

Messungen und Modellierung von Öl-Papier-Isolationssystemen im Frequenz- und Zeitbereich

Dipl. Wi.-Ing. Dietmar Giselbrecht, Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried, Dipl.-Ing. Gernot Adamietz
Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe, Deutschland

Kurzfassung

Für die Zustandsdiagnose von Leistungstransformatoren mit Öl-Papier-Isolierung werden Messungen sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich durchgeführt. Verhält sich das Isolationssystem wie ein lineares und zeitinvariantes System, so sind die Messergebnisse im Zeit- und Frequenzbereich äquivalent.

Untersuchungen an Öl- und Papierproben zeigten hingegen, dass Öl-Papier-Isolationssysteme nur in einem begrenzten Bereich und bei bestimmten Messbedingungen (Feldstärke, Temperatur und Geometrie) ein lineares Verhalten ausweisen. Der Zustand des Isolationssystems bezüglich Materialqualität, Feuchtigkeitsgehalt und Alterungszustand beeinflusst ebenfalls das Messergebnis.

Für lineare Materialien kann ein Netzwerk aus parallelen oder seriellen RC-Gliedern verwendet werden. Ein lineares Netzwerk besteht aus der instantane Kapazität C_{HF} , dem Isolationswiderstand R_{∞} sowie den Polarisationsmechanismen, die mit einer Summe von RC-Gliedern nachgebildet werden. Bei nichtlinearen Materialien sind die Parameter des RC-Netzwerks nicht mehr konstant und zeigen eine Abhängigkeit der Messbedingungen. Ein weiterer Nachteil des RC-Netzwerks liegt in der hohen Anzahl von diskreten Relaxationskonstanten, die benötigt werden, um das Materialverhalten ausreichend genau im Frequenz- und Zeitbereich nachzubilden. Weiterhin beschreiben die diskreten Relaxationszeitkonstanten nur einen Teil der Polarisationsmechanismen, da das Material meistens eine Relaxationszeitverteilung besitzt.

In der dielektrischen Diagnostik wird versucht, aus dielektrischen Messungen im Frequenz- und Zeitbereich auf die Modellparameter zu schließen und somit den Zustand des Isolationssystems zu bestimmen. Aus diesem Grund wird es immer wichtiger geeignete Modelle zu entwickeln, die eine exaktere Diagnose ermöglichen.

In diesem Paper wird eine nichtlineare Modellierung mit Hilfe der Cole-Cole Funktion und einer approximierten Transformation im Zeitbereich vorgestellt sowie die Grenzen des Modells aufgezeigt.

1. Einleitung

Elektrische Betriebsmittel und Anlagen werden für eine lange Lebensdauer konzipiert und über einen längeren Zeitraum betrieben. Der Ausfall solcher Anlagen, kann einen großen wirtschaftlichen Schaden darstellen und die Betriebsicherheit gefährden.

Es kann der Fall eintreten, dass die Anlagen schon vor ihrem vorgesehenen Austausch ausfallen und es zu einer Versorgungsunterbrechung kommt.

Vor diesem Hintergrund kommt der Diagnostik und Beurteilung dieser Betriebsmittel eine immer größere Bedeutung zu. Durch geeignete Diagnosemethoden können Ausfälle oder der Abbau von noch intakten Anlagen verhindert werden. Die Diagnostik kann somit helfen den Betriebszustand der Anlagen zu beurteilen, die Betriebssicherheit abzuschätzen und die Lebensdauer der Anlagen zeitlich voll auszunutzen. Das Potential zur Kostenersparnis, durch geeignete Diagnosemethoden, ist enorm und kann nicht vernachlässigt werden.

Um geeignete Aussagen über den Zustand eines Betriebsmittels treffen zu können, ist eine möglichst detaillierte Vorstellung vom Aufbau des Innenlebens und den Auswirkungen verschiedener Einflüsse auf das Betriebsmittel nötig.

Von besonderem Interesse ist hier die Isolierung eines Transformators zwischen der Oberspannungs- und Unterspannungswicklung. Erfüllt die Isolierung nicht mehr die notwendigen Anforderungen, so kann es zum Durchschlagen und damit zur Zerstörung des Transformators kommen. Modelle des Isolationssystems können hierbei helfen den Isolationszustand zu beurteilen und Einflüsse, wie zum Beispiel des Wassergehalts, auf die Isolationsfähigkeit festzustellen. Modelle werden mit Hilfe von Messungen an Betriebsmitteln erstellt. Als Beispiel sei hier die FDA-Messung genannt, bei der Strom, Spannung und die Phasenverschiebung bei unterschiedlichen Frequenzen erfasst wird. Das Messergebnis alleine liefert schon eine gewisse Möglichkeit zur Interpretation der Qualität der Isolation. Jedoch, einen detaillierten Einblick liefert erst das Modell.

Am Modell können Veränderungen und Einflüsse direkt und gezielt den Parametern zugeordnet werden. Dann ist es auch möglich, zu beurteilen, wie sich diese Parameter verändern, wie z.B. in Bezug auf die der Abnahme der Isolationsfähigkeit.

2. Theorie und Modelle

2.1. RC-Netzwerke

Bei der Modellierung mit RC-Netzwerken geht man zunächst von einer Parallelschaltung eines idealen Widerstandes und einer idealen Kapazität aus. Hier stellt C_A die Kapazität dar, die sofort nach anlegen des elektrischen Feldes E vorhanden ist. Der Widerstand R_A ist die Leitfähigkeit des Isolationsmaterials. Die einzelnen Polarisationsmechanismen können durch weitere RC-Reihenschaltungen berücksichtigt werden. Dazu werden die RC-Reihenschaltungen parallel zur Kapazität C_A und Widerstand R_A geschaltet.

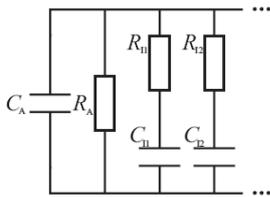


Bild 1: RC-Modell höherer Ordnung

Jede zusätzliche RC-Schaltung, die parallel dem RC-Netzwerk hinzugefügt wird, verfeinert das Modell und bringt es näher an die reale Messung. Die Werte der einzelnen RC-Elemente können durch eine Sprungantwortmessung im Zeitbereich oder im Frequenzbereich ermittelt werden [6],[9].

2.2. Debye-Modell

Eine dem RC-Netzwerk sehr ähnliche Möglichkeit zur Modellierung ist die Formel nach Debye. Das Modell von Debye bewegt sich im Frequenzbereich. Mit der Debye-Funktion wird im speziellen das Verhalten der komplexen Dielektrizitätszahl $\underline{\epsilon}$ über der Frequenz nachgebildet.

Die Debye-Funktion welche die frequenzabhängige dielektrische komplexe Permittivität ausdrückt lautet [2], [7]:

$$\underline{\epsilon}(\omega) = \epsilon' - j\epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)} + \epsilon_\infty \quad \text{und} \quad (1)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

Die Debye-Funktion wurde für einen Werkstoff mit einer Zeitkonstante abgeleitet. Die Zeitkonstante τ bezeichnet hierbei den Ort an dem der Imaginärteil des Funktionsverlaufs ein Minimum und der Realteil einen Wendepunkt hat. Der Verlauf des Imaginärteils ist dabei symmetrisch, um den Frequenzpunkt $\omega=2\pi/\tau$ angeordnet [2]. Wird die Debye-Funktion mit Real- und Imaginärteil über die Frequenz aufgetragen, so ergibt sich der folgende Verlauf:

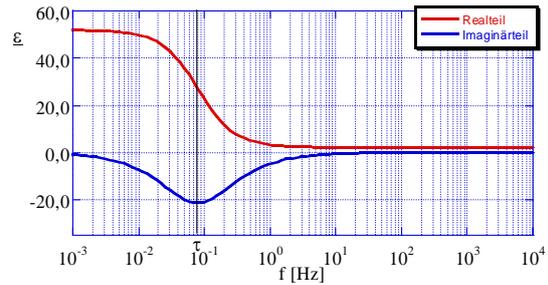


Bild 2: Komplexe Debye-Funktion über der Frequenz

Der Nachteil der Debye-Funktion (1) und RC-Netzwerken ist, dass sie für eine Zeitkonstante ausgelegt ist. Bei mehreren Zeitkonstanten ist eine Summe von Debye-Funktionen nötig. Ähnlich dem RC-Netzwerk kann dies allerdings zu einer unübersichtlichen Darstellung führen. Abhilfe schafft hier der Übergang von einer Zeitkonstanten zu einer Zeitkonstantenverteilung.

2.3. Modell mit Zeitkonstantenverteilung

Ein Medium mit einer Zeitkonstante, z.B. für die Orientierungspolarisation, ist ein sehr reines und homogenes Medium. In einem Medium welches aus Molekülen besteht, die sich nur in geringem Maße unterscheiden, werden die Zeitkonstanten nur wenig voneinander abweichen. Es handelt sich dann nicht mehr, um einzelne klar trennbare Zeitkonstanten, sondern die Zeitkonstanten verschwimmen aufgrund ihrer Nähe zueinander. Statt einzelner diskreter Zeitkonstanten ergibt sich eine Verteilung von Zeitkonstanten.

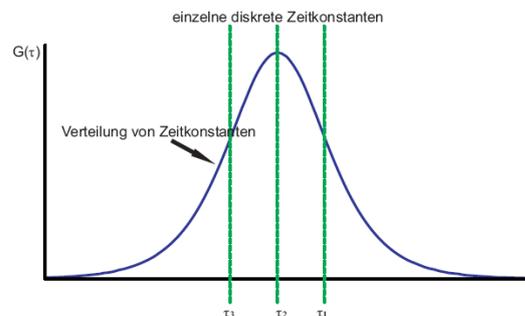


Bild 3: Diskrete und verteilte Zeitkonstanten

Einzelne Zeitkonstanten sind hier nicht mehr zu identifizieren. Das Debye-Modell kann durch eine Summation der Grundformel (1) auf mehrere diskrete Zeitkonstanten erweitert werden. Bei Medien mit sehr vielen polarisierbaren Gruppen ist jedoch sehr schnell die Grenze des Debye-Modells erreicht. Bei unterschiedlichen Verhalten wird das Modell schnell unüberschaubar. Um dies zu verhindern wird bei τ von einer Zeitkonstantenverteilung ausgegangen und $G(\tau)$ eingesetzt [8]. Für $G(\tau)$ gilt:

$$\int_0^{\infty} G(\tau) \cdot d\tau = 1 \quad (2)$$

Die Debye-Funktion (1) ändert sich dahingehend, dass in das Integral der Verteilungsfunktion (2) die Debye-Funktion zusätzlich eingesetzt wird.

Die Verteilungsfunktion $G(\tau)$ hängt von vielen Parametern ab, die alle einzeln nur schwer theoretisch bestimmbar sind [8].

Die **Cole-Cole-Funktion mit Leitfähigkeit** geht von einer symmetrischen Zeitkonstantenverteilung $G(\tau)$ aus. Erweitert man die Funktion mit der Leitfähigkeit σ und weiteren symmetrischen Zeitkonstantenverteilungen erhält man folgende Funktion [4], [5]:

$$\underline{\varepsilon}(\omega, T) = -j \underbrace{\left(\frac{\sigma(\tau)}{\varepsilon_0 \omega} \right)}_{\text{Leitfähigkeit}} + \varepsilon_\infty + \underbrace{\frac{\Delta \varepsilon_\alpha(T)}{1 + (j\omega \tau_\alpha(T))^{n_\alpha}}}_{\alpha\text{-Relaxation } G(\tau)} + \dots \quad (3)$$

Parameter:	
σ :	$0 \leq \sigma$; Leitfähigkeit [S/m]
ε_∞	$0 \leq \varepsilon_\infty$; Dielektrizitätskonst. für $\omega \rightarrow \infty$ (Grundpolarisation, instantane Polarisation)
ω	$= 2 \cdot \pi f$; Kreisfrequenz
T	Temperatur in °C
α -Relaxation:	
n_α	$0 < n_\alpha \leq 1$;
$\Delta \varepsilon_\alpha$	$0 \leq \Delta \varepsilon_\alpha$; α -Dielektrizitätsänderung
τ_α	$0 \leq \tau_\alpha$; α -Relaxationszeit [s]

Der Vorteil dieser Funktion liegt in der genaueren Zuordnung der Zeitkonstantenverteilung zur jeweiligen Relaxation und die Berücksichtigung der Leitfähigkeit. Des Weiteren wird die Anzahl der Modellparameter zum Vergleich zur RC-Netzwerke in den meisten Fällen geringer.

2.4. Bestimmung der Funktionsparameter

Ein wesentliches Problem bei der Approximation von Messdaten ist die Bestimmung der Funktionsparameter. Aus diesem Grund wird kurz eine Methode vorgestellt, die die Funktionsparameter mit Hilfe der Bewertungsfunktion und eines PCs generiert. Das Prinzip der Bewertungsfunktion $B(\omega)$ ist eine komplexe Division einer Messung durch eine Modellfunktion.

$$\underline{B}(\omega) = \frac{\underline{C}^{(\omega)}_{\text{Messung}}}{\underline{C}^{(\omega)}_{\text{Modell}}} = \frac{\underline{C}^{(\omega)}_{\text{Modell}} = \underline{C}^{(\omega)}_{\text{Messung}}}{1 + j\omega + \underline{z}_{\text{Störung}}} \quad (4)$$

Durch die komplexe Division im kompletten Frequenzbereich wird eine Separierung der einzelnen Modellparameter vorgenommen. Dabei gibt die Bewertungsfunktion Veränderungsfaktoren an. Im Bereich tiefer Frequenzen erhält man die Leitfähigkeitsfaktoren. Der Dielektrizitätsfaktor für die instantane Polarisation ist im Bereich hoher Frequenzen dominant. Der Frequenzbereich dazwischen wird vom Polarisationsverhalten und seiner Zeitkonstanten beeinflusst. Das folgende Bild 4 veranschaulicht das

Separationsverhalten der Bewertungsfunktion im Frequenzbereich von 0,1 mHz bis 4kHz.

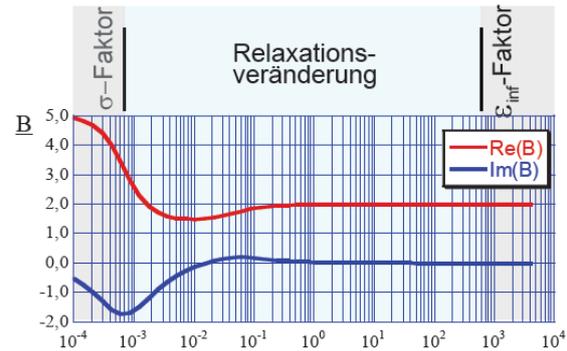


Bild 4: Bewertungsfunktionsverlauf bei der die Grundpolarisation und die Leitfähigkeit vom Modell abweichen.

Das Verfahren zur Approximation mit der Bewertungsfunktion kann in einem Programm realisiert werden. Da alle Modellinformationen im Imaginärteil oder im Realteil der komplexen Bewertungsfunktion vorhanden sind, können die Modellparameter mit der Least-Square Methode approximiert werden. So kann die Approximation von Messungen von einem Computer übernommen werden, der nur den Imaginärteil annähert (Bild 5).

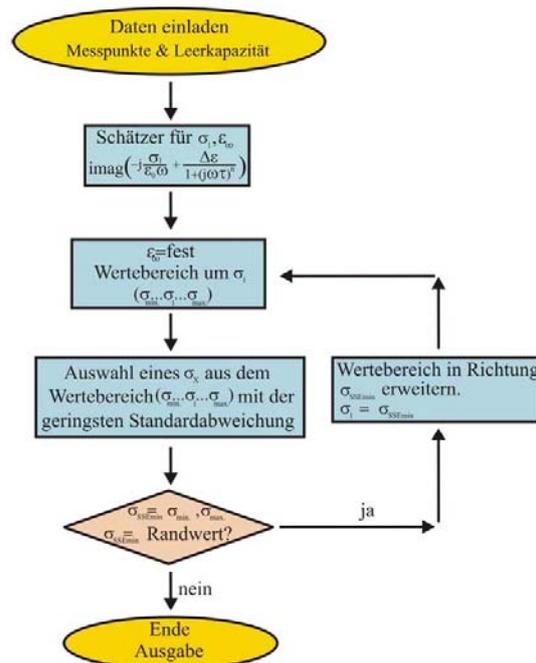


Bild 5: Ablaufdiagramm des Approximationsverfahrens mit einem PC

Zunächst müssen vom Benutzer die Messdaten und eine Referenzkapazität (z. B. C_{50}) eingegeben werden. Daraus berechnet das Programm den Verlauf der Dielektrizitätszahl. Danach folgt eine erste Schätzung für die Leitfähigkeit σ [S/m], außerdem wird der Wert der Grundpolarisation ε_∞ festgelegt. Die Grundpolarisation wird durch eine Mittelwertbildung aus den ersten Messwerten im höheren Frequenzbereich ermittelt. Die Schätzung für die erste Leitfähigkeit σ_1 dient

einer Bestimmung für den Wertebereich ($\sigma_{min} < \sigma_1 < \sigma_{max}$), indem sich die Leitfähigkeit σ befindet. Die Größe des Wertebereichs wird vom Benutzer definiert.

Mit den diskreten Leitfähigkeiten in diesem Wertebereich wird die Messung approximiert. Dabei wird mit der Least-Square Methode der Imaginärteil der Bewertungsfunktion zur Parameterbestimmung verwendet. Das wiederholt das Programm solange, bis das Minimum der quadratischen Abweichungssumme bei unterschiedlichen Leitfähigkeiten gefunden wird. Schließlich wird die Leitfähigkeit ausgewählt deren Approximationsergebnis die geringste Summe quadratischer Abweichungen hat. Bevor diese Leitfähigkeit allerdings übernommen werden kann, muss geprüft werden, ob es sich um einen Randwert handelt und mit welcher Abweichung das Modell die Messung nachbildet.

2.5. Transformation

Um Messergebnisse aus dem Frequenz- und Zeitbereich miteinander zu vergleichen, gibt es verschiedene Transformationen. Hier werden kurz die Transformationen vom Frequenzbereich in den Zeitbereich vorgestellt, damit die FDA-Messung mit den PDC-Messungen verglichen werden können. Das folgende Bild 6 zeigt ein paar Möglichkeiten:

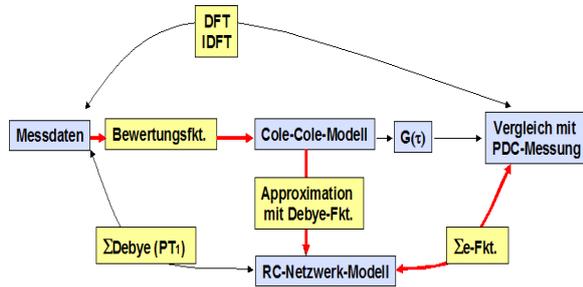


Bild 6: Transformationen vom Frequenzbereich in den Zeitbereich

Die Ansätze können dabei in indirekte Transformation mit Hilfe von Modellen und direkte Transformationen eingeteilt werden. Die direkten Transformationen, zu denen auch die diskrete Fouriertransformation (DFT) gehört, berechnen direkt aus den Messwerten im Frequenzbereich die Werte im Zeitbereich [3]. Die indirekten Transformationen, enthalten ein Modell als Zwischenschritt. Ein Beispiel dafür ist die Approximation mit der Cole-Cole-Funktion und der Umwandlung zur Debye-Funktion nach Zaengl [10]. Der Weg ist im Bild 6 mit rote und dicke Pfeile markiert.

Der Vorteil des Zwischenschritts mit der Cole-Cole-Funktion (3) liegt darin, dass hier eine Einteilung in α - und β -Relaxation gemacht wird. Die einzelnen Verhalten sind also klar zuzuordnen. Formel (3) liefert zudem einen Ansatz, in dem die Zeitkonstanten τ der verschiedenen Debye-Funktionen zu suchen sind. Konkret werden zur Annäherung der Cole-Cole-Funktion die α - und β -Relaxation durch jeweils ein RC-Netzwerk höherer Ordnung modelliert:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{\alpha}}{1 + (j\omega \tau_{\alpha})^{n_{\alpha}}} = \frac{\Delta \varepsilon_{\alpha H}}{1 + (j\omega \tau_{\alpha H})} + \frac{\Delta \varepsilon_{\alpha N}}{1 + (j\omega \tau_{\alpha N})} + \dots \quad (5)$$

α -Relaxation

Durch wie viele RC-Elemente die Anpassung erfolgt, hängt im Wesentlichen von den Exponenten n_{α} und n_{β} der Relaxationen ab. In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass um so weiter der Exponent von $n = 1$ abweicht, um so mehr Elemente benötigt werden. Als Richtwert gilt:

- $n_{\alpha, \beta} \in [0.95 - 1] \rightarrow 1$ RC-Glied
- $n_{\alpha, \beta} \in [0.85 - 0.95] \rightarrow 3$ RC-Glieder
- $n_{\alpha, \beta} \in [0.70 - 0.85] \rightarrow 5$ RC-Glieder

Da man bei einem Exponenten von $n_{\alpha, \beta} = [0.95-1]$ ein RC-Glied verwendet, wird der Exponent auf $n=1$ aufgerundet und die restlichen Werte werden gerade so übernommen. Die Cole-Cole-Funktion (3) wird also direkt in eine Debye-Funktion (1) übersetzt.

Für die Approximation durch die RC-Glieder empfiehlt es sich, eine ungerade Zahl an RC-Gliedern bzw. Debye-Funktionen zu verwenden.

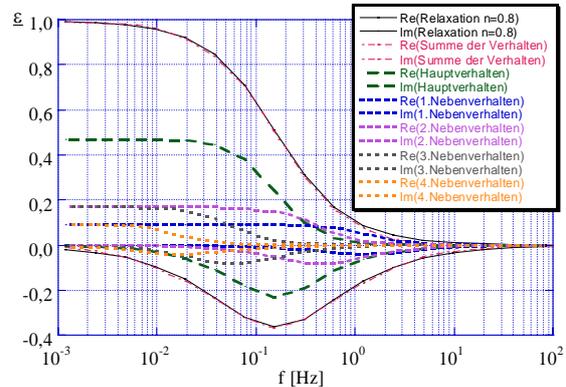


Bild 7: Approximation einer α -Relaxation durch Debye-Funktionen (Haupt- und 4 Nebenverhalten)

Das erste RC-Glied sollte dabei dieselbe Relaxationszeit, wie das zu approximierende Relaxationsverhalten, haben. Es bildet das Hauptverhalten. Die restlichen RC-Elemente werden dann symmetrisch zum Hauptverhalten als Nebenverhalten angeordnet. In Bild 7 ist ein Beispiel einer Relaxation mit einem Exponenten $n = 0.8$ dargestellt. Die Relaxation wird durch ein Hauptverhalten und vier Nebenverhalten nachgebildet. Wie im Bild 7 zu sehen ist, ist zwischen den Frequenzen 1 Hz und 100 Hz eine leichte Abweichung zu erkennen. Die Anpassung jedoch ist insgesamt sehr genau.

Der Grund warum die Cole-Cole Funktion in Debye-Funktionen übersetzt werden, liegt darin, dass die Haupt- und Nebenverhalten einfacher in den Zeitbereich transformiert werden können, als die nichtlinearen α - und β -Relaxationen mit ihren Zeitverteilungen. Für das Debye-Verhalten kann die einfache Transformation verwendet werden [3].

$$\frac{\Delta \varepsilon}{1 + (j\omega \tau)} \bullet \circ \frac{\Delta \varepsilon}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (6)$$

Für die Darstellung der Ergebnisse im Zeitbereich wird folgende Formel verwendet [10]:

$$i_{pol}(t) = U_0 \cdot C_0 \left[\frac{\sigma}{\epsilon_0} + \epsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (7)$$

$$\text{mit } f(t) = \frac{\Delta \epsilon_H}{\tau_H} e^{-t/\tau_H} + \frac{\Delta \epsilon_N}{\tau_N} e^{-t/\tau_N} + \dots$$

Die aus der Approximation ermittelten Modellparameter (3) wie z. B. die Leitfähigkeit σ , Dielektrizitätszahl ϵ_∞ können in die Funktion (7) direkt eingesetzt werden. Die Funktion $f(t)$ wird durch die Summe der in den Zeitbereich transformierten Haupt- und Nebenverhalten der α - und β -Relaxationen aufgestellt.

3. Messungen und Modell

3.1. Leistungstransformatoren

Ein Leistungstransformator (Trafo1) wurde mit der Cole-Cole Funktion (3) angenähert. Das folgende Bild zeigt die Messpunkte, Modellverlauf und die Gütefunktion:

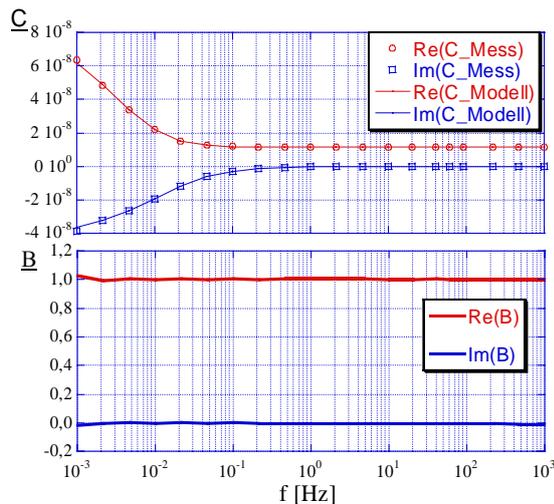


Bild 8: Messung, Modell und Gütefunktion eines Leistungstransformator 500MW (245kV / 21kV)

Trafo 1 konnte mit zwei Relaxationsverteilung sehr gut angenähert werden, da die Gütefunktion $\underline{B}(\omega) = 1 + j0 + \underline{z}_{Störung}$ ergibt. Die Modellfunktion für den Leistungstransformator (Trafo 1) lautet:

$$\underline{\epsilon}(\omega) = -j \frac{9,43E-14}{\epsilon_0 \omega} + 1 + \frac{3,1}{1 + (j\omega 78,5)^{0,99}} + \frac{2,0}{1 + (j\omega 19,9)^{0,95}}$$

α -Relaxation β -Relaxation

Als Referenzkapazität wurde die Grundkapazität verwendet: $C_{Ref} = 11417 \text{ pF} \approx C_{50}$.

Der zweite Leistungstransformator (Trafo 2) zeigt eine Abweichung in der Gütefunktion, die auf weiteren Relaxationsverhalten hinweisen. Ob die dritte

Relaxationsverteilung vernachlässigt werden kann, hängt von der jeweiligen Zustandsdiagnose ab.

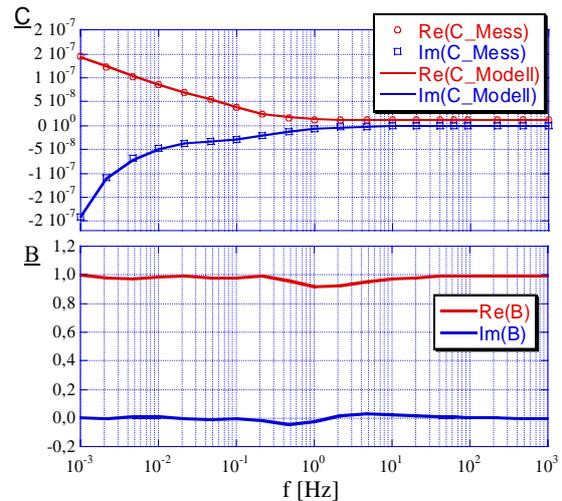


Bild 9: Messung, Modell und Gütefunktion eines Leistungstransformator 600MW (400kV / 30kV).

Die Modellfunktion mit der Referenzkapazität $C_{Ref} = 11193 \text{ pF} \approx C_{50}$ für den Leistungstransformator (Trafo 2) lautet:

$$\underline{\epsilon}(\omega) = -j \frac{8,0E-13}{\epsilon_0 \omega} + 1 + \frac{10,7}{1 + (j\omega 54,5)^{0,68}} + \frac{4,1}{1 + (j\omega 1,7)^{0,90}}$$

α -Relaxation β -Relaxation

Der Trafo 1 mit den $n_{\alpha,\beta} > 0,95$ kann theoretisch mit der Formel (6) und (7) einfach in den Zeitbereich umgewandelt werden. Bei Trafo 2 muss zuerst die Zeitverteilung angenähert werden. Wie weit die theoretische Transformation vom Frequenzbereich in den Zeitbereich mit der realen Messung am Transformator übereinstimmt muss noch genauer untersucht werden.

3.2. Öl- und Papier-Isolationsmaterial

Nicht nur die Messungen am Leistungstransformator können mit dem Modell (3) und dem Approximationsverfahren (Bild 5) angenähert werden, sondern auch einzelne Isolationsmaterialien wie z.B. Isolieröl, Papier oder Pressboard bei unterschiedlichen Materialzuständen. In der Veröffentlichung [4] wurde die Messung an einem neuwertigen Isolieröl und öl-imprägniertem Papier bei unterschiedlicher Temperatur durchgeführt. Es hat sich zeigt, dass je nach Material die Leitfähigkeit, die Relaxationsparameter und die instantane Polarisation sich ändern.

Bei Messung am neuwertigen trockenen (5ppm) und feuchten (18ppm) Shell-Diala-D mit einer Temperatur von 60°C haben die Modellparameter folgendes ergeben [1]:

- Das Verhältnis von $\Delta \epsilon / \tau^2$ ist beim trockenen und feuchten Isolieröl sehr klein. Das bedeutet, dass die α - und β -Relaxationen für eine einfache Betrachtung vernachlässigt werden können.

- Die größte Veränderung zwischen trockenem und feuchtem Isolieröl liegt in der Leitfähigkeit.

Bei Messung am trockenen (0,87%) und feuchten (3,21%) ölprägnierten Papier mit einer Messtemperatur von 60°C wurde folgendes festgestellt:

- Das Verhältnis von $\Delta\varepsilon/\tau^2$ ist beim trockenen Papier klein. Das bedeutet, dass die α - β -Relaxationen für eine einfache Betrachtung vernachlässigt werden können. Jedoch ist das Verhältnis von $\Delta\varepsilon/\tau^2$ beim feuchten Papier sehr groß. In diesem Fall, kann die α - und β -Relaxationen nicht vernachlässigt werden.
- Die Leitfähigkeit vom feuchten Papier ist gegenüber dem trockenen Papier größer.

Es hat sich bei verschiedenen Leistungstransformator-, Papier- und Öl-Messungen gezeigt, dass eine Übereinstimmung zwischen Modell (3) und Messung vorhanden ist.

Die Bewertungsfunktion hat an praktischen Messungen bewiesen, dass sie geeignet ist, die Modellparameter zu identifizieren. Vor allem die Zunahme des Imaginärteils, also der Leitfähigkeit, ist sehr gut zu erfassen.

Ein Problem ist, wenn die Leitfähigkeit sehr klein wird. In diesem Fall muss mit kleineren Frequenzen gearbeitet werden, was vor allem die Messgenauigkeit verschlechtert.

4. Zusammenfassung

Die Variation der Cole-Cole-Funktion mit Leitfähigkeit (3) hat gezeigt, dass sie eine sehr praktische Möglichkeit darstellt, um realistische Modelle von Öl- und Papier-Isolationssystemen zu liefern. Ihr Vorteil liegt in der Übersichtlichkeit und Aufbauvariation. Sie kann bei Bedarf, um beliebig viele Relaxationsverhalten erweitert werden. In der Regel kommt man mit zwei Relaxationen aus. Veränderungen in Papier- oder Ölisolationsmaterialien, wie z. B. eine Zunahme der Leitfähigkeit, können bei der Untersuchung des Materials den einzelnen Parametern der Modellfunktion (3) direkt zugeordnet werden.

Die Bewertungsfunktion (4) erwies sich als eine vorteilhafte Approximationsmethode gegenüber einer optischen Betrachtung. Durch ihre Korrekturfaktoren ist es einfach den Bereich der gesuchten Modellparameter stark einzuschränken. Vor allem aber, konnte diese Methode automatisiert und in Form eines Programms realisiert werden. Mit dem Programm war es möglich die Parameter für die Modellfunktion zu ermitteln. Eine Approximation einer Messung mit dem PC dauert wenige Sekunden. Die Bewertungsfunktion erwies sich aber auch außerordentlich nützlich bei der Beurteilung und Diagnose von Isolationsmaterialien. So können mit ihr Veränderungen im

Material und Lesitungstransformatoren, welche durch Zustandsänderung des Materials hervorgerufen werden, sichtbar gemacht werden. Dabei kann festgestellt werden, in welchem Ausmaß die Modellparameter sich verändern. Eine weitere Einsatzmöglichkeit der Bewertungsfunktion, ist die Kontrolle von Frequenzmessungen. Mit der Bewertungsfunktion kann festgestellt werden, ob es sich bei einer Frequenzmessung, um eine Fehlmessung handelt.

Für die Zukunft werden noch weitere Untersuchungen bezüglich des genauen Einfluss des Wassergehalts und der Alterung auf die Isolationsmaterialien gemacht. Des Weiteren sollte versucht werden, das Verfahren der Bewertungsfunktion bei Messungen mit unterschiedlicher Temperatur einzusetzen. Ein Ziel dabei wäre, einen Zusammenhang zu finden, um Messungen bei unterschiedlicher Temperatur vergleichen zu können. Damit könnten Messungen an realen Transformatoren, die bei unterschiedlichen Temperaturen gemacht wurden, besser bewertet werden.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Adamietz, Gernot: *Impedanzmessungen am Öl-Papier-Dielektrikum*. Studienarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Karlsruhe, 2005.
- [2] Debye, P.: *Polar Molecules*. Dover Publications, Inc., 1929.
- [3] Föllinger, Otto: *Laplace-, Fourier- und z-Transformation*. Hüting Verlag Heidelberg, 2000.
- [4] Giselbrecht, D., Leibfried, T.: *Modelling of Oil-Paper Insulation Layers in the Frequency Domain with Cole-Cole-Functions*. ISEI (IEEE), Toronto, 06/2006.
- [5] Havriliak, S. Negami: *A Complex Plane Representation of Dielectric*.
- [6] Küchler, Andreas: *Hochspannungstechnik*. ISBN 3-540-21411-9. Springer Verlag, 2005.
- [7] Macdonald, J. R.: *Impedance Spectroscopy*; J. Wiley & Sons, New York, 1987; ISBN 0-471-83122-0.
- [8] Pabst, Jürgen: *Komplexe Dielektrizitätszahl von Polymeren in starken elektrischen Feldern untersucht am Beispiel des ataktischen Polystyrols und des Polyurethans*. Doktorarbeit, Fachbereich Chemie der Universität Kaiserslautern, 1978.
- [9] Vahe Der Houhanessian: *Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation System*; Ph. Dissertation, ETH No. 12832, Zurich, 1998.
- [10] Zaengl, Walter S.: *Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations*.