

Für hochspannungstechnische Komponenten und Anlagen sind die Isolierstoffe und Isoliersysteme von zentraler Bedeutung; in Hochspannungs-Hochleistungstransformatoren sind sie heute noch fast ausschliesslich mit dem traditionellen Isoliersystem Mineralöl und Zellulose ausgeführt. Der vorliegende Aufsatz zeigt, wie mit einer Messung von Relaxationsströmen eine Zustandsbewertung der Isolation durchgeführt werden kann. Die vorgeschlagene Auswertemethode liefert die niederfrequenten Diagnosegrössen Kapazität und Verlustfaktor für einen Frequenzbereich, der für Alterungsprozesse in einer Öl-Papier-Isolierung offensichtlich von grosser Bedeutung ist.

# Vor-Ort-Diagnose für Leistungstransformatoren

## Relaxationsströme geben Auskunft über den Zustand der Isolationen von hochspannungstechnischen Komponenten und Anlagen

■ Vahe Der Houhanessian und  
Walter Zaengl

Die zielorientierte Anwendung diagnostischer Methoden zur Erkennung des aktuellen Zustandes technischer Systeme besitzt auf allen Gebieten der Technik einen hohen Stellenwert und ist daher seit jeher weitverbreitet. Auch auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik, in dem teilweise sehr kapitalintensive Komponenten verwendet werden, sind zahlreiche Methoden der technischen Diagnostik seit Jahrzehnten allgemein bekannt und vielfältig im Einsatz. Einige dieser Methoden befassen sich mit einer Zustandserfassung von Isolierstoffen oder Isoliersystemen, die vor allem bei den hochspannungstechnischen Komponenten zur Energieübertragung und -verteilung eine extrem wichtige Funktion erfüllen. Da praktisch alle Isolierstoffe, mit Ausnahme der Isoliergase, einer Alterung und damit einer Verschlechterung unterliegen, ein Versagen der Isolierung aber praktisch immer zu schweren Folgeschäden und

damit hohen Folgekosten führt, wurde vor allem in jüngster Zeit die Isolationsdiagnostik ein Gebiet intensiver Untersuchungen [1, 2]. Das grosse Interesse an dieser Thematik wird durch die zunehmend ungünstiger werdende Alterungsverteilung von teuren Betriebsmitteln, wie Hochspannungs-Leistungstransformatoren oder Hochspannungskabeln, geweckt, über die beispielsweise in [3] berichtet wird. Jedes Elektrizitätsversorgungsunternehmen ist daher mit der Fragestellung einer noch verfügbaren Restlebensdauer der Betriebskomponenten konfrontiert, an der das Isoliersystem einen entscheidenden Anteil besitzt. Auch wenn eine wirklich eindeutige Voraussage der Restnutzungsdauer für Isoliersysteme wohl nie gelingen wird, ist ein zusätzlicher Aufwand für eine Online- oder Offline-Diagnose immer dann vertretbar, wenn das Ergebnis der Diagnose und die damit verbundene Zustandsbewertung zu einer rechtzeitig durchführbaren Massnahme zur Auffrischung des Isolationszustandes führt. Natürlich ist dabei vorauszusetzen, dass diese Diagnose vor Ort durchgeführt werden kann.

Der vorliegende Beitrag ist einer Vor-Ort-Diagnose (offline) und möglichen Zu-

### Adresse der Autoren

Vahe Der Houhanessian, Dipl. El.-Ing. ETH, und  
Prof. Dr. Walter Zaengl, ETH Zürich, Fachgruppe  
Hochspannungstechnik, 8092 Zürich

standsbewertung von insbesondere Hochspannungs-Hochleistungstransformatoren, die auch heute noch fast ausschliesslich mit dem traditionellen Isoliersystem Mineralöl und Zellulose ausgeführt sind, gewidmet. Eine bewertende Diskussion der allgemein gut bekannten und bewährten Methoden erfolgt dabei aber nicht, da sie aus vielen Veröffentlichungen bereits bekannt sind (siehe z. B. Beitrag von U. Sundermann in [2] oder Kapitel 11 in [1]). Erwähnt man bei diesen Methoden nur jene, die nur das Isoliersystem des Aktivteils (ohne Durchführungen) betreffen, so sind zweifellos jene Verfahren am besten, welche auf einer Ölanalyse beruhen, da die Isolierölproben auf einfache Weise auch online gezogen werden können. Die Ölanalyse liefert über eine Auswertung der im Öl enthaltenen Gase oder auch Furfurole extrem wertvolle Hinweise über alterungsbedingte Abbauprodukte, die entweder durch thermische oder entladungsphysikalische Prozesse entstanden sein können [13]. Die zweifellos sehr wünschenswerte, elektrische Online-Messung von Teilentladungen, mit der möglicherweise schwerwiegende Isolationsfehler frühzeitig erkannt und damit auch Kurzschlüsse in den Transformatoren vermieden werden könnten, wird zurzeit eingehend untersucht; diese Diagnostikmethode ist aber wegen der starken Störeinkopplungen durch die üblicherweise angeschlossenen Freileitungen sehr schwierig mit ausreichender Empfindlichkeit durchzuführen ([2], Beitrag M. Lauersdorf). Man begnügt sich daher zunächst mit einer Offline-TE-Diagnose unter Verwendung einer Prüfspannungsquelle. – Vor allem in den europäischen Ländern wird seit einigen Jahren auch das Rückkehrspannungsmessverfahren (RVM, recovery voltage meter) erprobt. Obwohl die Vertreter dieser Messmethode angeben, dass man aus dem Ergebnis der Messung mit hoher Sicherheit den Feuchtegehalt der sich im Transformator befindlichen Feststoffisolation (Zellulose) bestimmen könne, bestehen eindeutige Anzeichen dafür, dass diese Behauptung nur eine eingeschränkte Gültigkeit besitzt; im Rahmen dieses Beitrages wird dies noch nachgewiesen.

Die RVM-Methode leitet sich aus einigen spezifischen Eigenschaften der Leitungs- und Polarisationsmechanismen, also der dielektrischen Eigenschaften materieller Isolierstoffe ab, die zwar seit vielen Jahrzehnten bekannt sind, deren theoretisches Grundgerüst aber offenbar noch nicht zum Allgemeinwissen der Praktiker gehört. Daher wird dem praxisorientierten Teil dieses Beitrages ein Theorie-Teil vorangestellt, der zum besseren Verständnis der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen beitragen soll.

### Theoretische Grundlagen

Legt man eine Spannung  $U$  an zwei beliebig geformte Metallelektroden, zwischen denen sich nur Vakuum befindet, so existieren im Feldraum dieser Elektroden auch ortsabhängige Feldstärken  $E$ , die von elektrischen Ladungen erzeugt werden. Diese befinden sich auf den Oberflächen der Metallelektroden und werden von der Spannungsquelle während des zeitlichen Aufbaus der Spannung als Strom  $I = i(t)$  geliefert. Die in einfacher Weise auch bezüglich ihres zeitlichen Verlaufes messbaren integralen Grössen, Spannung  $U$  und Strom  $I$ , ergeben sich aus den allgemeinen bekannten Beziehungen der Elektrostatik: die Spannung als Linienintegral über die ortsabhängige Feldstärke zwischen den Elektroden, die Summe der Ladungen  $Q$  auf den Elektroden über das Flächenintegral des Skalarproduktes von  $\epsilon_0 E$  und Flächenelement  $dA$  der eine Elektrode einschliessenden Hüllfläche (Satz von Gauss) und der Strom aus der zeitlichen Änderung dieser Ladungen. Die Allgemeingültigkeit der weiteren Ausführungen wird nicht verletzt, wenn die Zusammenhänge zwischen den integralen Grössen und der ortsabhängigen Feldstärke am Beispiel des «idealen Plattenkondensators» quantitativ gezeigt wird. Dieser bestehe aus zwei parallelen Plattenelektroden mit der effektiv wirksamen Fläche  $A$  und dem Elektrodenabstand  $a$ , zwischen denen dann eine ortsunabhängige Feldstärke  $E$  herrsche. Auch im Vakuumkondensator ist es sinnvoll, zunächst noch den Vektor  $D$  der «elektrischen Erregung» oder «dielektrischen Verschiebungsdichte»

$$D = \epsilon_0 E \tag{1}$$

( $\epsilon_0$ : elektrische Feldkonstante) einzuführen, der mit der Dimension einer Flächenladungsdichte ( $As/m^2$ ) stets orthogonal zur Elektrodenoberfläche steht und damit den direkten Zusammenhang zwischen den Feldern und erregenden Ladungen herstellt. Mit der Voraussetzung der Ortsunabhängigkeit von  $E$  kann die vektorielle Schreibweise verlassen und durch eine reine Zeitabhängigkeit der Feldgrössen ersetzt werden. Es wird somit

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) \tag{2}$$

die Spannung  $U$  wird

$$U = u(t) = \int_0^a E(t) \cdot ds = a \cdot E(t) \tag{3}$$

die Ladung  $Q$  auf jeder Elektrode

$$Q = q(t) = D(t) \cdot A \tag{4}$$

und schliesslich der Strom  $I$

$$I = i(t) = \frac{dQ}{dt} = A \cdot \frac{dD(t)}{dt} = A \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{dE(t)}{dt} \tag{5}$$

Hieraus ergibt sich, dass im Vakuumkondensator nur bei einer zeitlichen Variation der Feldstärke bzw. Spannung ein Strom fließen kann («Verschiebungsstrom»). Aus den Gleichungen (2), (3) und (4) folgt auch, dass die Kapazität  $C_V$  des idealen Plattenkondensators im Vakuum

$$C_V = \frac{Q}{U} = \epsilon_0 \frac{A}{a} \tag{6}$$

auch bei beliebigen Elektrodenanordnungen nur von  $\epsilon_0$  und Geometrieparametern der Elektroden und nicht von der Zeit  $t$  abhängt.

Wird nun das Vakuum des angenommenen, idealen Plattenkondensators vollkommen durch einen Isolierstoff (Dielektrikum) ersetzt, der im makroskopischen Sinne als homogen und isotrop betrachtet werden kann, so ändert sich im Feldraum die Feldstärkeverteilung nicht, das heisst die Ortsunabhängigkeit der Feldstärkevektoren  $E$  bleibt erhalten. Im Dielektrikum werden nun aber Polarisationsprozesse wirksam, die man recht häufig, aber fälschlicherweise durch einen reinen Zahlenwert, die Dielektrizitätskonstante, auf der rechten Seite von Gleichung (1) berücksichtigt. Physikalisch eindeutig ist aber nur die Veränderung der Verschiebungsdichte  $D$  in Gleichung (1) durch die Beziehung

$$D = \epsilon_0 E + P \tag{7}$$

wobei  $P$  die (makroskopische) Polarisation des Dielektrikums ist. Dieser Polarisationsvektor ist in isotropen Stoffen dem Vektor der Feldstärke und damit auch zum  $D$ -Vektor gleichgerichtet, wodurch man wieder die Vektorschreibweise verlassen kann. Bei einer zeitlichen Veränderung der Feldstärke tritt aber stets eine zeitliche Verzögerung von  $P$  gegenüber  $E$  auf.

Dass sich die makroskopische Polarisation  $P$  aus einer mikroskopischen Polarisierbarkeit der Materie ableiten lässt, sei hier nur nebenbei bemerkt. Die entsprechenden physikalischen Polarisationsmechanismen sind ebenfalls gut bekannt (Elektronen-, Ionen-, Deformations-, Orientierungs-, Grenzflächen- und eventuell Raumladungspolarisation). All diesen Polarisationsprozessen ist aber gemeinsam, dass in  $P$  lediglich Prozesse berücksichtigt sind, die einen reinen Dipolcharakter besitzen, deren Schwerpunkte somit in der Materie verbleiben. Elektrische Leitungsmechanismen, die zu einer Wanderung oder kontinuierlichen Driftbewegung von Ladungen durch das Dielektrikum, also von Elektrode zu Elektrode führen, sind in  $D$  von Gleichung (7) nicht enthalten. Die elektrische Wirkung von  $P$  macht sich

daher nur an den Elektroden bemerkbar, indem es den Verschiebungsstrom bei zeitlichen Feldänderungen verstärkt; innerhalb der Materie hebt sich die Wirkung der Dipole auf das erregende elektrische Feld aber bekanntlich auf.

Die globalen Polarisierungseigenschaften eines Isolierstoffes stecken somit in der zeitlichen Abhängigkeit der Polarisation  $P$  von der Feldstärke  $E$ . Sehr viele, aber nicht alle Polarisationsmechanismen sind proportional zur Feldstärke, solange diese nicht extrem gross wird. Erregt man daher den Isolierstoff plötzlich mit einer konstanten Feldstärke  $E_0$ , so wird für  $t \geq 0$  die Polarisation zeitabhängig:

$$P_o(t) = \epsilon_0 \cdot \chi(t) \cdot E_0 \quad (8)$$

In dieser «Schrittantwort» ist  $\chi(t)$  die dimensionslose, zeitabhängige (dielektrische) Suszeptibilität des betrachteten Stoffes. Bild 1 erläutert diesen Vorgang, wobei der skizzierte zeitliche Verlauf nur qualitativ aufzufassen ist, wenn man die Zeitachse als linear verlaufend annimmt. Der bei  $t = 0$  und  $\chi = 0$  beginnende Anstieg von  $\chi(t)$  ist wegen der extrem schnellen Polarisationsmechanismen, wie zum Beispiel der Elektronenpolarisation, die atomar bedingt ist, extrem steil und würde sich in einem Zeitbereich von kleiner als  $10^{-12}$  s ergeben. In diesem teils optischen Bereich wäre der stetige Anstieg auch durch Resonanzphänomene gestört. Da aber auch experimentell höchstens Zeitbereiche ab  $t > 10^{-9} - 10^{-6}$  s zugänglich sind, ist ein stetiger Anstieg ab diesen Zeiten realistisch. Extrem langsame Polarisationsmechanismen können dabei erst nach Stunden oder Tagen einen Endwert ( $\chi_\infty$ ) erreichen.

In Gleichung (8) ist somit  $\chi(t)$  oder  $P_o(t)$  die ideale Schrittantwort des Dielektrikums, die aber messtechnisch nicht vollständig zugänglich ist. Da bereits ein experimentell erzeugter Spannungs- oder Feldstärke-Schritt eine endliche Anstiegszeit aufweisen wird und oftmals der Polarisationssterm in Gleichung (7) auch bei Erregungen von beliebigem zeitlichen Verlauf von

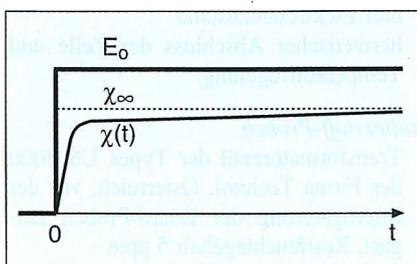


Bild 1 Polarisierungseigenschaften eines Isolierstoffes

Prinzipieller, zeitlicher Verlauf der elektrischen Suszeptibilität  $\chi(t)$  bei einer schrittförmigen Erregung eines Isolierstoffes durch die elektrische Feldstärke  $E_0$ .

$E(t)$  interessiert, ist zunächst der allgemeine Verlauf von  $P(t)$  zu bestimmen. Die Lösung dazu liefern die Duhamel-Integrale, da die spezielle Lösung der Schrittantwort mit Gleichung (8) bereits vorliegt. Dazu bildet man zunächst die Stossantwort von  $\chi(t)$ , die üblicherweise als dielektrische Antwortfunktion (dielectric response function, siehe z. B. [4])  $f(t)$  bezeichnet wird:

$$f(t) = \frac{d\chi(t)}{dt} \quad (9)$$

Der allgemeine Verlauf von  $P(t)$  wird somit

$$P(t) = \epsilon_0 \int_0^t f(t-\tau) \cdot E(\tau) \cdot d\tau = \epsilon_0 \int_0^t f(\tau) \cdot E(t-\tau) \cdot d\tau \quad (10)$$

und entspricht einer Faltung der beiden Funktionen im Zeitbereich.

Bei sehr vielen Isolierstoffen, insbesondere bei den in hochspannungstechnischen Komponenten häufig verwendeten Kunststoffen, und technischen Frequenzen dominieren die hier betrachteten Polarisationsvorgänge, die auch mit Verlusten verbunden sind. Bei den später näher untersuchten Öl-Papier-Isolationen von Transformatoren treten aber noch rein ohmsche Verluste durch Leitungseffekte (z. B. durch Ionen- und Elektronenleitung) auf. Unter Vernachlässigung von nichtlinearen Effekten, die recht häufig mit diesen Phänomenen verbunden sind, führen diese Leitfähigkeitsprozesse zu einer Stromdichte

$$J_\sigma = \sigma \cdot E \quad (11)$$

mit der als konstant angenommenen Leitfähigkeit  $\sigma$ , die in der Regel sehr stark temperaturabhängig ist, was bei den Polarisationsphänomenen nur im geringeren Masse der Fall ist. Die Vektorschreibweise in Gleichung (11) deutet wiederum auf die Isotropie der Stoffe hin.

Die Gesamtstromdichte  $J$  in einem idealen Plattenkondensator setzt sich damit aus der Leitfähigkeitsstromdichte  $J_\sigma$  nach Gleichung (11) und den Komponenten des gesamten Verschiebungsstromes nach Gleichung (7) unter Berücksichtigung von Gleichung (10) zusammen. Dabei kann man den Vektorcharakter der Gleichungen (7) und (11) aus den bereits erwähnten Gründen vernachlässigen, dafür aber von einer beliebig zeitabhängigen Erregung durch  $E(t)$  ausgehen.

$$J(t) = \sigma \cdot E(t) + \frac{dD(t)}{dt} = \sigma \cdot e(T) + \epsilon_0 \left[ \frac{dE(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) \cdot E(\tau) \cdot d\tau \right] \quad (12)$$

Für den Spezialfall einer schrittförmigen Erregung mit der ab  $t > 0$  konstanten Feldstärke  $E_0$  wird aus Gleichung (12) für  $t \geq 0$

$$J_{pol}(t) = E_0 [\sigma + \epsilon_0 \cdot f(t)] \quad (13)$$

da das 2. Glied von Gleichung (12), das die Verschiebungsstromdichte der Vakuumanordnung darstellt, den nicht messbaren Dirac-Einschaltstromstoss ergibt und daher vernachlässigt werden kann. Dieser Spezialfall ist gleichzeitig die sogenannte Polarisationsstromdichte, die nach dem plötzlichen Zuschalten einer Gleichspannungsquelle auf eine Isolieranordnung entsteht. Für die in den Gleichungen (3) bis (5) bereits vorausgesetzte Elektrodengeometrie des idealen Plattenkondensators kann man die Gleichung (13) mit den dabei eindeutigen Beziehungen zwischen den Feld- und Geometriegrößen in die messbaren Grössen (Polarisationsspannung  $U_0$ , Polarisations- oder Nachladestrom  $I_{pol}$ ) umrechnen. Es ergibt sich:

$$I_{pol}(t) = U_0 \left[ \frac{1}{R} + C_v \cdot f(t) \right] \quad (14)$$

mit  $R$ : Gleichstromwiderstand der Isolieranordnung und  $C_v$ : Vakuumpkapazität der Isolieranordnung, Gleichung (6).

Da in diesem Polarisationsstrom der Leitungsstrom  $U_0/R$  den stets mit der Zeit  $t$  stark abnehmenden Verschiebungsstrom mehr oder weniger stark verfälscht, ermittelt man die dielektrische Antwortfunktion  $f(t)$  aus dem Depolarisations- oder Nachentladestrom  $I_{depol}$ . Dieser ergibt sich aus einer Strommessung im Kurzschlusskreis der untersuchten Anordnung im unmittelbaren Anschluss an die Polarisationsperiode  $T_p$ . In Bild 2 ist der zeitliche Ablauf des Verfahrens skizziert, wobei absichtlich angenommen sei, dass der Polarisationsstrom während  $T_p$  noch nicht abgeklungen ist. Man erkennt sofort, dass

$$I_{depol}(t) = -U_0 C_v [f(t) - f(T_p + t)] \quad (15)$$

wird. Abgesehen von der Polaritätsumkehr des Stromes kann aus diesem Stromverlauf  $f(t)$  nur dann eindeutig bestimmt werden,

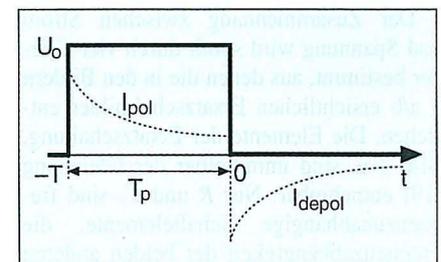


Bild 2 Relaxationsströme in einem Isolierstoff

Prinzipieller, zeitlicher Verlauf der Relaxationsströme  $I_{pol}$  und  $I_{depol}$  während und nach einer Polarisationsdauer  $T_p$ .

wenn der Polarisationsstrom nach dem Ablauf von  $T_p$  praktisch vollständig abgeklungen ist.

Zu diesen Betrachtungen über die Relaxationsströme ( $I_{pol}$  und  $I_{depol}$ ) sei abschliessend bemerkt, dass die Messung dieser Ströme ohne weiteres jeweils nach einem bekannten Zeitpunkt nach dem Anlegen von  $U_o$  und nach dem erfolgten Kurzschliessen erfolgen kann. Die Antwortfunktion  $f(t)$  wird damit erst ab einer endlich langen Zeit, zum Beispiel nach  $t = 1$  s, bekannt, was dazu führt, dass die aus  $f(t)$  berechenbaren frequenzabhängigen Eigenschaften, die anschliessend kurz behandelt werden, bei höheren Frequenzen unbekannt bleiben.

Der bisher behandelte Zeitbereich lässt sich sehr leicht in den Frequenzbereich überführen, wenn man die Fourier- oder Laplace-Transformation auf die bereits abgeleiteten Gleichungen im Zeitbereich anwendet. Dabei ist lediglich zu beachten, dass es sich bei der erregenden Feldstärke  $E(t)$  in Gleichung (12) bzw. der erregenden Spannung  $U_o$  in Gleichung (14) jeweils um eine Schrittfunktion handelt. So erhält man aus Gleichung (12) zunächst die frequenzabhängige Stromdichte

$$J(\omega) = E(\omega) [\sigma + j\omega\epsilon_o(1 + \chi(\omega))] \quad (16)$$

Dabei ist

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (17)$$

aus naheliegenden Gründen die Fourier-Transformierte der dielektrischen Antwortfunktion  $f(t)$  und stellt die komplexe Suszeptibilität dar. Die Trennung der Real- und Imaginärteile in Gleichung (16) führt zu

$$J(\omega) = E(\omega) [\sigma + \omega\epsilon_o\chi''(\omega) + j\omega\epsilon_o(1 + \chi'(\omega))] \quad (18)$$

Die Umwandlung der in dieser Gleichung vorhandenen Feldgrössen in frequenzabhängige Spannungen und Ströme am idealen Plattenkondensator liefert

$$I(\omega) = U_o(\omega) \left[ \frac{1}{R} + \omega C_v \chi''(\omega) + j\omega C_v (1 + \chi'(\omega)) \right] \quad (19)$$

Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung wird somit durch vier Glieder bestimmt, aus denen die in den Bildern 3 a/b ersichtlichen Ersatzschaltbilder entstehen. Die Elemente der Ersatzschaltung, Bild 3 a, sind unmittelbar der Gleichung (19) entnehmbar. Nur  $R$  und  $C_v$  sind frequenzunabhängige Schaltelemente, die Frequenzabhängigkeit der beiden anderen Elemente resultiert aus den  $f$ -abhängigen Gliedern der komplexen Suszeptibilität. Hier erkennt man sehr deutlich die Erhöhung der Vakuumkapazität durch den Real-

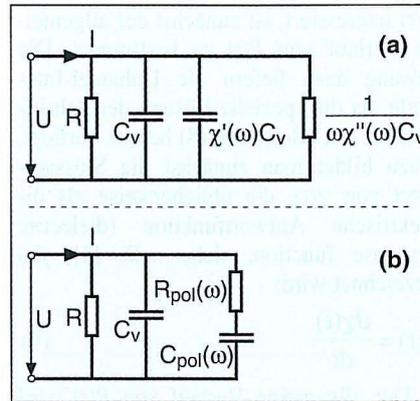


Bild 3 Allgemeine Ersatzschaltbilder eines verlustbehafteten Isoliersystems

Bedeutung der Schaltelemente siehe Gleichungen (19) und (20).

teil der Suszeptibilität  $\chi'$ , die in der Regel nicht sehr stark frequenzabhängig ist. Wegen der starken  $f$ -Abhängigkeit des abgesehen von  $R$  vorhandenen Verlustwiderstandes wird diese Ersatzschaltung aber nur wenig benützt. Die frequenzabhängigen Elemente, die in Parallelschaltung vorhanden sind, lassen sich aber in bekannter Weise in eine Serie-Ersatzschaltung umwandeln, siehe Bild 3b. Hier wird mit  $k = \chi''(\omega)/\chi'(\omega)$ :

$$R_{pol}(\omega) = \frac{k}{\omega(1+k^2)C_v\chi'(\omega)} \quad (20a)$$

$$C_{pol}(\omega) = (1+k^2) \cdot C_v\chi'(\omega)$$

und damit die Zeitkonstante dieses Gliedes

$$T_{pol}(\omega) = R_{pol} \cdot C_{pol} = \frac{k(\omega)}{\omega} \quad (20b)$$

Für beide Ersatzschaltungen wird der Verlustfaktor  $\tan\delta$ , also das Verhältnis von Real- zu Imaginärteil aus Gleichung (19)

$$\tan\delta = \frac{1}{R\omega C_v \epsilon'(\omega)} + \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} \quad (21a)$$

der hier durch die Komponenten der komplexen (relativen) Permittivität

$$\epsilon(\omega) = \epsilon' - j\epsilon'' = (1 + \chi') - j\chi'' \quad (21b)$$

ausgedrückt wurde.

Die mehr oder weniger starke Frequenzabhängigkeit der durch die Polarisationsvorgänge beeinflussten Glieder macht nun deutlich, dass man reale Dielektrika zweckmässigerweise durch eine Vielzahl parallel liegender Glieder in Bild 3 b mit abgestuften Zeitkonstanten simulieren kann, wovon später Gebrauch gemacht wird. Nur wenn der zeitliche Verlauf der Antwortfunktion  $f(t)$ , Gleichung (9), einer einfachen Exponentialfunktion entspräche, wäre  $T_{pol}$  in Gleichung (20 b) frequenzunabhängig. Für diese Annahme sei zum Beispiel

$$f(t) = \exp(-t/\tau) \quad (22)$$

Damit wird mit Gleichung (17) die Frequenzabhängigkeit der komplexen Suszeptibilität:

$$\chi'(\omega) = \frac{\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (23a)$$

$$\chi''(\omega) = \frac{\omega\tau^2}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (23b)$$

Aus den Beziehungen von Gleichung (20) wird somit  $k = \omega\tau$  und die Polarisationszeitkonstante  $T_{pol} = \tau$ . Dieser auch als «Debye-Mechanismus» bezeichnete Polarisationsvorgang tritt aber praktisch nie in dieser reinen Form auf. In Wirklichkeit kann die Antwortfunktion  $f(t)$ , wenn diese stetig, aber im zeitlichen Verlauf beliebig abfällt, stets als eine Überlagerung von Exponentialfunktionen, die durch unterschiedliche Amplituden und Zeitkonstanten geprägt sind, aufgefasst werden. Von dieser Tatsache wird bei der Auswertung der experimentellen Ergebnisse Gebrauch gemacht.

### Experimentelle Ergebnisse an Laborproben

Aus einer Vielzahl von Relaxationsstrommessungen an ölprägnierten, plattenförmigen Transformerboard-Proben werden hier einige Beispiele vorgestellt. Ein typisches Messergebnis wird dazu verwendet, über die theoretisch abgeleitete Modellbildung aus dem Zeitbereich der Relaxationsströme die frequenzabhängigen dielektrischen Eigenschaften zu berechnen, da diese einen vertieften Einblick in das Isoliersystem ermöglichen. Die bei den Laboruntersuchungen verwendeten Geräte und Isolierstoffproben lassen sich stichwortartig zusammenfassen:

#### Messzelle

- Parallele Plattenanordnung mit Schuttring-Elektrode von 113 mm Durchmesser, entsprechend 100 cm<sup>2</sup> Messfläche
- Elektroden aus rostfreiem Stahl, variabler Elektrodenabstand
- hermetischer Abschluss der Zelle und Temperaturregelung.

#### Isolierstoff-Proben

- Transformatoröl der Types US 3000 der Firma Technol, Österreich, vor der Imprägnierung der Board-Proben entgast, Restfeuchtegehalt 5 ppm
- Transformerboard, Plattenmaterial von 2 mm Dicke, Type T IV der Firma Weidmann AG, Rapperswil. Der bei den Messergebnissen jeweils angegebene Feuchtegehalt wurde beim Neumaterial durch die Gewichtszunahme des stark

getrockneten Boards bestimmt, bei den ölprägnierten, gealterten Proben über die Karl-Fischer-Methode

- Ölprägnierung der Proben bei Atmosphärendruck
- Alterung der ölprägnierten Proben in hermetisch abgeschlossenen Zellen aus rostfreiem Stahl über einen Zeitraum von 90 Tagen bei 120 °C; dabei Gewichtsverhältnis von Öl zu Board: 8,4; dadurch auch Zunahme der Ölfeuchte im Board und im Öl durch Alterungsprozesse, die sich auch in der Reduktion der Depolarisationswerte (DP-Wert) widerspiegeln. DP-Werte ungealtert: 950; gealtert: 479 bei 0,2% und 195 bei 1% Anfangsfeuchte.

Messgerät, Spannungsquelle und Schaltmechanismus für Relaxationsströme

- Keithley-Elektrometer, Type 617
- hochstabilisierte Gleichspannungsquelle, Fluke Type 415 B, 0–3,1 kV
- Schaltmechanismus, computergesteuert: Eigenbau

Direkte Messung der frequenzabhängigen Eigenschaften

- Dielectric Spectrometer der Firma Di-electric Instrumentation, England

Direkte Messung der Polarisations-spektren

- RVM der Firma Tettex Instruments, Type 5461

### Homogene Isolieranordnung

Das plattenförmige, ölprägnierte Board bildet eine makroskopisch homogene Isolieranordnung, wenn die Plattenelektroden eng am Board anliegen. Der Elektrodenabstand wird dann durch die Dicke des Boards (2 mm) bestimmt.

In Bild 4 sind die gemessenen Relaxationsströme  $I_{pol}$ ,  $I_{depol}$ , gemäss Gleichungen

(14) und (15) von ungealtertem und gealtertem Board bei einer jeweils unterschiedlichen Anfangsfeuchte des ungealterten Materials (0,2% in Bild 4 a; 1% in Bild 4 b) gegenübergestellt. Die dabei gewählte Polarisations-Gleichspannung  $U_0$  von 2 kV liefert bei der sehr langen Polarisationsdauer  $T_p$  von 20 000 s (rund 5,5 h) selbst nach der gleich langen Depolarisationszeit noch gut messbare Depolarisationsströme von ungefähr 1 pA. Signifikante Abweichungen zwischen den beiden Relaxationsstromarten ergeben sich vor allem dann, wenn eine höhere Feuchte des Boards vorliegt. Der Alterungsprozess führt nicht nur zur Erhöhung der Board-Feuchte von 0,2% auf 0,5% (Bild 4a), oder von 1% auf 2% (Bild 4b), sondern auch zu einer höheren Öl-Feuchte von ursprünglich 5 ppm auf 9 ppm, bzw. auf 19 ppm.

Bei der hier gewählten, recht langen Polarisationsdauer  $T_p$  darf man annehmen, dass die dielektrische Antwortfunktion  $f(t)$  nach Gleichung (9) bis zu einer Zeit von etwa  $T_p/10$  (also etwa 2000 s) in den gemessenen Depolarisationsströmen praktisch unverfälscht enthalten ist. Die Absolutwerte von  $f(t)$  sind daher für  $t \geq 1$  s aus Gleichung (15) mit der bekannten Vakuumkapazität der Anordnung quantitativ berechenbar. Würde man aber Gleichung (17) zur unmittelbaren Berechnung der frequenzabhängigen, komplexen Suszeptibilität verwenden, so stiesse man auf die allgemein bekannten Unsicherheiten, da  $f(t)$  weder im Zeitraum  $0 \leq t < 1$  s noch für  $t > 2000$  s bekannt ist [5].

Zur Ermittlung dieser frequenzabhängigen, dielektrischen Eigenschaften verwenden wir daher vorteilhafterweise das folgende, einfache Verfahren, das zu einer jeweils quantitativen Ersatzschaltung in Anlehnung an Gleichung (20) und Bild 3 b führt. In dieser Ersatzschaltung beeinflusst der Isolationswiderstand  $R$  die Isolier-

eigenschaften vor allem bei extrem tiefen Frequenzen; er lässt sich im vorliegenden Fall recht gut aus der Differenz der weitgehend abgeklungenen Relaxationsströme und der aktuellen Polarisationsspannung ermitteln. Wie alle Messergebnisse von Bild 4 zeigen, klingen die Depolarisationsströme ab  $t = 1$  s kontinuierlich ab. Dieses Abklingen ist zweifelsohne eine Konsequenz von sich überlagernden Polarisationsmechanismen, das man im Zeitbereich (dielektrische Antwortfunktion) praktisch immer durch eine Summe von abklingenden Exponentialfunktionen simulieren kann. Man fittet daher den gemessenen Depolarisationsstrom durch eine endliche Summe ( $i = 1 \dots n$ ) von Teilströmen

$$I_{depol}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-t / \tau_i) \quad (24)$$

mit den Amplituden

$$A_i = U_0 [1 - \exp(-T_p / \tau_i)] / R_i \quad (25)$$

$I_{depol}$  ist somit der Kurzschlussstrom von  $n$  parallel geschalteten R-C-Serienelementen mit den individuellen Zeitkonstanten  $\tau_i = R_i \cdot C_i$ , die sich beim Kurzschluss entladen. Zur quantitativen Bestimmung der Gleichung (24) wählt man dabei zweckmässigerweise nur zwei bis drei  $\tau_i$ -Werte für jeweils eine Dekade des gemessenen Zeitbereiches, da damit bereits eine sehr genaue Nachbildung des gemessenen Polarisationsstromes erreicht werden kann.

Bild 5 vermittelt diese allgemeine Ersatzschaltung, in der aber die verlustfreie Kapazität  $C_{50}$  noch nicht erläutert wurde. Sie beeinflusst den Depolarisationsstrom im gemessenen Zeitbereich nicht, da sie durch den Kurzschluss der Anordnung sofort entladen wird, also im Sinne der Gleichung (15) die Funktion einer Vakuumkapazität besitzt. Da diese Ersatzschaltung aber erst ab jener Zeit gültig sein kann, ab

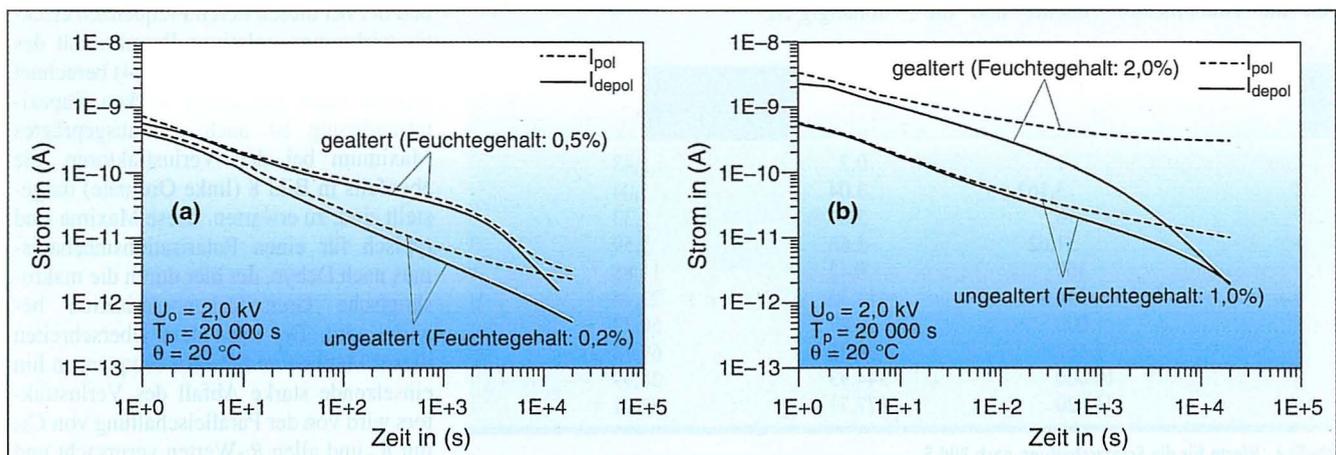
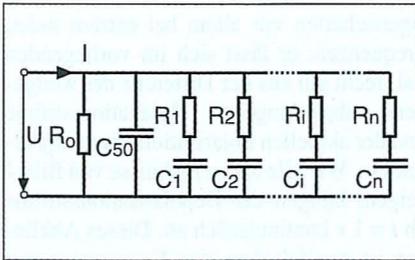


Bild 4 Gemessene Relaxationsströme

Relaxationsströme von 2 mm dicken, homogenen Board-Proben vor und nach einer Alterung (120 °C, 90 Tage):  
a mit einer Anfangsfeuchte von 0,2%      b mit einer Anfangsfeuchte von 1,0%



**Bild 5 Simulation gemessener Relaxationsströme**  
Allgemeine Ersatzschaltung eines verlustbehafteten Isoliersystems zur Simulation der gemessenen Relaxationsströme; Bedeutung der Schaltelemente, siehe Text.

der nach  $t = 0$  (Kurzschluss)  $I_{depol}(t)$  gemessen wurde, muss ein Wert von  $C_{50}$  gewählt werden, der vor dem Beginn der Messperiode wirksam ist. Wie auch die nachfolgenden Auswertungen beweisen, kann man für  $C_{50}$  die bei technischen Frequenzen (z. B. 50 Hz) leicht messbare Kapazität der Isolieranordnung einsetzen.

Wir verwenden nun die Relaxationsströme für das gealterte Board mit 2% Feuchte (Bild 4 b) und zeigen in Tabelle I die aus einem elementaren Fittingverfahren ermittelten, quantitativen (gerundeten) Werte für die Ersatzschaltung nach Bild 5.

Die Frequenzabhängigkeit der effektiv wirksamen Kapazität  $C$  und der Verlustfaktor  $\tan\delta$  lässt sich nun in bekannter Weise aus der Frequenzabhängigkeit der Eingangsimpedanz der entsprechenden Ersatzschaltung berechnen. In den Bildern 6 a/b sind die Ergebnisse dieser Berechnung für alle vier Relaxationsstrompaare von Bild 4 a/b für einen Frequenzbereich von  $10^{-4}$ – $10^2$  Hz dargestellt. Man erkennt, dass sich die Kapazität erst bei recht tiefen Frequenzen und vor allem mit zunehmender Board-Feuchte stärker erhöht, was offensichtlich auf die zunehmende Grenzflächenpolarisation zurückzuführen ist. Wesentlich signifikanter sind die Änderungen bei den Verlustfaktoren, bei denen sich die zunehmende Feuchte und die

Alterungsprozesse sehr stark bemerkbar machen.

Die mit diesem Verfahren nur indirekt ermittelten frequenzabhängigen Eigenschaften lassen sich mit dem Dielectric Spectrometer auch direkt messen, wobei aber der Zeitbedarf für diese Messungen, die nur für individuelle, diskrete Messpunkte sinnvoll sind, sehr gross wird, wenn die Frequenzen sehr klein werden. So beträgt zum Beispiel der Zeitbedarf für eine Messung bei der Frequenz von 1 mHz eine Stunde. Obwohl die Messspannung des Spektrometers nur 3 V beträgt, ist die Übereinstimmung der indirekt und direkt ermittelten  $C$ - und  $\tan\delta$ -Werte recht gut, wie die in den Bildern 6 a/b eingetragenen Messwerte für das gealterte Board mit 2% Feuchte beweisen. Nur beim Verlustfaktor ergeben sich ab Frequenzen von mehr als 0,1 Hz stärkere Abweichungen, was darauf zurückzuführen ist, dass die Relaxationsströme erst ab 1 s zur Verfügung stehen und für Zeiten  $< 1$  s durch das Fittingverfahren als nicht signifikant zunehmend angenommen wurden. Extrapoliert man nämlich diese Ströme im Zeitintervall 0,1–1 s durch eine Steigung, wie sie für Zeiten  $> 1$  s vorhanden ist, so wird die Übereinstimmung der Mess- und Rechenwerte für Frequenzen grösser 0,1 Hz bereits besser (siehe strichlinierte Abhängigkeit).

### Inhomogene, geschichtete Isolieranordnungen

Wird in der Messzelle der Abstand der Plattenelektroden grösser als die Dicke der plattenförmigen Board-Proben, so entsteht eine Schichtung von Isolieröl und Board. Die elektrische Feldstärke bleibt dann senkrecht zur Grenzschicht zwischen Öl und Board gerichtet, die Feldstärkeverteilung unterliegt aber den Einflüssen einer makroskopischen Grenzschichtpolarisation, die sowohl zeit- als auch frequenzabhängig ist.

In Bild 7 sind die Relaxationsströme von zwei geschichteten Anordnungen dargestellt, bei denen jeweils zwei ungealterte Board-Platten von je 2 mm Dicke die Elektroden bedecken, der Elektrodenabstand mit entweder 8 oder 20 mm aber so gewählt war, dass zwischen dem Board eine Isolierölstrecke von entweder 4 oder 16 mm entstand. Damit entstand ein Dickenverhältnis von Öl zu Board von 1:1 oder 4:1. Da die Ionenleitfähigkeit des Öls auch zu nicht-linearen Effekten führt, auf die hier aber nicht eingegangen wird, und die elektrische Leitfähigkeit des Öls wesentlich grösser als jene vom ölprägnierten Board ist, wurde bei diesen Messungen die Polarisationsspannung  $U_0$  mit 32 bzw. 80 V relativ klein gewählt. Der Mittelwert der erregenden Feldstärke betrug somit nur 4 V/mm. In Bild 7 wurden daher die Relaxationsströme als Absolutwerte angegeben, was den relativen Vergleich dieser Ströme erleichtert.

Im Vergleich zu den Relaxationsströmen von Bild 4 erkennt man sofort die signifikanten Änderungen in deren zeitlichem Verlauf. Dieser Verlauf wird durch einen zunächst nur sehr schwachen Abfall der Relaxationsströme im Zeitbereich bis grössenordnungsmässig 100 s bestimmt. Unter Verzicht auf eine tabellarische Wiedergabe der ermittelten Zahlenwerte für die Einzelelemente dieser Ersatzschaltungen sind in Bild 8 sofort die Ergebnisse der frequenzabhängigen Grössen dargestellt. Im Gegensatz zur homogenen Anordnung wird nun die Kapazitätsänderung wesentlich grösser, was zu erwarten war, da sich die Feldstärke im Öl relativ schnell abbaut und schliesslich nur mehr die Kapazität des Boards wirksam wird. Die Absolutwerte dieser Kapazität (rechte Ordinate) bei sehr niedrigen Frequenzen ( $10^{-4}$  Hz) strebt daher einem Grenzwert zu, da auch aus der wirksamen Elektrodenfläche, einem virtuellen Elektrodenabstand von 4 mm (Gesamtdicke der beiden Board-Proben) und der bei diesen tiefen Frequenzen effektiv wirksamen, relativen Permittivität des trockenen Boards (hier etwa 4,4) berechnet werden kann. Bei dieser starken Kapazitätsänderung ist auch ein ausgeprägtes Maximum bei den Verlustfaktoren, die ebenfalls in Bild 8 (linke Ordinate) dargestellt sind, zu erwarten. Diese Maxima sind typisch für einen Polarisationsmechanismus nach Debye, der hier durch die makroskopische Grenzflächenpolarisation bewirkt wird. Der nach dem Überschreiten dieser Maxima zu höheren Frequenzen hin einsetzende starke Abfall des Verlustfaktors wird von der Parallelschaltung von  $C_{50}$  mit  $R_0$  und allen  $R_i$ -Werten verursacht und nur geringfügig von den Polarisationsverlusten des Transformerboards, die bei diesen tiefen Frequenzen wesentlich kleiner

$i$	$\tau_i$ [s]	$R_i$ [TΩ]	$C_i$ [pF]
1	1	0,7	1,43
2	3,162	3,04	1,04
3	10	3,0	3,33
4	31,62	5,66	5,59
5	100	8,42	11,88
6	316,2	13,32	23,74
7	1 000	19,87	50,33
8	3 162	45,35	69,73
9	10 000	344,93	28,99
10	31 620	377,71	83,71

**Tabelle I Werte für die Ersatzschaltung nach Bild 5**

Mit Hilfe eines elementaren Fittingverfahrens aus den Relaxationsströmen von Bild 4 b ermittelte, quantitative (gerundete) Werte der Einzelelemente für die Ersatzschaltung nach Bild 5, mit  $R_0 = 6,1$  TΩ und  $C_{50} = 192,7$  pF.

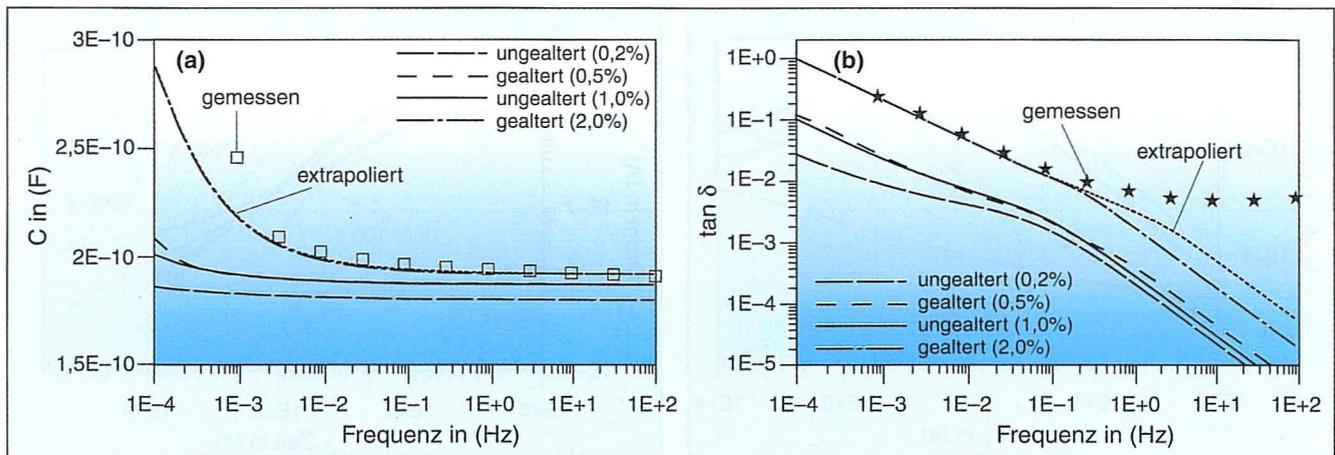


Bild 6 Frequenzabhängigkeit von Kapazität und Verlustfaktor von Board-Proben

Frequenzabhängigkeit der Kapazität  $C$  (a) und des Verlustfaktors  $\tan \delta$  (b) der homogenen Board-Proben von Bild 4, berechnet aufgrund der aus den Relaxationsströmen ermittelten Ersatzschaltungen nach Bild 5.

sind, wie der  $\tan \delta$ -Verlauf für das gut getrocknete, ungealterte Board (Bild 6 b) beweist.

Auch in Bild 8 sind wieder einzelne Messwerte eingetragen, die mit dem Dielectric Spectrometer an einer der beiden Anordnungen ermittelt wurden. Die Ursachen der Abweichungen zwischen den gemessenen und den aus der Ersatzschaltungen berechneten Werten, die hier aber nur gering sind und erst bei grösseren Frequenzen einsetzen, wurden bereits vorher erläutert.

Auch wenn man die geometrischen Verhältnisse dieser Isolierstoffschichtung nicht gekannt hätte, würde somit der frequenzabhängige Kapazitätsverlauf einen Einblick in das inhomogene Isoliersystem, das sich durch die starke Kapazitätsänderung und die Maxima im  $\tan \delta$ -Verlauf ergibt, ermöglichen. Da praktisch alle Transformatoren derartige Schichtungen enthalten, wird auch bei Messungen an

Transformatoren diese Erscheinung auftreten.

**Rückkehr-Spannungen**

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wird in jüngster Zeit immer häufiger die seit Jahrzehnten bekannte Erscheinung von «rückkehrenden Spannungen» für eine Beurteilung von insbesondere Trafo-Isolierungen angewandt. Die Erscheinung selbst beruht auf der Tatsache, dass sich zum Beispiel an den Klemmen eines Hochspannungskondensators, der über eine kürzere oder längere Zeit mit Gleichspannung beansprucht war, trotz eines kurzzeitigen Kurzschliessens der Klemmen am Kondensator wieder eine Spannung aufbaut, die je nach Kondensator-Dielektrikum in der Regel einen Maximalwert erreicht und erst nach längerer Zeit wieder verschwindet [6]. Aus dem in Bild 5 angegebenen allgemeinen Ersatzschaltbild lässt sich dieser Effekt sofort erkennen und bedarf daher

keiner zusätzlichen Erläuterung. Eine grosse Verbreitung hat aber nun die auf dieser Erscheinung aufbauende RVM-Messmethode gefunden, die seit einem auf der Cigré-Session 1990 publizierten Beitrag [7] und der Markteinführung eines entsprechenden Messgerätes [8] auch zur Offline-Diagnostik von insbesondere Grosstransformatoren verwendet wird.

Diese RVM-Methode, über die in den letzten Jahren sehr häufig und ausführlich in der Literatur berichtet wurde (siehe z. B. [9, 10]), besteht darin, das zu untersuchende Objekt in Zyklen mit einer Gleichspannung von typisch 2 kV zu polarisieren, es daraufhin kurzzuschliessen und nach dieser Kurzschlussperiode die Rückkehrspannung zu messen, dessen Maximalwerte  $V_{max}$  mit der jeweiligen Polarisationsdauer  $T_p$  in Abhängigkeit gebracht werden. Diese Abhängigkeit wird Polarisationspektrum genannt. Die Kurzschlusszeit beträgt dabei vorzugsweise  $T_p/2$ ; die Begründung dafür

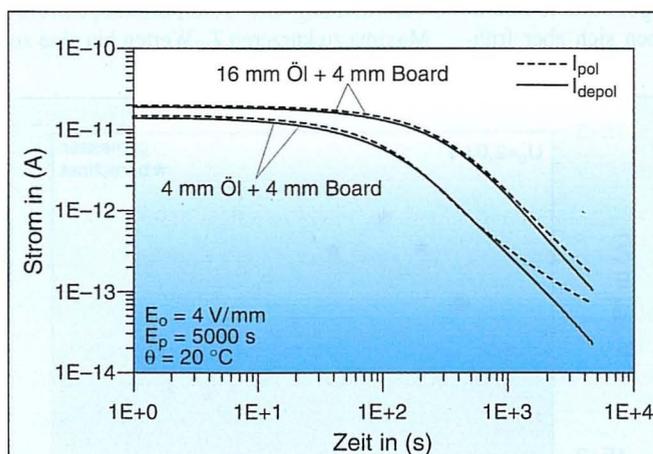


Bild 7 Gemessene Relaxationsströme von geschichteten, inhomogenen Isolieranordnungen  
Messanordnungen mit 4-mm-Boards und Ölrecken von 4 mm und 16 mm

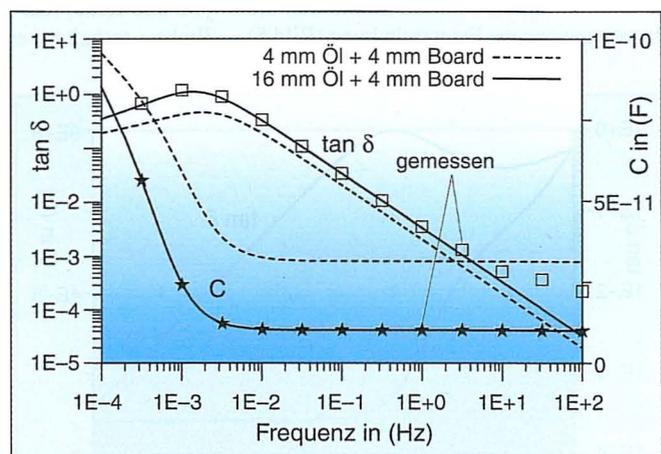


Bild 8 Frequenzabhängigkeit der Kapazität und des Verlustfaktors für geschichtete, inhomogene Isolieranordnungen

Frequenzabhängigkeit der Kapazität  $C$  und des Verlustfaktors  $\tan \delta$  der Proben nach Bild 7, berechnet aufgrund der aus den Relaxationsströmen ermittelten Ersatzschaltungen nach Bild 5.

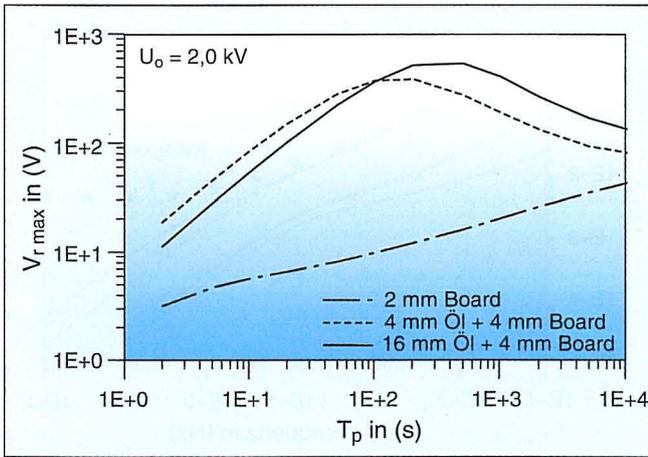


Bild 9 Vergleich der simulierten Polarisationspektren für die ungealterte, homogene Board-Probe von Bild 4 a mit jenen der beiden geschichteten Isolieranordnungen von Bild 7

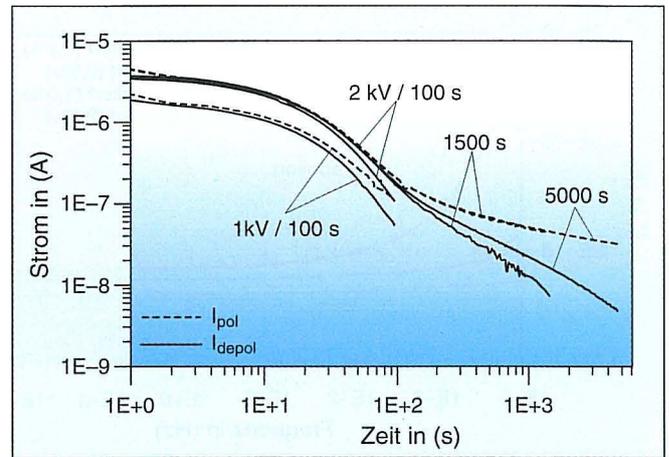


Bild 10 Gemessene Relaxationsströme eines betriebsgealterten Hochspannungstransformators  
nähere Angaben siehe Text

ist der einschlägigen Literatur zu entnehmen. Ein Polarisationszyklus ist dann beendet, wenn nach dem Erreichen des Rückkehrspannungmaximums das Objekt wieder so lange kurzgeschlossen bleibt, dass die dann noch wirksamen Depolarisationsströme vernachlässigbar klein wurden. Eine Zykluszeit kann damit recht gross werden, auch wenn die Polarisationsdauer  $T_p$  relativ kurz war.  $T_p$  wird dabei in diskreten Werten von 1 : 2 : 5, beginnend mit  $T_p = 20$  ms variiert. Der Maximalwert von  $T_p$  beträgt beim handelsüblichen Gerät 10 000 s.

Mit dem zur Verfügung stehenden RVM-Gerät war eine problemlose Messung der Polarisationspektren an den geschichteten Laborproben (Bilder 7 und 8) nicht möglich, da dieses Gerät eine Mindestkapazität des Prüfobjekts erfordert, die zudem noch von der wählbaren Polarisationsspannung abhängt. Aus Messungen an grösseren Prüfobjekten war aber bereits bekannt, dass die Ergebnisse von RVM-Messungen auch über die bereits behandelte Simulation der Relaxationsströme und die daraus gewonnene Ersatzschaltung (Bild 5)

mit guter Genauigkeit berechnet werden können. Liegt nämlich eine Ersatzschaltung auch quantitativ vor, so lassen sich die Schaltzyklen der RVM-Messungen über die Lösung eines Gleichungssystems von linearen Differentialgleichungen für die unterschiedlichen Anfangsbedingungen auch numerisch berechnen und erhält daraus den gesuchten Zusammenhang von  $V_{r,max} = f(T_p)$ , also das Polarisationspektrum. In Bild 9 sind die auf diese Weise simulierten Spektren für die beiden geschichteten Anordnungen von Bild 7 sowie das Spektrum für eine homogene, 2 mm starke, gut getrocknete Board-Probe (siehe Bild 4 a, 0,2% Feuchte) eingetragen. Diese Ergebnisse zeigen eindeutig den Einfluss der Schichtung, also der Geometrie der Anordnungen, auf den Verlauf dieser Spektren. Bei der homogenen Anordnung steigt  $V_{r,max}$  mit  $T_p$  kontinuierlich an und erreicht selbst bei einer Polarisationszeit  $T_p$  von  $10^4$  s noch keinen Höchstwert. Bei den beiden inhomogenen Anordnungen, die ebenfalls je 2 mm dicke, sehr gut getrocknete Board-Proben enthalten, ergeben sich aber früh-

zeitige Maxima, die sich bei dem relativ grösseren Ölanteil zu grösseren  $T_p$ -Werten hin verschieben. Würde man aber nach den Angaben der Fachliteratur [8] diese Maximalwerte mit der Board-Feuchte in Beziehung bringen, so wären die in dieser Literatur postulierten Feuchtwerte praktisch 0% für die homogene Anordnung, aber mindestens ungefähr 1,9% bzw. 1,5% für die beiden geschichteten Anordnungen. Im Prinzip lässt sich dieses Ergebnis recht einfach aus Ersatzschaltungen für die Einzelkomponenten der Anordnungen erklären, worauf hier aber verzichtet wird. Aus physikalischer Sicht ist die bei den inhomogenen Proben auftretende zusätzliche Grenzschichtpolarisation, für die auch die Leitfähigkeit des Öls eine bedeutende Rolle spielt, die wesentliche Ursache für das Auftreten der Maxima in den Polarisationspektren.

Bei einer Anwendung der RVM-Methode auf Transformatoren mit einer geschichteten Öl-Papier-Isolation wird daher diese Verschiebung der Polarisationspektrum-Maxima zu kürzeren  $T_p$ -Werten hin eine zu

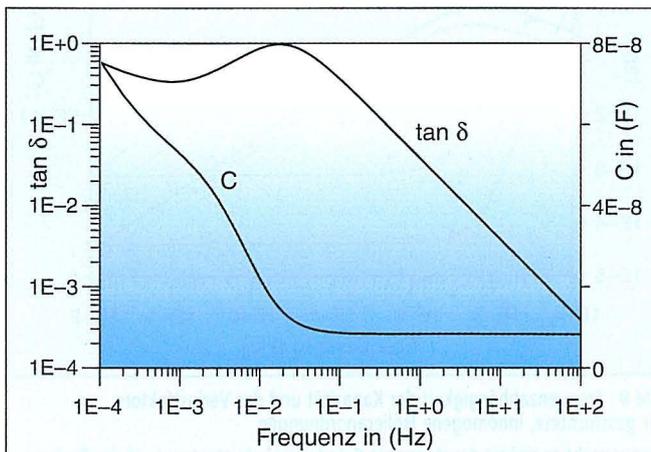


Bild 11 Frequenzabhängigkeit der Kapazität C und des Verlustfaktors  $\tan \delta$  für den Transformator von Bild 10

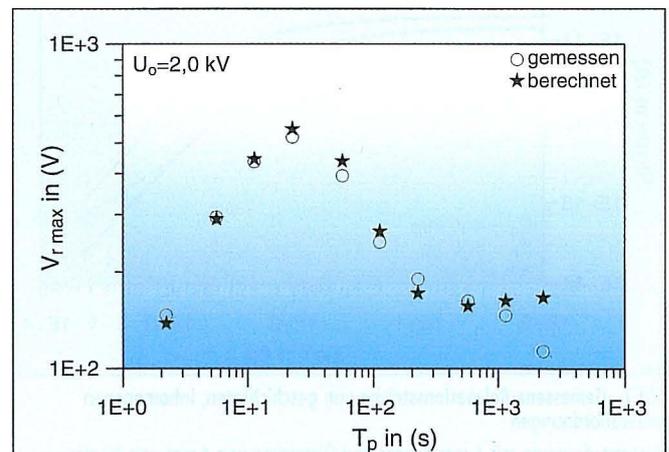


Bild 12 Das aufgrund einer Ersatzschaltung simulierte sowie das mit einem RVM-Gerät gemessene Polarisationspektrum des Transformators von Bild 10

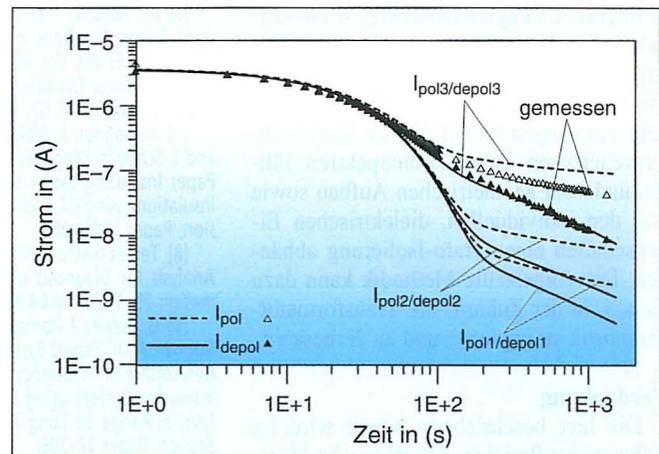
hohe Board-Feuchte vortäuschen, wenn man die Auswertemethode nach [8] anwendet. Erst kürzlich wurde auch an anderen Stellen berichtet, dass derartige Auswertungen nicht im Einklang mit Feuchtemessungen in der Feststoffisolation stehen, welche mit der international anerkannten Karl-Fischer-Titration vorgenommen wurden (siehe dazu [12] sowie Lit. [9] in [12]).

### Vor-Ort-Messungen an Hochspannungstransformatoren

Mit den eingangs des Abschnitts über experimentelle Ergebnisse an Laborproben genannten Laborgeräten (DC-Spannungsquelle; Keithley-Elektrometer; Umschaltmechanismus) lassen sich auch vor Ort Relaxationsströme an Leistungstransformatoren messen. Aus einer Mehrzahl von Messungen, die in unterschiedlichen Freiluftanlagen durchgeführt wurden, werden die Ergebnisse einer Vor-Ort-Messung für einen im Betrieb gealterten Transformator (25 MVA; 155/135/19,5 kV; Baujahr 1955) vorgestellt. Bild 10 zeigt die an diesem Transformator gemessenen Relaxationsströme (Absolutwerte) bei Polarisationsspannungen von 1 kV und 2 kV sowie bei unterschiedlichen Polarisationsdauern  $T_p$  von 100 s, 1500 s und 5000 s. Die Verdoppelung der Ströme bei der Verdoppelung der Polarisationsspannung ist ein Nachweis für die Linearität des hier voluminösen Isoliersystems. Der zeitliche Verlauf wird hier durch den relativ frühzeitigen Abfall der Relaxationsströme nach bereits etwa 20 s bestimmt, was auf eine relativ grosse Ölleitfähigkeit hinweist. Der Vergleich der Depolarisationsströme bei Polarisationsdauern von 1500 s und von 5000 s zeigt deutlich, dass nach dem Aufbau der Grenzflächenpolarisation, die durch den frühzeitigen, starken Abfall der Relaxationsströme charakterisiert wird, noch zusätzliche Polarisationsprozesse im Board aktiviert werden, was zu einem langsameren Abfall der Depolarisationsströme bei längeren Zeiten führt.

In Bild 11 sind die berechneten, frequenzabhängigen Kapazitäts- und  $\tan\delta$ -Werte für diesen Transformator zusammengefasst. Sie wurden wiederum aus der Simulation der Depolarisationsströme und der sich daraus ergebenden Ersatzschaltung (Bild 5) ermittelt. Neben dem markanten, starken Anstieg der Kapazität im Bereich von  $10^{-1}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  Hz, der durch die makroskopische Grenzflächenpolarisation verursacht wird, erfolgt ein weiterer starker Anstieg bei Frequenzen  $<10^{-3}$  Hz, der ganz offensichtlich durch die Polarisationsprozesse im Transformerboard bedingt ist. Der frequenzabhängige Verlauf des Verlust-

**Bild 13** Vergleich zwischen gemessenen (Messpunkte) und berechneten Relaxationsströmen des Transformators von Bild 10



faktors mit einem Maximalwert von 1 bei ungefähr  $2 \cdot 10^{-2}$  Hz und einem Wiederanstieg bei  $f < 10^{-3}$  Hz kann auf die gleiche Weise erklärt werden.

Das RVM-Messgerät ist für derartige Vor-Ort-Messungen an grossen Transformatoren konzipiert und daher problemlos einsetzbar. In Bild 12 sind daher die mit diesem Gerät gemessenen  $V_{max}$ -Werte in Abhängigkeit der vom Gerät gewählten individuellen  $T_p$ -Werte aufgeführt. Zum Vergleich dazu wurden auch die über die Simulation berechneten Werte eingetragen. Die gute Übereinstimmung zwischen diesen Polarisationspektren beweist, dass man die Ergebnisse einer RVM-Messung auch über das hier gewählte Simulationsverfahren, das von den Relaxationsströmen ausgeht, erhalten kann.

Abschliessend sei noch darauf hingewiesen, dass es möglich ist, bei einer Kenntnis des inneren Aufbaus eines Transformators, der im wesentlichen durch die Schichtung von Ölrecken und Boardbarrieren gekennzeichnet ist, zwischen den Phänomenen der makroskopischen Grenzflächenpolarisation und den Polarisationsprozessen der Einzelkomponenten zu unterscheiden [11]. Kennt man nämlich die dielektrische Antwortfunktion  $f(t)$  – siehe Gleichung (9) – dieser Komponenten sowie deren Leitfähigkeiten  $\sigma$ , so können die Gesamtstromdichten von geschichteten Anordnungen in Anlehnung an Gleichung (12) und einer Kenntnis der Vakuumkapazitäten auch rechnerisch simuliert werden. Für den Fall einer konkreten Simulation der Relaxationsströme eines Transformators können die dielektrischen Grössen für das Isolieröl aus Messungen an Ölproben gewonnen werden. Die Eigenschaften der im Transformator verwendeten Isolierstoffbarrieren lassen sich hingegen nicht messen, ohne das Gerät zu öffnen. Da zweifellos die Feuchte des Boards deren dielektrische Eigenschaften sehr wesentlich beeinflusst, kann man aber die

aus Labormessungen an Board-Proben mit unterschiedlicher Feuchte oder Alterung experimentell ermittelten Eigenschaften für eine Gesamtsimulation des Isoliersystems im Trafo verwenden, um die gemessenen Relaxationsströme am Transformator nachzubilden. Dieses Verfahren wurde bei dem im Bild 13 gezeigten Vergleich von gemessenen und simulierten Relaxationsströmen angewandt. Die Messwerte stammen dabei vom eingangs erwähnten Transformator für  $T_p = 1500$  s (siehe Bild 10). Bei den berechneten Kurvenscharen von Relaxationsströmen wurden die dielektrischen Eigenschaften von Pressboard-Proben mit steigendem Feuchte- und Alterungsgrad verwendet, um deren Einfluss auf den Gesamtverlauf der Relaxationsströme zu erkennen. Die beste Übereinstimmung mit den Messwerten ergibt sich dabei mit den als  $I_{pol3/depol3}$  bezeichneten Strömen, die aus den Eigenschaften einer im Labor gealterten Probe mit ungefähr 2% Feuchte berechnet wurde. Auch aus dieser Simulation erkennt man, dass die Isolieröleigenschaften, die bei der Simulation nicht geändert wurden, die Relaxationsströme bei kurzen Zeiten dominieren. Da die Laborproben aber nicht aus dem untersuchten Transformator entnommen wurden, wäre es sicher unzulässig, den genannten Feuchtegehalt der Feststoffisolation dieses Transformators, deren Zusammensetzung nicht bekannt ist, zuzuordnen.

### Schlussfolgerung

Es wurde gezeigt, dass man mit einer Messung der Relaxationsströme an Transformatoren sehr wertvolle Hinweise über den aktuellen Zustand des verwendeten Isoliersystems erhalten kann. Die dabei verwendete Auswertemethode liefert insbesondere die niederfrequenten Diagnosegrössen (Kapazität, Verlustfaktor) in einem Frequenzbereich, der für Alterungsprozesse

se in einer Öl-Papier-Isolierung offensichtlich von grosser Bedeutung ist. Derartige Eigenschaften werden zurzeit nur indirekt über eine spezielle Bewertung von Rückkehrspannungen erfasst, die zu schwer interpretierbaren Polarisationspektren führen und vom geometrischen Aufbau sowie von den individuellen, dielektrischen Eigenschaften einer Trafo-Isolierung abhängen. Die vorgestellte Methodik kann dazu dienen, in der Zukunft die Transformator-diagnostik zu ergänzen und zu verbessern.

### Verdankung

Die hier beschriebene Arbeit wird im Rahmen des Projekts «Dielektrische Messmethoden zur Diagnose des Isolationszustandes von Öl-Papier-isolierten Transformatoren» vom Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) finanziell unterstützt. Für diese Unterstützung sei an dieser Stelle bestens gedankt. Ebenfalls gedankt sei der Firma Weidmann AG, Rapperswil, für ihre technische Unterstützung bei der Vorbereitung und Alterung der Laborproben, sowie der Firma Haefely-Trench AG, Tettex Instruments Division, Zürich, für die Bereitstellung des RVM. Schliesslich bedanken wir uns bei der ABB Sécheron AG, Genf, und den Services Industriels de Genève, die uns die Möglichkeit gaben, die im Abschnitt «Vor-Ort-Messungen an Hochspannungstransformatoren» präsentierten Untersuchungen durchzuführen.

### Literatur

- [1] R. Porzel, E. Neudert und M. Sturm: Diagnostik der Elektrischen Energietechnik. Expert-Verlag, 1996, ISBN 3-8169-1364-4.
- [2] Micafil: Werterhaltung von Transformatoren, Zustandserfassung, Bewertung, Instandhaltung. Symposium 1996 (19 Beiträge).
- [3] F. Flottmeyer u. a.: Betrachtungen zum Problem der Nutzungsdauer von Hochspannungs-Transformatoren und Wandlern. VDE/ETG-Fachbericht Nr. 55 (1995), S. 43–63.
- [4] A. K. Jonscher: Dielectric Relaxation in Solids. Chelsea Dielectrics Press, London, 1983.

[5] F.I. Mopsik: The Transformation of Time-Domain Relaxation Data into the Frequency Domain. IEEE Trans. El. Ins. Vol. EI-20, 1985, pp. 957–964.

[6] B. Gross: On After-Effects in Solid Dielectrics. Physical Review Vol. 57, 1940, pp. 57–59.

[7] A. Bognár, L. Kalocsai, G. Csepes, E. Nemeth and J. Schmidt: Diagnostic Tests of High Voltage Oil-Paper Insulating Systems (in particular Transformer Insulation) using DC Dielectrometrics. Cigré 1990 Session, Paper 15/33-08.

[8] Tettex Instruments AG: Polarisation Spectrum Analysis for Diagnosis of Insulation Systems. Information 29, TI 29-d/e-04.92.

[9] G. Csépes, I. Hamos, I. Kispál, J. Schmidt and A. Bognár: A DC Expert System (RVM) for Checking the Refurbishment Efficiency of High-Voltage Oil-Paper Insulating System using Polarization Spectrum Analysis in Range of Long-Time Constants. Cigré 1994 Session, Paper 12-206.

[10] S.M. Gubanski and B. Holmgren: Diagnostics of Current Transformer Paper-Oil Insulation. 9th Intern. Symp. on High Voltage Engg., Graz 1995, paper 5660-1.

[11] U. Gäfvert and E. Ildstad: Modelling Return Voltage Measurements of Multi-Layer Insulation Systems. Proc. 4th Intern. Conf. On Properties and Applications of Dielectric Materials, 1994, IEEE Publication 94CH 3311-8, pp. 123–126.

[12] A. J. Kachler, R. Baehr, W. S. Zaengl, B. Breitenbach und U. Sundermann: Kritische Anmerkungen zur Feuchtigkeitsbestimmung von Transformatoren mit der «Recovery-Voltage-Methode». Elektrizitätswirtschaft 95(1996)19, S. 1238–1245.

[13] H.-J. Knab: Die Betriebsüberwachung von Transformatoren – Untersuchungen des Isolieröls als unentbehrliches Hilfsmittel in der Diagnostik. Bulletin SEV/VSE 87(1996)21, S. 41–47.

## Le diagnostic sur place des transformateurs de puissance

### Les courants de relaxation renseignent sur l'état d'isolement des composants et installations haute tension

Les matériaux isolants et systèmes d'isolement sont de prime importance pour les composants et installations haute tension; sur les transformateurs de haute puissance et à haute tension, ils se composent encore actuellement presque toujours du système traditionnel à huile minérale et cellulose. Le présent article montre comment une mesure des courants de relaxation  $I_{pol}$  et  $I_{depol}$  (voir fig. 2) permet une évaluation de l'état de l'isolement.

Une méthode élémentaire de fitting sert à déterminer d'abord des valeurs quantitatives pour les différents éléments d'un montage équivalent selon la figure 5 à partir des valeurs mesurées pour les courants de relaxation (voir table I pour les courants de relaxation de la fig. 4b). Ce montage équivalent permet de calculer l'influence de la fréquence sur la capacité effective  $C$  et le facteur de perte  $\tan\delta$ . Les figures 6a/b représentent les résultats de ces calculs pour les quatre paires de courants de relaxation de la figure 4a/b dans la plage de fréquence de  $10^{-4}$  à  $10^2$  Hz. Le résultat de cette détermination indirecte des propriétés fonctions de la fréquence concorde bien avec les valeurs mesurées directement au moyen d'un spectromètre diélectrique (fig. 6a/b). La méthode d'évaluation proposée fournit ainsi les grandeurs de diagnostic que sont la capacité et le facteur de perte pour une plage de fréquence importante en vue de l'évaluation des phénomènes de vieillissement dans un isolant au papier huilé. La méthode présentée peut servir à compléter et à améliorer le diagnostic des transformateurs.