

## Beurteilung des Messmethoden für die Diagnostik der Anfeuchtung von Transformatoren

Dipl.Ing. Altmann, Dipl. Ing. Bukviš

### 1 Einleitung

Die gegenwärtigen Methoden zur Messung des Wassergehalts im Isolationsöl und die an sie anknüpfende Beurteilung der Anfeuchtung des Isolationssystems von Leistungstransformatoren führen in vielen Fällen zu widersprüchlichen und manchmal nichtreproduzierbaren Schlüssen über den Zustand der zu beurteilenden Maschine.

Ein typisches Beispiel der daraus sich ergebenden widersprüchlichen diagnostischen Schlussfolgerungen bietet die Messung und Interpretation der gemessenen Daten vor und nach einem Ölwechsel bei einem älteren Transformator. Wird in beiden Fällen der Wassergehalt im Öl mittels Karl Fisher Methode gemessen, dann ist bei gleicher Maschinentemperatur im gealterten Öl der festgestellte Wassergehalt stets höher, als im neuen Öl.

Dieser Widerspruch kann bei der Beurteilung der Anfeuchtung des Transformators nur schwer akzeptiert werden.

Nehmen wir an, wir haben im Transformator 10.000 kg Öl und 1.000 kg Zellulosewerkstoffe. Der Transformator wird bei konstanter Temperatur von 50°C betrieben und im gealterten haben wir  $C_w = 30$  ppm gemessen. Im neuen Öl war das Messresultat unter den gleichen Bedingungen der Wassergehalt  $\sim 20$  ppm.

Dem entspricht dann vor dem Ölwechsel gemäss Nielsen-Diagramm, z.B. nach [L2] (Fabre-Pichon-Diagramm) ein Wassergehalt in der Zellulose  $C_p = 4.3$  %. In der Zellulose deponiert sind also  $1000 \times 0.043 = 43$  kg Wasser. Die menge des im Öl gelösten Wassers ist  $10\,000 \times 0.000030 = 0.3$  kg.

Durch einen Ölwechsel konnten wir also im besten Falle 0,3 kg Wasser entfernen. Die Gesamtmenge des Wassers im System hat sich infolge des Ölwechsels also unwesentlich geändert, und falls wir unter denselben Bedingungen den Wassergehalt im neuen Öl messen, müssen wir annähernd gleiche Resultate bekommen, d.h. eine vernachlässigbare Abweichung des  $C_w$  – Wertes.

Was hier allerdings keineswegs der Fall ist. Gibt uns z.B. die KF-Messung in einer neuen Öfüllung einen Wert von  $C_w = 20$  ppm, und der entsprechende Wassergehalt in der Zellulose ist also  $C_p = 3.2$  %, dann enthält die Zellulose nun lediglich 32 kg Wasser? Wohin sind mehr als ganze 10 kg Wasser verschwunden ?

### 2. Experimentanlage

Für eine quantitative Bestätigung der oben genannten Fragen haben wir eine experimentieranlage gemäss Bild 1 benutzt.

Mit Hilfe dieser Anlage versuchen wir nun dasselbe Geschehen zu simulieren, zu dem es im Transformator bei einem Ölwechsel, d.h. beim Ersetzen des alten Öls durch eine neue Füllung, kommt. Nun aber unter strikt definierten und demzufolge voll reproduzierbaren Bedingungen.

Wir haben dabei zwei Grundziele:

- qualitativ eindeutig zu bestimmen, welche der Methoden für die Messung der Anfeuchtung des Transformators geeignet ist und weiter, unter identischen Bedingungen, d.h. im Gleichgewichtszustand, im Öl-Zellulose-System vor und nach dem Ölwechsel unter Betriebsbedingungen quantitativ die Ergebnisse der KF- und der F- Methode zu vergleichen,

- durch Vergleichen der verfügbaren Nielsen-Diagramme mit unserer direkten Messung zu beurteilen, mit welcher Genauigkeit wir in der Lage sind, den Wassergehalt in den Zellulosewerkstoffen zu bestimmen.

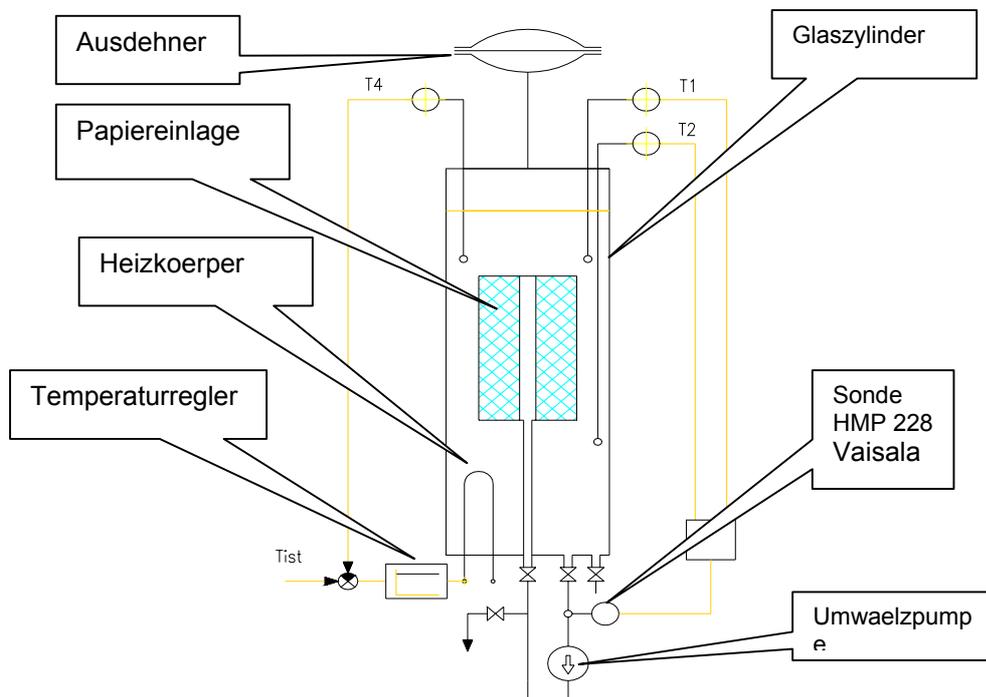


Bild 1 Schematische Darstellung der Experimentanlage

Das gesamte Experimentausmass haben wir reichlich dimensioniert (das experiment enthält minimal 20 Liter Öl und minimal 1,5 kg Zellulose), damit die für die Analyse vorgenommenen Ölprobenentnahmen die Bedingungen des Experiments nicht stören.

Ein leichtes Erreichen der gewünschten Temperaturniveaus im Öl-Zellulose-System ermöglichte die Anwendung einer elektrischen Aufheizung des Öls mit stetiger Temperaturregelung mittels PI-Regler. Ein relativ rasches Erreichen des erforderlichen Konzentrationsgleichgewichts und eine Unterdrückung der Entstehung von Temperatur-Stratifikationsschichten in der Ölfüllung des Experiments wurde erreicht, indem durch die Papiereinlage mittels Pumpe ständig Öl gedrückt wurde. Gleichzeitig wurde, mit Rücksicht auf die Unterdrückung der vertikalen Temperaturverteilung in der Papiereinlage auch mit Hilfe von zwei Temperaturfühlern T1 und T2 die zulässige vertikale Temperaturdifferenz des Öls unterhalb und oberhalb der Einlage kontrolliert.

Für die Messung des Wassergehalts im Öl wurde eine Sonde vom Typ HMP 228 (Vaisala) [L3] im On-Line-Regime benutzt, sowie die übliche Methode der Messung des Wassergehalts in der Ölprobe mittels Aquameter (Baur KFM 1000). Die Messung der Temperaturen in der Anlage erfolgte mit Temperatursensoren Ni 1000.

### 3. Die Messung der Relation $C_w = C_w(C_p, T)$

Die Messung der Relation  $C_w = C_w(C_p, T)$  verlief so, dass bei ständiger Durchspülung der Einlage mit Öl stets auf einem gegebenen Temperaturniveau das Konzentrationsgleichgewicht mittels On-Line eingesetzter Vaisala-Sonde kontrolliert wurde und erst bei nachweisbarem Erreichen des Beharrungszustands in deren Ausgang der Wasseraktivität eine Ölprobenentnahme für das Aquameter vorgenommen wurde.

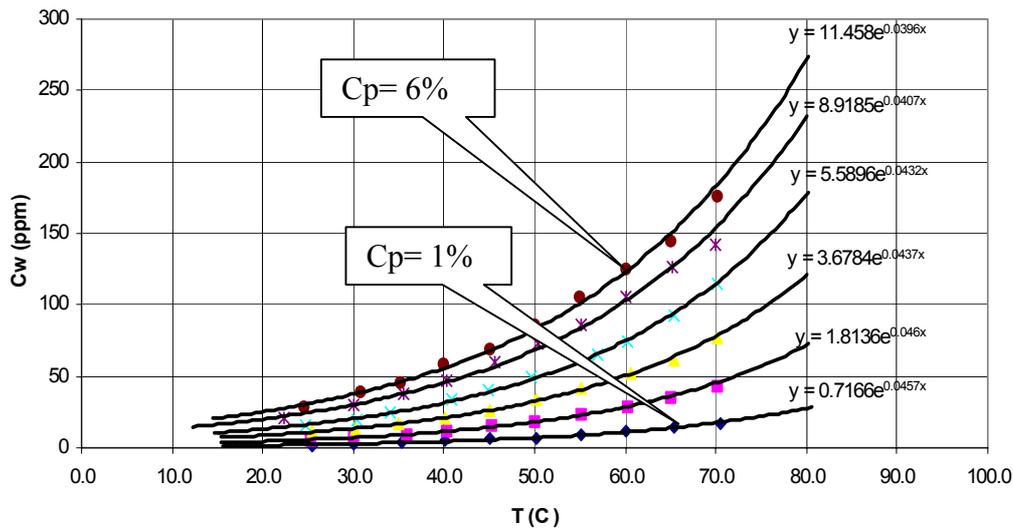


Bild 2 Abhängigkeit  $C_w = C_w(C_p, T)$  für neues Öl, Säurezahl  $\check{C}K < 0.005 \text{ mg KOH / g}$   
Mit Aquameter gemessen (KF-Methode).

Da wir den Wert  $C_w$  stets parallel mittels KF- und F-Methode gemessen haben, war es nötig erst zu beurteilen, mit welcher gegenseitigen Genauigkeit beide Methoden arbeiten. Dazu wurde das im Bild 3 gezeigte sog. Verifikationsdiagramm genutzt, wo auf der X-Achse die  $C_w$ -Werte aus der Vaisala-Sonde, und auf der Y-Achse die jeweils bei gleicher Temperatur und gleichem Wassergehalt in der Zellulose gemessenen Werte aus dem Aquameter aufgetragen sind.

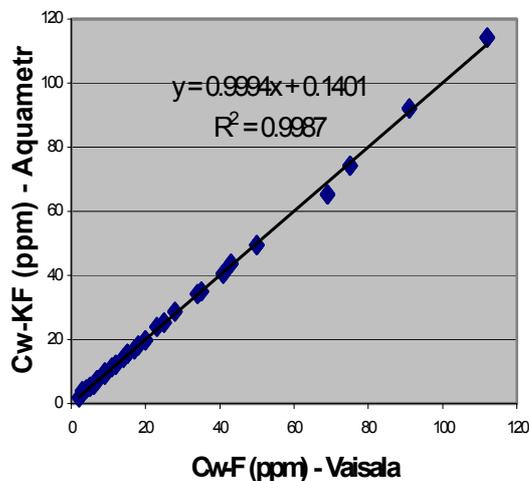


Bild 3 Verifizierung der gegenseitigen Genauigkeit der KF- und F- Methoden. -Neues Öl

Aus Bild 3 ist sehr gut zu erkennen, dass im Falle des neuen Öls mit einer Säurezahl  $\check{C}K < 0.005$  beide Methoden praktisch die gleichen Werte des Wassergehalts im Öl messen. Der Korrelationsindex  $R^2$  ist sehr hoch d.h. dass beide Methoden praktisch die gleichen  $C_w$ -Werte messen und die F-Methode gegenüber der standardmässigen KF-Methode zufriedenstellend genau ist.

..

Eine völlig andere Situation entstand, als wir das Experiment mit gealterten Öl mit einer Säurezahl  $\check{C}K = 0,18 \text{ mg KOH / g}$  füllten. Die mit dem gealterten Öl erzielten Resultate sind auf Bild 4 wiedergegeben.

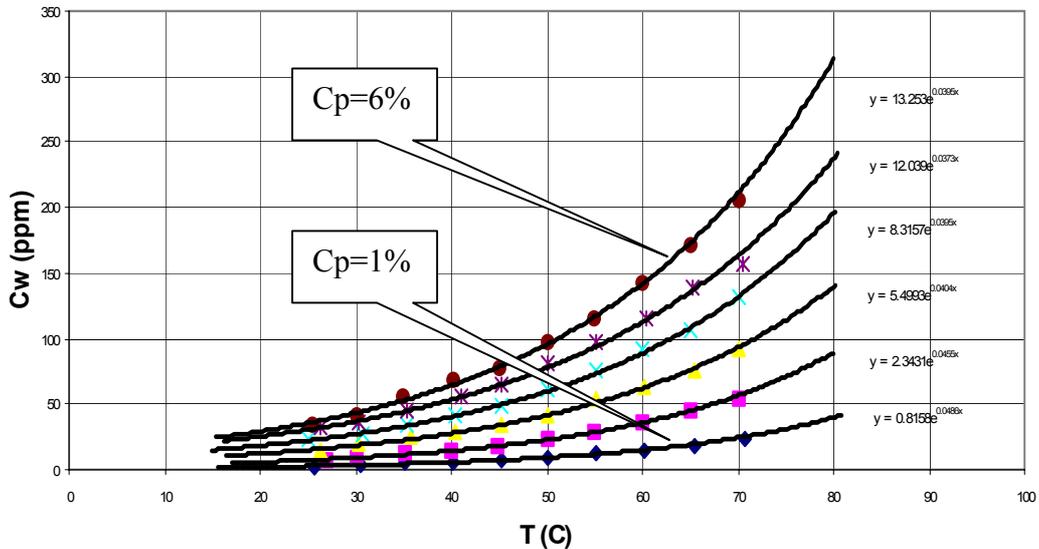


Bild 4 Abhängigkeit  $C_w = C_w(C_p, T)$ , gealtertes Öl, Säurezahl  $\check{C}K = 0,18 \text{ mg KOH / g}$  Mit Aquameter gemessen

Das Diagramm auf Bild 4 zeigt, dass nun mit dem Aquameter deutlich höhere Werte des Wassergehalts im Öl gemessen werden, und dies unter den Bedingungen, wo ausser dem Anstieg der Säurezahl des Öls es im Experiment zu keinerlei anderen Veränderungen kam. Diese Situation ist aus dem folgenden Verifikationsdiagramm klar ersichtlich .

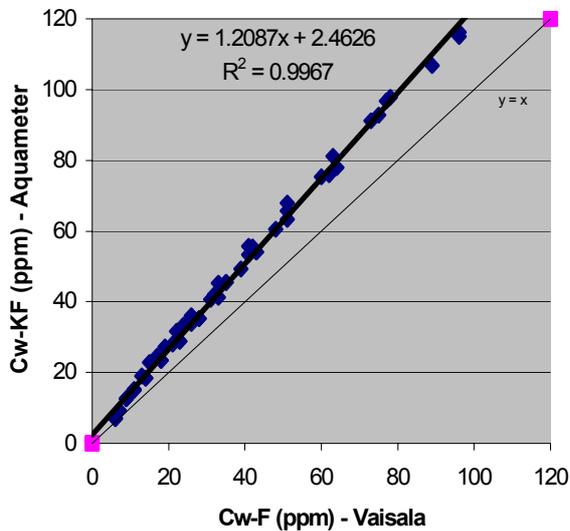


Bild 5 Genauigkeitsverifikation KF- gegenüber der F-Methode – gealtertes Öl, Säurezahl  $\check{C}K = 0,18 \text{ mg KOH / g}$ .

Die lineare Verbindungslinie des Trends zeigt, dass die Abweichung der mit dem Aquameter gemessenen Werte für  $\check{C}K = 0,18 \text{ mg KOH/g}$  nun mehr als 20% gegenüber dem nichtgealterten Öl beträgt. Da wir bei dieser Auswertung als Bezugsmessung die mittels der F-Methode gewonnenen Werte benutzt haben, müssen wir nun erst beweisen, dass die so eingeführten Werte tatsächlich Bezugswerte sind, d.h. dass mit der F-Methode gemessenen Werte für beide Öltypen gleich bleiben.

Das kann wiederum mittels Verifikationsdiagramm bewiesen werden, wo auf der X-Achse nun die mittels Vaisala-Sonde gewonnenen Werte für neues Öl erscheinen, und auf der Y-Achse die mit derselben Sonde und unter denselben Bedingungen gewonnenen Werte für gealtertes Öl. Die Resultate zeigt Bild 6.

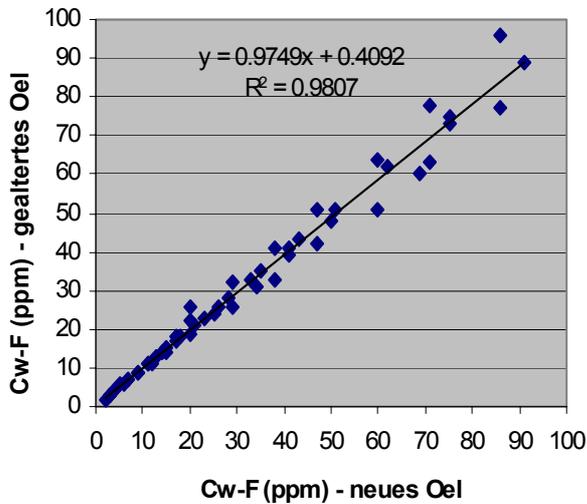


Bild 6 Genauigkeitsverifizierung der F-Methode – neues gegenüber gealtertem Öl

Wenn wir nun die KF- und die F-Methode vergleichen, wird es klar, dass die KF-Methode zur Bestimmung des Wassergehalts in der Zellulose und demzufolge auch zur Bestimmung der Anfeuchtung des Transformators lediglich dann anwendbar ist, wenn der Transformator mit neuem Öl, oder mit Öl mit sehr geringer Säurezahl, gefüllt ist. Demgegenüber wird der Ausgang der F-Methode seitens der Alterungsprodukte nicht wesentlich beeinflusst und ist also für die Bestimmung der Anfeuchtung des Transformators durchaus relevant.

#### 4. Verifikation des Nielsen-Diagramms

Bild 7 zeigt das Niensensche Gleichgewichtsdiagramm, das aufgrund unserer Messungen gewonnen wurde.

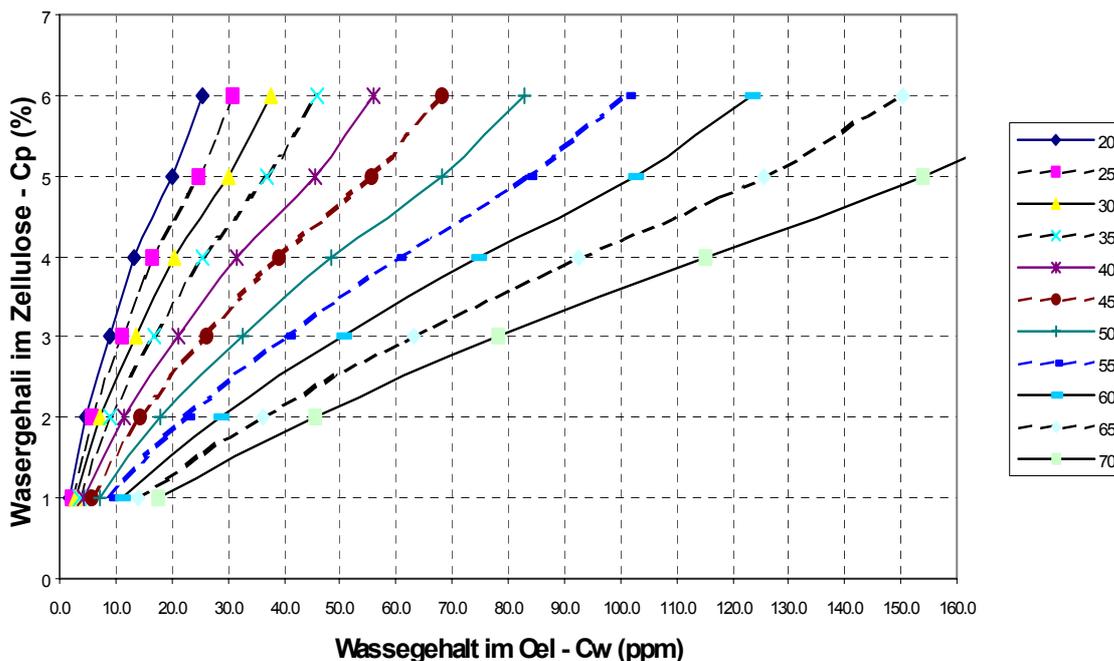


Bild 7 Niensensches Gleichgewichtsdiagramm – gemessene Werte, [L1], Säurezahl  $\check{C}K < 0.005 \text{ mg KOH / g}$

Eine Beurteilung der Genauigkeit der gemessenen Daten und des aus ihnen abgeleiteten Nielsen-Diagramms gegenüber Daten aus der Literatur ermöglicht das folgende Bild.

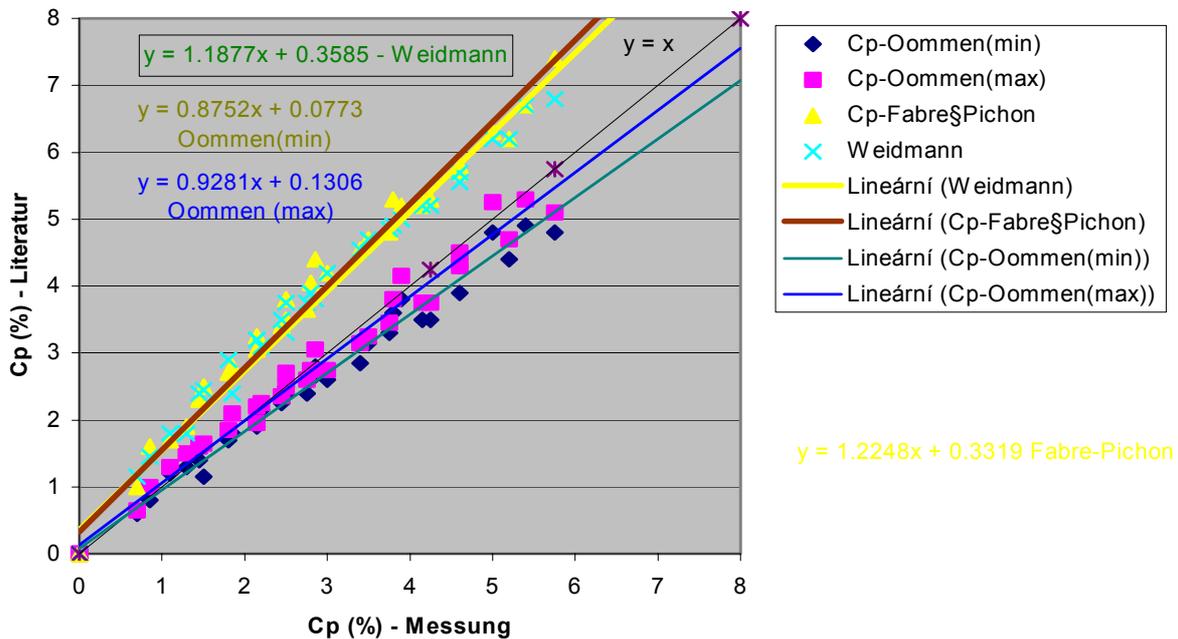


Bild 8 Vergleich der im Experiment gemessenen Daten mit denen aus der Literatur [L2].

Aus dem Bild ist ersichtlich, dass die in den meisten Fällen benutzten Nielsen-Diagramme, hier vertreten durch die von Fabre-Pichon (1960) und Norris (1963 – EHW Weidmann), auf eine beträchtliche Überbewertung des Wassergehalts in der Zellulose gegenüber unseren Daten führen.

Für diese älteren Daten liefert uns die lineare Regression im gesamten Bereich der Grösse Cp (1 – 6%) nicht nur eine beträchtliche positive relative Abweichung, sondern auch eine absolute Abweichung. Eine zufriedenstellende Erklärung dieser Tatsache zu geben ist zur Zeit nicht möglich, es wird notwendig sein, mehr im Detail zu überprüfen, wie diese, augenscheinlich vor allem rechnerische Verfahren, mittels experimenteller Daten verifiziert wurden.

Demgegenüber führen neuere Daten, siehe Oommen (1983), die in [L2] für eine wesentlich genauere Erfassung der gegebenen Realität gehalten werden, auf eine geringe negative Abweichung und eine relativ gute Übereinstimmung mit den direkt gemessenen Daten in unserem Experiment.

## 5. Schlussfolgerung

Aus der vorgelegten Arbeit geht hervor, dass die gegenwärtige Diagnostik der Anfeuchtung älterer Transformatoren augenscheinlich durch zwei grundlegende systematische Fehler belastet ist:

- Die Karl Fischer – Methode misst in gealterten Ölen einen höheren Wassergehalt im Öl als der Wert des Gehalts des in dem Öl gelösten Wassers ist, der allein gemeinsam mit der Temperatur den Wassergehalt in der Zellulose bestimmt.
- Die Applikation älterer Versionen des Nielsen-Diagramms führt zu einer Überbewertung des Wassergehalts in den Zellulosewerkstoffen von Leistungstransformatoren.

In der Praxis zeigt es sich jedoch leider, dass es bei der Diagnostik älterer Transformatoren sehr oft zu einer Verkettung von beiden genannten Fehlern kommt. Im gealterten Öl wird mit

der KF-Methode zuerst ein höherer als realer Wassergehalt im Transformatoröl gemessen, und nachfolgend wird dieser Fehler noch vergrößert, wenn wir diesen Wert in ein älteres Nielsen-Diagramm eingeben und dadurch einen unadäquat hohen Wert des Wassergehalts in der Zellulose bekommen. Als Ergebnis bekommen wir dann eine fehlerhafte Diagnose, die auf eine hohe Kontamination des Transformators mit Wasser hinweist.

Schrifttum:

- L1 ..... Altmann  
**Betriebsmessung der Anfeuchtung von Leistungstransformatoren**  
 (Provozní měření navlhnutí výkonových transformátorů)  
 Preprint für EW (2003)
- L2 ..... Y.Du, M.Zahn et al  
**A Review of Moisture Equilibrium in the Paper-Oil System**  
 Department of Electrical Engineering and Computer Science,  
 MIT, Cambridge, MA 02139 USA
- L3 ..... **HMP228 Moisture and Temperature Transmitter**  
 Operating Manual, Vaisala 1998
- L4 ..... Bukviš  
**Resultate aus einem Labor-Experiment zur Bestimmung des Gleichgewichtszustands des Wassergehalts im Isolationsöl und in der Zellulose**  
 (Výsledky z laboratorního experimentu pro určení rovnovážného stavu obsahu vody v izolačním oleji a celuloze)  
 Interner Bericht ARS 2003