

# Ölleitfähigkeit und Grenzflächenpolarisation am Öl-Papier-Dielektrikum

Dipl.-Ing. Maik Koch,  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen,  
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Deutschland

## Kurzfassung

Die vorliegende Untersuchung betrachtet ausgehend vom Leitungsmechanismus im Isolieröl die Randbedingungen für die richtige Messung der Leitfähigkeit unter dem Einfluss der Messspannung, dem Alterungszustand und dem Feuchtegehalt im Öl. Wasser liefert ionisierbaren Substanzen die Voraussetzung zur elektrolytischen Dissoziation und ändert somit indirekt die Leitfähigkeit. Die besonderen Leitungsmechanismen der Ionenleitung im Isolieröl und Diffusionseffekte der Ladungsträger an der Grenzfläche zum Pressboard lassen die bisher übliche Modellierung von Polarisationsmechanismen durch Netzwerke linearer Bauelemente nur zu einer ersten Näherung werden. Besonders bei neuem und/oder trockenem Isolieröl sind eine niedrige Feldstärke und Beschränkung auf ein Zeit- bzw. Frequenzfenster Voraussetzungen für Messungen ohne verzerrende Störeinflüsse.

Dielektrische Diagnosemethoden (RVM, PDC, FDS) nutzen u.a. die Grenzflächenpolarisation für die Evaluation des Wassergehalts der Isolierung. An einem großvolumigen Modell für mehrschichtige Öl-Papier-Isolierungen wird die Grenzflächenpolarisation unter dem Einfluss der Ölleitfähigkeit untersucht. Das Analyseergebnis der dielektrischen Diagnosemethoden sollte unabhängig von Einflüssen der Ölleitfähigkeit sein bzw. diese erfassen und berücksichtigen können, jedoch wurden erheblich variierende Ergebnisse festgestellt.

## 1 Dielektrische Diagnostik an Leistungstransformatoren

Die Hauptisolierung von Leistungstransformatoren wird seit Jahrzehnten erfolgreich als geschichtete Öl-Papier-Isolierung ausgelegt. Die Grenzfläche zwischen Pressboard und Isolieröl verdient besondere Aufmerksamkeit nicht nur wegen ihres Verlaufs entlang der Potentiallinien des elektrischen Feldes, auch nutzen dielektrische Diagnosemethoden ihre Eigenschaften. Die verursachte Grenzflächenpolarisation dient diesen Verfahren neben anderen Effekten zum Erkennen des Alterungszustands der Isolierung.

Ein großer Teil der Leistungstransformatoren deutscher Netzbetreiber nähert sich der ursprünglich projektierten Lebensdauer oder hat diese bereits überschritten. Deshalb liegt eine genaue Erkennung der Alterungsfaktoren und des Gesamtzustands im besonderen Interesse der EVU. Verschiedene Diagnosemethoden wurden während der letzten Jahre und Jahrzehnte entwickelt und optimiert; u.a. die Ermittlung des Wassergehalts in der Zellulose (Papier, Pressboard) durch dielektrische Diagnosemethoden.

Dielektrische Messungen erfassen grundsätzlich eine Überlagerung verschiedener physikalischer Phänomene, wobei die Grenzflächenpolarisation zwischen Öl und Papier eine wesentliche Rolle spielt. Diese Polarisationsart unterliegt verschiedenen Einflussfaktoren wie u.a. dem Aufbau der Grenzfläche, der Temperatur des Isolationssystems, der angewandten Messspannung, der Leitfähigkeit der Materialien und dem Leitfähigkeitsmechanismus im Isolieröl.

Mehrere Veröffentlichungen [1], [2] berichteten von Schwierigkeiten bei der Modellierung der dielektrischen Antwort an geschichteten Dielektrika. Die übli-

che Nachbildung mit linearen R-C-Gliedern bietet oft nur eine erste Näherung des wirklichen Verhaltens. Diese Nichtlinearitäten werden im Folgenden durch die Eigenschaften der Ölleitfähigkeit erklärt.

## 2 Leitungerscheinungen im Isolieröl

Wie auch in festen Isolierstoffen beruht die Volumenleitfähigkeit im Isolieröl im Wesentlichen auf Verunreinigungen. Reines Isolieröl, bestehend aus gesättigten Kohlenwasserstoffen paraffinischer und naphthenischer Struktur, weist weder Ionen noch die bei Flüssigkeiten ohnehin seltenen freien Elektronen auf. Erst Fremdbestandteile (Reste nach der Raffination, Verunreinigungen während Montage, Alterungsprodukte) liefern positiv und negativ geladene Ionen und damit den dominierenden Ladungsträgertyp. Jetzt können elektrische Ströme unter dem Einfluss eines äußeren Feldes oder durch Konzentrationsgradienten der Ionen auftreten. Mit Ionenbewegung ist stets auch Materietransport verbunden.

### 2.1 Dissoziation als Quelle von Ladungsträgern

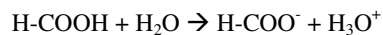
Ionen entstehen durch die spontane Dissoziation von in Spuren vorhandenen ionisierbaren Substanzen und ferner durch natürliche radioaktive Strahlung. Als elektrolytische Dissoziation bezeichnet man die Trennung von Ionen unter dem Einfluss von Wasser.

Bereits reines Wasser weist bei 25°C eine Leitfähigkeit von  $\sigma = 6 \cdot 10^{-6}$  S/m auf, verursacht durch Dissoziation gemäß



Die Ionenkonzentration beträgt dann  $N_{\text{H}^+} = N_{\text{OH}^-} = 6,02 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  bei einer Temperatur von 25°C [3].

Natürlich tritt Wasser im Isolieröl nur in Spuren auf (einige  $\mu\text{g/g}$ ), so dass die Leitfähigkeit viel mehr durch Säuren, und zwar verschiedene Karbonsäuren bestimmt wird. Diese sind auch in neuem Öl in geringem Maße vorhanden, vor allem entstehen sie während der Alterung der gesättigten Kohlenwasserstoffe. Sie dissoziieren wie folgt:

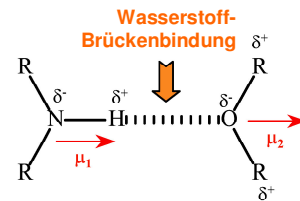


H-CO steht für die Aldehydgruppe einer Karbonsäure und ist z.B. bei Essigsäure  $\text{CH}_3\text{CO}$ . Schon bei 0,1-moliger Essigsäure ist die Ionenkonzentration  $N_{\text{H}^+} = N_{\text{Ac}^-} = 6 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$  bei 25°C, weshalb der Beitrag von Wasser zu vernachlässigen ist [3]. Neben organischen Säuren verursachen natürlich auch dissoziierende Basen und Salze, falls vorhanden, elektrische Leitfähigkeit. Nach [6] können auch durch Polymerisation und Polykondensation entstandene Makromoleküle zur Leitfähigkeit beitragen.

Verschiedene Autoren berichteten, dass der Wassergehalt eines Öls keinen Einfluss auf dessen Leitfähigkeit habe [4], während andere das Gegenteil gemessen haben (in [4] zitiert). Aus obigen Überlegungen ist zu schlussfolgern: Wasser erhöht wegen dessen Dissoziation in jedem Fall die Leitfähigkeit von Isolieröl, jedoch fällt dieser Effekt wegen der geringen Wassermenge und der geringen Ionenkonzentration unter die Messbarkeitsschwelle. Treten Säuren im Isolieröl auf, so ändern auch diese die Leitfähigkeit nicht, es sei denn, sie können dissoziieren. Dazu wiederum ist Wasser nötig. Voraussetzung für eine messbare Erhöhung der Leitfähigkeit ist also das Vorhandensein von Wasser *und* Säuren. Beide entstehen im Öl-Papier-Dielektrikum durch dessen Alterung.

## 2.2 Charakter der Ionenleitung

Die freien Ionen binden durch Wasserstoff-Brückenbindungen und Van-Der-Waals-Bindungen verfügbares Wasser und überhaupt jedes polare Molekül an sich. Wasserstoffbrückenbindungen werden durch die dipolare Struktur des Wasserstoffmoleküls möglich und entstehen durch die Aufteilung eines Wasserstoffatoms auf zwei sehr stark elektronegative Atome, in Abbildung 1 sind das Stickstoff und Sauerstoff. Bei Karbonsäuren und ihren Ionen besteht die Wasserstoffbrücke zwischen zwei Sauerstoffatomen, also  $\text{O-H} \cdots \text{O}$ .



**Abbildung 1:** Wasserstoff-Brückenbindung zwischen unterschiedlichen Molekülen, die Wasserstoff enthalten

Hier ist auch die Ursache für die Wasseraufnahmefähigkeit von Öl zu suchen. Reines Mineralöl (gesättigte Kohlenwasserstoffe) gehen weder Wasserstoff-Brückenbindungen noch Van-Der-Waals-Bindungen ein und kann deshalb mit Wasser keine Lösung bilden. Erst mit Fremdbestandteilen (fähig zu Wasserstoffbrücken oder auch polarer Natur) werden diese möglich, die Wassermoleküle lagern sich durch Wasserstoffbrücken oder Ladungsfluktuationen (Dipol-Wechselwirkungen) an.

Wegen des Anlagerns polarer Moleküle kann für die Ionenmobilität  $k$  trotz unterschiedlichen Ursprungs und Polarität ein mittlerer Wert angenommen werden. Wird ein gelöstes Ion mit der Ladung  $e$  als Kugel mit dem Radius  $a$  in einem Öl der Viskosität  $\eta$  nachgebildet, so ergibt sich die Ionenmobilität  $k$  zu:

$$k = e / 6 \pi \eta a$$

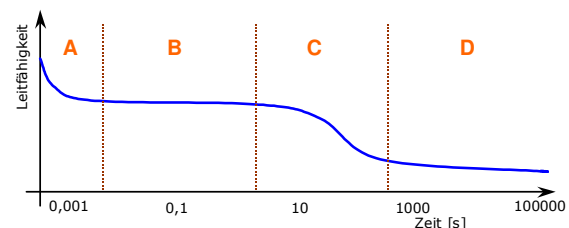
In dieser nur die Größenordnung angehenden Gleichung beträgt  $k = 10^{-9} \text{ m}^2/\text{Vs}$  bei  $\eta = 10^{-2} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$  für Transformatorenöl bei Raumtemperatur [5]. Die Geschwindigkeit  $v$  der Ionen ist dann vom elektrischen Feld  $E$  abhängig:

$$v = k E$$

Damit ist die Transitzeit  $t$  zum Durchqueren einer Ölstrecke  $d$  mit homogenem Feld  $E$ :

$$t = d / k E = d^2 / k v$$

Bei  $U = 10 \text{ V}$  und  $d = 1 \text{ mm}$  beträgt diese Zeit  $t = 100 \text{ s}$  und ist damit von höchster Bedeutung beim Messen der Leitfähigkeit. Abhängig von Frequenz (bei Wechselstrommessung) und Zeit (bei Gleichstrom) sind variierende Ergebnisse zu erwarten.



**Abbildung 2:** Zeitabhängige Leitfähigkeit eines Isolieröls

Wegen der unterschiedlichen Wanderungsgeschwindigkeiten der Ladungsträger ist auch der fließende Strom bzw. die Leitfähigkeit zeitabhängig. In Abbildung 2 soll nach [6] der Bereich A durch Polarisationserscheinungen verursacht werden. In B fließen bereits vorhandene schnelle Ionen ab, während sich in

C Raumladungszonen ausbilden, welche den Gesamtwiderstand der Anordnung vergrößern. Die Raumladungszonen entstehen durch einen Ladungsträgerstau vor den Elektroden, da die mittlere Wanderungsgeschwindigkeit größer ist als die Entladungsgeschwindigkeit an den Elektroden. D wird dann durch fortwährend neu dissoziierende Ionen dominiert.

### 2.3 Einfluss der Messspannung

Die Messspannung oder genauer die Feldstärke verursacht eine Reihe ungewollter Effekte: Feldbeschleunigte Dissoziation erhöht die Volumenleitfähigkeit bei  $E > 1 \text{ kV/cm}$ . Oberhalb ähnlicher Feldstärken spielt Ladungsträgerinjektion an den Elektroden eine steigende Rolle. Dieser Effekt ist von der Flüssigkeit, ihren Verunreinigungen und vor allem dem Elektrodenmaterial abhängig. Da ein Ionenstrom Materialtransport bedeutet, können vor allem bei hochviskosem Öl elektrohydrodynamische Flüssigkeitsbewegungen einen zusätzlichen Ladungstransport verursachen. Sie führen zum scheinbaren Erhöhen der Leitfähigkeit oberhalb einer Feldstärke von  $n \text{ } 100 \text{ V/cm}$  [5].

### 2.4 Einfluss der Öltemperatur

Wesentlich beeinflusst die Öltemperatur die Leitfähigkeit über die folgenden Mechanismen:

1. Mit sinkender Viskosität des Öls erhöht sich nach Abschnitt 2.2 die Ionenmobilität, die Transitzeit wird kürzer. Abbildung 2 wird in Richtung kürzerer Zeiten gestaucht.
2. Durch thermische Energie wird die Dissoziation der Karbonsäuren und anderer Ionenverbindungen mit exponentiellem Anstieg gefördert. Mit einer Temperaturerhöhung von  $25 \text{ auf } 90^\circ\text{C}$  steigt die Leitfähigkeit 20-40fach [5].

### 2.5 Lineares Modell mit Leitungsverlusten

Im einfachen Fall bildet eine Parallelschaltung aus einem Kondensator mit der Kapazität  $C$  und einem Widerstand  $R$  ein Isoliermedium nach. Für homogene Anordnungen gilt:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A / d \quad \text{und} \\ R = d / \sigma A$$

wobei  $A$  die Fläche der homogenen Anordnung und  $d$  deren Abstand ist. Die Permittivität  $\epsilon_r$  ist für Mineralöl 2,2; gültig in einem weiten Frequenzbereich und solange keine konstruktionsbedingten Polarisationserscheinungen wirken. Der Verlustwinkel  $\tan \delta$  ist aus Leitfähigkeit und Permittivität definiert zu

$$\tan \delta = 1 / R C \omega = \sigma / \epsilon_r \epsilon_0 \omega$$

Die Volumenleitfähigkeit  $\sigma$  ist ein Skalar aus der elektrischen Feldstärke  $E$  und der Stromdichte  $j$ :

$$j = \sigma E$$

Auch auf Leitungsvorgänge im Isolieröl wird das lineare R-C-Modell angewendet, z.B. in [7] zur Nachbildung des geschichteten Öl-Papier-Dielektrikums mittels R-C-Netzwerken. Die Komplexität der Ladungsträgerentstehung und Abbildung 2 lassen ohne weiteres erkennen, dass eine *lineare* Nachbildung bestenfalls eine Annäherung sein kann.

## 3 Messtechnik

### 3.1 Hochspannungsmesstechnik

Konventionell wendet man eine Schering-Brücke mit einer Messzelle in Schutzringelektrodenanordnung zur Verlustfaktormessung und damit auch zur Leitfähigkeitsbestimmung an. Da die zum Betrieb der Brücke nötige Hochspannung von einigen kV zwangsläufig das elektrohydrodynamische Gleichgewicht beeinflusst (Abschnitt 2.3), ist der Einsatz von geringeren Spannungen bzw. Feldstärken anzustreben. So wendet ein neues Messverfahren nach IEC61620 eine alternierende Rechteckspannung niedriger Spannung und Frequenz an. Daneben ist die Messung natürlich mittels eines Elektrometers oder sehr empfindlicher Verlustfaktor-Messgeräte möglich.

### 3.2 Gleichspannungs-Messungen

In den hier durchgeführten Messungen kam das Elektrometer Keithley 6517A mit eingebauter Spannungsquelle bis  $1 \text{ kV}$  zum Einsatz. Der Strommessbereich umfasst  $1 \text{ fA}$  bis  $20 \text{ mA}$  bei sehr hoher Genauigkeit. Eine Steuersoftware las die Messwerte automatisiert aus. Für die Leitfähigkeit wird die folgende Gleichung abgeleitet aus [8] verwendet:

$$\sigma(t) \cong \frac{\epsilon_0}{U_C C_0} i(t)$$

$U_C$  ist die Messgleichspannung,  $C_0$  die Kapazität der Messzelle in Luft. Ihre Gültigkeit ist auf Dielektrika ohne nennenswerte Polarisierbarkeit beschränkt, was bei reinem Isolieröl der Fall ist. Der bei Gleichspannungsmessungen in Elektrolyten auftretende Materialtransport lässt wegen der geringen Ionenkonzentration im Isolieröl keine systematischen Messfehler erwarten.

### 3.3 Wechselspannungs-Messungen

Das eingesetzte Isolationsdiagnosesystem IDA 200 der General Electric (ehemals Programm Electric AB Schweden) bestimmt die dielektrische Antwort eines Öl-Papier-Isolationssystems bei sinusförmiger Erre-

gung in einem breiten Frequenzbereich. Dadurch wird die komplexe Permittivität  $\epsilon(\omega)$  und der Verlustwinkel  $\tan \delta(\omega)$  in Abhängigkeit von der Frequenz zwischen 1 kHz und 0,0001 Hz ermittelt.

Bei der Frequenzbereichsmessung wurde die Ölleitfähigkeit  $\sigma$  ausgehend von der gemessenen komplexen Permittivität  $\epsilon(\omega)$  mit einem konstanten Realteil von 2,2 berechnet.

$$\underline{\epsilon}_r(\omega) = 2,2 - j \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}$$

Der Verlustfaktor kann auch wie folgt angegeben werden:

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\epsilon_r''(\omega)}{\epsilon_r'(\omega)}, \text{ womit gilt:}$$

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\sigma}{2,2 \epsilon_0 \omega}$$

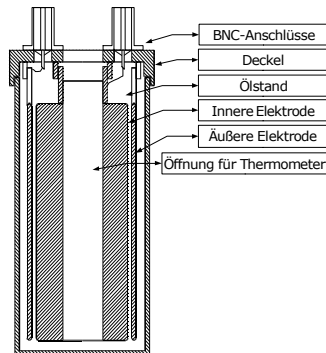
Damit ist die Leitfähigkeit aus der Messergebnissen des IDA 200 berechenbar:

$$\sigma(f) = 2,2 \epsilon_0 2\pi f \tan \delta(f)$$

Auch dieser Ausdruck gilt unter der Annahme, dass Öl im interessierenden Frequenzbereich nur vernachlässigbar polarisierbar ist.

### 3.4 Messzelle

Messungen an Isolierstoffen setzen eine Messanordnung mit Schutzringelektroden voraus.



**Abbildung 3:** Messzelle für hochisolierende Flüssigkeiten

Die angelehnt an [5] bzw. IEC 247 konstruierte Messzelle nach Abbildung 3 besitzt keinerlei Verbindungen zwischen den Messelektroden unterhalb des Flüssigkeitsstands. Der Elektrodenabstand beträgt 2 mm, was zu einer Kapazität an Luft  $C_0$  von 59,5 pF führt, berechnet und auch gemessen in einem Frequenzbereich von 1 mHz bis 1 kHz.

## 4 Messungen und Interpretation

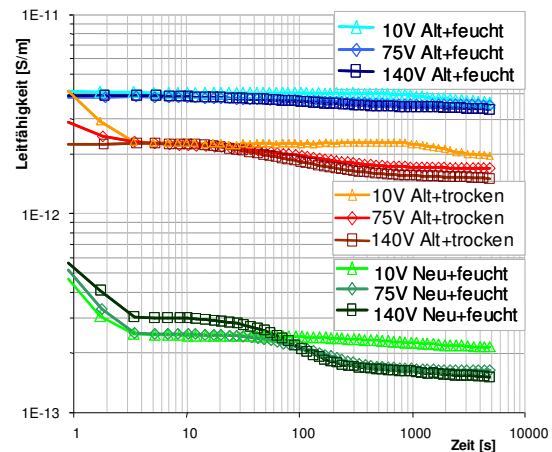
### 4.1 Untersuchte Isolieröle

Den in der folgenden Tabelle angegebenen Wassergehalt wurde sowohl mit coulometrischer Karl Fischer Titration mit direkter Probeneingabe ( $C_{W,KFT}$  in ppm) als auch mit einem kapazitiver Sensor für relative Feuchte ( $C_{W,rel}$  in %) Vaisala HMP 228 bestimmt.

Typ	Shell Diala D	Shell Diala D	Shell Diala D
Zustand	Neu, feucht	Gealtert, feucht	Gealtert, trocken
$C_{W,KFT}$	30 ppm	59 ppm	< 5 ppm
$C_{W,rel}$	32 %	32 %	1 %

### 4.2 Ergebnisse bei Gleichspannung

Abbildung 4 zeigt die mit der Messtechnik nach Abschnitt 3.2 gemessene Leitfähigkeit obigen Isolieröls. Parameter sind neben Alterung und Feuchtigkeit auch die Messspannung. Sie beeinflusst die Ergebnisse besonders bei geringer Leitfähigkeit (neues oder trockenes Öl) und während Zeiten größer als die Transitzeit der Ionen  $t > 20$  s. Für gealtertes, feuchtes und damit hoch leitfähiges Öl ist sie ohne Belang.



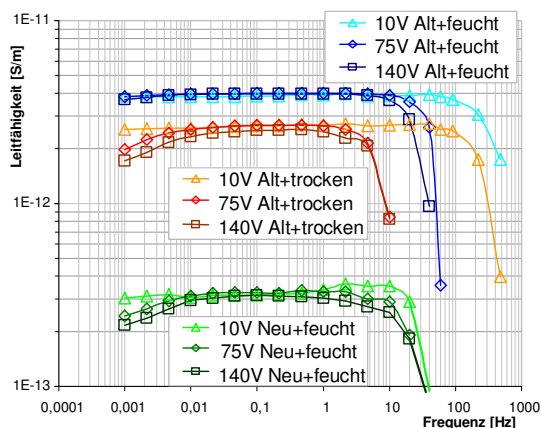
**Abbildung 4:** Leitfähigkeit bei Gleichspannungsmessung mit den Parametern Messspannung, Feuchte, Alterung bei 21°C

Wie bereits theoretisch belegt (Abschnitt 0) erhöht Feuchtigkeit die Ölleitfähigkeit entgegen den Aussagen anderer Autoren [4] sehr wohl. Sie gibt den Säuren im gealterten Öl die Möglichkeit zur Dissoziation. Der Anstieg für  $t < 3$  s ist auf die Einschwingzeit des Multimeters von etwa 2,5 s zurückzuführen, nicht auf Polarisierungseffekte wie bei Abbildung 2 beschrieben.

### 4.3 Ergebnisse bei Wechselfpannung

Die Ergebnisse aus der Frequenzbereichsmessung in Abbildung 5 stimmen sehr gut mit denen der Zeitbereichsmessung aus obiger Abbildung 4 überein. Feuchtigkeit erhöht die Leitfähigkeit, die Transitzeit beträgt etwa 20 s (entspricht 0,02 Hz), die Höhe der Mess-

spannung wirkt sich besonders auf wenig leitfähiges Öl aus. Für Frequenzen  $f > 10$  Hz verringert sich die Leitfähigkeit deutlich, was nicht mit den Erläuterungen zu Abbildung 2 übereinstimmt und auch nicht durch Messfehler erklärbar ist.



**Abbildung 5:** Leitfähigkeit bei Wechsellspannungsmessung mit den Parametern Messspannung, Feuchte, Alterung bei 21°C

Die Ergebnisse der Messungen sowohl bei Gleich- als auch bei Wechsellspannung zeigen ein Zeit- als auch Frequenzfenster, in dem die Ergebnisse unabhängig von der Spannung, also wirklich auf die Ölparameter bezogen sind. Das Fenster umfasst  $3 \text{ s} < t < 20 \text{ s}$  bzw.  $1 \text{ Hz} < f < 0,02 \text{ Hz}$ . Außerhalb dieser Grenzen sind ungewollte Effekte zu befürchten, also auch bei der von Hochspannungsbrücken verwendeten Netzfrequenz  $f = 50 \text{ Hz}$ .

## 5 Einflüsse auf dielektrische Messungen

### 5.1 Dielektrische Diagnosemethoden

Dielektrische Diagnoseverfahren messen eine Überlagerung von Leitfähigkeits- und Polarisierungseffekten am Dielektrikum des Transformators. Auf die Feuchte im Papier/Pressboard schließen verfahrensspezifische Analysesoftware, die die Messdaten der Diagnosemethoden auswerten. Aus der Spannungsmessung nach dem Polarisieren des Dielektrikums ist die Recovery Voltage Method (RVM) abgeleitet. Werden die Lade- und Entladeströme gemessen, so handelt es sich um die Methode der Polarisation and Depolarisation Currents (PDC). Die Bestimmung der komplexen Impedanz des Dielektrikums unter Wechsellspannung variabler Frequenz heißt Frequency Domain Spectroscopy (FDS). Die folgende Tabelle zeigt die angewendeten Messgeräte und Software.

Methode	RVM	PDC	FDS
Hersteller	Haefely Tettex	Alff Engineering / Keithley*	General Electrics
Messgerät	RVM 5462	PDC Analyser MOD1 / Elektrometer 6517A*	IDA 200
Software	SWRVM2 V.3.0	PDC Evaluation 3.0	MODS 1.5
Eigener Datensatz*			

\* für Ergebnisse in Abbildung 6 unten

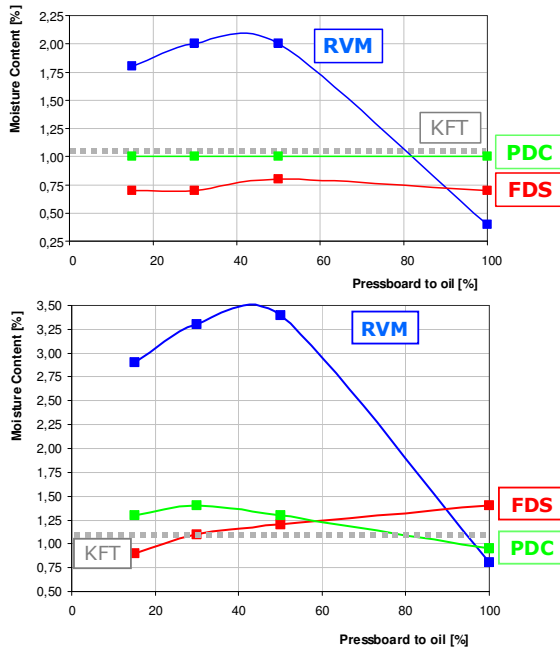
### 5.2 Messobjekt

Das „Pancake“ Modell ist ein großvolumiger isolierölgefüllter Kessel, in dem verschiedene Aufbauten aus Pressboardbarrieren und Kanalleisten zwischen Pancake-förmigen Wicklungen angeordnet sind [1]. Die Aufbauten mit unterschiedlichem Verhältnis von Barrieren zu Öl und Kanalleisten zu Öl bilden die Hauptisolierung verschiedener Transformatoren nach. Dies ermöglicht die systematische Untersuchung folgender Einflüsse auf die dielektrische Antwort: (1) Geometrie der Öl-Papier-Isolation, (2) Amplitude der Messspannung, (3) Temperatur, (4) Ölleitfähigkeit. In [1] ist die Änderung der erstgenannten Parameter nachlesbar, die folgende Tabelle zeigt den Parameter Ölleitfähigkeit.

	Alte Füllung	Neue Füllung
Typ	Shell Diala D	25 a in Betrieb
Wassergehalt	3 ppm	7 ppm
Durchschlagsfestigkeit	75 kV	53 kV
Neutralisationszahl	0,03 mg KOH/g	0,14 mg KOH/kg
Ölleitfähigkeit bei 10 mHz, 5 V/mm, 21°C	$1,57 \cdot 10^{-12} \text{ S/m}$	$16,5 \cdot 10^{-12} \text{ S/m}$

### 5.3 Analyse der Ergebnisse

In Abbildung 6 zeigt die vertikale Achse den mit der Software ermittelten Feuchtgehalt im Papier/Pressboard, die horizontale Achse das Verhältnis von Zellulose zu Öl, also die Geometrie des Dielektrikums. Die grau gestrichelte Linie „KFT“ ist das Ergebnis einer Messung der Papierfeuchte mit Hilfe der chemischen Analyse nach Karl Fischer. Deren Ergebnis beträgt 1,1 % Feuchte im Papier/Pressboard und ist allerdings ebenfalls fehlerbehaftet. Die Verfahrensweise während der Probenaufbereitung als auch die fragliche Heiztemperatur bei indirekter Titration lassen eine Toleranz von  $\pm 0,15 \%$  entstehen. Jedoch dient dieser Feuchtwert mindestens als Anhaltspunkt für die dielektrischen Verfahren.



**Abbildung 6:** Analyseergebnisse der dielektrischen Methoden vor (oben) und nach (unten) dem Öltausch

Alle Messverfahren analysieren nach dem Öltausch einen deutlich höheren Feuchtegehalt in Papier/Pressboard. Tatsächlich jedoch bleibt die Feuchte in der Zellulose nahezu unbeeinflusst durch den Öltausch. Das Öl bringt wegen dessen nur sehr geringer Wasseraufnahmefähigkeit (etwa Faktor 1:2000 gegenüber Zellulose) so gut wie keine Feuchtigkeit in das Modell ein. Die scheinbar höhere Feuchtigkeit hat also ihre Ursache in der mäßigen bis mangelhaften Kompensation des Einflusses der Ölleitfähigkeit für die dielektrischen Analysemethoden.

## 6 Zusammenfassung

Elektrolytische Dissoziation ist die wesentliche Ursache der Leitfähigkeit von Isolieröl. Vor allem Karbonsäuren, entstanden durch Alterung, liefern die für den Stromfluss nötigen Ionen als dominierenden Ladungsträgertyp. Dissoziation setzt neben ionisierbaren Substanzen auch Wasser voraus, weshalb die Leitfähigkeit von Isolieröl indirekt von dessen Wassergehalt abhängt. Der spezifische Charakter der Ionenleitung lässt eine Transitzeit für Ladungsträger, feldstärkeabhängige Effekte und einen starken Temperatureinfluss entstehen. Eine einfache Modellierung der Ölleitfähigkeit durch lineare R-C-Glieder kann nur eine erste Näherung sein. Voraussetzung für genaue Leitfähigkeitsmessungen ist die Beschränkung auf Feldstärken von  $E < 5 \text{ V/mm}$  und ein Zeit- bzw. Frequenzfenster von  $3 \text{ s} < t < 20 \text{ s}$  bzw.  $1 \text{ Hz} < f < 0,02 \text{ Hz}$ , besonders bei nur wenig leitfähigem Öl. Die Ölleitfähigkeit ändert die Grenzflächenpolarisation im geschichteten Öl-Papier-Dielektrikum und beeinflusst damit dielektrische Diagnosemethoden. Letztere kompensieren diesen Störeinfluss nur mäßig bis mangelhaft. Die weitere

Forschungsarbeit zielt auf eine genauere Modellierung des transienten Charakters der Ölleitfähigkeit zur zuverlässigeren Analyse dielektrischer Diagnosemethoden.

## 7 Literatur

- [1] M. Koch, K. Feser: "Vergleichende Untersuchungen an dielektrischen Diagnosemethoden für Leistungstransformatoren", ETG Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel Köln 2004
- [2] Küchler, A.; Leibfried, T.: „Berücksichtigung geometrischer und parasitärer Einflüsse bei der Bestimmung des Wassergehalts in Oel-Papier-Isolationen durch dielektrische Diagnose“, ETG Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel Köln 2004
- [3] Münch, Waldemar von: „Elektrische und magnetische Eigenschaften der Materie“, Teubner Verlag Stuttgart 1987
- [4] A.P. Washabaugh et. al.: "Dielectric Measurements of Semi-insulating Liquids and Solids", ICDL Conference Record Roma 1996
- [5] Berger, N. et. al.: "Progress in Determination of the Dissipation Factor  $\tan \delta$  and/or the Resistivity  $\sigma$  of Dielectric Liquids", Report of CIGRE Task Force 15.02.04, Electra No. 185 August 1999
- [6] Link, H.: „Das Temperaturverhalten der elektrischen Eigenschaften von Isolierölen“ Dissertation Braunschweig 1966
- [7] Der Houhanessian, Vahe: "Measurement and analysis of dielectric response in oil-paper insulation systems", Dissertation ETH Zürich, 1998
- [8] Zaengl, W. S.: „Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 5, 2003