Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 19

Artikel: Teilentladungsmessungen an Hochspannungsapparaten mit der Brückenschaltung

Autor: Praehauser, Th.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915600

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 21.01.2026

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

Teilentladungsmessungen an Hochspannungsapparaten mit der Brückenschaltung [1])

Von *Th. Praehauser*

537.52.08:621.3.027.3:621.372.542.22

Der Aufbau des Teilentladungs-Messkreises als Brückenschaltung geschah ursprünglich mit der Absicht, den Einfluss äusserer Störungen auf die eigentliche Teilentladungsmessung am Prüfobjekt abzuschwächen, wenn möglich auszuschalten. Die Brückenschaltung ist aber ausserdem ein Hilfsmittel zur Lokalisierung von Teilentladungen, indem man neben den Impulsgrössen auch die Impulsrichtungen der Teilentladungen in den Brükkenzweigen bestimmt.

La constitution du circuit de mesure des décharges partielles sous forme de montage en pont était destinée à réduire ou, si possible, à supprimer l'influence de perturbations extérieures sur la mesure à objet en essai. Le montage en pont peut toutefois servir également à localiser des décharges partielles, en déterminant dans les branches du pont non seulement les grandeurs des impulsions des décharges partielles, mais aussi leur sens.

1. Beschädigungsfreie Prüfung

Das Grundproblem in der Kontrolle der Qualität elektrischer Isolation von Hochspannungsapparaten ist Prüfen, ohne die Isolation zu beschädigen. Die Prüfungen sollen die Beanspruchungen im Betrieb vorwegnehmen und Schwachstellen aufdecken. Die bestandene Prüfung bietet Gewähr für einwandfreien, d. h. schadens- und ausfallfreien Betrieb. Es ist die Kunst rationeller Konstruktion und Fabrikation, den Aufwand gerade so weit zu treiben, dass die Betriebssicherheit gegeben ist. Dabei müssen sich der Konstrukteur und der Prüfer immer wieder fragen – genauso wie der Abnehmer es tut: Wie kann man eine durch die Prüfung verursachte, wenn auch geringfügige Beschädigung der Isolation aufdecken – und welches Ausmass einer Veränderung der Isolation, vorübergehend oder dauernd, darf noch zugelassen werden? Ein solches Mittel der Kontrolle, ohne selbst wieder Schaden zu verursachen, ist die Teilentladungsprüfung [1][2]).

2. Die Teilentladungsmessung (TE)

Elektrische Entladungen in der Hochspannungsisolation sind Spannungszusammenbrüche von Teilbereichen, die am Prüfling als Ganzem als Änderung in Spannung, Ladungsmenge und Ladeenergie in Erscheinung treten. Als Messgrösse steht nach den Empfehlungen der CEI [2] die scheinbare Ladungsmenge in pC (das ist die am Prüfling als Ganzem auftretende Ladungsänderung) im Vordergrund.

Um die Qualität verschiedener Apparate miteinander vergleichen zu können, müssen die Messgeräte im jeweiligen Prüfkreis geeicht werden. Es genügt nicht, die durch das Messgerät angezeigten Werte zur Kenntnis zu nehmen, vielmehr muss das Übertragungsverhalten des jeweiligen Messkreises bestimmt werden. Dies geschieht durch Anbringen eines Eichimpulses am Prüfling und entsprechende Einstellung des Messgerätes. Ist das Messgerät fest eingestellt, muss der Übertragungsfaktor berechnet werden. Empfehlungen für die Eichung der Messkreise und für Eichgeneratoren finden sich im Appendix III des Progress report 21.01 CIGRE 1968 (Kabel) [3].

Wenn auch bei jeder Messung vorausgesetzt wird, dass sowohl Speisung – also Spannungsregelung und Prüftransformator – als auch der Messkreis selbst, insbesondere der Kopplungskondensator, frei von TE sind, so müssen auftretende TE doch auf ihre Herkunft kontrolliert werden. Neben den spannungsunabhängigen Störungen aus der Umgebung, wie aus dem Netz, durch rotierende Maschinen, Kräne, Leuchtstoffröhren, andere Prüfvorgänge oder den Rundfunk, schleichen sich immer wieder spannungsabhängige Störer aus der Umgebung ein, wie metallische Gegenstände auf freiem Potential, nicht abgeschirmte Metallspitzen oder kleine Metallteilchen. Die spannungsunabhängigen Störungen lassen sich einwandfrei nur durch eine abgeschirmte Prüfhalle mit gefilterten Eingangsleitungen fernhalten; häufig verursachen einzelne wenige, aber starke Entladungen, deren Phasenlage in der Sinuslinie ziemlich unverändert bleibt, eine hohe Instrumentenanzeige und damit einen hohen Grundstörpegel, obwohl der Rest der Sinuslinie einen verhältnismässig kleinen Störpegel aufweist. Das Oszillogramm gibt demgegenüber ein klareres Bild des Störpegels. Durch die Photographie eine TE-Oszillogramms können solche erwähnten Einzelentladungen jederzeit als spannungsunabhängig nachgewiesen werden. Über die ganze Wechselspannungsperiode verteilte Störungen können in ihrem Einfluss auf die TE-Messung am Prüfling durch die Brükkenschaltung verringert werden. Dies war die Absicht, als die Brückenschaltung eingeführt wurde. Neben der Verringerung von spannungsunabhängigen Störungen kann die Brückenschaltung aber zur Lokalisation von TE verwendet werden. Über andere allgemeine und spezielle Messmethoden für verschiedene Apparategruppen gibt [4] einen Überblick.

Erscheinungsbilder verschiedener TE im Kathodenstrahloszillogramm wurden durch die Arbeitsgruppe der CIGRE 21.03 «Discharges» unter Dr. *Kreuger* [5] zusammengestellt. Nach Phasenlage und Intensität in der Sinuswelle und in Abhängigkeit von Zeit und Spannungshöhe werden folgende Ursprungsorte unterschieden: verschiedene Formen von Isolationsschäden in einer Isolationsschicht, Metallelektroden und deren Rand angrenzend an verschiedene Isolationsschichten, Metallteile auf freiem Potential, Kontaktfehler; ausserdem werden spannungsunabhängige Störungen und vorgetäuschte TE angegeben.

3. Die Brückenschaltung

3.1 Die Brückenschaltung zur Verringerung von Störungen

Zur Serieschaltung von Prüfling und Ankopplungsvierpol für das Messgerät schaltet man ein Objekt ungefähr gleicher Kapazität mit seriegeschaltetem Vierpol parallel und schliesst das Messgerät zwischen den beiden Vierpolen A_1 und A_2 an (Fig. 1a). Stimmt man die beiden Vierpole so ab, dass die

[1]) Beitrag zum «Symposium Elektrische Isolationstechnik» des SEV am 16./17. November 1972.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Spannungsabfälle der Störungen, die von ausserhalb des Prüfkreises kommen, an den beiden Vierpolen ungefähr gleich sind, so sind diese Störungen für das Messgerät M neutralisiert [6]. Fig. 1 zeigt dies am Beispiel einer Entladung von der Hochspannungselektrode gegen Erde während der negativen Halbwelle. Von den Hochspannungselektroden der Kapazitäten werden negative Ladungen abgezogen, wodurch zwangsläufig die gleich grossen positiven Ladungsmessungen von den niederspannungsseitigen Elektroden durch die Ankopplungsvierpole A_1 und A_2 gegen Erde fliessen. Sind A_1 und A_2 entsprechend den Kapazitäten abgestimmt, so werden die Spannungsabfälle der TE-Ströme ungefähr gleich sein, das dazwischen-

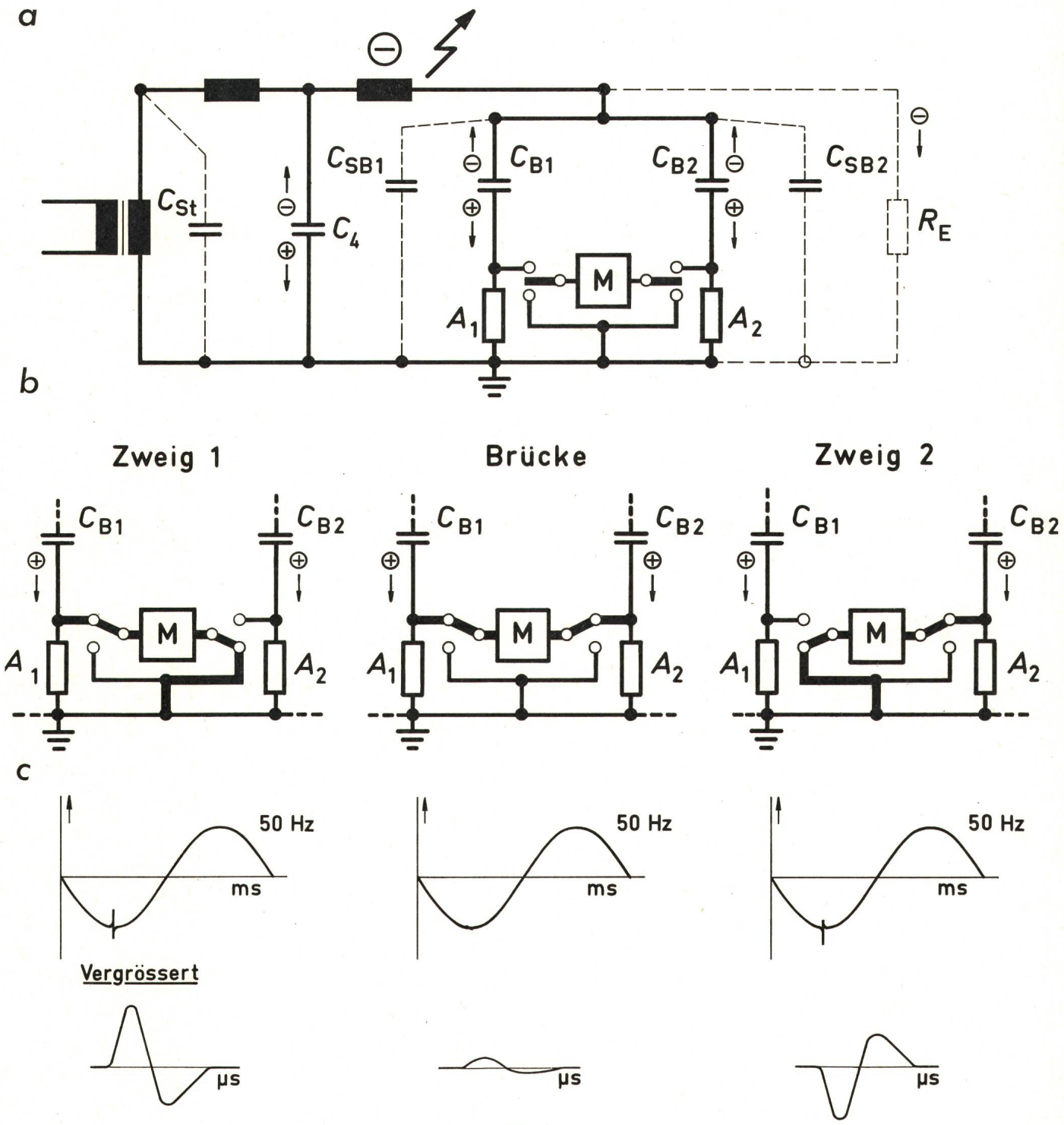

Fig. 1
TE-Messung mittels Brückenschaltung: TE gegen Erde

a Prinzipschema der Brückenschaltung. Verhältnisse bei äusseren TE von Hochspannung gegen Erde (negative Halbwelle)

C_{B1}, C_{B2} Kapazitäten der Prüfobjekte in Zweig 1 bzw. 2

C_4 Kopplungskondensator

C_{St}, C_{SB1}, C_{SB2} Streukapazitäten

R_E Ersatzwiderstand für TE gegen Erde

M Messgerät

A_1, A_2 Ankopplungsvierpol in Zweig 1 bzw. Zweig 2

⊕ ⊖ Bewegungsrichtung von positiven oder negativen Ladungen

b, c Je nachdem das Messgerät M in Zweig 1, in die Brücke oder in Zweig 2 geschaltet ist, erscheint der Entladungsimpuls im Oszillogramm nach aufwärts, stark vermindert oder nach abwärts (α-Gerät, s. auch Fig. 8)

geschaltete Messgerät registriert nur die Differenz. Die TE-Ströme durch die Vierpole werden ausserdem durch die Grösse von C_4 beeinflusst: Je grösser C_4 im Verhältnis zu den Kapazitäten der Objekte, ein desto grösserer Anteil des TE-Stromes fliesst durch C_4. Schaltet man das Messgerät jeweils einseitig gegen Erde, so kann man die TE-Intensität jedes Zweiges einzeln messen (Fig. 1b und c). Hier ist angenommen, dass eine positive Spannung an A_1 auch durch das Messgerät positiv wiedergegeben wird, eine positive an A_2 folglich negativ. Mit einer gut abgestimmten Brückenschaltung bei etwa gleich grossen Kapazitäten in den beiden Zweigen sind Dämpfungen bis 1 : 1000 erreichbar. Dies hat allerdings zur Voraussetzung, dass die beiden Messobjekte sehr nahe beieinanderstehen, so dass die Antennenwirkung der Brückenanordnung auf ein Minimum reduziert ist. Registriert das Messinstrument z. B. Frequenzen über 150 kHz noch gut, so kann bereits ein Abstand von 10 m zwischen den beiden Objekten die Brückenschaltung in ihrer Wirkung aufheben, also nutzlos machen. Im allgemeinen ist eine Dämpfung von 1 : 20 ausreichend. Neben der Abschirmung von äusseren Störungen kann aber die Brükkenschaltung als Hilfsmittel zur Lokalisierung von TE herangezogen werden.

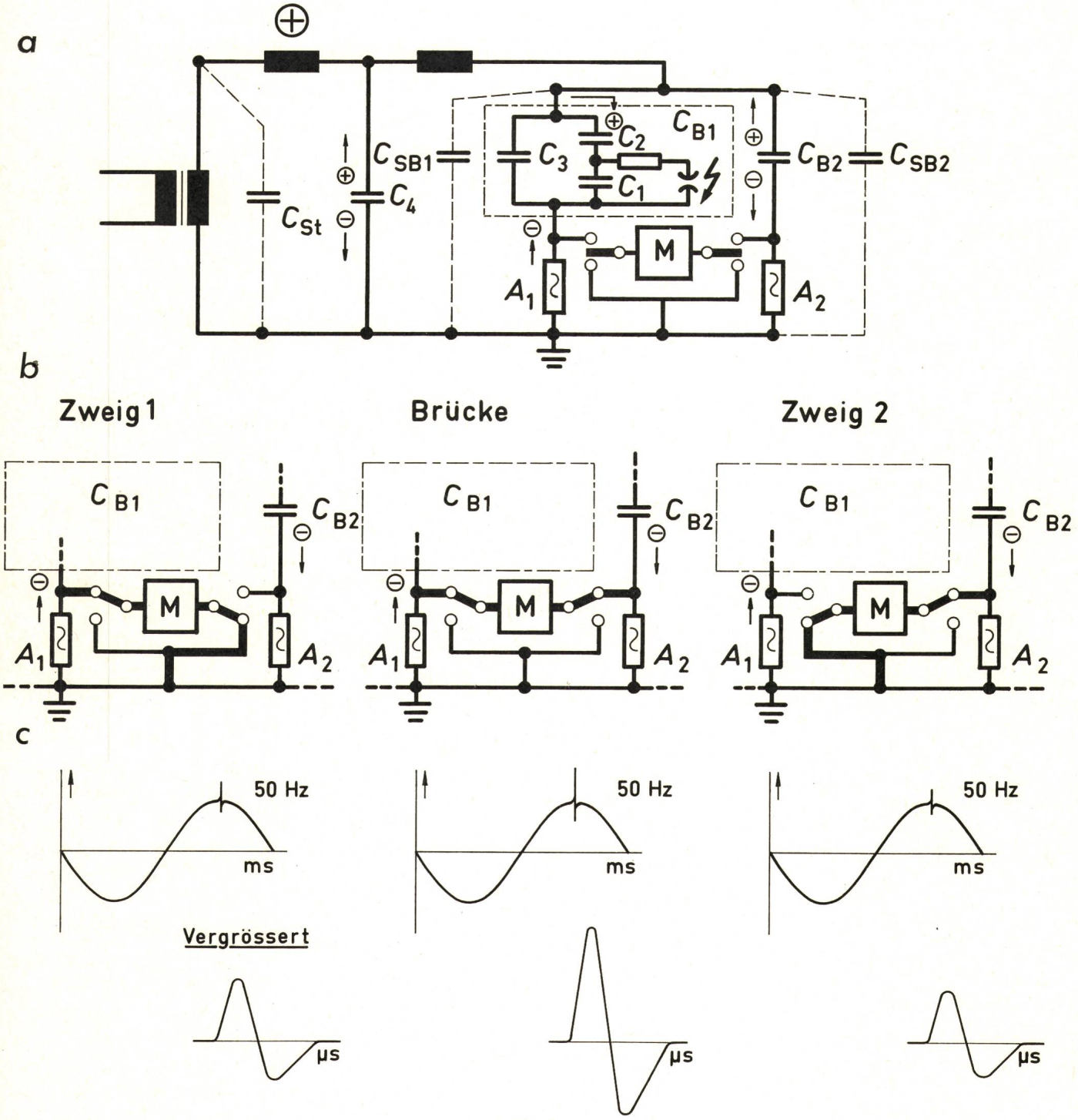

Fig. 2
TE-Messungen mit der Brückenschaltung: TE im Prüfobjekt Zweig 1

a Prinzipschema der Brückenschaltung: Verhältnisse bei inneren Entladungen im Prüfobjekt in Zweig 1 (positive Halbwelle), Bezeichnungen siehe Fig. 1

b, c Je nachdem das Messgerät in Zweig 1, in die Brücke oder in Zweig 2 geschaltet ist, erscheint der Entladungsimpuls im Oszillogramm grösser oder kleiner, aber immer nach oben gerichtet (α-Gerät, siehe auch Fig. 8)

3.2 Brückenschaltung mit Kathodenstrahloszillograph als Hilfsmittel zur Lokalisierung von TE

Die TE-Ströme verursachen je nach Richtung positive oder negative Spannungsabfälle in den Vierpolen A_1 und A_2. Der Ursprungsort der TE im Messkreis oder der Umgebung bestimmt die Richtung der TE-Ströme in den Ankopplungsvierpolen. Mittels eines echten Zweistrahloszillographen mit Lupe (also zwei voneinander unabhängig einstellbaren Zeitablenkungen) kann jeder beliebige Teil der Wechselspannungsperiode herausvergrössert werden. Für Entladungen von der Hochspannungselektrode gegen Erde in der negativen Halbwelle zeigt Fig. 1a den Stromverlauf in den beiden Vierpolen; er ist in beiden gleichgerichtet. Da das Messgerät für den Zweig 2 gegengeschaltet ist, sind die beiden Impulse im Oszillogramm entgegengesetzt gerichtet (Fig. 1b und c). Tritt die TE dagegen in einem der beiden Objekte auf, z. B. in Zweig 1 (Fig. 2), so sind die TE-Ströme durch die beiden Ankopplungsvierpole entgegengesetzt und daher im Oszillogramm gleichgerichtet. Bei einer Entladung von C_1 des aus den Kapazitäten C_1, C_2 und C_3 bestehenden Objektes C_{B1} sinkt die Spannung an den Elektroden von C_{B1} etwas ab. Ladungen fliessen von C_{B2}, C_4 und den Streukapazitäten nach. Wäre C_{B1} nicht mit den Hochspannungselektroden der anderen Kapazitäten verbunden, würde die Spannung im Augenblick des Teildurchschlages stärker absinken, es flösse aber durch den Vierpol A_1 fast kein TE-Strom, nämlich nur derjenige der Streukapazität infolge der Spannungsverminderung von C_{B1}: Die Ladungen von C_1 neutralisieren sich ja gegenseitig, C_3 verliert Ladung an C_2. Erst durch den Nachladevorgang von C_{B2}, C_4 usw. auf C_{B1} fliesst auch durch die Vierpole TE-Strom.

Die Fig. 3 bis 5 geben eine gegenüber den Fig. 1 und 2 vereinfachte Darstellung verschiedener Entladungsvorgänge. Des einfacheren Vergleichs wegen ist angenommen, dass in allen Fällen die TE in der negativen Halbwelle auftreten. Für die Vierpole ist der TE-Strom durch den Verlauf der positiven Ladungen angegeben. Die Oszillogramme sind weggelassen; ist in A_1 der TE-Strom gegen Erde gerichtet, so liegt der Impuls im Oszillogramm in der Richtung der positiven Spannung, für

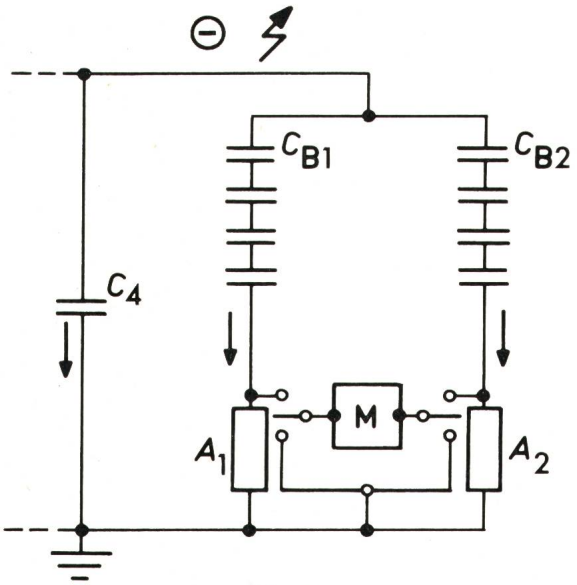

Fig. 3
Stromverlauf bei TE gegen Erde (negative Halbwelle)
↯ TE, ↓ Stromrichtung
Bezeichnungen siehe Fig. 1

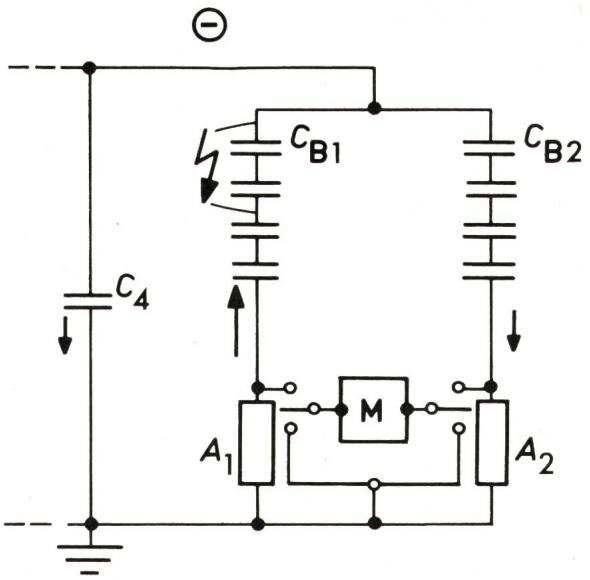

Fig. 4
Stromverlauf bei TE in Prüfobjekt Zweig 1 (negative Halbwelle)
Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 3

A_2 entgegengesetzt. Fig. 3 ist die vereinfachte Darstellung von Fig. 1, nämlich der TE von der Hochspannungselektrode. Fig. 4 gibt in Vereinfachung von Fig. 2 den TE-Strom für TE in Zweig 1, Fig. 5 für TE in Zweig 2. Aus den Fig. 3 bis 5 geht eindeutig hervor – wie sich durch Messungen auch leicht bestätigen lässt –, dass Entladungen von der Hochspannungselektrode gegen Erde in beiden Vierpolen und auch in C_4 durchwegs TE-Ströme gleicher Richtung haben, wogegen TE im Prüfobjekt eines Brückenzweiges in den beiden Ankopplungsvierpolen TE-Ströme entgegengesetzter Richtung verursachen.

Es stellt sich nun die Frage, ob es noch andere Ursprungsmöglichkeiten für TE gibt, welche die obenerwähnten vortäuschen könnten, wenn man allein auf die Impulsrichtungen achtet. Es sind dies die beiden folgenden Fälle:

Die gleichen Impulsrichtungen wie TE von Hochspannungselektrode gegen Erde zeigen auch TE aus einem der beiden Objekte der Brücke gegen Erde (also z. B. von einer Mittelabschirmung aus) (Fig. 6). Dieser Fall kann wichtig sein, wenn es um die Eignung einer Kopfelektrode geht; dann nämlich, wenn durch ein zu nahe an einer Mittelabschirmung stehendes geerdetes Objekt TE von dieser Mittelabschirmung verursacht und so TE von der Kopfelektrode vorgetäuscht werden – falls man nur die Impulsrichtung beachtet.

Die gleichen Impulsrichtungen wie bei TE in einem Objekt der beiden Brückenzweige ergeben sich, wenn zwischen den beiden Objekten TE auftreten (Fig. 7). Dieser Fall kann vorkommen, wenn ein Spannungsteiler zu nahe an einem Prüftransformator steht, so dass zwischen Mittelelektroden TE auftreten. Bei isolierter Betrachtung der Impulsrichtungen könnte man irrtümlich auf innere TE z. B. im Teiler schliessen.

Ausser auf die Impulsrichtungen muss deshalb noch auf die Grössenverhältnisse der Impulse geachtet werden, so wie dies bei anderen Prüfmethoden auch durchgeführt wird [7].

Das Übertragungsverhalten verschiedener TE-Strecken wird durch Eichimpulse konstanter Grösse bestimmt, wobei für Zweig 1 und 2 naturgemäss verschiedene Übertragungsfaktoren gelten (Übertragungsfaktor = tatsächlicher TE-Wert : angezeigten TE-Wert). Will man zusätzlich die korrekte,

d. h. die den unter Spannung herrschenden Verhältnissen entsprechende Impulsrichtung feststellen, verwendet man eine Eichfunkenstrecke, die konstante Spitzenentladungen hervorbringt, wenn man sie nicht zu sehr oberhalb ihrer Einsatzspannung betreibt [8].

Schliesst man ausserdem die Ankopplungsvierpole noch an anderen Meßstellen an, kann man durch den Vergleich der angezeigten Impulse mit den entsprechenden Messungen der Eichimpulse den mutmasslichen Ursprung der TE leichter finden. Es empfiehlt sich, eine Tabelle mit den Übertragungsfaktoren der verschiedenen TE-Strecken je Meßstelle samt Impulsrichtung aufzustellen (immer auf die gleiche Polarität bezogen). Durch Multiplikation der Messergebnisse an den verschiedenen Meßstellen mit den zugehörigen Übertragungsfaktoren für die verschiedenen TE-Strecken ergibt sich für jede TE-Strecke eine Gruppe von Werten, die von den verschiedenen Meßstellen herrühren. Für eine bestimmte TE-Strecke werden dann die für die verschiedenen Meßstellen umgerechneten Werte am nächsten beieinanderliegen. Der Ort der tatsächlichen TE wird in der Nähe dieser TE-Strecke liegen. Die Untersuchung der Impulsrichtung sollte zum gleichen Ergebnis führen. Die beiden Methoden kontrollieren und ergänzen sich gegenseitig.

Nun kann folgende Schwierigkeit auftreten: Solange man die Brückenschaltung benutzt, kann man die TE gut beobachten, weil die äusseren Störungen grösstenteils kompensiert sind. Will man nun ihre Veränderung durch Abschalten des 1. bzw. 2. Brückenzweiges feststellen, tritt plötzlich wieder der hohe Störpegel auf! Sind die TE, die näher untersucht werden sollen, äussere TE, so werden auch sie grösser werden. Bei inneren Entladungen hingegen tritt eher eine Verkleinerung auf, wenn einer der beiden Brückenzweige abgeschaltet wird (Fig. 2), so dass sie im nun erhöhten Grundpegel verschwinden können. In diesem Falle kann eventuell die Lupe des echten Zweistrahloszillographen sehr wertvoll sein: Mit ihr kann man die Entladungen aus jeder Phasenlage in der Wechselstromperiode beliebig herausvergrössern und vom Grundpegel unterscheiden, ihre Richtung feststellen und sie mit der des erwähnten Eichimpulses vergleichen.

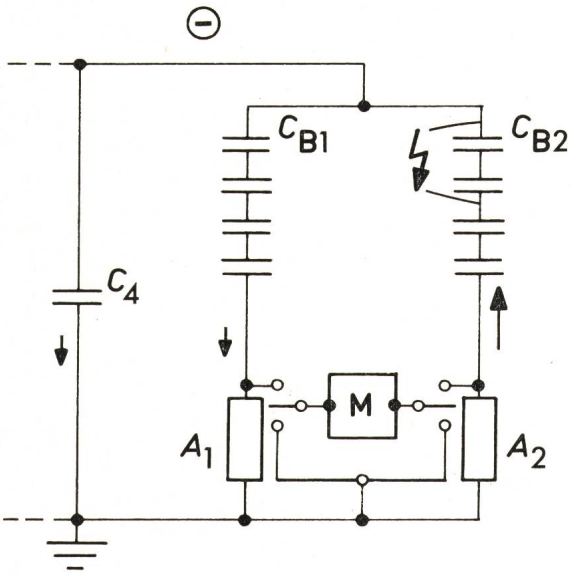

Fig. 5
Stromverlauf bei TE in Prüfobjekt Zweig 2 (negative Halbwelle)
Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 3

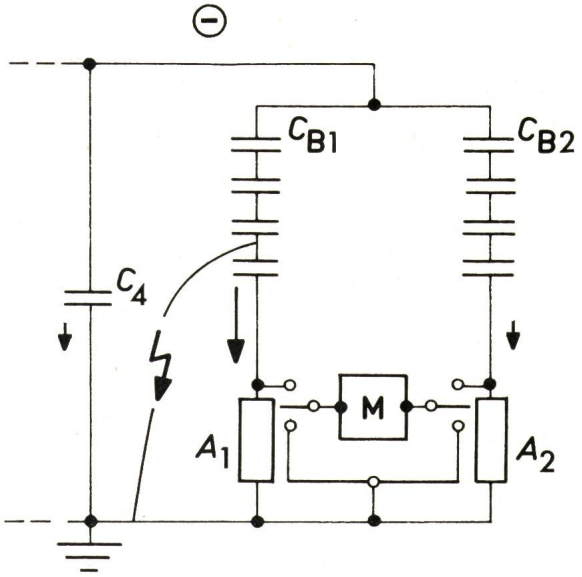

Fig. 6
Stromverlauf bei TE aus Prüfobjekt 1 gegen Erde (z. B. ab Mittelabschirmung; negative Halbwelle)
Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 3

3.3 Die Eichung

3.3.1 Bestimmung der Übertragungsfaktoren

Da die verschiedenen möglichen TE-Strecken im Messkreis verschiedene Übertragungsfaktoren haben, ist es am einfachsten, für die TE über das Messobjekt – nicht gegen Erde! – den Faktor 1 zu wählen, d. h. am Kathodenstrahloszillographen die Amplitude in mm gleich dem Eichimpuls in pC einzustellen. Dabei soll das Messgerät nur an den Ankopplungsvierpol A_1 des Messobjektes angeschlossen sein. Würde man in Brükkenschaltung eichen – also in der Differenz der beiden Ankopplungsvierpole –, so würde man zwei Übertragungsfaktoren kombinieren, wodurch die Auswertung erschwert würde. Anschliessend werden die Übertragungsfaktoren der wichtig erscheinenden TE-Strecken für die beiden Ankopplungsvierpole bestimmt. Zusätzlich kann es in bestimmten Fällen günstig sein, den zweiten Ankopplungsvierpol noch an anderen Meßstellen, z. B. in Serie zum Kopplungskondensator (C_4 in Fig. 1 bis 2), einzuschleifen und die verschiedenen Übertragungsfaktoren zu bestimmen.

3.3.2 Bestimmung von Phasenlage und Impulsrichtungsübertragung

Für die Diagnose mittels Oszillogrammen ist die Bestimmung der Phasenlage der TE unbedingte Voraussetzung. Mittels einer Eichfunkenstrecke [8] wird die negative Amplitude der Sinuslinie bestimmt, indem die Spitze der Eichfunkenstrecke an Hochspannung gelegt wird: Die TE-Impulse treten dann im Maximum der negativen Amplitude auf. Die Wiedergabe dieser Impulse wird weiterhin dazu benutzt, um die Wiedergabeform des TE-Impulses durch den Messkreis zu bestimmen. Das ist wichtig, insofern, als es zweierlei Arten von Breitbandgeräten zur TE-Messung in pC gibt. Beide Gerätearten geben den Impuls in Form einer Schwingung wieder, aber bei dem einen Gerät (α-Gerät) ist die erste Amplitude die grösste, beim anderen (β-Gerät) ist erst die zweite Amplitude die grösste (Fig. 8) [9]; die erste könnte übersehen werden und falsche Deutung verursachen. Es empfiehlt sich aber beim α-Gerät eine Kontrolle in der jeweiligen Messanordnung, da bei

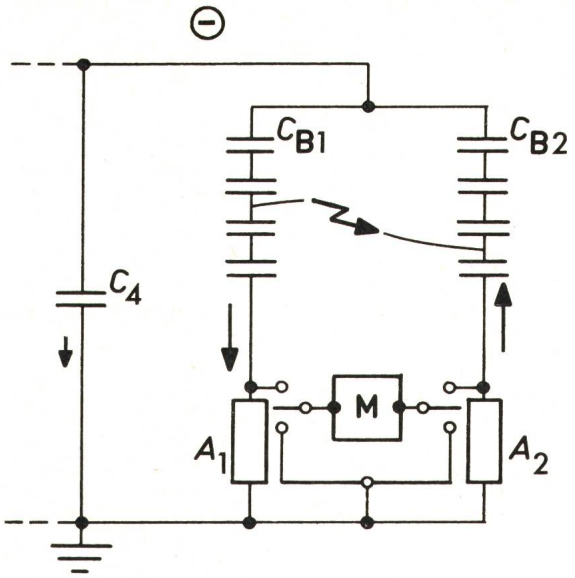

Fig. 7
Stromverlauf bei TE zwischen den Prüfobjekten in den Zweigen 1 und 2 (negative Halbwelle)
Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 3

einigen Fällen auch mit diesem Gerät ein β-Impuls auftreten kann. Diese letzte Messung muss ausserdem dazu benutzt werden, um festzustellen, ob Zweig 1 oder Zweig 2 die Impulsrichtung richtig wiedergibt: Der Impuls der Eichfunkenstrecke im Maximum der negativen Wechselspannungshalbwelle muss zur Null-Linie hin gerichtet sein, einfacher ausgedrückt: Die TE ist ein Spannungseinbruch, also eine Verminderung der Spannung.

3.4 Quantitative Abschätzung der Ladungsverschiebungen in den Ankopplungsvierpolen

Fast alle TE-Vorgänge sind mit Spannungseinbrüchen verbunden; eine Ausnahme bildet z. B. der Spannungsverlauf am untern Kondensatorteil des Zweiges 2 bei dem in Fig. 7 dargestellten Sprühvorgang zwischen zwei Prüfobjekten. Denn dieser untere Teil des Kondensators wird während des Sprühvorganges aufgeladen.

Die Ladungsverschiebungen mittels des Satzes von der Erhaltung der Energie zu berechnen ist bei Entladevorgängen dieser Art nicht empfehlenswert. Selbstverständlich gilt der Satz; aber er gilt für die Gesamtenergie des Systems, nicht für die Ladeenergie. Die Differenz zwischen den Ladeenergien vor und nach der TE geht in den verschiedenen Widerständen «verloren». Diese Widerstände sind aber schwer zu erfassen. Der einfachere Berechnungsweg geht über die Erhaltung der Ladungsmengen [10].

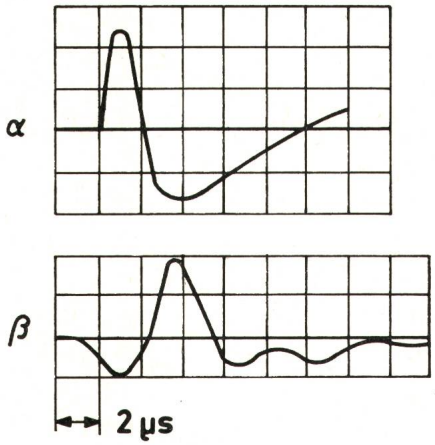

Fig. 8
Response von Messegräten [9] α- und β-Gerät

Für den in Fig. 7 dargestellten Fall sei der Spannungsabfall der 3 Kapazitäten C_{B1}, C_{B2} und C_4 nach einem Entladungsvorgang $= \Delta U$. Es wird angenommen, dass die Nachladung durch den Transformator gegenüber dem schnellen Ausgleichsvorgang zwischen den drei Kapazitäten vernachlässigt werden kann. Weiters seien die 50-Hz-Änderungen als sehr langsam gegenüber den TE-Vorgängen vernachlässigt, so als befänden sich die Kapazitäten auf negativer Gleichspannung. C_{B1} bestehe aus n seriegeschalteten gleich grossen Kapazitäten $n\,C_{B1}$, wobei der Sprühvorgang von x seriegeschalteten solchen Teilkapazitäten gegen y seriegeschaltete Teilkapazitäten der insgesamt m seriegeschalteten Teilkapazitäten von C_{B2} erfolgt. Die von C_{B1} gegen C_{B2} sprühende Ladungsmenge sei ΔQ, es gelte die vereinfachende Annahme, dass keine Ladung direkt gegen Erde sprüht. Im folgenden seien die einzelnen Vorgänge vorerst isoliert für sich betrachtet.

Wären C_{B1} und C_{B2} hochspannungsseitig nicht mit den anderen Kapazitäten verbunden, so träte beim Absprühen der Ladungsmenge ΔQ die Spannungsverminderung ΔU_1 am Kapazitätsteil $C_{B1}\,n/x$ und bei Vernachlässigung der Streukapazität auch an C_{B1} auf, die entsprechende Spannungserhöhung ΔU_2 an $C_{B2}\,m/y$ und auch an C_{B2}:

$$\Delta U_1 = \frac{\Delta Q}{C_{B1}\,n/x} \tag{1}$$

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta Q}{C_{B2}\,m/y} \tag{2}$$

Würden nach der TE nun die beiden Kapazitäten mit der Summe der Streukapazitäten und C_4, nämlich C – mit der ursprünglichen negativen Gleichspannung –, verbunden, so ergäbe sich insgesamt ein Spannungsabfall ΔU, wobei die Summe der Ladungsänderungen gleich Null sein muss:

$$\Delta U\,C + (\Delta U_2 + \Delta U)\,C_{B2} - (\Delta U_1 - \Delta U)\,C_{B1} = 0 \tag{3}$$

Daraus ergibt sich:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q\,(x/n - y/m)}{C_{B1} + C_{B2} + C} \tag{4}$$

Es fliessen folgende Ladungsmengen über die Vierpole bzw. über Erde:

von C_{B1}: $\quad \Delta Q - C_{B1}\,(\Delta U_1 - \Delta U)$ (5)

von C_{B2}: $\quad C_{B2}\,(\Delta U + \Delta U_2) - \Delta Q$ (6)

von C: $\quad C_3 \cdot \Delta U$ (7)

Setzt man die Werte aus den Formeln (1) bis (4) ein, so ergibt die Summe Null. Sprüht C_{B1} gegen Erde, nicht gegen C_{B2}, so bleiben die Formeln (5) und (7) gleich, für die Ladungsmenge ab C_{B2} gilt:

$$C_{B2} \cdot \Delta U \tag{8}$$

wobei

$$\Delta U = \frac{\Delta Q\,x/n}{C_{B1} + C_{B2} + C} \tag{9}$$

Für den Sonderfall, dass C_{B1} gegen den Erdflansch von C_{B2} sprüht, fliesst durch A_2 die Ladungsmenge

$$C_{B2} \cdot \Delta U - \Delta Q \tag{10}$$

Wenn C_{B1} gegen C_{B2} sprüht, wird meist ein Teil der Ladungsmenge ΔQ direkt gegen Erde fliessen. ΔU liegt dann zwi-

schen den Werten von (4) und (9). (Für die Fig. 3 bis 7 sind die Kapazitäten C_{B1}, C_{B2} und C als ungefähr gleich gross angenommen.)

4. Anwendungen

Bei Durchführungen lassen sich TE im Dilektrikum von solchen der kapazitiven Einlagen gegen Erde meist aufgrund des Erscheinungsbildes unterscheiden. Eine Bestätigung gibt dann Impulsrichtungs- und -grössenvergleich gemäss den Fig. 4 und 6.

Auch bei Kondensatoren gibt das Erscheinungsbild des Oszillogramms oft schon den eindeutigen Beweis, dass es sich um TE zwischen den Kondensatorbelägen handelt. Sehr einfach lassen sich TE gegen Kessel von TE Belag–Belag unterscheiden, indem man einmal den Kessel an Erde, das Dielektrikum niederspannungsseitig an den Vierpol, das andere Mal den Kessel zusammen mit dem Dielektrikum an den Vierpol schaltet. Die Impulsrichtungen sind dann einmal entsprechend Fig. 3 bzw. 6 und das andere Mal gemäss Fig. 4, oder in beiden Fällen gemäss Fig. 4.

Die in [9] (bzw. in [4] verkürzt) angegebenen Methoden für Kabel erfahren eine Vereinfachung insofern, als Vergleichsmessungen an den beiden Kabelenden durch Ein- und Abschalten der beiden an die Enden angeschlossenen Vierpole rascher, weil praktisch gleichzeitig, durchgeführt werden können. Für die Unterscheidung zwischen äusseren und inneren Entladungen gilt das oben Gesagte.

Die durch die Arbeitsgruppe «TE-Messung» des Studienkomitees 12 der CIGRE herausgegebenen Anleitungen [7] für Transformatoren können durch die Impulsrichtungsmethode unterstützt werden.

Bei Transformatoren, Messgruppen und schliesslich bei Prüfanordnungen ganz allgemein kann der Ursprungsbereich der TE eingeengt werden, indem man die Teile, zwischen denen TE auftreten können, einmal gemeinsam an einen Vierpol anschliesst, das andere Mal getrennt an die beiden Vierpole oder einseitig an Erde. Die Impulsrichtungen und Impulsgrössenverhältnisse werden sich nach den Fig. 3 bis 7 einordnen lassen. Bei allen Schaltungen eines grossen Kessels an den Vierpol kann allerdings der Grundstörpegel so gross werden, dass diese Messung nur in einer abgeschirmten Halle möglich ist.

5. Schlussbemerkungen

Die Impulsrichtungsmethode mit Impulsgrössenvergleich kann natürlich die Diagnosensammlung [5] sowie die allgemeinen und speziellen Messmethoden für einzelne Apparatearten nicht ersetzen. Aber die Impulsrichtungsmethode mit Impulsgrössenvergleich kann die Diagnose sehr beschleunigen. Vor allem für die Feststellung, ob die TE tatsächlich aus dem Prüfling kommen.

Literatur

[1] *T. Praehauser:* Ionisationsmessungen (Teilentladungsmessung) an Hochspannungsapparataen – eine Stückprüfung. E und M 86(1969)5, S. 193 ...201.

[2] Mesure des décharges partielles. Publication de la CEI No. 270, 1970.

[3] *F. H. Kreuger:* Dispositions recommandées pour l'étalonnage et le contrôle des circuits de détection des décharges. Rapport CIGRE No. 21-01 Annexe III, 1968.

[4] *T. Praehauser:* Lokalisierung von Teilentladungen in Hochspannungsapparaten. Schwierigkeiten und Aufwand. Bull. SEV63(1972)16, S. 893...905.

[5] *F. H. Kreuger:* Signification de la détection des décharges. Electra -(1969)11, p. 53...98.

[6] *F. H. Kreuger:* Discharge detection in high voltage equipment. London, Temple Press, 1964.

[7] Mesures de décharges partielles dans les transformateurs. Electra -(1971)19, p. 13...65.

[8] *F. H. Kreuger:* The point discharge gap. Source of constant partial discharges. Elektrotechniek 41(1963)16, p. 364...366.

[9] *G. Mole* and *F. H. Kreugen:* Mesure des décharges sur des câbles de grande longueur. Electra -(1969)8, p. 53...82.

[10] *T. Praehauser:* Messungen von Ionisation an Kondensatoren. Bull. SEV 57(1966)16, S. 701...708 + 58(1967)2, S. 74.

Adresse des Autors:
Dr. *Thomas Praehauser,* Abteilungsleiter für Prüffeld und für Kondensatoren der E. Haefely & Cie. AG, 4028 Basel.