Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 79 (1988)

Heft: 13

Artikel: Teilentladungsmessung an Hochspannungsapparaten in ungeschirmten elektrischen Verteilanlagen

Autor: Klaus, A. / Gerlach, H. G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904052

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: 09.12.2025

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

Teilentladungsmessung an Hochspannungsapparaten in ungeschirmten elektrischen Verteilanlagen

A. Klaus, H.G. Gerlach

Die Früherkennung von Isolationsschäden an Betriebsmitteln mit Hochspannungs-Dielektrikum ist ein wichtiges Anliegen der Elektrizitätswerke. Die FKH hat eine mobile Messeinrichtung für Teilentladungsmessungen vor Ort entwickelt. Es wird über Probleme der Messtechnik sowie über erste Messresultate berichtet.

La détection précoce des défauts d'isolation sur les moyens opérationnels de haute tension est une préoccupation importante des entreprises d'électricité. La FKH a développé un dispositif mobile permettant le mesurage des décharges partielles sur les lieux. On présente quelques problèmes de métrologie ainsi que les premiers résultats de mesure.

Adresse der Autoren

Dr. *H.G. Gerlach*, geschäftsführender Versuchsleiter,
A. Klaus, Mitarbeiter, Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Dörflistrasse 67, 8050 Zürich.

Die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) befasst sich seit Anfang der achtziger Jahre mit dem Problem der Früherkennung von Isolationsschäden an Messwandlern. Anlass dazu war gegeben, nachdem in einigen Elektrizitätswerken Kurzschlüsse an Spannungswandlern oder an kombinierten Strom/Spannungswandlern vorgekommen waren. Ein Kurzschluss in einem Messwandler am Netz führt zwangsläufig zur Zerstörung des Apparates, wobei von den Porzellansplittern des explodierenden Isolators eine erhebliche Personengefährdung ausgeht.

Unter mehreren diagnostischen Verfahren (z.B. Ölanalysen, tan-δ-Bestimmung, TE-Messung an erhöhter Wechselspannung) räumt man der Teilentladungsmessung (kurz TE) wegen deren signifikanter Aussagekraft gute Chancen ein. Voraussetzungen sind, dass es gelingt, die Messungen am Aufstellungsort durchzuführen (ohne Umplazieren bei geerdetem Gehäuse) und dass die in den Anlagen herrschenden Störpegel beherrscht werden. Inzwischen wurde eine passende Einrichtung (Messfahrzeug) entwikkelt, welche den Mitgliedern der FKH anlässlich des 50-Jahr-Jubiläums der FKH im Sommer 1987 vorgestellt worden ist. Das Messfahrzeug ist seither mehrfach eingesetzt worden, wobei nicht nur Spannungswandler, sondern auch einige SF_6-Schaltanlagen gemessen wurden.

Nachdem erste Referenzen vorliegen, hofft man, auf dem Wege konkreter Aufträge möglichst viele Ergebnisse und weitere Erfahrungen sammeln zu können. In Zusammenarbeit mit den auftraggebenden Elektrizitätswerken sollten dann auch allgemeine Fortschritte in der Beurteilung von Isolationszuständen älterer Apparate möglich sein. Letztlich wäre eine statistische Aussage über die Einschaltdauer am Netz und die TE-Messwerte (Lebensdauerregression) von grossem Interesse.

1. Allgemeine TE-Problematik

Teilentladungen sind transiente Feldzusammenbrüche in lokal überbeanspruchten Dielektrika, welche pulsförmige Signalströme i_s über einen im wesentlichen aus Kapazitäten bestehenden Hochspannungskreis treiben (Fig. 1). Messtechnisch lassen sich die Signalströme nach verschiedenen Methoden aus dem Hochspannungskreis auskoppeln, z.B. induktiv über Erdanschlüsse des Objekts [1] oder kapazitiv über Koppelkondensatoren und Messwiderstände C_k, R_m [2]. Für bestimmte Formen von dielektrischen Mängeln liegen Forschungsarbeiten vor, welche den Stromverlauf $i_s(t)$ oder andere Pulsgrössen wie Frequenzgang, Häufigkeit und Intensität beschreiben [3].

Unter TE-Messung versteht man allerdings die sogenannte scheinbare Pulsladung $q_s = \int i_s \mathrm{d}t$, welche mit einem entsprechenden transienten Spannungseinbruch $\triangle u$ an der Hochspannungsklemme in Verbindung zu bringen ist. Der Signalsprung $\triangle u$ an einer Klemme U, die unter Prüfbedingungen an Wechselspannung mit Scheitelwert $\hat{u}$ liegt, wird von einer Fehlerstelle im Dielektrikum gespeist (q_1, q_2) oder, zu Vergleichszwecken, in gleicher Grössenordnung ohne Spannung von einem äusserlich an die Klemmen des Objekts angeschlossenen Eichgenerator (q_{cal}). Das Grössenverhältnis $\triangle u/\hat{u}$ erreicht viele Zehnerpotenzen (über 100 dB); damit ist die relativ hohe Sensibilität der Messmethode anschaulich erklärt, die natürlich auch Anfälligkeit gegenüber Störbeeinflussung von aussen bedeutet. Unter den nicht drahtgebundenen Störquellen (Strahlung) haben alle jene elektromagnetischen Einflüsse,

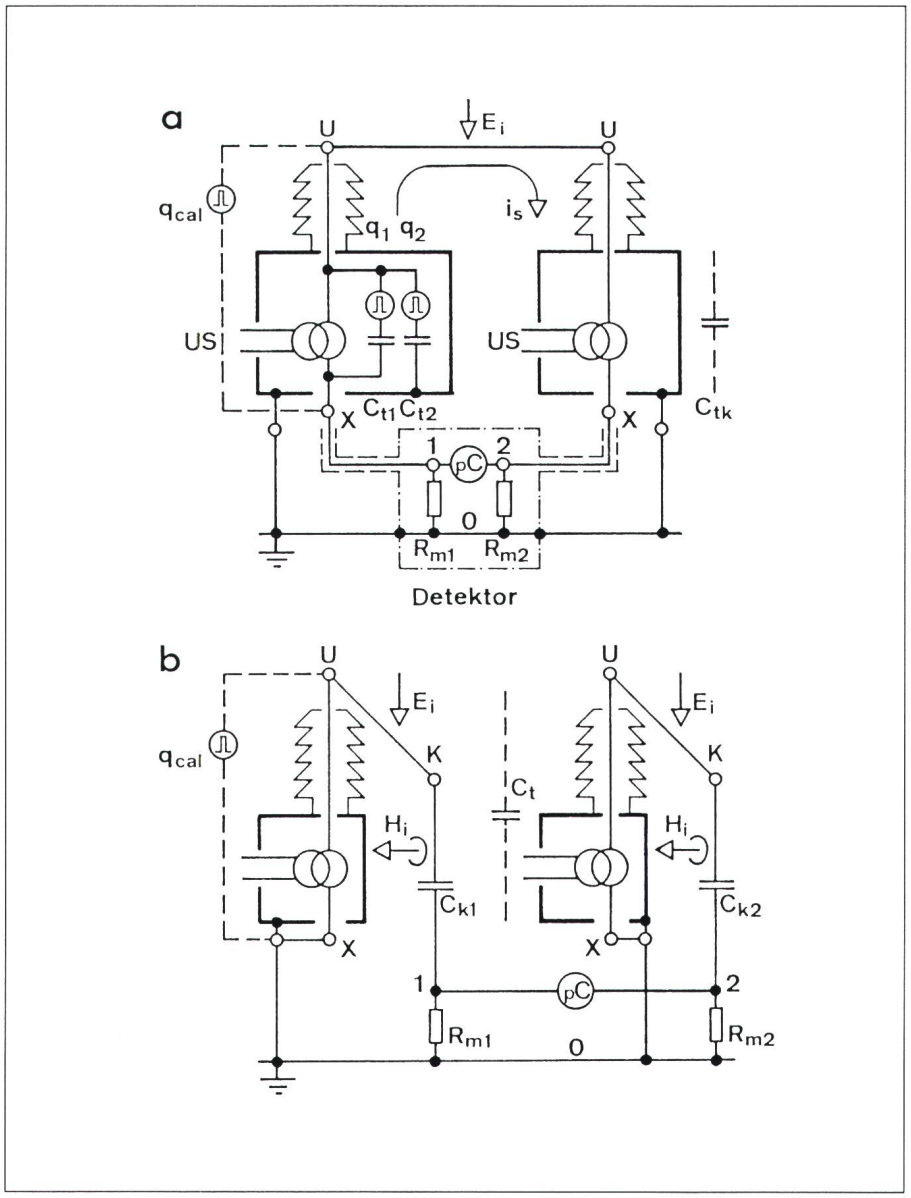
welche den Radioempfang stören würden (radio interference), sowie auch die einfallenden Radiowellen selbst Bedeutung (E_i in Fig. 1). Die TE-Messung ist ein genormtes Laborverfahren [4; 5] und findet breite Anwendung bei der Abnahme von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung, soweit Hochspannungsdielektrika involviert sind.

In der Regel wird die TE-Messung zusammen mit anderen Isolationsprüfungen vorgenommen. Sie liefert in Ergänzung zum engen Entscheidungsspielraum der Halteprüfungen (bestanden/nicht bestanden) weitere Informationen, ohne das Dielektrikum zu zerstören. Beispielsweise kann festgestellt werden, ob man mit Risiken zu rechnen hat, die als verdeckte Fabrikationsmängel bei der Spannungsprüfung nicht herausgekommen sind, oder ob Ansätze zu einer frühen Alterung erkennbar sind. Nicht zu unterschätzen sind die hohen Anforderungen, welche auch im Labor an einen TE-Messplatz zu stellen sind bzw. an die Erfahrung des Prüfpersonals, wenn in einem Labor trotz aller Anstrengungen ein genügender Störabstand nicht hergestellt werden kann. Der TE-Detektor, ein handelsüblicher Bandpass-Spannungsmesser (pC in Fig. 1), kann nach Art der Scheringbrücke über zwei Messwiderstände R_{m1}, R_{m2} und Kanäle 1, 2 verfügen, so dass sich Common-Mode-Störungen elektrisch unterdrücken lassen [2; 6]. Trotzdem bleiben viele Randbedingungen zu erfüllen, um Störeinflüsse völlig auszuscheiden.

2. Anlass und Zweck von Vor-Ort-TE-Messungen

Die Übertragung der Labor-TE-Messtechnik auf ungeschirmte Vor-Ort-Umfeldbedingungen ist wegen der Vielfalt von variablen Störeinflüssen problematisch. Dem steht eine weit gespannte Palette von Erwartungen gegenüber, die sich aus einer Fülle von grundsätzlich möglichen Informationsinhalten ableiten. Entsprechende Entwicklungsansätze sind aber meistens noch nicht ausgereift, und es ist dringend nötig, bei vielen Vor-Ort-Einsätzen praktische Erfahrung im Umgang mit der Messtechnik zu gewinnen.

Beispielsweise kann man bei den SF_6-Schaltanlagen Betriebsstörungen nicht vollständig ausschliessen, selbst dann nicht, wenn Abnahmetests an der fertig installierten Anlage erfolg-



Figur 1 Beispiele für Common-Mode-Störunterdrückung an paarweise vor Ort angeschlossenen Spannungswandlern

a Brückenschaltung ohne Koppelkondensatoren
b Doppel-Straight-Schaltung/Parallelauskopplung

Wandler	
U–X	Hochspannungswicklung, Klemmen
C_t, C_{tk}, C_{t1}, C_{t2}	Ersatzkapazitäten
q_1, q_2,	Fehlerquellen
i_s	Signalstrom
US	Unterspannungswicklung (Speisung)
Messeinrichtung	
K	Hochspannungsklemme
C_{k1}, C_{k2}	Kopplungskapazitäten
R_{m1}, R_{m2}	abgleichbare Messwiderstände
pC	Schmalband-Spannungsmesser
q_{cal}	elektronischer Eichgenerator
Störstrahlung	
E_i	elektrische Feldstärke
H_i	magnetische Feldstärke

Wesentliche Verbindungen
U–U, X–1, X–2 (a)
zweimal U–K beim Messen und zusätzlich K–K beim Abgleich (b)

reich bestanden worden sind [3]. Hier hofft man, mit Hilfe von TE-Messungen Zusatzinformationen über den Isolationszustand des Systems zu erhalten. Wenigstens für wandernde Teilchen hätte man aufgrund von Art und Grösse der Entladung durchaus eine Chance, gelegentlich ein aussagefähiges TE-Resultat zu erhalten. Weiteres Anliegen ist bei diesen Schaltanlagen wie bei den Kabelsystemen die Fehlerortung, wenn möglich nicht nur im Neuzustand, sondern in Form einer dauernden Überwachung im Betrieb. Tatsächlich enthält die Norm IEC 517 [7] bereits einen Hinweis auf TE-Vor-Ort-Messung, während die allgemeine Messpraxis jedoch noch nicht in der Lage ist, die gestellten Begehren zu erfüllen.

Bei den Spannungswandlern geht es um den Zustand von älteren Öl-Papier-Dielektrika in Apparaten, die sich schon seit mindestens zehn Jahren dauernd am Netz befinden, und von denen einzelne tatsächlich explodiert sind. Als mitbestimmend für die besondere Messwandlerproblematik muss man sehen, dass diese Geräte nicht wie die viel grösseren Leistungstransformatoren mit Überwachungseinrichtungen ausgerüstet sind; auch sind andere Methoden bereits eingeführt, mit denen die TE-Untersuchung in Konkurrenz tritt (Ölanalyse). Der Aufwand für eine TE-Vor-Ort-Messung an Spannungs- oder an kombinierten Strom/Spannungswandlern scheint aus zwei Gründen gerechtfertigt:

- erstens, weil das Umplazieren bzw. der Transport von Wandlern in ein Labor mit Risiken und recht hohen Kosten verbunden ist,
- zweitens, weil die elektrische TE-Kontrolle bestmögliche Signifikanz zu leisten verspricht, selbst wenn die in einem Labor erreichbare Messempfindlichkeit vor Ort nicht ganz gegeben ist.

Man erwartet ein diagnostisches Instrumentarium, welches folgende Eigenschaften aufweisen muss:

- ausreichend niedriger Störpegel durch elektrische Störunterdrükkungsmassnahmen; der Befund ist qualitativ zu werten (dB Störabstand),
- ausreichende Empfindlichkeit, welche durch Störunterdrückung allein noch nicht nachgewiesen ist; Funktionssicherheit bei jeder Lage der TE-Quelle im Objekt und bei jeder möglichen Wandlerkonstruktion; Reproduzierbarkeit der Messwerte im Elektrizitätswerk und beim Hersteller.

3. Schaltungen zur Störunterdrückung

Spannungswandler werden ähnlich wie Leistungstransformatoren am einfachsten über die Unterspannungswicklung erregt. Es liegt nahe, analog dem Brückenkonzept in [4] eine Art Scheringbrücke nach Fig. 1a aufzubauen, die aus zwei gleichen Objekten einer Dreiphasenaufstellung im Schaltfeld besteht. Die Wicklungskapazitäten wirken wechselseitig als Testobjekt- bzw. Kopplungskapazität C_{tk}. Dabei hatte man sich vorgestellt, dass nur durch Lösen der Fusspunktklemme X von Erde ein Hochspannungskreis ausreichender Empfindlichkeit gebildet würde, der im Prinzip aus den Teilkapazitäten C_{t1} über den Wicklungen links und rechts bestehen müsste. Zur Speisung können die in Fig. 1 angedeuteten Unterspannungswicklungen US in Reihe oder parallel an eine frequenzvariable Sinusstromquelle angeschlossen werden. Die Eichung muss getrennt erfolgen (q_{cal} an Klemmen U–X links bzw. rechts), weil sonst (U–O) ein Common-Mode-Signal an der Brücke entsteht, das gleichsinnige Ströme über die Messwiderstände R_{m1}, R_{m2} treibt und nur ein Nullsignal über dem abgeglichenen Brückenzweig 1–2 erzeugt.

Leider funktioniert das Verfahren nicht immer. Wenn man sich die verteilten Wicklungskapazitäten vereinfacht als eine Parallelschaltung C_{t1}, C_{t2} vorstellt, so hängt offensichtlich die Messempfindlichkeit von der Lage der TE-Quelle im Verhältnis zu den Ersatzkapazitäten ab (q_1/C_{t1}, q_2/C_{t2}). Beispielsweise wird eine Quelle q_2 im Pfad C_{t2} eine Signalstromverteilung i_s hervorrufen, die von der zuerst angenommenen q_1/C_{t1} wesentlich verschieden ist. Unter Umständen kann ein vollständiger Empfindlichkeitsverlust eintreten, wenn der Strom an den Messwiderständen vorbei direkt auf Erde abgeleitet wird. Wesentliche Streukapazitäten vom Kopf des Wandlers auf Erde wirken ähnlich, wobei man sich den Sitz der Insuffizienz im oberen Ölraum (Isolator) vorstellen könnte.

Der genannte Nachteil kann in der abgewandelten Doppel-Straight-Schaltung nach Fig. 1b nicht auftreten, weil der Wicklungsfusspunkt X mit dem Gehäuse und mit Erde verbunden bleibt. Mit der Einführung von symmetrischen Koppelkapazitäten C_{k1}, C_{k2} befinden sich die Testobjekte C_t in betriebsrichtiger Lage gegenüber Erde. Dies kommt auch beim Eichen zum Ausdruck, indem die Eichquelle q_{cal} betriebsrichtig an U–O anzuschliessen ist, was von vornherein alle Streukapazitäten des Objekts in die Ersatzkapazität C_t einbezieht. Der Vorteil der Brückenschaltung (Einsparung von Koppelkapazitäten) muss allerdings aufgegeben werden.

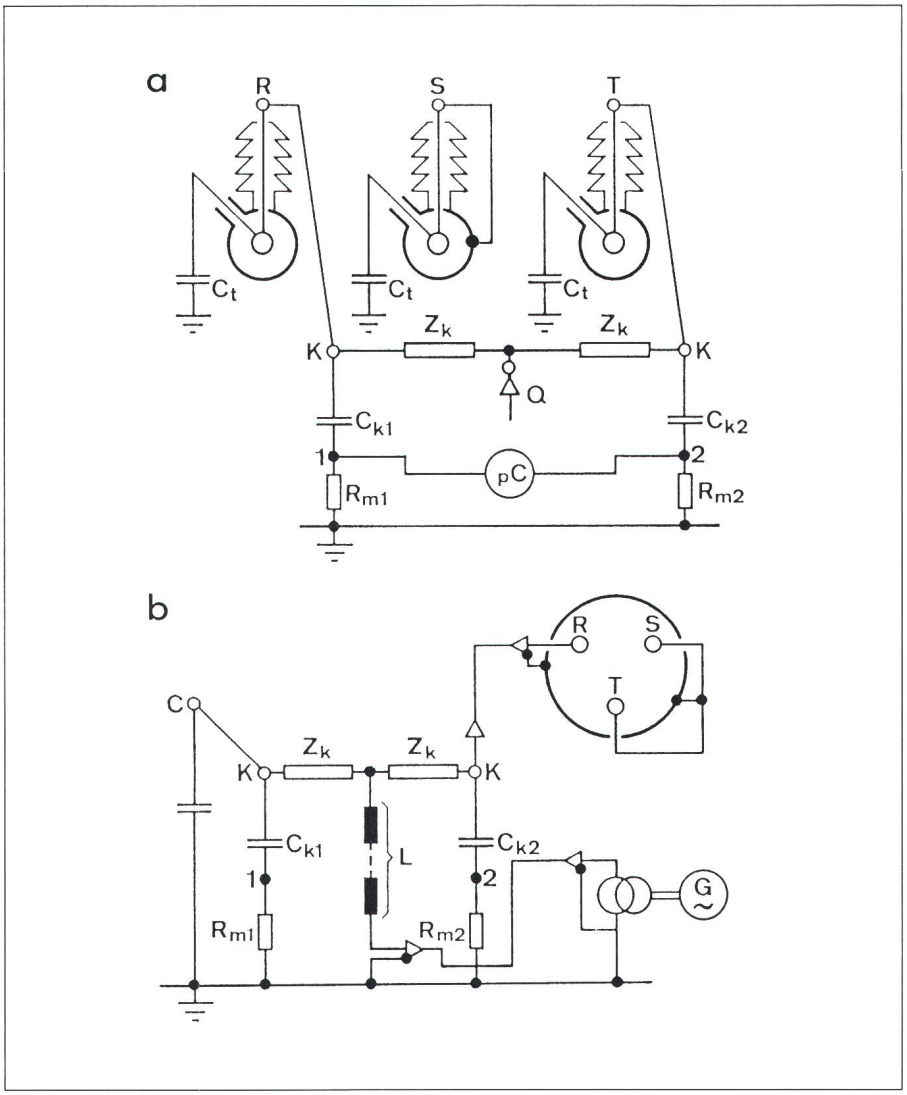
Die Doppel-Straight-Schaltung leistet in Sachen Störunterdrückung effektiv nicht weniger als die Brückenschaltung, obgleich die von den Hochspannungsverbindungen U–K ausgehenden eigenerregten Koronaeinflüsse als nicht unterdrückbar (non common mode) zu bewerten sind. Geht man davon aus, dass triviale Installationsfehler wie mangelhafte Kontakte, mangelhafte Feldaussteuerung, drahtgeführte Netzbeeinflussung usw. vermieden werden, so bleiben nur elektromagnetische Einkopplungen durch elektrische und magnetische Feldstärken E_i, H_i. Diese rühren von Langwellensendern oder von anderen Störstrahlern in deren Frequenzbereich (z. B. auch Fremdkorona) her. Im Vergleich der Schaltungen nach den Figuren 1a und 1b schneidet die letztere sogar besser ab, weil sie nicht nur elektrische, sondern auch magnetische Feldstärken unterdrücken kann. Auch die deterministische Eigenschaft kann von Bedeutung sein: Im Falle eines deutlichen TE-Befundes möchte man wissen, ob das linke oder rechte Objekt fehlerbehaftet ist. Ohne Eingriff in den Hochspannungskreis (C_k, R_m links und rechts unverändert) kann man in Figur 1b einfach den Spannungsmesser pC über 1–0 bzw. 2–0 anklemmen und erhält ein zwar gestörtes, aber eindeutiges, individuelles Resultat (einfach straight). Dies ist im Falle von Figur 1a nicht möglich, weil der Signalstrom beide Messwiderstände in Reihe durchfliessen muss.

Ein schmalbandiges Detektorsystem [6] vermag einen weiteren Beitrag an die Störunterdrückung zu leisten, vorausgesetzt, dass nur wenige Störsender in der Nähe der Mittenfrequenz (f_0) zu unterdrücken sind. Die gegenüber breitbandigem Messen geringere Pulsauflösung spielt bei Vor-Ort-Messungen keine wesentliche Rolle. Wenn ein relativ störungsfreies Fenster in einem stark gestörten Frequenzband verwendet werden muss (z. B. Küsten-

funkaktivität zu gewissen Tageszeiten), so ist der Nutzen der Schmalbandmethode allerdings gering. Ganz allgemein ändert sich der Störabstand im Verhältnis schmal- oder breitbandig nicht, wenn die Spektren der TE-Signale und der harmonischen Störer je ungefähr denselben Frequenzumfang haben.

Die Schmalbandmessung hat dagegen andere Vorteile, die zum Ausdruck kommen, wenn man Messkreise mit hochspannungsseitiger Einspeisung (Hocheinspeisung) vor Ort betreiben muss. Solche Fälle kommen bei Stromwandlern oder bei anderen passiven Objekten vor. Die FKH verwendet in der Regel ihre sinuserregten Resonanzkreise als Speisequelle [8]. Brükkenähnliche Schaltungen nach Figur 1 können nicht ohne weiteres durch eine gemeinsame Hocheinspeisung betrieben werden. Es werden hochohmige Entkopplungsimpedanzen (Filter auf Hochspannungspotential) benötigt. Diese lassen sich selektiv angepasst an den Schmalband-Arbeitsbereich besonders wirkungsvoll herstellen.

Als Realisierungsbeispiele von Doppel-Straight-Schaltungen mit Hocheinspeisung sind in Figur 2 die Schaltungsaufbauten für die SF_6-Anlageprüfung mit TE-Messung dargestellt. Die Sperrkreise Z_k sind auf identischen Frequenzgang abgestimmt bei einer umschaltbaren Mittenfrequenz $f_0 = 100/150$ kHz mit fester Bandbreite $\triangle f = 10$ kHz. Das Einmessen erfordert zusätzlich zum Brückenabgleich und zum Eichen einen Abstimmvorgang, indem bei angelegtem Eichgenerator durch kontinuierliches Ändern von f_0 am Detektor ein Anzeigemaximum gesucht wird. Für den Brückenabgleich werden die Sperrkreise Z_k kurzgeschlossen und ein Anzeigeminimum hergestellt. Das Eichen erfordert die Speisung mit q_{cal} zwischen den Klemmen R–O sowie die Entfernung der Kurzschlussverbindung über den Sperrkreisen (K–K). Danach ist die Schaltung betriebsbereit. Die auf Hochspannungspotential liegenden Sperrkreise erreichen ein relatives Impedanzmaximum Z_k/R_m = etwa 50...100.

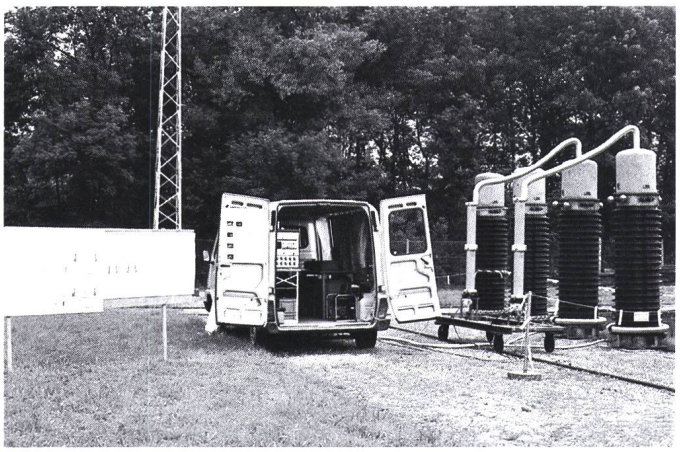


Figur 2 Doppel-Straight-Schaltung mit Hocheinspeisung durch Resonanz-Stromquellen, Beispiele für TE-Messung an SF_6-Anlagen

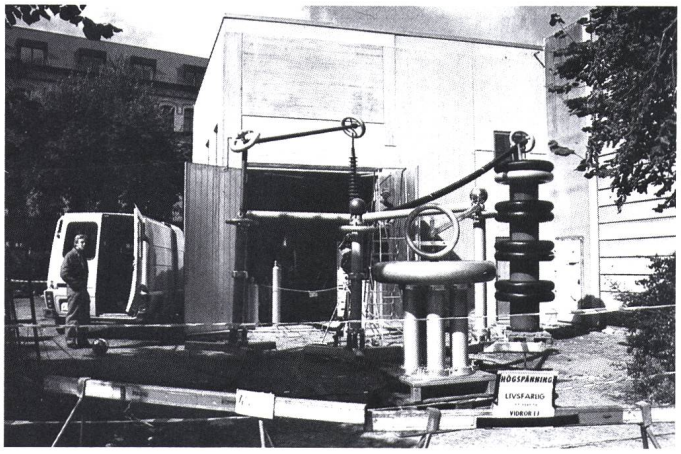
a	symmetrische Anordnung vor Freileitungseinführung in Einleiter-Rohranlage hoher Spannung über 400 kV
b	unsymmetrische Anordnung mit Testkabeleinspeisung in Dreileiter-Rohranlage mittlerer Spannung <170 kV
R/S/T	Phasenanschlüsse
C_k	Koppelkondensatoren
Q	Spannungsquelle allgemein
L	Serienresonanz-Spulen
C	Kompensationskondensator
G	Sinus-Generator mit variabler Frequenz
Z_k	Kopplungs-Sperrkreise 100–150 kHz/10 kHz

4. Erste Ergebnisse aus Wandlermessungen

Unabhängig von der Schaltung (Fig. 1a oder 1b) wurden in sechs verschiedenen Freiluftanlagen bei trockenem Wetter mit Brückendetektoren Störpegel von einigen pC gemessen (2...10 pC bis ungefähr Messspannung $U_1 = 1{,}2\ U_m/\sqrt{3}$). Bei erhöhter Messspannung $U_2 = 1{,}2\ U_m$ steigt der Pegel spannungsabhängig bis etwa 25 pC, wobei sich Koronaentladungen und andere Einflüsse (z.B. sporadische Partikelentladung) nicht eindeutig trennen lassen; der Pegel kann auch kleiner sein, wenn sporadische Einzelpulse nicht gezählt werden. Es wurden Brücken-Unterdrückungsfaktoren von 100...200 erreicht, die man nur mit ausreichender Signalstärke im Vergleich des Messgerätes pC an 1–0 und an 1–2



Figur 3 Freiluftmessplatz bei der FKH-Versuchsstation Däniken im Juni 1987
Rechts die zu prüfenden Wandler in Doppel-Straight-Schaltung (Fig. 1b)



Figur 4 Aussenaufstellung in einer 110-kV-Unterstation, Kärnten, bei den Österreichischen Draukraftwerken (OeDK) im Januar 1988
Doppel-Straight-Schaltung nach Figur 1a

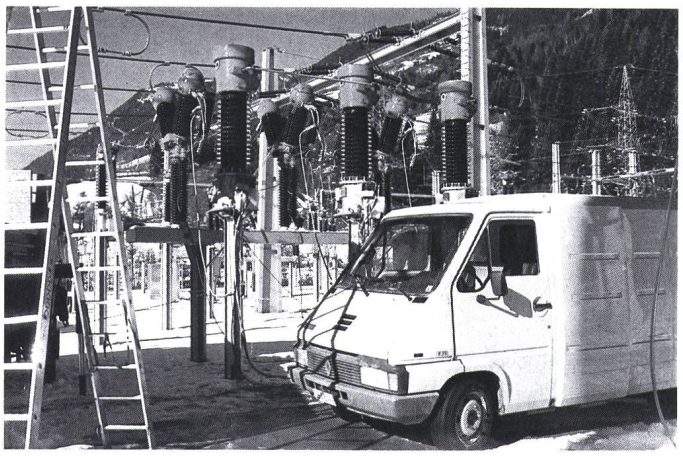
angeschlossen (Fig. 1) verifizieren kann, während die Eichquelle q_{cal} = 100...1000 pC auf die Klemmen U–O speist. Nach der Schweizer Norm [9] werden für neues Material TE-Messwerte von maximal 5 pC beim ersten ($1{,}2\ U_m/\sqrt{3}$) und maximal 10 pC beim zweiten Spannungsniveau zugelassen ($1...1{,}2\ U_m$). Die ältere, internationale Norm [5] enthält Grenzwerte von 10 pC bzw. 100 pC. Für Vor-Ort-Messungen und für alte Isolationen gibt es keine Normen, aber es wäre realistisch, entsprechend den messtechnischen Voraussetzungen der FKH Grenzwerte von 20 pC (U_1) bzw. 50 pC (U_2) ins Auge zu fassen, die einem erreichbaren Störabstand von Faktor 2 entsprechen. Messwerte über den Grenzwerten stehen mit Sicherheit für defekte Wandler. Der Ergebnisbereich Störpegel bis Grenzwert ist unsicher und würde jedenfalls eine Empfehlung zur Nachkontrolle im Lieferwerk auslösen.

Die zahlenmässige Ausbeute an Befunden ist noch gering. Immerhin weiss man heute genau, dass die Brükkenschaltung nach Figur 1a nicht verwendet werden darf, wenn geerdete Steuerbeläge der Hochspannungswicklungen nicht herausgeführt sind. Wo bei neueren Apparaten die Abschirmungen eines Spannungs- und eines Strommessystems auf Klemmen geführt sind, die man am Gehäuse *oder* am isolierten Fusspunkt X erden kann, bietet die Schaltung nach Figur 1a dagegen Vorteile, indem durch Umschaltungen C_{t1}/C_{t2} eine Lokalisierung des Fehlers möglich wird. Nicht nur zwischen links oder rechts kann unterschieden werden, sondern auch zwischen dem Dielektrikum des Spannungs- und des Strommesssystems. Bei den Wandlern Nr. 9 und 10 (Tabelle I) war es auf diese Art möglich festzustellen, dass in beiden Fällen je einzeln nur die Stromwandlerteile betroffen waren und dass die geschädigten Systeme unterschiedlich starke TE produzierten (die TE-Aussage und die Gasanalyse waren aber quantitativ nicht zu korrelieren). Gleichzeitig ist klar geworden, dass ohne Kenntnis der konstruktiven Gegebenheiten ein hohes Risiko für Nichterfassung vorhandener TE-Ströme besteht. In der entsprechenden Schaltung (Stromwandlerbeläge links und rechts nicht mit X verbunden, sondern mit 0 gemäss C_{t2} in Fig. 1a) kam erwartungsgemäss ein Null-Ergebnis heraus. Das Risiko der Nichterkennung besteht nicht in Figur 1b.

Messungen aus jüngerer Zeit (1987–88) haben auch insofern relevante Ergebnisse hervorgebracht, als der FKH einige sortierte Wandler zu Untersuchungszwecken zur Verfügung gestellt worden sind, die bereits als schadhaft bekannt waren und über die Labor-Messprotokolle der Hersteller vorlagen. In Tabelle I sind diese Messungen dargestellt.

Bei den acht Wandlern der Gruppe I waren die TE-Intensitäten nicht sehr stark ausgeprägt. Insofern als die TE im Bereich zwischen Störpegel und

Figur 5 Städtische Unterstation 132 kV, Schweden, im September 1987
Schaltanlage im Gebäude. Hocheinspeisung mit Resonanzkreis. Schaltung nach Fig. 2b



Messobjekt		Messung FKH Vorort-TE		Andere Messungen Labor-TE			
Gruppe	Nr.	pC(U_1)	pC(U_2)	pC(U_1)	pC(U_2)	tan δ ‰–U_1, U_2	Öl/Gas ppm H_2
I	1+2	300– 700		200–400			
	3+4	10– 12		20– 50			
	5+6	25– 30		25– 40			
	7+8	12– 15		10– 30			
II	9	2100	3000				1450
	10	180	500				5400
	9+10	1800–2200	2800–3000				
	11			2880	8100	7–U_1 15–U_2	20500
III	12+13	5– 6	5– 6	ohne Befund			
	13+14	5	10–12				
	15+16	10	10				
	16+17	10	15				
Grenzwerte:							
TE (alt)		20 pC	50 pC	20 pC	50 pC		
tan δ (neu)						2,2‰	
Gas (alt)							220 ppm
Empfindlichkeit* FKH		≦110	≦60				
Andere: TE/tan δ/Gas		max. 160				3,2–6,8	6,6–93

* Die Empfindlichkeit ist das Verhältnis der grössten gemessenen Werte zu den Grenzwerten (pro Spalte).

Tabelle I Vorort-TE-Messergebnisse an Kombiwandlern (FKH) und Vergleich mit diversen Labormessungen

verschiedene Fabrikate der Baujahre 1970–1975

Gruppe I sortiertes Los (8 Stück), Prüfspannung 325 kV, Betriebsspannung 66 kV, Messspannung U_1 = 150 kV, Freiluftaufstellung (Fig. 3)

Gruppe II sortiertes Los (3 Stück), Prüfspannung 230 kV, Betriebsspannung 63,5 kV, Messspannung U_1/U_2 = 70/123 kV, Aufstellung in Montagehalle bei den OeDK

Gruppe III Zufallslos (6 Stück), Spannungen wie II, Aufstellung in Freiluftschaltanlage (Fig. 4)

Grenzwert lagen (also erkennbar waren), konnte die Aussetzspannung mitberücksichtigt werden, welche bei U_e = 10...50 kV weit unter der Betriebsspannung lag. Somit wäre in allen Fällen ein bestehender Verdacht zu bestätigen. Die Wandler der Gruppe II wiesen sehr hohe TE-Beträge bei gleichzeitig niedriger Aussetzspannung um $U_e < 25$ kV auf. Hier würde man mit grosser Sicherheit auf schadhafte Isolation schliessen. Die willkürlich in der Schaltanlage ausgewählten Wandler der Gruppe III waren eindeutig in Ordnung.

5. Praktische Erfahrung an SF_6-Anlagen

Einige Hersteller unterwerfen die von ihnen erstellten Anlagen vor Ort abschnittweise einer Spannungsprüfung mit angeflanschten Prüftransformatoren, je nach Erfordernis auch einer TE-Messung über ebenfalls im Gasraum integrierte Kopplungskapazitäten. Dieses Verfahren ist nur bei kleineren Anlagen mit relativ niedrigem Spannungsniveau gebräuchlich. Es stellt eine Wiederholung der Fabrikkontrolle von Teilen dar, die in abgeschirmten Räumen durchgeführt wird und von daher gesehen als unkritisch zu betrachten ist. Kritisch zu betrachten ist nur die Sektionierung. Wenn dagegen an ganzen Anlagen auf einer normalen Baustelle ohne besondere Konstruktionsvorkehrungen TE-Messungen verlangt werden, dann kommen Freiluftanordnungen wie in Figur 2 in Frage. Es ist nicht Sache des Prüfers zu entscheiden, ob der Aufwand technisch gerechtfertigt ist. Ihm obliegt nur, eine Messung durchzuführen, welche die Chancen zu einem brauchbaren Ergebnis wahrt. Es wurden einige Messungen in der Schaltung von Figur 2 b praktisch ausgeführt, wobei in offenem städtischem Gelände Störpegel bis maximal 12 pC bei der unteren Messspannung (etwa 90 kV) bzw. 10...20 pC bei der oberen Messspannung (etwa 160 kV) erreicht worden sind. Auf der anderen Seite wurden sehr schlechte Erfahrungen mit Innenaufstellung in engen und unaufgeräumten Gebäuden gemacht. Vergleichsweise kann man mit ungeeignetem Material in ungeeigneter Anordnung ohne weiteres auf Störpegel von mehreren 100 pC kommen, so dass die Erfassung von Teilentladungen aus der Anlage sicher unmöglich ist.

Literatur

[1] *A. Wilson:* Discharge testing on site. Third International Electrical Insulation Conference, Brighton, 1978.

[2] *P. Osvath, W. Zaengl* und *H. J. Weber:* Teilentladungsmessung: Probleme und deren Lösung mit einem flexiblen Messsystem. Bull. SEV/VSE 76(1985)19, S. 1137 ... 1143.

[3] *S. A. Boggs:* Electromagnetic techniques for fault and partial discharge location in gas-insulated cables and substations. IEEE Trans. PAS 101(1982)7, p. 1935 ... 1941.

[4] Mesure des décharges partielles. Publication de la CEI 270, deuxième édition, 1981.

[5] Transformateurs de mesure. Quatrième partie: Mesure des décharges partielles. Publication de la CEI 44-4, 1980.

[6] *G. Szaloky:* Schmal- und breitbandige Teilentladungsmessungen. Bull. SEV/VSE 76(1985)19, S. 1144 ... 1148.

[7] Appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse de tension assignée égale ou supérieure à 72,5 kV. Publication de la CEI 517 (1980).

[8] *H. Binz, H.G. Gerlach:* Vorort-Wechselspannungsprüfung an SF_6-Schaltanlagen und PE-Hochspannungskabeln nach dem Serienresonanzprinzip.

[9] Teilentladungsmessung an Messwandlern. Regeln des SEV 3304.1986 (SNV Reg. Nr. 41 33 04).