

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 63 (1972)
Heft: 16

Artikel: Lokalisierung von Teilentladungen in Hochspannungsapparaten : Schwierigkeiten und Aufwand
Autor: Praehauser, Th.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915719>

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: 22.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Lokalisierung von Teilentladungen in Hochspannungsapparaten

Schwierigkeiten und Aufwand ¹⁾

Von Th. Praehauser

1. Teilentladungen (TE) als Mittel für die Kontrolle der Qualität der elektrischen Isolation von Hochspannungsapparaten

Bevor Hochspannungsapparate in Betrieb genommen werden, müssen sie auf ihre Betriebssicherheit und Funktionstüchtigkeit kontrolliert werden. Dies geschieht mittels Prüfungen, welche durch Vorschriften und Empfehlungen angegeben werden.

Bei der Festsetzung solcher Prüfungen in Art und Ausmass sind zwei Gesichtspunkte massgebend:

- a) Die zu erwartenden Betriebsbedingungen;
- b) Die Betriebserfahrungen mit Apparaten oder Apparateilen, die bestimmte Prüfungen bestanden hatten.

D. h. die Prüfungen sollen die Betriebsbedingungen in Kurzfassung vorwegnehmen und dabei Schwachstellen aufdecken, sie sollen aber die Apparate nicht durch übersetzte Verdichtung oder Überhöhung der Betriebsbedingungen überbeanspruchen und dadurch deren Lebensdauer verkürzen. Würden die Prüfungen die Apparate überbeanspruchen, so würden sie eine Überdimensionierung gegenüber den Betriebsbedingungen nötig machen [1]²⁾.

Ein Apparat, der trotz bestandener Prüfungen im Betrieb ausfällt, kann dies aus den folgenden Gründen tun:

a) Die Beanspruchung lag oberhalb der üblicherweise auftretenden und berücksichtigten Betriebsbedingungen. Diese Überbeanspruchung kann ganz kurzzeitig sein in Form einer hohen Überspannung (z. B. wegen Ausfall eines Überspannungsableiters, direktem Blitzschlag usw.) oder über einen langen Zeitraum andauern (z. B. in Form unerlaubt hoher Umgebungstemperatur, bzw. Kühlstauung, unzulässig hoher harmonischer Oberwellen, oder dauernd oberhalb des zulässigen maximalen Wertes liegender Betriebsbeanspruchung). Bei den über einen langen Zeitraum andauernden Überbeanspruchungen kommt es über eine allmähliche Zerstörung der Isolation schliesslich zum Durchschlag. Kurzzeitige Überbeanspruchungen können zur sofortigen Zerstörung führen oder diese allmählich einleiten — ähnlich Fall c).

b) Die Prüfungen entsprachen nicht den Betriebsbedingungen, d. h. sie waren zu nieder angesetzt, und dienten keiner geeigneten

Qualitätskontrolle. Dies kann bei Sonderausführungen von Hochspannungsapparaten auftreten, bei denen noch zu wenig Betriebserfahrungen vorliegen, so dass z. B. im Betrieb auftretende Überspannungen unterschätzt werden.

c) Der Apparat hatte schwache Stellen, welche aber die Prüfung gerade noch bestanden. Immerhin hatte die Qualität der Isolation des Apparates durch die Prüfung so gelitten, dass die normalen Betriebsbedingungen für die weitere, beschleunigte Zerstörung genügten und der Durchschlag schliesslich bei Betriebsspannung oder zumindest während normaler Beanspruchung auftrat.

d) Alterung der elektrischen Isolation. Durch chemische, mechanische, elektrische Vorgänge wird die ursprünglich, auch nach der Prüfung noch allem Anschein nach einwandfreie Isolation allmählich zerstört, so dass schliesslich der Durchschlag eintritt. Dies kann z. B. bei ölprägnierter Papierisolation infolge eines nicht ganz einwandfreien Isolieröls geschehen.

Im Fall a) entsprechen Prüfung und Dimensionierung den üblicherweise auftretenden Betriebsbedingungen, eine zusätzliche Prüfung brächte keine weitere Qualitätskontrolle, hingegen sind die Betriebsbedingungen nicht den Voraussetzungen entsprechend unter Kontrolle.

Im Fall b) sind die zu erwartenden Betriebsbedingungen nicht hinreichend bekannt, daher sind Dimensionierung und Prüfungen nicht entsprechend abgestimmt.

Im Fall c) sind wohl die Prüfungen den üblichen Betriebsbedingungen angemessen, die Qualitätskontrolle ist jedoch zu grob. Ein Teil der Isolation wird durch den Prüfvorgang zerstört, Teildurchschläge führen aber nicht zum vollen Durchschlag. Die damit verbundenen elektrischen Entladungen sind zu gering, um während der Prüfspannung oder bei der anschliessenden Kontrollmessung (ohne TE-Messung) aufzufallen. Eine Ionisations- (= Teilentladungs-) messung kann in vielen Fällen den Schaden ans Tageslicht bringen. Dies gilt auch für Fall d). Entweder «ionisierte» der Apparat schon vor der Prüfspannung bei normaler Betriebsspannung, oder er hatte nach der Prüfspannung ein höheres Teilentladungsniveau.

Schwächen der Isolation, seien sie ursprünglich schon vorhanden oder durch allmähliche Alterung entstanden, verursachen bei einer bestimmten Spannung elektrische Entladungen. Diese treten als elektrische Schwingungen im Messkreis, als Ultraschall und als Lichtemission in Erscheinung. Erfasst man diese Erscheinungen früh genug, so kann die Gefahr eines

537.52 : 621.313.027.3 : 62-192

¹⁾ Erweiterte Fassung eines Vortrages im Rahmen des Kolloquiums für Forschungsprobleme der Energietechnik am 8. Juni 1971 an der ETH und des Ausseminstitutes der Technischen Hochschule Wien am 21. Oktober 1971.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Gesamtdurchschlags rechtzeitig vorhergesehen werden. TE sind daher ein wichtiges Hilfsmittel zur Qualitätskontrolle elektrischer Isolation, wobei ihre Erfassung mit Hilfe elektrischer Methoden im Vordergrund steht.

2. Messung von TE als Ersatz für bisher übliche Prüfungen

Teilentladungen sind ein empfindlicher Indikator für Schwachstellen in der Isolation und — wenn ihr Verlauf während der Prüfvorgänge registriert wird — für eine eventuelle allmähliche Verschlechterung der Isolation. Während die Verlustwinkelmessung den Durchschnitt über die ganze Isolation angibt, werden durch die TE-Messung auch einzelne Fehlerstellen angezeigt. Mittels der TE-Messung wäre man also nicht mehr darauf angewiesen, die tatsächlichen Betriebsbedingungen durch Prüfungen derart zu verschärfen, dass Schwachstellen aus- und durchbrennen, um sie überhaupt aufzudecken. Mit diesem Vorgehen ist ja immer die Gefahr verbunden, dass man Schwachstellen schafft, die während des tatsächlichen Betriebes gar nicht entstanden wären, und somit durch die Prüfung, die eine Kontrolle sein sollte, den Apparat gefährdet. Diese Problematik betrifft vor allem die 1-min-Prüfspannungen. Um die Gefährdung möglichst zu reduzieren, können — bei gleichzeitiger TE-Messung — Spannungshöhe und Prüfdauer gegenüber den bisherigen Werten abgeändert werden, wobei aber die tatsächlich später im Betrieb auftretenden Beanspruchungen immer noch nachgebildet oder entsprechend ersetzt sein sollen. Hierbei müsste eine sinkende Spannungshöhe durch erhöhte Beanspruchungsdauer ausgeglichen werden — wofür man wissen sollte, welcher Spannungs-Zeit-Zusammenhang gleiches TE-Verhalten verursacht. Fest steht nämlich, dass unterhalb einer bestimmten Spannung gar keine TE mehr einsetzen, selbst wenn sie bei derselben erwähnten Spannung noch weiter «brennen» würden, sobald sie durch eine Überspannung ausgelöst wurden. Um der gewünschten Entsprechung von Prüfungshöhe und -dauer zu den Betriebsbedingungen möglichst nahe zu kommen, erscheint es daher einfacher — und auch zeitsparender — bei gleichzeitiger TE-Messung kurze, hohe Überspannungen anzulegen als lange aber niedrigere. Die Einführung einer Schaltspannungsprüfung mit einer Kontrolle durch TE-Messung könnte die 1-min-Prüfspannung sinnvoll ersetzen. (Durchführungsmethode s. [2]).

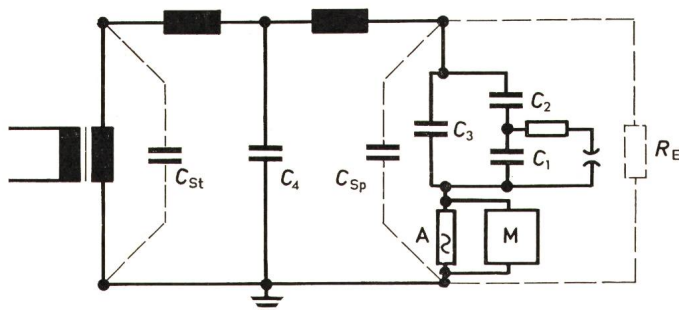


Fig. 1

Prinzipschema des Prüfkreises zur Messung von Teilentladungen

- C_1, C_2, C_3 Teilkapazitäten des Prüflings
- C_4 Kopplungskondensator
- C_{St}, C_{Sp} Streukapazitäten von Transformator bzw. Prüfling
- R_E Ersatzwiderstand für TE gegen Erde
- M Messgerät
- A Ankopplungsvierpol

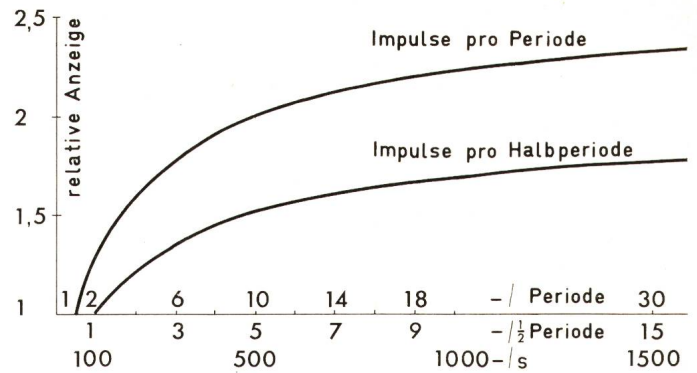


Fig. 2

Bewertung von Störimpulsen durch Störspannungsmessgeräte nach CISPR entsprechend ihrer Häufigkeit, bezogen auf einen Impuls pro einer bzw. einer halben Wechselspannungsperiode

3. Voraussetzungen für eine Qualitätskontrolle durch TE-Messung

3.1 Messgrößen

Die TE in der Isolation eines Prüflings sind Spannungszusammenbrüche an Teilkapazitäten (C_1 in Fig. 1) dieser Isolation. Diese Spannungszusammenbrüche werden durch die im Prüfling parallel liegenden Kapazitäten teilweise ausgeglichen und treten daher am Prüfling als Ganzem im allgemeinen stark verringert in Erscheinung. Die am Prüfling als Ganzem auftretenden Änderungen in Spannung, Ladungsmenge oder Ladeenergie werden über die dadurch verursachten Ausgleichsvorgänge im Messkreis bei der TE-Messung gemessen [3]. Die Spannungszusammenbrüche an den Teilkapazitäten selbst sind nur in sehr einfachen Anordnungen erfassbar.

Nach den Empfehlungen der CEI, Nr. 270 [4], steht die Messung der scheinbaren Ladung in pC (also der am Prüfling als Ganzem auftretenden Ladungsänderung) im Vordergrund. Die Messung in μV mit RIV-metern (radio interference voltage) wird als Indikation bezeichnet, da diese Geräte keine der oben angegebenen Größen direkt angeben. Entsprechend dem ursprünglichen Anwendungszweck, nämlich der Erfassung der Störungen im Rundfunkempfang, haben diese Geräte eine Bewertung gemäss der Empfindlichkeit des menschlichen Ohres eingebaut (500 Impulse pro Sekunde werden durch das Ohr doppelt so störend als 50 empfunden, die Anzeige durch das Gerät ist dementsprechend die doppelte gegenüber 50 Impulsen pro Sekunde); in den seltensten Fällen dürfte dies der Auswirkung der TE auf die Isolation entsprechen (Fig. 2).

3.2 Eichung

Für die Qualitätskontrolle genügen bloss relative, im Laufe der Prüfung in Abhängigkeit von Zeit und Spannung aufgenommene Werte nicht. Die Messresultate müssen vielmehr ausserdem mit denen anderer, ähnlicher Objekte verglichen werden können, man muss auch die absolute Qualität der Isolation kennen. Daher muss mit einem eindeutigen und absoluten Mass gemessen werden. Der durch das Messgerät angezeigte Wert des am Objekt als Ganzem tatsächlich auftretenden Störimpulses hängt sowohl vom Messgerät selber [5] als auch vom Übertragungsverhalten des Messkreises ab. Daher muss, — wie dies auch in den CEI-Empfehlungen 270 [4] festgehalten ist — an den Klemmen des Prüfobjektes ein Eich-

impuls angebracht und der Übertragungsfaktor bestimmt werden.

Eine Arbeitserleichterung bieten bei einfach aufgebauten Messobjekten wie Durchführungen oder Kondensatoren jene TE-Messgeräte, bei denen der Zeiger des Instrumentes dem Eichimpuls gemäss justiert werden kann. In diesem Fall können alle Werte direkt abgelesen werden, Umrechnungsfehler entfallen.

Eine blossre Berechnung des Übertragungsfaktors aus den C-, L- und R-Werten des Messkreises einschliesslich das Objekt ist nicht genau genug, die direkte Eichung hat immer den Vorzug und das grössere Gewicht. Die Eichgeneratoren [6] selbst sollten von Zeit zu Zeit nachgeeicht werden und es sollte die Möglichkeit bestehen, dies an einer offiziellen Stelle zu tun. Für die Genauigkeit beispielsweise von Eichwandlern ist eine entsprechende Regelung längst in Kraft, man würde heute nicht mehr darauf verzichten wollen. Ohne absolute Werte ist eine Qualitätskontrolle unmöglich, zumal für einzelne Apparate bereits heute feste Werte durch Vorschriften empfohlen oder durch Kunden verlangt werden.

Die Arbeitsgruppe TE unter Dr. Kreuger hat in Appendix III des Progress-report 21.01 CIGRE 1968 (Kabel) [7] Empfehlungen für die Eichung der Messkreise und für Eichgeneratoren herausgegeben.

3.3 Lokalisierung

Solange während einer Prüfung die TE die vorgeschriebenen Werte nicht überschreiten, erscheint die Lokalisierung der auftretenden TE nur für den Entwicklungsingenieur wichtig — um weitere Verbesserungen anbringen zu können. Treten aber

TE auf, die gefährlich erscheinen, weil sie die vorgeschriebenen Werte überschreiten, so muss der Nachweis erbracht werden, dass sie wirklich aus der Isolation des Prüfobjektes kommen. Es muss sicher sein, dass sie nicht aus dem Messkreis oder der Umgebung kommen, oder dass sie überhaupt nur vorgetäuscht werden. Schliesslich muss abgeklärt sein, ob es sich nicht bloss um sog. ungefährliche TE an irgendwelchen Abschirmungen oder Bolzen handelt. Die Lokalisierung spielt für diese Unterscheidungen eine wesentliche Rolle.

4. Unterscheidung der Herkunft der gemessenen Teilentladungen

4.1 Messtechnische Voraussetzungen

Für Spannungsregelung, Prüftransformator und Kopplungskondensator muss die Abhängigkeit des TE-Pegels von der Spannung bekannt sein; die entsprechenden TE-Werte müssen im jeweiligen Messkreis unterhalb der für das Prüfobjekt verlangten liegen (s. Abschn. 6.1).

Das Messgerät muss selbstverständlich kontrolliert und geeicht sein. Um beim Auftreten von TE nicht ganz auf mehr oder weniger systematisches Herumprobieren angewiesen zu sein, muss an das TE-Messgerät ein Kathodenstrahloszillograph angeschlossen sein. Ist es ein echter Zweistrahloszillograph — mit einer für die beiden Strahlen unabhängigen Zeitbasis — so erleichtert das die Arbeit, da aus der 50-Hz-Kurve Impulsgruppen herausvergrössert werden können. Man kann damit z. B. vorgetäuschte TE von echten unterscheiden. (Fig. 7) Für die Deutung der TE-Oszillogramme muss die Phasenlage der

Ursprung — Lokalisierung — Abhilfe

Tabelle I

Ursprung		Lokalisierung	Abhilfe	
Umgebung	spannungsunabhängig	Speisung Messgerät Speisung Transformator Rotierende Maschinen Kran Leuchtstoffröhren Rundfunk Andere Prüfvorgänge	Messkabel herausziehen ein — aus U ein — aus ein — aus KO: hohe Frequenz überlagert ein — aus	Filter, Photo KO, abwarten Filter, B, A, abwarten B, A, Photo KO, abwarten B, A, abwarten aus, A, entfernen B, A, abwarten aus, B, A, abwarten
	spannungsabhängig	Spitzen erdseitig Metall. Gegenstände auf freiem Potential Metallstaub auf dem Boden	U; KO: + Maximum (Fig. 3) U; KO: in beiden Halbwellen vor Maxima wandernd oder stillstehend (Fig. 4 und 5) U; KO: unregelmässige TE	entfernen, B, A. entfernen, B, A. entfernen
Messkreis		Verbindungsrohre Zu geringe Abstände gegen Umgebung Kontakte Glimmsicherungen in der Messeinrichtung	U; KO: — Maximum (Fig. 3) U; KO: + u. — Maximum (Fig. 3) KO: um O-Durchgang (Fig. 6) breite TE-Fächer	dickere Rohre, B Abstände vergrössern Schraubkontakte Strom durch Ankopplungsvierpol zu gross
Vorgetäuschte TE		Magnetisierung Trafo Barkhausen in Eisendraht	KO: feststehend, Intensität steigt mit Spannung, Frequenz in der Grössenordnung 10 kHz (Fig. 7) bei sehr niedriger Spannung ähnlich schlechtem Kontakt um Strom maxima	Photo KO, höhere Speisefrequenz keine Fe-Leiter verwenden

KO = TE-Oszillogramm, B = Brückenschaltung, A = Abschirmen, U = Ultraschalldetektor

KO = TE-Oszillogramm, B = Brückenschaltung, A = Abschirmen, U = Ultraschalldetektor

Prüfwechselspannung eindeutig festliegen. Um Fremdstörungen zu orten, ist ein Ultraschalldetektor, mit dem man die Herkunftsrichtung feststellen kann, sehr vorteilhaft.

4.2 Störungen

Störungen, das sind TE, die nicht aus dem Prüfling kommen. Bei der Beurteilung des TE-Verhaltens des Prüfobjektes muss man sicher sein, dass die gemessenen TE auch tatsächlich aus dem Prüfobjekt stammen, also keine Störungen aus dem Messkreis oder der Umgebung sind. Einen Überblick über die wichtigsten Störungsursachen, deren Lokalisierung und entsprechende Abhilfemassnahmen gibt Tabelle I.

Wenn sich bei spannungslosem Messkreis Störungen aus der Umgebung auf einzelne — wenn auch grosse — aber klar abgegrenzte Entladungen beschränken, kann dieses Erscheinungsbild durch ein Foto des Oszillogrammes festgehalten und bei der eigentlichen TE-Messung berücksichtigt werden. In einem solchen Falle kann es vorkommen, dass das Messinstrument schon vor dem Anlegen der Spannung an das Prüfobjekt einen Wert anzeigt, der über dem maximal zulässigen liegt; für die eigentlichen TE-Messungen am Prüfling sind dann sinnigermäss nur die spannungsabhängigen Entladungen aus den Oszillogrammen zu berücksichtigen. Der Instrumentenausschlag ist erst zu berücksichtigen, wenn er den Grundpegel übersteigt.

Aus den vielen möglichen Störungsursachen geht hervor, dass ein TE-Prüffeld frei von metallischen Teilen sein soll, die für die Prüfung nicht unbedingt nötig sind. Auch ist anzustreben, dass das TE-Prüffeld von Montagehallen getrennt und möglichst staubfrei ist. Die einzig wirklich sichere Massnahme aber, um TE-Messungen rationell durchführen zu können, d. h. ohne die oft sehr langwierige und mühselige

Suche nach Störursachen, ist ein abgeschirmtes Prüffeld mit Filtern in allen elektrischen Zuleitungen (s. Abschnitt 5).

Treten trotz abgeschirmtem Prüffeld Zweifel über den Ursprung von TE auf, so sollte der Messkreis durch Einsetzen eines TE-freien Messkreises an Stelle des Prüfobjektes kontrolliert werden. Allerdings können sich auch beim Einsetzen des eigentlichen Prüfobjektes noch Störungen einschleichen (schlechte Kontakte, Veränderung von Abständen unter die gerade noch TE-freien Werte, Transportgestell des Prüfobjektes usw.).

In den wenigsten Fällen ist aber ein abgeschirmtes Prüffeld verfügbar. Manchmal ist dann die Grundstörung — also die Höhe der spannungsunabhängigen TE — über die ganze Wechselstromperiode hin höher als der für das Objekt maximal zulässige TE-Wert. Man kann nicht immer warten, bis alle Störungen aus der Umgebung aufhören oder beim Rundfunk eine Sendepause eintritt. Eine wesentliche Verbesserung der Grundstörung erreicht man aber nur durch die Brückenschaltung.

4.3 Die Brückenschaltung

Der Zweck der Brückenschaltung (Fig. 8) ist, vom Messgerät äussere Störungen oder solche aus der Speisung abzuhalten. Indem man zum eigentlichen Messobjekt ein Objekt ungefähr gleicher Kapazität parallelschaltet und das Messgerät zwischen die seriegelgeschalteten Ankopplungsvierpole A_1 und A_2 legt, werden Störungen von aussen neutralisiert, wenn der TE-Spannungsabfall an den beiden Ankopplungsvierpolen gleich gross ist.

Die in Fig. 8 angedeutete Entladung von Hochspannung gegen Erde während der negativen Halbwelle zieht von den Hochspannungselektroden der Kapazitäten negative Ladung ab, wodurch zwangsläufig die gleich grosse positive Ladungsmenge von den niederspannungsseitigen Elektroden der Kapazitäten gegen Erde fliesst. Sind A_1 und A_2 entsprechend den Kapazitäten abgestimmt, werden die Spannungsabfälle gleich sein, sich gegenseitig aufheben und das Messgerät wird nichts registrieren (Fig. 8, Brücke). Schaltet man das Messgerät von einem Ankopplungsvierpol ab und gegen Erde, so kann man die TE messen (Fig. 8, Zweig 1 bzw. 2). Hier ist angenommen, dass eine positive Spannung an A_1 auch durch das Messgerät positiv wiedergegeben wird, eine positive an A_2 folglich negativ. Durch eine gutabgestimmte Brückenschaltung mit etwa gleich grossen Kapazitäten in den Brückenzweigen kann eine Abschwächung bis 1 : 1000 erreicht werden. Oft ist aber 1 : 20 ein ausreichender Erfolg. Je grösser ausserdem die Koppelkapazität C_4 ist, desto geringer tritt eine äussere Störung in den beiden Messzweigen, verglichen mit TE in einem der beiden, in Erscheinung. Tritt hingegen in einem der beiden Objekte, z. B. in Zweig 1 eine Entladung auf (Fig. 9) so fällt zwischen dessen Elektroden die Spannung leicht ab. C_4 und C_{B2} werden mitgerissen, d. h. sie geben Ladungsmengen an C_1 , C_2 , C_3 ab, wobei von C_{B2} die erdseitig abfliessende Ladungsmenge durch A_2 gegen Erde fliesst. C_{B2} verliert ja Spannung, d. h. Ladung, C_1 , C_2 , C_3 aber wird aufgeladen. Die beiden Spannungsabfälle addieren sich im Messinstrument. Der Spannungszusammenbruch an C_1 , C_2 , C_3 selbst im Augenblick der Entladung tritt demgegenüber am Messinstrument gar nicht in Erscheinung: die Ladungsmengen von C_1 neutralisieren sich gegenseitig, der Ladungsabfluss von C_3 auf C_2 geht nicht über den Vierpol. Einzig die Streukapazität gibt über den Vierpol Ladung an C_1 , C_2 , C_3 —

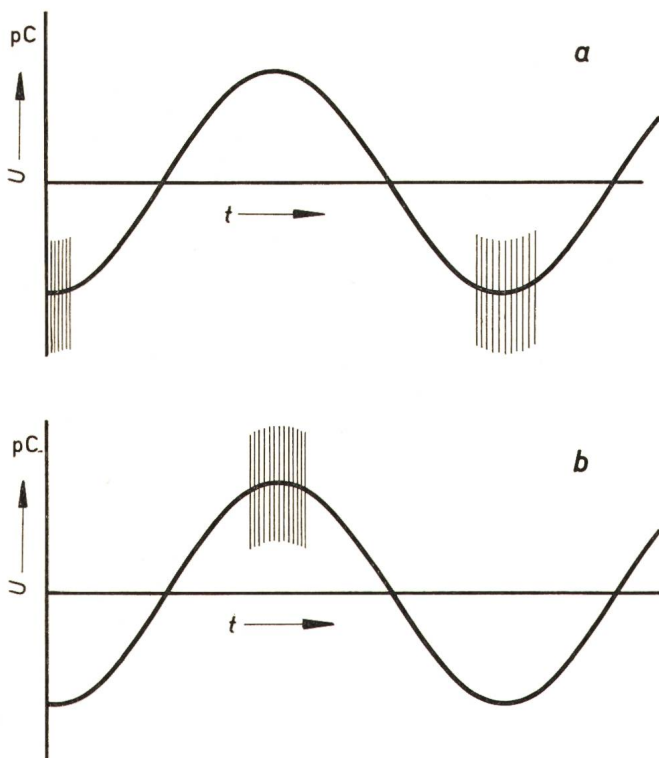


Fig. 3

Teilentladungen einer metallischen Spitze
Einsatzspannung und Intensität vom Radius abhängig [8]
a Spitze an Hochspannung
b Spitze an Erde gegen Hochspannung

genau wie C_4 und C_{B2} . (Je grösser allerdings C_4 ist, desto kleiner ist der Anteil über C_{B2}).

Daraus ergeben sich zwei Möglichkeiten, Störungen von aussen, TE in Objekt 1 und TE in Objekt 2 voneinander zu unterscheiden ³⁾:

- a) Beobachtung der Unterschiede der TE-Amplituden bei Brückenschaltung und bei Abschalten der Brückenzeige 1 bzw. 2.
- b) Beobachtung der Richtungen der Entladung bei Brückenschaltung, und bei Abschalten der Brückenzeige 1 bzw. 2.

Die quantitativen Verhältnisse werden stark durch die Grösse von C_4 beeinflusst. Daher muss vor jeder Messung das Verhalten in den verschiedenen Schaltungen (Brücke, Abschalten von 1 bzw. 2) mittels eines bekannten TE-Impulses sowohl von Hochspannung gegen Erde als auch über die beiden Messobjekte gemessen werden. Einen wesentlichen Einfluss auf die richtige Deutung der Impulsrichtung hat das Messgerät selbst: je nachdem ob es ein α - oder β -Gerät ist, ist die erste oder die 2. Amplitude des wiedergegebenen Impulses die grössere (s. Fig. 14, unten), bei einem β -Gerät könnte die erste kleinere übersehen werden. Da ausnahmsweise bei einem besonderen Messkreis ein α - auch wie ein β -Gerät reagieren kann, empfiehlt sich immer eine experimentelle Kontrolle durch einen Eichimpuls.

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. Brückenzeiges feststellen, tritt plötzlich wieder der hohe Störpegel auf! Sind die beobachteten TE äussere TE, so werden auch sie grösser werden — vorausgesetzt C_4 ist gross genug. Bei inneren Entladungen hingegen tritt eher eine Verkleinerung auf, wenn einer der beiden Brückenzeige abgeschaltet wird (Fig. 9), so dass sie im nun erhöhten Grundpegel verschwinden können. In diesem Falle ist die Lupe des echten Zweistrahloszillographen sehr wertvoll: mit ihr kann man die Entladungen aus jeder Phasenlage in der Wechselstromperiode beliebig herausvergrössern, ihre Richtung feststellen und sie mit der des erwähnten Eichimpulses vergleichen. Je nach der Impulsrichtung in der positiven oder negativen Halbwelle kommen die TE aus Objekt 1 oder 2. (Treten die TE in der positiven Halbwelle in Objekt 2 anstatt wie in Fig. 9 in Objekt 1 auf, so wären die Impulse entgegengesetzt [wie in Fig. 9] gerichtet, also in diesem Falle zur 0-Linie hin.)

Wesentlich komplizierter werden die Richtungsverhältnisse, wenn zwei Objekte unterschiedlicher Potentialverteilung zu nahe aneinander gestellt werden, so dass TE zwischen diesen beiden Objekten auftreten. Es empfiehlt sich daher, solche Objekte genügend zu distanzieren — obwohl die Antennenwirkung des Brückenkreises gegenüber eingestreuten Fremdstörungen vergrössert, d. h. der Grundpegel wieder etwas erhöht wird. Das Sprühen von Teilen einer Prüfanordnung gegeneinander kann z. B. auftreten, wenn Prüftransformator und Spannungsteiler sehr nahe zusammengebaut sind.

4.4 TE im Prüfobjekt

Grundsätzlich muss unterschieden werden zwischen gefährlichen und ungefährlichen TE. Sprühererscheinungen von einigen Zehn pC an äusseren Armaturen können als ungefähr-

³⁾ s. T. Praehauser: Teilentladungsmessungen an Hochspannungsapparaten mit der Brückenschaltung. Wird in einem späteren Heft des Bull. SEV erscheinen.

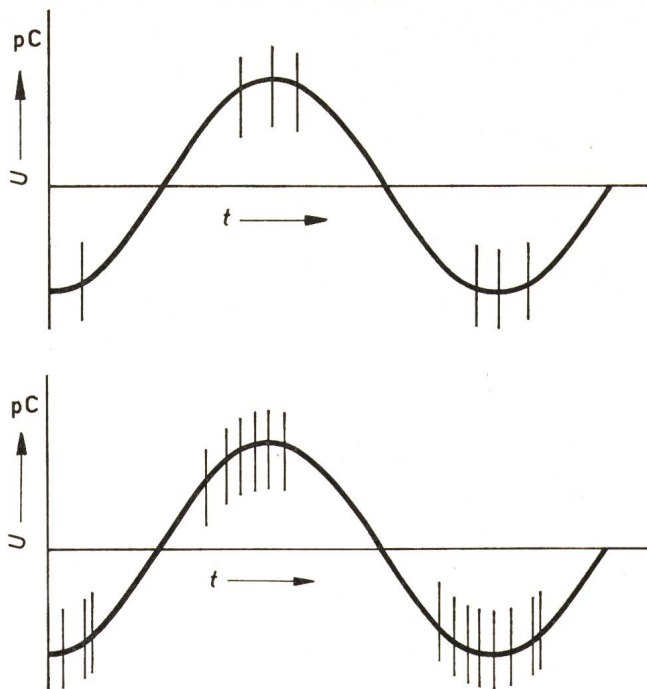


Fig. 4

Teilentladungen durch einen auf freiem Potential befindlichen Metallteil

Entladungen treten meist vor Amplitudenmaximum auf und haben untereinander etwa gleiche zeitliche Abstände, die mit steigender Spannung kleiner werden. Sie scheinen für das Auge manchmal in Paaren aufzutreten. Sie können wandern oder stillstehen. Die Grösse ist spannungsunabhängig, die Anzahl steigt mit der Spannung. Einsatz- und Löschspannung sind gleich, oberhalb einer bestimmten Spannung können sie allerdings auch wieder verschwinden. Nicht zeitabhängig.

lich toleriert werden (s. Fig. 3). Treten sie dagegen in der inneren Isolation auf, so können sie je nach dem Ursprungsort gefährlich sein. Hier ist es sehr schwierig eine allgemeingültige Grenze zu ziehen, abgesehen von der Schwierigkeit einer eindeutigen Lokalisierung in grossen Objekten. Deshalb zieht man es vor, für die innere Isolation unterhalb eines bestimmten Wertes zu bleiben, unabhängig davon, wo die TE im Innern auftreten. Für Apparate mit ölprägnierter Papierisolation, wie Durchführungen, Messwandler, Kopplungskondensatoren wird dieser zulässige Höchstwert bei maximaler Betriebsphasenspannung häufig mit grössenordnungsmässig 10 pC vorgeschrieben. Treten höhere Werte auf, so ist es für den Hersteller sehr wichtig, den Ursprung zu lokalisieren.

Bei Verwendung eines Kathodenstrahloszillographen stehen folgende Parameter zur näheren Bestimmung zur Verfügung:

- Phasenlage und Polarität in der Sinuswelle in Abhängigkeit von Zeit und Spannung;
- Abhängigkeit der Intensität von der Spannungshöhe und Polarität;
- Abhängigkeit der Intensität von der Zeit bei gleichbleibender Spannung.

Darin sind enthalten:

- Einsatz- und Löschspannung;
- Abhängigkeit der Impulszahl von der Spannungshöhe;
- Abhängigkeit der Impulszahl von der Zeit.

Die Arbeitsgruppe der CIGRE 21.03 «Discharges» unter Dr. Kreuger [9] hat eine Diagnosesammlung zusammengestellt, in der auf Grund obiger Parameter folgende Ursprungs-orte der TE unterschieden werden: Fehlstellen in einer Isolations-schicht, Metallelektroden am Rande dieser Isolations-schicht, Elektrodenrand einer Folie in einer Isolierschicht,

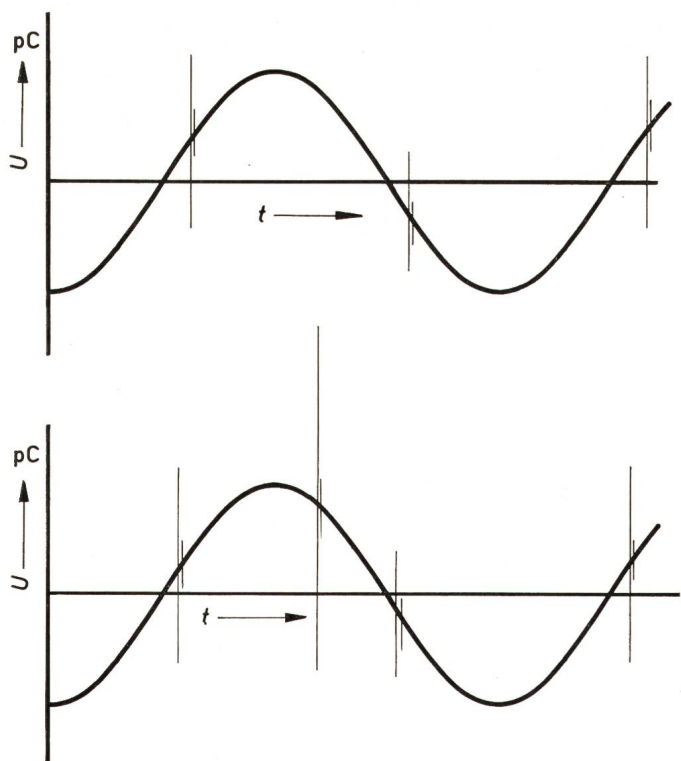


Fig. 5
Teilentladungen durch mehrere auf freiem Potential
befindliche Metallteile gegeneinander
Sie sind unregelmässig und stark wechselnd

Elektroden in Luft, Metallteile auf freiem Potential, Kontaktfehler; sowie Störungen, die spannungsunabhängig sind.

Will man die Momentanspannung wissen, bei der TE einsetzen, empfiehlt es sich, statt der elliptischen Darstellung einer Wechselstromperiode die tatsächliche Sinuskurve zu verwenden. Bei der Ellipse — besonders wenn die Nullpunkte nicht auf der grossen Achse liegen — ist die Phasenlage erst durch Umprojizieren auf einen Kreis möglich, also sehr umständlich und zeitraubend (Fig. 10).

5. Abgeschirmtes TE-Prüffeld

Die einzig sichere Massnahme, TE-Messungen frei von Störungen aus der Umgebung durchführen zu können, ist wie schon erwähnt, die Abschirmung des Prüffeldes. Diese Abschirmung besteht einerseits in einer Abschwächung elektromagnetischer Wechselfelder von Sendern, rotierenden Maschinen, Gleichrichtern usw., andererseits durch Sperren der in das Prüffeld führenden Leitungen gegen alle Frequenzen innerhalb des Messbereiches.

5.1 Abschirmung gegen elektromagnetische Wechselfelder

Solche Wechselfelder werden durch Gegenfelder für den Prüffeldraum neutralisiert, und zwar durch in der Abschirmung induzierte Wirbelströme und durch Gegenfelder magnetischen Materials. Die Abschirmung durch Eisenblech ist am besten (z. B. 0,1 mm, 100 kHz: 70 dB; 1 MHz: 140 dB). Gleich dickes Kupferblech schirmt bei niederen Frequenzen allerdings etwas besser ab, bei höheren aber merklich schlechter (100 kHz: ca. 80 dB; 1 MHz: ca. 100 dB). Maschendraht-eisen, doppelwandig bei 4 mm Maschenweite schirmt bis zu 10 MHz etwa wie Kupfer ab, oberhalb ist aber die Wirkung stark abfallend; mit steigender Maschenweite sinkt die Wirkung der Abschirmung ebenfalls (für ca. 16 mm Maschenweite

etwa um 20 dB). (Alle diese Angaben beziehen sich auf Räume von etwa 50 m³ Inhalt [10]. Für grössere Räume liegen die Werte besonders für Störer in der Nähe günstiger.)

Zur Abschirmung von Hochspannungshallen verwendet man heute Kupferblech [11], Eisenabschirmungen [12], punktverschweisstes Eisenblech [13] bzw. perforiertes Eisenblech [14] oder Maschendrahtabschirmungen [15]. Kupferblech wird dann vorgezogen, wenn das Schirmblech wie eine Tapete aufgezogen wird (Eisenblech ist rostanfällig — natürlich auch wandseitig — dort aber nicht zugänglich). Das Aufziehen von Kupferblech von der Vorbehandlung der Unterlage bis zum Verlöten der Folie liegt in der Grössenordnung zwischen 120 und 200 Fr./m². Billiger kommt selbstverständlich die Auskleidung mit Maschendraht, wobei allerdings darauf zu achten ist, dass alle Knoten verlötet seien, da sonst Störungen auftreten können. Bei grossen Hallen ist auch auf entsprechende akustische Dämpfung zu achten, damit die Verständigung nicht unter dem Nachhall leidet und auch, damit der Nachhall nicht zu gross ist, wenn in der Halle noch eine Stossanlage untergebracht wäre. Eine geeignete Massnahme ist dafür z. B. die Profilierung der Bleche [13].

In blechgeschirmten Hallen werden als Fenster Wabenkamineinsätze verwendet, die Hohlleiterabmessungen je nach gewünschter Frequenzdämpfung haben, (Kosten etwa 400 sFr. pro 1/4 m²). Tore für durch Folien abgeschirmte Räume müssen gegen den Türstock mit Doppelkontakten verbunden werden, um die Dämpfung der Halle nicht zu beeinträchtigen. Der nachträgliche Einbau einer Abschirmung in eine bestehende Halle kommt naturgemäss teuer, da vieles abgeändert oder ersetzt werden muss.

5.2 Sperrung der Zuleitungen zur Halle gegen alle im Messbereich liegenden Frequenzen

In eine abgeschirmte Halle müssen alle Zuleitungen gefiltert [10] werden, damit nicht über Speise- und Steuerleitungen die aufwendig abgeschirmten Störungen doch wieder hereinkommen. Die einfachere, billigere Lösung ist die Anbringung der Schaltwarte und des Reguliertransformators ausserhalb der geschirmten Halle, wobei aber die TE-Messgeräte innerhalb der Abschirmung untergebracht sind, so dass nur die Speiseleitungen eingeführt werden müssen. Die Dämpfung beträgt dabei zwischen 14 kHz bis 10 MHz: 100 dB. Besonders aufwendig ist das Filtern von Telefonleitungen, wenn die Filte-

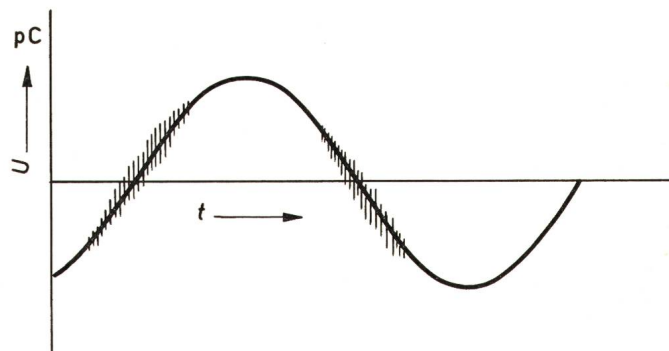


Fig. 6
Schlechte Kontakte

Unregelmässige, sehr dicht beieinander liegende Entladungen, etwa symmetrisch um die Spannungsnulldurchgänge. Mit steigender Spannung breiten sie sich stärker über die Sinuswelle aus. Oberhalb einer bestimmten Spannung können sie ganz verlöschen und nicht wiederkommen (Verschweissen der Kontakte)

rung bis unter 30 kHz herunter wirksam sein soll, ohne die Übermittlungsqualität zu beeinträchtigen.

Abschirmung und Filterung allein genügen allerdings nicht, für einen klaglosen Betrieb muss darauf geachtet werden, dass in dem abgeschirmten Prüffeld keine Gegenstände auf freiem Potential liegen; am besten werden alle Werkzeuge, Kabel und Verbindungsrohre in geerdeten, abgeschirmten Metallkästen untergebracht.

6. Allgemeine und spezielle Messmethoden für verschiedene Apparategruppen

6.1 Messkreise im allgemeinen

In Abwandlung des Messkreises in Fig. 1 wird der Ankopplungsvierpol häufig an den Koppelkondensator C_4 anstatt an das Messobjekt angeschlossen. Hinsichtlich der Messung ergeben sich folgende Unterschiede:

Liegt der Ankopplungsvierpol in Serie zum Messobjekt, so wird der ganze durch TE im Objekt verursachte Ausgleichsstrom erfasst, wogegen bei Serieschaltung zum Koppelkondensator ein Teil dieses Ausgleichsstroms über die Streukapazität abfließt. Die Messempfindlichkeit steigt in beiden Fällen mit der Grösse von C_4 an.

Ein Sprühen gegen Erde wird bei Serieschaltung zum Messobjekt um so schwächer erfasst, je grösser C_4 ist; wenn dagegen der Ankopplungsvierpol in Serie zum Koppelkondensator C_4 liegt, so ist es gerade umgekehrt, nämlich stärker.

Der grosse Vorteil der Serieschaltung des Ankopplungsvierpols zum Koppelkondensator C_4 gegenüber einer Serieschaltung zum Messobjekt liegt darin, dass bei einem Überschluss des Messobjektes, das Messgerät viel weniger gefährdet ist, weil in diesem Fall nicht der volle Überschlussstrom durch den Ankopplungsvierpol fliesst.

Will man TE von den Hochspannungsabschirmungen gegen Erde, und Störungen von der Speisung her möglichst aus der Messung eliminieren, so wählt man die bereits im Abschn. 4.3 behandelte Brückenschaltung, bei welcher diese Ausgleichsströme nur sehr vermindert erfasst werden.

Zu beachten bei all diesen Messungen ist aber, dass das Verhältnis der Kapazität des Prüflings zu C_4 sehr wichtig für die Messung ist.

Bei gleicher TE-Intensität in den beiden Kapazitäten stehen die angezeigten Werte etwa im umgekehrten Verhältnis zu den beiden Kapazitätswerten (Fig. 11). Ist also die Prüflingskapazität doppelt so gross wie C_4 , so werden die gleichen TE aus C_4 doppelt so stark angezeigt als diejenigen aus dem Prüfling. In diesem Fall muss der Koppelkondensator C_4 also ein wesentlich niedrigeres TE-Niveau haben als der Prüfling, damit nicht schlechte Ergebnisse des Prüflings vorgetäuscht werden. Daher empfiehlt sich immer, den Koppelkondensator genau zu prüfen und bei der Eichung des Prüflings zugleich festzustellen, wie gross die Anzeige des Gerätes wird, wenn der Eichimpuls über die Klemmen des Koppelkondensators angebracht wird. Diese Erscheinung ist besonders zu beachten, wenn ein Spannungsteiler — von üblicherweise kleiner Kapazität — als Koppelkondensator verwendet wird.

Die erwähnten Messkreise werden ohne Abwandlung für Durchführungen und Kondensatoren benutzt.

6.2 Durchführungen

Die häufigsten Fehler in Durchführungen sind die Schwachstellen im Dielektrikum.

Bei lackiertem und bei ölprägniertem Papier sieht das Verhalten der TE ähnlich aus, wenn auch für erstere eine viel höhere Intensität zugelassen ist: die TE beginnen vor dem

Spannungsmaximum; sie nehmen mit steigender Spannung an Intensität und Zahl zu und haben eine tiefere Lösch- als Einsatzspannung (Fig. 12 und 13). Eine Nachbehandlung durch Erwärmen bei lackiertem Papier oder frisch Füllen einer Durchführung mit Überwurf oder Evakuieren und frisch Fluten bei ölprägniertem Papier (wenn beim Nachfluten Luft dringeblichen war) kann Erfolg haben. Bei gegossenen Durchführungen ist der Durchführungskörper in solchen Fällen verloren. Hat die Durchführung einen Messbelag, so können dort Kontaktfehler auftreten; die TE verhalten sich dann gemäss Fig. 6.

6.3 Kondensatoren

So einfach die Kondensatoren vom prinzipiellen Aufbau her erscheinen — sie bestehen auf den ersten Blick nur aus Isolation zwischen zwei Elektroden — so schwierig kann das Erfassen von inneren TE sein. Die Ursache liegt im Abfall der Messempfindlichkeit und in der Zunahme der Störanfälligkeit mit steigender Kapazität. Die kleinste messbare Entladungsmenge Q (in C) ist [16]

$$Q = \alpha \sqrt{C} \quad \left. \begin{array}{l} C \text{ Kapazität in F} \\ \alpha \text{ Konstante des Messgerätes in C} \end{array} \right\} F^{-1/2} \quad (\text{im günstigsten Falle } 10^{-9} \text{ C})$$

Daraus ergibt sich z. B. für 1 μF eine kleinste messbare Entladungsmenge von 1 pC; für 100 μF sind es 10 pC. Andererseits stellt eine grosse Kapazität im Messkreis einen sehr kleinen Widerstand für Störungen von aussen dar (Speisung, Einstreuung), so dass es oft schwierig ist, die kleinste noch messbare Ladungsmenge überhaupt zu erfassen, da der Störpegel zu hoch ist.

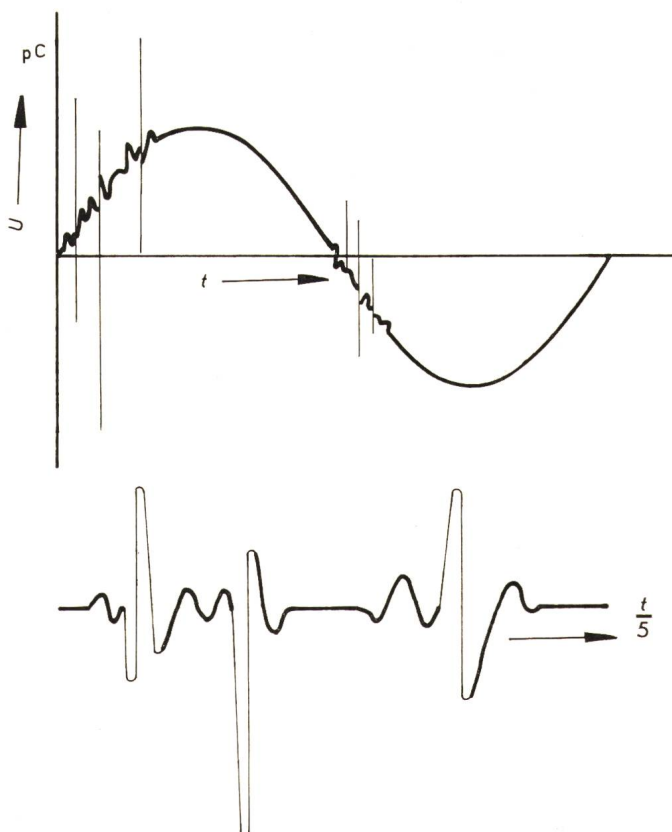


Fig. 7

Sättigungserscheinungen von Transformatoren oder Drosselspulen

Unregelmässige Schwingungen um 10 kHz, mit fester Lage auf der Sinuslinie.

Amplitude steigt mit der Spannung, keine Zeitabhängigkeit. Einsatz- und Löschspannung sind gleich

Für das Übertragungsverhalten des Messobjektes spielt ausserdem die Lage der Eigenfrequenz des Kondensators in bezug auf die Messfrequenz eine wichtige Rolle. Liegt z. B. die Eigenfrequenz bei einem Fünftel der Messfrequenz, so ist die an den Kondensatordurchführungen auftretende scheinbare Ladungsmenge ca. 5mal kleiner als es für eine reine (induktivitätsfreie) Kapazität der Fall wäre, gleiche innere TE-Intensität vorausgesetzt. Besonders bei Leistungskondensato-

ren muss also die Eigeninduktivität berücksichtigt werden, will man Rückschlüsse auf die inneren TE ziehen. Kondensatorbatterien als ganzes auf innere TE zu prüfen, ist aus den angegebenen Gründen nicht aussichtsreich.

Abgesehen von TE an Aussenteilen kommen als Ursprungsstellen für TE in Betracht: Das Dielektrikum der Kondensatorwickel, die Isolation gegen Erde und Kontakte.

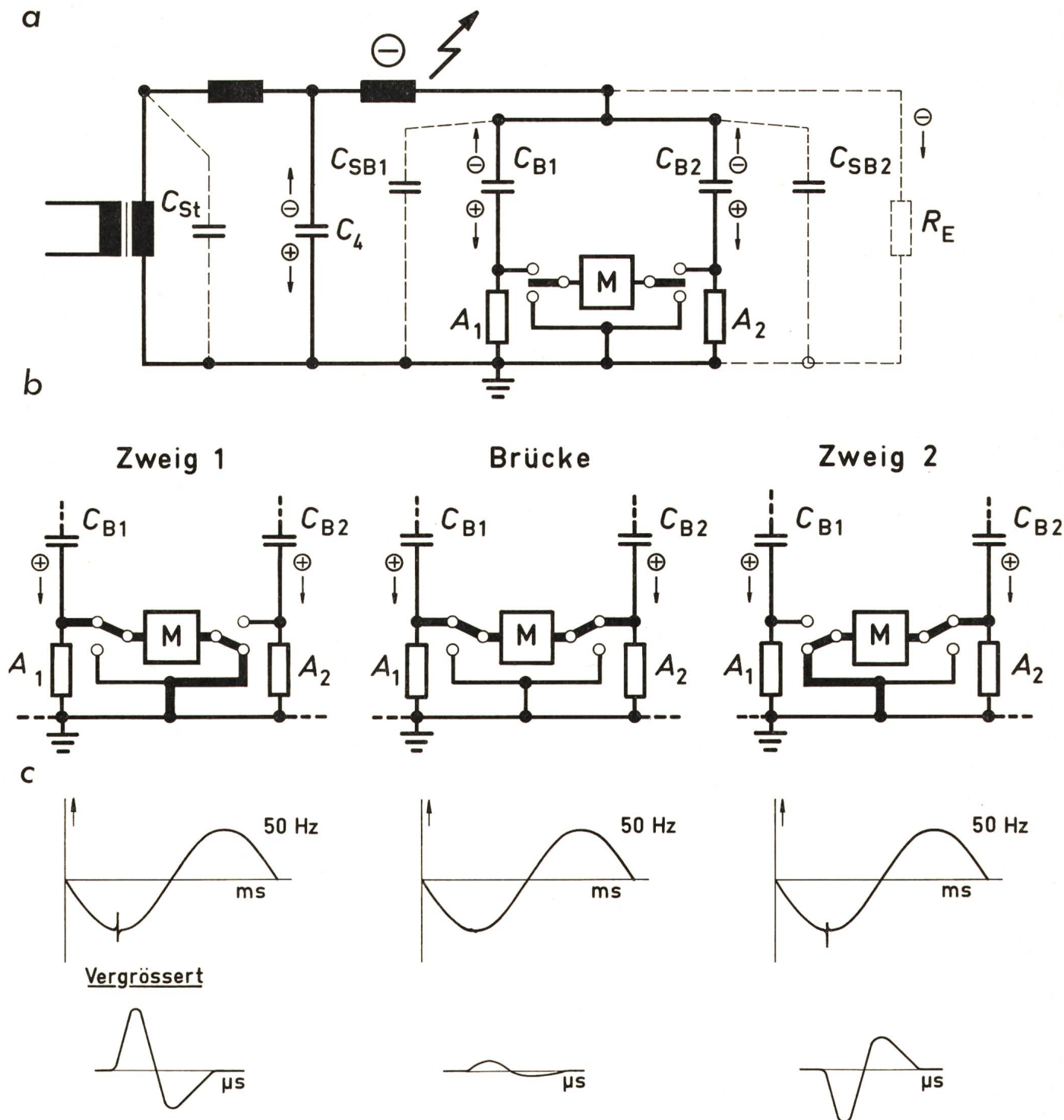


Fig. 8

TE-Messung mittels Brückenschaltung: Entladungen 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_{SB1} , C_{SB2} Streukapazitäten
 A_1 , A_2 Ankopplungsvierpol in Zweig 1 bzw. 2
 übrige Bezeichnungen wie in Fig. 1



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 abwärts (α -Gerät, s. Abschn. 6.4, Fig. 14).

Schwachstellen im Dielektrikum haben bei mineralöl-
 imprägnierten Kondensatoren ein TE-Verhalten entsprechend
 Fig. 12 und 13. Falls dieses Verhalten durch nicht einwand-
 freies Nachfluten vor dem Verschliessen der Kondensatoren
 verursacht wurde, kann Entleeren, Evakuieren und Frisch-
 fluten die Schwachstellen beseitigen, indem eventuell am
 Wickelrand sitzende Gasblasen entfernt werden. Bei Askarel-
 imprägnierten Kondensatoren ist die Hysterese wesentlich
 kleiner als in Fig. 13, d. h. die Intensität der TE steigt mit der
 Zeit bei gleichbleibender Spannung kaum an oder wird sogar

kleiner. Da Askarelkondensatoren im Kessel imprägniert und
 geflutet werden, kann der Fehler bereits im Trockenvorgang
 liegen. Nochmals evakuieren und Fluten hilft hier kaum, da
 dem ungenügend getrockneten Papier die Feuchtigkeit über
 das Imprägniermittel entzogen werden müsste.

Ist bei Serienschaltung von Kondensator-Elementen eines
 durchgeschlagen, so muss dies nicht durch TE erkennbar sein,
 dann nämlich, wenn der Durchschlag «satt» ist. Dieser Fall
 ist eher selten. Meist treten sehr starke Entladungen um den
 Spannungsnullpunkt auf, die durch ihre Unregelmässigkeit in

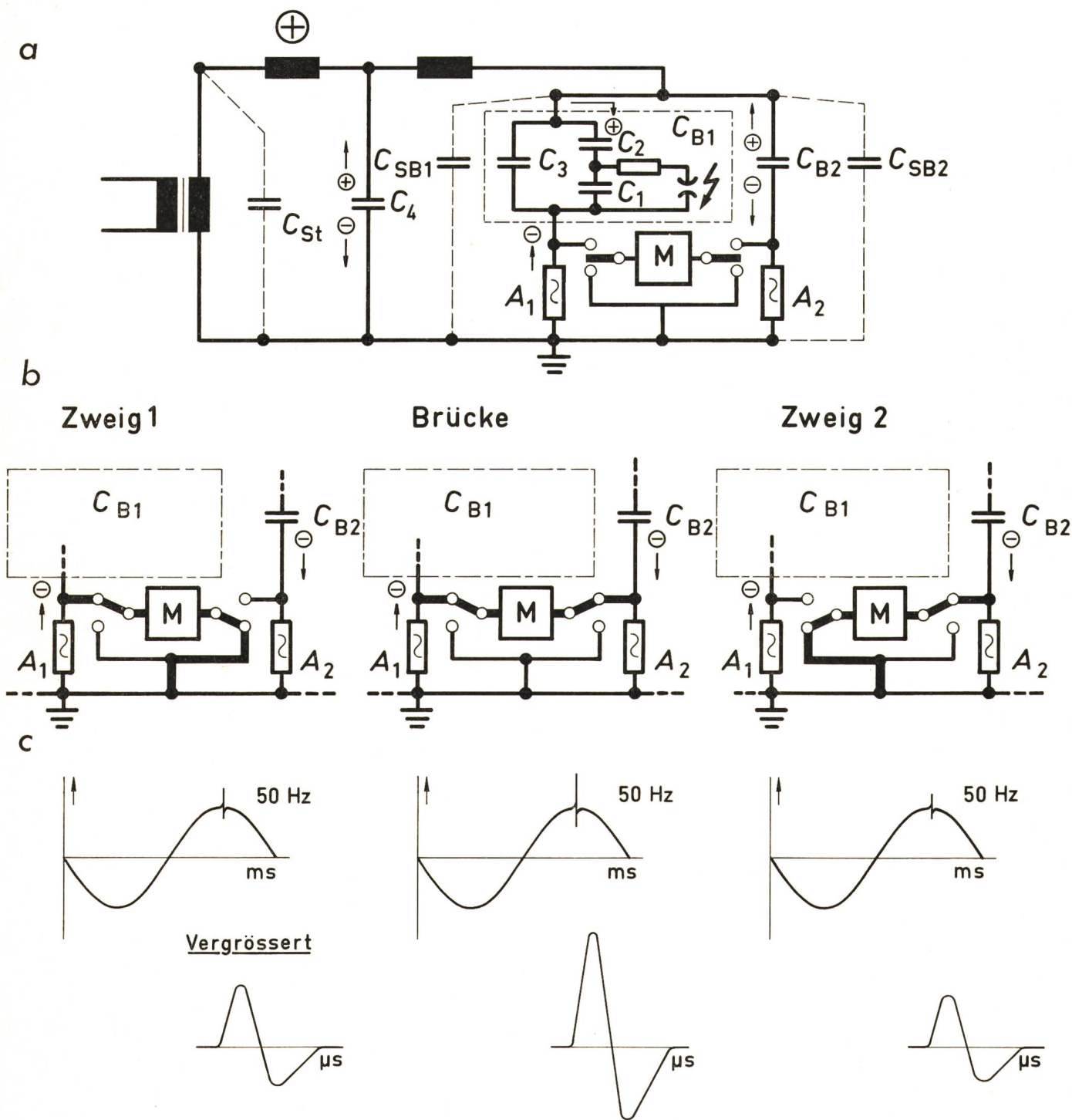


Fig. 9

TE-Messungen mit der Brückenschaltung: Entladungen im Prüfobjekt-Zweig

a Prinzipschema der Brückenschaltung: Verhältnisse bei inneren
 Entladungen im Prüfobjekt in Zweig 1 (positive Halbwelle)
 Bezeichnungen siehe Fig. 1 und Fig. 8

b, c Je nachdem das Messgerät in Zweig 1 oder in Zweig 2 in die
 Brücke geschaltet ist, erscheint der Entladungsimpuls im Os-
 zillogramm grösser oder kleiner, aber immer nach oben (α -Ge-
 rät s. Abschn. 6.4 und Fig. 14).

Lage und Grösse und den schnellen Wechsel auffallen. Es kann aber auch das gleiche Bild auftreten wie wenn sich metallische Gegenstände auf freiem Potential befinden (Fig. 5). Zur Kontrolle muss die Kapazität selbstverständlich vor und nach jeder Prüfung gemessen werden. Treten TE in der Isolation gegen Erde auf, so können sie z. B. mittels der Brückenschaltung als solche bestimmt werden.

Schlechte Kontakte zeigen ein Oszillogramm wie Fig. 6. Dabei können die Abstände zwischen den Entladungen mehr oder weniger dicht sein, die Grösse der Entladungen ist meist zeitunabhängig und steigt mit der Spannung an. Es kann aber auch vorkommen, dass oberhalb einer bestimmten Spannung überhaupt keine Entladungen mehr auftreten.

6.4 Kabel

Bei Durchführungen und Kondensatoren haben die Laufzeiten der TE-Impulse von den Entladungsstellen bis zum Messgerät wegen der relativ kleinen Entfernungen praktisch keinen Einfluss auf das Messergebnis. Bei Kabeln jedoch, können sich diese Laufzeiten je nach Kabellänge ausschlaggebend auf die TE-Impulsformung und Bewertung durch das Messgerät auswirken.

Vom Ort der TE breitet sich nach beiden Enden des Kabels eine Wanderwelle aus (Fig. 14). Je nach Abschluss der Kabelenden und je nach Anschluss des Messgerätes (an nur ein oder an beide Kabelenden) treffen nacheinander ein oder zwei Impulse im Messgerät ein (ein oder zwei direkte oder ein direkter und ein reflektierter). Direkter und reflektierter Impuls werden durch das Messgerät umgeformt und überlagern sich. Das Ergebnis dieser Interferenz liegt zwischen Verdoppelung und Auslöschung des direkten Impulses.

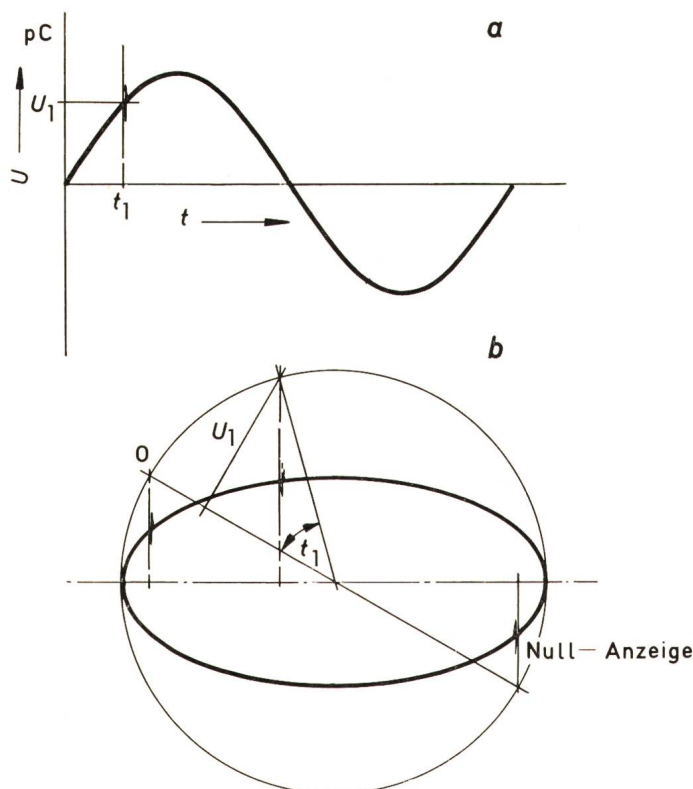


Fig. 10
Phasenlage und zugehöriger Momentanwert
der Betriebsspannung von Teilentladungen
a Darstellung in Sinuslinie
b Darstellung in Ellipse

Schmalbandgeräte formen den eintreffenden TE-Impuls in einen ausgeprägten Schwingungszug (z. B. von 500 kHz) um (Gesamtdauer z. B. über 50 μ s). Bei Breitbandgeräten hingegen klingt der umgeformte Impuls bereits nach wenigen stark gedämpften Schwingungen ab. Je nachdem, ob die erste oder die zweite Amplitude die grösste ist, spricht man von- α - oder β -response (Fig. 14). Bei einem Breitbandgerät mit α -response ergeben zwei überlagerte Impulse eine Verstärkung, wogegen bei β -response auch eine Schwächung auftreten kann, die die Deutung erschwert.

Diese Überlegungen entfallen für kurze Kabel (< 50 m); sie können als Kondensatoren behandelt werden, wenn die Laufzeit der TE kleiner als $1/5 \dots 1/10$ der kürzesten durch die Messgeräturnformung erzeugten Periodendauer ist [17]; eine Auslöschung tritt dann nicht ein.

Bei grösseren Längen empfiehlt die TE-Arbeitsgruppe des CIGRE-Komitees 21 (Kabel) verschiedene Massnahmen, um die Verfälschung der Messung zufolge der erwähnten Interferenzen zu vermindern [18]. Vorausgesetzt sind Messfrequenzen unter 500 kHz. Die Massnahmen sind in der zu Fig. 14 gehörenden Tabelle angeführt und im folgenden beschrieben.

Eine Reflexion des TE-Impulses an dem vom Messgerät (in Fig. 14 links) abgelegenen Kabelende (in Fig. 14 rechts) wird durch Abschluss dieses abgelegenen Kabelendes mit der charakteristischen Kabelimpedanz R_0 vermieden. Zum spannungsmässigen Schutz des Widerstandes R_0 muss ein TE-freier Kondensator C_{k2} in Serie geschaltet werden. Für einen Fehler kleiner als 25 % soll der Kondensator C_{k1} und möglichst auch C_{k2} grösser als $0,25/R_0 f_0$ sein ($f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$, wobei f_1 und f_2 die untere bzw. obere Grenzfrequenz des Messgerätes sind). Für diesen Fall des Abschlusses mit der charakteristischen Kabelimpedanz R_0 über eine grosse Koppelkapazität C_{k2} kann als Messgerät ein Schmalbandgerät oder ein α - oder β -Breitbandgerät gewählt werden (Tabelle zu Fig. 14, Spalte 1).

Zur Eichung wird der gleiche Eichimpuls auf die beiden Kabelenden gegeben und als e_1 und e_2 gemessen. Das Messgerät wird dann auf den arithmetischen Mittelwert dieser beiden Anzeigen justiert. Will man aber die Dämpfung der TE-Impulse längs des Kabels besser berücksichtigen, so eicht man das Messgerät entsprechend dem Eichimpuls am entfernten Ende. Nach der ersten Hochspannungsmessung vertauscht man die beiden Kabelenden und wiederholt die Hochspannungsmessung. Sind die Messwerte bei Hochspannung Q' bzw. Q'' , so ist der korrigierte Wert:

$$Q = \sqrt{\frac{e_1}{e_2} Q' Q''}$$

e_1 Anzeige, wenn der Eichimpuls auf messgerätseitigem Kabelende ist;

e_2 Anzeige, wenn der Eichimpuls auf entferntem Kabelende ist.

Um an der Grösse der Kopplungskondensatoren C_{k1} und C_{k2} und der Speisung Kosten zu sparen, kann man bei Verwendung eines Schmalbandgerätes wesentlich kleinere Kopplungskondensatoren verwenden, indem man diese mittels der Induktivitäten L_{k1} und L_{k2} für die Messfrequenz auf Serienresonanz abstimmt (Tabelle zu Fig. 14, Spalte 2). Die Grösse der Kopplungskondensatoren C_{k1} und C_{k2} soll grösser als $0,4 \cdot \Delta f / f_0^2 R_0$ sein (Δf Bandbreite, f_0 Messfrequenz des Messgerätes). Die Eichung geschieht wie vorher.

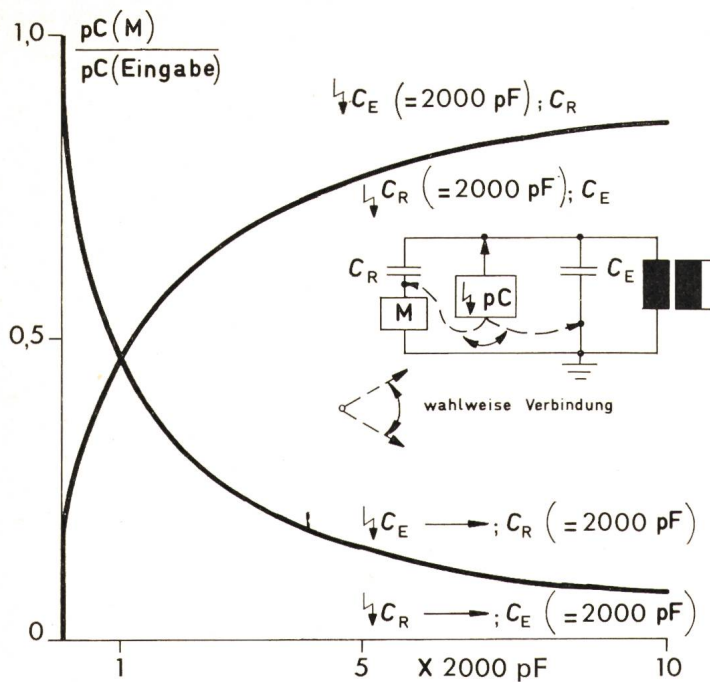


Fig. 11

Einfluss des Verhältnisses der Kapazitäten C_E und C_R im Messkreis auf die TE-Anzeige, je nach Ursprung der TE aus C_R oder C_E

- M Ankopplungsvierpol mit Messgerät
 $\downarrow pC$ Eichfunkenstrecke
 $\downarrow C...$ TE in C
 $C \rightarrow ...$ veränderliche Kapazität

Eine andere Möglichkeit, um die Intensität der reflektierten Welle zu reduzieren, ist der Abschluss des zu messenden Kabels durch ein TE-freies Kabel, dessen Länge eine störende Überlagerung von Impuls und seiner Reflexion ausschliesst (Tabelle zu Fig. 14, Spalte 3). Für ein α -Breitbandgerät genügen 200 m, für ein β -Breitbandgerät 400 m, da bei diesem die Zeit während welcher ein Fehler durch Überlagerung auftreten kann, doppelt so lange ist bei an sich gleicher Response-Frequenz (erst die 2. Amplitude ist die grösste). Allgemein ist die wünschenswerte Kabellänge $\lambda = T v$, wobei T die Response-Länge in μs ist, während der ein Fehler durch Überlagerung möglich ist: v ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Impulses. Falls die charakteristische Kabelimpedanz des zweiten Kabels von der des zu messenden (R_0) abweicht, ist sie durch Serieschaltung und eventuelle Parallelschaltung zweier solcher Kabel auf R_0 zu ergänzen. Zur Eichung wird wieder ein gleicher Impuls auf die beiden Enden des zu prüfenden Kabels gegeben und als e_1 und e_2 gemessen. Das Messgerät wird dann auf den arithmetischen Mittelwert dieser beiden Anzeigen justiert.

Nimmt man grössere Fehler der Anzeige in Kauf, so kann man die Messung ohne das Kabel abzuschliessen durchführen (Tabelle zu Fig. 14, Spalte 4). Mit einem α -Breitbandgerät kann man unter 30 % Fehlzanzeige bleiben. Da die Anzeige am Gerät je nach Eingabeort des Eichimpulses längs des Kabels variiert, wird vorerst an beiden Kabelenden der gleich grosse Eichimpuls eingegeben und gemessen als e_1 und e_2 . Der Minimalwert entlang des Kabels liegt erfahrungsgemäss bei etwa $0,6 e_2$. Sodann werden für die Eichung des Messgerätes 3 Fälle unterschieden:

a) Ist das Kabel kürzer als λ (gemäss der im vorhergehenden Absatz angegebenen Formel), so wird das Gerät gemäss dem arithmetischen Mittelwert justiert.

b) Ist das Kabel länger als λ , und der zum Eichimpuls am entfernten Ende gehörende Messwert e_2 grösser als der vom Ende beim Messgerät stammende Messwert e_1 , so wird das Messgerät gemäss $0,8 e_2$ justiert [Mittelwert aus Maximalwert (e_2) und Minimalwert ($0,6 e_2$)].

c) Ist das Kabel länger als λ , und der Messwert e_1 der grössere, so wird das Messgerät gemäss $0,5 e_1 + 0,3 e_2$ justiert [Mittelwert aus Maximalwert (e_1) und Minimalwert ($0,6 e_2$)].

Schliesslich kann man diesen Fehler aber reduzieren, wenn man eine 3-Positionen-Messung durchführt (Tabelle zu Fig. 14, Spalte 5). Dabei wird das TE-Verhalten in 3 Varianten gemessen: je ein Kabelende offen und schliesslich beide Kabelenden verbunden. Der Mittelwert der 3 Messungen, multipliziert mit einem Korrekturfaktor [18] (abhängig von der Kabellänge) ergibt den Wert der TE mit einem Fehler kleiner als 15 %, wenn das Kabel kürzer als 1000 m ist. Aber selbst ohne Korrekturfaktor bleibt der Fehler unter 25 %. Das Messgerät wird mittels eines Eichimpulses justiert, der am Messgerät-seitigen Kabelende aufgebracht wird.

Will man ausser der Grössenverteilung der TE-Impulse eine Lokalisation der Entladungen längs des Kabels, so muss man zu anderen Methoden greifen [17; 19].

Bei einem ungeschirmten Kabel ist das Prinzip der Messung relativ einfach: man zieht das Kabel in einem Behälter mit Isolierflüssigkeit durch eine Hochspannungselektrode und kann so den kritischen Ort leicht feststellen. Bei einem geschirmten Kabel — mit relativ hohem Schirmwiderstand — kann man diesen Schirmwiderstand dazu benutzen, Entladungen ausserhalb der den Schirm entlang laufenden Messelektrode, durch zu beiden Seiten der Messelektrode angebrachte Erdungsrollen abzufangen und abzdämpfen.

Ausser der Wanderwellenmethode, bei der der Ort mittels der Laufzeitdifferenz bestimmt wird, wird die Methode der

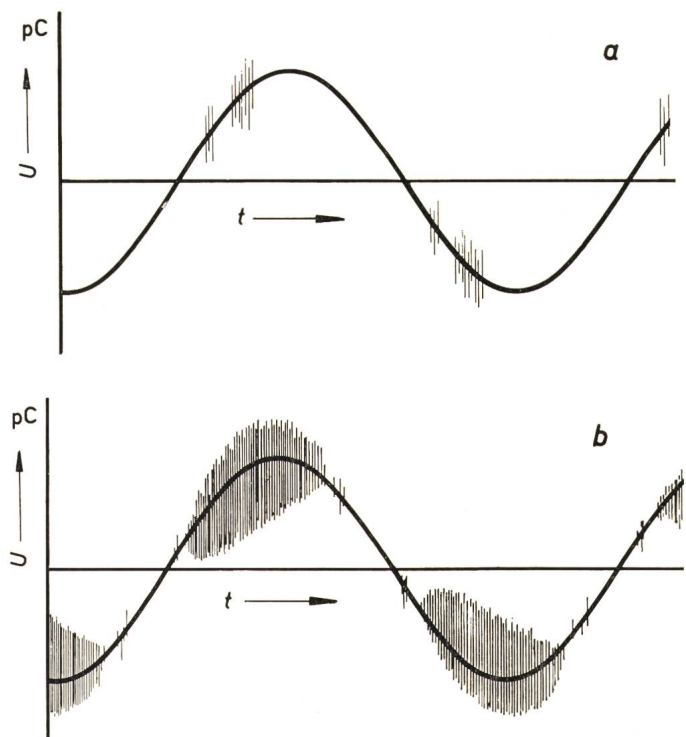


Fig. 12

Teilentladungen in mineralölprägniertem Papier

- a Beginn der Teilentladungen
 b längere Zeit nach dem Beginn bei gleichbleibender Spannung, oder kurz nachher bei weiterer Spannungssteigerung
 U Spannung; t Zeit

Frequenzmessung über das Frequenzband des Messgerätes verwendet: aus den Frequenzen mit den grössten Amplituden kann auf den TE-Ort geschlossen werden [20].

Bei mehradrigen Kabeln kann es von Vorteil sein, ein batteriebetriebenes Messgerät zu benutzen, um die TE auch auf Hochspannungsseite zu messen und so den 3-phasigen Betriebszustand zu kontrollieren.

6.5 Transformatoren

Das komplizierteste TE-Verhalten unter den bisher behandelten Apparaten zeigt zweifellos der Transformator. Im Gegensatz zu Durchführungen, Kondensatoren und Kabeln hat er ausser der kapazitiven Spannungssteuerung auch noch eine induktive gegen Erde oder eine der Phasen gegeneinander. Dadurch können auch noch TE zwischen galvanisch miteinander verbundenen Teilen des Apparates auftreten. Die TE werden ausser kapazitiv auch längs des Wicklungsleiters gegen Erde übertragen. Die hohen Frequenzen finden den kapazitiven Weg gegen Erde, die niederen laufen bevorzugt entlang der Wicklungen.

Wenn man von den Durchführungen absieht, deren TE-Kontrolle am besten vor dem Einbau in den Transformator durchgeführt wird — kann man nach ihrem Entstehungsort unterscheiden:

- TE zwischen Ober- und Unterspannungswicklung;
- TE von einer der Wicklungen gegen Kessel oder Eisenkern;
- TE innerhalb einer Wicklung am Rande von Windungslagen oder zwischen Windungen.

Die Erscheinungsbilder der TE im Oszillogramm entsprechend ihrem Ursprung — wie dies in den vorangehenden Ab-

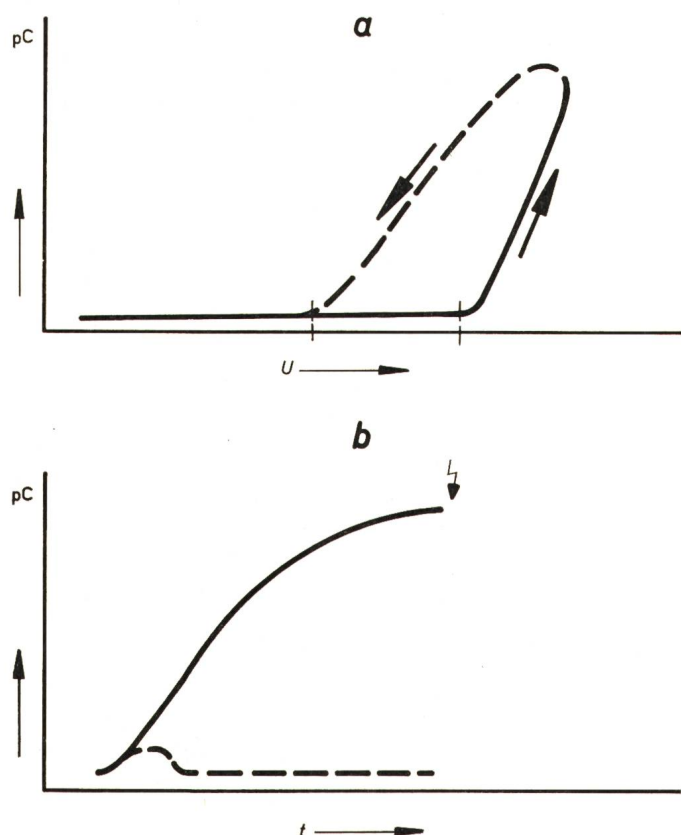


Fig. 13

Intensität von Teilentladungen

a Abhängigkeit von der Betriebsspannung

b Abhängigkeit von der Zeit bei gleichbleibender Spannung

schnitten dargestellt wurde — gelten prinzipiell auch hier; ebenso die Spannungsabhängigkeit, Zeitabhängigkeit und Phasenlage.

Anschlusspunkte für den Ankopplungsvierpol des Messgerätes sind: Erdseite der Hochspannungswicklung, Hochspannungsseite über einen Koppelkondensator. Hier kann auch die Durchführung benutzt werden, wenn diese einen vom Flansch trennbaren Erdbelag hat (ein Messbelag, der während des Betriebes auf Spannung liegt, ist nicht so günstig, da seine Kapazität gegen Erde entsprechend der Potentialsteuerung eine grosse Parallelkapazität zum Messkreis hat). Der von Erde zu isolierende Kessel wird weniger benutzt, da der Grundstörpegel hier sehr hoch ist.

Der tatsächlich gemessene Wert von TE hängt infolge des komplizierten Übertragungsverhaltens des Transformators sowohl vom Ursprungsort der TE ab als auch vom Anschlusspunkt des Ankopplungsvierpols. Misst man nun an den beiden oben angegebenen Anschlusspunkten, so kann man Rückschlüsse auf den Ursprungsort ziehen. Vorerst stellt man die Korrekturfaktoren für die Anschlusspunkte des Vierpols durch Eingabe von Eichimpulsen zwischen den folgenden zugänglichen Stellen fest:

- Hochspannungselektrode gegen Kessel;
- Hochspannungselektrode gegen Erdseite der Hochspannungswicklung;
- Erdseite der Hochspannungswicklung gegen Kessel.

Für jede Meßstelle ergibt sich dann je nach Eichstelle ein anderer Korrekturfaktor. Multipliziert man nun die bei der TE-Prüfung gemessenen Werte mit den möglichen Korrekturfaktoren für die beiden Anschlusspunkte des Vierpols, so wird ein Wertepaar am dichtesten beisammen liegen — z. B. bei Anwendung der Korrekturfaktoren für TE Hochspannungselektrode gegen Kessel. Damit ist eine grobe Lokalisierung getroffen.

Die Anleitung zu diesem Messverfahren wurde durch die Arbeitsgruppe: TE-Messung des Studienkomitees 12 der CIGRE zusammengestellt [21].

Genauere Lokalisierungen sind durch Wanderwellenmessung [22; 23], Frequenzanalyse [24; 25] (Messung der TE bei verschiedenen Messfrequenzen) oder Ultraschallmessung möglich [26]. Die Ultraschallmethode beruht auf der Ausbreitung der akustischen Signale im Transformator. An verschiedenen Stellen des Kessels werden von vornherein Meßstellen für Empfänger vorgesehen⁴⁾; der Bereich der erfassbaren Frequenzen muss auf jeden Fall oberhalb 10 kHz liegen, um die mechanischen Schwingungen nicht mitzumessen. Um 100 kHz ist die Dämpfung gerade so gross, dass Reflexionen nicht mehr stören. Diese Methode arbeitet rechnergesteuert, um Zufälligkeiten auszuschalten. Die Ultraschallregistrierung wird durch elektrisch erfasste TE ausgelöst.

Grenzwerte für noch zulässige TE können vorerst nicht angegeben werden [21].

7. Schlussbemerkungen

Da die Teilentladungsmessung eine sehr empfindliche Qualitätskontrolle elektrischer Hochspannungsisolierungen ermöglicht, wird sie immer mehr als Stückprüfung eingeführt werden. Bei der Prüfeinrichtung muss daher vor allem Wert

⁴⁾ s. General Electric Company (USA): Anlage zur Isolationsprüfung und Fehlerlokalisierung in einem elektrischen Apparat (Patentschrift 457 616 CH).

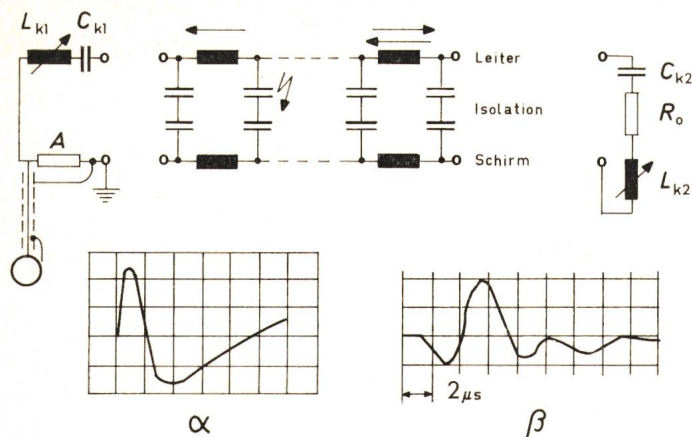


Fig. 14

TE-Messung an Kabeln

Oben: Ersatzschaltbild

CK_1, CK_2 Kopplungskapazitäten
 LK_1, LK_2 Abstimminduktivitäten
 R_0 charakteristische Kabelimpedanz
 A Ankopplungsvierpol

Unten: α - und β -Response des Messgerätes

Tabelle verschiedener Messmethoden nach [22]

Spalte	1	2	3	4	5
C_{k1}	10...200 nF	0,5...2 nF	10...200 nF	10...200 nF	3 Posit. Messung
L_{k1}	—	L reson.	—	—	
C_{k2}	10...200 nF	0,5...2 nF	Kabel	—	
R_0	Z Kabel	Z Kabel	∞	∞	
L_{k2}	—	L reson.	—	—	
Schmalband	+	+	—	—	—
Breitband α	+	—	+	+	+
Breitband β	+	—	+	—	—

darauf gelegt werden, dass der Prüfablauf so rationell wie möglich ist. Äussere Störungen sollen daher durch einwandfreie, nämlich TE-freie Speisung und einen störungsfreien Prüfraum unbedingt ferngehalten werden. Ausserdem ist es aber wichtig, dass bei TE-Stückprüfungen keine lange Prüfdauer vorgeschrieben wird, da ein grosser Zeitbedarf den Rationalisierungsmassnahmen in der Herstellung zuwider läuft.

Literatur

- [1] T. Praehauser: Ionisationsmessung (Teilentladungsmessung) an Hochspannungsapparaten — eine Stückprüfung. E und M 86(1969)5, S. 193...201.
- [2] M. Pieper und H.-J. Vorwerk: Erzeugung kurzzeitiger Überspannungen bei der Ionisationskontrolle von Messwandlern und Leistungstransformatoren. Brown Boveri Mitt. 58(1971)6, S. 196...200.
- [3] T. Praehauser: Messungen von Ionisation an Kondensatoren. Bull. SEV 57(1966)16, S. 701...708 + 58(1967)2, S. 74.
- [4] Mesure des décharges partielles. Publication de la CEI No. 270, 1970.
- [5] T. H. Praehauser: Mesures des décharges partielles dans les transformateurs et leurs éléments. Partie B: Comparaison d'instruments et circuits de mesure. Rapport CIGRE No. 12—10, 1968.
- [6] G. Mole: Basic characteristics of corona detector calibrators. Trans. IEEE PAS 89(1970)2, p. 198...204.
- [7] 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.
- [8] F. H. Kreuger: The point discharge gap. Source of constant partial discharges. Electrotechnik 41(1963)16, p. 364...366.
- [9] F. H. Kreuger: Signification de la détection des décharges. Electra -(1969)11, p. 53...98.
- [10] Geschirmte Kabinen und Raumabschirmungen. Datenbuch 1971/72. München, Siemens AG, 1971.
- [11] V. Heyne: Erweiterung des Transformatorenprüffeldes und Neubau eines Hochspannungslaboratoriums. BBC-Nachrichten 51(1969)2, S. 67...73.
- [12] A. Leschanz und G. Oberdorfer: Das neue Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Graz. E und M 85(1968)12, S. 527...532.
- [13] G. Leroy e. a.: Essais diélectriques et très hautes tensions. Le laboratoire à très haute tension des Renardières. Rev. Gén. Electr. 80(1971)10, p. 768...777.
- [14] H. Gsodam: Das neue Hochspannungslaboratorium und Transformatorenprüffeld der Elin-Union im Werk Weiz. ÖZE 19(1966)5, S. 230...237.
- [15] A. Imhof: Das neue Hochspannungslaboratorium der Messwandler Bau GmbH Bamberg: STZ 67(1970)10, S. 172...178.
- [16] G. Mole, P. G. Parrott and P. G. Kendall: Measurements of the magnitude of internal discharges in power capacitors. Proc. IEE 116(1969)5, p. 847...856.
- [17] F. H. Kreuger: Discharge detection in high voltage equipment. London, Temple Press, 1964.
- [18] G. Mole and F. H. Kreuger: Mesure des décharges sur des câbles de grande longueur. Electra -(1969)8, p. 53...82.
- [19] F. H. Kreuger: Détection des décharges, méthodes recommandées pour les essais de détection des décharges dans les câbles. Rapport CIGRE No. 209, Annexe I, 1966.
- [20] J. Galand: Localisation des décharges partielles dans les câbles par une méthode d'ondes stationnaires. Rev. Gén. 80(1971)5, p. 399...405.
- [21] Mesures des décharges partielles dans les transformateurs. Electra -(1971)19, p. 13...65.
- [22] A. T. Thoeng: Localisation des décharges partielles dans les transformateurs. Quelques aspects de la méthode basée sur la détection de l'onde progressive. Rapport CIGRE No. 12-02, 1968.
- [23] T. Bertula, V. Palva et E. Talvio: Mesures de décharges partielles sur les transformateurs dans l'huile. Rapport CIGRE No. 12—07, 1968.
- [24] W. Widmann: Messung innerer Teilentladungen bei Transformatoren. Bull. SEV 58(1967)22, S. 1001...1009.
- [25] R. T. Harrold and A. M. Sletten: Corona location in transformers by radio frequency spectrum analysis. Trans. IEEE PAS 89(1970)7, p. 1584...1602.
- [26] S. Yakov e. a.: Effet de couronne dans les transformateurs de puissance. Rapport CIGRE No. 12—06, 1968.

Adresse des Autors:

Dr. Th. Praehauser, Emil Haefely & Cie AG, Postfach, 4028 Basel.