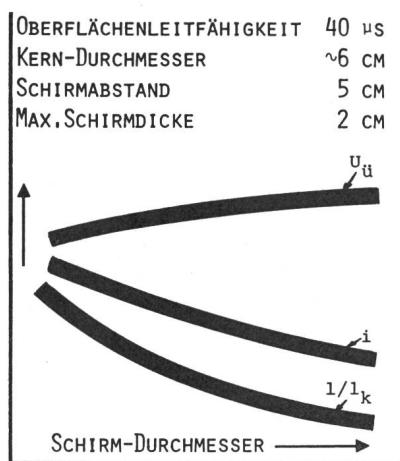


Fig. 7 Kritischer Ableitstrom  $i$ , kritische Kriechweglänge  $1/I_k$  und Überschlagsspannung  $Uü$  in Funktion des Schirmdurchmessers

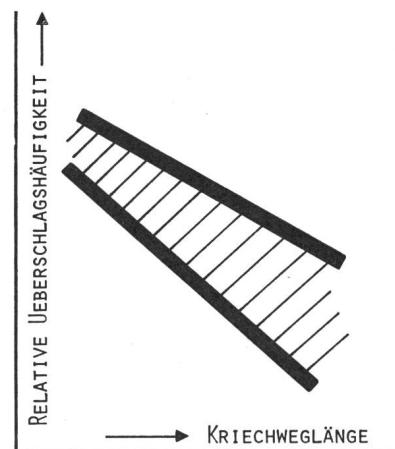
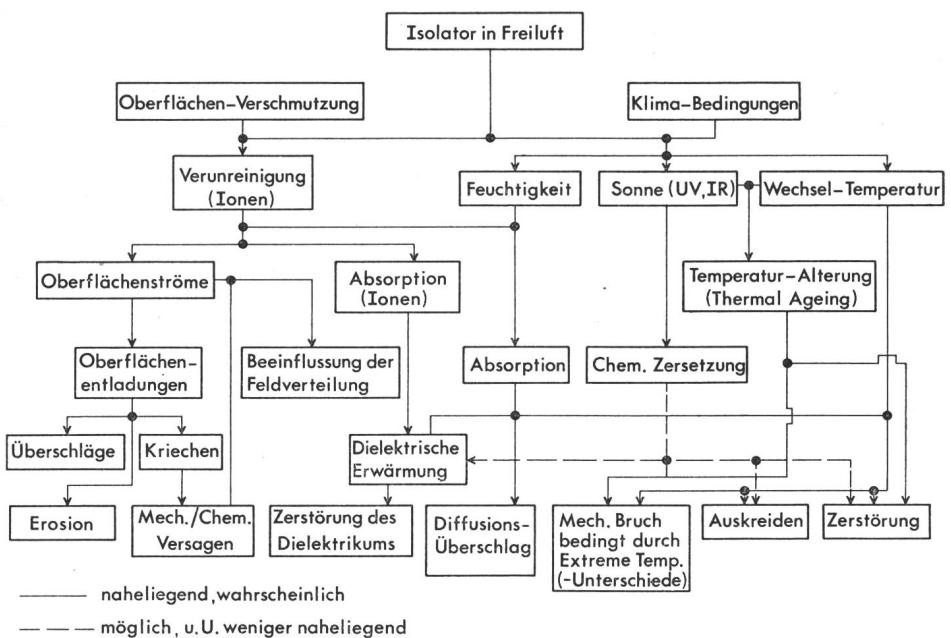


Fig. 9 Häufigkeit des Fremdschicht-Überschlages in Abhängigkeit der Kriechweglänge verschiedener Langstabisolatoren [11]  
(Anzahl Überschläge geteilt durch Summe aller Überschläge)

Fig. 10  
Fremdschicht-Bedingungen und mögliche Folgen



Lichtbogen weitere Zersetzungprodukte verflüchtigt oder das Material an seinem Fusspunkt erodiert. Beide Erscheinungen sind unerwünscht. Während eine Erosion in kleinen Grenzen noch zugelassen werden kann, ist die Ausbildung eines Kriechweges nicht zulässig. Die Forderung nach einem kriechstrombeständigen Werkstoff für Freiluftfeinsatz ist wohl eine selbstverständliche Voraussetzung, jedoch nicht ausreichend für einen erfolgreichen Einsatz in der Praxis. Es ist nämlich durchaus möglich, dass ein sehr kriechstrombeständiges Material in einem nicht optimal ausgebildeten Isolator zu schlechteren Resultaten führt als ein weniger kriechstrombeständiges Material, wobei alle Bedingungen bezüglich Formgebung optimal erfüllt sind.

Die bisherigen Erfahrungen mit Kunststoffen zeigen, dass nicht die Erosionsbeständigkeit, sondern die Kriechstrombeständigkeit und die Wetterbeständigkeit massgebend sind. Kriechen ist ein ausgesprochener Oberflächeneffekt, Erosion hingegen ein Volumeneffekt. Dementsprechend sind auch die Prüfmethoden zu werten. Wie vielfältig und komplex die Zusammenhänge sein können, geht aus Fig. 10 hervor.

## 6. Material- und Objektprüfungen

Es ist deshalb nicht zu verwundern, wenn zur Vorabklärung des Verhaltens von Materialien unter Fremdschichteneinfluss verschiedene Prüfmethoden und zwar am Material, an Modellen und am Objekt selbst, entweder unter dem Einfluss natürlicher oder künstlicher Beschmutzung angewendet werden, wobei in jedem Fall versucht wird, die Verhältnisse des Fremdschichtverhaltens der Praxis möglichst annähernd zu simulieren (Tabelle VI). Die Prüfmethoden erlauben zwischen Erosion und Kriechen zu unterscheiden, haben aber gegenüber der praktischen Beanspruchung den Nachteil, dass die Fremdschichtbedingungen andere, nämlich strengere, sind. Weitere Differenzen gegenüber dem Verhalten in Freiluft ergeben sich dadurch, dass im Labor der Nebel wesentlich dichter ist als im Freien und seine Verteilung gleichmäßig nach allen Seiten erfolgt, währenddem im Freien eine meist einseitig, durch Wind beeinflusste Einwirkung erfolgt. Jeder dieser Labor-Kurzzeittests ist auf einen

bestimmten Zerstörungsmechanismus ausgerichtet. Darin liegt die Ursache der recht grossen Differenzen in den Resultaten, so dass keine Methode allein für eine endgültige Beurteilung des Freiluftverhaltens verwendet werden kann. Eine Kombination aller Vorprüfungen ist notwendig, nur der Werkstoff, der in allen Prüfungen gesamthaft am besten abschneidet, kommt für weitere Freiluft-Versuche und -Anwendungen in Frage.

Aber auch andere Wettereinflüsse, wie z. B. Wechselfeuchtigkeit und Wechseltemperaturen, werden durch diese Laborversuche nicht erfasst. Weitere Abweichungen resultieren aus den relativ niedrigen Prüfspannungen und dem relativ kleinen Elektrodenabstand, wodurch der Lichtbogen fast an der gleichen Stelle festgehalten wird, während er bei Betriebsverhältnissen an der Oberfläche wandert.

Die UV-Belichtung (Weatherometer) gibt hauptsächlich Auskunft über das Oberflächenverhalten gegen Aufrauhen.

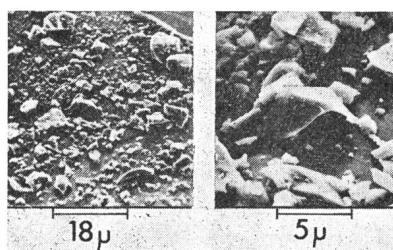


Fig. 11  
Beispiele Raster-Elektronenmikroskopischer Aufnahmen der Oberfläche mit Quarzmehl gefüllter Giessharz-Isolationen

Die Feststellung der Aufrauung der Oberfläche geschieht dabei am besten mittels rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (Fig. 11). Es ist dies bekanntlich ein Verfahren, bei dem mit einem fein-fokussierten Elektronenstrahl die Oberfläche abgetastet wird. Man erzielt damit Bilder sehr hoher Trennschärfe.

Als Vorprüfung im Sinne einer ersten Materialauswahl (Screening) sind die Prüfverfahren von Nutzen. Weitere Versuche am Modell, am Objekt (Isolator) und ganz besonders die Langzeitversuche der Praxis sind nicht zu umgehen, weil es nicht möglich ist, aus den Resultaten der kurzzeitigen Laborprüfungen am Material eindeutig auf das Langzeitverhalten bei Freiluftfeinsatz zu schliessen. Schon

Art der Prüfung	Elektrische Beanspruchung					Verschmutzung		Kriterium
	Abstand mm	kV	E kV/mm	Kontinuierlich	Diskontinuierlich	Kontinuierlich	Diskontinuierlich	
Kriechstromfestigkeit (EC 112)	4	0,38 ~	0,09	×	—	—	NH <sub>4</sub> CL	Spannung bei 50 Tropfen
Differentialtest (ASTM 2302)	1,6	3,0 ~	1,87	×	—	NH <sub>4</sub> CL	—	Bildung eines Kriechweges (Stufen)
Inclined-plane-Test	50	1-6 ~	0,02-0,12	×	—	—	NH <sub>4</sub> CL	Spannung bis Kriechwegbildung
Initial-tracking-voltage								Zeit bis Kriechwegbildung
Time-to-track Erosion								Erosionsvolumen
Dust-and-fog-Test	25,4	1,5 ~	0,059	×	—	Staub + Nebel	—	Zeit bis Kriechwegbildung oder Erosion bis Durchschlag
Merry-go-round-Test	140	10 ~	0,071	—	×	—	UV-Salzwasser	Cracking, Flashover, Erosion, Kriechwegbildung.
Stoßspannungstest	0,7	4~Stoss	5,72	—	×	—	—	Stromstöße bis Kriechwegbildung
Lichtbogen-Zeittest A	8	= Puls.	—	—	Puls.	—	—	Lichtbogen-Zeitverhalten
B	30	bis 38~	1,26	×	—	—	—	Diffusionsdurchschlag

unter den verschiedenen Laborprüfungen kann keine allgemeine, d. h. für alle Kunststoffe brauchbare Relation gefunden werden (Fig. 12). Stellt allein schon die Auswahl der richtigen, d. h. aussagekräftigsten Methoden ein nicht einfaches Problem dar, so wird das noch viel schwieriger durch den Umstand, dass trotz gleicher Messmethoden in verschiedenen Laboratorien sehr oft verschiedene Resultate erhalten werden. Die verschiedenen Kurzzeitprüfungen werden in der Regel von den Herstellern möglicher Werkstoffe selbst durchgeführt.

Die Vorversuche, ganz besonders aber die praktischen Versuche sind zeitraubend und aufwendig. Eine Zeitraffung ist kaum möglich. Da die Chemie laufend neue Kunststoffe oder Modifikationen bestehender Kunststoffe entwickelt,

besteht die Schwierigkeit darin, begonnene Langzeitversuche nicht durch neue Empfehlungen in Frage zu stellen. Anderseits sind die bis heute und besonders in den letzten Jahren erarbeiteten guten Resultate nur dank dieser neuen Entwicklungen überhaupt möglich geworden. Die Empfehlung neuer Kunststoff-Systeme ist daher auf ein vernünftiges Mass zu stabilisieren, damit man doch in annehmbarer Zeit – viele Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen verlangen eine Mindest-Langzeit-Bewährungsfrist von 10 bis 20 Jahren – zu brauchbaren Verhaltensdaten gelangt.

Ein möglicher Werkstoff kann schliesslich nur dann als für Freiluft brauchbar bezeichnet werden, wenn der daraus gefertigte Isolator bei langzeitiger Beanspruchung im Grenzbereich seines Isoliervermögens keine Zerstörung erleidet.

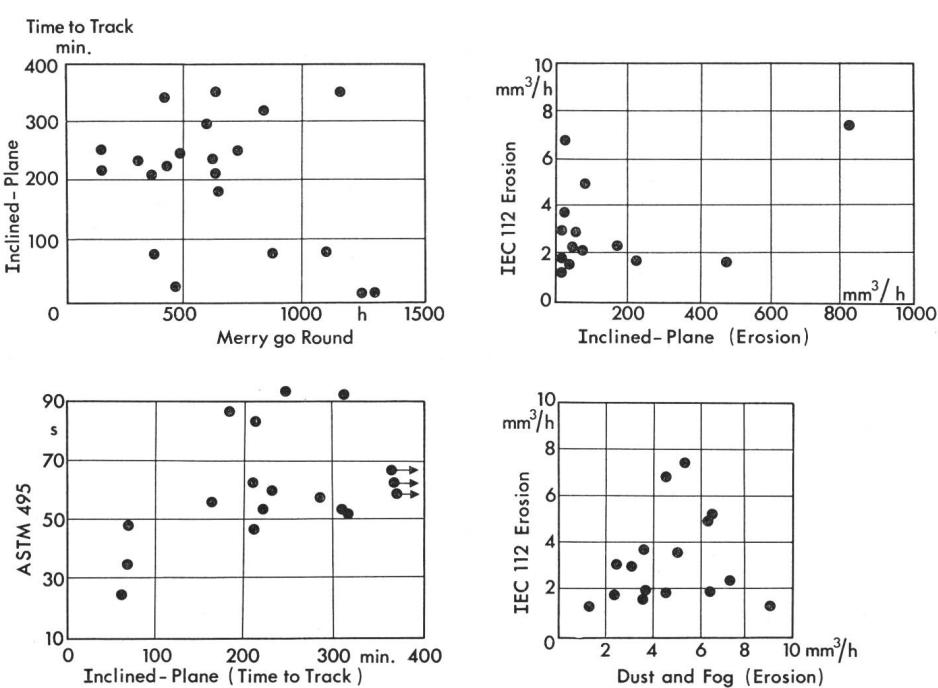


Fig. 12  
Vergleich der verschiedenen Laborprüfmethoden für Freiluftbeständigkeit  
(Jedem Messpunkt entspricht ein bestimmtes Isoliermaterial)

Für die Laborprüfungen am Objekt (Isolator) haben sich vor allem bewährt:

- das Salznebelprüfverfahren (IEC TC 36)
- die Prüfung nach VDE 0448 mit deponierter Fremdschicht
- eine Prüfung unter Regen
- die Kieselgur-Methode
- die Methylan-Methode
- ein Test bei Verwendung natürlicher Verschmutzung

Alle diese Prüfmethoden sind wohl definiert und allgemein bekannt. Das Salznebelprüfverfahren entspricht den Verhältnissen bei Sturm in Meeresnähe, VDE 0448 der Art der Verschmutzung durch Industriestaub und -abgase. Diese Methode ist eine recht gute Art der Objektprüfung. Sie kommt den praktischen Bedingungen am nächsten. Schon in relativ kleinen Salznebelzelten (z. B. 1 m<sup>3</sup>) kann am Material, an Teilen eines Isolators oder am ganzen Isolator brauchbare Information über das Verhalten ermittelt werden. Für eine bestimmte Konzentration des Nebels sowie Lage und Form des Isolators werden Grösse und Häufigkeit der Oberflächenentladungen durch geeignete Mittel registriert. Die Messung und Beobachtung des unsichtbaren Anteils der Entladungen im UV-Bereich, gegebenenfalls ergänzt durch Ultraschallmessungen, erlaubt eine frühere und bessere Erfassung dieser Vorgänge. Minimale Entladungstätigkeit bei einer bestimmten geometrischen Anordnung wird die optimale Betriebsbedingung anzeigen. Erosion kann ebenfalls ermittelt werden (Fig. 13).

Im Sinne einer weiteren Zeitraffung werden verschiedene Methoden vorgeschlagen. Bei der Erhöhung der Spannung muss vorsichtig vorgegangen werden. Wenn nämlich – wie schon erwähnt – die Stromstärke der Entladungsimpulse zu gross wird, dann bewegen sich die Entladungsfusspunkte so lebhaft, dass eine Zerstörung der Oberfläche u. U. gar nicht mehr stattfindet, was ein vollständig falsches Bild ergibt. In diesem Fall führt eine Verschärfung der Klimabedingungen

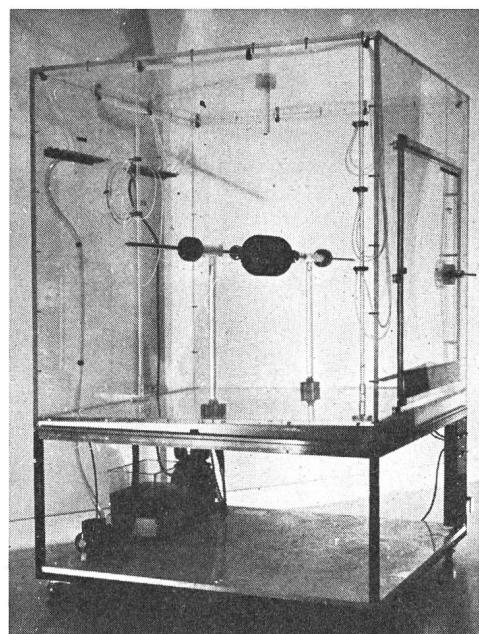


Fig. 13 Aus Plexiglas aufgebautes «Prüfzelt» für die Prüfung von Isolatorteilen und kleineren Objekten im Nebel oder Salznebel  
Grösse ca. 1 x 1 x 1 m

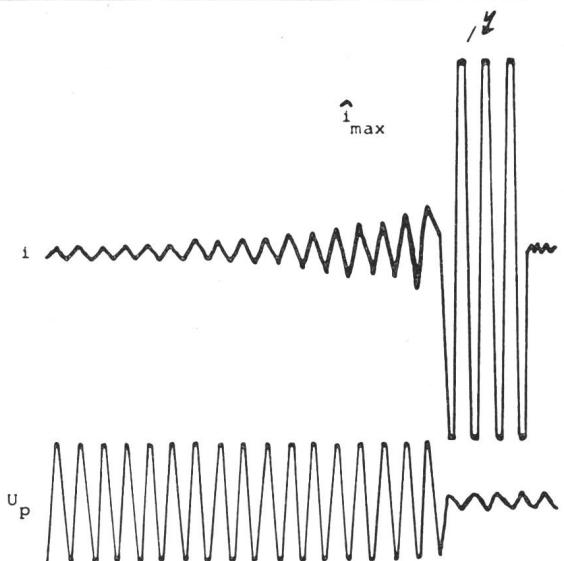


Fig. 14 Oszillogramm eines Fremdschicht-Überschlages

$i$  Ableitstrom  
 $i_{\max}$  Ableitstromimpuls vor dem Überschlag  
 $U_p$  Prüfspannung

oder die Durchführung von Versuchen mit zyklischer Salznebelbelastung eher zum Ziel.

Ein Vergleich bzw. eine Relation zwischen Kurzzeit- und Langzeitverhalten bei der Objektprüfung ist schon deshalb erschwert, weil für beide Bedingungen, nämlich im Labor künstlich erzeugte und unter den Bedingungen der Natur auftretende Fremdschicht, keine einheitliche Messgrösse für den Verschmutzungsgrad einer Isolationsoberfläche existiert. Die Bedingungen des Labors haben entweder Schichtleitfähigkeit oder Leitfähigkeit des Wassers, d. h. statische Werte als Bezugsgrösse, während die Vorgänge am Isolator unter der Prüf- oder Betriebsspannung dynamischer Art sind, weil dabei die Verschmutzung durch eine Art Wechselwirkung zwischen Befeuchtung und Entladung bestimmt wird. Beim Laborversuch darf man ferner mit einer gleichmässig aufgebrachten Schicht rechnen; die Möglichkeit der Selbstantreinigung besteht nicht oder wird nur unvollkommen simuliert, während im praktischen Freiluftversuch die Fremdschicht zufällig, d. h. unter dem Einfluss des Wetters, aufgebracht wird.

Als neues Kriterium und als wesentliche Bereicherung der Versuche und Erfahrungen in der Verhaltensvorhersage darf die von Verma ausgearbeitete Methode beurteilt werden [12]. Der höchste der während eines Versuches und kurz vor der letzten Halbperiode des Überschlages auftretenden Entladungsimpulse (Fig. 14) wird als Beurteilungskriterium für den dynamischen Verschmutzungsgrad eingeführt. Wenn die maximale Stromamplitude bei verschiedenen Prüfspannungen und Verschmutzungsgraden ermittelt wird, kann eine neue Charakteristik des Isolationsverhaltens bei Fremdschicht konstruiert werden (Fig. 15). Die maximale Stromamplitude ist unabhängig davon, wie die Leitfähigkeit der Isolator-Oberfläche entstanden ist und unterscheidet sich damit vorteilhaft von anderen Prüfverfahren.

Falls diese Zusammenhänge wirklich von allgemeiner Gültigkeit sind, hat man damit ein relativ einfaches Verfahren einer zuverlässigen Isolationsbemessung, das auch bei

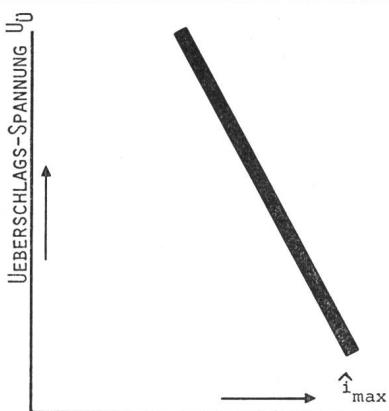


Fig. 15 Überschlagsspannung  $U_{ü}$  in Abhängigkeit des maximalen Ableitstromimpulses  $i_{max}$  [12]

der Entwicklung optimaler Bauformen von Nutzen sein kann. Verma hat diese Versuche im Salznebel durchgeführt. Aber auch andere Verfahren sind brauchbar, sofern für eine genügende, konstante Befeuchtung gesorgt ist.

## 7. Rückblick, Ausblick

Die ersten Versuche freiluftbeständiger Isolationen wurden hauptsächlich mit Giessharzen durchgeführt. Sie wurden durch die guten Eigenschaften der Giessharze und die vorzüglichen Resultate deren Verwendung für Innenräume angeregt, wo Elektroporzellan fast vollständig verdrängt worden ist. Da dabei weitgehend Giessharze der «ersten Generation», also vom Typus EP Bisphenol A, verwendet wurden, waren die erreichten Resultate unbefriedigend, weil die Beanspruchungen unter Freiluftbedingungen wesentlich härter sind. Überraschenderweise wurden aber auch mit diesen Harzen einige brauchbare Resultate erzielt. Im allgemeinen aber waren diese früheren Resultate eher enttäuschend, weil die geeigneten Werkstoffe, und vor allem dafür geeignete Verarbeitungsverfahren, fehlten. Dies erklärt die relativ hohe Ausfallrate der früheren Versuche.

Hauptsächliche Ursachen des Versagens waren:

- Kriechwegbildung
- unzulässig hohe Erosion
- thermisch bedingter Durchschlag, z. B. wegen zu hoher Wasseraufnahme
- Diffusions-Durchschlag (selten)
- Durchschlag längs der Grenzschicht Kern-Mantel bei Langstab-Isolatoren
- Fremdschicht-Überschlag
- Zerstörung als Folge von TE wegen ungeeigneter Verarbeitungsverfahren
- mechanisches Versagen

Ein wesentlicher Fortschritt wurde erreicht durch die Schaffung der Klasse cycloaliphatischer EP-Harze [13]. In den letzten Jahren wurden weitere Modifikationen entwickelt (Tabelle VII). Es hat sich speziell bei der Konstruktion von Langstab-Isolatoren als notwendig erwiesen, flexibilisierte oder von Natur aus flexible Werkstoffe zu verwenden. Solche Kunststoffe stehen heute zur Verfügung.

Die Durchführung von Versuchen zur praktischen Erprobung des Freiluftverhaltens folgte zwangsläufig den entsprechenden Entwicklungsarbeiten in den Laboratorien und geht etwa auf das Jahr 1960 zurück. Die Überwachung eines

Isolators im praktischen Langzeit-Freiluftversuch erfolgt durch periodische Kontrollen, sowohl visuell auf allfällige Veränderungen der Isolator-Oberfläche bezüglich Kriechspuren, Erosion, Aufrauhung und andere mögliche Erscheinungen, als auch durch meist automatisches Registrieren und Ordnen der Zahl von Teil-Überschlägen nach Stromstärke und Zeit.

Neben den eigentlichen Resultaten aus Freiluftversuchen müssen selbstverständlich auch die anderen Eigenschaften des Werkstoffes bekannt sein, wie sie etwa in Tabelle VII für verschiedene Isolator-Kunststoffe zusammengestellt sind.

Ausser den Giessharzen (Epoxid-, Polyester- und Polyurethanharze), die meist gefüllt und verstärkt (GFK), einzeln oder in Kombination zur Anwendung gelangen, werden auch andere Kunststoffe, insbesondere *Silikonkautschuk* und *Polytetrafluoroäthylen* als Mantel- oder Schirmmaterial geprüft und verwendet. Bei der wohl interessantesten Lösung, nämlich der eines Langstab-Isolators, wird fast immer eine Kombination mit einem Kern aus EP-Glas (GFK) gesucht. Es ist offensichtlich, dass die besondere Schwierigkeit in der Grenzschicht Kern-Mantel liegt.

Jeder der überhaupt in Frage kommenden Werkstoffe oder Werkstoff-Kombinationen hat entsprechend den gegebenen Bedingungen Vor- und Nachteile. Bei der Herstellung des Objektes spielt – neben optimaler Formgebung, die in besonderen Versuchen zu erproben und zu optimieren ist – eine gute Verarbeitbarkeit die ausschlaggebende Rolle. Diese soll sowohl in elektrischer, mechanischer und physikalischer Hinsicht optimale Werte garantieren, vor allem aber auch eine kurze Herstellungszeit ermöglichen [14; 15].

Bei der Entwicklung, der Konstruktion und der Herstellung von Isolatoren aus Kunststoff sind einige besondere Punkte als allgemeine Richtlinien zu betrachten:

- Vor allem ist der Tatsache konsequent Rechnung zu tragen, dass Kunststoffe gegenüber den bisherigen Materialien (Porzellan, Glas) ein weitgehend verschiedenartiges Material darstellen. Dies ganz besonders in elektrischer Hinsicht (Feldverteilung) und was die Temperaturabhängigkeit der elektrischen, mechanischen und physikalischen Daten betrifft. Würde lediglich Porzellan gegen einen Kunststoff ausgetauscht, d. h. also die klassische Bauart abgeformt, so würde damit bestenfalls ein Vergleich der verwendeten Materialien erhalten, diese Lösung aber kaum zum Erfolg führen.

- Kunststoffgerechte Konstruktion hat sowohl die Eigenschaften des Materials, dessen grosse, fast unbegrenzte Möglichkeiten der Formgebung als auch allfälliger Verbund-Konstruktionen und andere, besonders zeitsparende Fertigungsmethoden zu berücksichtigen.

- Den Metall-Armaturen bzw. der durch diese verursachten Beeinflussung des elektrischen Feldes muss vermehrt Beachtung geschenkt werden. Besonders beim Einbau von Isolatoren zu Prüfzwecken wird diesem Umstand oft zu wenig Beachtung geschenkt.

- Der allfällige Einfluss der Umgebung und eine dadurch bewirkte mögliche Veränderung gewisser Eigenschaften des Werkstoffes ist zu berücksichtigen.

- Die Entwicklung erfolgt in zwei Richtungen, nämlich nach den bestgeeigneten Kunststoffen oder deren Kombination und nach bestgeeigneter, für den jeweiligen Anwendungsfall optimaler Formgebung.

Es ist zu überlegen und bleibt dem Hersteller von Isolatoren überlassen, ob er – z. B. für eine bestimmte Spannungsreihe – einen für alle, auch die extremsten, Umweltbedingungen geeigneten und bewährten Isolator baut und diesen auch für weniger extreme Anwendungen verkauft

## Wichtigste Eigenschaften von Kunststoffen für Freiluftisolatoren

Tabelle VII

Bezeichnung	Einheit	EP hartelastisch	PUR flexibel	Silikon	PTFE	GFK EP + Glasfaser
<i>Mechanische und physikalische Eigenschaften</i>						
Zugfestigkeit bei RT	N/mm <sup>2</sup> %	50-80 0,5-1	6-7 30-50	40-60 1-3	50 45	10-25 200
Max. Zugspannung $\sigma_z$	N/mm <sup>2</sup> mm	80-130 1,5-4,5	80-100 3	-	-	600-1100 2-2,8
Bruchdehnung	N/mm <sup>2</sup> mm	12000-26000	-	7100-8200	11	650-750 > 15
Biegefesteitgkeit bei RT	N/mm <sup>2</sup> mm	70-120	70-120	180-210	-	35000-40000
Max. Biegespannung $\sigma_B$	Ncm/cm <sup>2</sup>	30-42	80-90	30-40	220	1000-3500
Durchbiegung	10 <sup>-6</sup> mm/mm 0°C	95-155	80-85	180	100	8
Elastizitätsmodul	0°C	0,35-0,45	0,25-0,3	- <sup>5)</sup>	- <sup>5)</sup>	120 - > 250
Schlagzähigkeit	cal/g 0°C	0,7-0,8	0,5-0,6	0,32	0,25	0,25
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	kcal/m h 0°C			-	-	-
Formbeständigkeit nach Martens						
Spez. Wärme (40-100 0°C)						
Wärmeleitfähigkeit						
<i>Elektrische Eigenschaften</i>						
Dielektr. Verlustfaktor tg $\delta$ 50 Hz RT	%	1,7-3,9 <sup>4)</sup>	2,0-5,0 <sup>4)</sup>	~1	1,3	0,42
Dielektr. Verlustfaktor tg $\delta$ 50 Hz 90 0°C	%	2,9-6,6	> 10	7-8	0,40	0,46
Rel. Dielektrizitätszahl $\varepsilon_r$ 50 Hz RT	-	3,5-4,5	~4,9	~4,5	4,2	2,1-2,2
Rel. Dielektrizitätszahl $\varepsilon_r$ 50 Hz 90 0°C	-	4,5-5,4	~7,0	~6,0	3,7	2,1
Spez. Widerstand $\rho_{10}$ RT	$\Omega$ cm	2-7 · 10 <sup>15</sup>	-	7 · 10 <sup>14</sup>	10 <sup>13</sup>	> 10 <sup>18</sup>
Spez. Widerstand $\rho_{10}$ 90 0°C	$\Omega$ cm	~10 <sup>14</sup> -10 <sup>15</sup>	-	3-5 · 10 <sup>12</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>11</sup>
Durchschlagfestigkeit 50 Hz RT, 1-min.-Wert	kV/cm	190-210 <sup>3</sup> )	180 <sup>3</sup> )	360 <sup>1</sup> )	-	100-150 <sup>2)</sup>
Lichtbogenfestigkeit ASTM-495	s	182-200	191-247	-	> 300	-
Kriechstromfestigkeit IEC 112	Stufe	KA 3c	KA 3c	-	KA 3c	-
Inclined plane test initial tracking voltage	kV	3,25	3-3,25	-	-	-
time to track	h	31-52	28-36	-	-	-
Dust and fog test	h	46-100	82-173	-	-	-

und dabei den Vorteil hoher Stückzahl ausnützt, oder ob – von Fall zu Fall – jeweils einer «Entwicklung nach Mass» der Vorteil zu geben ist.

Die aus den Untersuchungen über das Fremdschichtverhalten gewonnenen Erkenntnisse sind konsequent zu verwirklichen.

Was die bekannten Parameter der Formgebung betrifft, zeigt die Erfahrung, dass die wesentlichen Forderungen nach

- möglichst grosser spezifischer Kriechweglänge
- kleinem Strunk-Durchmesser

- hoher Schirmzahl
- dünnen Schirmen und
- grosser Schirmausladung

lauten, Bedingungen, die sich mit Kunststoffen besonders gut realisieren lassen.

Was die Festigkeit in mechanischer Hinsicht betrifft, sind die Anforderungen recht verschieden, je nachdem, ob es sich um einen Stütz- oder Hänge-(Langstab-)Isolator handelt. Der Stützer verlangt ein Material hoher Steifigkeit; ein Verbund mehrerer Materialien ist hier meistens nicht notwendig. Beim

<sup>1)</sup> Angabe der Probendicke fehlt      <sup>2)</sup> 2,0-mm      <sup>3)</sup> 0,5-mm      <sup>4)</sup> tg  $\delta$ -Werte sind stark von der Füllstoffart und -menge abhängig  
<sup>5)</sup> Nicht messbar bei flexiblen Kunststoffen

Fig. 16  
60-, 110-, 220-kV-Stützer

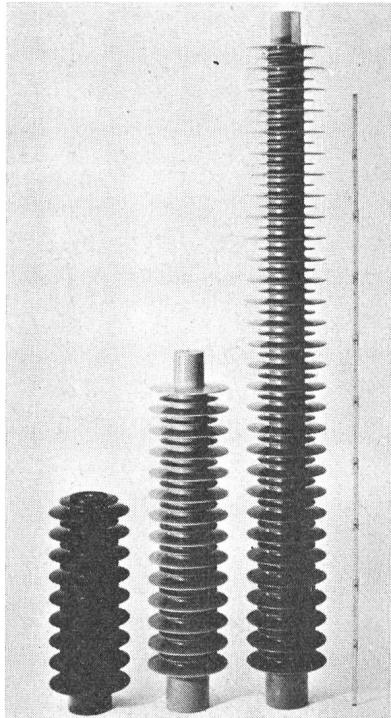


Fig. 19  
220-kV-Langstab-Isolator,  
Gewicht 6,3 kg

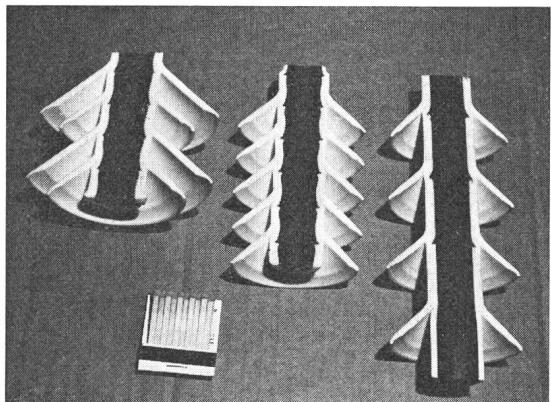
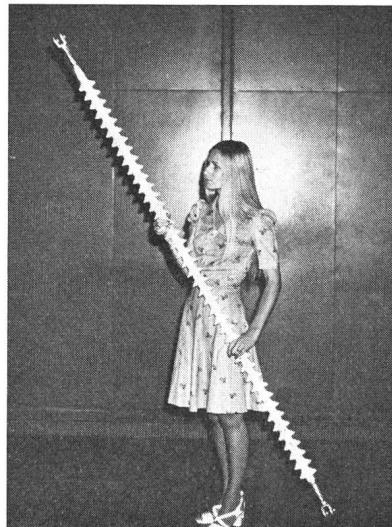


Fig. 20 Schnitt durch verschiedene Kunststoffschirme  
als Beispiel für die Vielgestaltigkeit der Formgebung

Hänge-Isolator, aufgebaut aus einem GFK-Verbundkern, umgeben vom freiluftbeständigen Schirm, ist die Situation eine ganz andere. Hier hat der Kernstab oder Strunk die Last aufzunehmen, wobei er bei Lastwechsel durch Eis, Schnee und Wind eine Dehnung oder Kontraktion erfährt. Der äussere Schirm ist mechanisch wenig beansprucht, soll aber diese Deformation des Strunks mitmachen, ohne dass die Grenzschichten Strunk-Schirm zerstört werden. Das heisst, dass das Schirmmaterial hochelastisch sein muss, auch bei extremen Höchst- und Tiefsttemperaturen.

Die kritische Stelle eines Isolators ist diese Grenzzone Kern-Schirm. Elektrisch ist sie ungünstig, nämlich in Richtung des Hauptfeldes beansprucht. Jede schwache Stelle, entstanden z. B. durch mechanische oder thermische Schädigung, durch Alterungsvorgänge (z. B. Hydrolyse-Alterung), wird dort den Anfang einer Zerstörung des Isolators nehmen. Man ersieht daraus, dass an das Material des Isolators, sowohl seines Strunkes wie aber ganz besonders an das seines Mantels, recht hohe Anforderungen bezüglich mechanischen und elektrischen Verhaltens gestellt werden. In physikalischer Hinsicht werden zudem möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit und hohe Zersetzungstemperatur verlangt. Die Forderung nach genügender Kriechstromfestigkeit kann heute durch die von der Chemie angebotenen Kunststoffe erfüllt werden.

Einige Beispiele erfolgreicher Anwendungen sind in Fig. 16...21 dargestellt.

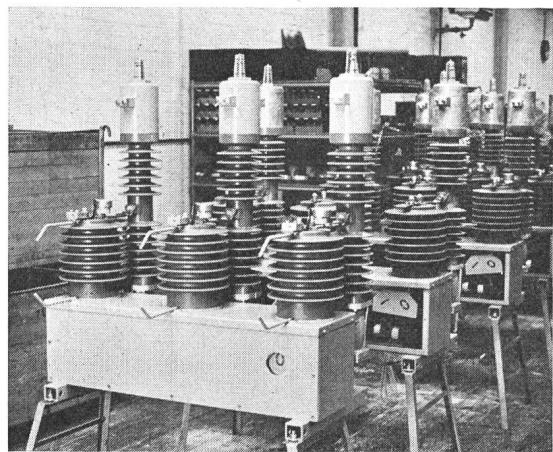


Fig. 17 24-kV/150-MVA-Streckenschalter mit aufgebautem Stromwandler

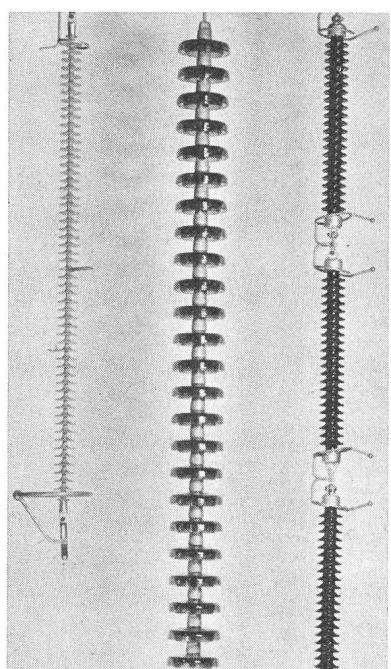


Fig. 18  
380-kV-Isolatorketten,  
alle für eine Mindest-  
bruchlast von 160 kN

Ihre Gewichte verhalten sich wie 110 : 190 : 20. Im elektrischen Isoliervermögen unter Verschmutzung erreicht der Kunststoff-Langstab die besten Werte, obwohl er die geringste Bauhöhe und den geringsten Kriechweg aufweist.

- Prüfungen an Proben, die entweder aus dem Objekt gearbeitet, in jedem Fall aber durch gleiche Verarbeitung gefertigt wurden.
  - Oberflächenrauhigkeit, Auskreidung und/oder Abnahme des Glanzes der Oberfläche im Weatherometer.
  - Feuchtigkeitsaufnahme
  - Kochwasserbeständigkeit
  - Hydrolyse-Alterung
  - *Mechanische Prüfungen*  
Prüfung bei niedrfrequenter (z. B. zwischen 1 bis 10 Hz) Belastung und Entlastung (Schwelllast) bei RT, Tieftemperatur (im Bereich z. B. -40 bis -60 °C und +60 evtl. +90 °C. Anschliessend Wiederholung der elektrischen Prüfung.
  - *Elektrische Prüfungen*
    - Halte-Spannung - trocken
      - nach Nebel
      - nach Salznebel bei .... Salzgehalt nach Salznebeltest (wie lange hält der Isolator die Haltespannung?)
    - Oberflächenwiderstand bzw. Ableitstrom und tg δ, trocken, nach Nebel, nach Salznebel und evtl. nach Wasserlagerung
    - Salznebeltest
    - TE- bzw. Störspannungsmessungen
    - Einsatz-Spannung
  - Kombinierte Prüfungen an Langstab-Isolatoren
    - Temperatur Wechselprüfung, z. B. -40 bis -60 °C/ +90 °C am mechanisch unbelasteten Isolator.
    - Prüfung der Verbundzone Kern-Mantel.
- Die vorbelastete Verbundzone wird durch eine Wechsel- und Stoßspannungsprüfung, evtl. unter Regen und/oder nach einer bestimmten Anzahl von Temperaturspielen (z. B. -50 °C/+50 °C, 5- bis 10mal) auf ihre elektrische Festigkeit geprüft.

Im Interesse der Betriebssicherheit ist ein neu entwickelter Isolatortyp sorgfältigen Prüfungen zu unterziehen, von denen – je nach Aufstellungsort und Bedingungen – gegebenenfalls auch nur eine geeignete Auswahl zu treffen ist (Tabelle VIII).

Das Interesse der Fachwelt an Konstruktionen mit geeigneten Kunststoffen ist weltweit gross, was den Entwicklungsarbeiten zu weiteren durchschlagenden Erfolgen verhelfen wird. Die Probleme sind ebenso interessant wie vielseitig. Sich damit zu beschäftigen, ist faszinierend und ein typisches

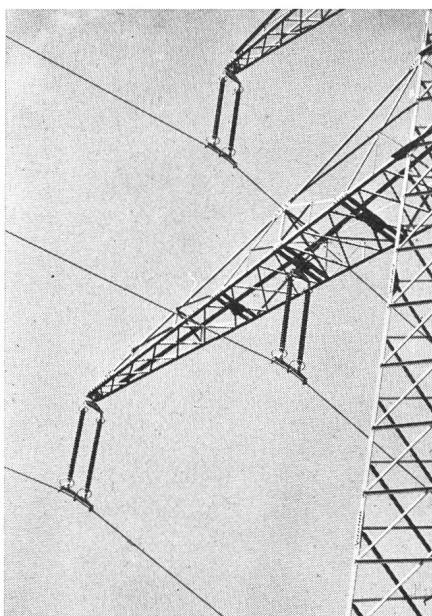


Fig. 21  
Kunststoff-Isolatoren  
einer 220-kV-Leitung  
des Bayernwerkes

Beispiel einer notwendigen Zusammenarbeit zwischen Vertretern von Chemie, Physik und Ingenieurwissenschaften bzw. den Herstellern von Kunststoffen, den Verbrauchern und den Anwendern (Fig. 22).

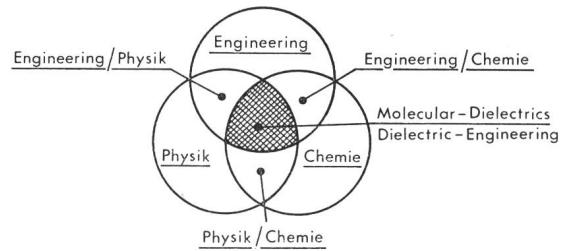


Fig. 22 «Dielectric research» im Rahmen von Chemie, Physik und Ingenieurwissenschaften

Als Ergänzung und der Vollständigkeit halber zu diesen Ausführungen über Freiluftisolationen wären noch neue Konstruktionen zu erwähnen, die dank den ausgezeichneten Eigenschaften von GFK möglich sind, z. B. isolierende Masten, Isoliertraversen oder eine Leitungsaufhängung, wie sie in einem CIGRE-Bericht [16] als «Pendelstützer» erwähnt wurden. Solche Möglichkeiten erlauben eine Leitungsführung unter Beanspruchung wesentlich reduzierter Energieschneisen und geringerer Masthöhen bzw. den Ausbau bestehender Freileitungen auf höhere Übertragungsspannung bei gleichem Trasseebedarf.

#### Literatur

- [1] C. L. Malaguti: Essais de longue durée effectués en Italie sur les isolateurs de matériaux organiques. Contribution de discussion CIGRE 1974, Groupe 15, p. 46..47.
- [2] J. P. Burkhardt and C. F. Hofmann: Application of cast epoxy resins in power circuit breakers. IEEE PES Winter Meeting, New York, January 27..February 1, 1974, Conference Paper No. C 74 064-2.
- [3] P. Mähönen e.a.: Tenue en tension des résines époxydes. Rapport CIGRE No. 15-01, 1974.
- [3a] P. Mähönen: Utilisation d'isolateurs «outdoor» en résine moulée. Contribution de discussion CIGRE 1974, Groupe 15, p. 35..36.
- [4] W. Schmidt und F. Schwab: Fremdschichtprobleme auf Freileitungsisolatoren in unmittelbarer Nähe von Autobahnen, Bull. SEV 63(1972)5, S. 227..230.
- [5] H. von Cron und H. Dorsch: Détermination de l'isolation des réseaux de transport par rapport aux surtensions à la fréquence de service et aux surtensions transitoires compte tenu de la diminution du pouvoir isolant due à des couches étrangères superficielles. Rapport CIGRE No. 402, 1958.
- [6] H. Näcke: Stabilität der Fremdschichtentladungen und Theorie des Fremdschichtüberschlags. ETZ-A 87(1966)16, S. 577..585.
- [7] G. Weidler: Fremdschichtstörungen in Hochspannungs-Freiluftanlagen. ETZ-A 92(1971)4, S. 195..201.
- [8] A survey of the problems of insulator contamination in the United States and Canada. Part II: Geographical aspects. A report of an IEEE Working Group. Trans. IEEE PAS 91(1972)5, p. 1948..1954.
- [9] B. Seetha Ram: Computational analysis of polluted insulator flashover. Thesis of the Victoria University of Manchester, Institute of Science and Technology, Department of Electrical Engineering and Electronics, 1974.
- [10] K. Naito: Surtensions et coordination de l'isolation. Contribution de discussion CIGRE 1974, Groupe 33, p. 54..56.
- [11] M. Prasad Verma, H. Niklasch und I. Kolossa: Hochspannungs-Stützisolatoren unter natürlichen Fremdschichtbedingungen. ETZ-A 95(1974)2, S. 98..105.
- [12] M. Prasad Verma: Höchster Ableit-Stromimpuls als Kenngröße für das Isolierverhalten verschmutzter Isolatoren. ETZ-A 95(1973)5, S. 302..303.
- [13] H. Batzer, O. Ernst und R. Stierli: Cycloaliphatische Epoxyharze. ETZ-B 15(1963)21, S. 595..599.
- [14] W. Dieterle und J. Schirr: Elektrische und mechanische Eigenschaften von im Druckgussverfahren hergestellten Epoxidharzformstoffen. Bull. SEV 63(1972)22, S. 1300..1304.
- [15] J. Boetschi, O. Ernst und E. Kustenberg: Die Verarbeitung von Giessharzen auf dem Weg zur Automation. Kunststoffe-Plastics 21(1974)1, S. 9..10.
- [16] M. Cojan, A. Puck und D. Rivière: Réduction d'encombrement des pylônes par utilisation d'éléments en isolants synthétiques. Rapport CIGRE No 22-10 1974.

#### Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. Walter Dieterle, Division Kunststoffe und Additive, CIBA-GEIGY AG, 4002 Basel.