

Bestimmung des Wassergehaltes im Isolationssystem von Leistungstransformatoren

T. Leibfried

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik
Universität Karlsruhe

1. Einleitung

Wasser im Isolationssystem von Transformatoren wirkt als Katalysator für den chemischen Zersetzungsprozeß, vor allem der Feststoffisolation. Die Kenntnis des Wassergehaltes ist daher ein wichtiger Baustein einer modernen Instandhaltungsstrategie von Transformatoren.

Zur Bestimmung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation von Transformatoren hat sich die dielektrische Analyse als neues Verfahren neben der Analyse von Ölproben etabliert. Die dielektrische Analyse ist wesentlich aufwändiger, man erwartet dann aber deutlich verlässlichere Aussagen, als bei der einfacheren Analyse der Ölproben. Allerdings unterliegt auch die dielektrische Analyse bestimmten Einschränkungen. Weiterer Entwicklungsbedarf ist notwendig, um diese Einschränkungen zu überwinden und die Genauigkeit der dielektrischen Analyse zu verbessern.

2. Einfluß des Wassergehaltes auf die Alterung von Öl-Papier Isolationssystemen

Die **Alterung der Feststoffisolation** wird im wesentlichen durch die beiden Parameter **Betriebstemperatur und Wassergehalt** charakterisiert [1]. Die Feststoffisolation, also Papier und Transformerboard, besteht aus Zellulose. Hohe Temperaturen bewirken neben einer Zersetzung des Öls auch eine Aufspaltung der Zellulosemoleküle. Diese Zellulosemoleküle bestehen aus Glukoseringe, die kettenförmig aneinandergereiht eine Zellulosefaser bilden. Bei neuwertiger Zellulose beträgt die Kettenlänge ca. 1000 – 1200 Moleküle. Dies wird als **Durchschnittlicher Polymerisationsgrad (DP)** bezeichnet. Alterung der Feststoffisolation bedeutet die Aufspaltung der Molekülketten, d. h. die Verkürzung der Molekülkettenlänge. Die Feststoffisolation gilt als unbrauchbar, wenn der DP-Wert auf unter 150 abgesunken ist. Das Material ist dann so brüchig und spröde geworden, daß ein weiterer Betrieb des Transformators nicht mehr zu empfehlen ist.

Es ist schon seit langem bekannt, daß die Aufspaltung der Zellulosemoleküle, d. h. die Depolymerisation, durch das in der Feststoffisolation gespeicherte Wasser begünstigt wird. Seit den 60er Jahren wurden eine ganze Reihe von Untersuchungen zu diesem Thema in Forschungslabors [2, 3] (**Bild 1a**) und in Labors von Isolierstoffherstellern durchgeführt [1]. Eigene Untersuchungen in Zusammenarbeit mit dem Materiallabor der Siemens AG, Transforma-

torenwerk Nürnberg, haben diese Ergebnisse bestätigt. **Bild 1b** zeigt die Abnahme des DP-Wertes von 2 verschiedenen Materialproben infolge einer gleichartigen, künstlichen Alterung in Öl bei einer konstanten Öltemperatur von 95 °C. Unterschiedlich war die Anfangsfeuchte, also der Wassergehalt der Materialproben zu Beginn der Alterungsversuche. Diese betrug 20 % für die Materialprobe (1) und 1,9 % für die Probe (2). **Bild 1c** zeigt eine Abnahme des Wassergehaltes der Materialproben während des Versuchs. Dennoch fällt der DP-Wert bei der Probe mit dem hohen Wassergehalt von anfänglich 20 % deutlich stärker ab, als bei der Probe mit 1,9 % Anfangs-Wassergehalt. Mit zunehmendem Wassergehalt in der Transformatorboardprobe läuft der Spaltprozess der Zelluloseketten offenbar erheblich schneller ab. Außerdem lag der Endwert der DP-Wertes nach einer Versuchsdauer von 6 Monaten bei der Probe (2) mit dem anfänglich hohen Wassergehalt etwas niedriger. Zusammenfassend demonstriert der Versuch, daß der Prozess der Aufspaltung der Zelluloseketten der Feststoffisolation umso schneller und intensiver abläuft, je höher der Wassergehalt ist. Die physikalische Erklärung dieses Verhaltens liegt darin, daß es in einer Kette von Zellulosemolekülen stärkere und schwächere chemische Bindungen gibt. Wasser wirkt als Katalysator für den Spaltprozess wobei zunächst die chemisch schwächeren Bindungen aufgebrochen werden. Dies erklärt, daß bei der Materialprobe (1) mit anfänglich hohem Wassergehalt der DP-Wert zunächst stark absinkt, sich dann aber ab nach einer Alterungsdauer von 2 Monaten praktisch nicht mehr ändert. Bei der Materialprobe (2) dauert es wesentlich länger, bis die chemisch schwachen Bindungen gespalten werden.

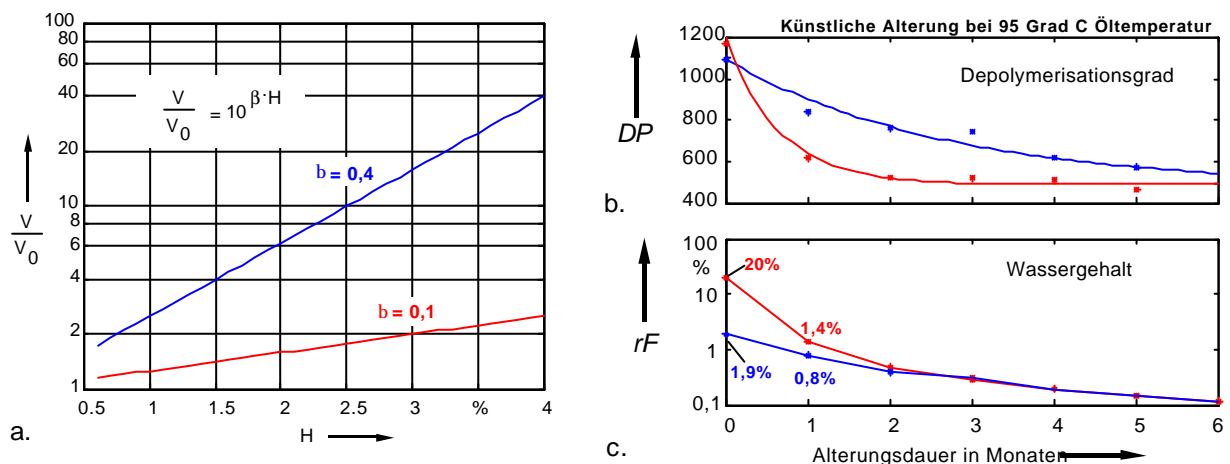


Bild 1. Steigerung der Depolymerisationsgeschwindigkeit durch Wasser als Katalysator für den chemischen Spaltprozess

a. Relative Depolymerisationsgeschwindigkeit V/V_0 von Zellulose (Preßspan) in Abhängigkeit des Wassergehaltes H in der Zellulose nach Bouvier [2] für verschiedene Materialparameter $0,1 < b < 0,4$

Eigene Untersuchungen: Künstliche Alterung von 1mm starkem Pressboard in Öl bei einer Temperatur von 95° C bei unterschiedlichem Anfangswassergehalt der Materialproben (1) und (2)

b. Abnahme des DP-Wertes über der Zeit

c. Abnahme des Wassergehaltes (F in %) über der Zeit (bestimmt mit der Karl-Fischer-Titration)

Wasser im Isolationssystem eines Transformators ist zu einem Anteil von > 99 % in der Feststoffisolation gespeichert, nur ein Anteil von < 1 % ist im Öl gelöst, abgesehen von freiem Wasser, das hier jedoch nicht betrachtet werden soll. Dieser Aspekt der Alterung von Isolationssystemen findet heute zunehmend mehr Beachtung, sicher auch aufgrund der gegebenen Altersstruktur des Transformatorbestandes. Ein erheblicher Bestand der heute betriebenen Transformatoren, ist älter als 30 Jahre, wie verschiedene Untersuchungen von Seiten der Energieversorgungsunternehmen und unabhängigen Institutionen entnommen werden kann [4, 5].

3. Dielektrische Analyse

Verfahren zur dielektrischen Analyse von Isolationssystemen sind

- PDC-Analyse (PDC = **P**olarization and **D**epolarization **C**urrent) [6]
- FDS-Analyse (FDS = **F**requency **D**omain **S**pectroscopy) [7]
- RVM-Analyse (RVM = **R**ecovery **V**oltage **M**easurement) [8]

Im Grunde sind alle 3 Verfahren – wenn man sie technisch richtig angewendet und die notwendigen systemtheoretischen Grundlagen beachtet – äquivalent. Man kann sie zumindest theoretisch ineinander umrechnen. Sie unterscheiden sich in der Abbildung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation in den Größen Polarisations- und Depolarisationsstrom (PDC-Analyse), $\tan \delta$ (FDS-Analyse) und Rückkehrspannung (RVM-Analyse).

Hier kommt es entscheidend darauf an, dass sich der Wassergehalt in der Feststoffisolation möglichst klar und eindeutig in der entsprechenden Diagnosegröße niederschlägt. Von den meisten Fachleuten wird die Auffassung vertreten, dass die PDC- und FDS-Analyse i. a. zu brauchbaren Ergebnissen führt, während die RVM-Methode weniger geeignet für eine Bestimmung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation von Leistungstransformatoren ist.

Dennoch zeigte sich in der Vergangenheit, dass auch die PDC- und FDS-Analyse weiterer Verbesserung bedürfen, um die Zuverlässigkeit zu steigern. Dem Autor liegen Erfahrungen vor, nach welchen mit der PDC-Analyse in ca. 90 % aller Fälle eine genügend genaue ($< \pm 0,5\%$) Bestimmung des Wassergehaltes in Transformatoren möglich ist. Bei der FDS-Analyse dürften ähnliche Verhältnisse vorliegen, da beide Verfahren in enger Verwandtschaft zueinander stehen und auch ineinander umgerechnet werden können [6].

Im Folgenden sollen die Einschränkungen der beiden Verfahren diskutiert werden – auf Basis der PDC-Analyse. Die beschriebenen Einschränkungen und die Abhilfemaßnahmen sind aber auch bei der FDS-Analyse zutreffend und ggf. wirksam.

4. PDC-Analyse als Methode zur Bestimmung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation von Transformatoren

4.1 Vorgehensweise bei der PDC-Analyse

Ein Verfahren zur Diagnose der Hauptisolation von Leistungstransformatoren ist die PDC (polarization and depolarization current) Analyse [6]. An die Hauptisolation, also zwischen Ober- und Unterspannungswicklung, wird für eine bestimmte Polarisationszeit T_L eine Gleichspannung U_0 von einigen 100 V angelegt (**Bild 2a**). Es fließt ein impulsartiger Ladestrom (Polarisationsstrom), der dann monoton auf einen konstanten Wert abfällt, gegeben durch die Leitfähigkeit des Dielektrikums. Nach Ablauf der Polarisationsdauer T_L wird der Schalter S umgelegt und das Dielektrikum über das Amperemeter kurzgeschlossen. Es fließt ein impulsartig ansteigender Entladestrom (Depolarisationsstrom) entgegen gesetzter Polarität, der monoton auf den Wert Null abklingt, bis sich die Kapazität vollständig entladen hat.

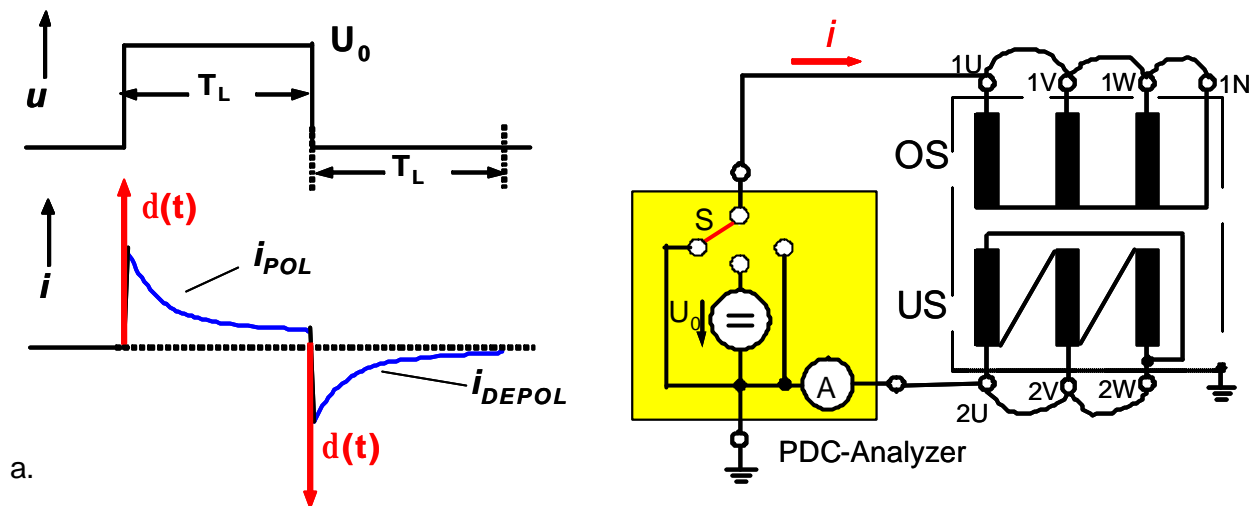
Im nächsten Schritt wird nun für die Hauptisolation des Transformators ein Modell parametrisiert. Aus der Polarisationscharakteristik von Materialproben mit genau definiertem Feuchtigkeitsgehalt sowie der Geometrie von Hauptisolation und Probenanordnung können alle Parameter des dielektrischen Transformatormodells berechnet werden. Aus dem „Best Fit“ zwischen den am Transformator gemessenen Relaxationsströmen und den aus dem Modell berechneten Relaxationsströmen erhält der Anwender eine ganze Reihe von Informationen über das Isolationssystem, z. B. den Wassergehalt des Isolationssystems, $\tan \delta$, die Leitfähigkeit des Öls, den Polarisationsindex (z. B. R_{15}/R_{60}) sowie das Polarisationspektrum.

Das Verfahren läßt sich also in drei Schritte gliedern (**Bild 2b**):

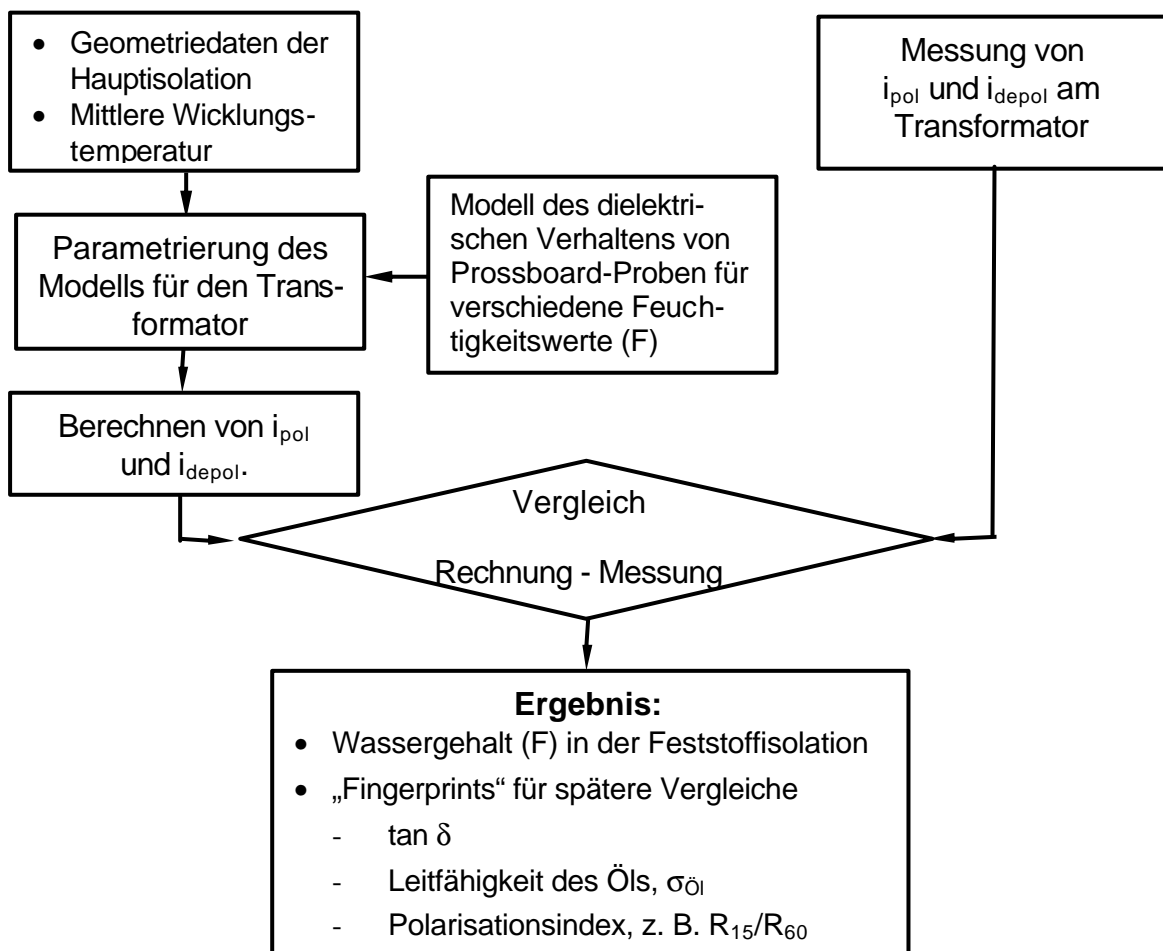
- 1) *Messungen des Polarisations- und Depolarisationsstromes am betreffenden Transformator*
- 2) *Parametrieren eines Modells für das dielektrische Verhalten des Isolationssystems*
In dieses Modell gehen die Geometrie des Transformators, die mittlere Wicklungstemperatur T_{wm} zum Zeitpunkt der Messung sowie bekannte Modelle und Eigenschaften des dielektrischen Verhaltens von Isolieröl und Pressboard ein.
- 3) *Vergleich der gemessenen und berechneten Polarisations- und Depolarisationsströme*
Aus dem Modell für den Transformator können die Polarisations- und Depolarisationsströme für verschiedene Feuchtigkeitswerte der Feststoffisolation bei der Meßtemperatur T_{wm} berechnet werden. Der Vergleich der berechneten und gemessenen Polarisations- und Depolarisationsströme liefert einen „Best Fit“ für einen bestimmten Feuchtigkeitswert. Auf diese Weise kann der Wassergehalt der Feststoffisolation genügend genau bestimmt werden.

Zur Parametrierung des aus Widerständen und Kapazitäten bestehenden Modells des Isolationssystems benötigt man den genauen Aufbau des Isolationssystems im Streukanal zwischen den beiden ans Meßgerät angeschlossenen Wicklungen (**Bild 3**). Die Geometrie der Barrieren, Leisten und Ölkänaäle kann zusammengefaßt und damit vereinfacht werden. Aus dieser geometrischen Ersatzanordnung ergibt sich direkt die Struktur des sehr komplexen dielektrischen Modells für den gesamten Transformator. Das elektrische Verhalten eines Dielektrikums kann durch eine RC-Schaltung nachgebildet werden. Hierbei berücksichtigen R_z die DC-Leitfähigkeit und C_z die 50-Hz-Kapazität der Anordnung. Die RC-Reihenglieder model-

lieren alle Polarisationsvorgänge, die im Zeitbereich $t > 1$ s auftreten. Alle anderen Polarisationsvorgänge im Zeitbereich $t < 1$ s sind in C_z enthalten.



a.



b.

Bild 2. Schematische Darstellung der für die PDC-Analyse notwendigen Schritte
 a. Messung von Polarisations- und Depolarisationsstrom
 b. Prozessschritte der PDC-Analyse

Öl wird bislang im betrachteten Zeitbereich ($t > 1\text{ s}$) nur durch eine RC-Parallelschaltung modelliert, bestehend aus der Permittivität (Kapazität) der Ölkanäle und einem Widerstand zur Nachbildung der Leitfähigkeit des Öls. Im PDC-Analysesystem sind Modelle für das dielektrische Verhalten von Pressboard-Proben für verschiedene Feuchtigkeitswerte gespeichert. Die Software des PDC-Analysesystems berechnet dann aus den Modellen der Materialproben und der Geometrie des Isolationssystems alle Werte des RC-Ersatzschaltbildes und die sich ergebenden Polarisations- und Depolarisationsströme.

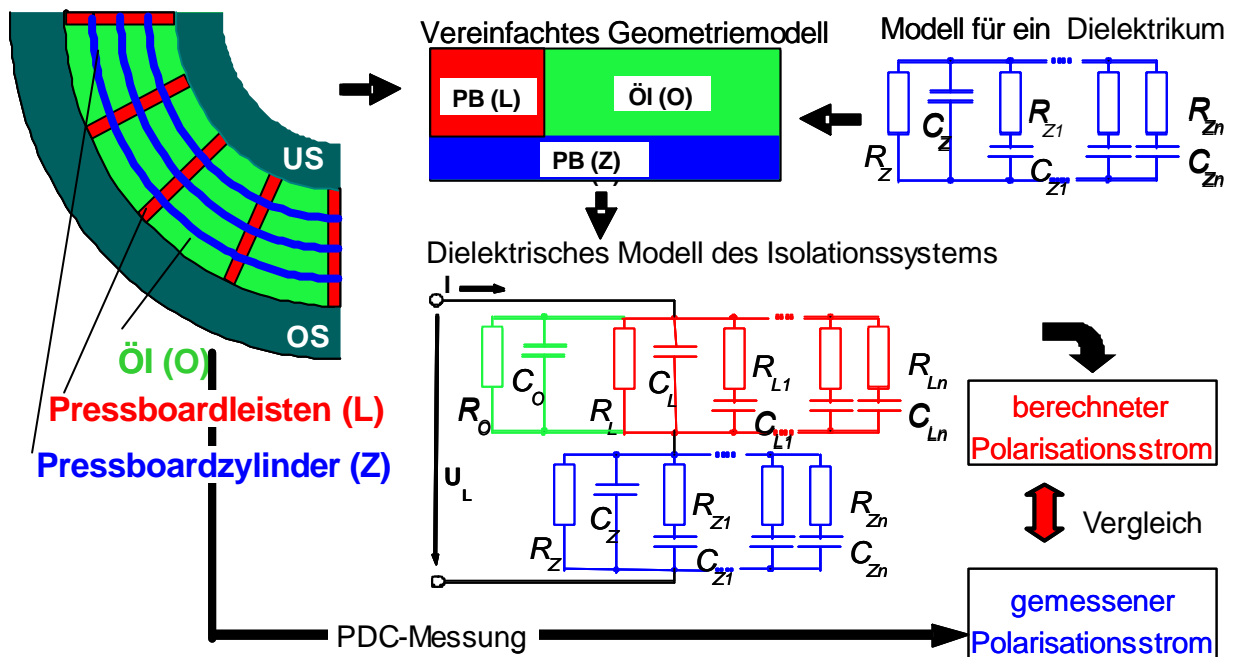


Bild 3. Modellierung der Hauptisolation eines Transformators und Aufstellen des Ersatzschaltbildes zur Beschreibung des dielektrischen Verhaltens der Hauptisolation

Erfahrungen, die im Zusammenhang mit der LFH-Trocknung von Transformatoren gesammelt wurden zeigen, dass mit der PDC-Analyse in ihrer heutigen technischen Realisierung, d. h. nur der Berücksichtigung des quasi homogenen elektrischen Feldes zwischen den Wicklungen, in ca. 90 % aller Fälle brauchbare Ergebnisse erzielt werden können. Es wird dann ein Wert für den Wassergehalt mit einer Genauigkeit im Bereich $\pm 0,5\%$ erzielt. Es wurden jedoch auch Fälle bekannt, bei denen sowohl die PDC- als auch die FDS-Analyse zu eher unbefriedigenden Ergebnissen hinsichtlich der Genauigkeit führten. Im folgenden sollen mögliche Ursachen dafür und mögliche Abhilfemaßnahmen diskutiert werden.

Es sei hier ausdrücklich festgestellt, dass die Maßnahmen beiden Methoden, d. h. sowohl der PDC- als auch der FDS-Methode zugute kommen.

4.2 Verbesserungspotenziale bei der dielektrischen Analyse, dargestellt anhand der PDC-Analyse

4.2.1 Berücksichtigung des elektrischen Feldes an den Wicklungsenden

Bei den bisherigen theoretischen Betrachtungen und den entsprechenden softwaretechnischen Realisierungen von PDC- und FDS-Methode blieb das elektrische Feld am Wicklungsende meist außer Betracht. Hauptgrund dafür ist die schwierige Modellierung, da die Geometrie des Isolationssystems an den Wicklungsenden sehr kompliziert ist.

Es stellt sich allerdings die Frage ob dies korrekt ist – vor allem bei gealterten Transformatoren. Denn es gibt einen Strompfad von einer Wicklung (z. B. OS-Wicklung) zur nächsten Wicklung (z. B. US-Wicklung) eines Wicklungssatzes, der bis auf die Leiterisolation der Wicklung eine reine Ölstrecke darstellt. Dieser Pfad wird durch die Ölkanäle im Bereich der oberen Endisolation der Wicklungen gebildet (**Bild 4**). Je nach Kühlungsart (ON, OF oder OD) existiert ein solcher Strompfad auch im unteren Wicklungsaufbau. Der Strompfad ist zwar relativ lang, andererseits ist die Ölleitfähigkeit vor allem bei gealtertem Öl im Vergleich zu Transformerboard um einige Größenordnungen geringer, so dass der über diesen Pfad fließende Strom im Vergleich zu dem Strom durch den Bereich des homogenen elektrischen Feldes durchaus eine Rolle spielen kann. Um dies zu klären bedarf es allerdings noch detaillierter Untersuchungen.

Abgesehen davon, tragen auch kapazitive Ströme durch das Isolationssystem im Randbereich zum Gesamtstrom bei. Auch hier muß noch untersucht werden, ob diese Ströme nennenswert zum Gesamtstrom beitragen.

Die Modellierung beider Ströme ist deutlich schwieriger, als die Berechnung des Stromes durch den homogenen Teil des Isolationssystems. Ein möglicher Weg könnte in einer abschnittswisen Modellierung des elektrischen Feldes im Randbereich durch Teilkapazitäten und Widerstände bestehen. Diese abschnittswise Modellierung ist dann allerdings geometrieabhängig und damit stark abhängig von der Konstruktion des Transformators. Hier müssen Verfahren entwickelt werden, die eine praktikable Umsetzung der Berechnung ermöglichen.

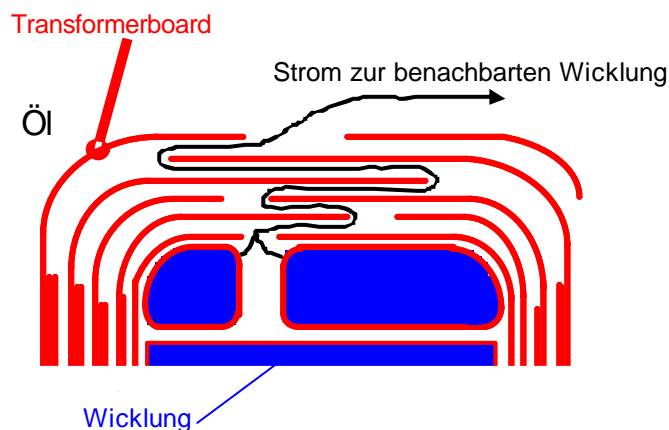


Bild 4. Strompfad von Wicklung zu Wicklung

4.2.2 Temperatureinfluß auf die Relaxationsströme

Nennenswerten Einfluß auf die Relaxationsströme hat die Temperatur (**Bild 5a**). Die Temperatur des Isolationssystems ist aber einerseits nur schwer zugänglich, andererseits ist sie sicherlich lokal auch unterschiedlich. Man wird daher schon aus Gründen der Unkenntnis der genauen Temperatur des Isolationssystems und weil eine abschnittsweise Modellierung des Isolationssystems mit jeweils etwas unterschiedlichen Temperaturen zu einem praktisch nicht durchführbaren Aufwand führt, eine nur begrenzte Genauigkeit der Modellierung erreichen.

Ein praktikabler Weg könnte sein, die mittlere Wicklungstemperatur durch Messung des mittleren Wicklungswiderstandes zu bestimmen (**Bild 5b**). Für Kupfer als Leitermaterial ergibt sich der aktuelle Wicklungswiderstand R_A aus der aktuellen mittleren Wicklungstemperatur ϑ_A , dem Wicklungswiderstand R_P und der mittleren Wicklungstemperatur ϑ_P einer Prüffeldmessung aus

$$R_A = R_P \cdot \frac{\vartheta_A + 235}{\vartheta_P + 235} \quad (1)$$

Daraus lässt sich dann bei Messung von R_A die mittlere Wicklungstemperatur ϑ_A bei bekannten Prüffeldwerten R_P und ϑ_P berechnen.

Der Wicklungswiderstand kann kontinuierlich während der Relaxationsstrommessung durch Anlegen einer Gleichspannung an die Wicklung gemessen werden (**Bild 5b**). Die Gleichspannungsquelle muß hochkonstant sein, Gleichspannung und Gleichstrom können mit hoher Genauigkeit gemessen und digital aufgezeichnet werden. In der Praxis muß allerdings untersucht werden, ob die Messung des Polarisationsstromes durch den fließenden Gleichstrom durch die Wicklung beeinflusst wird.

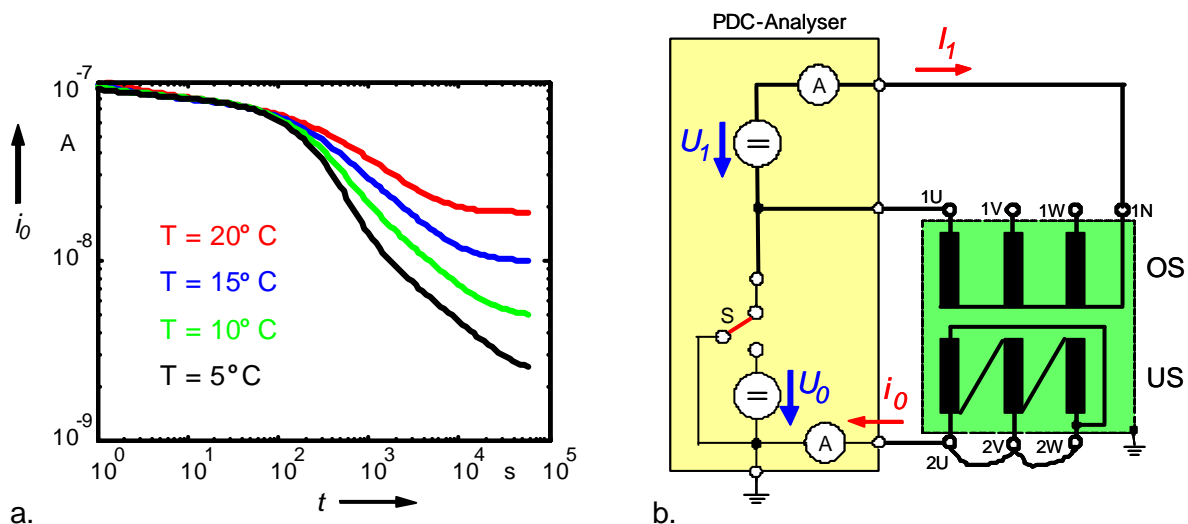


Bild 5. a. Temperaturabhängigkeit des Polarisationsstromes
b. Messung von Polarisationsstrom und Wicklungswiderstand

Im Kontrast zur Auswirkung der Temperatur macht sich der eigentlich interessierende Wassergehalt auf andere Weise bemerkbar. **Bild 6a** zeigt den Polarisationsstrom vor und nach einer Aktivteiltrocknung eines 240-MVA-Transformators. Die Messung erfolgte bei annähernd gleicher Temperatur, so dass der Einfluß der Temperatur bei diesem Beispiel gegenüber jenem des Wassergehaltes vernachlässigt werden kann. Der Unterschied im Polarisationsstrom durch einen Wasserentzug von ca. 86 Liter durch die Aktivteiltrocknung macht sich vor allem im Zeitbereich $> 10 \dots 100$ s deutlich bemerkbar. Bei geringerem Wassergehalt im Transformator ist auch der Polarisationsstrom über praktisch den gesamten Zeitbereich geringer. Direkt nach Beginn der Messung ($t \approx 0$) ändert sich hingegen der Polarisationsstrom durch den Wassergehalt nicht. Er wird vielmehr durch die Leitfähigkeit des Öls bestimmt.

Im $\tan \delta$ macht sich die Abhängigkeit des Wassergehaltes vor allem bei tiefen Frequenzen bemerkbar (**Bild 6b**). In beiden Fällen ist eine gute Separierbarkeit des Einflusses des Wassergehaltes von anderen Einflussparametern auf den Polarisationsstrom und den $\tan \delta$ gegeben.

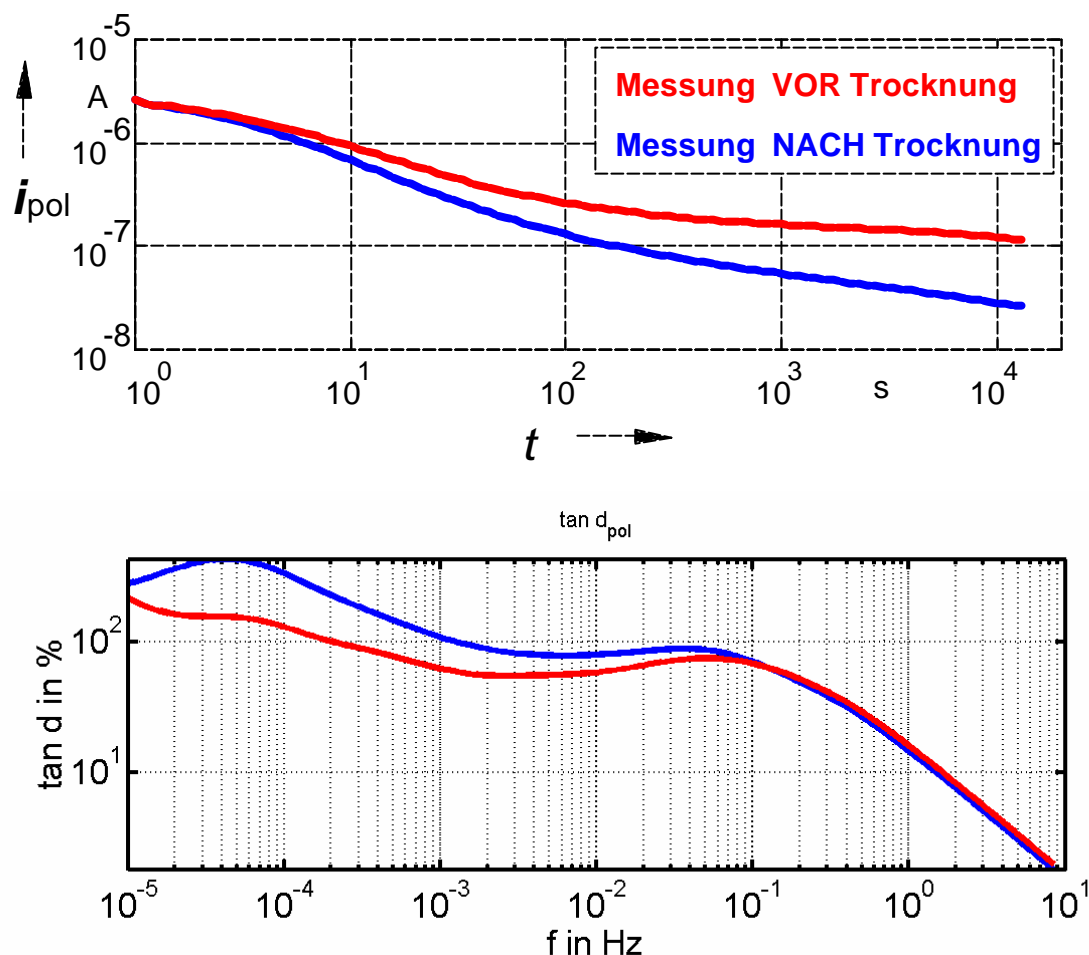


Bild 6. Einfluß unterschiedlicher Wassergehalte bei quasi identischer Temperatur (40 °C und 36 °C) auf (Messung des Polarisationsstromes vor und nach der Aktivteiltrocknung eines 240-MVA-Transformators, Wasserentzug: 86 Liter)
a. den Polarisationsstrom
b. den $\tan \delta$ (berechnet aus dem Polarisationsstrom gemäß dem in [6] angegebenen Verfahren)

4.3 Probleme bei der Anwendung der dielektrischen Analyse in der Praxis

Ein großer Nachteil der dielektrischen Analyse ist, dass man relativ detaillierte Informationen über den Wicklungsaufbau benötigt, um sicher zu sein, dass eine bestmögliche Modellierung erfolgen kann. Zusammen mit möglichst exakt bestimmten Materialdaten erreicht man durch eine bestmögliche Modellierung des Transformatorisolationssystems die genauesten Ergebnisse hinsichtlich des Wassergehaltes in der Feststoffisolation.

Dieses an sich wünschenswerte Ergebnis hat jedoch einen wesentlichen Nachteil in der praktischen Anwendung. Transformatorhersteller sind i. a. nicht bereit, Daten über den Wicklungsaufbau ihrer Transformatoren den Anwendern diagnostischer Methoden zur Verfügung zu stellen. Andererseits stehen auch dem Transformatorhersteller nur die Daten seiner eigenen Produkte zur Verfügung. Daten von Transformatoren anderer Hersteller sind ihm fast noch weniger zugänglich, als einem unabhängigen Diagnostiker. In den Umspannwerken der meisten EVU (Energieversorgungsunternehmen) sind jedoch Transformatoren mehrerer Hersteller eingesetzt. Somit haben sowohl unabhängige Anwender diagnostischer Methoden als auch Hersteller von Transformatoren Schwierigkeiten, die notwendigen Daten über den Wicklungsaufbau der zu untersuchenden Transformatoren zusammenzustellen.

Für die EVU's bedeutet dies im Grunde, dass die Bewertung ihrer Transformatoren von vorn herein in Frage gestellt ist. Ein Ausweg könnte sein, dass das EVU die Diagnose seiner Transformatoren bei dem jeweiligen Hersteller in Auftrag gibt, dem die Daten seiner Transformatoren ja zur Verfügung stehen. Nachteilig dabei ist, dass dies eine Vielzahl von Aufträgen zur Folge hat, weiterhin kommen von verschiedenen Auftragnehmern auch verschiedene diagnostische Methoden zum Einsatz – ganz zu schweigen von unterschiedlichen Interpretationen und Bewertungsansätzen.

Ziel muß es deshalb sein, die dielektrische Analyse in der Praxis anwendbar zu machen – auch wenn die Daten des Wicklungsaufbaus nicht oder nur ungefähr zur Verfügung stehen. Ausgangspunkt der weiteren Überlegungen ist, dass nur die Nenndaten, wie sie auf dem Typenschild angegeben sind, zur Verfügung stehen.

Transformatoren mit gleicher Nennspannung der Oberspannungswicklung oder möglicherweise beider Wicklungen, zwischen denen die PDC-Messung erfolgen soll, haben zumindest einen ähnlichen Aufbau des Streukanals zwischen diesen beiden Wicklungen. Dies könnte ein Ansatz sein, um auf der Basis der Nennspannung der Oberspannungswicklung eine Art standardisierte Wicklungsgeometrie zu definieren, die zur Modellierung des Isolationssystems verwendet wird, d. h. es wird eine Beziehung zwischen der Nennspannung der Oberspannungswicklung (oder beider Wicklungen zwischen denen die PDC-Messung erfolgt) und der Geometrie des Isolationssystems hergestellt.

$$\text{GeometriedesIsolationssystems} = f(U_N) \quad (2)$$

Um zu prüfen, ob dieser Ansatz in der Praxis realisierbar ist, muß anhand konkreter Beispiele untersucht werden, ob sich tatsächlich eine Beziehung zwischen der Geometrie des Isolationssystems und der Nennspannung der Wicklungen herstellen lässt. Es könnten aber auch noch andere Parameter eine Rolle spielen, beispielsweise könnte die Nennleistung und damit die Baugröße des Transformators ein wichtiger Parameter sein.

Ein wichtiger Parameter zur Identifikation einer bestimmten Geometrie des Isolationssystems dürfte die Kapazität zwischen den Wicklungen sein, zwischen denen die PDC-Messung erfolgt. Hierzu sei ein Beispiel gegeben. In einem deutschen Atomkraftwerk (AKW) wurden PDC-Messungen an 2 Transformatoren mit gleichen Nenndaten vorgenommen ($U_N = 420 \text{ kV}$, $S_N = 725 \text{ MVA}$). Dabei ergaben sich deutlich unterschiedliche Werte der Wicklungskapazitäten C_{OS-US} zwischen OS und US:

$$C_{OS-US} = \begin{cases} 8463 \text{ pF} & \text{Hersteller A} \\ 42497 \text{ pF} & \text{Hersteller B} \end{cases} \quad (3)$$

Freundlicherweise haben die Hersteller der beiden Maschinentransformatoren die Geometriedaten zur Verfügung gestellt. Wie die sehr unterschiedliche Wicklungskapazität vermuten ließ, ergab sich dabei eine deutlich unterschiedliche Ausführung des Wicklungsaufbaus der Transformatoren (**Bild 7**). Bei Hersteller A wurde ein sehr einfacher Wicklungsaufbau realisiert, wie er üblicherweise bei Leistungstransformatoren zur Anwendung kommt. Es existiert ein Streukanal zwischen OS und US, wodurch sich eine Kapazität von ca. 8500 pF ergibt. Der von Hersteller B realisierte Wicklungsaufbau ist deutlich komplizierter. Die US ist zweigeteilt (US1 und US2) und um die OS angeordnet. Aufgrund dieser Konstellation ergeben sich 3 Streukanäle und damit die deutlich höhere Kapazität zwischen OS und US von ca. 42500 pF.

Äußerlich ist der völlig unterschiedliche Wicklungsaufbau und die daraus resultierende völlig unterschiedliche Geometrie des Isolationssystems an den Transformatoren nicht erkennbar. Auch die auf dem Typenschild angegebenen Nenndaten sind identisch und geben keinen Hinweis auf einen völlig unterschiedlichen inneren Aufbau. Die Messung der Wicklungskapazität hingegen liefert einen deutlichen Hinweis auf die unterschiedlichen Wicklungsaufbauten und ist gleichzeitig in der Praxis sehr einfach durchführbar.

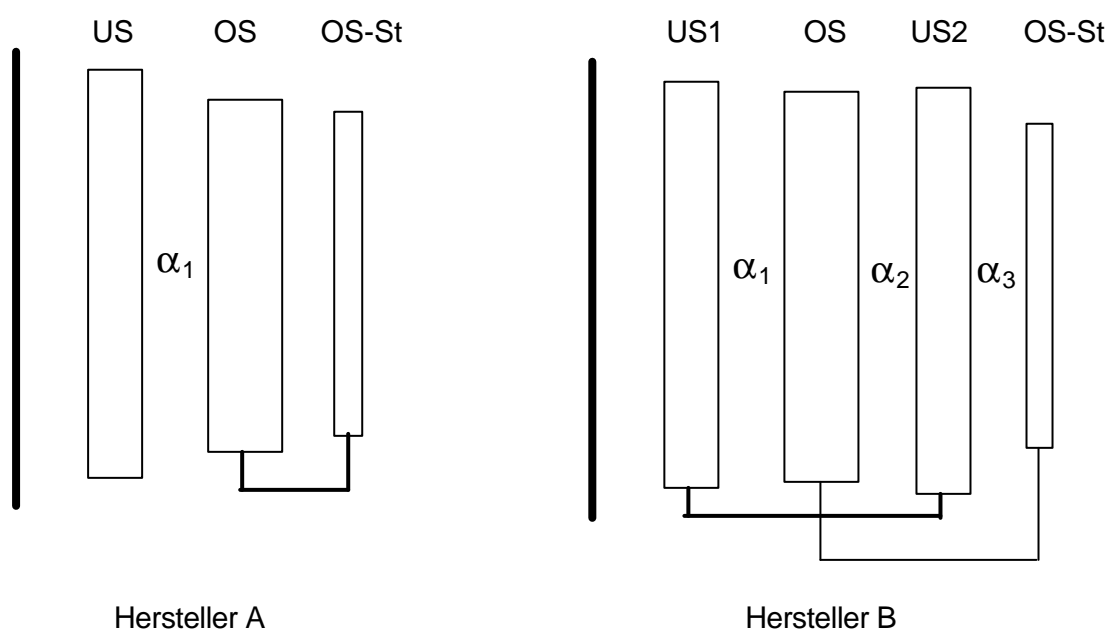


Bild 7. Wicklungsaufbau der beiden untersuchten 725-MVA-Maschinentransformatoren von 2 verschiedenen Herstellern

Durch die nur „näherungsweise“ korrekte Geometrie des Wicklungsaufbaus werden mit einiger Sicherheit Einbußen in der Genauigkeit des so bestimmten Wassergehaltes in der Feststoffisolation entstehen. Es muß an konkreten Beispielen untersucht werden, wie sich eine „standardisierte Geometrie“ abhängig von der Nennspannung auf die Genauigkeit des zu bestimmenden Wassergehaltes im Vergleich zur vollständigen Information über die Wicklungsgeometrie auswirkt.

5. Gleichgewichtskurven zwischen Wassergehalt im Öl und in der Feststoffisolation

Es existieren seit langem Gleichgewichtskurven zwischen dem Wassergehalt im Öl und in der Feststoffisolation [9] (**Bild 8**). Prinzipiell ist damit über den Wassergehalt im Öl, der sich aus einer Ölprobe vergleichsweise einfach bestimmen lässt, eine Bestimmung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation möglich. Die Genauigkeit der Methode ist allerdings gering, da nur ein Anteil $< 1\%$ des Wassers in einem Transformator im Öl gelöst ist. Man versucht also, durch Bestimmung eines kleinen Bruchteils der Wassermenge auf die weit größere Wassermenge in der Feststoffisolation zu schließen. Ein kleiner Fehler in der Bestimmung des Wassergehaltes im Öl muß sich daher erheblich auf die Genauigkeit des Wassergehaltes in der Feststoffisolation auswirken. Ein weiterer Grund für die begrenzte Genauigkeit ist, dass die angegebenen Kurven im Gleichgewichtszustand gelten. Dieser ist in der Praxis vor allem bei Netzkuppltransformatoren mit ihren wechselnden Lasten wohl kaum je gegeben.

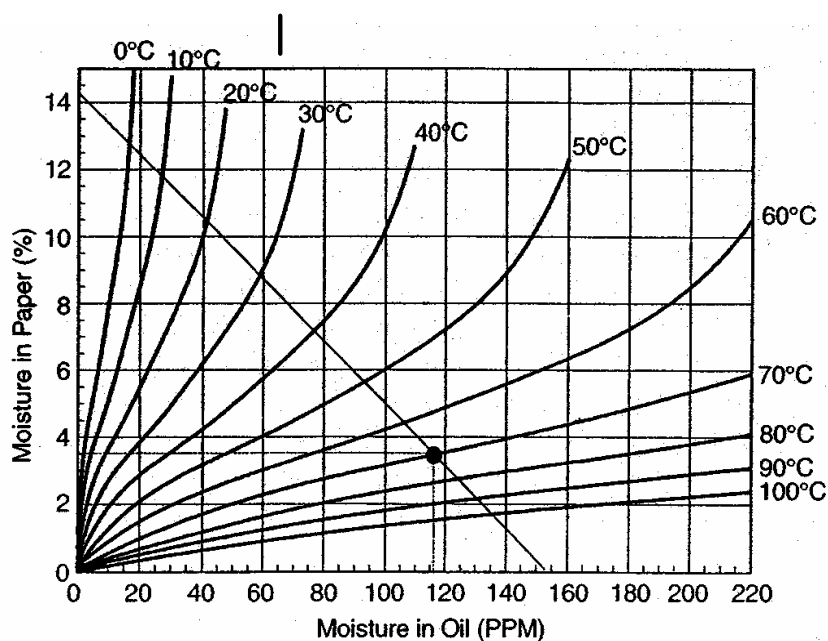


Bild 8. Gleichgewichtskurven zur Bestimmung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation (Paper) aus dem Wassergehalt im Isolieröl gemäß [9]

Im Zusammenhang mit den in den Jahren 2001 und 2002 durchgeführten Aktivteiltrocknungen wurden festgestellt, dass eine Bestimmung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation auf der Basis dieser Methode i. a. nicht zu zuverlässigen Aussagen führt. Deshalb wurde von der Siemens AG (PTD T MCS) und der Fa. Artec Ende 2001 die PDC-Methode zur Bestimmung des Wassergehaltes in Transformatoren eingeführt.

Die Bestimmung des Wassergehaltes im Transformator über den Wassergehalt im Isolieröl ist dennoch eine interessante Methode – z. B. für eine erste Abschätzung – da das Verfahren einen nur geringen Aufwand erfordert. Außerdem könnte man sich die Abschaltung des Transformators wie sie bisher bei der dielektrischen Analyse erforderlich ist ersparen. Allerdings müsste die Genauigkeit der Abschätzung gesteigert werden.

Hier könnte ein neuer Ansatz helfen. Werden die Ölproben zu verschiedenen Zeitpunkten genommen, so ist es eher unwahrscheinlich, dass sich der Transformator immer im selben Zustand befindet. Eine Mittelwertbildung ergäbe dann einen Wert, der deutlich genauer sein dürfte, als die Einzelmessung $W_{Papier}(t_k)$.

$$\overline{W}_{Papier} = \sum_{k=1}^N W_{Papier}(t_k) = \sum_{k=1}^N f(W_{\text{Öl}}(t_k)) \quad (4)$$

Die Funktion f ist durch die Gleichgewichtskurven gegeben. Untersucht werden muß noch, welche Anzahl N von Messwerten benötigt wird und welche zeitlichen Abstände t_k diese Messwerte haben müssen.

6. Zusammenfassung

Die Bestimmung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation über die Bestimmung des Wassergehaltes im Isolieröl durch Anwendung der Gleichgewichtskurven könnte bei geeigneter Modifikation ein brauchbares Verfahren für eine erste Abschätzung des Wassergehaltes im Transformator sein. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird man keine ausreichend hohe Genauigkeit erzielen, um auf dieser Basis eine Entscheidung über eine Investition in z. B. eine Aktivteiltrocknung oder eine andere werterhaltende Maßnahme zu treffen. Für einen ersten Anhaltswert könnte das Verfahren allerdings brauchbar sein. Es wäre dann bei einer Vielzahl von Transformatoren, deren Wassergehalt im Isolationssystem untersucht werden soll, eine Abschaltung vermeidbar. Stellt sich dann ein verdächtig hoher Wassergehalt bei einem Transformator heraus, so kann in den dann notwendigen Fällen eine genauere Analyse – z. B. durch eine PDC- oder FDS-Messung erfolgen.

Die PDC- und FDS-Methode liefern nach bisherigen Erfahrungen, die vor allem im Zusammenhang mit den Aktivteiltrocknungen gemacht wurden, in 90 % aller Fälle zufrieden stellende Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit ($\pm 0,5\%$). Es wurden 2 Ansätze für Verbesserungen sowohl der PDC- als auch der FDS-Methode angegeben. Bisher wird das elektrische Feld an den Wicklungsenden nicht berücksichtigt. Dies kann vor allem bei gealterten Transformatoren mit einer hohen Leitfähigkeit des Isolieröls zu nicht unerheblichen Fehlern in der Modellierung des Isolationssystems führen. Weiterhin nimmt die Temperatur einen großen Einfluß auf den Polarisationsstrom. Es wurde ein Verfahren vorgestellt, wie man wenigstens näherungsweise die Temperatur des Isolationssystems bestimmen kann. Durch die Weiter-

entwicklung der dielektrischen Diagnose dürfte sich die Zuverlässigkeit von PDC- und FDS-Analyse noch weiter steigern lassen.

Für eine breite Anwendbarkeit der dielektrischen Analyse in der Praxis wird vorgeschlagen, eine „standardisierte Geometrie“ für die Modellierung des Isolationssystems eines Transformators zu verwenden, die von der Nennspannung abhängt. Die Messung der Wicklungskapazität erlaubt es, deutlich unterschiedliche Wicklungsaufbauten zu identifizieren – bei identischen Nenndaten vergleichbarer Transformatoren. Die erzielbare Genauigkeit des Verfahrens bei Verwendung dieser nur näherungsweise korrekten Geometrie des Isolationssystems muß allerdings noch – im Vergleich zur Auswertung der dielektrischen Analyse mit korrekter Geometrie des Isolationssystems - untersucht werden.

7. Literatur

- [1] H. P. Moser, V. Dahinden: „Transformerboard II“, H. Weidmann AG, CH-8640, Rapperswil
- [2] B. Bouvier: „Nouveaux criteres pour caracteriser la degradation thermique d'une isolation à base de papier“, Laboratoire Central des Industries electriques, No. 72, Juin 1970
- [3] J. Bingelli, J. Froidevaux, R. Kratzer: „The Treatment of Transformers. Quality and Completion Criteria of the Process“, CIGRE Report No. 110, 1964
- [4] F. Flottmeyer, G. Lange, T. Miksa, W. Neldner, U. Sundermann: „Betrachtung zum Problem der Nutzungsdauer von Hochspannungs-Transformatoren und -wandlern“, ETG-Fachbericht Nr. 55, 1995
- [5] K.-H. Weck: „Instandhaltung von Mittelspannungsverteilstnetzen“, Haefely Symposium 2000, Stuttgart
- [6] Der Houhanessian, V.: "Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems". Ph. D. dissertation, ETH No. 12832, Zurich, 1998.
- [7] P. Werelius: „Development and application of high voltage dielectric spectroscopy for diagnosis of medium voltage XLPE cables, Ph D Thesis, Department of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden, 2001, ISSN 1650-674x
- [8] A. Bognar, 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“, paper 15/33-08, CIGRE, Paris, France, 1990
- [9] Du, Y.; Zahn, M.; Lesieutre, B.C.; Mamishev, A.V.; Lindgren, S.R.: Moisture equilibrium in transformer oil paper systems, IEEE Electrical Insulation, Vol. 15, No.1, January/February 1999.