Messung von Ionisation an Kondensatoren

Autor(en): **Praehauser, T.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **57 (1966)**

Heft 16

PDF erstellt am: **03.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916623

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

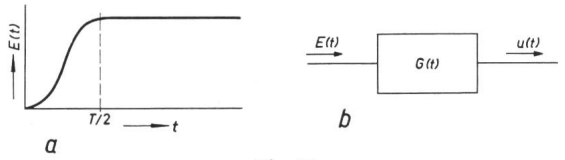


Fig. 11
Eingabe einer cos-förmig ansteigenden Funktion in ein Übertragungssystem
a einziehende Cosinuswelle:

$$E(t) = 1/2\left(1 - \cos\frac{2\Pi}{T}\right) \text{ für } 0 \leq t \leq T/2;\ E(t) = 1 \text{ für } t \geq T/2$$

b Definitionen zu Gl. (8):
$E(t)$ beliebige Eingangsfunktion z. B. Cos-Funktion; $G(t)$ Übergangsfunktion des Systems (Rechteckstossantwort); $U(t)$ Ausgangsfunktion für $E(t)$

geben. Fig. 12 zeigt die Antwort eines gedämpften kapazitiven Teilers auf verschiedene Frequenzen des Cosinusanstieges. Ein Rechteckstoss, der eine fünf mal kleinere Anstiegszeit hat als der gemessene Anstieg, beschreibt die wirkliche Rechteckstossantwort genügend genau (Fehler kleiner 2 %).

Die Erzeugung von Rechteckstössen um 1 ns Anstiegszeit gelingt, so dass die experimentelle Bestimmung der Teilerantwort mit Niederspannung keine Schwierigkeiten mit sich bringt.

Literatur

[1] *W. Zaengl* und *K. Feser:* Ein Beitrag zur Berechnung des Übertragungsverhaltens von Stoßspannungsteilern. Bull. SEV 55(1964)25, S. 1249...1256.
[2] *P. R. Howard:* Errors in Recording Surge Voltages. Proc. IEE, Part II Power Engineering 99(1952)–, S. 371...383.
[3] *W. Zaengl:* Ein neuer Teiler für steile Stoßspannungen. Bull. SEV 56(1965)7, S. 232...240.
[4] *T. Harada:* A new Consideration on Resistor Divider for Impulse Voltage Measurements. Technical Report E-64004, Central Research Institute of Electric Power Industry, July 1964.
[5] *K. W. Wagner:* Operatorenrechnung und Laplacesche Transformation. 2. Auflage, Leipzig, Johann Ambrosius Barth Verlag, 1950.
[6] *A. Ašner:* Fortschritte auf dem Gebiete der Messung sehr hoher, rasch veränderlicher Stoßspannungen. Brown Boveri Mitt. 47(1960)4, S. 239...267.

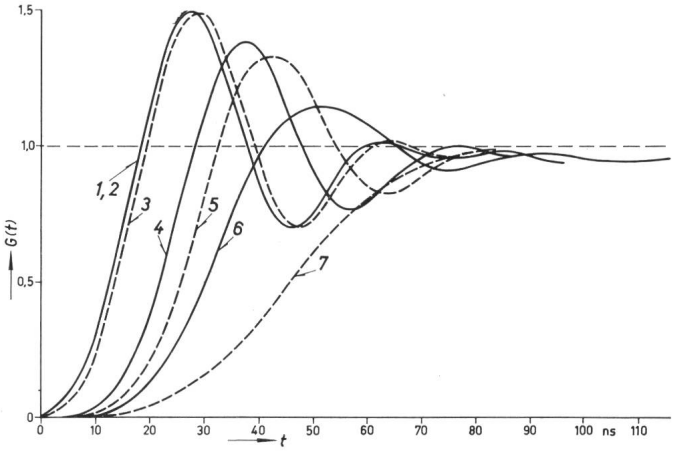


Fig. 12
Ausgangsfunktionen für eine einziehende Welle mit cosinusförmigem Anstieg
$C_e = 40$ pF, $C_p = 1$ pF, $C_1 = 150$ pF, $R = 1$ kΩ, $L = 10$ µH
1 $T = 0$ (Rechteckstoss); *2* $T = 1$ ns; *3* $T = 6$ ns; *4* $T = 40$ ns; *5* $T = 60$ ns; *6* $T = 80$ ns; *7* $T = 150$ ns

[7] *G. Doetsch:* Anleitung zum praktischen Gebrauch der Laplace-Transformation. 2. Auflage, München, Oldenbourg 1961.
[8] *H. Kaden:* Impulse und Schaltvorgänge in der Nachrichtentechnik. München, Oldenbourg 1957.
[9] *H. Stephanides:* Messtechnische Probleme bei der Stossprüfung mit Voll- und abgeschnittenen Wellen. E u. M 73(1956)17, S. 410...415.
[10] *F. A. Fisher:* Transient Response of Impulse Voltage Dividers. Trans. AIEE Communications and Electronics 77(1958)–, S. 411...420.
[11] *C. Gary:* La mesure des hautes tensions de choc. Les diviseurs de tension. Rev. gén. Electr. 69(1960)10, S. 517...552.
[12] *H. H. Meinke* und *F. W. Gundlach:* Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, 1962.

Adresse des Autors:
Dipl.-Ing. *K. Feser,* Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München, Arcisstrasse 21, D-8 München (Deutschland).

Messung von Ionisation an Kondensatoren

Von *T. Praehauser,* Basel

621.319.4 : 537.572

Nach einem Vergleich der Begriffe: Ionisation, Teilentladung, Korona werden die damit zusammenhängenden Messgrössen der Ladungsverschiebung, des Spannungsabfalls und des Energieabfalls an den Elektroden des zugehörigen Dielektrikums behandelt. Es werden Hinweise auf Messanordnungen und Messgeräte gegeben und das Ionisationsverhalten von Kondensatoren, unter Berücksichtigung der Einführung der Ionisationsmessung als Prüfung, beschrieben.

Après une comparaison des notions, telles que la ionisation, la décharge partielle, l'effet de couronne, l'auteur décrit les unités de mesure correspondant, telles que le décalage de charge, la chute de tension et d'énergie aux électrodes du diélectrique correspondant. L'auteur fournit des indications au sujet des instruments de mesure et des dispositifs de mesure, du comportement des condensateurs à la ionisation, compte tenu de l'introduction d'une mesure de ionisation.

1. Die Begriffe: Ionisation, Korona, Teilentladungen

Schwache elektrische Teilentladungen in festen, flüssigen oder gasförmigen Isoliermaterialien werden in der Literatur sowohl mit Ionisation als auch mit Korona bezeichnet. Die Inhalte der Begriffe «Ionisation», «Korona» und «elektrische Teilentladungen» überschneiden sich weitgehend, sie sind kurz gefasst die folgenden:

«Ionisation» bedeutet sowohl den Vorgang der Erzeugung von Ladungsträgern als auch den dadurch hervorgerufenen Zustand. Die Erzeugung der Ladungsträger erfolgt durch Zuführung der Ionisierungsenergie; dies kann z. B. durch Elektronenstoss, Atomstoss (bei hohen Temperaturen), Wellenstrahlung erfolgen. Im weiteren wird nur die Erzeugung von Ladungsträgern durch Stoss behandelt (Stossionisation).

«Korona» umschreibt schwache elektrische Teilentladungen unter Stossionisation des isolierenden Mediums, wobei häufig Leuchterscheinungen als eingeschlossen, der feste und flüssige Aggregatzustand aber oft als ausgeschlossen angenommen werden. Bei dieser Einschränkung darf aber nicht übersehen werden, dass feste Körper fast immer Hohlräume enthalten, in denen — auch nach der engeren Fassung des Begriffes — Korona auftreten kann.

«Elektrische Entladungen» im weitesten Sinn müssen nicht unbedingt Stossionisation einschliessen, sie können sich vielmehr auf eine Neutralisierung vorhandener Ladungen beschränken. Dies ist z. B. bei den in jedem Isoliermaterial (ausser dem idealen Vakuum) auftretenden meist sehr kleinen Restströmen der Fall, die alle Ladungsträger durch ausserhalb der Entladung liegende Erscheinungen (z. B. Höhenstrahlung) geliefert bekommen, also blosse Ladungswanderung sind. Solche «Entladungen», die in der blossen Neutralisation von an den Elektroden ankommenden Ladungsträgern bestehen, fallen aber nicht unter die Begriffe «Ionisation» bzw. «Korona», sie werden hier nicht weiter behandelt; vielmehr werden im

folgenden «elektrische Entladungen» im engeren Sinne als Teildurchschläge meist mikroskopisch kleiner Bereiche im Isoliermaterial verstanden.

Bei der Verwendung einer dieser drei Begriffe im folgenden, ist als wesentliches Gemeinsames immer inbegriffen, dass das elektrische Feld im betreffenden Isoliermaterial durch Stossionisation (identisch mit Stossionisierung) zusätzliche Ladungsträger erzeugt.

Die augenfälligste Art der Korona ist diejenige an Metallelektroden in Luft bei hohen Spannungen. Besonders an Kanten treten infolge Feldverzerrung hohe Feldstärken auf, die durch Ansammlung von Raumladungen noch erhöht werden und zu Stossionisation führen, was sich in den bekannten Leuchterscheinungen äussert. Diese Erscheinung ist meist ungefährlich, ist jedoch unerwünscht, wenn dadurch Funkstörungen verursacht werden, oder wenn sie an Prüfeinrichtungen für Koronamessungen auftritt, weil dann die Messergebnisse verfälscht werden können. Die Hochspannungselektroden solcher Prüfeinrichtungen müssen je nach Form bestimmte Abmessungen haben [1][1]), um die an ihrer Begrenzung auftretende Feldstärke unter dem für Stossionisation nötigen Wert zu halten (Grössenordnung 20 kV/cm). Gefährlich können solche Entladungen werden, wenn die Korona in Büschel- und Stielentladungen übergeht und es an Hochspannungsapparaten zu äusseren Überschlägen kommt, die entweder zu direkter Zerstörung führen oder für die innere Isolation schädliche Entladeschwingungen oder Überspannungen auslösen. Auch wenn diese Entladungen nicht so intensiv werden, können sie gefährlich sein sobald sie die Isolierstoffe in der Nähe der Metallelektroden angreifen und eine Kriechwegbildung einleiten. Den höchsten Beanspruchungen werden jedoch meist Dielektrika im Innern der Apparate ausgesetzt, welche somit auch hinsichtlich der Auswirkung von Ionisation die gefährdetste Stelle bilden. Hier sind für eine Ionisation vor allem Hohlräume günstig, die eine viel geringere Festigkeit haben als das sie umgebende Dielektrikum, besonders wenn Unterdruck herrscht, so dass die hier auftretenden Durchschläge die Wände erodieren und besonders bei Flüssigkeiten ionisieren [2]. In Flüssigkeits-imprägnierten Dielektrika sind vor allem Feuchtigkeitsreste [2; 3], Gasreste, Spitzen und Kanten von Elektroden (z. B. bei Folien in Kondensatoren) oder leitende Teilchen, Zentren der Ionisation. Da um Spitzen die Feldstärke durch die Feldverzerrung wesentlich erhöht ist, bilden sich hier vor allem Gasblasen [4] durch Dissoziation des Imprägniermittels infolge stärkerer Stossionisation und vielleicht sogar Elektronenemission. Sind einmal Gasblasen gebildet, so steigt die Intensität der Ionisation stark an wegen der gegenüber dem übrigen Dielektrikum meist viel kleineren Dielektrizitätskonstante und kleineren elektrischen Festigkeit. Gleich- und Wechselspannung zeigen hier einen graduellen Unterschied in der Intensität, der lange Zeit zu der Meinung verführt hat, bei Gleichspannung gebe es keine dem Durchschlag vorangehende Ionisation. Sie war aber bei Gleichspannung nur nicht so leicht messbar wie bei Wechselspannung. Aus der Nicht-Messbarkeit wurde der falsche Schluss auf deren Nicht-Vorhandensein gezogen.

Der Grund für die bei Gleichspannung geringere Intensität der Ionisation ist folgender: Entsteht mit steigender Beanspruchung ein Durchschlag durch eine Gasblase (z. B.: [5; 6]), so erfolgt ein Ladungsausgleich, der dem elektrischen Feld in der Blase entgegenwirkt. Erst bei einer weiteren Feldsteigerung wird wieder ein Durchschlag eintreten (Fig. 1). Bei Wechselspannung geht erstens diese Feldänderung viel rascher vor sich als üblicherweise bei einer Gleichspannung, weshalb die Aufeinanderfolge der Entladungen viel rascher und damit die Messgrösse je Zeiteinheit leichter erfassbar ist, und zweitens steigt bei Wechselspannung infolge des ständigen Polaritätswechsels die Feldstärke trotz fortwährender Feldstärkenänderung nicht nötigerweise bis zum Durchschlagswert des Dielektrikums, so dass Ionisation über einen langen Zeitraum ohne einen Durchschlag möglich ist, wogegen bei Gleichspannung nach einer bestimmten Summe von Feldstärkeänderungen der Gesamtdurchschlag eintritt. Fig. 1 gibt eine sehr vereinfachte Darstellung eines solchen Vorganges: Zwischen zwei Elektroden sei eine Gasstrecke in Serie mit einem Dielektrikum höherer Durchschlagfestigkeit und der relativen Dielektrizitätskonstante ε an eine Wechselspannung gelegt, wobei die Gasstrecke so klein angenommen sei, dass ihr Vorhandensein oder Nichtvorhandensein einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Feldstärke im übrigen Dielektrikum hat. Solange die Gasstrecke nicht durchgeschlagen ist, hat die Feldstärke in ihr den ε-fachen Wert gegenüber dem übrigen Dielektrikum. Sie kann so lange proportional mit der angelegten Spannung steigen, bis der Durchschlag eintritt, die Gasstrecke also leitend wird. Die zur einen, anliegenden Elektrode gelangenden Ladungen können ohne weiteres durch diese abwandern. Den an das Dielektrikum wandernden entgegengesetzten Ladungen ist durch den hohen Widerstand des Dielektrikums der Weg zur anderen Elektrode versperrt, so dass sie die Trennfläche Gas—Dielektrikum so lange aufladen bis durch sie das Feld in der Gasblase so weit kompensiert ist, dass die Löschspannung in der Gasstrecke unterschritten wird und die Entladung erlischt. Die Gasstrecke wirkt wieder als Isolator. Die Feldstärke kann wieder mit der an der ganzen Anordnung liegenden Spannung proportional deren Änderung anwachsen, bis die Durchschlagspannung erreicht ist. Tritt aber vorher eine Spannungsreduktion ein, so kann die Feldstärke in der Gasstrecke bereits den Durchschlagwert des entgegengesetzten Richtungssinnes erreichen, bevor die Spannung am Gesamtdielektrikum den Nullwert durchschritten hat. Die Entladungen werden also um den Nulldurchgang der Spannung häufiger sein als im Scheitelwert, weil hier die Spannungsänderung am grössten ist. Dies ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber Glimmen von Metallelektroden in einem freien Luftraum, bei dem das Maximum der Korona um den Scheitelwert auftritt: Es gibt wohl Raumladungen, die den Vorgang beeinflussen, aber keine durch starre Zwischenflächen gestauten Ladungen, die eine Phasenverschiebung in so grossem Ausmass bewirken könnten.

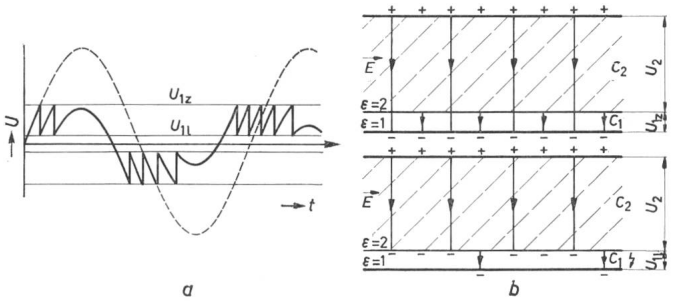


Fig. 1
Vereinfachte Darstellung von Teilentladungen in einer zu einer Kapazität in Serie geschalteten Gasstrecke
a Spannungsverlauf der Gasstrecke bei Wechselspanung; *b* Feldlinienverlauf und Ladungsverteilung (schematisch) vor und nach dem Teildurchschlag
U Spannung an der Kapazität *C*; U_{1z} Zündspannung an der Gasstrecke; U_{1l} Löschspannung an der Gasstrecke; *t* Zeit; *E* Feldstärke

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Die sehr vereinfachte Darstellung der Fig. 1 wird durch folgende Umstände wesentlich kompliziert: Die Dielektrikumsoberfläche um einen Hohlraum ist nichtleitend, muss also keine Äquipotentialfläche sein, daher werden Durchschläge der Gasstrecke an verschiedenen Stellen auftreten und anschliessend auch Überschläge entlang der Dielektrikumsoberfläche (wenn sie gross genug ist). Ausserdem werden die Hohlräume nicht eine zusammenhängende homogene Schicht bilden, sondern unregelmässig über das Dielektrikum verteilt sein, welches selbst wieder ein Mischdielektrikum mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten sein kann. Schliesslich werden die Elektroden nicht mikroskopisch spiegelglatt sein, sondern unzählige Spitzen und Kanten haben. Die hier auftretenden stark erhöhten Feldstärken bewirken eine gegenüber dem übrigen Dielektrikum voreilende Ionisation durch die folgenden, auch gleichzeitig auftretenden, schon angedeuteten Faktoren: Stossionisation vor der Spitze, Kaltemission von Elektronen bei negativer Polarität, dadurch Ionisation und Dissoziation des angrenzenden Dielektrikums, meist unter Gasbildung. Sobald sich Gasblasen bilden, steigt — wie bereits erwähnt — die Ionisation sprungartig an, da erstens die Feldstärke infolge der höheren Dielektrizitätskonstante auf ein Vielfaches steigt, zweitens die Durchschlagsfeldstärke des Gases meist wesentlich kleiner als die des anschliessenden Dielektrikums ist. Dabei darf aber keineswegs angenommen werden, jedes Elektron bewirke eine Stossionisation. Viele Elektronen werden, wenn überhaupt, gerade so viel Energie abgeben können, um eine Molekülgruppe in einen angeregten Zustand zu versetzen, der aber nach 10^{-8} s entweder durch einen weiteren Stoss verstärkt werden muss, oder durch Abgabe eines Photons (Lichtblitzes) oder während eines Zusammenstosses rückgängig gemacht wird [7]. (In einigen Fällen konnte in Flüssigkeiten schwaches Leuchten beobachtet werden [8; 9; 10].) Bei kleinen Feldstärken ist daher die Wahrscheinlichkeit zu ionisieren oder zu dissoziieren sehr klein, sie steigt aber mit der Feldstärke sehr stark an, — also indirekt auch mit dem Auftreten von Gasblasen. Bei geschichteten Dielektrika kommt zu der Wirkung von Hohlräumen, Spitzen und Kanten noch die Verschiedenheit der Leitfähigkeit und der elektrischen Festigkeit längs und quer zu den Schichten hinzu (Fig. 2). In mit chlorierten Diphenylen oder Mineralöl imprägnierten Papierkondensatoren können von der Folienkante aus entlang den anliegenden Papierlagen Entladungen auftreten. Zufolge der Spannungsverteilung, die sich zuerst entsprechend der kapazitiven und Ohmischen Steuerung einstellt, die aber durch die Entladungen verschoben wird, erfolgen auch hier die Mehrzahl der Entladungen analog Fig. 1 um den Spannungsnulldurchgang [11]. Bei hoch beanspruchten Kondensatoren finden sich daher oft Rußspuren von den Folienkanten nach aussen.

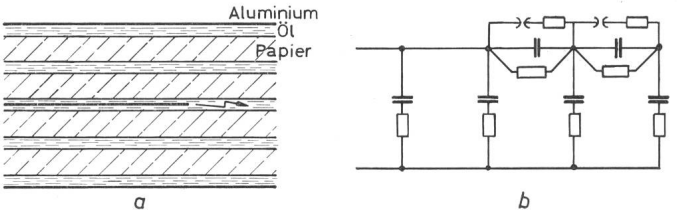


Fig. 2
Randentladungen im geschichteten Kondensatorelektrikum von der Folienkante entlang der Schichten
a schematische räumliche Anordnung; *b* Ersatzschaltbild (nach [11])

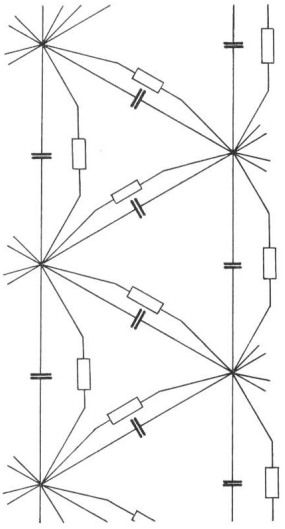


Fig. 3
Ersatzschaltbild für das untersuchte Dielektrikum

2. Messung der Ionisation

2.1 Messbare Grössen

Eine Teilentladung im Dielektrikum bedeutet einen Spannungszusammenbruch (genauer: eine Spannungsreduktion) und eine Ladungsneutralisierung an einem Teilelement dieses Dielektrikums. Dieses Teilelement enthält Kapazitäten, Induktivitäten und Widerstände und ist durch entsprechende Grössen mit den übrigen Teilelementen quer- und längsverbunden (Fig. 3). (Auch längs Querverbindungen können Teilentladungen auftreten [13].) Die Änderung des elektrischen Zustandes dieses Teilelementes kann in den seltensten Fällen direkt erfasst werden — ausser in künstlichen Anordnungen zur Untersuchung von Einzelentladungen —, erfasst werden kann meist nur ihre Auswirkung auf die Umgebung. Neben den elektrischen Auswirkungen, die hier ausführlicher behandelt werden sollen, treten auf (s. z. B. [13]): Leuchterscheinungen (beobachtbar in durchscheinenden Dielektrika und an der Oberfläche als «Glimmen»), Erwärmung, Geräusche (z. B. «Hissing» bei Durchführungen), chemische Veränderungen (z. B. Gasbildung in Kondensatoren). Ausser den Leuchterscheinungen, die aber nur in Sonderfällen [10] sehr empfindliche Indikatoren sein können, zeigen diese Auswirkungen im Gegensatz zu den elektrischen, die Entladungen fast durchwegs erst bei fortgeschrittenem Ausmass an, also dann wenn bereits Beschädigungen am Dielektrikum aufgetreten sind, weshalb sie hier nicht weiter behandelt werden sollen. Die elektrischen Auswirkungen von Teilentladungen auf die Umgebung sind: Aussendung von elektromagnetischen Wellen, Spannungs- und Energieabfall an den das Dielektrikum begrenzenden Elektroden, und erhöhter Verluststrom durch Nachlieferung der (im Inneren) neutralisierten oder (z. B. von Abschirmelektroden) abgesprühten Ladungen. Die Aussendung von elektromagnetischen Wellen kann zwar sehr störend sein (Funkstörspannungen z. B. durch Funken-«Entladungen» an schlechten Kontakten), setzt aber bereits verhältnismässig starke Entladungen voraus und ist daher als Mittel zur Anzeige beginnender Entladungen — der Korona-Einsetzspannung — weniger geeignet.

Spannungs-, Energie- und Stromverhalten werden zunächst für die weitestgehende Vereinfachung eines Dielektrikums mit Störstelle (d. h. mit Teilentladung) dargestellt, nämlich für die Serieschaltung einer Gasstrecke mit einem Dielektrikum wie

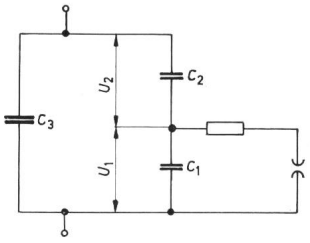


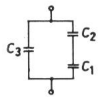
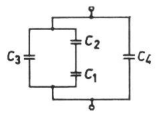
Fig. 4
Vereinfachtes Ersatzschaltbild für das untersuchte Dielektrikum
U Spannung an der Kapazität C; C_1 Kapazität der durch eine Funkenstrecke mit Ersatzwiderstand überbrückten Teilentladungsstrecke C_2 Seriekapazität; C_3 Parallelkapazität

in Fig. 1b. Dabei soll noch angenommen werden, dass die Entladung um Grössenordnungen schneller vor sich geht als die Speisespannung folgen kann, und dass vorerst die Löschspannung vernachlässigbar gegen die Zündspannung der Teilentladungsstrecke ist.

Knapp vor dem Teildurchschlag sei die Spannung zwischen den Elektroden $U_1 + U_2$. Im Durchschlag verhält sich die Gasstrecke wie ein leitender Körper, U_1 bricht zusammen, zwischen den Elektroden liegt nur mehr die Spannung U_2, bis sie durch die Spannungsspeisung wieder auf den ursprünglichen Wert $U_1 + U_2$ angehoben wird. Die elektrische Energie der Anordnung ist vor dem Wiederaufladen um die auf die Gasstrecke entfallende Energie kleiner, diese wurde durch die Entladung in Wärme umgesetzt. Die Ladungsmenge auf der an das Dielektrikum angrenzenden Elektrode bleibt aber trotz des Durchschlages so lange unverändert, als keine Ladungs-Nachlieferung von aussen stattfindet, die Spannung also nicht ansteigt. Beim Wiederaufladen ist die zuzuführende Energie grösser als die in der Gasentladungsstrecke in Wärme umgesetzte: Erstens wird der ganze Kondensator auf höhere Spannung gebracht, und nicht nur eine Teilkapazität, und zweitens ist bei Aufladung einer Kapazität durch eine Speisung konstanter Spannung wegen der Verluste im Aufladewiderstand die von der Quelle zu liefernde Energie doppelt so gross als die im Kondensator gespeicherte. In den seltensten Fällen wird man aber eine reine Serieschaltung einer Kapazität mit einer Teilentladungsstrecke finden, meist wird dieser Anordnung eine grössere Kapazität parallelgeschaltet sein. Fig. 4 stellt gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen eine weitgehende Vereinfachung dar, indem die Querverbindungen — wie sie in Fig. 3 dargestellt sind — zunächst vernachlässigt sind. Der grundlegende Unterschied gegenüber der reinen Serieschaltung besteht darin, dass im Augenblick des Durchschlages von C_1 die Spannung an C_2 ansteigt, bereits bevor von der Spannungsquelle Ladung nachgeliefert wurde, weil C_3 sich auf C_2 entlädt. Massgebend für die nun C_2 und C_3 gemeinsame Spannungshöhe ist die Bedingung, dass die Summe der auf direkt verbundenen Elektroden sitzenden Ladungsmengen vor und nach der Teilentladung die gleiche ist — solange von der Spannungsquelle keine Ladung nachgeliefert wurde. Daraus ergibt sich ein Energieabfall hinsichtlich der Summe der Ladeenergien von C_2 und C_3: Die Differenz wird in der Teilentladungsstrecke in Wärme umgewandelt. Die Proportionen von Spannungsabfall, Energieabfall und Ladungsverschiebung der Gesamtordnung zu Spannung, Energie und Ladung der Teilentladungsstrecke für den Vorgang des Teildurchschlages und für die anschliessende Aufladung der Gesamtanordnung auf die ursprüngliche Spannung, gibt Tabelle I. Darin ist auch noch der praktisch wichtige Fall aufgenommen, dass zur Ersatzschaltung des Dielektrikums mit den Teilentladungen (Fig. 4) aus messtechnischen Gründen noch ein Kondensator C_4 parallelgeschaltet ist.

Spannungs-, Energie- und Ladungsverhältnisse an der Gesamtanordnung bei Durchschlag der Teilkapazität C_1
(Vereinfachte Annahme : Löschspannung $C_1 = 0$)

Tabelle I

Gesamtanordnung			
Sofort nach Teilentladung (ohne Speisung)			
Spannungsabfall Gesamtanordnung / Spannungsabfall am Teilkondensator C_1	1	$\frac{C_2}{C_2 + C_3}$	$\frac{C_2}{C_2 + C_3 + C_4}$
Ladungsverschiebung ab C_4 / neutralisierte Ladung in C_1	—	—	$\frac{C_2 C_4}{C_1 (C_2 + C_3 + C_4)}$
Ladenergiedifferenz an Gesamtanordnung / Ladeenergie C_1 vor Teilentladung	1	$1 + \frac{C_2 C_3}{C_1 (C_2 + C_3)}$	$1 + \frac{C_2 (C_3 + C_4)}{C_1 (C_2 + C_3 + C_4)}$
Beim Wiederaufladen auf die ursprüngliche Spannung			
Ladungsnachschub in Gesamtanordnung / neutralisierte Ladung in C_1	$\frac{C_2}{C_1}$	$\frac{C_2}{C_1}$	$\frac{C_2}{C_1}$
Ladeenergiezuwachs / Ladeenergie C_1 vor Teilentladung	$2 + \frac{C_2}{C_1}$	$2 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{C_2 C_3}{C_1 (C_2 + C_3)}$	$2 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{C_2 (C_3 + C_4)}{C_1 (C_2 + C_3 + C_4)}$
von Spannungsquelle gelieferte Energie / Ladeenergie C_1 vor Teilentladung	$2\left(2 + \frac{C_2}{C_1}\right)$	$2\left(2 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{C_2 C_3}{C_1 (C_2 + C_3)}\right)$	$2\left(2 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{C_2 (C_3 + C_4)}{C_1 (C_2 + C_3 + C_4)}\right)$

Diese Zusammenstellung zeigt folgende Auswirkungen einer Teilentladung auf das elektrische Verhalten der das Dielektrikum begrenzenden Elektroden:

Sowohl der Spannungsabfall an den Elektroden (ausser bei der reinen Serieschaltung nach Fig. 1) als auch der Ladungsnachschub beim Wiederaufladen auf die ursprüngliche Spannung sind nur Bruchteile des Spannungsabfalls und der Ladungsbewegung in der Teilentladungsstrecke. Die Änderung der in der Gesamtanordnung gespeicherten elektrischen Ladeenergie vor dem Wiederaufladen auf die ursprüngliche Spannung dagegen ist mindestens ebenso gross wie die in der Teilentladungsstrecke vor der Entladung gespeicherte Ladeenergie. Die von der Spannungsquelle zur Erreichung der ursprünglichen Spannung zu liefernde Energie übersteigt sogar deren Vierfaches (Verluste im Aufladewiderstand).

Die Aufhebung der Vereinfachung, die Löschspannung der Teilentladungsstrecke als Null anzunehmen, führt auf die grundsätzlich gleichen Ergebnisse [14]. Sind Zünd- und Löschspannung polaritätsabhängig, so treten bei periodischen Vorgängen in Fig. 1a entsprechende Verschiebungen auf. Die zweite weit grundsätzlichere Vereinfachung durch Einführung der Ersatzschaltung nach Fig. 4 anstelle von Fig. 3 wurde durch die Berechnung insofern bereits teilweise aufgehoben, als die Bedingung der Erhaltung der Ladungen in abgeschlossenen Systemen ohne direkte Berechnung der Verlustenergien doch zu den Energiebilanzen derjenigen Endzustände führt, die sich aus verlustbehafteten Verbindungen zwischen den Teilkapazitäten ergeben. Bei Kondensatoren, auf die hier das Hauptgewicht gelegt wird, können die Verluste der Teilkapazitäten selbst, für die bereits behandelten einmaligen Vorgänge, ausser Betracht gelassen werden, solange an ihnen kein Durchschlag auftritt. Für C_1 ist dieser Fall des Durchschlages berücksichtigt. Das verbleibende Kapazitätsschema von Fig. 3 lässt sich somit auf dasjenige der Fig. 4 reduzieren. Bei periodischen Vorgängen können alle Widerstände durch Ableitung von Ladungen Änderungen der Spannungsverteilung bewirken.

Die Dauer der einzelnen Teilentladungen beträgt 10 bis 1000 ns. Die Form ist die einer Stosswelle, z. B. $4 \mid 20 \cdot 10^{-9}$ s [12...16]. Die einzelnen Messwerte hängen von den Messgeräten, der Messanordnung und dem Prüfling ab. Meist werden periodisch wiederkehrende Teilentladungen untersucht. Periodische Vorgänge wirken sich naturgemäss auf den Verlustwinkel eines Dielektrikums aus, der aber ein relativ unempfindlicher Indikator und daher zur Bestimmung der Korona-Einsetzspannung ungeeignet ist. Der Verlustwinkel zeigt erst stark fortgeschrittene Teilentladungen verlässlich an.

2.2 Prüfanordnung

Um die an einem Prüfobjekt durch Teilentladungen hervorgerufenen Spannungs-, Ladungs- und Ladeenergieänderungen,

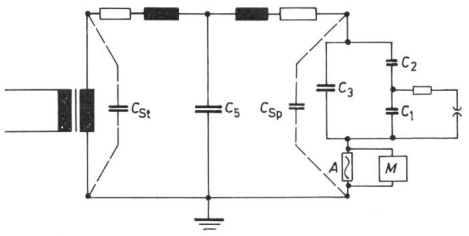


Fig. 5

Prinzipschema des Prüfkreises zur Messung von Ionisation

Anordnung C_1, C_2, C_3 entspricht dem Ersatzschaltbild für das untersuchte Dielektrikum wie Fig. 4

A Abgreifwiderstand (Ankopplungsvierpol); *M* Messgerät; C_{St} Streukapazität des Speisetransformators; C_{Sp} Streukapazität des Prüflings

möglichst unverfälscht an das Messgerät heranzubringen muss der Messkreis (die Prüfanordnung) folgende Bedingungen erfüllen:

1. Der Störpegel muss kleiner sein als der zu messende Wert. Dies gilt selbstverständlich sowohl für den spannungsfreien Zustand (Einstreuung von aussen) als auch unter der Prüfspannung. Der Störspannungsscheitelwert des Prüflings z. B. addiert sich nicht einfach arithmetisch zu demjenigen des Prüfkreises; dazu wäre eine genau gleiche Phasenlage nötig, was nur ab und zu, nicht aber über einige Wechselstromperioden hin erwartet werden kann. Einstreuungen von ausserhalb der Messanordnung lassen sich — ausser in einer Brückenschaltung (s. Abschn. 2.3) — oft nur schwer von Störungen unterscheiden, die innerhalb der Messanordnung auftreten.

2. Der Messkreis darf die zu messende Störung weder kurzschliessen, noch sie unterdrücken. Dies gilt auch bei der Überprüfung des Messkreises auf Störfreiheit. Dabei muss aber folgendes beachtet werden: Es dürfen keine prinzipiellen Änderungen in der Schaltung zwischen Überprüfung und Messung vorgenommen werden. Es empfiehlt sich, überhaupt möglichst wenig Änderungen zwischen Vergleichsmessungen zu machen, damit sich keine Störquellen einschleichen (schlechte Kontakte, freie Potentiale, Sprühstellen auf der Hochspannungsseite).

Fig. 5 gibt das prinzipielle Ersatzschaltbild für eine Ionisationsmessanordnung wieder. Um aus der Speisung kommende Störungen zu unterdrücken, wird oft zusätzlich am Hochspannungsausgang des Speisetransformators ein Filter event. mit einem Saugkreis kombiniert vorgesehen. Diese Möglichkeit bietet sich vor allem dann an, wenn vorzugsweise bei einer ganz bestimmten Frequenz, z. B. 1 MHz, gemessen werden soll.

Wie werden nun die Spannungs-, Ladungs- und Ladeenergieänderungen des Prüflings durch die Anordnung gemäss Fig. 5 an das Messgerät weitergegeben?

1. Annahme: $C_3 = C_5 = C_{St} = C_{Sp} = 0$ (also Serienschaltung einer Kapazität mit einer Entladungsstrecke). Ausserdem sei (wie auch in den folgenden drei Annahmen) die Induktivität des Speisetransformators so gross, dass bei einer Teilentladung die Ersatzfrequenz der Ladungsnachlieferung durch den Transformator ausserhalb des vom Messgerät erfassten Frequenzbereiches liegt. Im Augenblick des Teildurchschlages gibt es keine Ladungsbewegung durch den Ankopplungsvierpol, der Spannungsabfall könnte also nur durch hochspannungsseitige Spannungsmessung festgestellt werden, woraus sich der Abfall in der Ladeenergie des Kondensators berechnen liesse. Am Ankopplungsvierpol lässt sich die Teilentladung selbst also überhaupt nicht feststellen, nur der Wiederaufladevorgang (siehe Tabelle I). Dieser Sonderfall ist aber praktisch nicht zu verwirklichen, da immer Streukapazitäten vorhanden sind (s. 3. Annahme).

2. Annahme: $C_5 = C_{St} = C_{Sp} = 0$. Es gilt dasselbe wie für die 1. Annahme.

3. Annahme: $C_5 = 0$. Streukapazitäten sind vorhanden. Entsprechend Tabelle I findet eine Ladungsverschiebung durch den Ankopplungsvierpol statt, die allerdings um so kleiner wird, je grösser C_3 ist. Bei grossen Prüfkapazitäten C_3 ist daher zur Erhöhung der Anzeige Annahme 4 anzuwenden. Eine Ausnahme bildet eine Entladung, die nicht in C_1 sondern direkt gegen Erde stattfindet (also z. B. von der Hochspannungsabschirmung aus).

4. Annahme: Alle Kapazitäten der Fig. 5 sind vorhanden, in Tabelle I ist mit C_4 ($= C_5 + C_{St} + C_{Sp}$) zu rechnen. Die während des Teildurchschlages durch den Ankopplungsvierpol fliessende Ladungsmenge steigt mit C_4, ausser in dem Sonderfall einer direkten Entladung gegen Erde. Soll nicht eine innere Ionisation (also z. B. zwischen den Belägen eines Kondensatorelementes), sondern die Koronafreiheit von Hochspannungsabschirmungen (auch im Inneren von Apparaten) gegen Erde geprüft werden, so ist C_4 möglichst klein zu halten. Im Ersatzschaltbild ist für den Fall der Entladung gegen Erde für die betreffende Entladungsstelle ein Widerstand R_E gegen Erde anzunehmen, dessen Strom sich über die der Entladungsstelle anschliessenden Kapazitäten schliesst (Fig. 6). Es geht ein um so grösserer Anteil der Ladungsverschiebung durch den Ankopplungsvierpol, je grösser die Prüfkapazität im Verhältnis zu C_4 ist, denn in diesem Sonderfall sind diese beiden Kapazitäten hinsichtlich der Ladungsverschiebung parallelgeschaltet, der Ankopplungsvierpol wird durch C_4 überbrückt. Eine ähnliche Überbrückung

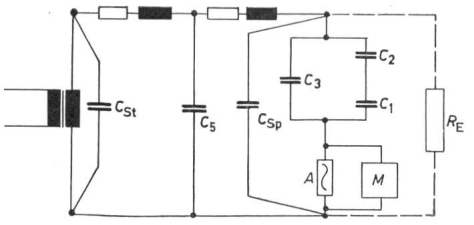


Fig. 6
Teilentladungen direkt gegen Erde (z. B. von Hochspannungsabschirmungen) über den Ersatzwiderstand R_E
Diese Ladungen fliessen nur zu einem Teil über den Ankopplungsvierpol.
Bezeichnungen siehe Fig. 5

des Ankopplungsvierpols kann bei der Bestimmung des Übertragungsverhaltens der Prüfschaltung nach VDE-Entwurf [126, § 6] bei grosser Prüflingskapazität auftreten:

«Mit Hilfe eines geeigneten Spannungsgebers und eines Vorschaltkondensators sehr kleiner Kapazität wird in die vollständig aufgebaute Prüfschaltung ein von den Daten der Prüfschaltung praktisch unabhängiger und während der Messung konstant gehaltener Ersatzstörstrom zwischen den bei der Korona-Isolationsprüfung an Hochspannung und direkt oder über den Ankopplungsvierpol an Erde liegenden Klemmen des Prüflings eingeführt.»

Anschliessend wird einmal die Koronamesseinrichtung an der bei der Koronaprüfung vorgesehenen Stelle eingeschaltet, und einmal in unmittelbarer Serieschaltung mit dem Spannungsgeber. In beiden Schaltungen wird gemessen, das Verhältnis der beiden Messwerte gibt den «Korrekturfaktor». Dabei liegt abweichend von Fig. 5 der Ankopplungsvierpol bei der Koronamessung in Reihe zu C_5. (Bei einer Variante ohne C_5, was der Annahme 3 entspricht, würde ein dem Prüflingskondensator direkt parallelgeschalteter Spannungsgeber durch jenen praktisch kurzgeschlossen). Ist nun die Prüflingskapazität klein gegen C_5, so werden sich Ersatzstörstrom und tatsächlicher Störstrom (aus dem Prüfling) hinsichtlich des Ankopplungsvierpols ähnlich verhalten. Ist sie dagegen in der Grössenordnung von C_5, so wird der durch den Ankopplungsvierpol fliessende Anteil des Ersatzstörstromes (zufolge der parallelgeschalteten Prüflingskapazität) wesentlich verringert, für einen Störstrom aus dem Prüfling hingegen tritt keine analoge Reduktion auf. Durch diese Schaltung der Ersatzstörstromquelle würde also ein schlechteres Übertragungsverhalten vorgetäuscht, als es für den tatsächlichen Störstrom besteht. In diesem Fall erscheint es empfehlenswert, den Spannungsgeber nicht über einen zusätzlichen Kondensator anzuschliessen, sondern entweder über die Prüflingskapazität, und für die Vergleichsmessung den Vierpol zuerst in Serie mit dem Prüfling und dann mit C_5 (wie für die eigentliche Ionisationsmessung) zu schalten, oder den Spannungsgeber in Serie mit dem Prüfling einmal hochspannungs- und einmal niederspannungsseitig zu schalten, wobei der Ankopplungsvierpol für die Ionisationsmessung in Serie mit dem Prüfling bleibt. Für die eigentliche Ionisationsmessung wird der Spannungsgeber entfernt.

Für eine möglichst empfindliche Messung lässt sich daher nicht ein für alle Fälle gültiges Schaltschema angeben, sondern nur der sehr allgemein anmutende Grundsatz: Damit die mit einer Teilentladung verbundene Ladungsverschiebung in der Hauptsache durch den Ankopplungsvierpol fliesst, müssen einerseits alle Überbrückungen dieses Vierpols vermieden werden, anderseits sind Ohmscher, induktiver und kapazitiver Widerstand in Serie zu diesem Vierpol im allgemeinen möglichst klein zu halten. Nur bezüglich des Prüfobjektes selbst ist bei *innerer* Ionisation (z. B. in einem Kondensatorwickel) die Empfindlichkeit der Messung um so grösser, je kleiner seine Kapazität ist. Für das Übertragungsverhalten der Prüfschaltung ist noch zu beachten, dass z. B. im Falle der Messung des Scheitelwertes des am Ankopplungsvierpol entstehenden Spannungsverlaufes dieser Wert nur ein Teil des auf den ganzen Messkreis verteilten Spannungsabfalls ist, also ein Korrekturfaktor eingeführt werden muss [15]. Wesentlich einfacher als durch Rechnung lässt sich das Übertragungsverhalten durch Eichimpulse bestimmen. Hier ist aber darauf zu achten, ob der Impuls nur auf das Messgerät geht, oder ob und wie er den Messkreis miteinschliesst. Im ersteren Fall wird nur die Konstanz des Messgerätes kontrolliert.

Eine Messmethode, die für Kondensatoren nicht in Betracht kommt, ist die Ortungsmethode in Kabeln mittels Wanderwellen. Aus der Zeitdifferenz von direkt zu einem Ende laufender und am anderen Ende reflektierter Welle kann auf die Lage der Koronastelle geschlossen werden [6].

2.3 Messgeräte

Die vom Ankopplungsvierpol abgenommene Störgrösse geht über ein die Grundschwingung unterdrückendes Gerätefilter und einen Verstärker an die Messwertumformung. Wird die Störgrösse aus einer Brückenschaltung von Prüfobjekt und Vergleichsobjekt entnommen, so können die äusseren Störeinflüsse besser unterdrückt werden [13]. Daneben kann auch die Verlustmessung zur Ionisationsanzeige herangezogen werden, sie ist aber sehr ungenau. Die Anzeige der Störgrösse erfolgt auf vier Arten:

durch Lautsprecher,
durch Impulszähler,
durch Zeigerinstrumente,
durch Oszillographen.

Lautsprecher zur Wiedergabe der mit Korona verbundenen Geräusche im Prüfling sind verglichen mit den anderen drei Anzeigegeräten ziemlich unempfindlich (Lautsprecher zur Verdeutlichung der verstärkten elektrischen Störgrössen dagegen können empfindlicher als Zeigerinstrumente sein). Zeigerinstrumente geben Durchschnittswerte über eine Anzahl von Wechselstromperioden, die von der Trägheit des Zeigersystems abhängen, wobei die am Ankopplungsvierpol auftretenden Spannungsscheitelwerte, Spannungsmittelwerte, Spannungszeitprodukte oder die ihnen entsprechenden Stromwerte angezeigt werden. Man kann demgemäss nicht unterscheiden zwischen einem grösseren Impuls und mehreren rasch aufeinanderfolgenden kleineren, auch nicht, ob es sich um Störimpulse handelt, die regelmässig jede oder nur jede x-te Wechselstromperiode auftreten. Demgegenüber geben Oszillographen ein Bild der Intensitätsverteilung über die Wechselstromperiode, also zwei Informationen mehr: nämlich über die Phasenlage und die Gleichmässigkeit der Verteilung (wenige starke oder viele kleine Impulse). Daraus kann man zusätzliche Schlüsse über die Lage des Koronazentrums ziehen. Entladungen im negativen 50-Hz-Maximum sind z.B. durch Glimmen einer Metallelektrode in Luft gegen Erde verursacht, Entladungen um das 50-Hz-Strom-Maximum durch schlechte Kontakte, Entladungen im 50-Hz-Spannungsanstieg durch Hohlräume im Dielektrikum. Man darf aber auch hier nicht vergessen, dass das Auflösungsvermögen eines Oszillographenschirmes begrenzt ist auf etwa 250 bis 500 Impulse im Schirmdurchmesser [13], das bedeutet bei elliptischer Aufzeichnung einer 50-Hz-Periode die gleiche Zahl je Halbperiode, also 20 µs je Impuls als kleinste feststellbare Impulsdauer. Zusammen mit einem Impulszähler (Zählbereich 10...100 000 Impulse/s) lässt sich nur mehr eine geringe Erhöhung des Auflösungsvermögens erreichen. Als kleinst feststellbare Grössen werden angegeben: 1 µV bei Gerätevollausschlag; 0,005 pC bei einer Prüflingskapazität von ca. 20 pF, ca. 0,5 pC bei ca. 0,2 µF [13]. Aufbau, Wirkungsweise sowie Messgrösse und deren Bereich sind jeweils den entsprechenden Betriebsanleitungen der Messgeräte zu entnehmen. Einen Rückblick auf die Entwicklung der Messmethoden geben z. B. [17; 18], einen Überblick über gegenwärtige Methoden [13] und über Eichimpulse [13; 19].

2.4 Bestehende Empfehlungen

Empfehlungen betreffend Koronamessungen wurden herausgegeben von der NEMA [20; 21], der American Society for Testing and Materials [22] und vom VDE [12; 23], wobei die Messung von Funkstörspannungen den Vorrang einnimmt.

3. Ionisationserscheinungen in Kondensatoren

Bei Ionisationsmessungen an Kondensatoren muss vor allem versucht werden, die Ionisation zu lokalisieren. Ein Sprühen von Abschirmungen oder Metallteilen gegen Erde muss anders bewertet werden als eine innere Ionisation. Wohl darf auch das Sprühen gegen Erde oder auch zwischen metallischen Abschirmungen im Inneren eines Apparates bestimmte Grenzen nicht überschreiten, die Beträge richten sich aber nach dem Verwendungszweck. Ein Kopplungskondensator für Störpegelmessung muss unterhalb einer viel kleineren Störspannung bleiben als ein Leistungskondensator. Die Lokalisation dieser Ionisationserscheinungen ist naturgemäss mit einem Ozsillographen einfacher, doch gibt auch ein Zeigergerät gewisse Hinweise durch das gleichmässige Ansteigen mit der Spannung oder durch die Konstanz bei gleichbleibender Spannung, unabhängig von der Zeit. Für das Lebensdauerverhalten von Kondensatoren dagegen ist Ionisation im Kondensator-Dielektrikum von entscheidender Bedeutung.

3.1 Einfluss der Dielektrikumsdicke, der Fabrikation und der Materialqualität

Bei flüssigkeitsimprägnierten Kondensatoren ist die Dikkenabhängigkeit der Ionisationseinsatzspannung seit langem bekannt [24; 25; 26]. Je dünner das Dielektrikum ist, umso höher ist auch die Ionisations-Einsatzfeldstärke. Einen wesentlichen Einfluss hat hier die Qualität der Imprägnierung: Feuchtigkeit [2; 3], Gas [24; 27] reduzieren die Ionisations-Einsatzspannung ganz wesentlich. Der Einfluss der Lagenzahl scheint gering zu sein [17], woraus der Schluss gezogen wird, dass die Ionisations-Einsatzspannung bevorzugt an den Folienkanten eines Kondensatorelementes auftritt. Bei Kunststoffen ist naheliegenderweise die Grösse der auftretenden Hohlräume entscheidend. Für verschiedene Hohlraumgrössen sind bestimmte Betriebsspannungen zulässig — trotz einer gewissen Korona [13].

3.2 Einfluss von Feldstärke und Zeit auf das Verhalten der Ionisation im Kondensator-Dielektrikum

Fig. 7 gibt den schematisierten Verlauf der Intensität der Ionisation für ein ölimprägniertes Papierdielektrikum. Ab

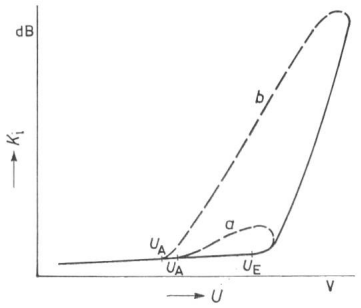


Fig. 7
Intensität der Ionisation K_i in Abhängigkeit von der Spannung U am Prüfling
U_E Ionisationseinsetzspannung (Koronaeinsetzspannung); U_A Löschspannung (Koronaaussetzspannung)
—— ansteigende Spannung
--- abnehmende Spannung
Erklärungen siehe im Text

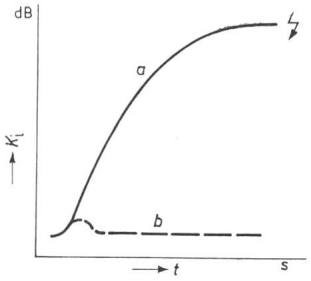


Fig. 8
Zeitlicher Verlauf der Ionisationsintensität K_i bei konstanter Spannung
t Zeit
Erklärungen siehe im Text

einer bestimmten Spannung, der Ionisations-Einsatzspannung, tritt eine eindeutige Steigerung der Intensität über den Grundstörpegel auf. Kleine sporadische Entladungen treten allerdings auch schon vorher auf, sie verschwinden aber bei Konstanthaltung der Spannung oder sogar bei geringfügiger Spannungssteigerung wieder [28]. Wird bei Einsetzen der Korona die Spannung sofort wieder reduziert, so kann trotzdem bei mineralölimprägnierten Papierkondensatoren noch ein leichtes Ansteigen der Intensität auftreten, doch sinkt die Intensität in der Regel um so rascher mit fallender Spannung, je rascher die Spannungsumkehr erfolgt. (Fig. 7, Kurve *a*). Wird die Spannung nach Einsetzen der Ionisation auch weiterhin gesteigert, so steigt die Intensität stark an — bei Spannungsumkehr erfolgt das Erlöschen der Ionisation dann bei entsprechend tieferer «Löschspannung». Bei Mineralölimprägnierung ist die eingeschlossene Fläche (Fig. 7, Kurve *b*) wesentlich grösser als bei Imprägnierung mit chlorierten Diphenylen, auch steigt bei diesen die Intensität mit steigender Spannung weniger rasch an [27;29]. Dies gilt auch für den Intensitätsanstieg mit der Zeit bei konstant gehaltener Spannung (Fig. 8, Kurve *a*). Bei Kunststoffen dagegen kann ein anderes Verhalten auftreten. Bei konstant gehaltener Spannung kann die Intensität wieder absinken (Fig. 8, Kurve *b*) [13]. Sehr wesentlich für das Dielektrikum ist die Erholung wenn einmal eine Ionisation aufgetreten ist. Diese tritt auf, wenn entweder die Spannung ganz weggenommen, oder doch unter den Wert der Löschspannung gesenkt wird [30]. Nach einer Pause, die von der Dauer und der Intensität der vorhergegangenen Ionisation abhängt — wobei gewisse Werte allerdings nicht überschritten werden dürfen — kann wieder der erste Wert der Ionisations-Einsatzspannung erreicht werden. Wird zuwenig lange gewartet, so liegt die Einsatzspannung zwischen der erstmaligen Einsatzspannung und der Löschspannung. Erfolgt die Ionisation infolge von Überspannungen, so kann bei Betriebsspannung die Ionisation erhalten bleiben. Dabei sind grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden: Entweder erlischt die Ionisation allmählich, oder sie wird intensiver — der Grenzwert der Betriebsspannung heisst «autoextension-voltage» [30] (auch: Umkehrspannung). Bei mehrfacher Ionisation tritt eine Akkumulierung auf, sie ist aber keine strenge Summierung, da sie sehr von den Ruhepausen und der jeweiligen Intensität abhängt [30].

Die Frequenz einer Spannung hat insofern auf die Ionisations-Einsatzspannung einen Einfluss, als innerhalb des gleichen Zeitraumes eine höhere Periodenzahl, also auch höhere Erwärmung auftritt. Massgebend ist aber eher die Summe der Scheitelwerte, weniger die Frequenz bei Überlagerung zweier Spannungen [31]. Bei mineralölimprägnierten Kondensatoren tritt ausserdem ein Absinken der Ionisations-Einsatzspannung bei längerem Betrieb ein. Bei Betrieb mit etwa 90 % der

«momentanen» Ionisations-Einsatzspannung erfolgt der Ionisationseinsatz nach etwa 10 min.

Bei allen diesen Messungen hat die Grösse der Kapazität des Prüflings einen ausschlaggebenden Einfluss auf das Messergebnis. Über 200 μF ist die Forderung nach genügender Empfindlichkeit selbst der empfindlichsten Messanordnung problematisch [32] — eine Korona kann längst vorhanden sein, sie ist aber nicht feststellbar.

4. Ionisationsmessungen als Kondensatorenprüfung

Aus dem in Abschnitt 3 Gesagten ist ersichtlich, welche Gefahren eine Ionisationsprüfung an Kondensatoren mit sich bringen kann. Eine Kontrolle auf Höhe der Ionisations-Einsatzspannung kann dem Dielektrikum dauernden Schaden zufügen — die Ionisation geht bei Betriebsspannung weiter und führt schliesslich zum Durchschlag. Dies ist besonders bei grossen Kapazitäten der Fall, die die Empfindlichkeit der Messeinrichtung so beeinträchtigen, dass eine höhere Einsatzspannung vorgetäuscht wird, obwohl die Intensität der Ionisation an einzelnen Stellen des Dielektrikums bereits gefährdende Ausmasse angenommen haben kann. Als Typenprüfung (aber nicht zerstörungsfrei!) gibt dagegen die Feststellung der Ionisations-Einsatzspannung wesentliche Aufschlüsse über die Fabrikation, sie kann ausserdem auch an kleineren Prüflingen durchgeführt werden, wodurch die Messung viel empfindlicher wird. Ähnlich ist es mit einer blossen Kontrolle auf Ionisation während der anderen Prüfungen. Damit kann kein Schaden angerichtet, aber zusätzliche Information gewonnen werden. Ist die gemessene Intensität nach der 1-Minuten 50-Hz-Prüfung bei Betriebsspannung grösser als vorher — was heisst, dass sie den Grundstörpegel übersteigt, so ist noch eine Ionisation im Kondensator vorhanden, die allerdings durch gründliches Evakuieren wieder beseitigt werden kann, wenn sie nicht zu intensiv war. Wenn Ionisation bei der 1-Minuten 50-Hz-Prüfspannung auftritt, so wird das meist durch äusseres Sprühen verursacht. Dies ist auch aus der Konstanz der Intensität ersichtlich. Tritt aber keinerlei Ionisation bei der Prüfspannung auf, so sollte man einen künstlichen Ionisator einführen z. B. einen Draht an der Hochspannungsabschirmung, um die Messeinrichtung zu kontrollieren. Ist die Einrichtung in Ordnung, so kann es immer noch sein, dass sie nicht empfindlich genug ist. Nicht gemessene Ionisation bedeutet nicht unbedingt nicht vorhandene! Prüfanordnung und Grösse der Prüflingskapazität bestimmen die Empfindlichkeit der Messung. Sie kann durch Eichimpulse kontrolliert werden, wenn diese die ganze Prüfanordnung einbeziehen, also nicht bloss auf das Messgerät allein wirken. Trotz der Anwendung von Eichimpulsen muss immer überlegt werden, ob tatsächlich ein möglichst grosser Anteil der interessierenden Störgrösse an den Ankopplungsvierpol für das Messgerät gelangt, oder ob sie nicht durch die gewählte Anordnung unterdrückt oder eventuell direkt gegen Erde abgeleitet wird (s. Abschn. 2.2).

Hinsichtlich der Höhe des gemessenen Störpegels gilt, dass sich der Grundstörpegel und die Störpegel der einzelnen Prüfkreis-Bestandteile nicht einfach addieren, man muss vielmehr berücksichtigen, ob das Messgerät Scheitelwerte, Ladungssummen oder Einzelimpulse verzeichnet. Mit den üblichen Zeiger-Messgeräten bedeutet der Anstieg der Störspannung von einem Grundpegel von 5 auf 7 μV das tatsächliche Vorhandensein von 7 μV. Ausserdem gilt im allgemeinen für die Serieschaltung zweier Kondensatoren nicht die Summe der Störspannungen der beiden Kondensatoren, sondern der grössere Wert.

Ionisationsprüfungen sollten an grossen Objekten nur mit Sachkenntnis durchgeführt werden; ein Vertrauensverhältnis zwischen Kunden und Lieferanten erleichtert eine sachliche, vorurteilsfreie Deutung der Messungen.

Literatur

[1] *N. Hyltén-Cavallius* et *J. Fryxell:* Effet de couronne dans les transformateurs de puissance et problèmes d'essai correspondants. CIGRE-Rapport N° 104, 1962.

[2] *Z. Krasucki, H. F. Church* and *C. G. Garton:* A new Explanation of Gas Evolution in Electrically Stressed Oil-Impregnated Paper Insulation. J. electro-chem. Soc. 107(1960)–, S. 598...602.

[3] *D. J. Allan* and *J. Heighes:* Routine Factory Measurement of Internal Discharge. Electr. Rev. 176(1965)24, S. 902...905.

[4] *Z. Krasucki:* Processes Leading to Discharges in Oil-Impregnated Paper. Proc. IEE Part B 109(1962)Suppl. 22 S. 435...439.

[5] *A. E. W. Austen* and *W. Hackett:* Internal Discharges in Dielectrics. J. IEE Part I 91(1944)44, S. 298...322.

[6] *J. H. Mason:* Discharge Detection and Measurements. Proc. IEE 112(1965)7, S. 1407...1423.

[7] *W. Finkelnburg:* Einführung in die Atomphysik. 10. Auflage, Berlin, Springer 1964.

[8] *T. W. Dakin* and *D. Berg:* Luminous Spots on Electrode in Insulation Oil Gaps. Nature 184(1959)4680, S. 120.

[9] *H. Basseches* and *M. W. Barnes:* Gassing of Liquid Dielectrics under Electrical Stress. Industrial Engineering Chemistry 50(1958)6, S. 959...966.

[10] *Yu. S. Pintal:* Ionisationscharakteristiken und Alterung des Papier-Öl-Dielektrikums von Kondensatoren. Elektrotechnika 36(1965)1, S. 58...60.

[11] *J. R. Nye* and *W. R. Wilson:* Physical Concepts of Corona in Capacitors. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 72(1953)—, S. 781...787.

[12a] Erzeugung und Messung von Höchstspannungen. Teil 4: Richtlinien für Messeinrichtungen für Korona-Isolationsprüfungen mit Wechselspannungen bis 500 Hz. VDE-Vorschrift-Entwurf 0433 Teil 4/..63.

[12b] Erzeugung und Messung von Höchstspannungen. Teil 5: Richtlinien für Korona-Prüfungen an Betriebsmitteln mit Wechselspannungen bis 500 Hz. VDE-Vorschrift-Entwurf 0433 Teil 5/..63.

[13] *F. H. Kreuger:* Discharge Detection in High Voltage Equipment. London, Temple Press 1964.

[14] *A. Veverka* und *J. Chládek*: Eine neue Anordnung zur Messung der Leistung bei Ionisationsvorgängen. Bull. SEV 49(1958)2, S. 45...50.

[15] *W. Widmann:* Beitrag zur Bestimmung der Messempfindlichkeit bei Teilentladungsprüfungen von Hochspannungsgeräten. AEG-Mitt. 55(1965)1, S. 28...39.

[16] *E. Baumann:* Messmethode zur Ionisations-Verlustmessung und Messung des zeitlichen Ablaufes von Entladungsimpulsen bei Wechselspannung. ETZ-A 81(1960)4, S. 127...129.

[17] *J. R. Hopkins, T. R. Walters* and *M. E. Scoville:* Development of Corona Measurement and their Relation to the Dielectric Strength of Capacitors. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 70(1951)–, S. 1643...1651.

[18] *T. W. Dakin* and *J. Lim:* Corona Measurements and Interpretation. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 76(1957)12, S. 1059...1065.

[19] *W. Rabus:* Kugelfunkenstrecken-Rauschgenerator. ETZ-A 83(1962)10, S. 328...331.

[20] Methods of Measuring Radio Noise. NEMA Publication No. 107, New York NEMA 1964.

[21] Radio Noise Meter. NEMA Publication No. 102, New York, NEMA 1950.

[22] Tentative Method for Corona Measurement. ASTM-Standard D 1868-61T.

[23a] Vorschriften für Störspannungsmessgeräte. VDE-Vorschrift 0876.

[23b] Leitsätze für das Messen von Funkstörungen. VDE-Vorschrift 0877.

[24] *A. Liechti:* Contribution à l'étude des diélectriques au papier imprégné de faible épaisseur. CIGRE-Rapport N° 123, 1946.

[25] *A. Liechti:* Etude des diélcetriques au papier imprégné à l'huile, utilisés dans la construction des condensateurs statiques pour fréquences industrielles. CIGRE-Rapport N° 112, 1948.

[26] *W. Held* und *R.-C. Kunze:* Glimmentladungen und Lebensdauer von Starkstromkondensatoren. ETZ-A 82(1961)11, S. 333...335.

[27] *W. Held und R.-C. Kunze:* Glimmentladungen im Kondensatordielektrikum. VDE-Fachberichte 20(1958)– S. 28...37.

[28] *J. H. Mason:* Oil Impregnated Paper Capacitors. Electrical Research Association, Leatherhead, Surrey, ERA Rapport LT 373, 1958.

[29] *G. M. Soulages:* Evolution dans la technique des condensateurs. Bull. Soc. Franç. Electr. 7/IX(1959)97, S. 449...460.

[30] *D. Zanobetti* et. al: L'ionisation dans les condensateurs industriels. CIGRE-Rapport N° 141, 1958.

[31] *J. H. Mason:* Discharges in Dielectrics at High Voltage. Electrical Research Association, Leatherhead, Surrey, ERA Rapport L/T 271, 1952.

[32] *Z. Krasucki, H. F. Church* et *C. G. Garton:* Facteurs déterminant la durée de vie utile de condensateurs de puissance. CIGRE-Rapport 138, 1962.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. *Thomas Praehauser,* Emil Haefely & Cie. AG, Postfach, 4000 Basel 28.