Möglichkeiten der Isolationsdiagnose durch Bewertung der dielektrischen Antwort von Isoliersystemen

H. Borsi
Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen, Fachgebiet Hochspannungstechnik, Universität Hannover,

Übersicht

In den letzten Jahren ist das Interesse an Lebensdauer- Management und Diagnose sowie Abschätzung des Zustandes der Isolierung von Isoliersystemen in Komponenten der elektrischen Energieversorgung gestiegen. Um das Verhalten der Gesamtisolierung von Isoliersystemen mit Papier- Ölisolierung zu bestimmen werden seit längerer Zeit die dielektrischen Parameter der Isoliersysteme herangezogen. Als Messgröße dient dabei die dielektrische Antwort der Isolierung im Zeitbereich auf eine zeitlich begrenzte Gleichspannungserregung und im Frequenzbereich die Messung von Verlustfaktor über der Frequenz.
In diesem Beitrag werden zunächst die Grundlagen der Bestimmung der dielektrischen Antwort der Isoliersysteme und die Einflussparameter auf die dielektrische Antwort der Isoliersysteme in kurzer Form vorgestellt. Es werden dann Möglichkeiten zur Diagnose der Isoliersysteme anhand deren dielektrischer Antwort erläutert. Dabei werden die heute am häufigsten eingesetzten Diagnoseverfahren anhand der dielektrischen Antwort der Isoliersysteme im Zeit- und Frequenzbereich gegenübergestellt und diskutiert.

Einleitung

Als Folge der Liberalisierung der elektrischen Energieversorgung ist in den letzten Jahren der Bedarf und das Interesse an Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung und Lastoptimierung der Komponenten der elektrischen Energieversorgung stark gestiegen. Zu diesem Zweck ist die Kenntnis des Zustandes der Komponente von großer Bedeutung. Dabei spielt die Diagnose des Isolationszustandes eine große Rolle. Transformatoren sind eine der wichtigsten und kostenintensivsten Komponenten der elektrischen Energieversorgungsnetze. Hinzu kommt, dass weltweit die Transformatoren relativ alt sind. Viele der Leistungstransformatoren in den elektrischen Energieversorgungsunternehmen nähern sich dem Ende Ihres Designlebens. Obwohl viele dieser Transformatoren noch funktionieren besteht die Gefahr, dass bereits Alterungserscheinungen und Schädigungen der Isolierung vorhanden sind, die eine Lebensdauerverkürzung und einen Ausfall des Transformators zur Folge haben können. Bekanntlich altert die Isolierung von Transformatoren unter dem Einfluss von Sauerstoff, Wasser und Temperatur. Dabei erfolgt die Alterung der Zellulose sowohl elektrisch als auch chemisch und mechanisch.
Diese Alterungseinflüsse werden zu einer Diagnose der Isolation herangezogen. So wird z.B. durch die Messung der elektrischen Festigkeit der gealterten Isolierung und deren Vergleich mit der elektrischen Festigkeit der Isolierung im neuen Zustand der Alterungszustand der

Isolierung elektrisch ermittelt. Auch eine Teilentladungsmessung kann hier Aussagen über die Güte der Isolierung liefern.
Weiterhin können durch die Messung der gelösten und nicht gelösten Zersetzungsgase in der Flüssigkeit Rückschlüsse auf den Alterungszustand der gesamten Isolierung gezogen werden. Eine Zersetzung der Zellulosebestandteile kann auch durch eine chemische Analyse in der Isolierflüssigkeit ermittelt werden(Furfurol-Analyse).
Die mechanische Zerstörung der Zellulose kann unter bestimmten Voraussetzungen mit Hilfe der Messung des Polymerisationsgerades der Zellulose ermittelt werden. Hierzu muss in das Innenleben des Transformators eingegriffen werden und Teile der festen Isolierung der Wicklung entnommen werden. Dies hat einerseits eine Beschädigung der Isolierung zur Folge und andererseits gibt keine exakte Aussage über einen eventuell beschädigten Bereich der Isolierung. Gerade die feste Isolierung in Transformatoren ist jedoch bezüglich der Lebensdauer der Gesamtisolation von zentraler Bedeutung. Wenn der Zustand des Öls im Transformator nicht zufriedenstellend ist kann mit einer Behandlung oder einem Austausch der Isolierflüssigkeit Abhilfe geschaffen werden. Ist dagegen das Papier auch nur in einem kleinen Teilbereich beschädigt, so ist in der Regel ein Ausfall des Transformators mit zum Teil großen Schäden die Folge.
In den letzten Jahren versucht man zunehmend, eine Aussage über den Isolationszustand mit Hilfe der dielektrischen Antwort der Isolierung der Transformatoren zu machen. Diese zerstörungsfreien Verfahren sind nicht nur sensibel gegenüber den Alterungseinflüssen in der Isolierung, sondern können darüber hinaus Aussagen über weitere Einflussgrössen wie Feuchtegehalt in der festen Isolierung und Verschmutzung der flüssigen Isolierung liefern. Die Verfahren, die die Antwort der Isolierung zur Bestimmung des Isolationszustandes ausnutzen, werden grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilt welche als Verfahren, die im Zeitbereich arbeiten und Verfahren, die im Frequenzbereich arbeiten, beschrieben werden können. Alle diese Verfahren basieren auf der Messung der Polarisations- und Depolarisationsphänomene in der Isolierung.

Messung der dielektrischen Antwort im Zeitbereich

Es werden hier zwei Verfahren angewandt, nämlich die Messung der Wiederkehrspannung, (Recovery Voltage Measurement RVM) und die Polarisationsstrommessung (Polarisation – Depolarisation – Current PDC).

Grundlegende Betrachtung der Wiederkehrspannung (Recovery Voltage Measurement RVM)

Bei diesem Verfahren wird zunächst für eine bestimmte Zeit eine Gleichspannung entsprechend Bild 1 an den Klemmen des Prüflings angelegt.
Hier stellt p(t) die Sprungantwort des Dielktrikums dar. Der erste Teil in diesem Diagram als Antwort einer idealisierten Sprungfunktion symbolisiert die sehr schnellen Polarisationsvorgänge $p(t = t_0) = p_\infty$. Dieser Bereich kann weder im Zeit- noch im Frequenzbereich aufgenommen werden. Nach längerer Zeit werden alle Polarisationsvorgänge beendet und die Polarisation erreicht ihren Endpunkt $p(t = \infty) = p_s$.

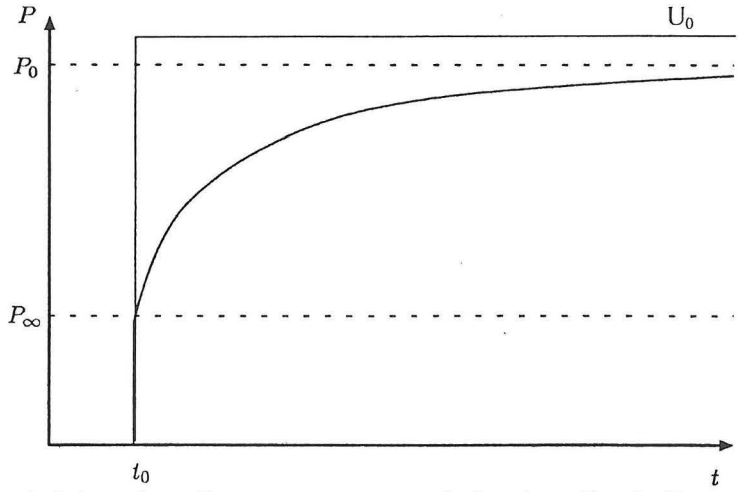


Bild 1: Polarisation infolge einer Sprungspannung mit der Amplitude U_0

Nach Entfernen der Gleichspannung werden die Klemmen des Prüflings für eine bestimmte Zeit kurz geschlossen. Nach dem Entfernen des Kurzschlusses baut sich infolge der Polarisations- und Depolarisationseffekte eine Spannung an den Klemmen des Prüflings auf, die als Wiederkehrspannung bezeichnet wird.
Bild 2 zeigt prinzipiell die Entstehung der Wiederkehrspannung. Während der Zeit $0 \le t \le t_1$ wird das Dielektrikum mit der Spannung U_0 aufgeladen. Während der Zeit $t_1 \le t \le t_2$ werden die Klemmen kurzgeschlossen. Nach der Zeit t_2 baut sich die Wiederkehrspannung auf, die an den offenen Klemmen des Prüflings gemessen werden kann.

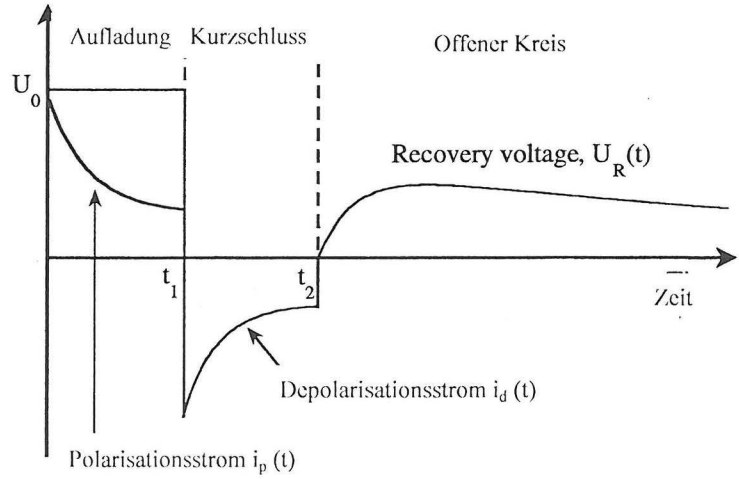


Bild 2: Prinzipdiagramm der Entstehung der Wiederkehrspannung.

Im Folgenden werden die Prozesse, die bei diesen Vorgängen stattfinden, kurz beschrieben.
Wenn ein dielektrisches Material infolge eines elektrischen Feldes E aufgeladen wird, wird das Material infolge der elektrischen Verschiebungsvorgänge polarisiert. Der Zusammenhang zwischen dem Vektor der elektrischen Verschiebungsdichte D, dem elektrischen Feld E und der Polarisation P wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$D = \varepsilon_0 E + P \qquad (1)$$

Die physikalische Konstante ε_0 in dieser Gleichung stellt die Permitivität des Vakuums dar. Der Zusammenhang zwischen der Verschiebungsdichte D und dem elektrischen Feld E ist im

allgemeinen linear und wird mit Hilfe einer Konstante ε, die die relative Permitivität genannt wird, wie folgt beschrieben:

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E \qquad (2)$$

Aus den Beziehungen (1) und (2) lässt sich der Zusammenhang zwischen Polarisation P und dem elektrischen Feld E wie folgt beschreiben:

$$P = \chi\varepsilon_0 E = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E \qquad (3)$$

Die Größe χ in dieser Gleichung stellt die dielektrische Suszeptibilität des Mediums dar.
Die Polarisationsvorgänge sind zeit- und frequenzabhängig und werden durch verschiedene Phänomene im Dielektrikum verursacht /1/. Dabei handelt es sich um elektronische, molekulare, Dipolorientierungs- und Grenzflächenpolarisationen.
Bei einem linearen und homogenen Isolierstoff kann die Polarisation beim Anlegen eines zeitvariablen elektrischen Feldes E(t) wie folgt definiert werden:

$$P(t) = \varepsilon_0(\varepsilon_\infty - 1)E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{t} f(t - t_0)E(t_0)dt_0 \qquad (4)$$

f(t) beschreibt hier die sogenannte Antwortfunktion des Dielektrikums. Die elektrische Verschiebungsdichte wird dann wie folgt beschrieben:

$$D(t) = \varepsilon_0\varepsilon_\infty E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{t} f(t - t_0)E(t_0)dt_0 \qquad (5)$$

Der erste Teil dieser Gleichung beschreibt die schnellen Polarisationsvorgänge, während der zweite Teil die langsamen Polarisationsvorgänge beschreiben.
Wenn nun ein elektrisches Feld E(t) an ein dielektrisches Material angelegt wird verursachen sowohl die gebundenen als auch die freien Ladungsträger einen Strom. Die Bewegung der freien Ladungsträger repräsentiert die Leitfähigkeit während die gebundenen Ladungsträger die dielektrische Verschiebung darstellen.
Die Stromdichte J(t) setzt sich dabei aus der Addition des Verschiebungsstromes und des Leitungsstromes wie folgt zusammen:

$$J(t) = \sigma\ E(t) + dD/dt \qquad (6)$$

Dabei ist σ die Gleichstromleitfähigkeit und D(t) ist die elektrische Verschiebung .
Wenn zum Zeitpunkt t = 0 eine Sprungspannung an den Klemmen der Isolierung angelegt wird kann der Polarisationsstrom aus der folgenden Beziehung ermittelt werden:

$$J_{polarisation} = E(\sigma + \varepsilon_0 f(t)) \qquad (7)$$

Im Falle einer Isolation mit der Kapazität C_0 sieht der Polarisationsstrom wie folgt aus:

$$J_{polarisation} = C_0\ U_a\ (\sigma/\varepsilon 0 + f(t)) \qquad (8)$$

Wenn wir nun die Sprungspannung von der Isolation trennen erhalten wir den sogenannten Depolarisationsstrom wie folgt:

$$J_{depolarisation} = - C_0 U_a (f(t) - f(t + t_{aufladung})) \qquad (9)$$

Unter der Voraussetzung großer Aufladezeit gegenüber der errechnete Responsefunktion kann der zweite Term in der obigen Funktion vernachlässigt werden. Unter dieser Voraussetzung ist die Antwortfunktion f(t) proportional zum Polarisationstrom. In diesem Falle kann die Responsefunktion und die Leitfähigkeit aus Polarisation- und Depolarisationsstrom ermittelt werden.
Die Responsefunktion beschreibt die Gedächnisfähigkeit eines dielektrischen Systems und liefert signifikante Informationen über das Isoliermaterial. Wenn der Kurzschluß geöffnet wird werden die durch die Polarisation gebundenen Ladungen frei und können eine Spannung zwischen den Klemmen des Dielektrikums aufbauen. Diese Spannung wird die Wiederkehrspannung genannt. Die Wiederkehrspannung wird durch die Relaxationsprozesse im Dielektrikum verursacht. Der äußere Strom während der RVM-Messung ist null. Die folgende Gleichung gibt dabei die Stromdichte an.

$$J(t) = \sigma E(t) * \varepsilon_0 \varepsilon_r d/dt\, E(t) * \varepsilon_0 d/dt \left(f(t-\tau) E(\tau) d\tau \right) \qquad (10)$$

E(t) ist dabei das elektrische Feld, welches aus der Wiederkehrspannung an den offenen Klemmen des Dielektrikums verursacht wird. Die obige Gleichung zeigt, dass die Wiederkehrspannung von der elektrischen Leitfähigkeit σ, von der relativen Permitivität ε_r und der dielektrischen Antwort f(t) abhängt. Alle diese Parameter werden sowohl durch die Alterung als auch durch die Feuchtigkeit beeinflusst. Weiterhin kann die Wiederkehrspannung durch die Geometrie der Anordnung und der angelegten Erregerspannung beeinflusst werden.
Das Phänomen RVM kann am besten mit Hilfe des Ersatzschaltbildes des Dielektrikums beschrieben werden. Wie erwähnt, nehmen die langsamen Polarisationsprozesse der Funktion f(t) und damit die Relaxationsströme kontinuierlich ab. Die Ströme können durch eine Summe von Differentialgleichungen /2/ simuliert werden. Diese Summe stellt zusammen mit der Kapazität bei Netzfrequenz C_∞ und dem Isolationswiderstand R_0 die Basis für das Ersatzschaltbild dar (Bild 3).

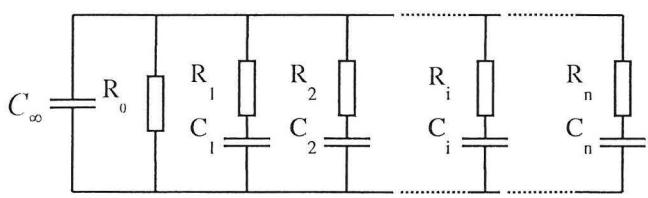


Bild 3: Ersatzschaltbild für ein lineares Dielektrikum

Wenn an den Klemmen dieser Schaltung die Spannung U_0 angelegt wird fließen die Polarisationsströme zusammen mit dem konstanten Strom durch den Widerstand in den Kreis und laden die Kapazität C_∞ auf. Mit Zeitverzögerungen entsprechend den RC-Gliedern werden auch deren Kapazitäten aufgeladen. Je nach der Länge der Ladezeit werden die Polarisationsprozesse in den RC-Gliedern teilweise oder vollständig aktiviert. Eine kurzzeitige Entladung infolge eines Kurzschlusses bewirkt zunächst lediglich eine Entladung der Kapazität C_∞. Bei längerer Kurzschlusszeit beginnen auch langsamere Polarisationsprozesse mit dem Ausgleich. Nach dem Öffnen der Klemmen (Entfernen des

Kurzschlusses) kann die Wiederkehrspannung als Folge der Polarisationsprozesse, die während des Kurzschlusses nicht erfolgt oder abgeschlossen wurden, in Form der Entladung in C_∞ und R_0 gemessen werden. Die Amplitude der Wiederkehrspannung ist proportional zur Spannung U_0.

Praktische Beispiele von RVM-Messungen

Die Höhe und die Lage des Maximums der Wiederkehrspannung hängt sowohl von den Parametern des Messaufbaus als auch von den Parametern des Messobjektes ab. Einige dieser Abhängigkeiten sollen im Folgenden anhand von gemessenen und berechneten Beispielen an verschiedenen Modellanordnungen und Transformatoren vorgestellt werden.

Einfluss der Aufladezeit

Bild 4 /3/ zeigt für ein Öl-Papier isoliertes Model /3/ bei einer Spannung von U_0 = 500 V die berechneten und gemessenen Wiederkehrspannungen. Als Parameter dient dabei die Aufladezeit, welche zu t_c = 100, 500 und 1000 Sekunden gewählt wurde. Die Kurzschlusszeit t_g war für alle Kurven konstant bei 10 Sekunden.
Untersuchungen anderer Autoren bestätigen dieses Verhalten /4/ und zeigen, dass bei gleichem Verhältnis der Auflade- und Entladezeiten die Höhe des Maximums der Wiederkehrspannung nahezu konstant bleibt (Bild 5). Im Bild 5 ist das Verhältnis der Auflade- und Entladezeiten konstant gleich 2 gewählt. Obwohl die absoluten Zeiten sich um das 10- fache unterscheiden sind die Höhen der gemessenen Spannungen nahezu identisch.

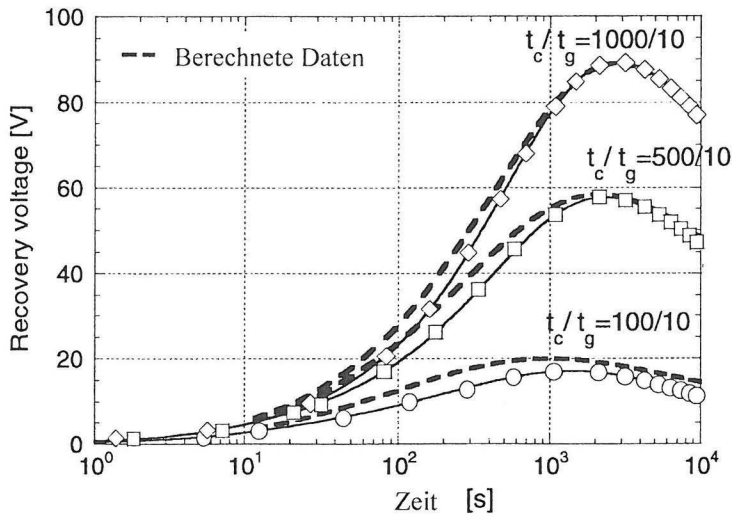


Bild 4: Berechnete und gemessene Kurven der Wiederkehrspannung für ein Öl-Papier isoliertes Objekt /3/.
Aufladespannung U_0 = 500 V
Aufladezeit t_c = 100, 500 und 1000 s
Kurzschlusszeit t_g = 10 s

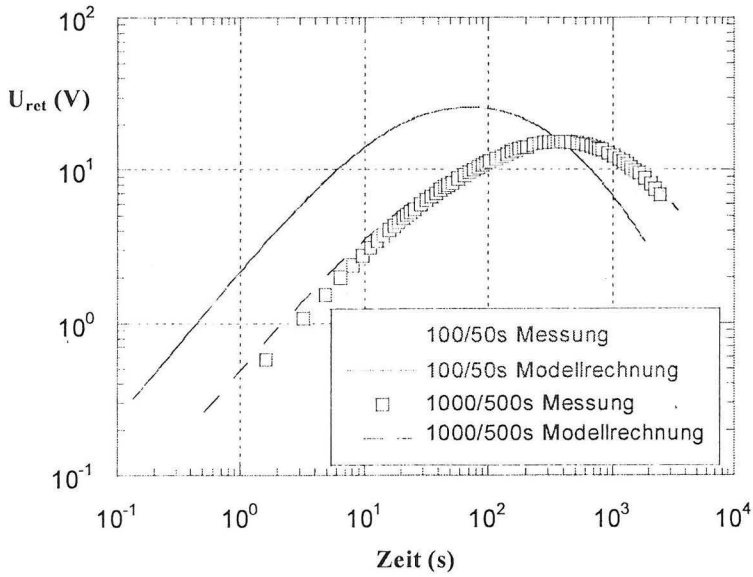


Bild 5: Berechnete und gemessene Wiederkehrspannungen ermittelt an einem Modell nach /4/.

Um die Einflüsse von Spannungshöhe, Geometrie des Isolationsaufbaus und Qualität der Isolierflüssigkeit (Leitfähigkeit) in verschiedenen Isolationszuständen zu untersuchen, wurde von der Firma Alstom-Venissieux in Frankreich ein spezielles Modell (Pancakemodell) entwickelt. Mit diesem Modell kann neben der Bestimmung der Einflüsse des Isolationszustandes auch der Einfluss der Geometrie (Öl-Papier-Verhältnis) bestimmt werden. Einige Ergebnisse der Untersuchungen mit diesem Modell sind in den folgenden Bildern (Bilder 6-8) dargestellt. Bild 6 zeigt die Einflüsse der Geometrie auf die RVM bei einer Spannung von U_0 = 500 V. Bei den drei oberen Kurven besteht die Anordnung aus verschiedenen Öl-Papier-Schichten, wobei die Dicke des Öls und des Papiers verändert wird. Die Verhältniszahlen 50/50 (04), 70/30 (03) und 85/15 (02) in den Kästchen zeigen das Dickenverhältnis des Öls zu Papier während bei den unteren drei Kurven die Dicke des Öls zu Null gewählt worden ist ((01), (05), (06)).

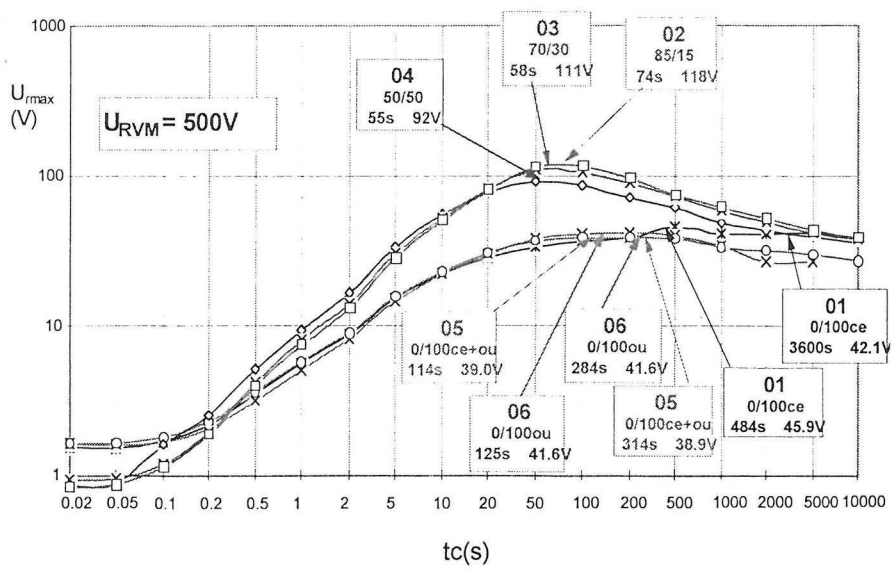


Bild 6: RVM –Kurven bei verschiedenen geometrischen Anordnungen der Spulen im Pancakemodell bei einer Spannung von 500V

Wie ersichtlich sind die Höhe der Maxima und die Zeiten des Auftretens der Maxima nahezu identisch, während bei den unteren Kurven die Maxima bei verschiedenen Zeiten auftreten.
Bild 7 zeigt die Kurven für die gleiche Konfiguration jedoch für eine höhere Spannung von 2000 V. Hierbei verhalten sich die Kurven ebenfalls ähnlich, wobei jedoch größere Differenzen sowohl in der Höhe als auch in der Zeit des Auftretens der Maxima sichtbar werden. Außerdem zeigen die bei 2000 V gemessenen Kurven höhere Werte des Maximums im Vergleich zu den bei 500V gemessenen.

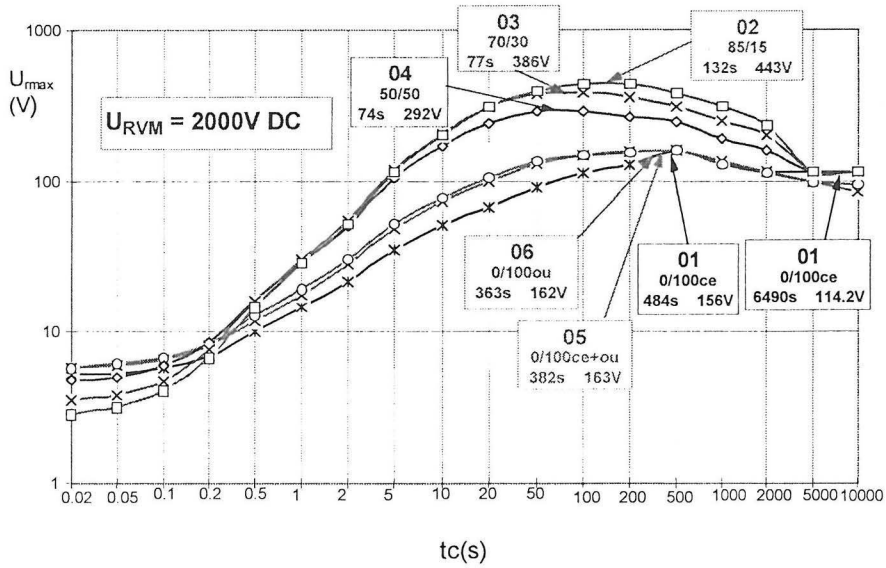


Bild 7: RVM –Kurven bei verschiedenen geometrischen Anordnungen der Spulen in pancake Model bei einer Spannung von 2000V

Eine zweimonatige thermische Belastung mit 65 °C führte zu einer Veränderung der Zeitkonstanten hin zu höheren Zeiten, wie dies im Bild 8 dargestellt ist.
Damit ist ersichtlich, dass sich die Zeitkonstante in Abhängigkeit von der Messzeit ändert. Je älter die Isolierung ist desto größer die Zeitkonstante.
Dieses Verhalten deutet auf eine Verringerung der Feuchte im Dielektrikum hin. Für diese Messung war eine Isolationskombination Öl-Papier mit einem Verhältnis von 85/15 zugrunde gelegt worden.
Bild 9 zeigt das RVM-Spektrum gemessen nach dem Austausch der Isolierflüssigkeit. Im Vergleich mit Bild 8 wird deutlich, dass der Austausch der Isolierflüssigkeit eine starke Veränderung des RVM-Spektrums verursacht. Das Maximum verschiebt sich von ca. 100 Sekunden und 118 V hin zu 1677 s und 110 V nach dem Ölwechsel. Dies zeigt den starken Einfluss der Ölleitfähigkeit. Weiterhin wird in Bild 9 der starke Einfluss der Geometrie sichtbar. Bei einer Veränderung des Verhältnisses Öl/Papier von 50/50 zu 85/15 verändert sich die Zeit des Maximums von 564 s auf 1677 s.
Diese Untersuchungen zeigen, dass das RVM-Spektrum nicht nur durch die Feuchte und den Zustand des Papiers, sondern auch durch die Geometrie der Anordnung und die Leitfähigkeit und den Zustand der Isolierflüssigkeit beeinflußt wird. Ausserdem haben weitere Parameter wie die Grenzschicht und der Gleichgewichtszustand der Feuchte zwischen Öl und Papier Einfluss auf die RVM-Kurven.

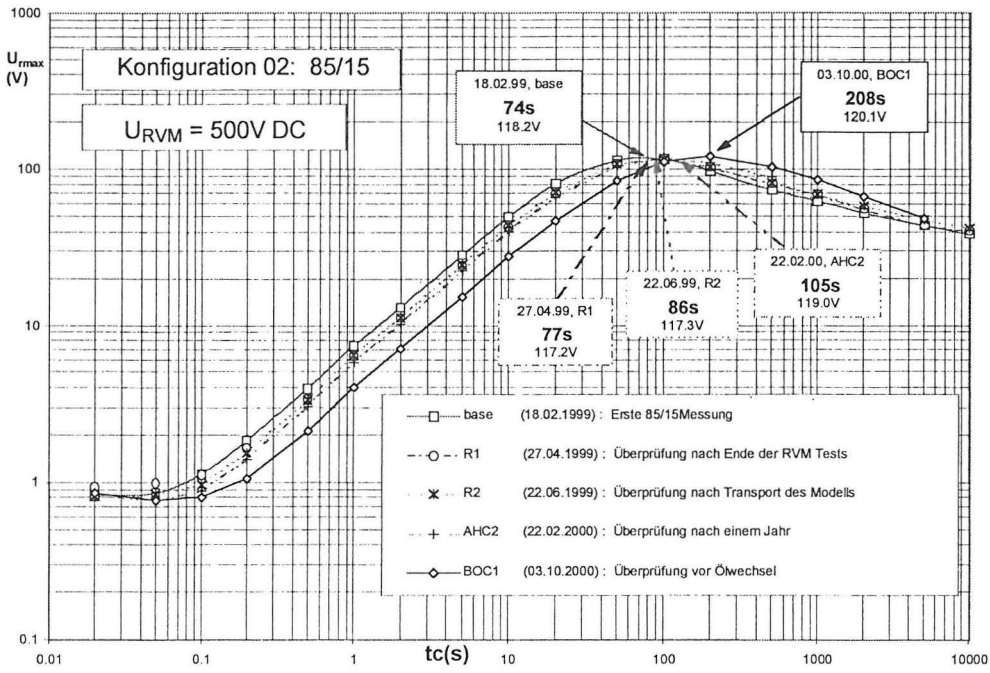


Bild 8: RVM –Spektrum gemessen am Pancakemodell bei einem Öl-Papier-Verhältnis von 85/15 bei 500 V nach einer 2 monatigen thermischer Alterung.

RVM-Untersuchungen, die während der Trocknung eines 29 Jahre alten 400/132 kV 240 MVA Transformators durchgeführt wurden zeigten, dass die Abschätzung der Feuchte im Papier aus dem Polarisationsspektrum zu Fehlinterpretationen führen kann. Der Ölzustand spielt eine dominierende Rolle.

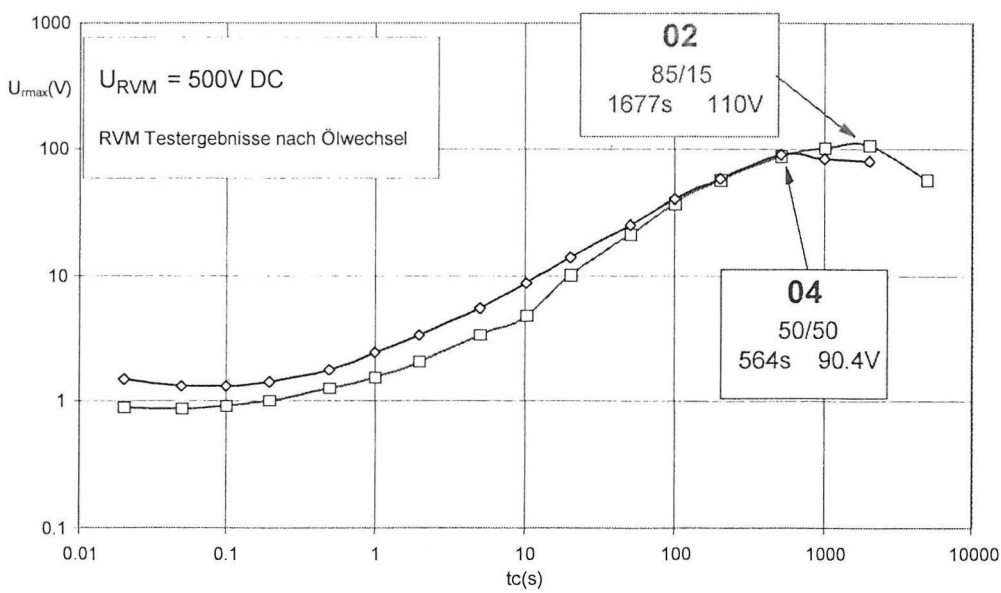


Bild 9: RVM-Spektrum des Pancakemodells für zwei verschiedene Geometrien nach dem Ölwechsel

Messung der Polarisations- und Depolarisationsströme

Ähnlich wie das RVM-Verfahren kann man mit der Messung der Polariasations- und Depolarisationsströme Informationen über die langsamen Polarisationsprozesse gewinnen. Unter der Voraussetzung, dass der Prüfling vollständig entladen ist, fliesst beim Anlegen einer Sprungspannung U_0 an den Prüfling mit der Kapazität C_0 der Polarisationsstrom $i_p(t)$.

$$i_{pol}(t) = C_0 U_0 \left(\frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right) \qquad (11)$$

In dieser Gleichung ist $\delta(t)$ die Deltafunktion, welche die Ableitung der Stufenspannung bei $t = 0$ ist. Wie ersichtlich besteht der Polarisationsstrom grundsätzlich aus zwei Teilkomponenten. Der eine Teil hängt mit der Leitfähigkeit zusammen und der zweite Teil mit der Aktivierung verschiedener Polarisationsprozesse. In den Materialien, die als elektrische Isolierung eingesetzt werden, treten verschiedene Polarisationsprozesse mit sehr unterschiedlichen Zeitkonstanten auf.

Beim Entfernen der Sprungspannung und unmittelbarer Kurzschluss des Prüfobjektes bei t_0 fliesst der Depolarisationsstrom. Dieser Strom kommt durch die Relaxation der Polarisationsprozesse, die während der Beanspruchung mit der Sprungspannung U_0 aktiviert worden sind. Der Depolarisationsstrom i_{depol} (t) für die Zeit $t > t_1$ kann wie folgt ermittelt werden:

$$i_{depol}(t) = -C_0 U_0 \left(f(t) - f(t - t_1) \right) \qquad (12)$$

Der Depolarisationsstrom hat gegenüber dem Polarisationsstrom ein negatives Vorzeichen. Bild 10 zeigt schematisch die Verläufe der Sprungspannung und des Polarisations- und Depolarisationsstroms.

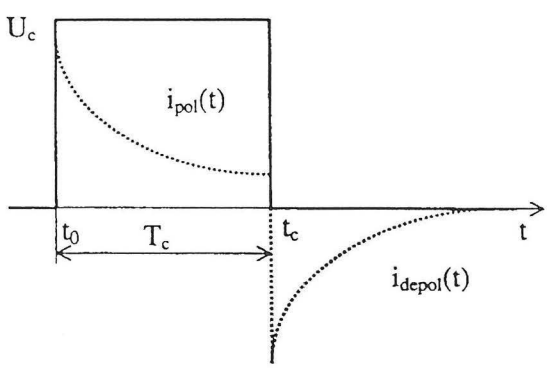


Bild 10: schematische Darstellung der Sprungspannung und des Polarisations- und Depolarisationsstroms.

In der Praxis wird der Polarisations-Depolarisationsstrom mit einem Zwei-Elektrodenverfahren, wie im Bild 11 gezeigt, gemessen.

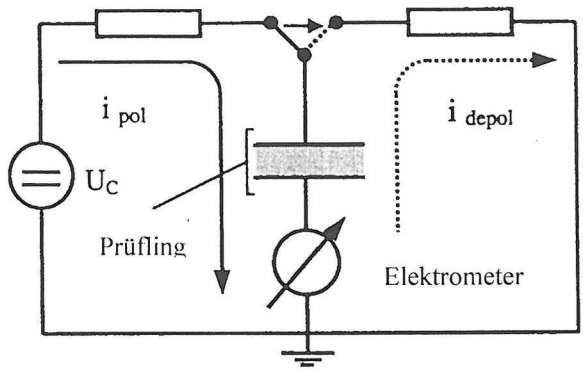


Bild 11: Prinzipieller Aufbau zur Messung der Polarisations- / Depolarisationsströme.

Durch die Wahl der Elektrodenkonfiguration kann dann der Polarisationsstrom i_{pol} und der Depolarisationsstrom i_{depol} definiert werden.
Bild 12 zeigt die Polarisations- und Depolarisationsströme bei einem Öl-Papier-Prüfling bei einer Spannung von U_0 = 3 kV. Der Prüfling hatte eine Kapazität von C_0 = 144 pF. Die Messzeit betrug t = 10,5 Sekunden /3/. Um die Ergebnisse auf andere Isoliersysteme mit unterschiedlicher Geometrie und Spannung übertragen zu können sind die Stromwerte auf U_0 und C_0 bezogen. Wie aus dem Bild zu entnehmen ist, sind in einem doppellogarithmischen Maßstab zwei Neigungensänderungen, einmal bei 10 s und einmal bei 2000 s, zu erkennen. Bei etwa 6000 Sekunden gibt es eine Trennung zwischen den Lade- und Entladeströmen. Dieser Punkt markiert den Beginn des Bereiches, bei dem während der Polarisation die Ströme durch die Gleichstromleitung dominieren.

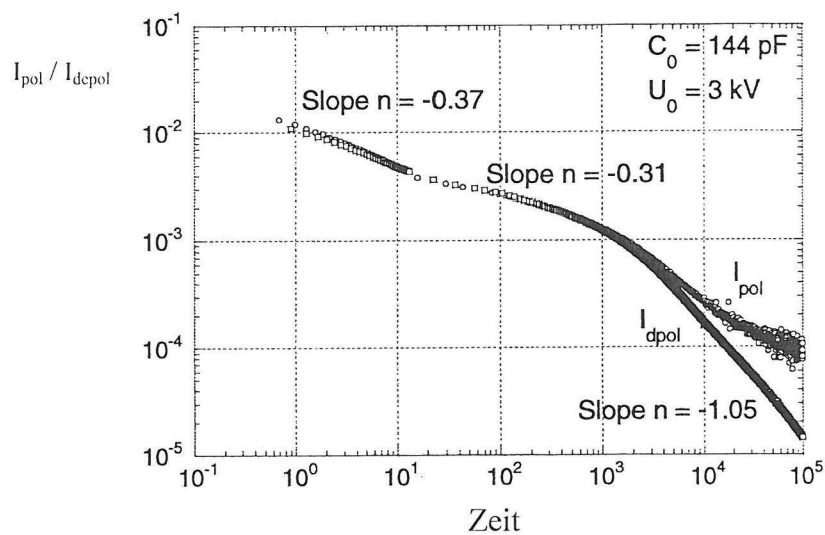


Bild 12: Polarisations- und Depolarisationsströme in einem Öl-Papier-isolierten Prüfling /3/.

Bei der Messung der Pol- / Depol-Ströme gibt es eine Faustregel, die besagt, dass die Aufladezeit etwa 10 Mal so lang sein soll, wie die Messzeit des Depolarisationsstroms damit der gemessene Depolarisationsstrom proportional zu der dielektrischen Antwortfunktion des Isoliersystems ist.

Es ist manchmal bei Isoliersystemen sehr schwer zwischen dem tatsächlichen Gleichstromleitungsstrom und verschiedenen Typen der langsamen Polarisationseffekte zu unterscheiden. Daher ist es wichtig, dass der Prüfling so lange aufgeladen wird um die tatsächliche Gleichstromleitfähigkeit zu erhalten

Im folgenden werden beispielhaft einige Ergebnisse vorgestellt, die an einem Öl-Papier Prüfling mit 2 mm Isolierschichtdicke imprägniert mit Mineralöl zwischen planparallelen Elektroden gemessen wurden. Dabei wurde der Wassergehalt und der Alterungszustand variiert. Der effektive Durchmesser der Elektroden betrug 113 mm. Die Kapazität C_0 betrug 44,4 pF.

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt, bei denen die Feuchte und der Alterungszustand der Proben variiert werden. Zunächst wurden die Proben durch eine 24- stündige Trocknung unter Vakuum bei 120 C° auf 0,2 % und 1 % getrocknet. Daran anschliessend wurden die Prüflinge mit entgastem und auf 5 ppm getrocknetem Mineralöl imprägniert.

Gealtert wurden die Prüflinge 90 Tage in einem abgeschlossenem Stahlbehälter bei 120 °C. Danach erhöhte sich die Feuchte der Prüflinge mit dem anfänglichen Wassergehalt von 0,2 % auf 0,5 % und bei den Proben mit dem anfänglichen Wassergehalt von 1 % auf 2 %. Während der Alterung stieg die Feuchtigkeit der Isolierflüssigkeit auf 9 ppm bzw. 19 ppm. Der Depolimerisationsgrad (DP) reduzierte sich durch die Alterung von anfänglich 950, auf 479 bzw. auf 195, wodurch die Effektivität des künstlichen Alterungsprozesses bestätigt wird.

Im Bild 13 sind einige Kurven für die Poalrisations- und Depolarisationsströme bei $U_0 = 200$ V für verschiedene Feuchtegehalte über der Zeit im Bereich von 1 s bis 200000 s dargestellt /5/.

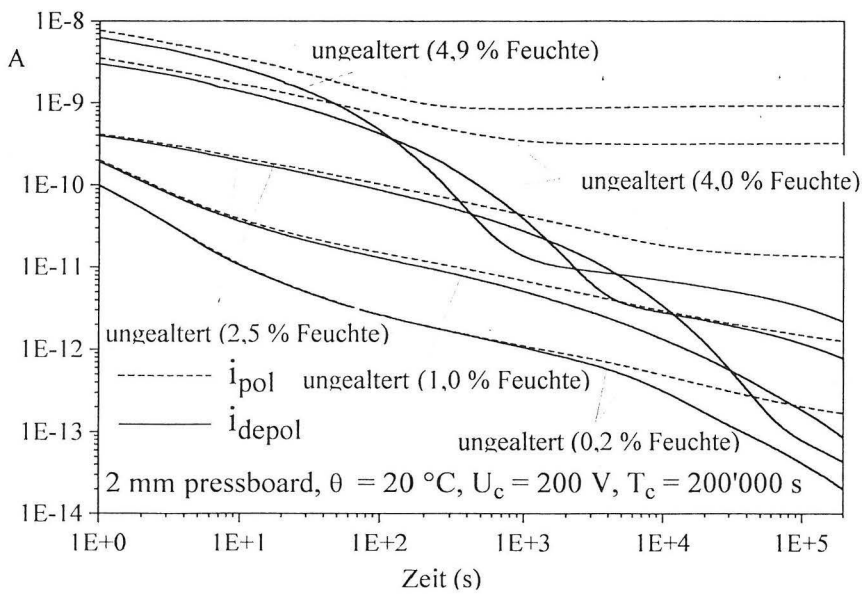


Bild 13: Polarisations- und Depolarisationsströme ungealterter Prüflinge mit verschiedenen Wassergehalten bei einer Messzeit von 200000 s.

Aus diesem Diagram ist der starke Einfluss der Feuchte auf die Absolutwerte der Stromkurven sichtbar. Weiterhin ist es ersichtlich, dass mit steigendem Wassergehalt der Einfluss des Leitungsstromes grösser wird. Die Amplitude des Leitungsstromes kann nach dem Abweichungspunkt der Kurven der Polarisations- und des Depolarisationsstromes bestimmt werden.

Der Hauptunterschied in Kurvenform und Amplitude der Ströme wird durch Polarisationsvorgänge an den mikroskopischen Grenzschichten innerhalb des Pressboards

verursacht. Lediglich ein geringer Anteil der Ströme wird durch hochfrequente Anteile der relativen Permitivität, welche ebenfalls von der Feuchte abhängig ist, verursacht.
Bild 14 zeigt für die Prüflinge aus Bild 13 die gleichen Diagramme vor und nach der Alterung der Prüflinge. Die Erhöhung der Feuchte infolge der Alterung von 1 % auf 2 % kann aus den Polarisations- Depolarisationsstromkurven entnommen werden. Kleine Veränderungen der Stromkurven können auch durch die Zersetzungsprodukte des Pressbordmaterials verursacht werden.

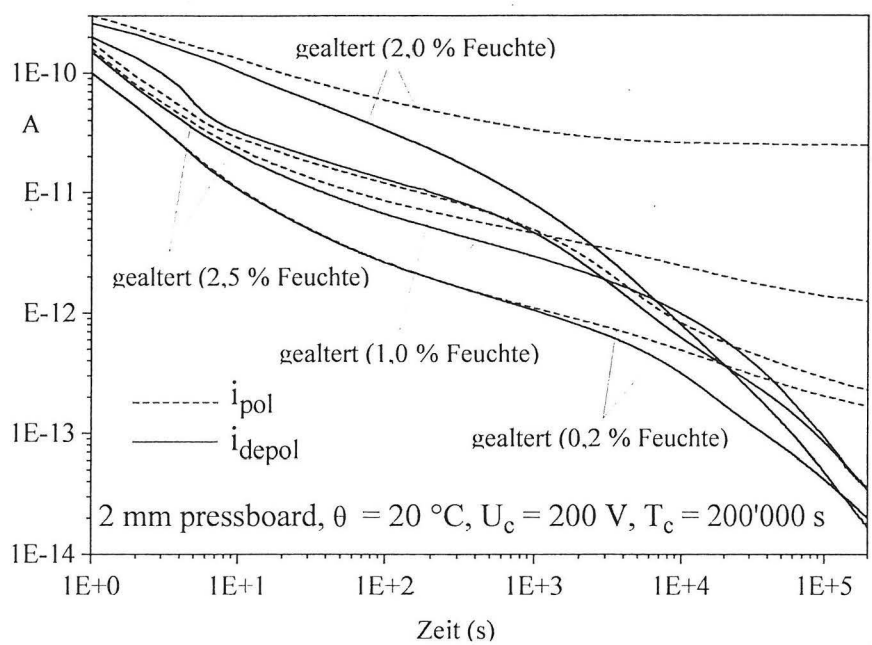


Bild 14: Polarisations- und Depolarisationsstöme der imprägnierten Pressboardprüflinge vor und nach der Alterung.

Zur Bestimmung des Einflusses der Geometrie auf die Polarisations- und Depolarisationsstöme sind Messungen an dem Pancakemodell durchgeführt worden. Bild 15 zeigt einige Untersuchungsergebnisse der Polarisations- und Depolarisationsstöme für verschiedene Schichtungskonfigurationen. Die Aufladespannung wurde klein gewählt, um Nichtlinearitäten in der Flüssigkeit zu vermeiden. Nur bei der Lage (01), bei der keine Ölschicht vorhanden ist, wurde eine höhere Aufladespannung von U = 200 V angelegt. Diese Spannung ist niedrig genug, um keine Nichtlinearitäten innerhalb des 10 mm dicken Pressboards zu verursachen. Bild 15 zeigt die Polarisations- und Depolarisationsstöme für die Schichtung (01) bis (04) umgerechnet für eine Ladespannung von U = 30 V. Die Aufladezeit betrug bei allen Messungen 5000 s. Aus den Kurven ist ein Einfluss der Geometrie ersichtlich.

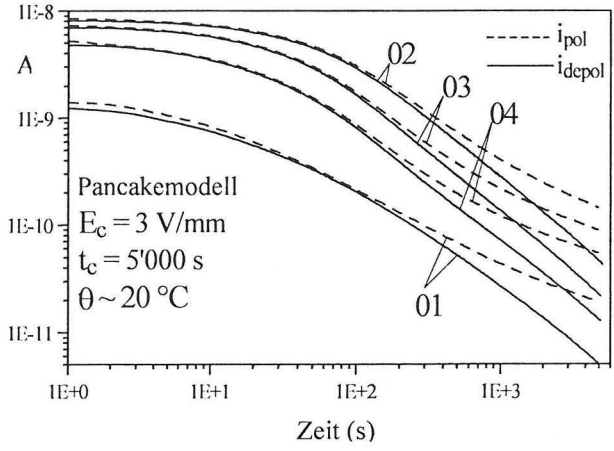


Bild 15: Polarisations- und Depolarisationsstöme gemessen an vier verschiedenen Schichtkonfigurationen des Pancakemodells. Die Feldstärke beim Ladevorgang betrug 3 V/mm.

Messung der dielektrischen Antwort im Frequenzbereich (FDS)

Diese Methode basiert auf der Verallgemeinerung der bekannten tan δ Messung bei der Netzfrequenz. Der Unterschied zu der konventionellen tan δ Messung besteht darin, dass hier anstelle einer einzigen Messung bei der Netzfrequenz viele verschiede Messungen bei unterschiedlichen Frequenzen durchgeführt werden.
Mathematisch können mit Hilfe einer Laplace- oder Foriertransformation die vorhin dargestellten Zusammenhänge vom Zeitbereich in den Frequenzbereich übertragen werden.
Die Stromdichte im Frequenzbereich $\hat{j}(\omega)$ bei einem Isoliermaterial unter dem Einfluss des Erregerfelds $\hat{E}(\omega)$ kann wie folgt beschrieben werden:

$$\hat{j}(\omega) = i\omega\varepsilon_0 \left[\underbrace{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega)}_{\text{kapazitiver Anteil}} - i \underbrace{\left(\frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right)}_{\text{resistiver Anteil}} \right] \hat{E}(\omega) \qquad (13)$$

In diesem Ausdruck stellen $\chi'(\omega)$ und $\chi''(\omega)$ die Anteile der komplexen Suszeptibilität des Materials dar, σ_{dc} ist die Gleichstromleitfähigkeit.
Dieser Ausdruck zeigt, dass der Strom aus zwei Komponenten besteht. Die eine Komponente ist in Phase mit dem angelegten elektrischen Feld, der sogenannte resistive Teil, und die andere Komponente, welche dem angelegten Feld um 90° voreilt, der sogenannte kapazitive Teil. Der Anteil des Stromes, der mit dem Feld in Phase ist, repräsentiert die Verluste in dem Material, welche infolge zweier verschiedener Mechanismen zustande kommen. Für den einen Bereich ist die Bewegung der freien Ladungsträger (Gleichstromleitfähigkeit) verantwortlich und für den zweiten Teil die Umorientierung der gebundenen Ladungsträger (Relaxationsverluste).
Die Messung von Kapazität und tan δ bei Netzfrequenz mit Hilfe von Messbrücken ist seit langem bekannt und Stand der Technik. Seit einigen Jahren werden diese Größen (insbesondere bei Kabeln) manchmal auch bei einer niedrigen Frequenz von 0,1 Hz in Verbindung mit niederfrequenten Hochspannungstestsytemen eingesetzt.

Mit Hilfe eines neuen Systems IDA 200 /6/ können seit einiger Zeit noch viel bereitere Frequenzbereiche zwischen 0,0001 Hz bis 1000 Hz gemessen werden.
Das Messprinzip kann wie folgt erläutert werden: Mit Hilfe eines digitalen Signalprozessors wird ein sinusförmiges Signal mit gewünschter Frequenz erzeugt, welches verstärkt und an den Prüfling angelegt wird. Die Spannung am Prüfling und der dadurch verursachte Strom durch den Prüfling werden gemessen. Daraus wird sowohl die Kapazität als auch der Verlustfaktor, tan δ des Prüflings als Funktion der Frequenz ermittelt.
Bei sehr tiefen Frequenzen sind die Messungen sehr zeitaufwändig. Um den Winkel zwischen Spannung und Strom zu ermitteln benötigt man mindestens 2 –3 Perioden. Für die Ermittlung eines Messwerts für Kapazität und tan δ bei einer Frequenz von 1 mHz kann somit eine Zeit bis zu 3000 s notwendig sein.
Bild 16 zeigt die Kapazität eines Prüflings aus imprägniertem Pressboard über der Frequenz. Als Parameter dient hier die Feuchte des Pressboards. Sie bewegt sich zwischen 0,2 % und 4 % /7, 8/.

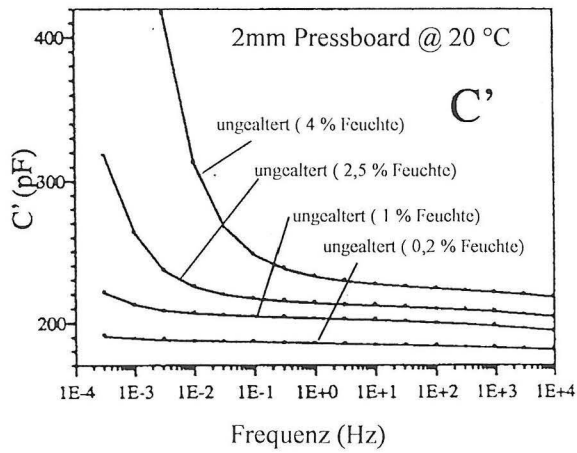


Bild 16: Realteil der komplexen Kapazität eines ölimprägnierten 2 mm dicken Pressboard–Prüflings bei 20 °C.

Wie ersichtlich, macht sich der Einfluss der Feuchte bei sehr tiefen Frequenzen sehr viel stärker bemerkbar als bei Netz- und höheren Frequenzen. Bei tiefen Frequenzen steigt die Kapazität viel stärker mit der Feuchte an. Diese Steigerung basiert auf der Tatsache, dass aufgrund der höheren Leitfähigkeit der Flüssigkeit gegenüber Pressboard bei tiefen Frequenzen das Feld verringert wird. Ein Teil der Kapazitätssteigerung wird durch die zusätzlichen Polarisationseffekte innerhalb des Pressboards verursacht.

Bild 17 zeigt für den gleichen Prüfling die entsprechenden tan δ Kurve über der Frequenz. Hieraus wird der Einfluss der Feuchte in tiefen und sehr tiefen Freqenzen viel stärker deutlich. Dieses Verhalten wird offensichtlich durch die infolge der Leitfähigkeit von Wasser angeregten Grenzschichtphänomene innerhalb des Pressboards verursacht.

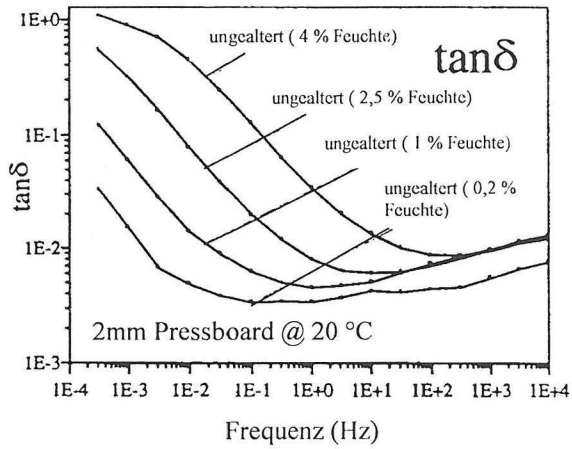


Bild 17: Verlustfaktor tan δ der imprägnierten Pressboard- Prüflinge

Untersuchungen an einem Transformator bestätigen die starke Frequenzabhängigkeit des tan δ. Bild 18 zeigt ein Beispiel für die Abhängigkeit des tan δ von der Frequenz. Die Untersuchungen sollen Aufschluss über die Feuchte in der festen Isolierung und die Leitfähigkeit der Isolierflüssigkeit liefern, die wiederum Indikatoren für den Isolationszustand des Transformators darstellen. In der Regel repräsentieren die hochfrequenten Anteile der Antwort im Bereich von 50 Hz bis 1000 Hz die Response der festen Isolation, wobei die Anwesenheit der Flüssigkeit in den Spalten die Antwort reduziert. Der mittlere Bereich der Antwort wird durch die Einflüsse der Isolierflüssigkeit dominiert. Dieser Bereich erstreckt sich zwischen etwa 100 Hz und 1 Hz. In tieferen Frequenzbereichen ist die Flüssigkeit nahezu kurzgeschlossen und nur die Grenzflächenpolarisationsanteile in der festen Isolation dominieren (Frequenzbereich 0.01Hz – 0.001 Hz).

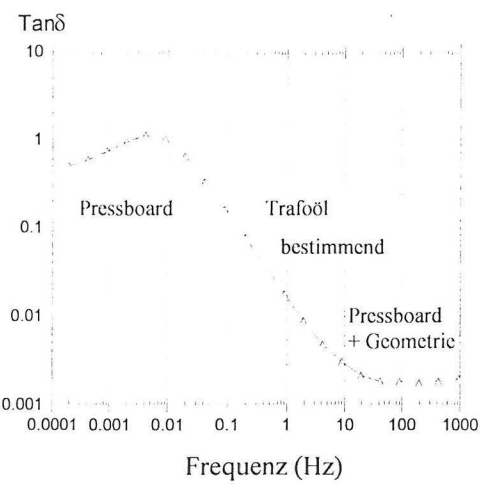


Bild 18: Tan δ- Messwerte über der Frequenz im Bereich zwischen 0,0001 Hz und 1000 Hz gemessen bei einer Spannung von 200 V.

Bild 19 zeigt tan δ über der Frequenz im Vergleich für zwei Transformatoren. Bei den beiden Transformatoren handelt es sich einmal um einen neuen Transformator, Baujahr 1999, bei dem die Messung zwischen Hochspannungs- und Niederspannungswicklung durchgeführt wurde während die dritte Wicklung geerdet war. Der zweite Transformator war wesentlich älter (Baujahr 1963), wobei ebenfalls die Messung zwischen der Hochspannungs- und der Niederspannungswicklung erfolgte. Wie ersichtlich zeigen die beiden Transformatoren sehr unterschiedliche Frequenzantworten. Bei dem neuen Transformator fällt der tan δ Wert sofort mit der Steigerung der Frequenz beginnend bei 1 mHz ab und zeigt bis zu hohen Frequenzen kein Maximum, während bei dem alten Transformator ein Maximum bei der Frequenz 0,01 Hz sichtbar ist. Dieser Unterschied kann in der Leitfähigkeit der Isolierflüssigkeit begründet sein. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass der neue Transformator im Vergleich zu dem alten wesentlich geringere Feuchtigkeit enthält. Messungen der Ölleitfähigkeit und -feuchte bestätigen diese Annahmen.

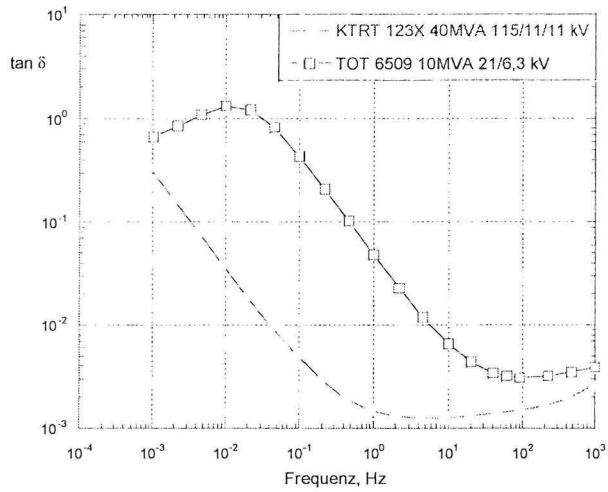


Bild 19: Verlustfaktor als Funktion der Frequenz für zwei verschiedene Transformatoren

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die Messung der dielektrischen Antwort der Isoliersysteme wertvolle Informationen über den Zustand der Isolation von Leistungstransformatoren liefert. Die Messung der dielektrischen Antwort kann im Zeitbereich (RVM, PDC) oder im Frequenzbereich (FDS) durchgeführt werden. Trotz unterschiedliche Messverfahren liefern alle diese Methoden vergleichbare Ergebnisse. Alle Verfahren reflektieren die Polarisationseffekte in der Isolierung. Trotzdem hat jedes dieser Verfahren seine eigens Schwächen und Stärken.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die dielektrische Antwort einer Isolierung durch den Ölzustand (Ölfeuchte, Ölleitfähigkeit), Feuchte in der festen Isolierung, Zustand der festen Isolierung (Alterungszustand), Grenzschicht zwischen der festen und der flüssigen Isolierung, Geometrie der Anordnung und Parameter des Messaufbaus beeinflusst werden kann. Über die Einflüsse jeder dieser Parameter gibt es bereits viele Untersuchungen. Für eine quantitaive Beurteilung, Kalibrierung und Diagnose der Isolation an Transformatoren sind jedoch weitere systematische Untersuchungen notwendig, bei denen die Einflüsse jeder dieser Parameter einzeln und in Kombination untersucht werden sollen und mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen aus der Praxis verglichen werden.

Referenzen

(1) von Hippel A.R., „Dielektric Materials and Applications". The Technology Press of M.I.T. and J. Wiley&Sons, New York 1958

(2) Der Houhanessian V., Zaengel W.S., „Time Domain Measurement of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems". 1996 IEEE Int. Symp. On Electr. Insulation, IEEE Publication 96CH3597-2, pp.47-52

(3) Hegelson A., „Analysis of Dielectric Response measurement Methods and Dielectric Properties of Resinreach Insulation During Processing". PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2000 ISSN 1100-1593

(4) Gäfvert U., Frimpong G., Fuhr J., „Modelling of dielectric measurements on power transformers". Proc.of the 1998 CIGRE Conference, Paris France, paper 15-103, 1998

(5) Der Houhanessian V. „Measurement and Analysisof Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems". Ph.D dissertation,ETH No 12832, Zurich, 1998

(6) PROGRAMMA Electric AB, Täby, Sweden

(7) Gäfvert et al, „Dielectric Spectroscopy in time and Frequency Domain Applied to Diagnostics of Power Transformers". 6th Int. Conf. On Properties and Applications of Dielctric Materials, Juni 2000, Xiàn, China

(8) Pugh J. „Dielectric measuremente using frequency response analysers". Fourth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, IEE Coference Publication 239, IEE 1984, pp 247-250

(9) Jonscher A.K. „Dielektric relaxation in solids". Cheslsea Dielectrics Press 1983

(10) Kachler A.J., Baehr, R., Zängel, W.S., Breitenbauch, B., Schmidt, J. „Kritische Anmerkungen zur Feuchtigkeitsbestimmung von Transformatoren mit der „Recovery-Voltage-Method". Elektrizitätswirtschaft, Jg. 95 (1996), Heft 19, S. 1238-1245

(11) Der Hohanessian V., Zaengel W.S. „On-site diagnosis of power transformers by means of relaxation current measurements". Conference Record of the 1998 IEEE Int. Symposium on El. Insulation (ISEI), Waschington, 7-10 June 1998, Publication 98CH36239

(12) Alff JJ, Der Hohanessian V., Zaengel W.S., Kachler A.J., „A noval, compact instrument for the evaluation of relaxation currents conceived for on-site diagnosis of electric power apparatus". CA, USA, April 2-5, 2000, Publication 00CH37075, pp.161-167

(13) Gäfvert U., „Condition Assesssment of Insulation systems - Analysis of Dielectric Response Methods" Proc.Nordic Insulation Symposium (Nord IS 96), June 10-12, 1996, Bergen, Norway, pp. 1-20

(14) Zaengel W.S., „Dielectric Spektroskopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment (Transformers, Cables ETC.)" 12th ISH, International Symposium on High Voltage Engineering, Session 9, August 2001, Bangalore, India