

Physik des Feuchteausstauschs in einem Öl-Zellulose Isoliersystem unter Beachtung des Grenzschichtverhaltens

Dipl. Ing. Bernd Buerschaper, Prof. Dr. Thomas Leibfried

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Deutschland

Kurzfassung

Die Analyse des transienten Feuchteausstauschs von Öl-Papier Isolierungen in Leistungstransformatoren ist eng mit den physikalischen Transportphänomenen der Diffusion und Wärmeleitung gekoppelt. Auf Grundlage der physikalischen Modellbildung im Fluid (Isolieröl), an der Grenzschicht Öl-TRANSFORMERBOARD sowie innerhalb des Zelluloseverbundes des TRANSFORMERBOARD'S (TB) werden Aussagen über das Diffusionsverhalten in einem TB-Öl System getroffen. Oft ist die Diffusionsproblematik auf nichtimprägniertes TRANSFORMERBOARD beschränkt (dieser Fall spielt im Transformatorenbau eine wichtige Rolle). Einige andere Untersuchungen beschreiben die Diffusioneigenschaften von ölprägnierten TRANSFORMERBOARD unter normalen Druck- und Feuchtebedingungen im Klimaschrank. Im vorliegenden Beitrag werden diese Ergebnisse den Untersuchungen des Diffusionsverhaltens in einem realen Öl-Papier System gegenüber gestellt.

1 Einleitung

Leistungstransformatoren mit Öl-TRANSFORMERBOARD Isolierung besitzen im Neuzustand einen Feuchtegehalt von lediglich 0,5 Masse%. Im Laufe des Lebenszyklus' des Transformators erhöht sich der Wassergehalt vor allem in Abhängigkeit der Wärmebeanspruchung (als Folge der elektrischen Beanspruchung) auf mehrere Prozent. Zunächst ist die Funktionstüchtigkeit des Transformators durch einen erhöhten Feuchtegehalt nicht eingeschränkt. Bei höheren Feuchtegraden wird die Gefahr von Teilentladungsaktivitäten am Transformator größer. Ebenso ist eine Reduzierung der Isolationsfeldstärke durch erhöhten Feuchtegehalt zu erwarten [1]. Wasser in der Zelluloseisolierung wirkt aber vor allem als Katalysator für die Depolymerisation, d.h. die Spaltung der Zellulosemolekülketten. Kritisch bei der Zellulosekettenspaltung ist, dass das Material dadurch spröde und brüchig wird, was auch die mechanische Widerstandsfähigkeit verringert. Neben dem Feuchte-Gleichgewicht, das sich in einer Öl-Papier Isolierung unter bestimmten Bedingungen einstellt, und das bereits sehr gut erforscht ist, sind aber auch die Feuchteverteilung innerhalb der Transformatorisolierung und das transiente Feuchteverhalten von großem Interesse. Neue Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet dienen insbesondere der Weiterentwicklung spezieller Monitoringverfahren sowie einer effizienten Trocknung von Transformatoren.

Bei der Betrachtung transientser Feuchte-Austauschprozesse spielen Diffusionsprozesse, also der Stoffaustausch innerhalb der Isolierung, eine entscheidende Rolle. Eine Hauptrolle bei der Analyse des Stoffaustausches spielt der Diffusionskoeffizient D , dessen genaue Bestimmung von essentieller Bedeutung ist.

2 Der Gleichgewichtszustand

Das Öl-Papier Isoliersystem eines Transformators befindet sich im Gleichgewichtszustand, wenn der Teilchendichtestrom Null ist. Bei konstantem Teilchendichtestrom spricht man von einem Quasi-Gleichgewichtszustand (engl. steady state). Die Ursache des Teilchendichtestroms sind Partialdruckunterschiede innerhalb des Isolierversundes. Partialdruckunterschiede entstehen durch unterschiedliche Wärme- und/oder Konzentrationsverteilungen. In der Literatur existieren mehrere Gleichgewichtskurven, die die Abhängigkeit der Isolierölfeuchte von der Papierfeuchte darstellen, mit zwei wichtigen Grundaussagen:

1. Im Gleichgewicht ist die relative Feuchte in einem Öl-Papier-System stets gleich.
2. Die relative Feuchte ist gleich, unabhängig vom angrenzenden Medium (Öl oder Luft).

Aufgrund des letzteren Sachverhaltes müssen die Öl-Papier-Gleichgewichtskurven nicht durch direkten Kontakt (Öl-Papier) bestimmt werden [1][2][3][4]. Vielmehr wird über die Gleichgewichtsverläufe Öl-Luft und Papier-Luft (indirekte Bestimmung) auf das Gleichgewichtsverhalten Öl-Papier geschlossen. Der Vorteil der indirekten Bestimmung liegt darin, dass es experimentell wesentlich einfacher ist, den Gleichgewichtszustand in der Gasphase zu bestimmen als im direkten Öl-Papier Kontakt. Die Untersuchungen des vorliegenden Papers beschäftigen sich mit Prozessen des transienten Feuchteausstausches. Der Ausgangspunkt der Experimente waren häufig Gleichgewichtszustände des Öl-Papier Systems. Hierbei wurde eine sehr genaue Übereinstimmung zu den Gleichgewichtskurven von Oommen [1] festgestellt.

3 Feuchtediffusion im Transformator

Je nach Alterungszustand besitzt das Öl-Papier Isoliersystem eines Transformators einen erhöhten Feuchtegehalt. Davon befindet sich der weitaus größte Teil des Wassers (ca. das 100-fache) in der Papierisolierung. Ein Konzentrations- oder Temperaturungleichgewicht zwischen beiden Medien erzwingt einen Diffusionsstrom, der einen Feuchteausgleich herstellt. In einem Öl-Papier-System kann der Diffusionsvorgang in drei Abschnitte unterteilt werden:

- Diffusion der Wassermoleküle im freien Öl (sofern keine Konvektion vorliegt)
- Diffusion im Grenzschichtübergang
- Diffusion im Zelluloseverbund

3.1. Begriffe und Annahmen

Die Triebkräfte einer Diffusion sind verschiedener Art, wobei man zwischen Diffusion in einem isothermen und nichtisothermen System unterscheidet. In einem isothermen System beruht der Diffusionsprozeß auf mechanischen Triebkräften; das sind Partialdruck- oder Konzentrationsgradienten. Da der Transformator nicht als isothermes System aufgefasst werden kann, muß ein weiterer Effekt berücksichtigt werden - der Thermoeffekt (Soret-Effekt). Die Diffusionstriebkräfte resultieren hier zusätzlich aus einem Temperaturgradienten.

Prinzipiell können diese drei Mechanismen die Ursache sein, wenn in einem Transformator-Isoliersystem als Folge des Ungleichgewichtes ein transienter Feuchteausgleich (Stofftransport durch Diffusion) entsteht. Die zeitliche und örtliche Abhängigkeit des Stofftransportes durch Diffusion wird durch das 2. FICK'SCHE Gesetz beschrieben:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{2. FICK'SCHES Gesetz} \quad (1)$$

c = Konzentration
D = Diffusionskoeffizient
x = Diffusionslänge
t = Zeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zunächst nur die Vorgänge in einem isothermen System behandelt. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Analyse nichtisothermer Systeme.

Ein isothermes System hat zu bestimmten Zeitpunkten an allen Orten stets die gleiche Temperatur. Das schließt nicht aus, dass sich nicht auch die Systemtemperatur ändert, jedoch ist die Änderung zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort gleichmäßig im gesamten System zu verzeichnen.

3.2 Mathematik der Diffusion

In einem Transformator erfolgt die Diffusion in den meisten Fällen zu beiden Seiten des TRANSFORMERBOARD'S. Legt man wieder ein isothermes System zugrunde, ergibt sich ein symmetrisches Diffusionsprofil von links und rechts zur TB-Mitte. Die mathematische Lösung des Problems erhält man durch Lösen der pDgl. des 2. FICKSCHEN Gesetzes (1) unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen. Zum Zeitpunkt t_0 ist die Konzentration im TB überall gleich groß (Gleichgewicht): $c(x, t_0) = c_0$ (2)

Nach der Grenzschichttheorie herrscht an den TB-Außenflächen x_0 und x_1 in einer infinitesimal kleinen Schicht dx zu allen Zeiten die Grenzflächenkonzentration c_1 , die annähernd durch die Gleichgewichtsfeuchte, die sich im TB aufgrund der Ölfeuchte ergibt, bestimmt werden kann.

$$c_1(x_0, t) = c_1(x_1, t) \quad (x_0 \text{ u. } x_1 = \text{TB} - \text{Ortskoord.}) \\ = \text{Gleichgewichtsfeuchte TB und Öl} \quad (3)$$

Dann lautet die Lösung der pDgl:

$$c(x, t) = c_1 - \sum_n \frac{4(c_1 - c_0)}{n\pi} e^{-\left(\frac{n^2 \pi^2 D t}{l^2}\right)} \sin\left(\frac{n\pi}{l} x\right) \quad (4)$$

für $n = 1, 3, 5, \dots$

c_0 = Anfangskonzentration im TB
 c_1 = äußere Randschichtkonzentration des TB
D = Diffusionskoeffizient
x = Diffusionsweg
l = Gesamtdicke TB

Ist der Diffusionskoeffizient D bekannt, kann das Konzentrationsprofil für jeden beliebigen Zeitpunkt und beliebigen Ort im TB berechnet werden (Bild 1). Allerdings ist die exakte Bestimmung des Diffusionskoeffizienten meist sehr aufwendig, da die Diffusionsströme klein sind und das Konzentrationsprofil oft schwierig zu bestimmen ist. Deshalb weicht man in vielen Fällen auf theoretische oder empirisch-theoretische Beziehungen zur Vorausberechnung des Diffusionskoeffizienten aus.

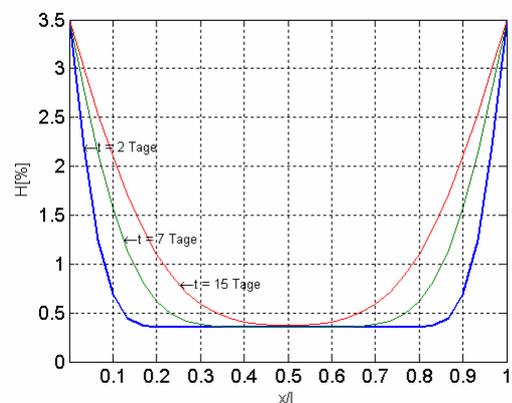


Bild 1 Konzentrationsprofil berechnet nach (4)

3.3 Diffusion im freien Öl

Da an der unmittelbaren Grenzschicht des TB die Diffusion ausschließlich im Ölfluid stattfindet, lag es nahe den Diffusionskoeffizienten von Wasser in Öl zu bestimmen. Dafür wurde die in Bild 2 dargestellte Versuchsanordnung verwendet.



Bild 2 Versuchsaufbau zur Messung des Selbstdiffusionskoeffizienten in Öl

Untersucht wurde die Diffusion von Wassermolekülen in einem ölgefüllten Zylinder (Diffusionsrohr). Um eine Thermodiffusion weitgehend auszuschließen und den Einfluß der Schwerkraft auf die Molekülbewegung klein zu halten, erfolgte eine waagerechte Anordnung des Diffusionszylinders. Zum Zeitpunkt $t_0=0$ wurde an der Stelle $x=0$ des Zylinders 50 ml Wasser eingefüllt. Das Wasser sammelte sich im Fuß des Rohres. Fortan diffundierten unter dem Einfluß des bestehenden Konzentrationsunterschiedes die Wassermoleküle in Richtung des geringeren Konzentrationsgefälles innerhalb des Zylinders.

3.3.1 Diffusion in der Grenzschicht

Stationäres Grenzschichtverhalten

Zwischen beiden Phasen (Wasser und Öl) bildet sich eine Grenzschicht aus (Bild 3).

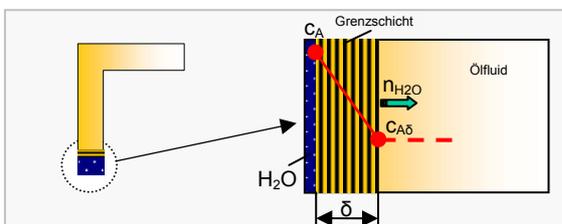


Bild 3 Grenzschicht zwischen den Phasen

Die Konzentrationsverteilung in der Grenzschicht kann unter folgenden Bedingungen berechnet werden:

- Das System befindet sich im stationären Zustand d.h. $dc/dx = \text{konstant}$
- Der Stoffaustausch beruht allein auf Diffusion

Der stationäre Stoffaustausch kann mit dem 1. FICK'SCHEN Gesetzes wie folgt berechnet werden:

$$j_{H_2O} = -D \frac{\delta c_A}{\delta x} + c_A u \text{ mit } u = x_A \omega_A + x_B \omega_B \quad (5)$$

Die Bezugsgeschwindigkeit u ist die mittlere molare Geschwindigkeit aller am Stoffaustausch beteiligten Teilchen. Sie wird im vorliegenden Fall aus der resultierenden Geschwindigkeit der Wassermoleküle in das Ölfluid ($x_A \omega_A$) und der Ölmoleküle in das Wasserfluid ($x_B \omega_B$) berechnet. Wegen der geringen Stoffstromdichten von Wasser in Öl ist $x_A \omega_A$ sehr klein. Aufgrund der Annahme, daß keine Lösung von Öl in Wasser stattfindet, kann $x_B \omega_B$ null gesetzt werden. Die Bezugsgeschwindigkeit u ist also sehr gering. Da die Konzentration c_A der Wassermoleküle im Öl ebenfalls sehr gering ist (ppm-Bereich) kann der zweite Term der Gleichung (4) vernachlässigt werden. Der Stoffaustausch in der Grenzschicht beruht also allein auf Diffusion. Die Lösung der pDgl (5) bei den gegebenen Randbedingungen lautet:

$$j = \frac{D}{\delta} (c_{A0} - c_{A\delta}) \quad (6)$$

Das Konzentrationsprofil in der Grenzschicht ist eine Gerade. Der Quotient D/δ wird als Stoffübergangskoeffizient bezeichnet, wobei δ die Dicke der Grenzschicht bezeichnet. Über die Grenzschichtdicke können hier keine quantitativen Aussagen getroffen werden. Sie ist allerdings sehr dünn und dürfte im μm -Bereich liegen.

Den bisherigen Aussagen wurde ein stationäres Verhalten im Diffusionsrohr und an der Grenzschicht unterstellt. Im stationären Fall entspricht die Grenzschichtkonzentration $c_{A\delta}$ der Sättigungskonzentration von Wasser in Öl bei gegebener Temperatur. Ein Vergleich der numerischen Simulation der Feuchteverteilung im Diffusionsrohr unter Annahme dieser Randschichtfeuchte mit realen Messwerten führte zu dem in Bild 4 dargestellten Verlauf. Da sich das System zum Zeitpunkt der Messung nicht im stationären Zustand war, stimmen die Verläufe nicht überein. Das Grenzschichtenmodell muß nun für instationäre Bedingungen erweitert werden.

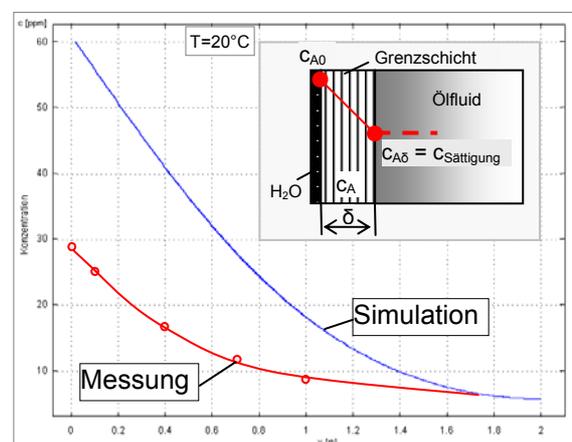


Bild 4 Vergleich Messung und Simulation

Instationäres Grenzschichtverhalten

Die Ergebnisse der Messung in Bild 4 verdeutlichen, daß die gemessene Feuchte in geringen Abstand zur Wasserschicht bereits auf wesentlich geringere Werte abgesunken ist als es die Simulation mit einer Randschichtfeuchte von 60 ppm ergibt. Das heißt, das Modell mit einer Grenzschicht und einer rechtsseitigen Grenzschichtfeuchte = Sättigungsfeuchte von 60 ppm ($T = 20^\circ\text{C}$) ist nicht geeignet die tatsächlichen Verhältnisse des Phasenüberganges von Wasser in Öl darzustellen. Hier zeigt sich, daß das Modell wirklich nur im stationären Gleichgewicht anwendbar ist.

Für den instationären Fall wurde deshalb das Grenzschichtenmodell erweitert, wobei eine zweite Grenzschicht eingeführt wurde. Die linksseitige Grenzschichtfeuchte $c_{A\delta}$ der zweiten Grenzschicht weist wieder Sättigungsfeuchte auf, wie sie sich im stationären Zustand einstellt. (Bild 5).

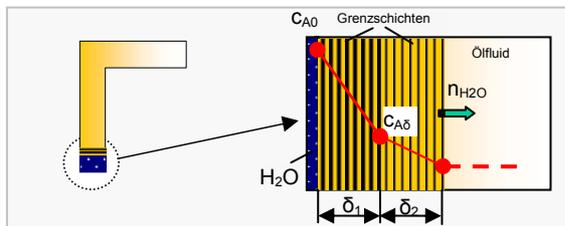


Bild 5 Filmtheorie – Grenzschichtverhalten mit zwei Grenzschichten

Weiter wird unterstellt, daß das Konzentrationsprofil in der zweiten Grenzschicht den Bedingungen aus Gleichung 6 entspricht. Streng genommen gilt Gleichung 6 nur im stationären Zustand. Als Vereinfachung wird aber angenommen, daß sich das System zu einem bestimmten Zeitpunkt t in einem quasistationären Zustand befindet, was auf Grund des geringen Stoffaustauschs der je Zeiteinheit stattfindet in Näherung gültig ist. Der Diffusionskoeffizient berechnet sich aus den Daten des Stoffübergangskoeffizienten zu:

$$\beta = \frac{D_{GS}}{\delta} \Rightarrow D_{GS} = \beta \cdot \delta \quad (6)$$

Über die Schichtdicke δ können hier keine exakten Aussagen getroffen werden, außer das sie im μm -Bereich liegt. Ebenfalls nicht bekannt ist der Stoffübergangskoeffizient. Für die numerische Simulation wurde zunächst willkürlich eine Schichtdicke von $100 \mu\text{m}$ angenommen. Der Diffusionskoeffizient wurde in der Simulation solange variiert, bis die Kurvenverläufe aus den Messungen und der Simulation Übereinstimmung zeigten (Bild 7). Dabei hat sich gezeigt, daß die Simulation dann am besten mit den Messungen übereinstimmt, wenn der Stoffübergangskoeffizient β den gleichen Wert wie der Diffusionskoeffizient D im Diffusionsrohr hat.

$$D_{GS} = D_{Rohr} \cdot \delta \quad \beta = D_{Rohr} \quad (7)$$

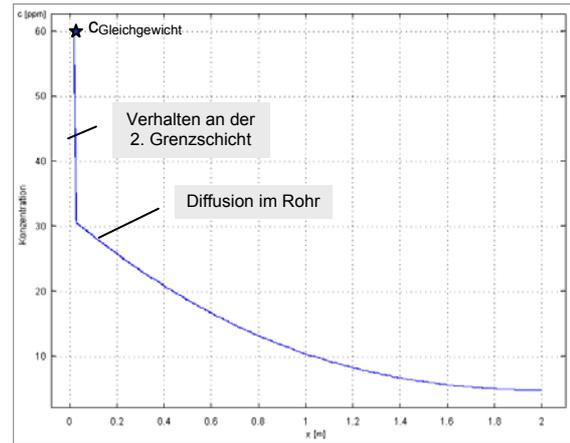


Bild 6 Numerische Simulation des Grenzschichtverhaltens und im Diffusionsrohr bei $T = 20^\circ\text{C}$

Vergleich Numerische Simulation-Messergebnisse

Bild 7 zeigt die Gegenüberstellung der Mess- und Simulationsergebnisse. Das Verhalten in der zweiten Grenzschicht wurde gemäß den im vorigen Abschnitt gemachten Aussagen simuliert. Der Stoffübergangskoeffizient in der Grenzschicht wurde gemäß Gleichung 7 mit $D^* = 5\text{E-}11$ ermittelt.

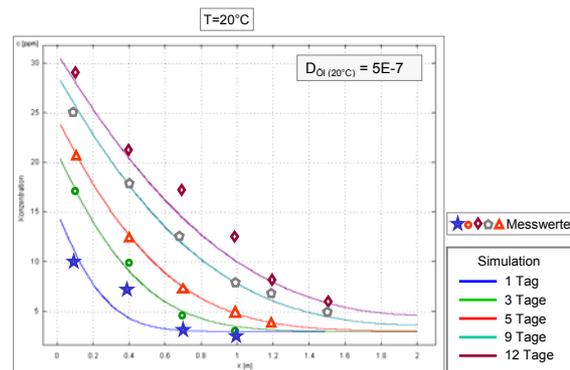


Bild 7 Vergleich numerische Simulation und Messergebnisse im Diffusionsrohr

3.4 Diffusion im ölprägnierten Transformatorboard

Klimaschrank vs. Ölsystem

Diffusionsprozesse in TB werden oft im Klimaschrank unter atmosphärischem Druck (oder Vakuum) und definierten Klimabedingungen durchgeführt. Die Gleichgewichtskurven Öl-TB wurden auf diese Weise bestimmt. Da der Wasserdampfdruck unter den atmosphärischen Bedingungen im Klimaschrank nicht dem im Ölfluid entspricht, und auch das Grenzschichtverhalten in Luft anders als im Fluid zu bewerten ist, sollte untersucht werden, ob Diffusionsprozesse in ölprägniertem TB unter den Bedingungen im Klimaschrank mit guter Genauigkeit experimentell bestimmt werden können. Hierzu wurde folgendes Experiment durchgeführt.

Je eine Tafel ölprägniertes TIII-TB wurde zur Exposition im Klimaschrank und in einer Ölflüssigkeit ausgesetzt. Die eingestellte Luftfeuchte im Klimaschrank entsprach dabei exakt dem entsprechenden Gleichgewichtswert der Feuchte im Ölbad. Nach 2 Tagen Diffusionszeit wurde an beiden TB-Proben das Feuchteprofil gemessen (Tabelle 2).

	Ölprägniertes TIII (3mm)	
	Klimaschrank Luftfeuchte ≙ 50ppm Ölfeuchte T = 70°C	Ölbad 50ppm T = 70°C
Schicht	48h-Feuchte	48h-Feuchte
Randfeuchte	3,5 %	3,5 %
1	2,8 %	2,5 %
2	2,3 %	1,6 %
3	1,8 %	0,7 %
5	1,2 %	0,4 %
6	0,9 %	0,4 %
7-12	0,6 %	0,4 %
Durchschnitt	1,9 %	1,1 %

Tabelle 2 Vergleich gemessenes TB-Feuchteprofil im Ölbad bzw. Klimaschrank

Unter den Bedingungen im Klimaschrank geht die Diffusion erheblich schneller von statten. Im vorgestellten Versuch wurde nach zweitägiger Exposition im Klimaschrank derselbe Diffusionsstrom gemessen wie im Ölversuch nach ca. 20 Tagen. Bereits nach 7 Tagen war im gesamten TB der Feuchtegleichgewichtszustand erreicht. Eine mögliche Ursache für das beschleunigte Diffusionsverhalten ist die beobachtete teilweise Verflüchtigung des Öles aus den Poren des TB's. Da der Diffusionskoeffizient in Luft wesentlich größer als in einem Fluid ist, vergrößert sich dadurch der Diffusionskoeffizient im TB (ähnlich wie bei nichtprägnierten TB). Besonders bei hohen Temperaturen oder bei geringen Schichtdicken bedeutet die Befeuchtung im Klimaschrank eine erhebliche Fehlerquelle bei der Bestimmung des TB-Diffusionskoeffizienten. Der Fehler beläuft sich etwa in der Größenordnung einer Zehnerpotenz.

Aufgrund der oben dargestellten Ergebnisse wurde der Diffusionskoeffizient von ölprägniertem TB in einem TB-Öl System bestimmt. Die konstante Ausgangsfeuchte im TB zu Versuchsbeginn betrug stets ca. 0,4%. Die Randfeuchte an beiden Seiten des TB's musste ebenfalls konstant gehalten werden. Dazu wurde eine größere Menge TB mit definierter Feuchte in ein abgeschlossenes Ölsystem eingebracht, das dann als „Feuchtespender“ für die zu untersuchenden TB-Proben fungierte.

Diffusion-Ergebnisse

Bild 9 zeigt beispielhaft die Änderung des gemessenen Konzentrationsverlaufes in TIV über mehrere Tage. Im Einklang mit der Grenzschichttheorie müsste sich an der äußersten Randschicht stets die Gleichgewichtsfeuchte zum Ölfluid einstellen. Wie

aus Bild 9 ersichtlich ist dieser Sachverhalt im instationären Zustand meßtechnisch nicht nachweisbar, da die Gleichgewichtsfeuchte nur in einer infinitesimal kleinen Grenzschicht auftritt.

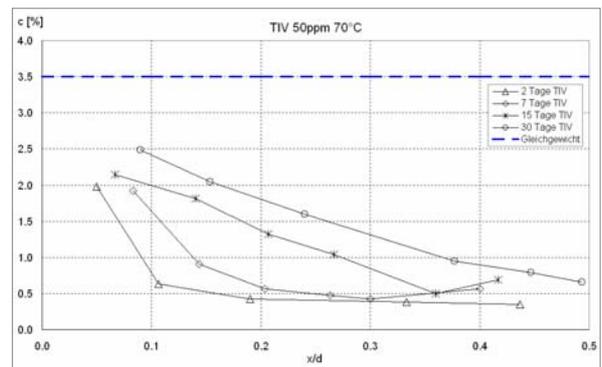


Bild 9 Konzentrationsprofil in TIII (3mm, 70°C, 70 ppm-Ölfeuchte, 7 Tage)

In Bild 10 ist der Vergleich des Diffusionsverhaltens von TIII- und TIV-TB nach 30 Tagen dargestellt. Der unterschiedliche Diffusionsverlauf erklärt sich aus der Hartpressung des TIV-Materials. Die Diffusion verläuft deshalb in TIV langsamer.

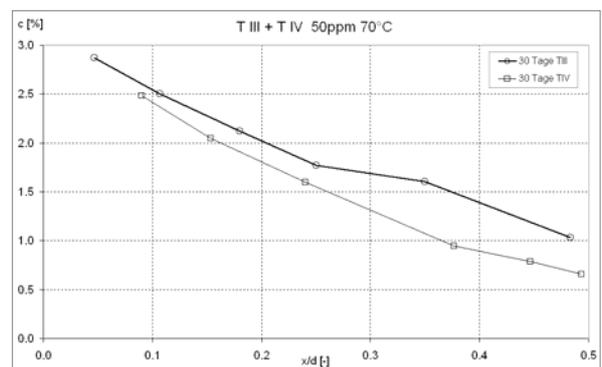


Bild 10 Vergleich Konzentrationsprofil T III - T IV (3mm, 70°C, 50 ppm-Ölfeuchte, 30 Tage)

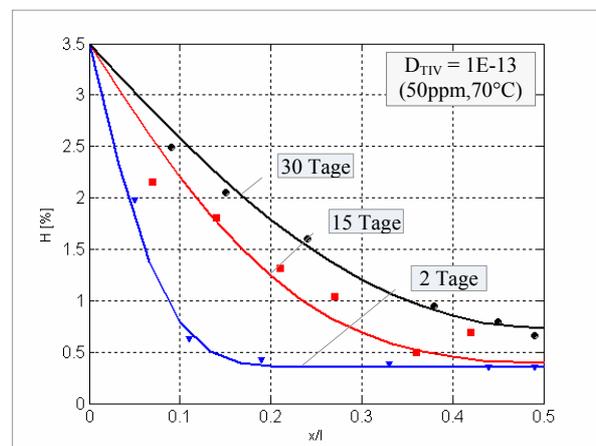


Bild 11 Vergleich Lösung der pDgl und Experiment (TIV 3mm, 70°C, 50 ppm-Ölfeuchte, 30 Tage)

Der Vergleich der Kurvenverläufe aus der Lösung der pDgl und dem gemessenen Feuchteprofil ist in Bild 11 dargestellt. Der meßtechnisch ermittelte Diffusionskoeffizient wurde in der Lösung der pDgl verwendet. Die Übereinstimmung beider Kurvenverläufe ist sehr deutlich.

Folgende Diffusionskoeffizienten in TB wurden bei den bisherigen Versuchen ermittelt.

	ölimprägn. TIII	ölimprägn. TIV
T [°C]	70°C	70°C
D [m ² s ⁻¹]	2·10 ⁻¹³	1·10 ⁻¹³

Tabelle 3 Diffusionskoeffizient für TIII und TIV (50 ppm Ölfeuchte ≙ 3,5 % TB-Feuchte, 70°C)

3.5 Diffusion in ölimprägn. Papier

Neben den Untersuchungen des Diffusionsverhaltens in TIII und TIV-Materialien ist auch die Bestimmung des Diffusionskoeffizienten in ölimprägniertem Papier von Bedeutung. Papier wird hauptsächlich für die Isolierung der Transformatorenwicklungen und Zuleitungen eingesetzt. Ziel der Untersuchungen war es festzustellen, inwieweit sich eine aufgrund des Herstellungsprozesses gegenüber TB veränderte Struktur des Zelluloseverbundes auf den Diffusionskoeffizienten auswirkt.

Für drei verschiedene Ölfeuchten wurde der Diffusionskoeffizienten in Papier experimentell bestimmt. Die Temperatur wurde mit 70°C gewählt.

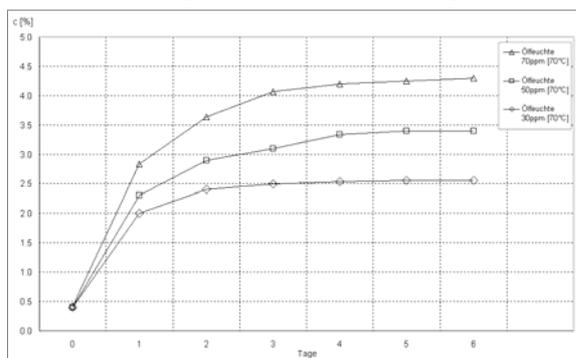


Bild 12 Konzentrationsverlauf einer 0,15 mm Papierisolierung bei verschiedenen Ölfeuchten (T=70°C)

Mit den oben angegebenen Versuchsbedingungen wurde der Diffusionskoeffizient von Papier mit ca. $2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ berechnet.

Der Diffusionskoeffizient in Papier ist damit eine Zehnerpotenz kleiner als im TB. Da die Papierherstellung mit einer beidseitigen Druckpressung verbunden ist, ist das auch plausibel.

Schlussfolgerungen

Für die Beurteilung des Feuchteausstausches im Transformator spielt der Diffusionskoeffizient eine entscheidende Rolle. Der Diffusionskoeffizient ist eine Materialkonstante, die vom Partialdruck der Temperatur und von der Konzentration abhängt. Exakte Messungen des Diffusionskoeffizienten sind sehr aufwendig. Die Erfahrungen aus den Untersuchungen haben gezeigt, dass ein nebeneinander von experimenteller Bestimmung und der Anwendung theoretischer Beziehungen zur analytischen Vorausberechnung bzw. zum Abgleich des Diffusionskoeffizienten die besten Ergebnisse liefert.

Untersucht wurde der Diffusionskoeffizient von TRANSFORMERBOARD des Typs TIII, TIV sowie in Isolierpapier. Die Versuchstemperatur betrug 70°C bei Ölfeuchten zwischen 50 und 100ppm. Mit diesen Versuchsbedingungen sollten realitätsnahe Bedingungen simuliert werden. Die Diffusionsexperimente wurden in einem Öl-TB System vorgenommen. Eine Versuchsdurchführung unter atmosphärischen Bedingungen im Klimaschrank ist nicht geeignet, da hier der Diffusionsprozeß gegenüber den realen Bedingungen in einem Ölfluid deutlich beschleunigt wird. Der Hauptgrund für den deutlich beschleunigten Diffusionsprozeß im Klimaschrank liegt vor allem in der Verflüchtigung des Öles aus den Poren der äußeren Grenzschichten des TB's. Dadurch verringert sich der Diffusionskoeffizient drastisch. Übergangsprozesse in TB wie sie unter Betriebsbedingungen in einem Transformator auftreten, können also nur im direkten Kontakt mit dem Ölfluid bestimmt werden.

Für TB (TIII und TIV) wurde mit den oben angegebenen Versuchsbedingungen ein Diffusionskoeffizient von $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ bzw. $1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ermittelt. Dieser Wert liegt also um eine Zehnerpotenz niedriger als in [5].

In dünnem Papier wurde ein Diffusionskoeffizient von $2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ gemessen.

Die Bestimmung des Feuchte in Öl und TB erfolgte mittels Karl-Fischer-Methode auf Grundlage von [8].

Literatur

- [1] T.V. Oommen, „Moisture Equilibrium in Paper-Oil Systems“, Proceedings of the Electrical/Electronics Insulation Conference, Chicago, IL, pp. 162-166, Oct 3-6, 1983
- [2] T.V. Oommen, „Moisture Equilibrium Charts for Insulation Drying Practice“, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, No.10, pp. 3063-3067, Oct. 1984
- [3] P.J. Griffin, C. M. Bruce, J. D. Christie, „Comparisin of Water Equilibrium in Silicone and Mineral Oil Transformers“, Minutes of the Fifty-Fifth Annual International Conference of Doble Clients, Sec. 10-9.1, 1988
- [4] Y. Du, M. Zahn, B.C. Lesieutre, A. V. Mamishev, S. R. Lindgren, „Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems“ DEIS Feature Article, 1999
- [5] W. W. Guidi, H. P. Fullerton, „Mathematical Model for Prediction of Moisture Take up and Removal in Large Power Transformers“ Conference Paper C-74 242-4, Winter Power Meeting, New York, NY., 1974
- [6] H. P. Moser, V. Dahinden, „Transformerboard I + II“, 1987
- [7] WEIDMANN Compendium, Weidmann TBS AG, CH-Rapperswil, 2001
- [8] B. Buerschaper, T. Leibfried, M. Hahn, „Feuchtemessung in zellulosehaltigen Feststoffemittels Karl-Fischer-Titration – ein Erfahrungsbericht“, ETG-Fachbericht 97, Köln 2004
- [9] Ulrich Grigull, „Wärme- und Stoffübertragung“, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1986
- [10] H. G. Zachmann, „Mathematik für Chemiker“, Verlag VCH Weinheim, New York, Basel, Cambridge 1990
- [11] J. Crank, „Mathematics of Diffusion“ Second Edition, Oxford Science Publikation, Clarendon Press Oxford 1995