Die Auswirkung von Spalten und Hohlräumen auf die elektrische Festigkeit hochausgenutzter Epoxy-Giessharzisolationen

Autor(en): **Gänger, B.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **75 (1984)**

Heft 9

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904399

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die Auswirkung von Spalten und Hohlräumen auf die elektrische Festigkeit hochausgenützter Epoxy-Giessharzisolationen

B. Gänger

Der Bericht fasst aus den einschlägigen Veröffentlichungen die neueren Forschungsergebnisse über Bildung und Wachstum von Hohlraumentladungen speziell in Giessharzisolationen zusammen. Im Rahmen der messtechnischen Erfassung solcher Störungen wird auch auf die durch die physikalischen Vorgänge gezogene untere Nachweisgrenze für Teilentladungen eingegangen. Die Störauswirkungen auf die elektrisch bedingte Alterung und das Betriebsverhalten der giessharzisolierten Apparate werden behandelt.

En se basant sur les publications récentes, l'auteur présente un résumé des résultats de recherches sur la formation et le développement de décharges dans les vacuoles d'isolations en résine moulée. En traitant les techniques de mesure il s'occupe également de la corrélation entre les phénomènes physiques et la limite inférieure de détection des décharges partielles, de même que des répercussions des décharges sur le vieillissement purement électrique et du comportement en service d'appareils en résine moulée.

Adresse des Autors
Dr. *B. Gänger*, Dufourstrasse 5, 5430 Wettingen.

1. Einleitung

Die Kunstharze, vor allem in Form der warmhärtenden Epoxidharze mit Zugabe feingemahlener mineralischer Füllstoffe, weisen den grossen Vorteil der Giessbarkeit in flüssigem Zustande und der unveränderlich-starren Struktur nach dem Aushärten bei nur geringer Schwindung auf. Sie ermöglichen damit die Herstellung formstabiler, dauerhaltbarer und elektrisch hochwertiger Isolierungen praktisch jeder gewünschten Ausführung bei nur mässigem Gewicht. Während ihr Freiluftverhalten trotz wesentlicher Verbesserungen unter ungünstigen Umständen gelegentlich noch Wünsche offen lassen mag, haben sich hingegen solche Epoxy-Isolationen im Betrieb von Innenraumanlagen voll durchgesetzt und dort die früher üblichen aus Porzellan oder Hartpapier nahezu gänzlich verdrängt. Ganz besonders gilt dies für die vollgekapselten und mit Schwefelhexafluoridgas (SF_6) von erhöhtem Druck gefüllten Apparate und Anlagen. Dank deren äusserst geringem Platzbedarf und der weitestgehenden Unabhängigkeit von den Vorgängen und dem Zustand der freien Atmosphäre bietet diese Bauweise grosse Vorteile. Sogar als Alternative für Hoch- und Höchstspannungsleitungen kürzerer Länge finden SF_6-gefüllte Rohrleitungen in ein- oder dreiphasiger Bauweise in zunehmendem Masse Beachtung und Anwendung. Auch bei den Messwandlern setzte sich die Giessharz-Isoliertechnik bis zu hohen und höchsten Nennspannungen durch.

Wegen der hohen und durch Verdichtung noch weiter erhöhten elektrischen Festigkeit des Füllgases ergeben sich für die stützenden und tragenden festen Isolierbestandteile einer SF_6-Anlage zwangsläufig kleine Abmessungen und damit hohe elektrische Beanspruchungen auf Durch- oder Überschlag. Obwohl die gefüllten und die ungefüllten Kunstharze im Kurzversuch unter angepassten Bedingungen sehr hohe Durchschlagwerte (bis zu einigen hundert Kilovolt pro mm Schichtdicke [1; 2] aufweisen und die Überschlagfestigkeit bei zweckmässiger Material- und Elektrodengestaltung nur wenig tiefer zu liegen pflegt, sind bei der praktischen Verwendung ungünstige Nebeneinflüsse wie Inhomogenitäten und Fehlstellen im Material durch Spalten- und Hohlraumbildung im Innern oder zu den Elektroden hin oder wegen des Einschlusses leitender Fremdpartikel nicht völlig auszuschliessen. Diese erniedrigen die erzielbaren Festigkeitswerte teils erheblich und führen vor allem bei längerer Dauer der Spannungseinwirkung zu weit niedrigeren Ansätzen für die dauernd zumutbaren Beanspruchungen. Der Durchschlag erfolgt dann auch nicht mehr, wie vom gleichförmigen Feld her gewohnt, recht unvermittelt in einem Zug, sondern unter allmählicher Zermürbung des Dielektrikums durch stetiges oder etappenweises Vorbohren feinster Entladungskanäle in Richtung zur Gegenelektrode hin.

2. Die elektrische Erfassung von Störungen

Die frühzeitige Erkennung und Bewertung bezüglich einer eventuellen Betriebsgefährdung solcher Mängel ist ein vorrangiges Anliegen von Hersteller und Benützer. Die vorliegende Zusammenstellung einschlägiger Untersuchungen und Forschungsarbeiten gibt einen Überblick über die dabei gewonnenen Einsichten in die Natur und den Ablauf der spannungsinduzierten Alterung giessharzisolierter Objekte.

Der Störvorgang

Die Erfassung von Störherden auf elektrischem Wege wird heute mit gutem Erfolg und in grossem Umfange

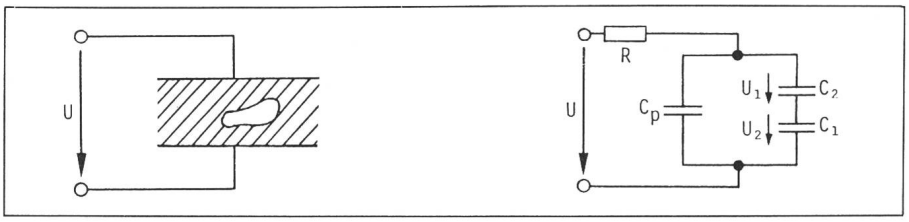

Fig. 1 Dielektrikum mit Hohlraum **Fig. 2 Ersatzschema**

betrieben. Andere Verfahren, wie etwa der unmittelbare Einblick zur Störstelle im Falle durchsichtiger Dielektriken oder die Verwendung von Röntgenstrahlen oder Ultraschall, haben sich nur in Spezialfällen bewährt. Die folgenden Ausführungen beschränken sich deshalb auf die Methode der Aufnahme und Auswertung der von der Störstelle ausgehenden elektrischen Signale, die weiteste Verbreitung erlangt und ihren Niederschlag in den internationalen Normen gefunden hat [3]. Sonstige elektrische Messungen wie etwa die Aufnahme der Kapazität oder des dielektrischen Verlustfaktors oder gewisser anderer Merkmale des Prüflings in Abhängigkeit von der angelegten Spannung oder der Zeit erwiesen sich nur in besonders gelagerten Fällen als hilfreich.

Der weiteren Betrachtung liege ein gemäss Figur 1 irgendwo im Dielektrikum eingebetteter gaserfüllter Hohlraum zugrunde. In ihm herrscht ein gegenüber seiner Umgebung erhöhtes elektrisches Feld, das bei einer bestimmten Spannung U an den Elektroden zu Trägerlawinen im Gas Anlass geben kann. Diese entwickeln sich zwischen den einander gegenüberliegenden Wandungen des Hohlraumes zur Anode hin und sind von gleicher Art wie bei einer Anordnung mit metallisch leitenden Belägen. Ob nun die Erstlawine über direkt nachfolgende und sich ständig wiederholende weitere Lawinen zur selbständigen Entladung führt oder sie vielleicht nur vereinzelt in unregelmässiger Folge Nachfolger findet, kann zunächst dahingestellt bleiben.

Der Schwarm schneller Elektronen ist stets von einem ebensolchen von Photonen aus Anregungs- und Rekombinationsprozessen begleitet und strahlt somit Licht aus. Ferner kommt es zur Dissoziation von Gasmolekülen und unter Umständen zur Bildung reaktionsfähiger Molekülbruchteile sowie der Lockerung von Molekülbindungen im festen Dielektrikum unter dem Aufprall der Elektronen. Schliesslich mögen auch elektrische Ladungen an den Hohlraumwänden kleben bleiben und das elektrische Feld mindestens zeitweilig verändern. Von besonderer Wichtigkeit für die vorliegende Betrachtung ist aber der Ladungsausgleich beim Übergang der Elektronenlawine, weil dabei die auf den Hohlraum entfallende Teilspannung zusammenbricht und die von diesem repräsentierte Teilkapazität kurzgeschlossen wird unter sprungweiser Zunahme der zwischen den Elektroden wirksamen Gesamtkapazität des Systems. Auch bei grösserem Hohlraumquerschnitt setzt zwar die Entladung mit nur einer Lawine ein, und von dieser können wegen der fehlenden Querleitfähigkeit der betroffenen Dielektrikumsbegrenzungen nur die Ladungen weniger Quadratmillimeter ausgeglichen werden; jedoch werden von der Lawinenstrahlung weitere seitlich versetzte Lawinen ausgelöst, so dass die ganze Hohlraumkapazität praktisch doch zur gleichen Zeit entladen wird.

All die oben angeführten Prozesse der Energiefreisetzung an den Grenzflächen, dazu die chemischen Umsetzungen im Gas und am festen Stoff sowie die Temperatursteigerung im Hohlraum und die Druckerhöhung des eingeschlossenen Gases vermögen zu einer Verschlechterung der Eigenschaften des Feststoffes zu führen. Schlimmstenfalls endigt die Degradation in einem Durchschlag zwischen den Elektroden. Unzweifelhaft wäre die Erfassung der im Hohlraum umgesetzten Energie am besten geeignet zur Beurteilung der Gefährlichkeit der Entladung. Zwar lässt sich prinzipiell die in der Teilentladung verbrauchte Energie ermitteln, doch reicht die Empfindlichkeit der Messverfahren nicht aus; auch wegen anderer Gründe konnte sich daher die Leistungsmessung nicht durchsetzen.

Messgrundlagen

In der Praxis wandte man sich deshalb frühzeitig Methoden zu, die zwar nicht unmittelbar das Ausmass und die Schnelligkeit der Materialschädigung anzuzeigen vermögen, aber doch ein empfindliches und geeignetes Mass der gesuchten Störgrösse liefern. Neben der Messung des von der Entladung verursachten *Spannungs*sprunges oder des zugehörigen *Strom*pulses ist hier vor allem die damit verknüpfte *Ladungs*änderung zu nennen. Zur Messung der Störspannung dient ein selektiver Hochfrequenzmessempfänger. Bei rasch sich folgenden Pulsen zeigt das Gerät fast deren vollen Scheitelwert (Quasi-Peak-Messung) an und ist für Einzelpulse nur wenig empfindlich, was vielfach als erwünscht gilt.

Wegen seiner Übersichtlichkeit und Praxisnähe wird heute recht allgemein das Ersatzschema nach Figur 2 als gut zutreffend für die Darstellung der elektrischen Verhältnisse im Prüfkörperkreis angesehen. C_1 stellt hierin die Kapazität der Störstelle dar, C_2 deren Koppelkapazität an die Elektroden des Prüflings und C_p die dazu parallele «gesunde» Kapazität des verbleibenden Dielektrikums. Auf C_1 und C_2 entfallen die Teilspannungen:

$$U_1 = \frac{U_1}{C_1 + C_2}\, U \qquad U_2 = \frac{U_1}{U_1 + C_2}\, U$$

Beim Zünden der Hohlraumentladung gleichen sich dessen Ladungen zum grössten Teil aus, und seine Teilspannung geht abrupt bis fast auf Null zurück, was am Kapazitätssystem einen Spannungssprung um

$$\Delta U \approx \frac{C_2}{C_p + C_2} \cdot U$$

bewirkt. Obwohl die Zündspannung U_1 wohl immer das durch die Paschen-Kurve gegebene Minimum von einigen hundert Volt erreicht und meist darüber liegen wird, ist der an den Klemmen der Anordnung messbare Spannungssprung ΔU im allgemeinen weit kleiner und erreicht je nach dem Verhältnis der Koppel- zur wohl immer weit grösseren Parallelkapazität bloss Werte von wenigen Volt oder auch nur geringe Bruchteile davon. Am Messwiderstand R tritt derselbe Spannungssprung aber von umgekehrtem Vorzeichen auf. Anders als bei den Spitzenentladungen in der Atmosphäre wird im Fall der wandbegrenzten Entladung der Vorgang durch einen eingeprägten *Spannungs*sprung physikalisch korrekt nachgebildet.

Mit dem Ausgleich der Flächenladung des Hohlraumes hat die Entladung zunächst ihr Ende gefunden. Eine durch die Netzimpedanz und den Messwiderstand R begrenzte Ladungsnachlieferung stellt das alte Gleichgewicht wieder her, und das Spiel Zün-

dung, Spannungszusammenbruch, Ladungsnachlieferung kann weitergehen. Die vom Netz zugeführte Ladung berechnet sich zu

$$Q = \Delta U \left[C_p + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \right] \approx \Delta U \cdot C_p$$

oder lässt sich auch ausdrücken als

$$Q \approx U_1 \cdot C_2$$

Sie wird als scheinbare Ladung bezeichnet. Mit der Dielektrikumsdicke ändert sie sich in umgekehrtem Mass, hingegen ist sie anders als der messbare Spannungssprung ΔU nicht von der Objektkapazität (C_p) abhängig. Von der an der Störstelle selbst umgesetzten Ladung ist sie verschieden, und diese bleibt unbekannt, solange das Verhältnis der inneren Kapazitäten nicht angegeben werden kann. Auch weil in die scheinbare Ladung die Kenngrössen des äusseren Kreises nicht eingehen, wird sie heute allgemein als das zweckmässigste Mass zur Kennzeichnung der Störgrösse betrachtet. Nur in den Fällen, wo sich noch Impedanzen zwischen Fehlerort und Messstelle befinden, ist der Messwert dementsprechend abgeändert.

Somit sagt die scheinbare Ladung für sich allein nichts über die wahre Störung am Störort aus und lässt auch keine sichere Prognose über die vermutliche Gefährdung der Isolierung zu. Und doch erlaubt ihre Kenntnis oft den Isolationszustand und das weitere Verhalten aufgrund der Erfahrung und mit der Voraussetzung eines vergleichsweise ähnlichen Aufbaues der Objekte mit einiger Sicherheit zu beurteilen. Ihr gegenüber haben die dank hoher Systemempfindlichkeit und einfacher Ergebnisanzeige ebenfalls weit verbreitete Messung der Störspannung oder vielleicht auch noch die des Störstromes in den letzten Jahren etwas an Bedeutung eingebüsst. Falls allein eine Aussage darüber verlangt wird, ob ein Objekt störfrei oder störbehaftet ist und nach der Intensität der Störung nicht gefragt wird, ist es belanglos, welche dieser Grössen zur Charakterisierung des Objektzustandes angezogen wird; allein für ausreichende Messempfindlichkeit ist Sorge zu tragen. Es genügt dann, beim Steigern der Spannung auf das allfällige Einsetzen einer Entladung bzw. beim Zurückregeln von einem hohen Wert auf das Aussetzen zu achten und zu vergleichen, ob Ein- und Aussetzspannung ausreichend weit über den für einen einwandfreien Betrieb geforderten Werten liegen.

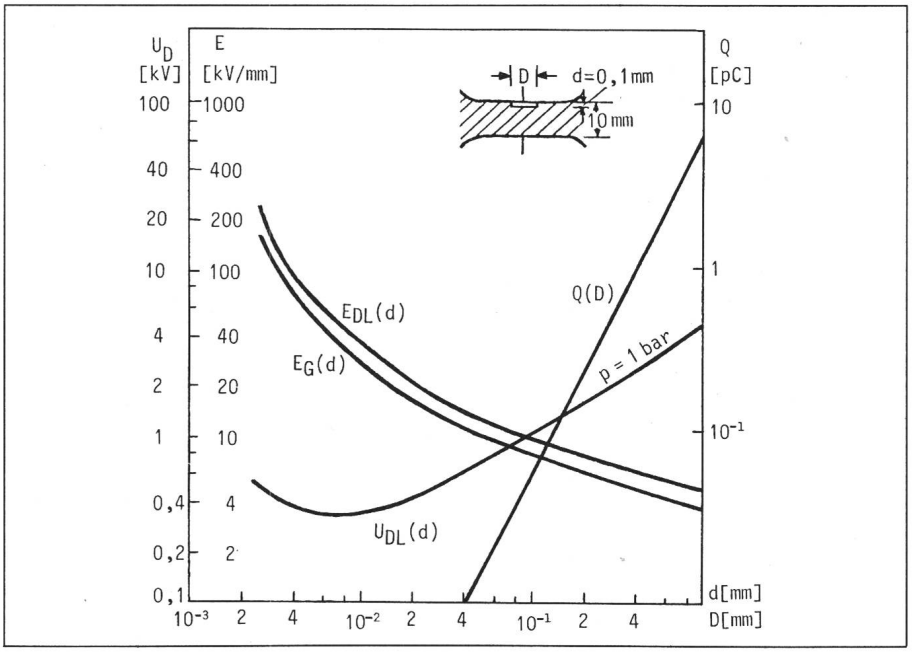

Fig. 3 Durchschlagspannung, Feldstärke und scheinbare Ladung eines einer Elektrode anliegenden Hohlraumes

U_{DL} Durchschlagspannung in Luft bei 1 bar und 20°C
E_{DL} Die von U_{DL} abgeleitete Zündfeldstärke in einer in das Giessharz eingebetteten kleinen Luftblase
E_G Feldstärke im Giessharz
Q_D Scheinbare Ladung beim Durchzünden des Hohlraumes vom Durchmesser D und der Höhe 0,1 mm
D Durchmesser des Hohlraumes (Zylinder)
d Höhe des Hohlraumes

3. Die Messempfindlichkeit

Natürlich stellt sich nun die Frage, ob die jeweils angewandte Messmethode auch ausreicht, um selbst schwache Entladungen noch sicher zur Anzeige zu bringen. In erster Linie hängt dies von der Grösse des störenden Hohlraumes ab, dann unter anderem vom Druck (Dichte) des Gases in ihm und dessen Art. Um in diesem eine Entladung ausbilden zu können, muss die anliegende Teilspannung die Zündspannung der *Paschen*-Kurve des eingeschlossenen Gases (Kurve $U_{DL}(d)$ bei konstantem Druck in Fig. 3) erreichen. Aus ihr ist der Verlauf der Zündfeldstärke $E_{DL}(d)$ abgeleitet. Ist der Hohlraum ungefähr kugelförmig, so übertrifft die Feldstärke in ihm jene im Feststoff um den Faktor

$$\frac{E_{\text{Kugel}}}{E_{\text{Feststoff}}} = \frac{3\varepsilon_r}{2\varepsilon_r + 1}$$

Bei einer relativen Dielektrizitätzahl $\varepsilon_r \approx 3{,}6$ für Giessharz liegt demnach die Feldstärke im umschliessenden Giessharz um 24% unter der des Gases (Kurve $E_G(d)$ in Fig. 3). Handelt es sich dagegen um einen spaltförmigen Hohlraum von beträchtlicher seitlicher Erstreckung bei nur geringer Spaltweite (in Feldrichtung), wie dies beispielsweise bei einer Ablösung des Giessharzes von einer Elektrode der Fall ist, so erreicht die Feldverstärkung im Spalt einen weit höheren Wert, nämlich das ε_r-fache.

Zur Berechnung der Pulsladung $Q = C_2 \cdot U_1$ beim Zünden braucht es die Grösse der Koppelkapazität C_2 des Hohlraumes zu den Elektroden hin. Wegen dessen geringer Ausdehnung ist sie als Folge der Zusammendrängung der Feldlinien vor dem Eintritt in den Hohlraum grösser als der aus der Breite der ladungsbelegten Dielektrikumsflächen errechnete Wert. Zur Vereinfachung der Betrachtung sei nun der Hohlraum von zylindrischer Form, einer Elektrode anliegend, gedacht. Mit der weiteren plausiblen Annahme, dass der Faktor der Feldverstärkung dem einer aus der Elektrode vorragenden leitenden Erhebung gleichkomme [5], erhält man für einen halbkugeligen Abschluss des Zylinderhohlraumes vom Durchmesser D den Faktor 3. Die im rechten Teil von Figur 3 eingetragene Kurve $Q(D)$ gilt unter diesen Annahmen und für eine ungeänderte Höhe des Hohlraumes im zylindrischen Teil von d = 0,1 mm

(Zündspannung U_I = 750 V) sowie eine Giessharzdicke von 10 mm. Man erkennt, dass bei sehr kleinen Hohlräumen die scheinbare Ladung nur winzige Bruchteile eines Picocoulomb erreicht und sich daher bei technischen Messungen der Beobachtung entziehen wird. Erst bei Hohlräumen von einigen Zehntelmillimetern Ausdehnung besteht eine gewisse Aussicht für die Störung, im Prüffeld unter guten Messbedingungen angezeigt zu werden. Für beim Giessen und Aushärten entstandene Bläschen mögen gar noch etwas ungünstigere Verhältnisse herrschen, weil die Dichte des Gases oder Dampfes in ihnen möglicherweise nur wenige Torr erreicht und die Zündspannung bis zum *Paschen*-Minimum absinken mag. Anderseits gilt es zu bedenken, dass selbst beim dauernden Brennen einer Entladung in einer solchen abgeschlossenen Kleinstblase die darin umgesetzte Energie $E = \frac{1}{2} C_I U_I^2$ äusserst gering bleibt und es sehr fraglich erscheint, ob dies zur Schädigung des Wandmaterials und zum Vorwachsen der Entladung in Feldrichtung überhaupt ausreicht.

4. Die Ausbildung von Entladungen an Spitzen und scharfen Kanten

Teilentladungen stellen sich nicht nur in bereits bestehenden Hohlräumen ein, sondern können auch erst unter der Einwirkung eines örtlich eng begrenzten, sehr starken elektrischen Feldes entstehen, wie dies etwa bei einer ins Material eingebetteten Metallspitze oder scharfen Kante als Elektrode der Fall ist. Als Vorstufe mögen sogar zunächst nur Leuchtprozesse wahrnehmbar sein, noch bevor es zu messbaren elektrischen Signalen kommt. Tatsächlich gelang es russischen Forschern vor gut anderthalb Jahrzehnten, am Rand von Kondensatorbelägen schwache Lichtemissionen bei einer Spannung weit unterhalb der Nachweisgrenze elektrischer Störungen aufzunehmen [6]. Reihenaufnahmen dieser Art unter Zuhilfenahme von Fotomultiplier oder von Mikroskop und nachgeschaltetem Bildverstärker geben Zeugnis von den Strukturveränderungen an der Entladungsstelle sowie dem fortschreitenden Materialabbau und erhellen so den Einfluss der elektrischen Beanspruchung auf die rein feldinduzierte Alterung des Isolierstoffes. Natürlich muss dazu das Dielektrikum transparent sein; doch lassen sich die so gewonnenen Einsichten ohne Bedenken auf die üblicherweise undurchsichtigen Giessharzmassen übertragen.

Das hohe Feld vor der scharfgekrümmten Elektrode veranlasst Elektronen zum Austritt aus ihr [7]; deren Aufprall auf das dielektrische Material führt zum Aufbrechen von Molekülbindungen und einer Verringerung der Materialdichte [8] bei stossweiser Dampfbildung [9]. Im weiteren Ablauf kommt es zu feinsten Anrissen und zu noch unselbständigen Entladungen in Form vereinzelter Trägerlawinen oder dann auch über Nachfolgeelektronen zu sich selbst erhaltenden Entladungen. Der submikroskopische Hohlraum wird vorzugsweise in Feldrichtung zu einem dünnen Hohlkanal von weniger als 1 µm [10] bis zu höchstens einigen µm [11] ausgeweitet und gelängt. An seinen Wänden schlagen sich Zersetzungsprodukte nieder, vielleicht lagern sich auch Ladungsträger an, was ihm zusammen mit Feuchtigkeitsspuren eine gewisse Leitfähigkeit verleiht. Hierdurch kann sich das Potential der Elektrodenspitze bis zum Entladungskopf vorschieben, und vom neuen Aktivitätszentrum vermag sich die Entladung weiter ins gesunde Material vorzubohren. Dieser Mechanismus der Entstehung feinster verästelter Kanäle von insgesamt bäumchenartiger Struktur wird als Treeing bezeichnet. Ein Beispiel ist in Figur 4 [12] wiedergegeben. Gelingt es einzelnen Kanälen, auf diese Weise absatzweise bis zur Gegenelektrode vorzudringen, so ist die Voraussetzung für den kurzschliessenden Funken zwischen den Elektroden gegeben.

Anliegende Spannung sowie Krümmung der vorstehenden Elektrodenspitze oder anders ausgedrückt die Höchstfeldstärke an deren Scheitel sind demnach die entscheidenden Kenngrössen bei der Einleitung des Vorganges der verzögerten oder sofortigen Hohlraumbildung im Umguss. Unterhalb einer gewissen kritischen Feldstärke ist selbst bei langer Dauer der einwirkenden Spannung nicht mehr mit einer Autoelektronenemission aus der Spitze, dem Vorkommen von Entladungen und einer daraus sich entwickelnden progressiven Schwächung des Dielektrikums zu rechnen. In Figur 5 ist das Resultat eines Langzeitversuches [13] an anfänglich entladungsfreien Probekörpern bei unterschiedlichen Spannungshöhen und Spitzenformen (gekennzeichnet durch den Spitzenradius r) dargestellt. Zwei Bereiche sind klar durch eine Grenzkurve voneinander geschieden: Zur linken (schraffierter Bereich) liegen alle Messpunkte mit eingetretener Schädigung, rechts von der Kurve die mit bleibender Unversehrtheit des Dielektrikums. Die Grenzkurve wurde nach bekannten Ansätzen [14] für das elektrostatische Spitzenfeld mit E_{krit} = 210 kV(eff)/mm errechnet. Eine allfällige Abschwächung des Feldes durch Raumladungen ist demnach nicht berücksichtigt.

Ausser Spitzenwirkung und Rauhigkeit der Elektrodenoberfläche wird das Auftreten von Entladungen noch begünstigt durch Fremdpartikel im Harz, durch Spaltbildung zwischen Elektrode und Harz hauptsächlich beim Aushärten als Folge ungenügender mechanischer Entkopplung oder auch durch Blasenbildung wegen unzureichender Entlüftung des Harzes vor oder beim Vergiessen.

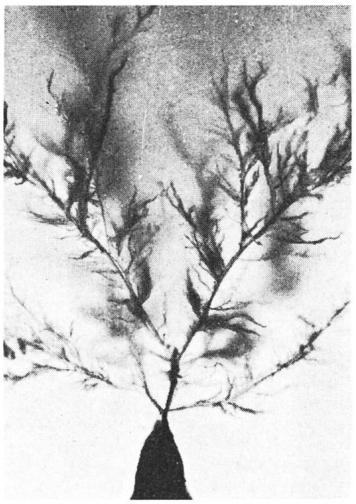

Fig. 4 Treeing an einer Nadelspitze

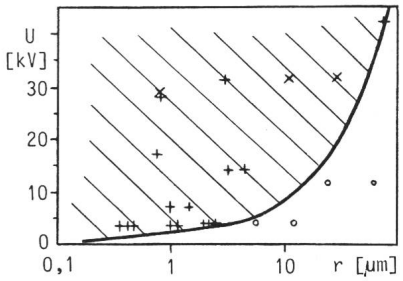

Fig. 5 Entladungsbildung bzw. Entladungsfreiheit in Epoxidharz

Bei Spitze-Platte (5 mm Abstand) in Abhängigkeit von Spitzenradius r und angelegter Spannung U (Effektivwert) bei Versuchsdauern bis zu Monaten

○ keine Hohlraumbildung
+ Entladungen mit Hohlraumbildung
× Entladungen mit sofort einsetzendem Treeing

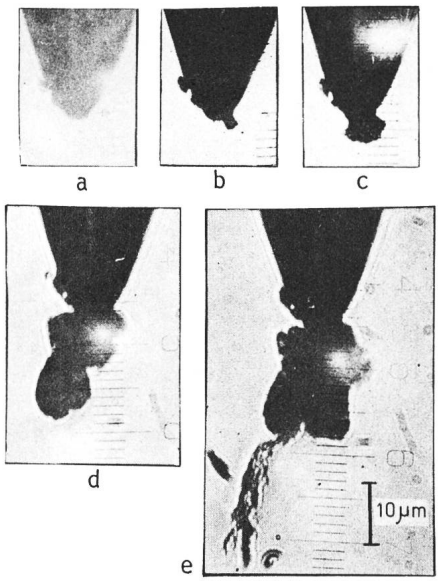

Fig. 6 Hohlraumbildung und Kanalwachstum vor einer feinen Spitze

U = 3,5 kV(eff)/mm, Gegenelektrode 5 mm entfernt, Vergrösserung 1500fach

a nach 0 h
b nach 64 h
c nach 240 h
d nach 700 h
e nach 900 h

Vom allmählichen Wachstum der Entladung vor einer zugeschärften Spitze (Krümmungsradius r = 2,7 µm) und der damit verbundenen Materialzerstörung vermittelt Figur 6 [13] eine Vorstellung. Bei unverändert belassener 50-Hz-Spannung von 3,5 kV(eff) liess sich im umgebenden Harz erstmals nach 64 h an der Stelle höchsten Feldes ein winziger Hohlraum von etwa 2 µm Ausdehnung erkennen. Im Verlauf von einigen hundert Stunden vergrösserte er sich um das Mehrfache, schliesslich begann am Kopf der Höhlung nach über 700 h ununterbrochener Beanspruchung die Bäumchenbildung mit feinsten sich verzweigenden Hohlkanälen.

Die Dauer ab Anlegen der Spannung bis zur Bildung von Kanälen hängt sehr stark von der Höchstfeldstärke ab. Bei scharfgekrümmter Elektrode und hoher Spannung ist diese sogenannte Induktionsperiode sehr kurz, und das Treeing setzt gleich beim Zuschalten der Spannung ein. Selbst mit äusserst empfindlichen Aufnahmegeräten ist es bisher nicht gelungen, elektrische Störsignale schon vor dem Beginn des Treeing wahrzunehmen [7, 15]. Offensichtlich müssen zunächst einmal Molekülbindungen durch das Elektronenbombardement aufgetrennt und Mikrohohlräume geschaffen werden, in denen dann eine beobachtbare Trägervermehrung und Lawinenbildung einsetzen kann.

Bei hoch angesetzter Spannung bilden sich von Anfang an einige oder auch viele Einzelentladungen von schnell zunehmender Leuchtstärke im Raum um die Spitze aus (Fig. 7). Ihr Erscheinungsbild ähnelt sehr dem einer Faden- oder Büschelentladung in Gasen oder beim Gleitvorgang. Bei weiterem Wachstum verlagert sich dann die Aktivität auf die Fronten der Verästelungen, und die rückwärtigen Kanalteile werden dunkel oder doch so lichtschwach, dass sie sich nicht mehr aufzeichnen, wie Figur 7 bei t =

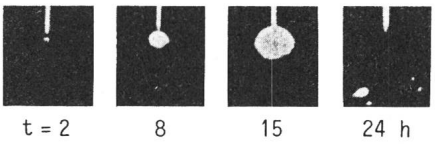

Fig. 7 Zeitliche Entwicklung der Lichtabstrahlung aus einer anfänglich büschelförmigen Spitzenentladung

U = 20 kV(eff), 50 Hz, Vergrösserung 3,5fach

24 h zeigt. Von den neuen Aktivitätszentren stossen neue Entladungsäste in den Raum vor. Dabei wurde auch erkannt, dass Licht nicht allein von der Entladung im Gasraum ausgeht, sondern auch vom unmittelbar angrenzenden Material der Kanalwände als Folge dort gebildeter Raumladungen [11], und dass die Verästelungen in unregelmässiger Folge aufleuchten.

Das Vorverschieben der Zone grösster Entladungsaktivität dürfte durch die Anlagerung leitfähiger Zersetzungsprodukte an den Kanalwänden wie auch durch einen Anstieg des Gasdruckes im einzelnen Kanal unter der Bildung gasförmiger Produkte aus dem zersetzten Festmaterial und einen Temperaturanstieg im Kanal gefördert werden. Hierfür spricht auch die Beobachtung, dass oft bei längerer Spannungsbeanspruchung die Entladung erlöscht und nur gelegentlich neu zündet.

Bei der buschförmigen Entladung nimmt die Aktivität anscheinend generell mit der Zeit zu, wie aus Messungen der pro Zeiteinheit transportierten Ladungsmenge, der Anzahl der grossen Ladungspulse und der Länge der Entladungsfigur zu schliessen ist; auch kommen keine Phasen fehlender Lichtabstrahlung vor [16]. Bei tieferer Spannung hingegen und damit zunächst nur fadenförmigem Erscheinungsbild nimmt zwar die Entladungslänge (Fig. 8) [17] ebenfalls noch stetig zu, dagegen gehen die elektrischen Merkmale (Q, N) nach anfänglicher Zunahme mit dem Aufhören der Lichtemission aus der Zone unmittelbar um die Spitze gleichfalls recht plötzlich auf kleine Werte zurück und wenn überhaupt kommen Ladungspulse nur noch gelegentlich vor. Erst wenn die weiter vorstossenden Kanäle die Gegenelektrode erreicht haben, springt Q wieder auf grosse Werte hoch; dem folgt bald der Durchschlag [18].

Das Wachstum der Treeing-Kanäle ist abhängig davon, ob sie zu ihrer Umgebung hin abgeschlossen sind und sich unter dem Geschehen in ihnen ein ansteigender Druck aufbauen kann oder ihr Innendruck beispielsweise vermittels einer Hohlnadelelektrode oder eines anliegenden grösseren Hohlraumes konstant gehalten wird. Bei den «belüfteten» Hohlraumentladungen ist die Zahl der Ladungspulse kleiner als bei der nach aussen hin abgeschlossenen Anordnung [10]. Mit Verkleinerung des Druckes im Hohlraum geht die Einsetzspannung der Entladung zurück, und die Zahl der Entladungskanäle wird grösser. Messungen über den sich in der Entladung ausbildenden Druck führten zu sehr unterschiedlichen Aussagen [19; 20]. Höhere Temperaturen haben eine starke Vermehrung der Vorentladungen zur Folge und führten auch zu einer mässigen Vergrösserung der Prüflings-

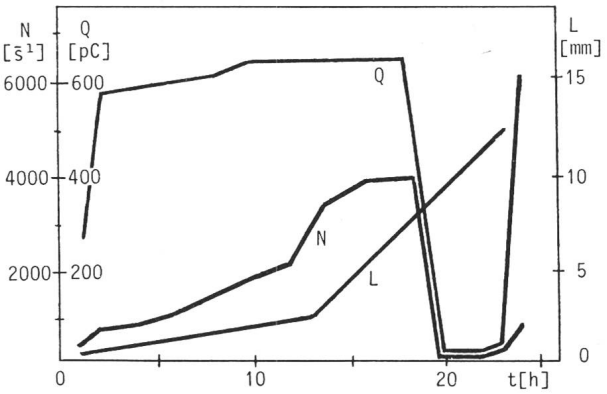

Fig. 8 Charakteristiken einer Spitzenentladung in Kunstharz

U = 20 kV(eff), 50 Hz, Gegenelektrode 12 mm entfernt

Q grösste vorkommende Ladungspulse
N Zahl der (positiven) Ladungspulse pro Sekunde
L Länge der Entladung

Durchschlagwahrscheinlichkeit [21].

Auf das Isoliermaterial ausgeübte Druck- oder Zugkräfte beeinflussen das Wachstum der Entladungskanäle. Diese wachsen bevorzugt in den Ebenen senkrecht zur grössten Dehnung [22; 23], und die Entladungsintensität nimmt bei Zug in Feldrichtung zu, während sie bei Druck quer zur Feldrichtung abnimmt [24].

5. Die Einsetzspannungen

Die Messung der Einsetzspannung von Teilentladungen in einem Hochspannungsgerät ist für die Praxis von Wichtigkeit. Damit wird der Nachweis geführt, ob die Innenisolierung eines Gerätes bei den im Betrieb zu erwartenden Beanspruchungen entladungsfrei bleiben wird oder eine allmähliche Verschlechterung der Isoliereigenschaften und vielleicht sogar der schliessliche Verlust des Isoliervermögens befürchtet werden muss. Dabei ist auch hier wiederum darauf zu verweisen, dass schwache Störungen nur bei hochempfindlicher Messung Aussicht darauf haben, zur Anzeige gebracht zu werden.

Weil es zur Einleitung der Trägerlawine und zum Zünden einer Entladung eines Erstelektrons bedarf und die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein eines solchen in einem allseitig umschlossenen kleinen Hohlraum gering ist, werden vielfach recht grosse Verzögerungen im Einsetzen einer Entladung beobachtet [25]. Der Entladeverzug ist bei einem der Elektrode anliegenden Hohlraum kleiner und hängt neben der Spannungshöhe vor allem von der Hohlraumgrösse ab. Besonders lange Verzüge oder Durchzünden erst nach kräftiger Erhöhung der Spannung beobachtet man bei Anwendung kurzer Spannungsstösse.

Bei einer satt in das Harz eingebetteten Spitzenelektrode müssen unter dem Bombardement der aus der Spitze gezogenen Elektronen erst zahlreiche Molekülbindungen zerschlagen werden, ehe es zu einem kräftigeren Ladungsübergang kommen kann. Strukturmängel im Gefüge oder Fremdkörpereinschlüsse lassen sich auch im Homogenfeld nicht von vornherein ausschliessen und könnten somit selbst bei Giessharzkörpern mit grossflächigen Elektroden prinzipiell zu einem erst nach einiger Zeit einsetzenden Treeing führen. Doch hat die Praxis erwiesen, dass diese Gefahr als sehr gering einzuschätzen ist und wirklich bedrohliche Herstellungsmängel bei sorgfältiger TE-Kontrolle aufgedeckt werden.

Mechanische Spannungen vermögen die Ein- wie auch die Aussetzspannungen zu beeinflussen [24]. Im Spitzenfeld wird das Entladungsverhalten durch Druck verbessert und durch Zug verschlechtert, eine Folge der Verdichtung beziehungsweise Auflockerung des Gefüges an Fehl- und Schwachstellen.

Generell erhält man bei Spitzen- und Hohlraumentladungen mit *Wechsel*spannung die niedrigsten Einsatzwerte. Mit *Stoss*spannung ergeben sich wesentlich höhere Werte, die meist erst nach oftmaliger Wiederholung, eventuell bis zu den durch die Paschen-Kurve gegebenen Werten, absinken [26]. Noch etwas höhere Einsetzspannungen findet man mit *Gleich*spannung. Der Grund dafür ist die Abschwächung des starken Spitzenfeldes durch Aufbau einer Raumladung gleichen Vorzeichens. Nur wenn das Treeing durch plötzlichen Kurzschluss der Gleichspannungsquelle nach längerem Laden herbeigeführt wird, liegt die Einsetzspannung tiefer.

Hohlraumentladungen langer Dauer bei mehrfach wiederholter Spannungsbeanspruchung können ein Ermüden oder Altern des Prüfkörpers nach sich ziehen. Eine Voraussage über den Gang der Einsetzspannung ist im Hinblick auf die teils gegenläufigen Einflüsse und auch auf die statistische Natur des Entladeverzuges kaum möglich. Eine Rolle spielt dabei auch die Art und Weise des Versuchsvorgehens. So erweist sich oftmals die Aussetzspannung beim Zurückregeln von einem hohen Wert als besser reproduzierbar als die Einsetzspannung. Falls sie unter diese zu liegen kommt, erhält man bei Aufnahme der Störintensität einen hystereseartigen Verlauf. Unter Umständen erlischt aber auch die Entladung je nach Intensität zeitweilig oder für dauernd beim Erhöhen der anliegenden Spannung [27]. Dazu sei hier die Aussage angeführt [24], wonach bei technischen Isolierungen auf Kunstharzbasis sehr schwache Störungen mit einer Intensität von kleiner als 2 pC selbstlöschend seien und im allgemeinen zu keiner Beeinträchtigung der Lebenserwartung des Isoliersystems führten. Doch ist diesem Effekt der «Selbstheilung» mit einiger Skepsis zu begegnen, weil zumindest für höhere Beanspruchungen das Risiko eines Durchschlages nach langer Zeit nicht ganz ausgeschlossen werden kann. Beispielsweise wird von anderer Seite von Versuchen bei Störintensitäten an der Grenze des technisch Messbaren (1 pC und weniger) berichtet [5, 28], bei denen sich nach Wochen noch Durchschläge ereigneten, dies allerdings bei Feldstärken von mehr als dem doppelten des im Betrieb Üblichen.

Der Verfasser möchte in diesem Zusammenhang seine auf vieljährige Erfahrung im Umgang mit kunstharzisolierten Systemen gegründete Meinung zum Ausdruck bringen, wonach speziell bei neuen oder wesentlich abgeänderten oder höher ausgenutzten Isolieranordnungen geeignet angesetzte Dauerversuche wichtige Hinweise auf mögliche Mängel konstruktiver oder technologischer Art abzugeben vermögen und eine gute Grundlage zur Beurteilung des zu erwartenden Betriebsverhaltens darstellen.

Wird das Vorzeichen der Spannung nach mehreren Stössen gleicher Höhe geändert, so vermag im allgemeinen nur der erste Stoss nach der Polaritätsumkehr eine Entladung im Hohlraum einzuleiten [29]; auch ist seine Entladungsintensität erheblich grösser. Weitere Stösse führen dann erst bei deutlich erhöhter Spannung wieder zum Durchzünden. Wird als erster Stoss nach dem Polaritätswechsel ein solcher reduzierter Höhe gegeben (Formierungsstoss), so hat dies eine Verringerung der Entladungsintensität des nachfolgenden Stosses voller Höhe zur Folge.

6. Die elektrische Festigkeit von Epoxidharzen

Unter günstigen Bedingungen (fehlerfreie, völlig homogene Materialstruktur, sattes Anliegen der eher kleinen Elektroden, gleichförmiges Feld bei geringer Materialdicke, kurze Spannungseinwirkung, keine zu hohe Temperatur) wurden mit Reinharz materialspezifische Durchschlagfestigkeiten bis über 400 kV(eff)/mm erreicht [1; 2; 30]; für gefüllte Harze mit deren vielen mikroskopisch kleinen Korngrenzen gelten etwas niedrigere Werte. Die technisch nutzbaren Werte liegen jedoch der vorgehend besprochenen Strukturmängel wegen, vor allem bei langer Dauer der elektrischen Beanspruchung, sehr viel tiefer. Unterhalb einer gewissen Schwelle für die Höchstfeldstärke kommen Teilentladungen im riss- und lunkerfrei hergestellten Isolierstoff jedoch selbst bei langer Dauer der Feldeinwirkung nicht vor, daher besteht für diese auch

nicht die Gefahr einer elektrisch bedingten Alterung und Verkürzung der Lebenserwartung. Eine vom elektrischen Feld induzierte Alterung ist erst oberhalb einer kritischen Beanspruchung zu erwarten. Der dafür anzusetzende Wert hängt ausser vom Material noch von der Verarbeitung ab. So wurde gefunden, dass bei Vorentladungen in gebohrten Hohlräumen die Beständigkeit geringer ist als bei solchen mit glatter Giesshaut (durch Blasenbildung im erstarrenden Harz) [31]. Reinharz scheint gegen Entladungen weniger widerstandsfähig zu sein als gefüllte Harze.

Die Rissgefährdung vor allem grösserer Giessharzkörper durch eingefrorene mechanische Spannungen ist in erster Linie durch das unterschiedliche Schwinden von um- oder eingegossenem Metall und dem Harz bei dessen Erstarren und Aushärten bedingt. Überschreitet die resultierende Dehnung einen gewissen Wert, so muss mit Fliesszonen und winzigen Anrissen und in ungünstigen Fällen mit Rissbildung oder auch Ablösung gerechnet werden. Folgt man der in [32; 33] vorgebrachten Meinung, dann bestimmt das Verhältnis $\Delta\varepsilon/\varepsilon_{krit}$ von tatsächlicher Schwindungsdifferenz der beiderseitigen Dehnungen zur kritischen Dehnung des Umgusses den Abfall der elektrischen Festigkeit des Prüfkörpers. Doch dürften die vorgelegten Versuchsergebnisse kaum ausreichend sein, um den behaupteten Rückgang der Durchschlagspannung mit diesem Verhältnis nach einem Potenzgesetz ähnlich dem bei der Abhängigkeit von der Beanspruchungszeit wahrscheinlich zu machen.

Trägt man bei Durchschlagmessungen an unter sich gleichen Probekörpern die für die jeweilige Zeit bis zum Durchschlag erhaltenen Werte in Abhängigkeit von der Versuchsspannung auf, so lässt sich aus der Extrapolation der Mittelwertkurve zu den langen Zeiten hin erschliessen, ob während der geforderten Gerätelebensdauer ein Isolationsversagen mit guter Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Die Abschätzung wird erleichtert, wenn die Versuchswerte auf einer Geraden zu liegen kommen. Oft erreicht man dies bei ihrer Eintragung in ein doppeltlogarithmisches Koordinatennetz, d. h. unter Annahme der Gültigkeit einer 2-Parameter-Weibull-Verteilung der Form

$$U_D = \frac{k}{L^{1/n}}$$

Hierin bezeichnet L die Zeit bis zum Durchschlag, k eine von den Versuchsumständen abhängige Konstante und n den Reziprokwert der Neigung der Lebensdauerkennlinie. In ihr kommt die Art des Alterungsprozesses im Isolierstoff zum Ausdruck. Ein und derselbe n-Wert bei Versuchen an Prüflingen unterschiedlichen Aufbaues weist auf gleichartigen Ablauf der inneren Zerstörungsvorgänge bei der gewählten Spannung hin. Dagegen wird zum Beispiel bei quasi-homogenem Feld das Wachstum der Vorentladungen qualitativ verschieden sein von dem einer im Dielektrikum eingebetteten Spitze und sofort einsetzendem Treeing. All dies wirkt sich neben der Höhe der Spannung, als einem der wichtigsten Parameter, auf den Zahlenwert von n aus. Bei kaum noch merklicher Alterung nimmt n Werte von $\geqslant 50$ an.

Figur 9 gibt Beispiele für das Alterungsverhalten von (gefülltem) Epoxidharz im schwach und im extrem inhomogenen Feld [32; 33]. (Weil andernfalls ihre offensichtliche Alterung unverständlich bliebe, muss vermutet werden, dass die Prüfkörper des näherungsweise ebenen Feldes nicht von Anfang an störfrei waren.) In den dargestellten Fällen verlaufen die Kennlinien bei den Anordnungen mit schwacher Feldinhomogenität ($a_{1,2}$, b) alle mit ungefähr derselben Neigung ($n \approx 12$), doch sind sie je nach dem beanspruchten Isoliervolumen gegeneinander verschoben. Bei der weit ins Harz hineinstossenden Spitze hingegen weist die Charakteristik einen Knick auf; sie wird von zwei Geradenstücken unterschiedlicher Neigung gebildet. Bei kurzen Zeiten (hohe Versuchsspannungen) fällt die Charakteristik stark ($n \approx 4$) und wesentlich weniger ($n \approx 15$) bei den langen Durchschlagzeiten.

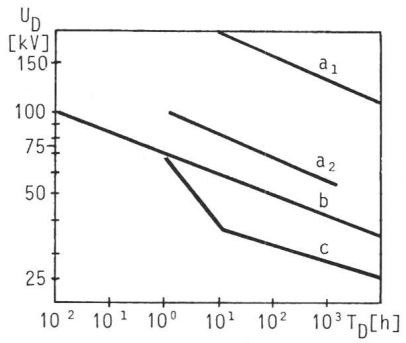

Fig. 9 Lebensdauerkennlinien bei stark unterschiedlicher Elektrodenkonfiguration

U_D 50-Hz-Durchschlagspannung
T_D Zeit bis zum Durchschlag
a_1 eingegossene Kugel gegen Platte in 5 mm Abstand
a_2 eingegossene Kugel gegen Platte in 1 mm Abstand
b koaxiale Zylinderanordnung 35/45 mm ∅, 0,5 m lang
c Spitze gegen Platte in 5 mm Abstand

Von den zahlreichen Beispielen im Schrifttum über die Gefährdung technischer Objekte durch innere Entladungen als Folge von Fabrikationsmängeln sei hier nur eines angeführt [34]: Aufgrund des Ergebnisses der TE-Kontrolle einer grösseren Anzahl von SF_6-Giessharzisolatoren wurden diese zwei Gruppen mit und ohne nachgewiesenen TE-Störungen zugeteilt und beide einem Dauerversuch mit stark überhöhter Spannung unterzogen. Von den störbehafteten Objekten fiel mehr als die Hälfte bereits in den ersten hundert Stunden aus; einige weitere folgten ihnen über die Dauer eines Jahres. Hingegen überstand der weitaus grösste Teil der bei der TE-Kontrolle unbeanstandeten Prüflinge den Dauerversuch, ohne Schaden zu nehmen.

Generell ist die Auswirkung einer einmal erkannten Störung auf das Dauerverhalten nicht leicht zu beurteilen. Zu viele Einflussgrössen wie Art, Ausdehnung und Lage der Fehlerstelle sowie die dort vorherrschende Feldstärke erschweren die Aussage, ganz abgesehen davon, dass ja die wahre Intensität der Entladung an der Störstelle unbekannt bleibt und die gemessene scheinbare Ladung nur sehr bedingt zu ihr in Beziehung gebracht werden kann. Manchmal lassen sich auch aus dem Erscheinungsbild der auf dem Oszillografenschirm aufgezeichneten Störanzeichen wesentliche Hinweise entnehmen. Auch besteht bei höherer Störintensität eher der Verdacht auf bedrohliche Mängel wie etwa Risse oder grössere Vakuolen im starken Feld. So wird beispielsweise empfohlen, Störungen von mehr als 20 pC bei der 1,2fachen Betriebsspannung nicht mehr zu tolerieren [25]; die SEV-Regeln für kunstharzisolierte Messwandler [35] setzen die Grenze teils sogar noch tiefer an. In neuerer Zeit ist denn auch die Tendenz unverkennbar, mit der vermehrten Vornahme der TE-Kontrolle und der zunehmenden Breite der gewonnenen Erfahrungen sowie der verbesserten Messbedingungen in den Prüfräumen die als zulässig betrachteten Werte dem zu prüfenden Material besser anzupassen und eher tiefer anzusetzen.

Literatur

[1] *D. Kind:* Die Hochspannungstechnik am Beginn des Kunststoffzeitalters. ETZ-A 91(1970)3, S. 134...139.

[2] *K. O. Tangen, Ø. Lund* et *P. I. Fergestad:* Etude de la tenue diélectrique et des propriétés de vieillissement des résines époxydes à partir d'essais accélérés. Rapport CIGRE N° 15-03, 1974.

[3] *T. W. Dakin* e.a.: Phénomènes disruptifs dans les gaz en champ uniforme. Courbes de Paschen pour l'azote, l'air et l'hexafluorure de soufre. Electra -(1974)32, p. 61...82.

[4a] *B. Salvage:* Electric stresses in gaseous cavities in solid dielectrics. Proc. IEE 111(1964)6, p. 1162...1172.

[4b] *G. Mitra* and *B. Salvage:* Electric stress in a circular cylindrical gaseous cavity in a solid dielectric, the axis of the cylinder being parallel to the field. Proc. IEE 113(1966)5, p. 931...935.

[5] *T.W. Dakin* and *S.A. Studniarz:* Voltage endurance of epoxy resins with microcavity type defects. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal 1976; p. 291...295.

[6] *G.S. Kutchinsky* e.a.: Décharges partielles et durée de vie de l'isolement des condensateurs. Rapport CIGRE N° 137, 1966.

[7] *G. Bahder, T.W. Dakin* et *J.H. Lawson:* Analyse du claquage par arborescence. Rapport CIGRE N° 15-05, 1974.

[8] *K.C. Kao* and *D.M. Tu:* Formation of electrical treeing in polyethylene. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Amherst/Mass., 1982; p. 598...603.

[9] *D. W. Auckland, R. Cooper* and *J. Sanghera:* Photographic investigation of formative stage of electric breakdown in diverging fields. IEE Proc. 128 A(1981)3, p. 209...214.

[10] *M. Nawata* and *H. Kawamura:* Deterioration and breakdown due to treeing from a needle-shaped void in organic insulators. Electrical Engineering in Japan 88(1968)10, p. 45...49.

[11] *S. Zoledziowski* a.o.: Study of electrical treeing in epoxy resins using electro-optical methods. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan 3(1979), paper 21.04.

[12] *E. J. McMahon* and *J.R. Perkins:* Evaluation of polyolefin HV insulating compounds; dendrite (tree) formation under highly divergent fields. IEEE Trans. PAS 83(1964)12, p. 1253...1260.

[13] *Y. Shibuya, S. Zoledziowski* and *J. H. Calderwood:* Void formation and electrical breakdown in epoxy resin. IEEE Trans. PAS 96(1977)1, p. 198...207.

[14] *R. M. Eichhorn:* Treeing in solid extruded electrical insulation. IEEE Trans. EI 12(1976)1, p. 2...18.

[15] *S. Bamji* a.o.: Light emission from polyethylene subjected to highly divergent fields. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Amherst/Mass., 1982; p. 592...597.

[16] *C. Laurent* and *C. Mayoux:* Analysis of the propagation of electrical treeing using optical and electrical methods. IEEE Trans. EI 15(1980)1, p. 33...42.

[17] *C. Laurent, C. Mayoux* and *A. Sergent:* Electrical breakdown due to discharges in different types of insulation. IEEE Trans. EI 16(1981)1, p. 52...58.

[18] *W. Kodoll:* Influence of dielectric stress concentration on voltage endurance of epoxy-mica generator insulation. IEEE Trans. EI 12(1977)6, p. 446.

[19] *S.I. Reynolds:* On the behavior of natural and artificial voids in insulation under internal discharge. Trans. AIEE Power App. Syst. 77(1959)40, p. 1604...1608.

[20] *G. Löffelmacher:* Der in Teilentladungskanälen in Polyäthylen entstehende Gasdruck und sein Einfluss auf die Kanalentwicklung. ETZ-A 96(1975)3, S. 152...154.

[21] *S. Kon:* Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit des Teilentladungsverhaltens von Epoxidharzformstoff-Prüfkörpern. ETZ-A 96(1975)3, S. 123...125.

[22] *E.J. McMahon:* The chemistry of corona degradation of organic insulating materials in high-voltage fields and under mechanical strain. IEEE Trans. EI 3(1968)1, p. 3...10.

[23] *J. Schirr:* Beeinflussung der Durchschlagfestigkeit von Epoxidharzformstoff durch das Herstellungsverfahren und durch mechanische Spannungen. Dissertation der Technischen Universität Carolo-Wilhemina Braunschweig, 1974.

[24] *F. Bachofen, M. Beyer* und *H.-J. Jähne:* Einfluss mechanischer Spannungen und elektrischer Beanspruchung auf das Teilentladungsverhalten von Epoxidharz. Internationales Symposium Hochspannungstechnik Zürich, 1975. Bericht 5.2-02, S. 622...627.

[25] *P. Mähönen* e.a.: Tenue en tension des résines époxydes. Rapport CIGRE N° 15-01, 1974.

[26] *Y. Saito, M. Fukuzawa* and *H. Nakamura:* On the mechanism of tree initiation. IEEE Trans. EI 12(1977)1, p. 31...34.

[27] *E. C. Rogers:* The self-extinction of gaseous discharges in cavities in dielectrics. Proc. IEE Part. A: Power Enging. 105(1958)24, p. 621...630.

[28] *T. Nitta* and *H. Kuwahara:* Time dependence of breakdown voltage and endurance testing of compressed gas insulation. IEEE Trans. PAS 100(1981)6, p. 3055...3065.

[29] *R. J. Densley* and *B. Salvage:* Partial discharges in gaseous cavities in solid dielectrics under impulse voltage conditions. IEEE Trans. EI 6(1971)6, p. 54...62.

[30] *J.H. Beard* and *S. Orman:* Intrinsic electric strength of epoxide resins. Proc. IEE 114(1967)7, p. 989...994.

[31] *D. Kind* and *D. König:* AC breakdown of epoxy resins by partial discharges in voids. IEEE Trans. EI 3(1968)2, p. 40...46.

[32] *A. Georgi:* Rissgefährdung und elektrischer Durchschlag in Epoxidharzisolierungen. Elektrie 32(1978)10, S. 528...531.

[33] *W. Mosch* a.o.: On the application of life time characteristics measured at model insulations to technical epoxy resin insulations. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan 3(1979), paper 21.02.

[34] *M. Crucius* e.a.: Essais de longue durée sur des isolateurs en époxydes dans le SF_6 gazeux. Rapport CIGRE N° 15-07, 1978.

[35] Regeln zur Vereinheitlichung der TE-Messung an Messwandlern. Publikation des SEV Nr. 3304.1976.