

# Ein neues Verfahren zur Online-Feuchtemessung in Leistungstransformatoren

Dipl.-Ing. Maik Koch,

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen,

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Deutschland

## Kurzfassung

Diese Untersuchung beschreibt ein neues Verfahren zur Messung und Charakterisierung der Feuchtigkeit in Leistungstransformatoren. Ausgehend vom thermodynamischen Potential wurde die Wasseraktivität bzw. Relative Feuchtigkeit als Ursache für Diffusion und Gleichgewicht gefunden. Auftreten und Bindung von Wasser in Öl und Zellulose werden detailliert dargestellt. Konventionelle Gleichgewichtsdiagramme mit der Gewichtsfeuchte in Öl (ppm) als Funktion der Gewichtsfeuchte in Zellulose (%) verursachen erheblichen Fehleinschätzungen. Mehrere Verbesserungen führen zur Anwendung der Relativen Feuchte als hervorragende charakteristische Messgröße für Wasser. Ihre Größe in der festen Isolierung kann bei Gleichgewicht direkt aus der Relativen Feuchte im Öl abgelesen werden. Sie ist nicht nur wesentlich einfacher, genauer und kontinuierlich messbar, sondern spiegelt das Schadenspotenzial von Wasser in Form des aktiven Wassers direkt wieder.

## 1 Einführung

Wasser in Öl-Papier-isolierten Leistungstransformatoren entwickelt sich zu einem häufig diskutierten und für die Betreiber sehr wichtigen Thema. Wasser ist ein Alterungsprodukt und spaltet die Zelluloseketten der Feststoffisolierung weiter hydrolytisch auf. Dadurch kann die Kraftwirkung äußerer Kurzschlussströme bei gesunkener mechanischer Festigkeit zum inneren dielektrischen Fehler führen. Dieser zieht den Totalausfall des Transformators als teuerstem Betriebsmittel in der Energieübertragungskette nach sich. Weitere Schadenswirkungen von Wasser sind begünstigte Teilentladungen, Bläschenbildung (Bubbling) und eine verringerte Durchschlagsspannung des Isolieröls.

Bild 1 zeigt als wesentliche Quellen für Feuchtigkeit in Transformatoren die Atmosphäre (Installation, Reparatur, Atmen), undichte Versiegelungen oder Dichtungen und Wasser aus der Zersetzung von Zellulose und Öl. Zellulose kann etwa die 2000fache Wassermenge gegenüber Öl aufnehmen. Somit dient Öl nur als Transfermedium für Wasser, die Zellulose ist das Speichermedium. Im wechselnden Betrieb von Transformatoren strebt die Feuchtigkeit ein Gleichgewicht an. Ob dieser Zustand erreicht wird, hängt von der Temperatur, der Geometrie, den Massenströmen und der Feuchtigkeit ab.

## 2 Wasser in Öl-Papier-isolierten Transformatoren

### 2.1 Feuchtediffusion und Gleichgewicht

Thermodynamisches Gleichgewicht zielt auf die höchstmögliche Entropie im System ab, wobei das thermodynamische und das chemische Potential des Systems die Gleichgewichtsprozesse antreiben.

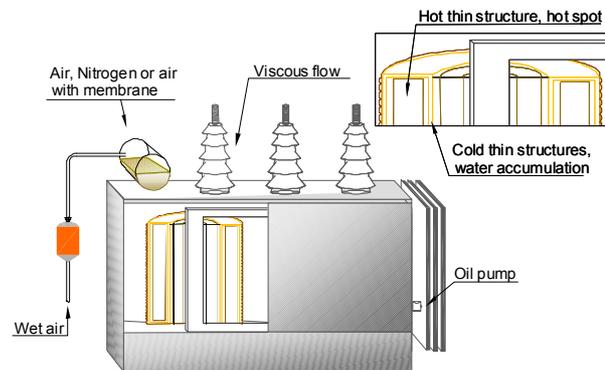


Bild 1: Ursachen der Feuchtigkeit in Transformatoren

Feuchtediffusion zwischen Zellulose und Papier wird durch die unterschiedliche temperaturbeeinflusste Wasserlöslichkeit hervorgerufen. Steigt die Temperatur, so *verringert* sich die Wasseraufnahmefähigkeit von Zellulose, während die von Öl *zunimmt*. Also treibt das Bestreben, die höchstmögliche Entropie zu erreichen, die Wassermoleküle in das Öl. Bei sinkender Temperatur läuft der Prozess natürlich umgekehrt ab. Jedoch bleibt bei jedem Zustand die Wasseraufnahmefähigkeit von Papier einige 1000-mal größer als die von Öl.

Das globale thermodynamische Gleichgewicht tritt ein, wenn die messbaren Größen wie Temperatur, Druck und Feuchtigkeit mit der Zeit stabil bleiben. Dieser Zustand ist für Transformatoren nicht erreichbar. Dennoch treten lokale thermodynamische Gleichgewichtszustände auf, d.h. die messbaren Größen ändern sich so langsam, dass die betrachteten Punkte im Gleichgewicht mit ihrer Umgebung sind. Gleichgewichtsdiagramme für Feuchtigkeit in Zellulose und in Öl sind also begrenzt anwendbar. Tatsächlich können in einem Transformator mehrere Isolationssysteme mit spezifischer Temperatur usw. angenommen werden, die Gleichgewicht besitzen.

## 2.2 Gleichgewicht und relative Feuchte

Die Diffusion von Wasser wird durch Unterschiede im Wasserpotential  $\Psi$  angetrieben. Wasserpotential oder die partielle freie Enthalpie ist ein thermodynamisches Potential mit den unabhängigen Variablen Temperatur  $T$ , Druck  $p$  und Stoffmenge  $n$ . Entsprechend Gleichung (1) ist sie auch beschreibbar als Funktion der Wasseraktivität  $a_w$  und der Temperatur  $T$  mit der Gaskonstante  $R$  und dem Molekulargewicht von Wasser  $M_w$  [5].

$$\Psi = \frac{RT}{M_w} \ln(a_w) \quad (1)$$

Die Wasseraktivität gibt direkte Auskunft über den Energiezustand von Wasser in Materie. Sie ist numerisch verknüpft mit der relativen Feuchtigkeit  $RH$  durch (2).

$$RH = a_w \cdot 100 \% \quad (2)$$

Damit beschreibt ein einfaches Gesetz den Feuchte-austausch: Die relative Feuchtigkeit in angrenzenden Medien ist bei Gleichgewicht identisch (3). Damit wird das Gleichgewicht und die höchste Entropie im System erreicht.

$$RH_{Cellulose} = RH_{Oil} = RH_{Air} \quad (3)$$

Die relative Feuchtigkeit als Äquivalent der Wasseraktivität beschreibt das Wasser, das zur Interaktion mit Materialien zur Verfügung steht. Also sind von ihr direkt chemische Reaktionen (Depolymerisation durch Hydrolyse), die Dissoziation von Säuren (Durchschlagsspannung, Ölleitfähigkeit) und das Verdampfen von Wasser abhängig (Bubble-Effekt). Die Wasseraktivität und damit die relative Feuchtigkeit ist also sehr gut geeignet, das Gefährdungspotenzial von Wasser in Transformatoren zu beschreiben.

## 2.3 Wasseraufnahme in Zellulose

Das in Transformatoren verwendete Pressboard und Papier besteht zu 90 % aus Zellulose, zu 3-7 % aus Lignin (Holzbestandteil) und Pentosan (Zucker). Im Folgenden soll der Sammelbegriff Zellulose für die im Transformatorenbau verwendeten Papiere und Pressboard gelten.

Zellulose besteht aus polaren Glukoseketten und kann große Wassermengen binden, dass in folgenden Formen auftritt:

1. Bei geringem Wassergehalt werden die Moleküle durch chemische Adsorption relativ fest gebunden (Wasserstoffbrückenbindungen an aktiven OH-Gruppen).
2. Bei höherem Wassergehalt (ab etwa 1-2 % Gewichtsfeuchte) halten nur relativ schwache Van-der-Waals- und
3. Kapillarkräfte das Wasser im Zelluloseverbund (physikalische Adsorption, Bild 2).
4. Wasser kann als kondensiertes Wasser in Kapillaren auftreten.

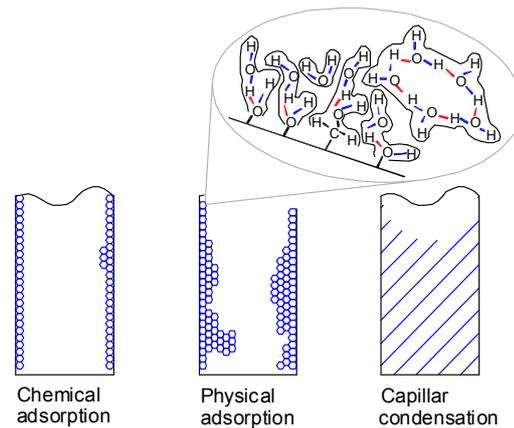


Bild 2: Bindung von Wassermolekülen in Zellulose

Zellulose altert durch Oxydation, Hydrolyse und bei hohen Temperaturen durch Pyrolyse unter dem Einfluss von Wärme, Säuren und Feuchtigkeit. Oxydation und Pyrolyse lassen Wasser entstehen, während die hydrolytische Kettenspaltung Wasser benötigt. Der Polymerisationsgrad als Zahl der verketteten Glukosemoleküle sinkt bei Alterung von anfangs 1000-1500 auf 200-400, was als Ende der Lebensdauer betrachtet wird.

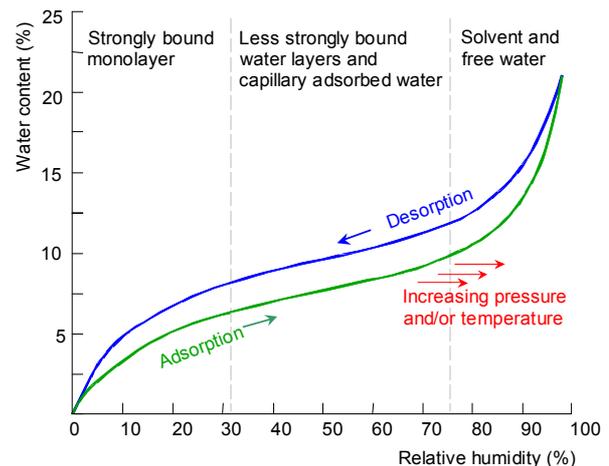


Bild 3: Ad- und Desorptions-Isotherme für Zellulose

Die Beziehung zwischen Gewichtsfeuchte und relativer Feuchte eines Materials kann durch Sorptionsisotherme grafisch dargestellt werden. Sie zeigt für jeden Feuchtwert die entsprechende Gewichtsfeuchte bei konstanter Temperatur. Ändert sich die Zusammensetzung oder Qualität des Materials, so ändert sich auch das Sorptionsverhalten. Bedingt durch die Komplexität der Sorptionsvorgänge können die Isothermen nicht rechnerisch bestimmt werden, sondern müssen experimentell aufgenommen werden. Der steile Verlauf im linken Drittel wird von chemischer Adsorption bestimmt. Der mittlere Bereich ist von physikalischer Adsorption dominiert, während im rechten Drittel freies Wasser auftritt, siehe Bild 3. Ad- und Desorptionskurven unterscheiden sich, da das Ablösen von Wassermolekülen Energie erfordert.

## 2.4 Wasseraufnahme in Isolieröl

Reines Isolieröl besteht aus apolaren, gesättigten Kohlenwasserstoffen (Paraffine, Naphtene) und kann deshalb kein Wasser lösen. Technisch reines Öl jedoch enthält Aromate und Verunreinigungen, die nach der Raffinerie noch enthalten sind. Außerdem treten im Betrieb Partikel und Alterungsprodukte auf, damit kann Wasser im Öl gelöst werden und tritt folgendermaßen auf:

1. Durch Wasserstoffbrücken- und/oder Van-der-Waals-Bindungen gebunden an Aromate, Alkohole, Säuren
  2. Absorbiert von Teilchen wie z.B. Zellulosefasern
  3. Beim Überschreiten der Sättigung als Tröpfchen.
- Die Feuchtigkeit  $C_W$  bezieht man auf das Ölgewicht (ppm oder  $\mu\text{g}$  Wasser / g Öl) oder auf die Sättigungsfeuchte  $C_{W,S}$  (%).

Mineralöl altert durch Oxydation abhängig von Temperatur, Feuchtigkeit und natürlich Sauerstoffzufuhr. Ein im Transformator gealtertes Öl enthält Alkohole, Aldehyde, Ketone und Säuren, die aber im wesentlichen aus der Zellulosealterung stammen. Alle diese Alterungsprodukte erhöhen die Wasseraufnahmefähigkeit des Öls, da sie Wasserstoffbrücken- und/oder Van-der-Waals-Bindungen eingehen können. Bei einer Wasserstoffbrückenbindung wird ein Wasserstoffatom (Proton) zwischen zwei Atome mit hoher Elektronegativität gebunden, z.B. Sauerstoff. Diese Bindung tritt auch zwischen den Wassermolekülen selbst auf, was zur Tröpfchenbildung führt. Van-der-Waals-Bindungen sind einfach elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen entgegengesetzten Ladungen (Dipolen).

Bild 4 zeigt die Sättigungsfeuchte für neues Isolieröl nach Shell und Oommen [1], für ein betriebsgealtertes Shell K 6 SX aus 1965 mit einer Neutralisationszahl von 0,49 mg KOH / g Öl und zusätzlich für Silikonöl [2].

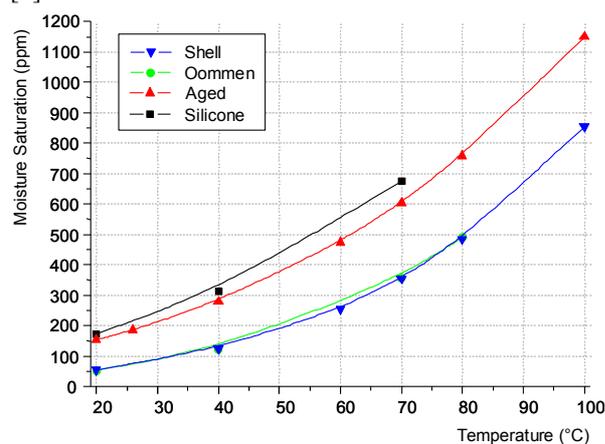
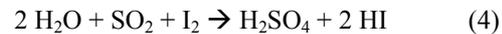


Bild 4: Wassersättigung für neues Isolieröl, gealtertes Öl (NZ = 0,49 mg KOH/g Öl) und Silikonöl

## 3 Direkte Feuchtemessung

### 3.1 Wassermasse: Karl Fischer Titration

Bei einer Titration fügt man ein Reagenz bekannter Konzentration (Titer) zu einer unbekanntem Substanz hinzu, bis die Konzentration ausgeglichen ist. Bei *coulometrischer* Titration generiert eine Elektrode den Titer, in diesem Fall Jod, nach der folgenden Gleichung.



Die Empfindlichkeitsgrenze reicht bis zu wenigen  $\mu\text{g}$  Wasser. Die Feuchte in Zellulose  $C_W$  wird auf das Gewicht  $m_p$  bezogen, also als Gewichtsfeuchte errechnet. Die zu bestimmende Feuchtigkeit aus Öl, Papier oder Pressboard kann auf drei Wegen in das Reaktionsgefäß gelangen:

1. Direkte Injektion. Z.B. Öl kann direkt eingespritzt werden. Allerdings verschmutzt das Reaktionsgefäß und Nebenreaktionen mit Alterungsprodukten oder Inhibitoren können stattfinden.
2. Ausheizmethode. Der Wasserdampf wird in einem Ausheizofen aus dem Material ausgetrieben und in das Reaktionsgefäß geleitet. Nachteilig wirkt sich der Blindwert des leeren Reaktionsgefäßes aus, die Empfindlichkeit sinkt deutlich.

Die coulometrische Titration nach Karl Fischer gilt als Maßstab für Feuchtebestimmung im Allgemeinen. Die Messzelle selbst ist sehr genau, jedoch birgt die Probenaufbereitung und das Auslösen des Wassers aus der Probe eine Reihe von Fehlerquellen.

1. Während der Probenaufbereitung dringt immer Feuchtigkeit aus der Atmosphäre ein; alle Ergebnisse sind mit einer Abweichung zu höheren Werten behaftet.
2. Die Ausheizmethode ist für trockenen Öle mit  $C_W \leq 10$  ppm kaum anwendbar. Daneben führt die direkte Injektion und die Ausheizmethode bei gealterten Ölen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Das könnte mit dem
3. Einfluss von Öl-Additiven und Alterungsprodukten erklärt werden. Z.B. reagieren Aldehyde und Ketone mit dem Methanol des Reagenz zu Azetalen und Ketalen unter Produktion von Wasser.
4. Die Ausheiztemperatur, also die zum Lösen von gebundenem Wasser eingebrachte thermische Energie, bestimmt wesentlich die freigesetzte Wassermenge.
5. Randbedingungen, die nicht von Standards festgelegt sind, werden in Öllaboren unterschiedlich gehandhabt. Deshalb zeigten Ring- oder Blindtests immer wieder sehr große Unterschiede im gemessenen Feuchtegehalt.

Im Rahmen der Untersuchungen dieses Beitrags wurde das Gerät Aqua 40.00 der Analytik Jena mit coulometrischer Titration, Ausheizofen und einem Kreislauf aus Methanoldampf angewendet. Die Ausheiztemperatur lag bei 160°C für Isolierpapier und 180°C für

Pressboard. Die Feuchte in Isolieröl wurde durch direkte Injektion in die Messzelle mit einem für Öl spezialisierten Reagenz ermittelt.

Die damit erreichte Wiederholbarkeit der Messungen lag bei  $\pm 10\%$  des Messwerts für die Gewichtsfeuchte von Zellulose. Bei der Gewichtsfeuchte in Öl betrug sie  $\pm 9\%$  im Bereich von 10-200 ppm.

### 3.2 Relative Feuchtigkeit: Kapazitive Sensoren

Kapazitive Sensoren bestehen aus zwei Elektroden mit einem Dielektrikum aus hydroroskopischem Polymer (Bild 5). Wassermoleküle diffundieren abhängig von der relativen Feuchte des umgebenden Mediums durch poröse Elektroden in das Dielektrikum. Die recht hohe Permittivität von Wasser  $\epsilon_w = 80$  erhöht die Kapazität des Sensors. Diese Änderung wird an einem RC-Oszillator in eine variable Frequenz umgeformt und so gemessen.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad \text{und} \quad \epsilon_r = \epsilon_i + \epsilon_w \cdot c \quad (5)$$

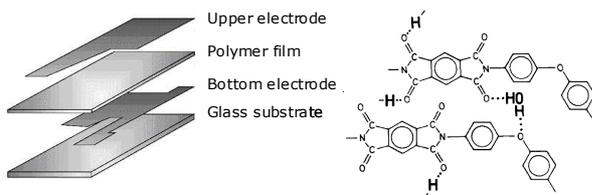


Bild 5: Prinzip eines kapazitiven Dünnschichtsensors (links) und Wassermoleküle angelagert an Polyimid-Moleküle (rechts)

Alterungsprodukte können ebenfalls in das Dielektrikum diffundieren und die Permittivität ändern. Allerdings ist dieser Einfluss wegen ihrer vergleichsweise geringen Permittivität als gering einzuschätzen. Ist das Medium stark säurehaltig, so können die Elektroden korrodiert werden. Kommerziell erhältliche Sensoren unterscheiden sich in ihrer Einschwingzeit und Langzeitstabilität.

Vorteil der kapazitiven Sensoren ist, dass ihre richtige Funktion und Kalibrierung einfach durch gesättigte Salzlösungen kontrollier- und korrigierbar sind. Gerade bei Langzeiteinsätzen, z.B. in Monitoring-Systemen, sollte ihre Genauigkeit regelmäßig kontrolliert werden.

In dieser Untersuchung wurden zwei Sensoren vom Typ HMP 228 der Vaisala GmbH benutzt. Die Feuchtigkeit relativ zur Sättigungfeuchte ist der ursprüngliche Messwert des Sensors, der auch in dieser Untersuchung ausschließlich verwendet wurde. Daneben kann die Feuchte relativ zum Gewicht in ppm durch zwei ölspezifische Konstanten errechnet werden. Diese Konstanten ändern sich mit der Fähigkeit des Öls, Wasser zu absorbieren, also der Zusammensetzung, Verunreinigungen und besonders mit dessen Alte-

rungszustand. Eine Kalibrierung auf das jeweilige Öl-Papier-System ist für richtige ppm-Messwerte unumgänglich, für die relative Feuchte natürlich nicht nötig. Wegen der unterschiedlichen Messmethoden können kapazitive Sensoren und die Titration nach Karl Fischer nicht direkt miteinander verglichen werden.

### 3.3 Untersuchte Materialien

Absorptionsisotherme wurden für folgende Materialien gemessen: Neues Kraft-Papier, neues thermisch stabilisiertes Papier, neues Pressboard, thermisch gealtertes Papier, thermisch gealtertes Pressboard, betriebsgealtertes Pressboard aus 1965, neues Öl Shell Diala D, neues Öl Nynas Nitro 3000, ein 25 Jahre betriebsgealtertes Öl mit einer Neutralisationszahl von 0,089 und ein betriebsgealtertes Shell K 6 SX aus dem Jahr 1965 mit einer NZ von 0,49. Die thermische Alterung der Zellulose geschah durch mehrwöchige Erwärmung auf 140°C bei sehr hoher Feuchtigkeit.

## 4 Indirekte Feuchtemessung durch Gleichgewichtsdiagramme

### 4.1 Herkömmliche Diagramme

Nur in seltenen Fällen (Reparatur, Verschrottung) können Papierproben entnommen und so der Wassergehalt direkt ermittelt werden. Deshalb versucht man, aus der Feuchte in ppm einer Ölprobe die Feuchte in % im Papier oder Pressboard zu ermitteln. Werden dazu Gleichgewichtsdiagramme angewandt (z.B. Oommen, Du, Zahn, Piper und Jeffry in [3]), ist aber einer Reihe von Unsicherheiten und systematischen Fehlern zu rechnen:

1. Die Probenentnahme verursacht eine nicht einschätzbare Streuung der Ergebnisse. Dazu ist gerade die Feuchtemessung in trockenem Isolieröl eine messtechnische Herausforderung.
2. Die Diagramme gelten nur unter Gleichgewichtsbedingungen, welche sich bei Umgebungstemperaturen erst nach langen Zeiträumen einstellen.
3. Die bei geringem Feuchtgehalt sehr große Änderung der Kurven erschwert eine genaue Ablesung.
4. Wegen der ungleichmäßigen Feuchtigkeits- und Temperaturverteilung entsteht nur ein Mittelwert für die Papierfeuchte.
5. Die Diagramme sind nur für das spezifische Öl und Papier gültig, an welchem sie erstellt wurden. Das erläutert das folgende Bild 6.

Das Gleichgewichtsdiagramm in Bild 6 enthält neben den üblichen Verläufen für die Gleichgewichtsfeuchte bei 20, 40, 60 und 80°C auch die Gleichgewichtsfeuchte für andere Zellulosearten und Alterungszustände. Zur besseren Übersichtlichkeit sind diese nur für das Gleichgewicht bei 60°C eingetragen. Weist nun eine Ölprobe eine Gewichtsfeuchte von 20 ppm auf, so

ermittelt man bei 60°C eine Feuchte in neuem Papier von 3,2 %, in neuem Pressboard von 2,9 %, in gealtertem Papier und bei gealtertem Öl von 2,3 % und schließlich in gealtertem Pressboard und bei gealtertem Öl von 1,7 %. Der Fehler bei der Anwendung nicht angepasster Gleichgewichtsdiagramme kann also bis zu 100 % betragen! So ist ihr Einsatz nur sinnvoll, wenn sie der Wasseraufnahmefähigkeit von Öl und Zellulose angepasst sind, d.h. für den entsprechenden Transformator entwickelt wurden und im Laufe der Alterung angepasst werden.

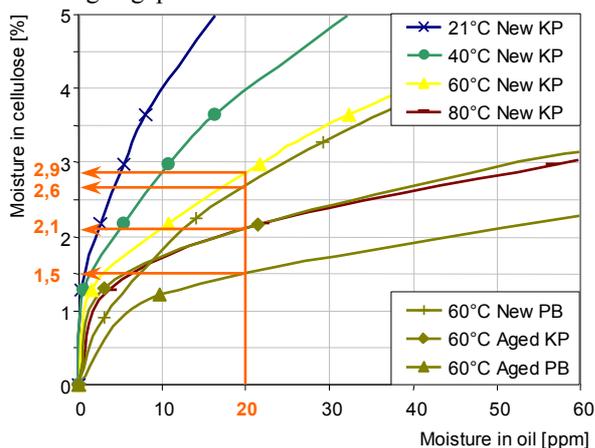


Bild 6: Gleichgewichtsdiagramm für Öl- und Papierfeuchte mit Gleichgewichtskurven für verschiedene Zellulosearten und Alterungszustände

Die geänderte Wasseraufnahmefähigkeit lässt sich leicht erklären. Im Öl entstehen durch die Alterung Produkte, die dessen Wasseraufnahmefähigkeit wesentlich *erhöhen*. Beim Papier *verringert* die Alterung die Wasseraufnahmefähigkeit, insbesondere der Effekt „Verhornung“. Altert Papier bei erhöhter Temperatur, so sättigen sich die OH-Gruppen der Zelluloseketten gegenseitig ab. Die dadurch verbundenen Mikrofibrillen der getrockneten Zellulose sprechen nicht alle beim Wiederanfeuchten auf das Wasser an. Zudem hat verschiedenes Papier/Pressboard schon im Neuzustand wegen dessen Zusammensetzung und Mikrostruktur eine unterschiedliche Wasseraufnahmefähigkeit [4].

## 4.2 Angepasste Gleichgewichtsdiagramme

Herkömmliche Gleichgewichtsdiagramme beinhalten die Gewichtsfeuchte in Öl in ppm. Hier wird eine neue Form von Gleichgewichtsdiagrammen dargestellt, die nun die relative Ölfeuchte in % statt der Gewichtsfeuchte in ppm verwenden. Zudem werden sie an die Wasseraufnahmefähigkeit der jeweiligen Zellulose angepasst. Dadurch entstehen die Vorteile:

1. Die Ölalterung hat keinen Einfluss mehr auf das Gleichgewicht. Zwar ändert sich die Sättigungsfuchte des Öls mit der Alterung, diese Änderung ist aber in der Feuchtigkeit relativ zur Sättigungs-

feuchte bereits eingeschlossen. Eine Adaption auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Öls wird überflüssig.

2. Ölprobenentnahme und Transport zum Labor als wesentliche unwägbara Fehlerquellen werden ausgeschlossen.
3. Kapazitive Sensoren stellen die Messwerte kontinuierlich zur Verfügung und können einfach in Monitoringsysteme eingebunden werden.

Entsprechend des thermodynamischen Gleichgewichts genügt es, die relative Ölfeuchte zu messen, die bei Gleichgewicht identisch der relativen Papierfeuchte ist (Abschnitt 2.2). Nun muss nur noch über ein angepasstes Gleichgewichtsdiagramm die Gewichtsfeuchte im Papier errechnet werden.

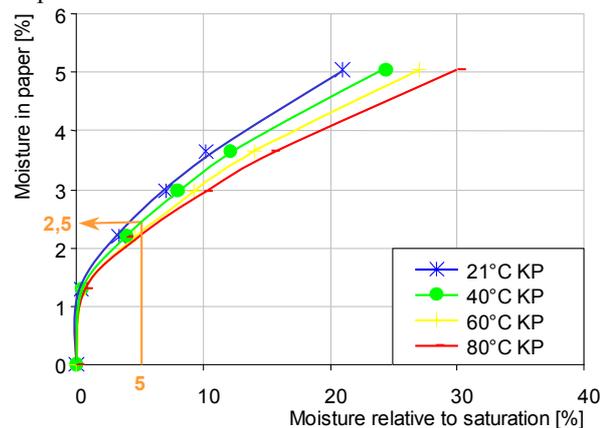


Bild 7: Gewichtsfeuchte in Kraft Papier als Funktion der relativen Feuchte

Bild 7 zeigt ein Gleichgewichtsdiagramm für neues Kraft Papier. Als Beispiel betrage die relative Ölfeuchte 5 % und die Isolationstemperatur 40°C so kann sofort die Gewichtsfeuchte im Papier mit 2,5 % bestimmt werden. Da sich das Gleichgewicht abhängig von der Temperatur erst nach Stunden oder Tagen einstellt, sollte die Papierfeuchte nur beim Betrieb über eine längere Zeit mit gleicher möglichst hoher Temperatur berechnet werden. Das Ergebnis ist ein mittlerer Feuchtwert für das Kraft Isolierpapier im Transformator. Die Berechnung über ein Kurvenfitting des Bild 7 kann Monitoring-Systemen überlassen werden.

Wie bereits gesagt, müssen die Gleichgewichtsdiagramme dem jeweiligen Material (Kraft Papier, Thermisch stabilisiertes Papier, Pressboard) und dessen Alterungszustand angepasst werden. Das bedeutet einen zusätzlichen Aufwand. Deshalb stellt der folgende Abschnitt einen wesentlich einfacheren und auch physikalisch vorteilhafteren Weg zur Feuchtemessung in Transformatoren vor.

## 4.3 Messung der Wasseraktivität

Beschreibt die relative Feuchte den Zustand von Öl-Papier-Isolierungen, so ergeben sich folgende Vorteile:

1. Kein Einfluss durch Öl- und Papieralterung,

2. Umrechnung über Gleichgewichtsdiagramme nicht mehr nötig,
3. Kontinuierliche, genaue Messung mit kapazitiven Sensoren,
4. Direkter Zusammenhang zum zerstörerischen Potential von Wasser.

Der letzte Punkt soll noch näher erläutert werden. Wasser äußert sich in verschiedenen Schädigungen: Die dielektrische Festigkeit von Öl wird verringert (Durchschlagfeldstärke, TE-Einsatzspannung), die Alterung der Zellulose wird beschleunigt und der Bubble-Effekt kann auftreten. Für alle drei Wirkungen ist das Wasser verantwortlich, dass für Wechselwirkungen zur Verfügung steht. Genau dieses Wasser wird durch die relative Feuchte beschrieben, nicht durch die Gewichtsfeuchte. Die Wassermasse bezogen auf die Zellulose- oder Ölmasse (Gewichtsfeuchte in ppm oder %, gemessen mit der Karl Fischer Titration) beinhaltet auch die Wassermoleküle, die stark gebunden sind, also nicht für Wechselwirkungen zur Verfügung stehen. Den direkten Bezug zum Schädigungspotential stellt das aktive Wasser her, beschrieben durch die relative Feuchte.

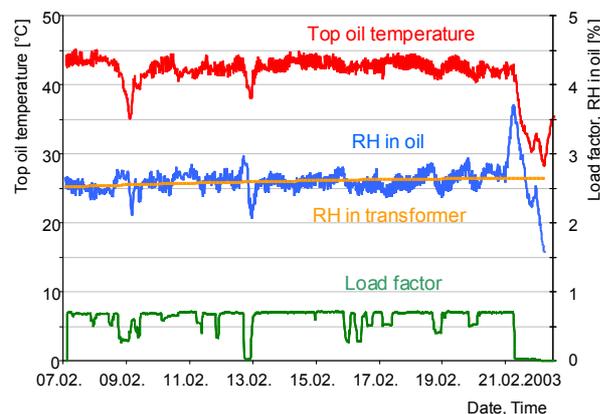


Bild 8: Gemessener Lastfaktor, obere Öltemperatur, relative Feuchtigkeit im Öl und berechnete Feuchtigkeit in der Zellulose [6]

Das obenstehende Bild 7 verdeutlicht die Messung der Wasseraktivität in einem Leistungstransformator mit Online-Monitoring-System. Die relative Feuchtigkeit im Öl (und damit die Wasseraktivität) ändert sich mit der oberen Öltemperatur bzw. dem Lastfaktor. Mit einem Langzeitmittelwert der Ölfeuchte wird ein „mathematisches Gleichgewicht“ hergestellt und die relative Feuchte in der Zellulose berechnet, hier beträgt diese 2,6%. Damit ist das Schädigungspotential von Wasser besser charakterisiert als durch die bisher übliche Gewichtsfeuchte.

## 5 Zusammenfassung

Wasser ist ein Alterungsprodukt und -katalysator. Daneben begünstigt Wasser Teilentladungen, verringert die Durchschlagsspannung und führt zur Bläschenbildung (Bubbling) bei hohen Temperaturen.

1. Feuchtediffusion zielt auf die höchstmögliche Entropie ab. Gleiche Temperatur und Druck vorausgesetzt, wird die *relative* Feuchtigkeit angrenzender Körper (z.B. Öl und Papier) im Feuchtegleichgewicht identisch.
2. Die coulometrische Karl Fischer Titration gilt als Maßstab für die Bestimmung der Gewichtsfeuchte in % oder ppm. Jedoch bergen die Probenaufbereitung und das Auslösen des Wassers aus der Probe eine Reihe von Fehlerquellen.
3. Kapazitive Sensoren messen die relative Feuchte im Öl kontinuierlich und sind genauer als das herkömmliche Ölprobenverfahren mit Probenentnahme, Transport und anschließender Karl-Fischer-Titration.
4. Konventionelle Gleichgewichtsdiagramme mit der Gewichtsfeuchte in Öl (ppm) als Funktion der Gewichtsfeuchte in Zellulose (%) können kaum in praktischen Fällen angewendet werden. Zum Beispiel ändert sich das Gleichgewicht mit der Alterung von Öl und Papier.
5. Angepasste und verbesserte Gleichgewichtsdiagramme mit der relativen Feuchte in Öl (%) als Funktion der Gewichtsfeuchte in Zellulose (%) schließen den Fehler durch die Ölalterung aus.
6. Die relative Feuchte in der Zellulose kann bei Gleichgewicht direkt aus der relativen Ölfeuchte abgelesen werden. Die relative Feuchte ist nicht nur wesentlich einfacher, genauer und kontinuierlich zu messen, vielmehr gibt sie das Schadenspotential von Wasser in Form des aktiven Wassers direkt an.

## 6 Literatur

- [1] Du, Y., Zahn, M. et. al “A Review of Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems” IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 15, No. 1, pp. 11-20, January-February 1999
- [2] P. Griffin, et al. “Comparison of Water Equilibrium in Silicone and Mineral Oil Transformers” Minutes of the Fifty-Fifth Annual International Conference of Doble Clients, 1988, sec. 10-9.1.
- [3] S. Fischer „Blasenbildung von in Flüssigkeiten gelösten Gasen“ Elektronische Dissertation, TU München 2001, <http://tumb1.ub.tum.de/>
- [4] M. Koch “Improved Determination of Moisture in Oil-Paper-Insulations by Specialised Moisture Equilibrium Charts” Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, S. 508, Beijing, China, 2005
- [5] Water Activity Theory [www.wateractivity.org](http://www.wateractivity.org) 2006
- [6] M. Koch, S. Tenbohlen, T. Stirl “Advanced Online Moisture Measurements” International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, April 2-5, 2006, Changwon Korea