

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 50 (1959)

Heft: 13

Artikel: Bestimmung der Kriechwegfestigkeit von organischen Isolierstoffen

Autor: Michel, K. / Hillenkamp, M.H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059464>

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: 21.02.2026

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)

Bestimmung der Kriechwegfestigkeit von organischen Isolierstoffen

Von K. Michel und M. H. Hillenkamp, Baden

621.317.333.6 : 621.315.61

Die Frage der Bewertung der Kriechwegfestigkeit elektrischer Isolierstoffe und die hiefür entwickelten Prüfmethoden werden in verschiedenen Ländern und international diskutiert. Mit dem Tropfenverfahren wurden von sechs schweizerischen Prüfstellen an einer repräsentativen Auswahl organischer Isolierstoffe Vergleichsversuche ausgeführt, über deren Ergebnisse berichtet wird. Zu einem Entwurf der CEI¹⁾ werden ergänzende und geänderte Prüfbedingungen vorgeschlagen. Eine Auswertungsmethode der Ergebnisse wird empfohlen, die zu drei Klassen der Kriechwegfestigkeit führt. Ihre Abstufung ist derart gewählt, dass bei kleinstem Prüfaufwand die grösste Sicherheit in der Klassifizierung jedes Isolierstoffes erreicht wird.

A. Kriechwegbildung und Kriechwegfestigkeit

Auf der Oberfläche von Isolierstoffen, die in reinem, trockenem Zustand hohe Isolationswiderstände aufweisen, bilden sich in Gegenwart von leitenden Verunreinigungen zwischen unter Spannung stehenden Teilen Kriechströme. Bei trockenen Verunreinigungen sind die Kriechströme und ihre Wirkungen meist unbedeutend. Eine bleibende Schädigung der Oberfläche und ihrer Isolationsfestigkeit tritt sehr häufig durch Einwirkungen von Kriechströmen in Feuchtigkeitsniederschlägen zusammen mit elektrolytisch wirksamen Ablagerungen auf organischen Isolierstoffen ein. Es kommt zur Bildung von Kriechspuren und schliesslich zum Kriechweg [1]²⁾.

Die durch den Kriechstrom verursachte Erwärmung beginnt die leitende Oberflächenschicht auszutrocknen. In der Folge bilden sich lokale Stromunterbrüche, denen elektrische Entladungsvorgänge mit Funken- oder Lichtbogenbildung folgen. Bei organischen Isolierstoffen bewirkt die mit diesen Entladungen verknüpfte örtliche Erhitzung eine Zerstörung, sei es in Form einer Verkohlung oder der Zersetzung zu vorwiegend gasförmigen Produkten. Bei andauernder Beanspruchung durch Kriechströme vermehren und vergrössern sich die verkohlten Stellen. Ihre Leitfähigkeit trägt dazu bei, den Kriechstrom und dessen Wirkung auf die noch nicht angegriffenen Stellen der Oberfläche zwischen den spannungsführenden Teilen zu verstärken. Die leitenden, verkohlten Stellen, die Kriechspuren, wachsen unter der Einwirkung der andauernden Ent-

ladungen weiter an und vereinigen sich schliesslich zu einem zusammenhängenden Kriechweg, der eine leitende Verbindung zwischen den unter Spannung stehenden Teilen auf der Isolierstoffoberfläche darstellt [2; 3].

Ob sich unter Einwirkung des Kriechstromes durch Verkohlung ein Kriechweg bildet, oder ob durch Zersetzung zu gasförmigen Produkten eine Aufrauhung oder Aushöhlung der Isolierstoffoberfläche eintritt, die mehr eine mechanische als eine elektrische Schädigung des Isolierteils mit sich bringt, hängt von der chemischen Natur des organischen Isolierstoffes, von der Art der Füllstoffe und nicht zuletzt von der Oberflächenbeschaffenheit des Isolierteiles ab.

Eine ausgesprochene Neigung zur Verkohlung und damit eine geringe Kriechwegfestigkeit zeigen allgemein die mit Phenolharzen hergestellten Kunststoffe. Dagegen weisen Aminoplaste, d. h. Melamin- und Harnstoffharze enthaltende Kunststoffe und die Mehrzahl der thermoplastischen Kunststoffe eine weit höhere Widerstandsfähigkeit gegen die Einwirkungen von Kriechströmen auf.

B. Prüfung der Kriechwegfestigkeit

Bei den gebräuchlichen Methoden zur Prüfung der Kriechwegfestigkeit wird die zu prüfende Isolierstoffoberfläche zwischen zwei auf die Probe aufgesetzten Elektroden in definierter Weise mit Elektrolytlösungen oder einer Feuchtigkeitsschicht beladen. Als Mass für die Kriechwegfestigkeit dienen entweder die bis zur Bildung eines Kriechwegs erforderlichen Elektrolytzugaben, die unter gegebenen

¹⁾ Commission Electrotechnique Internationale.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Bedingungen notwendige Zeit oder auch die minimale Spannung, die zum Kriechweg führt [2].

Bei den seit zwei Jahrzehnten üblichen Tropfentestmethoden für die Prüfung organischer Isolierstoffe wird die Elektrolytlösung in einer zeitlichen Folge, die jeweils das Verdampfen des Lösungsmittels und das Abklingen der anschliessenden Funkenentladungen gestattet, aufgetropft. Die in der Publ. Nr. 177 des SEV festgelegte schweizerische Prüfvorschrift [4] benützt Schneidenelektroden und eine 0,1prozentige Ammoniumchloridlösung. Das Prüfergebnis wird ausgedrückt in der Tropfenzahl, die einen bleibenden Kriechweg hervorruft. Ähnlich ist das deutsche Prüfverfahren nach DIN 53480, bzw. VDE 0303, mit den Unterschieden, dass die Elektrolytlösung ausser Ammoniumchlorid noch ein Netzmittel (z. B. Nekal BX) enthält, und dass Tropfengrösse und -folge derart festgelegt sind, dass eine automatische Durchführung der Prüfung möglich wird.

Englische Prüfverfahren benützen als Elektroden einen Stift und einen konzentrisch angeordneten Ring, der ein seitliches Entweichen der zugetropften Elektrolytlösung verhindern soll. Nachteilig ist bei dieser Methode die durch die Elektrodenform bedingte Beschränkung auf ebene Prüfflächen. Ausgehend von schwedischen und norwegischen Untersuchungen und Vorschlägen [5] liegt als Dokument 15(Bureau Central)8 der CEI³⁾ ein Entwurf für eine internationale Prüfvorschrift zur Bestimmung der Kriechwegfestigkeit vor. Elektrodenanordnung und Vorgehen entsprechen grundsätzlich den schweizerischen und deutschen Tropfentestverfahren. Als Prüfflüssigkeit dient eine 0,1prozentige Ammoniumchloridlösung. Im Gegensatz zu den nach bestehenden Vorschriften ermittelten Grenztropfenzahlen bei bestimmter Prüfspannung wird als Kriterium die als «Index der Kriechwegfestigkeit» bezeichnete minimale Grenzspannung für eine bestimmte Tropfenzahl vorgeschlagen. Die Prüfung wird bei verschiedenen Spannungen durchgeführt. Aus dem sich daraus ergebenden Spannungs-Tropfenzahl-Diagramm wird die Spannung, bei welcher nach 50 Tropfen eine Kriechwegbildung einsetzt, ermittelt und als Index für die Kriechwegfestigkeit genommen.

Neben dem Tropfentestverfahren sieht die Prüfvorschrift DIN 53480 zusätzlich ein Tauchverfahren vor, bei welchem der Prüfling periodisch in die Elektrolytlösung eingetaucht wird, bis ein Kurzschluss zwischen den Elektroden auftritt.

Für die Beurteilung des Kriechstromverhaltens bei Hochspannung hat sich das Dampfverfahren nach Micafil [6; 4] gegenüber dem Tropfentestverfahren als geeigneter erwiesen. Die unter einer Prüfspannung von 10 kV liegende Probe wird von einem konstanten Dampfstrom bestrichen. Als Mass für die Kriechwegfestigkeit gilt die Zeit bis zur Ausbildung des Kriechweges.

Da der Kriechweg als Folge einer thermischen Zersetzung unter Verkohlung der Materialoberfläche zustande kommt, bestehen enge Beziehungen zwischen Kriechwegfestigkeit und Lichtbogenfestig-

³⁾ Dokument Nr. 15(Bureau Central)8 der Commission Electrotechnique Internationale: «Méthode pour Déterminer l'Indice de Résistance au Cheminement des Matériaux Isolants Solides dans des Conditions Humides» (Projet) Jan. 1957.

keit. Die amerikanische Methode ASTM D 495-58T zur Bestimmung der Lichtbogenfestigkeit wird deshalb in den Vereinigten Staaten auch zur Beurteilung des Kriechstromverhaltens der Isolierstoffe benützt und ergibt eine weitgehende Übereinstimmung in der Einstufung der Isolierstoffe mit den Verfahren, die mit Elektrolytlösungen arbeiten. Bestimmungsgrösse ist die Zeit, bis der auf der Materialoberfläche erzeugte intermittierende Lichtbogen ins Material wandert und zum Kurzschluss führt.

C. Veranlassung und Aufgabestellung der Versuche

Die Arbeitsgruppe 3 des Fachkollegiums (FK) 17B (Niederspannungsschaltapparate) des CES⁴⁾ hat in Zusammenarbeit mit den FK 12 (Radioverbindungen) und FK 13 (Messinstrumente) den Auftrag übernommen, einen Vorschlag über «Regeln für die Bemessung von Luftstrecken und Kriechstrecken» aufzustellen. Für die Festlegung der Kriechstrecken soll ausser der Nennspannung und den Umgebungsbedingungen wie Luftdruck, Feuchtigkeit und Verstaubung auch die Kriechwegfestigkeit der verwendeten Isolierstoffe berücksichtigt werden. Eine derartige Differenzierung nach dem Kriechstromverhalten der Isolierstoffe ist nur durchführbar auf der Basis einer eindeutigen Klassierung der Kriechstromfestigkeit und einer Prüfmethode, die eine zuverlässige reproduzierbare Einreihung in Klassen gestattet.

Die bestehenden Klasseneinteilungen, wie sie beispielsweise im Normblatt DIN 53480 mit 5 Kriechstromfestigkeitsstufen enthalten sind, oder die 3 Kategorien, die sich aus der Publ. Nr. 177 des SEV ergeben, können in dieser Hinsicht nicht befriedigen. Einzig die höchste Klasse entsprechend diesen Publikationen, in welche insbesondere die Melaminharz- und Harnstoffharz-Preßstoffe fallen, ist einwandfrei abgrenzbar. Die Zuordnung in die niedrigeren Klassen ist infolge der grossen Streuung der Prüfergebnisse unsicher.

Zur Klärung dieser Fragen wurde eine gemeinsame Studiengruppe aus den Reihen der Arbeitsgruppe 3 des FK 17B und der Arbeitsgruppe 3 (Kriechwege) des FK 15 bestellt, die außerdem Stellung nahm zum internationalen Entwurf der Prüfvorschriften im Dokument 15(Bureau Central)8 der CEI.

Vergleichsversuche nach der Tropfentestmethode bei verschiedenen Prüfstellen⁵⁾ mit einer repräsentativen Auswahl verschiedener Materialmuster sollten eine Stellungnahme ermöglichen zu:

a) Festlegung der Prüfmethode, ausgehend vom Entwurf der CEI. Zur Diskussion standen beson-

⁴⁾ Comité Electrotechnique Suisse.

⁵⁾ An den Versuchen beteiligten sich die Materialprüfstellen und Laboratorien folgender Firmen und Institutionen:
Albiswerk Zürich AG, Zürich 47
AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG)
Carl Maier & Cie., Schaffhausen
Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 50
Materialprüfanstalt des SEV, Zürich 8
Sprecher & Schuh AG, Aarau

Das Probematerial wurde zur Verfügung gestellt von:
Landis & Gyr AG, Zug
Micafil AG, Zürich 48
Schweizerische Isolat-Werke, Breitenbach (SO)
Suhner & Co. AG, Herisau
H. Weidmann AG, Rapperswil (SG)

- ders Tropfengrösse, zeitliche Tropfenfolge, Begrenzung der Tropfenzahl, Prüfspannungen, Präzisierung der weiteren Prüfbedingungen;
- b) Möglichkeit einer sicheren Klassierung der untersuchten Materialien, sei es nach der Grenztropfenzahl oder der Grenzspannung.

D. Durchführung der Versuche

Die Vergleichsversuche der Studiengruppe wurden in zwei aufeinanderfolgenden Versuchsreihen durchgeführt, wobei die Erfahrungen der ersten für die Planung der zweiten Reihe berücksichtigt werden konnten.

Als Prüfvorschrift wurde für die erste Versuchsreihe grundsätzlich das Tropfenverfahren nach SEV gewählt, mit dem Unterschied, dass bei 5 verschiedenen Spannungen und dem Entwurf der CEI folgend mit einer Tropfengrösse von 20 mm^3 gearbeitet wurde. Als Prüflösung diente entsprechend den Vorschriften des SEV und dem Entwurf der CEI 0,1prozentige Ammoniumchloridlösung. Von Versuchen mit Netzmittelzusatz, wie ihn die DIN-Norm vorschreibt, wurde abgesehen, da das Netzmittel das Auslaufen der Prüflüssigkeit aus dem Raum zwischen den Schneiden begünstigt und durch die Bildung von Rückständen nach dem Verdampfen der

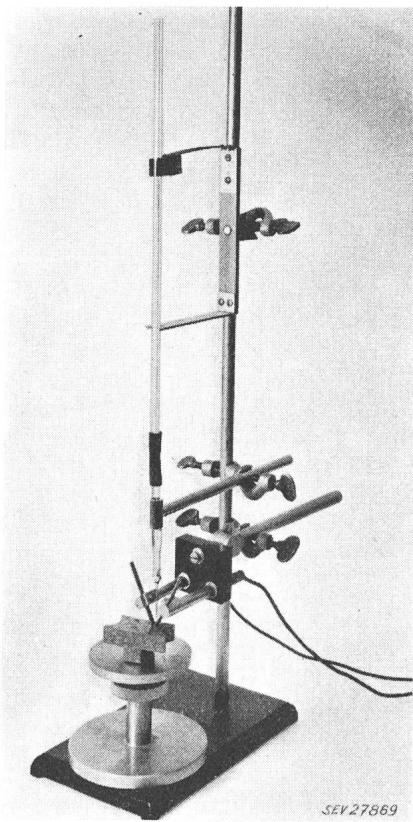


Fig. 1

Gerät für die Prüfung der Kriechfestigkeit nach der Tropfenmethode entsprechend dem Entwurf der CEI

Die Mikrobürette ist federnd aufgehängt, so dass der Tropfen mittels der aus einer Hohlnadel bestehenden Spitze unmittelbar auf die Materialoberfläche zwischen den Elektroden abgesetzt werden kann. Die einwandfreie Auflage der Elektroden und der Elektrodendruck von 100 g sind gewährleistet durch das frei bewegliche Gelenk des Elektrodenhalters, die Drehbarkeit um die Achse des Halters und die Verstellbarkeit des Probenträgers in der Höhe

Lösung die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse verschlechtert. Eingehende Versuche in Deutschland [7] bestätigen die störende Wirkung des Netzmittelzusatzes, der abgesehen von der Erhöhung der Meßstreuung zu einer anomalen Verteilung der Messwerte mit einer Erhöhung der Tropfenzahl führt.

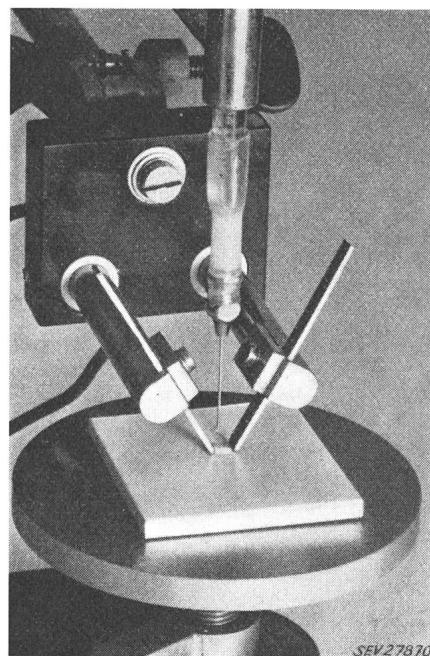


Fig. 2
Elektrodenanordnung und Tropfengeber des Kriechstromprüfgerätes

Die Wolframelektroden mit einem Querschnitt von $5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ können nach erfolgtem Abbrand nachgeschliffen und nachgestellt werden. Die als Bürettenspitze verwendete Injektionsnadel von etwa 1 mm Durchmesser ist am Ende plan geschliffen

Bei der ersten Versuchsreihe ergaben sich grosse Streuungen von Prüfstelle zu Prüfstelle, weshalb die Leistung der Spannungsquelle und die Charakteristik des Auslöserelais für die zweite Reihe näher umschrieben wurden. Die Tropfenfolge wurde auf Grund der Beobachtungen bei der ersten Reihe für die weiteren Prüfungen entgegen dem Entwurf der CEI mit 60 s in Übereinstimmung mit der DIN-Norm auf $30 \pm 2 \text{ s}$ festgesetzt. In dieser Zeit kamen bei allen Prüfungen die Funkenentladungen im wesentlichen zum Stillstand, so dass die Erhöhung der Einwirkungszeit der Tropfen das Ergebnis kaum merklich ändert. Da sich bereits in der ersten Versuchsreihe zeigte, dass bei einer Tropfengrösse von 10 mm^3 eine bessere Differenzierung der Messwerte in Abhängigkeit von der Spannung in Erscheinung trat als bei Tropfen von 20 mm^3 , wurde die zweite Versuchsreihe an allen Prüfstellen mit beiden Tropfengrösse durchgeführt. Die Kriechstromprüfung mit Tropfen von 10 mm^3 ist nur durchführbar, wenn der Tropfen direkt auf die Oberfläche des Prüflings aufgesetzt und so verteilt werden kann, dass er gleichzeitig beide Elektroden benetzt. Dies ist möglich bei einem Prüfgerät (Fig. 1 und 2), welches als Tropfengeber eine federnd aufgehängte Mikrobürette mit Glaskugelverschluss und entsprechend der Empfehlung des Entwurfes der CEI als Ausguss eine Injektionsnadel aufweist. Der automatische

| | Versuchsreihe | |
|--|--|--|
| | I | II |
| Prüfgerät | | |
| Elektroden | nach Publ. Nr. 177 des SEV | |
| Breite | 5 mm | 5 mm |
| Dicke | | |
| (in der aufliegenden Fläche) | 0,5 mm | 0,5 mm |
| Abstand | 4 mm | $4 \pm 0,1$ mm |
| Winkel gegen Horizontale | 60° | 60° |
| Material | Wolfram | Wolfram oder Wolframkarbid |
| Auflagedruck | — | ≈ 100 g |
| Spannungsquelle | nach Publ. Nr. 177 des SEV (Strombegrenzungswiderstand 60 Ω bei 300 V) | Kurzschlußstrom bei allen Spannungen 3 A $\pm 5\%$ |
| Auslösung | — | Bei 2A $\pm 10\%$ mit Momentanauslöserelais |
| Prüfspannungen | 175, 250, 300, 400, 500 V (50 Hz) | 175, 250, 300, 400, 500 V $\pm 5\%$ (50 Hz) |
| Prüflösung | Ammoniumchlorid 0,1% | Ammoniumchlorid 0,1% |
| Tropfengröße | 20 mm ³ | a) 10 mm ³ $\pm 10\%$ b) 20 mm ³ $\pm 10\%$ |
| Tropfenfolge | (2 Prüfstellen zusätzlich mit 10 mm ³) | 30 \pm 2 s |
| Durchführung der Prüfung | | |
| Anzahl der Einzelbestimmungen pro Prüfung | 5 | 5 |
| Messwert | Anzahl Tropfen bis zur Kriechwegbildung, bzw. bis Auslösung erfolgt | 60 Tropfen |
| Beendigung der Prüfung | 50 Tropfen | |

Geber mit frei fallenden Tropfen nach DIN 53480 bedingt dagegen grössere Tropfen, wie beispielsweise die vorgeschriebenen 30 mm³.

Die Prüfbedingungen für die zwei Versuchsreihen sind in Tabelle I zusammengestellt.

Als Probematerial wurden die am häufigsten für Isolierzwecke verwendeten Kunststoffprodukte ge-

wählt, wobei in der zweiten Versuchsreihe besonders die Produkte, wie Phenolharze mit anorganischen Füllstoffen, Phenol-Melaminharz-Preßstoffe und Schichtpreßstoffe, deren Klassierung Schwierigkeiten erwartet liess, berücksichtigt wurden. Die Zusammenstellung des Probematerials ist in Tabelle II wiedergegeben.

Zusammenstellung des Probematerials

Tabelle II

| Nr. ¹⁾ | Art des Produktes | Typenbezeichnung nach VSM | Harzbasis | Füllstoff Harzträger | Versuchsreihe |
|-------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------|
| 1...4 | Formpreßstück | H.POP | Phenol | Holzmehl | I |
| 5 | | H.PAP | Phenol | Asbestpulver | |
| 6...7 | | H.PAF | Phenol | Asbestfasern | |
| 8 | | H.MPOP | Melamin, Phenol | Holzmehl | |
| 9...10 | | H.MOP | Melamin | Holzmehl | |
| 11 | | H.MAP | Melamin | Asbestpulver | |
| 12...13 | | H.MAF | Melamin | Asbestfasern | |
| 14 | Formpreßstück | H.PAP | Phenol | Asbestpulver 30% | II |
| 15 | | H.PAP | Phenol | Asbestpulver 50% | |
| 16 | | H.PAF | Phenol | Glasfasern | |
| 17 | | H.MPOP | Melamin, Phenol | Holzmehl | |
| 18 | | — | Polyester | Glasfasern | |
| 19 | | — | Alkyd | mineral. Pulver | |
| 20 | Schichtpreßstoff | H.POPb | Phenol (normal) | Papier | II |
| 21 | | H.POPb | Phenol (harzreich) | Papier | |
| 22 | | H.PAPb | Phenol | Asbestpapier | |
| 23 | | H.PAGb | Phenol | Glasgewebe | |
| 24 | | — | Epoxy-Phenol | Glasgewebe | |
| 25 | Formgußstück | — | Epoxy (Araldit B) | — | II |
| 26 | | — | Epoxy (Araldit B) | Quarzmehl | |
| 27 | Thermoplast. Formstück | — | Celluloseacetat (Courtaulds) | | |
| 28 | | — | Celluloseacetat (Kodak) | | |
| 29 | | — | Celluloseacetobutyrat (Kodak) | | |
| 30 | | — | Polyamid (Nylon 1001) | | |
| 31 | | — | Polyamid (Nylon NT) | | |
| 32 | | — | Polyamid (Grilon) | | |
| 33 | | — | Polymethylmethacrylat (Plexigum) | | |
| 34 | | — | Polystyrol (Montecatini) | | |
| 35 | | — | Polystyrol, schlagfest (Dow) | | |
| 36 | | — | Polyäthylen (ICI) | | |

¹⁾ Mehrere Probenummern bei gleicher Materialbezeichnung erhielten Probematerial von verschiedenen Herstellern oder Verarbeitern.

Für jede Prüfung wurden in Übereinstimmung mit den SEV-Vorschriften und DIN-Normen 5 Einzelbestimmungen durchgeführt. Im Hinblick auf die auftretende Streuung der einzelnen Bestimmungen mag diese Zahl als ungenügend erscheinen. Die gleichzeitige Prüfung an 5 Prüfstellen und die Ausdehnung der Prüfung auf 5 verschiedene Spannungen und 2 Tropfengrößen ermöglicht jedoch eine ausreichende Zuverlässigkeit in der Beurteilung der erhaltenen Resultate. Eingehende Grosszahluntersuchungen von *Claussnitzer* und *Siegel* [7; 8] ergeben eine im allgemeinen recht gute Übereinstimmung von Versuchen mit 50...200 und Versuchen mit 5 Einzelbestimmungen, wobei die Zuverlässigkeit der Ergebnisse von Stoff zu Stoff beträchtliche Unterschiede aufwies.

E. Darstellung und Auswertung der Prüfergebnisse

Die Beurteilung der Prüfergebnisse der einzelnen Probematerialien kann anhand von Darstellungen, wie sie für 4 Beispiele in den Fig. 3, 4, 5 und 6 wiedergegeben sind, erfolgen. Die Diagramme vereinigen alle Messwerte für ein Probematerial bei bestimmter Tropfengröße, erhalten aus den Einzelbestimmungen aller beteiligten Prüfstellen bei 5 verschiedenen Prüfspannungen.

Charakteristisch ist in allen Fällen das Ansteigen der Tropfenzahl mit sinkender Prüfspannung. Mit steigender Tropfenzahl vergrößert sich der relative Streubereich der Messwerte. Die Bedingungen für die Bestimmung einer unteren Grenzspannung, bei welcher die Kriechwegbildung unterbleibt — in der praktischen Durchführung des Entwurfs des CEI bis die Tropfenzahl über 50 steigt — sind demnach ungünstig. Anderseits erscheint es auf Grund der erhaltenen Punktfolgen ebensowenig zweckmäßig, die Tropfenzahl bei einer bestimmten Prüfspannung — z. B. 300 V entsprechend Publ. Nr. 177 des SEV oder 380 V entsprechend DIN 53480 — als ausschliessliches Kriterium für die Kriechwegfestigkeit festzulegen.

Beim Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Prüfstellen untereinander zeigen sich gewisse spezifische Unterschiede, die auf massgebende Abweichungen der Prüfeinrichtungen oder im Prüfverfahren zurückgeführt werden müssen: So liegen im allgemeinen die Messwerte der Prüfstellen B und E im oberen, diejenigen von D im unteren Teil des Streubereiches. Bei Prüfstelle F ist der Streubereich an sich überdurchschnittlich gross.

Als Bestimmungsgröße für die aus 5 Einzelbestimmungen bestehende Prüfung dient bei der SEV-Methode der Mittelwert, nach der DIN-Norm der niedrigste Einzelwert. Beide Auswertungsverfahren sind mit erheblichen Nachteilen verknüpft. Wird die Prüfung bei 50 bzw. 60 Tropfen auch ohne Eintreten der Kriechwegbildung abgebrochen, so ist es nicht möglich, das arithmetische Mittel zu bilden, wenn die Einzelbestimmungen teils unter, teils über der maximal erfassten Tropfenzahl liegen. Außerdem zeigen die Diagramme in Fig. 3...6 in der Verteilung der einzelnen Messwerte für eine bestimmte Spannung eine einseitig stärkere Streuung in Richtung hoher Tropfenzahlen. In dem in Fig. 7 wieder-

gegebenen Beispiel (Probematerial Nr. 14, VSM-Typ H. PAP) sind die Ergebnisse sämtlicher Prüfstellen als Summenhäufigkeitskurven für die verschiedenen Prüfspannungen dargestellt. Bei den höheren Prüfspannungen, 300, 400, 500 V, liegt, wie der gerade Verlauf zeigt, noch eine annähernd nor-

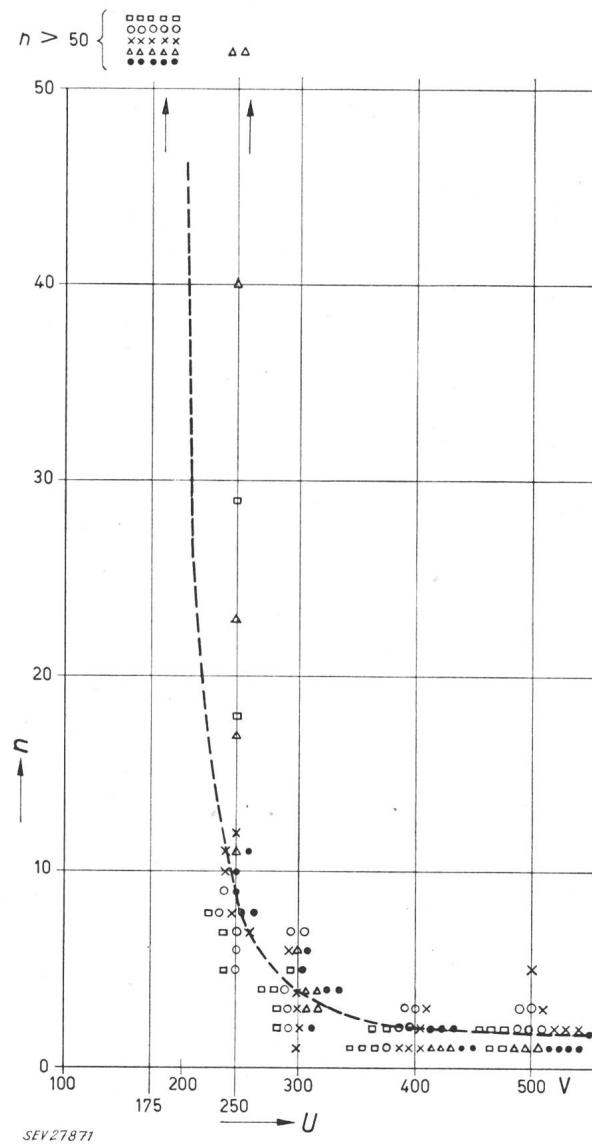


Fig. 3
Bestimmung der Kriechwegfestigkeit an Preßstoff H.PAP
(Phenolharz / 30 % Asbestpulver)

Probematerial Nr. 14, mit Tropfen von 10 mm³

- ○ △ ● Messwerte der Prüfstellen B, C, D, E, F bei den Prüfspannungen 175, 250, 300, 400 und 500 V
- Tropfenzahl in Funktion der Prüfspannung
(ermittelt aus den Zentralwerten der Einzelbestimmungen)

male Gaußsche Verteilung vor. Bei 250 V ist der Kurvenverlauf durch einen ausgeprägten Knickpunkt gekennzeichnet, der auf eine durch Störfaktoren bedingte Mischverteilung hinweist. Diese Anomalien der Verteilung führen zur Verfälschung des Mittelwertes als Bestimmungsgröße.

Ebensowenig ist der niedrigste Messwert, der bei der kleinen Zahl der Einzelbestimmungen mit einem grossen mittleren Fehler behaftet ist, für die Kennzeichnung des Prüfergebnisses geeignet.

Aus diesen Gründen wurde als Bestimmungsgröße für das Ergebnis der 5 Einzelbestimmungen der Zentralwert⁶⁾ gewählt. Wie auch das Beispiel in Fig. 7 zeigt, wird der Zentralwert weniger beeinflusst von extremen Werten, den «Ausreisern», und ist bei kaum grösserem mittlerem Fehler als das arithmetische Mittel mit dem geringsten Rechenaufwand zu ermitteln.

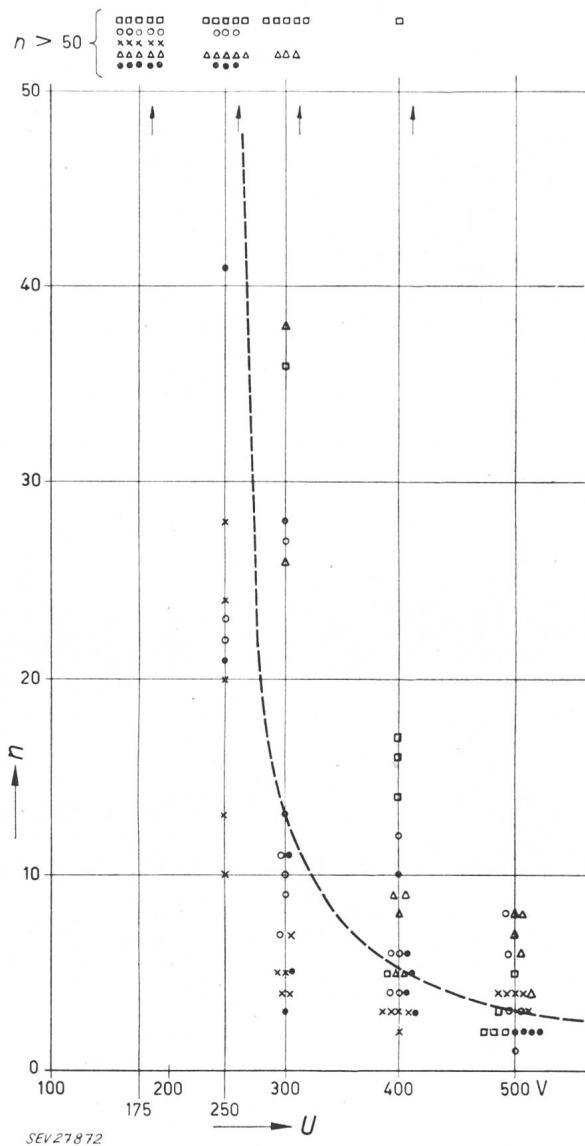


Fig. 4

Wie Fig. 3, jedoch für Preßstoff H.MPOP
(Phenol-Melaminharz / Holzmehl)
Probematerial Nr. 17
Bezeichnungen siehe Fig. 3

Die Zentralwerte der von den einzelnen Prüfstellen durchgeführten Versuche und der Zentralwert für die Gesamtheit aller Einzelbestimmungen einer Prüfung sind in der Tabelle III für die erste Versuchsreihe und in den Tabellen IV und V für die zweite Versuchsreihe zusammengestellt. Auf den Zentralwerten sämtlicher Einzelbestimmungen der 5 Prüfstellen basieren die in den Diagrammen Fig.

⁶⁾ Zur Ermittlung des Zentralwertes ordnet man die Einzelergebnisse nach zunehmenden Werten. Durch aufeinanderfolgendes Streichen von Wertpaaren, bestehend aus je einem höchsten und tiefsten Einzelergebnis, gelangt man bei einer ungeraden Zahl von Einzelwerten zu einem verbleibenden Zentralwert.

3...6 eingetragenen Kurven zur Charakterisierung der Spannungsabhängigkeit der Grenztropfenzahl. In Fig. 8 sind die Tropfenzahl-Spannungs-Kurven für die wichtigsten Isolierstoffe aus den beiden Versuchsreihen, geprüft mit der Tropfengrösse 20 mm³, in Fig. 9 geprüft mit der Tropfengrösse 10 mm³, zusammengefasst. In den beiden Darstellungen fehlen die Produkte, die bei 500 V Prüfspannung Tropfen-

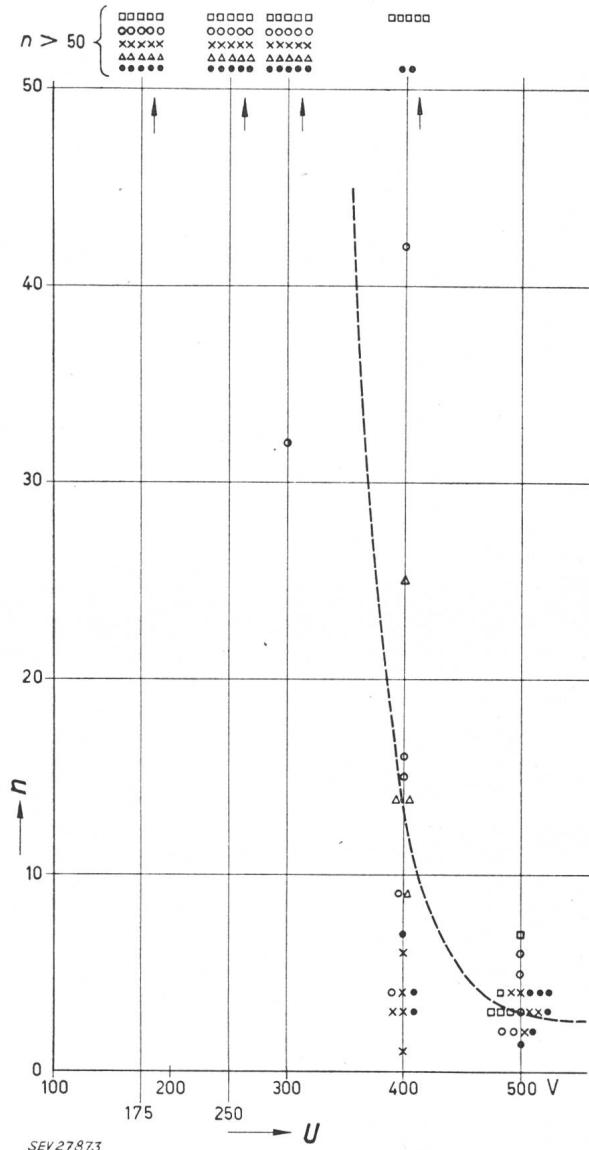


Fig. 5

Wie Fig. 3, jedoch für Schichtstoff H.POPb
(Phenolharz / Hartpapier)
Probematerial Nr. 21
Bezeichnungen siehe Fig. 3

zahlen über 50 aufweisen, nämlich die Melaminharze (Proben Nr. 9...13), die Formpreßstücke auf der Grundlage von Polyester-, Alkyd- und Epoxyharzen (Nr. 18, 19, 25, 26) und sämtliche thermoplastischen Kunststoffe (Nr. 27...36). Diese Isoliermaterialien umfassen somit eindeutig eine einwandfrei abgrenzbare höchste Stufe der Kriechwegfestigkeit.

Schwieriger wird eine zuverlässige und sinnvolle Unterteilung der im dargestellten Bereich der Fig. 8 und 9 erfassten Produkte. In allen Fällen handelt es sich um Formpreßstücke oder Schichtpreßstoffe, die Phenolharze enthalten, seien es reine Phenol-

Übersicht über die Ergebnisse der 1. Versuchsreihe: Formpreßstücke

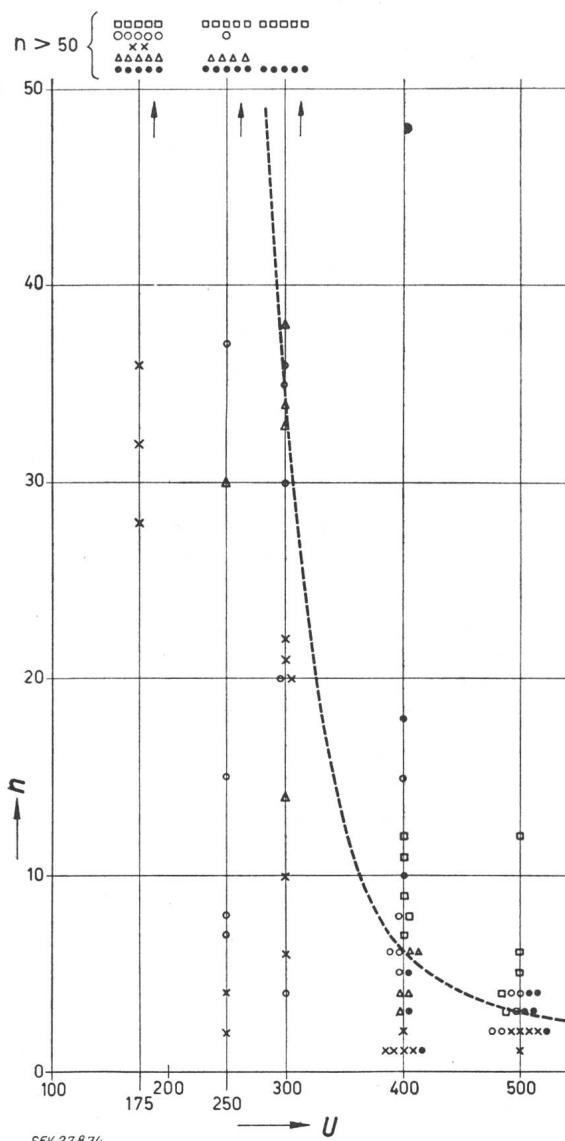
Tabelle III

| Probematerial | | Tropfengröße mm ³ | Tropfenzahlen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------|---------------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|---|-----|---|-----|---|---|
| | | | Prüfspannung | | | | | | | | | | Prüfspannung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nr. | Typenbezeichnung | mm ³ | 175 V | | | | | 250 V | | | | | 300 V | | | | | 400 V | | | | | 500 V | | | | | | | | | |
| | | | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | Prüfstelle | | | | | | | |
| | | | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | | | | | |
| 1 | H.POP | 20 | 4 | 17 | 10 | 14 | 10 | 10 | 2 | 6 | 4 | 5 | 5 | 4 | 1 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | |
| 2 | H.POP | | 9 | 9 | 7 | 12 | 12 | 9 | 3 | 3 | 2 | 2 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| 3 | H.POP | | 7 | 10 | 8 | 7 | 12 | 8 | 2 | 5 | 4 | 2 | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 4 | H.POP | | 6 | 12 | 14 | 10 | 22 | 11 | 3 | 3 | 7 | 4 | 7 | 4 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | |
| 5 | H.PAP | | 13 | 18 | 13 | 13 | 20 | 15 | 4 | 9 | 6 | 4 | 7 | 6 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 6 | H.PAF | | 26 | 32 | >50 | 47 | >50 | 40 | 8 | 10 | 9 | 5 | 28 | 9 | 5 | 7 | 6 | 5 | 6 | 6 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 7 | H.PAF | | 20 | 24 | 22 | 10 | >50 | 22 | 4 | 8 | 7 | 4 | 8 | 7 | 3 | 5 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 8 | H.MPOP | | 23 | 19 | >50 | 13 | >50 | 25 | 11 | 14 | 17 | 5 | 50 | 13 | 4 | 11 | 9 | 4 | 16 | 5 | 2 | 4 | 3 | 2 | 6 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 |
| 9 | H.MOP | | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | | |
| 10 | H.MOP | | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | | |
| 11 | H.MAP | | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | | |
| 12 | H.MAF | | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | | |
| 13 | H.MAF | | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | — | >50 | | |
| 1 | H.POP | 10 | 10 | — | — | — | — | — | 27 | 5 | — | 8 | — | 2 | — | — | — | 4 | — | 2 | — | — | 2 | — | 1 | — | — | — | 1 | — | — | |
| 2 | H.POP | | 6 | — | — | — | — | — | 29 | 2 | — | 6 | — | 2 | — | — | — | 2 | — | 2 | — | — | 1 | — | — | — | 1 | — | — | | | |
| 3 | H.POP | | 7 | — | — | — | — | — | 22 | 5 | — | 7 | — | 2 | — | — | — | 5 | — | 2 | — | — | 4 | — | — | — | 2 | — | — | | | |
| 4 | H.POP | | 11 | — | — | — | — | — | 20 | 2 | — | 6 | — | 3 | — | — | — | 3 | — | 2 | — | — | 4 | — | — | — | 4 | — | — | | | |
| 5 | H.PAP | | 17 | — | — | — | — | — | 27 | 10 | — | 9 | — | 2 | — | — | — | 5 | — | 1 | — | — | 1 | — | — | — | 1 | — | — | | | |
| 6 | H.PAF | | >50 | — | — | — | — | >50 | 26 | — | — | 20 | — | 12 | — | — | — | 11 | — | 2 | — | — | 2 | — | — | — | 1 | — | — | 2 | | |
| 7 | H.PAF | | 46 | — | — | — | — | >50 | 7 | — | — | 15 | — | 3 | — | — | — | 5 | — | 3 | — | — | 2 | — | — | — | 2 | — | — | 1 | | |
| 8 | H.MPOP | | 21 | — | — | — | — | >50 | 13 | — | — | >50 | — | 5 | — | — | — | 23 | — | — | — | — | 5 | — | — | — | 6 | — | — | — | | |
| 9 | H.MOP | | — | — | — | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | — | — | — | >50 | — | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | | |
| 10 | H.MOP | | — | — | — | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | | |
| 11 | H.MAP | | — | — | — | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | | |
| 12 | H.MAF | | — | — | — | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | | |
| 13 | H.MAF | | — | — | — | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | >50 | — | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | — | — | — | >50 | | |

Übersicht über die Ergebnisse der 2. Versuchsreihe: Formpreßstücke, Schichtpreßstoffe, Formgußstücke

Tabelle IV

| Nr. | Probematerial | Typenbezeichnung | Tropfenzahl Zentralwert aus 5 Einzel- bestimmungen der Prüfstelle B mit Tropfen von 20 mm ³ Prüfspannung 175 V, 250 V, 300 V, 400 V, 500 V | Beobachtungen bei der Prüfung mit 500 V | |
|-----|---|------------------|--|---|---|
| | | | | | |
| 27 | Celluloseacetat (Courtaulds) | | — > 60 — | | |
| 28 | Celluloseacetat (Kodak) | | — > 60 — | | |
| 29 | Celluloseacetobutyrat (Kodak) | | — > 60 — | | ähnlich Nr. 27 und 28, jedoch geringere Einwirkung |
| 30 | Polyamid (Nylon 1001) | | — > 60 — | | starke Aushöhlung durch Anschmelzen des Materials, blasig, verfärbt durch dunkle Zersetzungspprodukte |
| 31 | Polyamid (Nylon NT) | | — > 60 — | | ähnlich Nr. 30, starker blasig |
| 32 | Polyamid (Grilon) | | — > 60 — | | ähnlich Nr. 30 |
| 33 | Polymethylmethacrylat (Plexigum) | | — > 60 — | | schwache Aufrauhung der Oberfläche, kein Einsinken der Elektroden |
| 34 | Polystyrol (farblos) (Montecatini) | | — > 60 — | | leichte Aufrauhung der Oberfläche |
| 35 | Polystyrol schlagfest (Dow) (weiss pigmentiert) | | — > 60 — | | stärkere Aufrauhung, dunkle Zersetzungspprodukte |
| 36 | Polyäthylen (ICI) (schwarz) | | — > 60 — | | starke Aufrauhung der Oberfläche |



Wie Fig. 3, jedoch für Schichtstoff H.PAPb (Phenolharz /Asbesthartpapier)

Probematerial Nr. 22

Bezeichnungen siehe Fig. 3

harze oder Kombinationen von Phenol- mit Melaminharzen oder mit Epoxyharzen.

Mit den niedrigsten Tropfenzahlen bei den tiefsten Prüfspannungen beginnen die Phenoplast-Preßstoffe mit organischen Füllstoffen, anschließend folgen die Phenoplast-Preßstoffe und -Schicht-

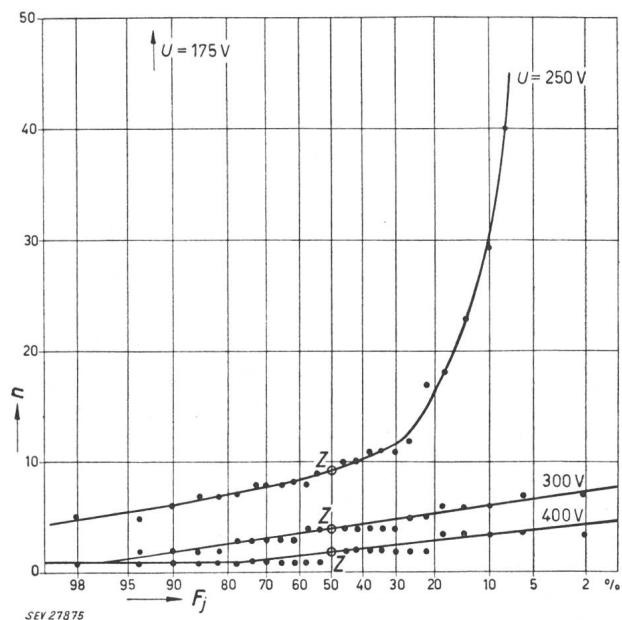


Fig. 7
Summenhäufigkeitskurven der Grenztropfenzahlen von Preßstoff H.PAP

Probematerial Nr. 14 (wie Fig. 3) bei verschiedenen Prüfspannungen, geprüft mit Tropfen von 10 mm³
n Tropfenzahl bis zur Auslösung; F_j Summenhäufigkeit [%]; U Prüfspannungen [V]; Z Zentralwerte der Tropfenzahlen

stoffe mit Glasfasern oder Glasfasergeweben und weiter mit Asbestfasern als Füllstoff. Die höchsten Tropfenzahlen bei 300...400 V ergeben sich bei Phenolharz-Papier- und Phenolharz-Asbest-Schichtpreßstoffen und bei den gemischten Phenol-Melaminharz-Preßstoffen.

Bei der Prüfung mit Tropfen von 20 mm³ (Fig. 8) fallen die Tropfenzahl-Spannungs-Kurven der

meisten erfassten Produkte in ein derart enges Gebiet, dass, wenn noch die auftretenden Überschneidungen berücksichtigt werden, eine Unterteilung kaum mehr durchführbar ist.

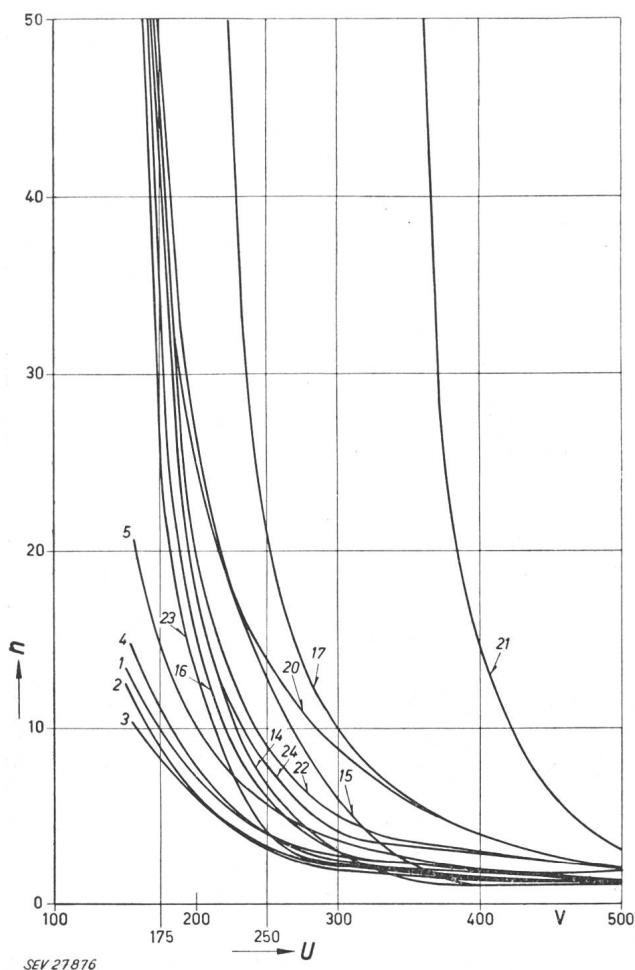


Fig. 8

Grenztropfenzahl in Funktion der Prüfspannung für verschiedene organische Isolierstoffe, geprüft mit Tropfen von 20 mm^3

1...24 Tropfenzahl-Spannungskurven für die Probematerialien 1...24, ermittelt aus den Zentralwerten aller Prüfstellen

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 7

Günstiger liegen die Verhältnisse bei der Prüfung mit Tropfen von 10 mm^3 : In Fig. 9 sind die Kurven für die entsprechenden Produkte bei im wesentlichen gleicher Reihenfolge weiter auseinandergerückt. Es lassen sich zwei Gruppen festlegen, die mit den bisher üblichen Abstufungen wie auch mit den praktischen Erfahrungen hinsichtlich des Kriechstromverhaltens weitgehend übereinstimmen. Die niedrigste Stufe mit weniger als 7 Tropfen bei 300 V umfasst hauptsächlich Formpreßstücke mit Holzmehl, Glasfasern und niedrigem Gehalt an Asbest als Füllstoff. Mit mehr als 7 Tropfen bei 300 V folgen als zweite Gruppe Formpreßstücke mit hohem Gehalt an mineralischen Füllstoffen, die meisten Schichtpreßstoffe und mit Melaminharzen modifizierte Phenoplaste. Eine weitergehende Unterteilung erscheint auf Grund der durchgeföhrten Versuche nicht als zweckmäßig, da die Zuordnung zu einer grösseren Zahl von Klassen bei der beobachteten Streuung der Ergebnisse zu unsicher ist.

Die resultierenden drei Klassen der Kriechwegfestigkeit sind in Fig. 9 durch die drei Felder *a*, *b* und *c* wiedergegeben, welche durch die Kurvenzüge *A* und *B* voneinander abgegrenzt sind.

Für die praktische Durchführung der Prüfung können die Klassen folgendermassen charakterisiert werden:

Die Klasse *a* der Kriechwegfestigkeit ist erreicht, wenn bei 500 V Prüfspannung mehr als 30 Tropfen zu 10 mm^3 zur Bildung eines Kriechweges erforderlich sind. (Punkt A_1 auf Kurve *A* in Fig. 9.) Die Versuche zeigen, dass die Zahl von 30 Tropfen ausreicht zur sicheren Abgrenzung, was den Prüfaufwand erheblich vermindert.

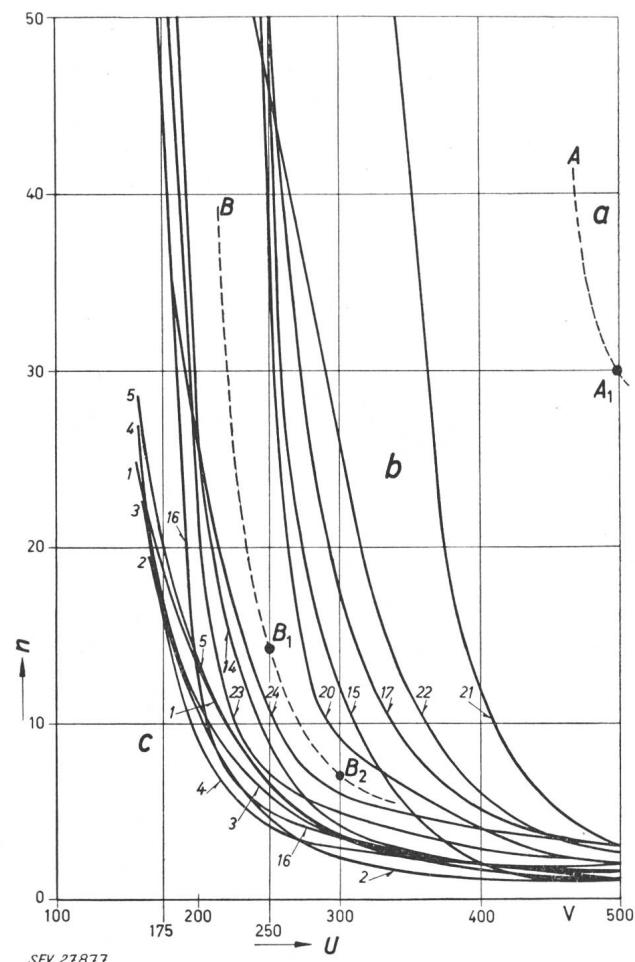


Fig. 9
Grenztropfenzahl in Funktion der Prüfspannung für verschiedene organische Isolierstoffe, geprüft mit Tropfen von 10 mm^3

- 1...24 Tropfenzahl-Spannungskurven für die Probematerialien 1...24
 - a*, *b*, *c* Zuordnungsbereiche der Kriechwegfestigkeits-Klassen *a*, *b*, *c*
 - A* Begrenzungskurve zwischen den Zuordnungsbereichen *a* und *b*
 - A_1 Kriterium für die Zuordnung zu Klasse *a*
 - B* Begrenzungskurve zwischen den Zuordnungsbereichen *b* und *c*
 - B_1 , B_2 Kriterium für die Zuordnung zu Klasse *b*
- Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 7

Die Bedingungen für die Zuordnung zur Klasse *b* sind erfüllt, wenn bei 250 V über 15 Tropfen und bei 300 V über 7 Tropfen (Punkte B_1 und B_2 auf Kurve *B*) zur Kriechwegbildung erforderlich sind.

In die Klasse *c* fallen jene Isolierstoffe, welche eine oder beide der für die Zuordnung zur Klasse *b* erforderlichen Bedingungen nicht erfüllen.

Aus der Anwendung dieser Festlegungen auf die durchgeführten Versuche ergibt sich die in Tabelle VI wiedergegebene Klassierung der untersuchten Isolierstoffe.

*Klassierung der untersuchten Isolierstoffe in die Kriechwegfestigkeitsklassen *a*, *b* und *c**
(Prüfung mit Tropfengröße 10 mm³)

Tabelle VI

| Isolierstoff | Probe Nr. | Klasse der Kriech- weg- festig- keit ¹⁾ | Klassenzuteilung nach Ergebnis der einzelnen Prüfstellen | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|---|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | A | B | C | D | E | F |
| <i>Formpreßstücke</i> | | | | | | | | |
| H.POP | 1 | | | | | | <i>c</i> | |
| H.POP | 2 | | | | | | <i>c</i> | |
| H.POP | 3 | | | | | | <i>c</i> | |
| H.POP | 4 | | | | | | <i>c</i> | |
| H.PAP (Asbest) | 5 | | | | | | <i>c</i> | |
| H.PAP (30% Asbest) | 14 | <i>c</i> | | <i>c</i> | <i>c</i> | <i>c</i> | <i>c</i> | <i>c</i> |
| H.PAF (Asbest) | 7 | | | <i>c</i> | <i>c</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>c</i> |
| H.PAF (Glasfasern) | 16 | | | <i>c</i> | <i>c</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>c</i> |
| <i>Schichtpreßstoffe</i> | | | | | | | | |
| H.PAGb (Glasgewebe) | 23 | | | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>c²⁾</i> | <i>c²⁾</i> | <i>c</i> |
| Epoxy-Phenol / Glas- gewebe | 24 | | | <i>c²⁾</i> | <i>c</i> | <i>c</i> | <i>c²⁾</i> | <i>b</i> |
| <i>Formpreßstücke</i> | | | | | | | | |
| H.PAP (50% Asbest) | 15 | | | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>b</i> | <i>b</i> | <i>b</i> |
| H.PAF (Asbest) | 6 | | <i>b</i> | | | | <i>b</i> | |
| H.MPOP | 8 | | <i>c</i> | | | | <i>b</i> | |
| H.MPOP | 17 | <i>b</i> | | <i>b</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>b</i> | <i>b</i> |
| <i>Schichtpreßstoffe</i> | | | | | | | | |
| H.POPb, normal | 20 | | | <i>b</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>b</i> | <i>c²⁾</i> |
| H.POPb, harzreich | 21 | | | <i>b</i> | <i>b</i> | <i>b</i> | <i>b</i> | <i>b</i> |
| H.PAPb (Asbest) | 22 | | | <i>b</i> | <i>c²⁾</i> | <i>c²⁾</i> | <i>b</i> | <i>b</i> |
| <i>Formgußstücke</i> | | | | | | | | |
| Alkyd / Mineralpulver | 19 | | | <i>a</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>a</i> | <i>a</i> |
| Polyester/Glasfasern | 18 | | | <i>a</i> | <i>a</i> | <i>a</i> | <i>a</i> | <i>a</i> |
| H.MOP | 9 | | | | | | | |
| H.MOP | 10 | | | | | | | |
| H.MAP (Asbest) | 11 | | | | | | | |
| H.MAF (Asbest) | 12 | | | | | | | |
| H.MAF (Asbest) | 13 | | | | | | | |
| <i>Thermoplast. Form- stücke</i> | | | | | | | | |
| Celluloseacetat | 27 | | | | | <i>a</i> | | |
| Celluloseacetat | 28 | | | | | <i>a</i> | | |
| Celluloseacetobutyrat | 29 | | | | | <i>a</i> | | |
| Polyamid (Nylon) | 30 | | | | | <i>a</i> | | |
| Polyamid (Nylon) | 31 | | | | | <i>a</i> | | |
| Polyamid (Grilon) | 32 | | | | | <i>a</i> | | |
| Polyethylmetha- crylat | 33 | | | | | <i>a</i> | | |
| Polystyrol, normal | 34 | | | | | <i>a</i> | | |
| Polystyrol, schlagfest | 35 | | | | | <i>a</i> | | |
| Polyäthylen | 36 | | | | | <i>a</i> | | |

¹⁾ Klassierung nach dem Zentralwert aus dem Ergebnis sämtlicher Prüfstellen.

²⁾ Eine der beiden Bedingungen für Zuteilung zur Klasse *b* erfüllt.

Der Vergleich der nach dem Ergebnis der einzelnen Prüfstellen erhaltenen Klassenzuteilungen mit der aus dem Gesamtergebnis aller Prüfstellen resultierenden Klassierung zeigt für die Klassen *a* und *c* eine nahezu vollständige Übereinstimmung.

In Klasse *b* ist die Sicherheit der Zuordnung geringer. Sie sollte aber durch die weiteren Verbesse-

rungen der Prüfmethode, wie sie sich aus den Erfahrungen mit der ersten und zweiten Versuchsreihe ergeben haben, noch erhöht werden können.

So wurde durch zusätzliche Versuche einer Prüfstelle festgestellt, dass die Auslösung bei 0,5 A mit einer maximalen Verzögerung des Relais von 1 s die Streuung der Messwerte vermindert gegenüber den Prüfbedingungen mit 2 A Auslösestrom und Momentanauslösung.

Fig. 10 zeigt einige charakteristische Bilder, wie sie sich aus der Kriechstromprüfung ergeben: Ein leitender Kriechweg bildet sich nur bei Phenoplast-

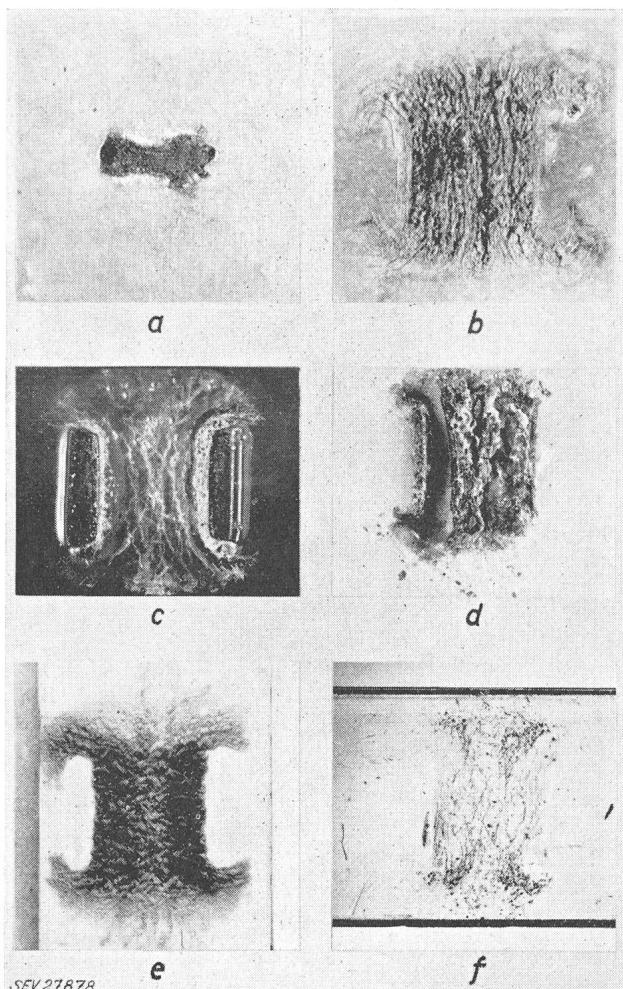


Fig. 10
Verschiedene Isolierstoffe nach der Kriechstromprüfung mit 0,1-%-Ammoniumchloridlösung

- a) Preßstoff Phenolharz-Cellulosefasern
300 V, 4 Tropfen. Charakteristische Kriechwegbildung in Richtung des elektrischen Feldes
- b) Preßstoff Melaminharz-Cellulose
300 V, 60 Tropfen. Rillenbildung quer zum elektrischen Feld, ohne Kriechweg
- c) Celluloseacetat (Probe Nr. 27)
500 V, 50 Tropfen. Leichte Aufrauhung, ohne Kriechweg. Einsticken der Elektroden in die erweichte Oberfläche.
- d) Polyamid (Probe Nr. 32)
500 V, 50 Tropfen. Starke Aushöhlung durch Aufschmelzen und Zersetzung des Materials, ohne Kriechwegbildung
- e) Polystyrol, schlagfest (Probe Nr. 35)
500 V, 50 Tropfen. Gleichmäßige Aufrauhung und Dunkelfärbung durch Einlagerung von Russ in die angeschmolzene Oberflächenschicht, ohne Kriechwegbildung
- f) Polymethylmethacrylat (Probe Nr. 33)
Leichte Erosion der Oberfläche ohne sichtbare Zersetzungsprodukte, ohne Kriechwegbildung

sten (Beispiel *a*). Bei Melaminharzen (*b*) entstehen durch die oberflächliche Zersetzung zu vorwiegend gasförmigen Produkten Rillen quer zur Richtung des elektrischen Feldes ohne Auftreten eines Kriechweges. Mehr oder weniger starke oberflächliche Veränderungen, wie Aufrauhung, Haarrissbildung oder Aushöhlung durch Schmelzen oder thermische Zersetzung, jedoch auch wieder ohne Kriechwegbildung, treten bei den thermoplastischen Kunststoffen (Beispiele *c...f*) in Erscheinung.

F. Folgerungen und Empfehlungen

Auf Grund der durchgeführten Gemeinschaftsversuche wird das im Entwurf der CEI [Dokument 15 (Bureau Central) 8] vorgeschlagene Verfahren zur Prüfung der Kriechwegfestigkeit wohl grundsätzlich als geeignet betrachtet. Doch scheinen gewisse Änderungen und ergänzende Festlegungen unerlässlich, um zu einem Prüfverfahren zu gelangen, das eine reproduzierbare Einteilung der Isolierstoffe in Klassen verschiedener Kriechwegfestigkeit gestattet und die Anwendung der Prüfung auf ungünstig geformte Prüflinge ermöglicht. Zudem muss eine bestimmte Auswertungsmethode festgelegt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Änderungen werden die folgende *Prüfbedingungen* vorgeschlagen:

Prüfgerät mit Elektroden aus Wolfram von 5 mm × 2 mm Querschnitt:

| | |
|---|-------------------|
| Elektrodenabstand | 4 mm |
| Winkel der Elektroden gegen die Horizontale | 60° |
| Auflagefläche | 5 mm × 0,5...1 mm |
| Auflagedruck | 50...100 g |

Stromquelle und Auslösung:

| | |
|-------------------------|-------|
| Kurzschlußstrom | 3 A |
| Auslösestrom des Relais | 0,5 A |
| maximale Verzögerung | 1 s |

Prüflösung:

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Ammoniumchloridlösung | 0,1 % |
| Tropfengröße | 10 ± 1 mm ³ |
| Tropfenfolge | 30 ± 5 s |

Prüfspannungen: 250, 300, 500 V (50 Hz)

Minimale Anzahl Einzelbestimmungen: 5

Gegenüber den im Entwurf der CEI vorgesehnen Elektroden aus Platin oder unedlen Metallen hat das Wolfram den Vorteil des geringeren Abbrandes bei Unempfindlichkeit gegen die Elektrolytlösung.

Ein Tropfenintervall von 30 s ist, wie die Versuche zeigten, ausreichend. Die Tropfengröße von 10 mm³ wird bevorzugt wegen der besseren Differenzierung der Ergebnisse, wie auch wegen der Notwendigkeit der Prüfung an unregelmäßig geformten, unebenen Prüflingen, auf welchen bei grösseren Tropfenvolumen ein Teil des Tropfens ausserhalb des Wirkungsbereiches der Elektroden fliest und damit das Ergebnis der Prüfung wesentlich beeinflusst. Da die vorgeschlagene Methode ebenfalls für die Neufassung der Vorschriften des SEV über die Prüfung fester Isolierstoffe (Publikation Nr. 177) berücksichtigt werden soll, ist diesem Umstand besonders Rechnung zu tragen, indem diese Prüfungen im Rahmen der gesetzlichen Sicherheitsvorschriften an fertigen Isolierstücken durchgeführt werden müssen.

Zur Beurteilung der Kriechwegfestigkeit ist die Durchführung der Prüfung nur mit einer Spannung häufig nicht ausreichend. Umgekehrt ist die Erfassung des Kriechwegindexes nach dem Entwurf der CEI relativ umständlich und für die praktische Durchführung zu wenig genau umschrieben. Die hier vorgeschlagene Prüfung bei drei verschiedenen Spannungen (250, 300 und 500 V) gestattet bei beschränktem Prüfaufwand eine zuverlässige Bestimmung der Kriechwegfestigkeit.

Als *Prüfergebnis* sind die Tropfenzahlen bei den drei Prüfspannungen massgebend, wobei der Zentralwert aus 5 Einzelbestimmungen als Bestimmungsgröße für die Tropfenzahl bei einer bestimmten Spannung gilt.

Die Anwendung der beschriebenen Prüfmethode und Auswertung erlaubt eine gesicherte *Klassenzuordnung* der organischen Isolierstoffe in die drei folgenden Klassen:

| Kriechwegfestigkeit | | Zuteilungsbedingungen | |
|---------------------|----------|--|---------------------|
| Klasse | | Tropfenzahl bis zur Auslösung | |
| gut | <i>a</i> | > 30 | bei 500 V |
| mittel | <i>b</i> | > 7 und > 15 | bei 300 V bei 250 V |
| gering | <i>c</i> | wenn eine oder beide Bedingungen für Klasse <i>b</i> nicht erfüllt sind. | |

Die derart definierten Abstufungen der Kriechwegfestigkeit stimmen mit den praktischen Erfahrungen über die Kriechweganfälligkeit der erfassten Isolierstoffe im allgemeinen überein und sind damit als Grundlage für eine abgestufte Bemessung der Kriechstrecken geeignet.

Charakteristische Vertreter dieser drei Klassen der Kriechwegfestigkeit sind beispielsweise:

Klasse *a* Anorganische Isolierstoffe
(Keramik, Glas, Glimmer, Asbest)

Kunststoffe auf der Grundlage von
Melaminharzen
Harnstoffharzen
Epoxyharzen⁷⁾
Polyesterharzen⁷⁾
Alkydharzen⁷⁾

Thermoplastische Kunststoffe wie
Polymethacrylate
Polystyrol
Polyäthylen
Polyvinylchlorid
Polyamide
Cellulose-Kunststoffe

Klasse *b* Formpreßstoffe auf der Grundlage von
Phenol-Melaminharzmischungen,
Phenolharzen mit hohem Gehalt
an mineralischen Füllstoffen

Schichtpreßstoffe auf der Grundlage von
Phenolharzen mit Papier oder Asbest-
produkten als Harzträger

⁷⁾ Je nach Harztyp, Füllstoff und Zusatzstoffen, wie z. B. Phenolharzen, können Epoxy-, Polyester- und Alkydharzkunststoffe auch in die tieferen Klassen fallen.

- Klasse c Phenolharzkunststoffe**
 mit vorwiegend organischen Füllstoffen, wie Holzmehl, Cellulosefasern oder Gewebebeschnitzeln
 mit Glasfaserprodukten als Füllstoff, mit geringem Gehalt an mineralischen Füllstoffen.

Literatur

- [1] **VSM 77114:** Kunststoffe und Isolierstoffe für die Elektrotechnik. Kriechwegfestigkeit und Kriechwegsicherheit, Beiträge.
VDE 0303. Teil 1/10.55: Leitsätze für elektrische Prüfungen von Isolierstoffen. Teil 1: Bestimmung der Kriechstromfestigkeit bei Betriebsspannungen unter 1 kV.
DIN 53480 — Okt. 1955: Prüfung von Isolierstoffen. Bestimmung der Kriechstromfestigkeit bei Betriebsspannungen unter 1 kV.
[2] **Knappe, W.:** Die Kriechstromfestigkeit von Isolierstoffen. ETZ Bd. 72(1951), Nr. 8, S. 224...228.

- [3] **Schumacher, K.:** Kriechwegbildung bei Kunststoffen. ETZ-A Bd. 76(1955), Nr. 11, S. 369...376.
[4] **Schweiz. Verband für die Materialprüfungen der Technik. FK 23:** Prüfung von elektrotechnischen Isolierstoffen auf Kriechwegfestigkeit. Schweizer Arch. angew. Wiss. Techn. Bd. 12(1946), Nr. 10, S. 323...328.
[5] **Liander, H. und A. Asplund:** Creepage Flash-Over Testing of Plastics. CEE/032/S 105/50.
[6] **Kappeler, H.:** Kriechstromfestes Isoliermaterial. Micafil-Nachr. Bd. -(1945), S. 15...16.
[7] **Claussnitzer, W. und V. Siegel:** Zur Kennzeichnung der Kriechstromfestigkeit nach dem Tropfverfahren durch Grenztropfenzahlen oder Grenzspannungen. Kunststoffe Bd. 48(1958), Nr. 7, S. 299...305.
[8] **Claussnitzer, W. und V. Siegel:** Über die Bestimmung der Kriechstromfestigkeit von Isolierstoffen in Grosszahlversuchen. ETZ-A Bd. 79(1958), Nr. 5, S. 144...149.

Adressen der Autoren:

Dr. phil. **K. Michel**, Chemisches Laboratorium der AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG), und **M. H. Hillenkamp**, dipl. Ing., Konstruktionsabteilung für Grossapparate der AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Commentaires d'un exploitant concernant le projet de code international d'essais de modèles réduits de turbines

Conférence donnée à l'assemblée de discussion du 13 février 1959 à Zurich¹⁾,
 par **P. Bourguignon**, Chatou

621.224.001.57

Indépendamment de buts non couverts par le projet de code international tels que la contribution à l'étude des effets d'échelle, les essais de réception sur modèle réduit n'ont de réel intérêt que si les conditions de mesure in situ conduisent à des frais élevés ou à une précision trop faible. Dans cet esprit leur emploi est surtout recommandé pour les installations de basse-chute. Dans sa rédaction actuelle le projet répond sensiblement aux désirs de l'exploitant. Il insiste à plusieurs reprises sur l'intérêt du doublement systématique des mesures au moyen de procédés ou d'appareils différents et recommande par priorité les méthodes de mesure de débit aisément contrôlables. Il prévoit la possibilité de contrôles de similitude au moyen d'essais effectués in situ. Par contre, il n'insiste peut-être pas assez sur la nécessité de prévoir au contrat de fourniture l'indication aussi précise que possible de toutes les conditions de mesure.

Unabhängig davon, dass der Entwurf von Empfehlungen der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) für Abnahmeverweise am Modell hydraulischer Maschinen gewisse Anliegen, z. B. einen Beitrag an das Studium der Frage des Einflusses des Modellmaßstabes, außer Betracht lässt, sind Abnahmeverweise am Modell nur dann von wirklichem Interesse, wenn die Versuche an der fertigen Maschine entweder hohe Kosten verursachen oder zu wenig genaue Ergebnisse liefern. Sie werden daher vorzugsweise bei Anlagen mit kleinem Gefälle angewendet werden. In der vorliegenden Fassung entspricht der Entwurf weitgehend den Bedürfnissen des Kunden. Er enthält wiederholt Hinweise auf die Wichtigkeit der Wiederholung der Messungen mit anderen Verfahren oder anderen Messgeräten und empfiehlt in erster Linie die leicht überprüfbar Wassermengen-Messungen. Ferner enthält der Entwurf die Möglichkeit von Vergleichsmessungen an der an Ort und Stelle eingebauten, fertigen Maschine. Dagegen betont er vielleicht zu wenig, wie wichtig es ist, im Liefervertrag alle Messbedingungen so genau wie möglich festzulegen.

Dans le cadre de l'assemblée de discussion consacrée aux essais sur modèles réduits de turbines hydrauliques, le Président de l'assemblée, Monsieur le Professeur Gerber²⁾ m'a demandé d'exprimer mon opinion concernant le projet de code international d'essais de réception sur modèle réduit en tant que membre d'une firme exploitant des usines hydroélectriques et possédant une station d'essais.

Il n'est donc peut-être pas sans intérêt de rappeler d'abord les raisons qui ont conduit l'Electricité de France à se constituer une telle station.

I. Intérêt d'une station de modèles réduits chez un exploitant d'usines hydroélectriques

Dès sa création, l'Electricité de France s'est souciée de constituer des équipes susceptibles de contrôler le fonctionnement technique de son matériel.

¹⁾ Assemblée de discussion consacrée aux «Essais sur modèle réduit des machines hydrauliques», organisée par l'Institut des machines et installations hydrauliques à l'EPF, l'ASE, l'Association Suisse pour l'aménagement des eaux et le Groupe des ingénieurs mécaniciens de la Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes.

²⁾ Cf. Gerber, H.: Modellversuche und Abnahmeverweise am Modell hydraulischer Maschinen. Bull. ASE t. 50(1959), n° 10, p. 469...471.

Pour la production hydraulique en particulier, ce souci était guidé par le désir de connaître aussi exactement que possible les performances de ses nombreuses turbines en vue d'en assurer la meilleure exploitation. Très rapidement, ces équipes se sont préoccupées de perfectionner les méthodes de mesure, en vue de réduire la marge d'incertitude inhérente à toute détermination des performances d'une machine industrielle, dans le but de pouvoir comparer entre elles, d'une manière plus satisfaisante, les réalisations de ses différents fournisseurs et de déterminer avec plus de précision l'intérêt économique des rénovations de matériel envisagées.

Pour les installations fonctionnant sous de grandes hauteurs de chute nette, les Services de la Production Hydraulique d'Electricité de France reprirent à la base l'étude de la méthode thermodynamique de mesure des rendements. Grâce à l'utilisation d'une méthode de zéro et à la mise au point d'un matériel très précis, ils purent rapidement utiliser cette méthode d'une manière intensive. Compte tenu de l'expérience acquise à la suite de ces essais, ainsi que des nombreuses comparaisons avec d'autres méthodes, on peut estimer actuellement que les rende-