

Dielektrische Modellierung der Öl-Papier-Isolationssysteme von Leistungstransformatoren

M.Eng. Michael Jaya, Dipl. Wi.-Ing. Dietmar Giselbrecht, Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried
Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Deutschland

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden dielektrische Modelle von Öl und ölprägniertem Transformerboard (Pressboard-Pb) auf der Basis des Cole-Cole-Ansatzes vorgestellt. Die Modelle berücksichtigen nicht nur das Verhalten der Isolierstoffe über der Frequenz sondern auch die Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften. Auf der Basis dieses Modell-Ansatzes lässt sich eine dielektrische Modellierung für das komplexe Isolationssystem eines Leistungstransformators aufbauen. In dem Paper wird gezeigt, wie ein solches Modell aussehen kann. Der neue Modellierungsansatz bringt gegenüber den bisher meist verwendeten R-C-Modellen einige Vorteile mit sich. Ein dielektrisches Systemverhalten kann somit mit nur wenigen Parametern beschrieben werden. Aufgrund dessen ist die Modellierung der Temperaturabhängigkeit vergleichsweise einfach realisierbar.

1 Theorie des Isolationsschichtmodells

Wie bei jedem physikalischen Modell müssen bezüglich des Isolationsschichtmodells eines Leistungstransformators bestimmte Annahmen und Vereinfachungen akzeptiert werden. Man könnte beispielsweise versuchen, eine räumlich dreidimensionale Betrachtung des Isolationssystems eines Leistungstransformators (siehe Bild 1) anzustreben. Für die Modellierung des Streukanals reicht für die meisten Fälle eine räumlich zweidimensionale Betrachtung in Form eines homogenen Plattenkondensators aus.

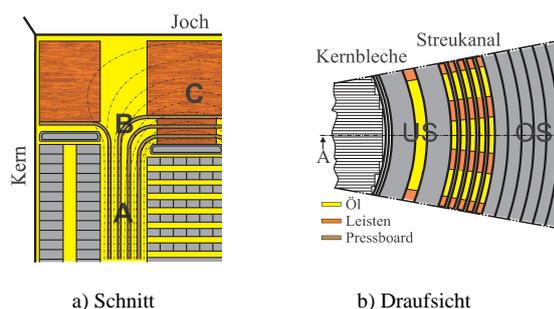


Bild 1 Schnitt durch den Wicklungsaufbau eines Leistungstransformators

- A zylindrischer Feldbereich
- B Randfeld an den Wicklungsenden
- C horizontaler Feldbereich

Die erste grundlegende Vereinfachung des vorgestellten Modells besteht zunächst darin, das Dielektrizitätsverhalten von Öl-Papier-Isolationssystemen mit einer Leitfähigkeit, einer symmetrischen Relaxationsverteilung und einer instantanen Polarisierung zu beschreiben wie in (5) [2].

Als zweite Vereinfachung wird die Geometrie des Streukanals (siehe Bild 1) zwischen OS- u. US-Wicklung als ein Zweisolationsschichtsystem betrachtet, das nur aus Öl und Pressboard besteht. Dieses reduzierte Isolationsschichtmodell für Leistungstransformatoren wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

1.1 Idealisertes Isolationsschichtmodell im homogenen Feld

Für die Modellierung wird der Streukanal zunächst als ein Zweisolationsschichtsystem mit folgenden Annahmen und Vereinfachungen betrachtet:

- Es existiert ein homogenes Feld zwischen der OS- u. US-Wicklung. Diese Annäherung kann gemacht werden, wenn der Wicklungsradius sehr groß gegenüber der Streukanallänge ist.
- Die dielektrische Eigenschaft von Pressboard ϵ_{pb} kann mit einer symmetrischen Relaxationsverteilung, Leitfähigkeit und der instantanen Polarisierung beschrieben werden (siehe Gl.(6)).
- Die komplexe Dielektrizitätsfunktion für Mineralöl $\epsilon_{öl}$ hat kein Relaxationsverhalten (siehe Gl.(7)).
- Die Isolationsschichten bestehen aus einem flüssigen (Öl) und festen (Pressboard) Dielektrikum, die beide Senkrecht zum homogenen elektrischen Feld stehen.
- Die Oberflächenleitfähigkeit zwischen den Isolationsschichten wird vernachlässigt, da die meisten Isolationsschichten senkrecht zum homogenen elektrischen Feld stehen.

- Die Grenzflächeneffekte direkt an der Oberfläche der einzelnen Isolationsschichten und an den Elektroden werden vernachlässigt.

Das Isolationsschichtmodell beschreibt das Impedanzverhalten des Streukanals (Bereich A im Bild 1) in Form einer komplexen Kapazität, das durch die verschiedenen Isolationsschichten im homogenen Feld erzeugt wird. In Bild 2 ist der prinzipielle idealisierte Streukanalaufbau eines Leistungstransformators im homogenen Feld dargestellt.

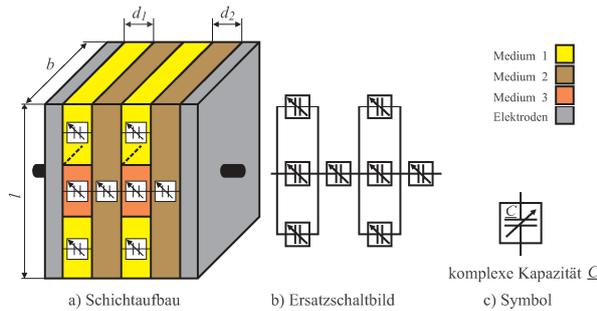


Bild 2 Isolationsschichtmodell im homogenen Feld

Jedes Isoliermedium (z. B. Öl, Papier oder Pressboard) hat ein dielektrisches Verhalten im Frequenzbereich, das als eine komplexe Kapazität $\underline{C}_{M_x}(\omega, \vartheta, \cdot)$ nachgebildet werden kann, die von Frequenz, Temperatur, Alterungszustand und evtl. weiteren Parametern abhängt, aber von der Feldstärke unabhängig ist. Im homogenen elektrischen Feld ist die Feldrichtung bekannt und daher muss das Impedanzverhalten senkrecht zum elektrischen Feld nicht beachtet werden. Die komplexe Kapazität \underline{C}_x der einzelnen Medien ergibt sich durch:

$$\underline{C}_x(\omega, \vartheta, \cdot) = \frac{\underline{\epsilon}_x(\omega, \vartheta, \cdot) \cdot \epsilon_0 \cdot A_x}{d_x} = \underline{\epsilon}_x(\omega, \vartheta, \cdot) \cdot C_{0_x} \quad (1)$$

- $\underline{C}_x(\omega, \vartheta, \cdot)$ komplexe Kapazität des Mediums x ,
- $\underline{\epsilon}_x(\omega, \vartheta, \cdot)$ komplexe Permittivität des Mediums x ,
- $\omega = 2\pi f$ Kreisfrequenz,
- ϑ Temperatur,
- ϵ_0 elektrische Feldkonstante,
- A_x Fläche des Mediums x ,
- d_x Länge des Mediums in Feldrichtung,
- C_{0_x} Vakuumkapazität des Mediums x .

Hierbei beinhaltet die komplexe Kapazität \underline{C}_x alle dielektrischen Eigenschaften und beschreibt das Verhalten eines Mediums im Frequenzbereich. Für neuwertige Öl-Papier-Isolationssysteme reichen in den meisten Fällen die Cole-Cole Funktion mit Leitfähigkeit aus (vgl. Gl. (6),(7)), um den komplexen Dielektrizitätsverlauf zu beschreiben [1]. Das gesamte Systemverhalten kann aus der Parallel- und Reihen-

schaltung der einzelnen komplexen Kapazität $\underline{C}_{M_x}(\omega, \vartheta, \dots)$ (siehe Bild 2b) ermittelt werden. Dadurch kann das Modell vereinfacht werden und wir erhalten folgende Darstellung:

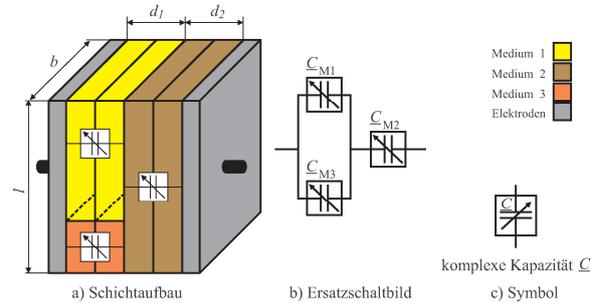


Bild 3 Vereinfachtes Isolationsschichtmodell im homogenen Feld

Die Gesamtkapazität des vereinfachten Isolationsschichtmodells beschreibt die folgende Gleichung:

$$\frac{1}{\underline{C}_{ges}} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot A} \left[\frac{d_{M_2}}{\underline{\epsilon}_{M_2}} + \frac{d_{M_1}}{k_{A_x} \cdot \underline{\epsilon}_{M_1} + (1 - k_{A_x}) \cdot \underline{\epsilon}_{M_3}} \right] \quad (2)$$

- d_{M_x} Summe der Schichtdicke des Mediums x ,
- $\underline{\epsilon}_{M_x}$ Permittivität des Mediums x ,
- k_{A_x} Flächenfaktor $k_{A_x} = A_{M_x} / A$ des Mediums x ,
- A Gesamtfläche Senkrecht zum elektrischen Feld,
- ϵ_0 elektrische Feldkonstante.

Der Flächenfaktor k_{A_x} berücksichtigt maximal zwei unterschiedliche Medien pro Schicht und es gilt

$$k_{A_1} = \frac{A_{M_1}}{A} = \left(1 - \frac{A_{M_3}}{A} \right) = (1 - k_{A_3}).$$

Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Isolationsschichtmodells sind geringe Oberflächeneffekte, isotrope Materialeigenschaften über die gesamte Einzelschicht und ein nahezu homogenes Feld, das Senkrecht zur Isolationsschicht steht. Außerdem darf die Feldstärke die Materialeigenschaften nicht verändern. Sollten diese Voraussetzungen nicht mehr erfüllt sein, muss das jeweilige Systemverhalten gesondert in das Modell einfließen. Multipliziert man (2) mit der Vakuumkapazität C_0 , dann erhält man die komplexe Dielektrizitätsfunktion $\underline{\epsilon}_{ges}$ des gesamten Isolationssystems:

$$\frac{1}{\underline{\epsilon}_{ges}} = \frac{C_0}{\underline{C}_{ges}} = \frac{1}{d} \left[\frac{d_{M_2}}{\underline{\epsilon}_{M_2}} + \frac{d_{M_1}}{k_{A_x} \cdot \underline{\epsilon}_{M_1} + (1 - k_{A_x}) \underline{\epsilon}_{M_3}} \right] \quad (3)$$

Mit dem Schichtdickenfaktor $k_{M_x} = d_{M_x}/d$ entsteht die gewichtete Dielektrizitätsfunktion

$$\frac{1}{\underline{\varepsilon}_{ges}} = \frac{C_0}{\underline{C}_{ges}} = \left[\frac{k_{M_2}}{\underline{\varepsilon}_{M_2}} + \frac{d_{M_1}}{k_{A_x} \cdot \underline{\varepsilon}_{M_1} + (1 - k_{A_x}) \underline{\varepsilon}_{M_3}} \right] \quad (4)$$

Untersuchungen im Labor an einfachen Öl-Papierschichten zeigten, dass bei verschiedenen Anordnungen der Schichten die Modellierung mit den Messergebnissen gut übereinstimmen.

1.2 Vereinfachtes Isolationsschichtmodell für Leistungstransformatoren

Bei realen Leistungstransformatoren werden zusätzlich angenommen, dass mindestens ein Ölkanal von der OS- zur US-Wicklung existiert. Der Grund kann Risse im Pressboard oder eine lange Ölstrecke zwischen OS- u. US-Wicklung am Rand des Streukanals sein.

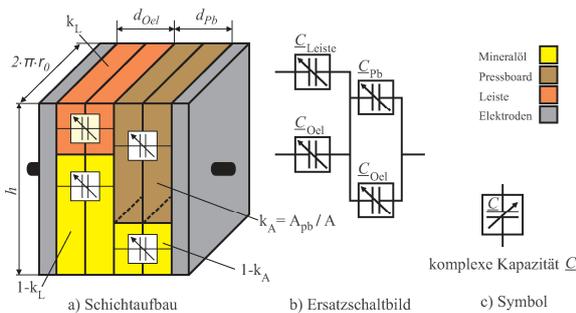


Bild 4 Schematischer Aufbau des Isolationsschichtmodells für Leistungstransformatoren

Analog zum Isolationsschichtmodell im homogenen Feld in Gl. (4) lautet die Dielektrizitätsfunktion des Streukanals im Leistungstransformator

$$\begin{aligned} \frac{1}{\underline{\varepsilon}_T(\omega, \vartheta, \cdot)} &= \frac{k_{\text{Öl}}}{k_L \cdot \underline{\varepsilon}_{Pb}(\omega, \vartheta, \cdot) + (1 - k_L) \cdot \underline{\varepsilon}_{\text{Öl}}(\omega, \vartheta, \cdot)} + \\ & \frac{1 - k_{\text{Öl}}}{k_A \cdot \underline{\varepsilon}_{Pb}(\omega, \vartheta, \cdot) + (1 - k_A) \cdot \underline{\varepsilon}_{\text{Öl}}(\omega, \vartheta, \cdot)} \quad (5) \\ &= \frac{C_0}{\underline{C}_T(\omega, \vartheta, \cdot)} \end{aligned}$$

mit der Dielektrizitätsfunktion vom Pressboard

$$\underline{\varepsilon}_{Pb}(\omega, \vartheta, \cdot) = \frac{\Delta \varepsilon(\vartheta, \cdot)}{1 + (j\omega\tau(\vartheta, \cdot))^n} - j \frac{\sigma_{Pb}(\vartheta, \cdot)}{\varepsilon_0 \cdot \omega} + \varepsilon_{Pb\infty} \quad (6)$$

und der Dielektrizitätsfunktion vom Öl

$$\underline{\varepsilon}_{\text{Öl}}(\omega, \vartheta, \cdot) = -j \frac{\sigma_{\text{Öl}}(\vartheta, \cdot)}{\varepsilon_0 \cdot \omega} + \varepsilon_{\text{Öl}\infty} \quad (7)$$

wobei die Temperaturabhängigkeit der Ölleitfähigkeit mit dem Arrhenius-Andrade-Ansatz [3]

$$\sigma_{\text{Öl}}(\vartheta) = \sigma_{\text{Öl}_0} \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R_m(\vartheta + 273,15)} \right)} \quad (8)$$

beschrieben wird. Die Parameter des Isolationsschichtmodells sind

$\underline{\varepsilon}_T$	Dielektrizitätsfunktion des Transformators,
$\underline{\varepsilon}_x$	Dielektrizitätsfunktion des Materials x ,
C_0	Vakuumkapazität des Transformators,
\underline{C}_T	Kapazität des Transformators,
A	Fläche Senkrecht zum elektrischen Feld,
d	Breite des Streukanals,
k_L	Leisten – Flächenfaktor ($k_L = A_L/A$),
$k_{\text{Öl}}$	Öl – Schichtdickenfaktor ($k_{\text{Öl}} = d_{\text{Öl}}/d$),
σ_x	spezifische Leitfähigkeit des Materials x ,
$\varepsilon_{x\infty}$	instantane Polarisation des Materials x ,
$\Delta \varepsilon$	Dielektrizitätsänderung der Pb – Relaxation,
τ	Relaxationszeitkonstante,
n	Exponent für die Relaxationsverteilung,
E_A	Aktivierungsenergie,
R_m	universelle Gaskonstante,
$\sigma_{\text{Öl}_0}$	temperaturunabhängige spezifische Leitfähigkeit.

In (8) ist die Temperaturabhängigkeit der Ölleitfähigkeit berücksichtigt, die mit der dynamischen Viskosität von Mineralölen in Beziehung steht. Die Viskosität nimmt mit steigender Temperatur und fallendem Druck ab. Es soll beachtet werden, dass (8) eine idealisierte Annäherung ist, die z. B. den Einfluss der Brownschen Molekularbewegung mit zunehmender Temperatur nicht berücksichtigt.

Aus Gleichung (5) ist ersichtlich, dass das Dielektrizitätsverhalten des Transformators von den folgenden vier wesentlichen Parametern abhängt:

- Geometrieparameter
 - Öl-Schichtdickenfaktor $k_{\text{Öl}}$
 - Flächenfaktor k_A
 - Vakuumkapazität C_0
- Materialparameter
 - Komplexe Dielektrizitätsfunktion der einzelnen Materialien $\underline{\varepsilon}_x$ (siehe Gl. (6),(7))

Die Faktoren $k_{\text{Öl}}$ und C_0 sind durch die Geometrie des Streukanals gegeben. Falls die Geometriedaten unbekannt sind, können zunächst die Leisten vernachlässigt werden ($k_L = 0$). Somit vereinfacht sich das Isolationsschichtmodell (siehe Bild 5) und (5) zu

$$\frac{C_0}{\underline{C}_T(\cdot)} = \frac{k_{\text{Öl}}}{\underline{\varepsilon}_{\text{Öl}}} + \frac{1 - k_{\text{Öl}}}{k_A \cdot \underline{\varepsilon}_{Pb}(\cdot) + (1 - k_A) \cdot \underline{\varepsilon}_{\text{Öl}}(\cdot)}$$

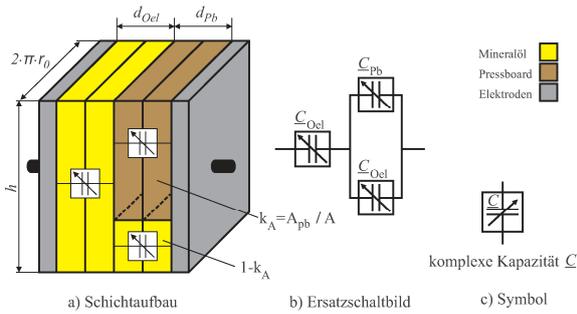


Bild 5 Schematischer Aufbau des Isolationsschichtmodells für Leistungstransformatoren ohne Leisten

Die Reduzierung der Materialparameter ermöglicht eine eindeutige Lösung für die restlichen Material- und Geometrieparameter. Die instantane Polarisation von Öl und Pressboard werden im Gegensatz zur spezifischen Leitfähigkeit durch Temperatur, Wassergehalt und Alterungsmechanismen nur geringfügig beeinflusst und kann somit als konstant angenommen werden. Die Bilder 5-8 zeigen beispielhaft den Einfluss der Geometriedaten und Materialeigenschaften des Streukanals auf den Dielektrizitätsverlauf. Die Leisten im Ölkanal werden zunächst vernachlässigt ($k_L = 0$), um den Einfluss der anderen wesentlichen Geometriedaten zu verdeutlichen. Die rote Referenzlinie in den Bildern 6-9 wurde mit (5) und $k_A = 0,995$, $k_{Ol} = 0,5$, $\sigma_{Ol} = 1 \text{ pS/m}$, $\sigma_{Pb} = 0,1 \text{ fS/m}$, $\varepsilon_{Ol\infty} = 2,1$, $\varepsilon_{Pb\infty} = 4$, $\Delta\varepsilon = 0$ und $\tau = 0 \text{ s}$ erzeugt. Der Flächenfaktor k_A beeinflusst den Verlauf des Imaginärteils der Dielektrizitätsfunktion im unteren Frequenzbereich, d. h. letztlich die Gesamtleitfähigkeit. Der Öl-Schichtdickenfaktor k_{Ol} verändert die Stärke des Relaxationsverhaltens und verschiebt die instantane Polarisation.

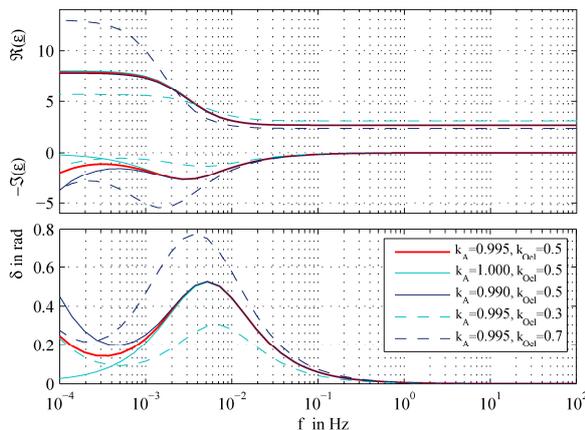


Bild 6 Einfluss der Geometrieparameter auf den Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion

Die materialspezifischen Eigenschaften beeinflussen ebenfalls den Kurvenverlauf (siehe Bild 7). Die größ-

te Veränderung verursacht die Ölleitfähigkeit σ_{Ol} , was durch die Frequenzverschiebung des Relaxationsverhaltens ersichtlich ist. Der Hauptgrund liegt in der Leitfähigkeitsdifferenz zwischen Pressboard und Öl, die zu einer Grenzflächenpolarisation führt. Die Veränderung der instantanen Polarisation des Pressboards $\varepsilon_{Pb\infty}$ verhält sich ähnlich wie der Öl-Schichtdickenfaktor k_{Ol} . Die Einflüsse durch die Pressboardleitfähigkeit σ_{Pb} und der instantanen Polarisation des Mineralöls $\varepsilon_{Ol\infty}$ sind zwar vorhanden, aber in der Auswirkung auf den Kurvenverlauf gering.

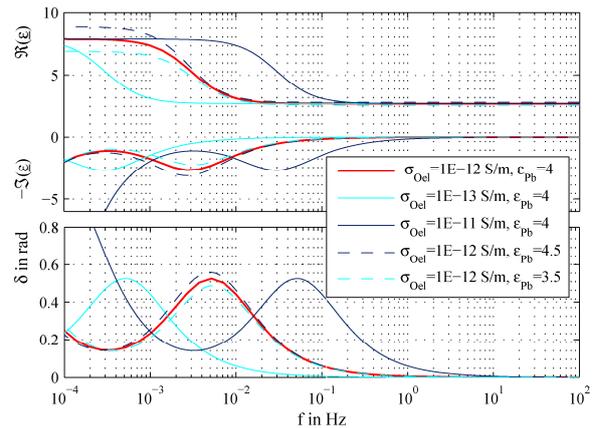


Bild 7 Einfluss der Materialparameter auf den Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion

In den Bildern 6-7 wurde der Einfluss der Geometrieparameter und der Materialparameter verdeutlicht. Dabei wurde angenommen, dass das Pressboard und Mineralöl kein Relaxationsverhalten haben. Experimentelle Messungen haben gezeigt, dass diese Annahme für Mineralöl zutrifft, aber für Pressboard ist diese Annahme nur eine grobe Modellierung der Realität. Wird die Materialeigenschaft des Pressboards um eine Relaxation erweitert, dann erhält der gesamte Verlauf ein zweites Relaxationsverhalten.

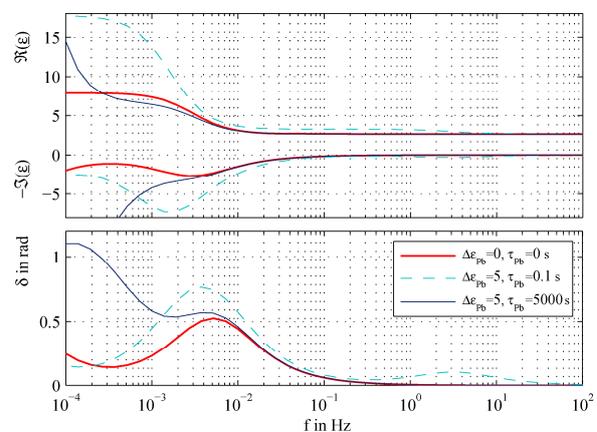


Bild 8 Einfluss des Relaxationsprozesses im Pressboard auf den Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion

Bild 8 zeigt den Einfluss von einer Relaxation, die dem Pressboard zugeordnet wurde, im Vergleich zum Verlauf der komplexen Dielektrizitätszahl ohne Relaxationsverhalten im Pressboard (roter Referenzverlauf). Eine Verbesserung des Modells wird durch die Berücksichtigung der Leisten im Ölkanal erreicht. Bild 9 zeigt den Einfluss der Leisten auf die komplexe Dielektrizitätsfunktion. Die gesamte instantane Polarisation und die Position der Relaxation werden durch die Leisten verändert. Dies kann aber auch durch das Öl-Schichtdickenfaktor und eine Veränderung der instantanen Polarisation von Pressboard oder Mineralöl erreicht werden. Dies hat zur Folge, dass bei unbekannter Geometrie keine eindeutige Lösung für die Materialcharakteristika existiert.

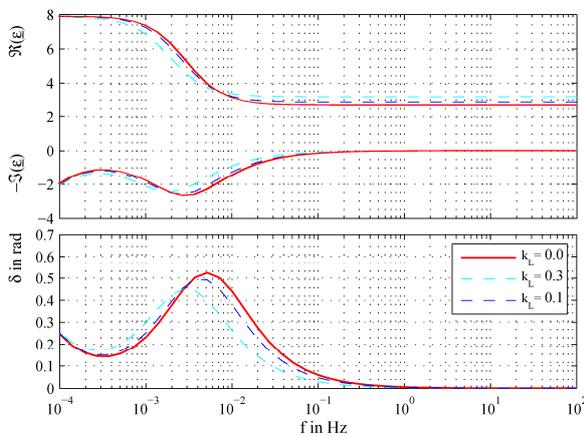


Bild 9 Einfluss der Leisten im Ölkanal auf den Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion

2 Anpassung der Parameter

Die entwickelten Modellgleichungen sind nur in wenigen Sonderfällen analytisch lösbar, da (5) ein komplexes nichtlineares Gleichungssystem darstellt, die mit standardisierten numerischen Verfahren nicht gelöst werden kann. Aus diesem Grund wird die gemessene komplexe Kapazität \underline{C}_T elementweise durch einen komplexen Term \underline{C}_B dividiert, um die sogenannte Bewertungsfunktion (\underline{B} -Funktion) [5] zu erhalten. Durch die komplexe Division sind alle komplexen Messinformationen von \underline{C}_T im Real- oder Imaginärteil der \underline{B} -Funktion enthalten. Mit der \underline{B} -Funktion kann das nichtlineare Gleichungssystem mit Hilfe von reellen numerischen Verfahren gelöst werden, indem im betrachteten Frequenzbereich die Gleichung

$$\Re \left\{ \frac{\underline{C}_T(\omega)}{C_0 \left[\frac{\sigma_B}{j\omega\epsilon_0} + \epsilon_B \right]} \right\} = \Re \left\{ \frac{\underline{C}_{Modell}(\omega)}{C_0 \left[\frac{\sigma_B}{j\omega\epsilon_0} + \epsilon_B \right]} \right\} \quad (9)$$

gelöst wird. Die Konvergenz des numerischen Verfahrens hängt zum einen vom Mengenbereich der einzelnen Parameter und zum anderen vom numerischen Verfahren ab. Um die Lösungsmenge zu verkleinern, kann der Wertebereich für die Materialeigenschaften mit Hilfe von definierten Messungen reduziert werden. In Tabelle 1 ist der eingegrenzte Wertebereich der jeweiligen Materialeigenschaft zusammengestellt. Weiterhin müssen $\epsilon_{\text{öl}\infty} = 2,1$ und $\sigma_{pb} = 0,1$ fS/m gewählt werden. Die Lösungen des hierfür verwendeten „Nonlinear Least-Squares-Curve Fitting Toolbox“ von MATLAB wurden auf Plausibilität und durch gezielte Testmessungen geprüft, in wie weit das Verfahren sinnvolle Ergebnisse liefert.

Tabelle 1 Wertebereich der Materialparameter

Parameter	Wertebereich	Einheit
$\sigma_{\text{öl}}$	0,1 – 100	pS/m
$\epsilon_{pb\infty}$	3 – 5	-

Die Genauigkeit der Anpassung kann mit dem maximalen Abweichungsfaktor nach (10) angegeben werden.

$$\max \left\{ \Re \left\{ \frac{\underline{C}_T(\omega)}{\underline{C}_{Modell}(\omega)} \right\} \right\} = \max \left\{ \Re \{ B(\omega) \} \right\} \quad (10)$$

3 Vergleichbarkeit des Modells mit FDS-Messungen

Das in Bild 4 vorgestellte Isolationsschichtmodell ist eine starke Vereinfachung der Realität. Trotzdem ist dieses Modell geeignet, um dielektrische Diagnose an Leistungstransformatoren durchzuführen, wenn die Geometriedaten des Transformators und dessen Isoliermaterialarten bekannt sind. Die Transformatorisolationen müssen durch (5) nachgebildet werden und auf dieser Weise können Frequenzgänge errechnet und durch „Kurven-Fitting“ mit einer FDS-Messung zur Deckung gebracht werden, um die am besten passenden Materialparameter zu ermitteln [4].

Das folgende Beispiel eines 190-MVA-Maschinentransformators (236/21 kV, Baujahr 1969) zeigt die Übereinstimmung des Isolationsschichtmodells mit einer FDS-Messung. Die Originalmessung am Maschinentransformator und das angepasste Transformatormodell zeigen eine gute Übereinstimmung mit einer maximalen prozentualen Abweichung von 0,53 % (siehe Bild 10). Der Verlauf der Bewertungsfunktion $\Re \{ B \}$ [5] zeigt die Genauigkeit der Anpassung an.

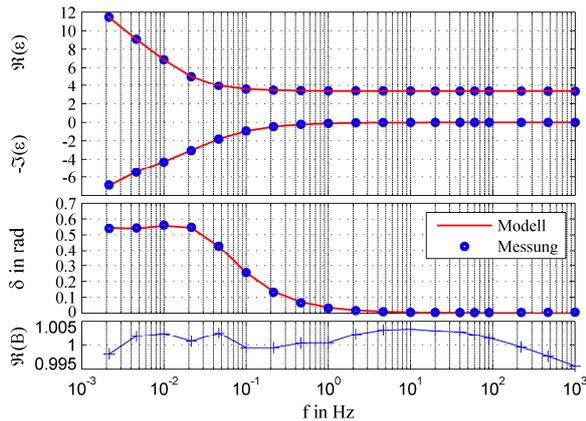


Bild 10 FDS-Messung eines Maschinentransformators und das simulierte Transformatormodell

Tabelle 2 Geometriedaten des Transformators

Parameter	Wert	Einheit
Leisten-Anzahl	40	Stück
Leistenbreite	25	mm
Radius US-Wicklung	684	mm
Radius OS-Wicklung	754	mm
Höhe US-Wicklung	1640	mm
Höhe OS-Wicklung	1590	mm
Summe Pressboard	42	mm
Summe Öl	28	mm

Mit einem $k_{\text{öl}} = 0,4$ wurde die Simulation durchgeführt und folgenden Materialparameter wurden durch „Kurven-Fitting“ ermittelt:

- Geometrieparameter
 - effektiver Flächenfaktor $k_A = 0,97$
 - Leistenfaktor $k_L = 0,18$
 - theoretische Leerkapazität $C_0 = 2,93$ nF
- Öl-Modellparameter
 - Öl-Leitfähigkeit $\sigma_{\text{öl}} = 6,80$ pS/m
- Pressboard-Modellparameter
 - instantane Polarisierung $\varepsilon_{p_{b\infty}} = 4,41$
 - Änderung der Pb-Relaxation $\Delta\varepsilon = 7,30$
 - Relaxationszeitverteilung $n = 0,65$
 - Zeitkonstante der Pb-Relaxation $\tau = 83,08$ s

Aus den Geometriedaten wurde ein Leistenfaktor k_L von 0,22 berechnet. Der ermittelte k_L von 0,18 liegt somit im tolerierbaren Rahmen. Ebenfalls aus den Geometriedaten wurde eine theoretische Leerkapazität von 2,81 nF berechnet. Für diese Berechnung wurden die Wicklungen als Zylinderkondensatoren betrachtet. Die leichte Erhöhung der Kapazität zum 2,93 nF können vernachlässigt werden, da die Randfelder und der Höhenunterschied der Wicklungen bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das entwickelte Isolationsschichtmodell basiert auf physikalischen Zusammenhängen, die mit der sogenannten Cole-Cole-Funktion kombiniert wurden. Die Cole-Cole-Funktion stellt einen Spezialfall der Havriliak-Negami-Funktion [6] dar und wird zur Beschreibung des dielektrischen Systemverhaltens der einzelnen Isoliermaterialien verwendet. Das Modell besteht aus vielen Annahmen und Annäherungen und ist nur für die komplexe Kapazitätsmessung im Frequenzbereich (FDS) geeignet. Die Annahme der symmetrischen Verteilung des Relaxationsverhaltens hat sich bei Materialmessungen oft bestätigt. Eine genauere Bestimmung der Verteilungsformen könnte jedoch die Auswertung und letztlich das Modell verbessern.

In zukünftigen Arbeiten werden das Feststoffverhalten hinsichtlich der Parameter Temperatur, Alterung, Wassergehalt und Säuregehalt näher untersucht. Die Anwendbarkeit des Isolationsschichtmodells zur Modellierung des dielektrischen Systemverhaltens vom Pressboard wird überprüft.

Die Anwendbarkeit des entwickelten Isolationsschichtmodells zur Zustandsdiagnose von Leistungstransformatoren muss durch weitere Messungen an möglichst zahlreichen Transformatoren überprüft werden. Um Diagnostik an Leistungstransformatoren durchführen zu können sind Referenzmessungen an einem neuen oder neuwertigen Transformator notwendig. Die Modellparameter können zur Kontrolle einer FDS-Messung verwendet werden.

5 Literatur

- [1] D. Giselbrecht, T. Leibfried – Modelling of oil-paper insulation layers in the frequency domain with Cole-Cole Functions. ISEI, Toronto, 2006
- [2] D. Giselbrecht – Mathematische Modellierung von Öl-Papier-Isolationssystemen im Frequenzbereich zur Diagnose von Leistungstransformatoren. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Karlsruhe (TH), 2008.
- [3] V. D. Houhanessian – Measurement and analysis of dielectric response in oil-paper insulation systems. PhD Dissertation, ETH no. 12832, Zürich, 1998.
- [4] A. Küchler – Hochspannungstechnik. Springer Verlag, 2005
- [5] D. Giselbrecht, T. Leibfried – Trend analysis of Power Transformers with FDS-measurements. ISH, Ljubljana, 2007
- [6] M. Beyer – Hochspannungstechnik. Springer Verlag, 1992