



**Institut für Elektroenergiesysteme
und Hochspannungstechnik**
Universität Karlsruhe (TH)



ETG – Fachtagung

„Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen“

8-9 März 2005 in Hanau

Thema: „Impedanzmessungen am trockenen und feuchten Öl-Papier-
Isoliersystem“

Inhaltsverzeichnis

1. Versuchsaufbau und Messablauf	3
1.1. Versuchsaufbau	3
1.2. Messablauf und -genauigkeit	4
2. Systemidentifikation und Modellbildung	4
2.1. Modellbildung	5
2.2. Identifikation des Öl-Systems	5
2.3. Identifikation des Papier-Systems	7
3. Zusammenfassung	8
4. Literaturverzeichnis	8

Impedanzmessungen am trockenen und feuchten Öl-Papier-Isoliersystem

Dipl. Wi.-Ing. Dietmar Giselbrecht, Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe, Deutschland

Kurzfassung

Impedanzmessungen ermöglichen Aussagen über Materialeigenschaften, welche wiederum mit den elektrischen Eigenschaften verknüpft sind. Ändern sich die elektrischen Eigenschaften durch chemische Reaktionen so können qualitative und quantitative Aussagen mit Hilfe der Impedanzmessung erfolgen.

Moderne Impedanzanalysatoren bieten die Möglichkeit, die frequenzabhängige Leitfähigkeit und Dielektrizitätsfunktion $\epsilon_r(\omega)$ einer Probe im Frequenzbereich von einigen mHz bis zu einigen MHz zu bestimmen. Impedanzspektroskopische Messungen sind vergleichsweise einfach durchzuführen und liefern sehr präzise Ergebnisse über große Leitfähigkeits- und Kapazitätsbereiche. Bei Öl-Papier-Isoliersystemen können Rückschlüsse auf die Beweglichkeit von Ionen und Molekülen sowie Transportmechanismen gezogen werden.

Es hat sich durch die Impedanzmessungen an trockenen und feuchten Öl-Papier-Isoliersystemen gezeigt, dass die Dielektrizitätsfunktion $\epsilon_r(\omega, T, F_{\text{Öl}}, F_{\text{PB}})$ sehr komplex ist und neben einer Frequenzabhängigkeit einer Abhängigkeit von der Temperatur T und vom Feuchtigkeitsgehalt F des Öls und Papiers aufweist. Die Änderung der Dielektrizitätszahl wird zum einen durch Polarisationsprozesse im Inneren des Isoliersystems und zum anderen durch Schichtenbildung an den Grenzflächen zwischen Öl und Papier hervorgerufen.

Bei unpolarem Material werden unter der Wirkung eines elektrischen Feldes die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen gegeneinander verschoben und somit elektrische Dipolmomente induziert. Diese Verschiebungspolarisation tritt bei hohen Frequenzen auf. Im Gegensatz dazu tritt bei polaren Molekülen die Orientierungspolarisation ein, die je nach Dipolmoment nur bei niedrigen Frequenzen die Kapazität ändert, da die Dipole nur einem langsam veränderlichen elektrischen Feld folgen können.

An den Grenzflächen zwischen Öl und Papier kommt es in einem elektrischen Feld zur „starren“ oder „diffusen“ Schichtbildung, die ebenfalls die Kapazität und die Leitfähigkeit beeinflussen. Eine Beschreibung der Messergebnisse ist komplex und kann bisher nur zum Teil mit theoretischen Modellen nachgebildet werden. Aus diesem Grund wird versucht, das theoretische Modell mit experimentell gemessenen Daten zu ergänzen, um so komplexe Vorgänge von Isoliersystemen genauer beschreiben zu können. In dieser Untersuchung werden einige Erfahrungen und Messergebnisse der Impedanzmessung an den trockenen und feuchten Öl-Papier-Isoliersystemen aufgezeigt sowie Modellierungsformen vorgestellt.

1. Versuchsaufbau und Messablauf

1.1. Versuchsaufbau

Folgender Messaufbau wurde für die Messungen verwendet:

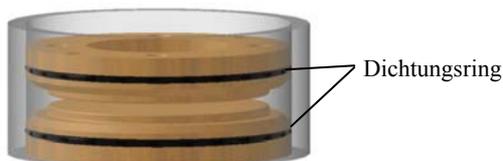


Abbildung 1 Glaszylinder mit Elektroden

Der Aufbau besteht aus einem Glaszylinder mit einem Innendurchmesser von 132 mm. In diesem Glaszylinder befinden sich zwei Elektroden.

Der hervorgehobene Teil der Elektroden hat einen Durchmesser von jeweils $110^{\pm 0.1}$ mm. Der Abstand

der Platten wurde bei der Messung von reinem Isolieröl mit Abstandhaltern von 0,15mm eingestellt. Bei Messungen mit Zellulose wurde der gegebene Papierabstand verwendet (0,14mm). Der Dichtungsring dient dazu, die Feuchtigkeit im Innenraum des Messkondensators konstant zu halten. Der untere Metallring quetscht beim Anschrauben den Dichtungsring gegen die Glaswand. Die Verwendung des Glaszylinders war notwendig, da bei der Verwendung von Kunststoff die Feuchtigkeit des Isolieröls bei sonst konstanten Bedingungen nicht konstant war. Weiterhin wurde ein Temperatursensor an der Elektrode befestigt, um auch Versuche mit unterschiedlichen Temperaturen im Klimaschrank durchzuführen.

Die Befüllung des Aufbaus mit Isolieröl erfolgte durch eine Befüllungsbohrung am Rand der oberen Elektrode, die mit einer Schraube abgedichtet ist. Feste Stoffe (beispielsweise das Isolierpapier) müssen vorher eingebracht werden.

1.2. Messablauf und -genauigkeit

Für alle Messungen wurde der Alpha-A High Resolution Dielectric / Impedance Analyzer der Firma Novocontrol Technologies verwendet. Dieses Gerät legt eine Spannung von 0.2V-2V mit einer bestimmten Frequenz an ein zu messendes Objekt an und misst den Strom und die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Der Messbereich des Gerätes bezüglich der Impedanz beträgt 10^{-2} - 10^{14} Ohm. Der Messbereich der Kapazität beträgt 10^{-15} - 1Farad [1]. Der verwendete Aufbau des Messkondensators war so ausgelegt, das er innerhalb des Arbeitsbereichs des Analyzers lag.

Der in Kapitel 1.1 beschriebene Aufbau wurde im Zweipol-Betrieb gemessen. Aus der angelegten Spannung bei einer bestimmten Frequenz f berechnet das Gerät nach folgender Formel die parallele komplexe Kapazität C_p [1]:

$$C_p = -i \cdot \frac{I}{\omega \cdot U} \quad \text{mit } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (\text{Gl.: 1})$$

Den Wert für die komplexe Dielektrizitätszahl $\underline{\epsilon}_r$ errechnet sich aus der Division der komplexen parallelen Kapazität mit der theoretischen Vakuumkapazität des Aufbaus:

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon' - i \cdot \epsilon'' = \frac{\frac{1}{N} \sum_i C_p}{C_0} \quad (\text{Gl.: 2a})$$

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon' - i \cdot \epsilon'' = \frac{\frac{1}{N} \sum_i C_{pi}}{\frac{1}{N} \sum_i C_{Stickstoff, i}} \quad (\text{Gl.: 2b})$$

C_0 könnte prinzipiell sich aus der Geometrie des Kondensators errechnet werden. Da der Aufbau beispielsweise durch die Zuleitungen der Messleitungen sowie durch Streukapazitäten (systematische Fehler) eine Messungenauigkeit beinhaltet, wurde zu jeder Veränderung der Geometrie für eine neue Messreihe eine Messung mit Stickstoff durchgeführt. Durch die Division der gemittelten komplexen Stickstoffkapazität von 10 Messungen wurde die Leerkapazität für die Messanordnung bestimmt (vgl. Gl.:2b), um so systematische Fehler zu eliminieren.

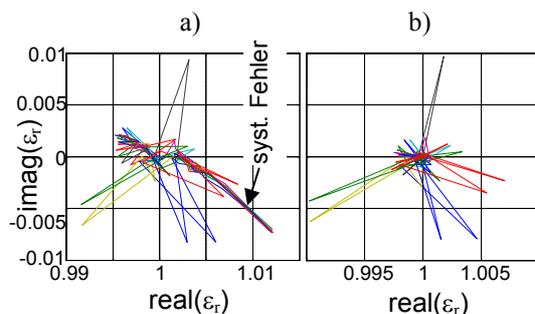


Abbildung 2 Messabweichung mit (a) und ohne (b) systematischen Fehler

Die Abbildung 2 zeigt die Messabweichung von 5 Messreihen zur berechneten Vakuumkapazität (Abb. 2.3a, Gl.:2a) und die Abweichung von 5 Messreihen zur gemittelten komplexen Stickstoffkapazität (Abb. 2.3b, Gl.:2b).

Eine Messreihe wurde immer wie folgt aufgenommen:

Nachdem der Messkondensator mit einem Dielektrikum gefüllt wurde, wurde zunächst eine sehr lange Stabilisierungszeit (10h-24h) durchlaufen. Gerade bei der Messung mit dem Isolierpapier fanden noch Ausgleichsvorgänge nach 20h statt. Danach wurden 10 Messungen aufgenommen, wobei die Frequenz immer von 40kHz bis 10mHz und teilweise 1mHz durchlaufen wurde.

Bei den Messreihen mit unterschiedlichen Temperaturen wurde jeweils nach einer Messreihe eine andere Temperatur eingestellt und dann nach einer Stabilisierungspause erneut 10 Messungen gemessen. Dabei wurden die Temperaturen 10°C, 30°C, 50°C und 70°C eingestellt.

Bei der späteren Auswertung der Messreihen wurde immer der Mittelwert der 10 Messungen verwendet, um so die Störeinflüsse zu reduzieren.

Eine Hauptanforderung an den Aufbau war es, die Feuchtigkeit konstant zu halten, da sie einen deutlichen Einfluss auf die Messergebnisse hat.

Als trockenes Öl wurde Shell Diala D mit ca. 4-8ppm Wassergehalt verwendet und vor und nach der Messung die Feuchtigkeit jeweils mit Hilfe der Karl-Fischer-Titration bestimmt.

Bei Verwendung von Isolierpapier als Dielektrikum wurde der Feuchtigkeitsgehalt jeweils vor und nach einer kompletten Messreihe durch die Ausheizmethode mit anschließender Titration nach VDE0370 Teil 20 bestimmt, um Aussagen über den Anstieg der Feuchtigkeit des Papiers im Messkondensator zu bekommen.

2. Systemidentifikation und Modellbildung

Bei der Impedanzspektroskopie werden die relevanten Daten aus der frequenzabhängigen Impedanz und der zugehörigen Phasenverschiebung gewonnen. Deswegen ist bei dieser Messtechnik für die Identifikation entscheidend, über welchen Frequenzbereich gemessen wird. Theoretisch erhält man am meisten Informationen, wenn das ausgewählte Frequenzspektrum maximal ist. Bei dem eingesetzten Gerät (Novocontrol) befindet sich der nominelle Frequenzbereich von 1μHz bis 20MHz. Messungen im niedrigen Frequenzbereich dauern extrem lange und die meisten Systeme befinden sich nicht in einem stationären Zustand während der gesamten notwendigen Messzeit. Dies hat zur Folge, dass der Arbeitspunkt sich mit der Zeit verschiebt und das System nicht mehr zeitinvariant ist. Aus diesem Grund wurden die Messungen maximal bis 1mHz durchgeführt.

Bei höheren Frequenzen ist der Messbereich durch Induktivitäten in den Messleitungen begrenzt. Durch Optimierung des Messaufbaus mit kurzen und abgeschirmten Kabeln lässt sich die obere Grenzfrequenz auf ca. 1MHz erhöhen [2].

Bei den folgenden Messungen wurde in den meisten Fällen ein Messbereich von 10mHz bis 40kHz gewählt, um das Öl- und Papiersystem mit physikalischen und elektrochemischen Methoden zu identifizieren.

2.1. Modellbildung

Zur Beschreibung des dielektrischen Verhaltens von Öl- und Papiersysteme wurde der Ansatz von Cole und Cole (1941) für dielektrische Systeme gewählt [1], [2]. Die allgemeine Dielektrizitätsfunktion (DF) lautet:

$$\underline{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^\alpha} \quad (\text{Gl.: 3})$$

mit Kreisfrequenz $\omega=2\pi f$ der Dielektrizitätskonstante ϵ_∞ für $\omega \rightarrow \infty$ und ϵ_s für $\omega \rightarrow 0$ und der diskreten Relaxationszeit τ_0 . Gleichung 3 beschreibt vor allem das Frequenzverhalten von festen und flüssigen Dielektrika mit einer geringen Leitfähigkeit. Mit $\alpha=1$ stellt die DF einen idealen Halbkreis mit dem Mittelpunkt auf der reellen Achse (sog. Debye-Relaxation) dar. Aufgrund von inhomogener Verteilung der Stoffkonzentrationen und der Temperatur über den Grenzflächen existieren lokal unterschiedliche Kapazitäten und Leitwerte. Dies führt dazu, dass die gemessenen Impedanzverläufe vom idealen Halbkreis-Verlauf abweichen. Typischerweise sind die gemessenen Halbkreise flacher und der Mittelpunkt liegt unterhalb der reellen Achse [2]. Mit dem Parameter $0 \leq \alpha \leq 1$ kann die symmetrische Veränderung des Halbkreises nachgebildet werden.

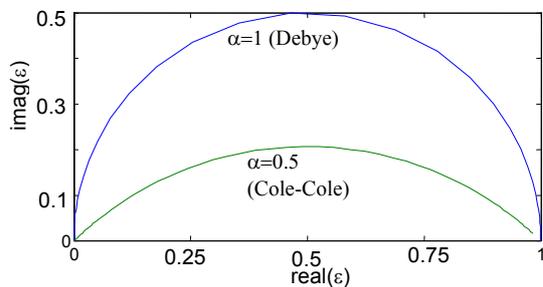


Abbildung 3 Ortskurve der Cole-Cole Formel mit unterschiedlichen Parametereinstellungen von α

Dieser Modellansatz bietet jedoch keine direkte physikalische Interpretationsmöglichkeit. Dennoch ist die DF für die Voridentifikation von Impedanzmessdaten nützlich, wenn kein physikalisches Modell verfügbar ist.

In diesem Paper wurde hauptsächlich die Cole-Cole-Funktion (Gl.: 3) verwendet.

Der Einfluss der Leitfähigkeit wurde erst bei den Impedanzmessungen ab Temperatur von 70°C und in Frequenzbereich unter 10mHz bemerkbar.

2.2. Identifikation des Öl-Systems

Eine komplexe Dielektrizitätsfunktion (DF) für Öl (Shell Diala D) mit einem Wassergehalt von ca. 6ppm ist in Abbildung 4 dargestellt im Frequenzbereich von 10mHz-40kHz. Die Dielektrizitätsfunktion $\epsilon_r(\omega)$ ist rein reell mit einem konstanten Realteil im Frequenzbereich von 4Hz-40kHz. Bei Frequenzen unterhalb von 4Hz wird die DF komplex.

Wird angenommen, dass das Öl-System ein lineares, zeitinvariantes, kausales und stabiles System (im Zeitraum der Messung) ist, dann kann der Basisverlauf der DF im gemessenen Frequenzbereich wie folgt beschrieben werden:

$$\underline{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_0} = 2,11 + \frac{83 - 2,11}{1 + j\omega \cdot 114s}$$

ϵ_∞ rührt von der ionischen und elektronischen Polarisierbarkeit her. Dabei wird der Wert als konstant angesehen und mit der maximalen Frequenz gleichgesetzt, d. h. $\epsilon_\infty = \epsilon_r(\omega_{max})$. ϵ_s ist die statische Dielektrizitätskonstante, die die Antwort des Systems auf ein statisches elektrisches Feld beschreibt. Die charakteristische Rückkehrzeit τ_0 und ϵ_s wurden durch Annäherung der Modellfunktion an die gemessenen Daten ermittelt.

Die Abbildung 4 zeigt den gemessenen und modellierten Verlauf der DF. Anschaulich kann das Modell als eine Übertragungsfunktion angesehen werden, dass die Kapazitätsänderung vom Vakuum aus beschreibt. In diesem Fall kann das Übertragungsverhalten im Frequenzbereich als eine Addition eines K-Glieds und PT₁-Glieds identifiziert werden.

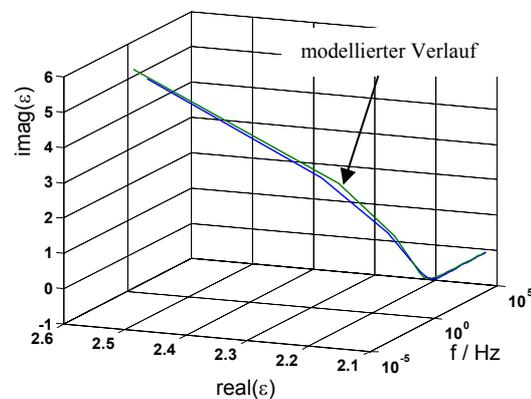


Abbildung 4 Dielektrizitätsfunktion $\epsilon_r(\omega)$ für Öl mit 6ppm Wassergehalt bei 20°C und modellierten Verlauf

Um den Einfluss der Feuchtigkeit zu ermitteln, wurde ein Öl mit ca. 35ppm verwendet und die gleiche Messung mit dem identischen Aufbau durchgeführt.

Mit der Annahme, dass die **Feuchtigkeit im Öl** eine multiplikative Änderung der Kapazität zum trockenen Öl bewirkt, wurde die DF wie folgt unterteilt:

$$\underline{\varepsilon}_r(\omega) = \underline{\varepsilon}_{\text{feuchte}}(\omega) \cdot \underline{\varepsilon}_{\text{trockenesÖl}}(\omega) \quad (\text{Gl.: 4})$$

Hierbei ist $\underline{\varepsilon}_{\text{feuchte}}(\omega)$ die komplexe Übertragungsfunktion für die Feuchtigkeitsänderung zum trockenen Öl, die durch dividieren der gemessenen komplexen Kapazität $\underline{C}_{\text{feuchtesÖl}}$ und $\underline{C}_{\text{trockenesÖl}}$ bestimmt wird:

$$\underline{\varepsilon}_{\text{feuchte}}(\omega) = \frac{\underline{C}_{\text{feuchtesÖl}}(\omega)}{\underline{C}_{\text{trockenesÖl}}(\omega)} \quad (\text{Gl.: 5})$$

$\underline{\varepsilon}_{\text{trockenesÖl}}(\omega)$ entspricht der komplexe DF ausgehend von der Stickstoffkapazität. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass das Frequenzverhalten der Übertragungsfunktion $\underline{\varepsilon}_{\text{feuchte}}(\omega)$ einen typischen Debye-Verlauf aufweist (Abbildung 5) mit $\varepsilon_\infty = \varepsilon_r(\omega_{\text{max}}) = 1$, $\varepsilon_s = 6,4$ und $\tau = 1,6s$

Dies kann damit begründet werden, dass im Wesentlichen nur die Feuchtigkeit die Dielektrizitätszahl ändert und das homogene Öl-System mit einer charakteristischen Relaxationszeit τ beschrieben wird. Der Debye-Modell Fall mit einer konstanten Relaxationszeit ist eine idealisierte Darstellung. Um das mikroskopische Verhalten mit verschiedenen Relaxationszeiten zu modellieren, kann eine Verteilung der Relaxationszeiten $g(\tau)$ herangezogen werden[2].

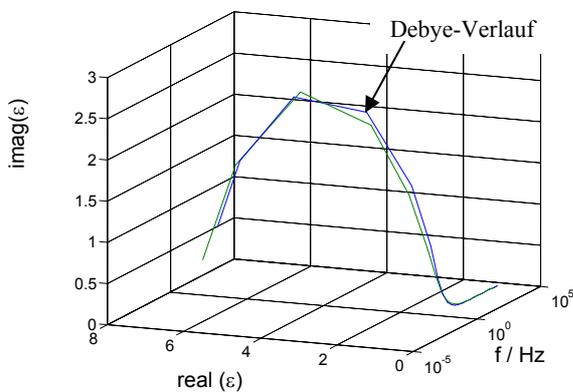
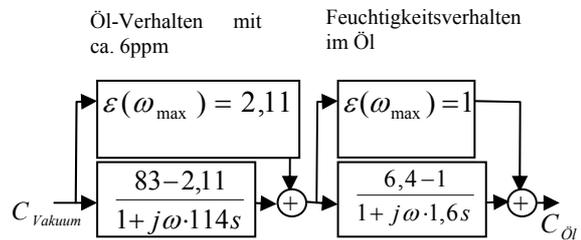


Abbildung 5 Übertragungsfunktion $\underline{\varepsilon}_{\text{feuchte}}$ bei 20°C vom Öl mit 6ppm zum Öl mit 35ppm und mit modellierter Debye – Verlauf

Zusammenfassend konnte für das beschriebene Öl-System die folgende Übertragungsfunktion identifiziert werden:



Die bisherige Dielektrizitätsfunktion wurde für eine konstante Temperatur $T=20^\circ\text{C}$ beschrieben. Die Abhängigkeit der Öl-Temperatur T ist in Abbildung 6 dargestellt. Es ist auffällig, dass bei Frequenzen über 10Hz die DF konstant zwischen 2,1 und 2,2 liegt und eine sehr geringe Korrelation mit der Temperatur T aufweist. Bei Frequenzen unterhalb von 10Hz ist eine starke Temperaturabhängigkeit festzustellen.

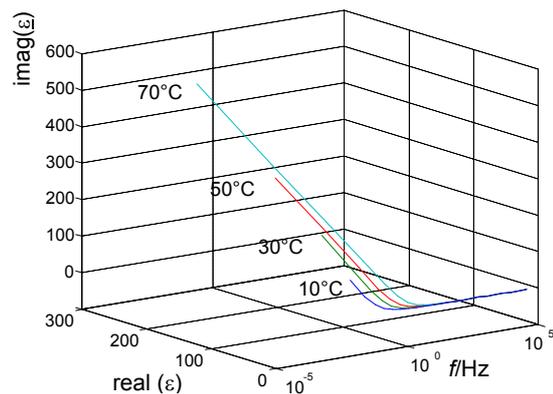


Abbildung 6 Dielektrizitätsfunktion $\underline{\varepsilon}_{\text{Öl}}(\omega)$ bei 10°C, 30°C, 50°C und 70°C und bei einer konstanten Öl-Feuchte von 17ppm

Die Änderung der Dielektrizitätszahl wird zum einen durch Polarisationsprozesse im Inneren des Öl-Systems und zum anderen durch Schichtenbildung an den Grenzflächen zwischen Öl und Elektrode hervorgerufen. Die Schichtenbildung beeinflusst vor allem die statische Dielektrizitätskonstante ε_s . Bei polaren Molekülen tritt die Orientierungspolarisation ein, die je nach Dipolmoment bei niedrigen Frequenzen die Kapazität ändert, da die Dipole nur einem langsam veränderten elektrischen Feld folgen können [3]. Bei steigender Temperatur wird die Viskosität des Öls geringer und die Kapazität steigt bei etwas höheren Frequenzen an, da der Drehwiderstand der Dipole kleiner wird.

Die Abhängigkeit für polare Dipolmomente ist bei der Übertragungsfunktion $\underline{\varepsilon}_{\text{feuchte}}(\omega)$ ebenfalls zu erkennen (Abbildung 7).

Bei hohen Frequenzen werden durch die Wirkung eines elektrischen Feldes die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen gegeneinander verschoben und somit elektrische Dipolmomente induziert. Diese Verschiebungspolarisation ist nur gering von der Temperatur abhängig, d.h. $\epsilon_{\infty} = \epsilon(\omega_{\max})$ ist konstant bei Temperaturen zwischen 10 und 70°C.

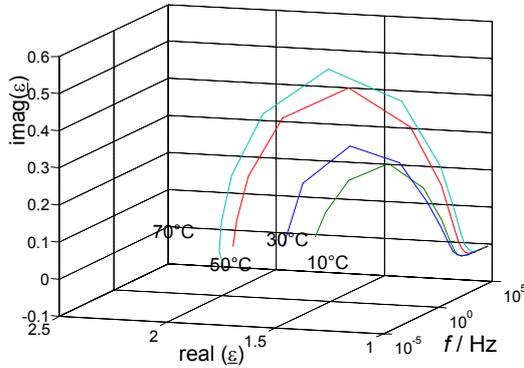


Abbildung 7 Übertragungsfunktion $\epsilon_{\text{feuchte}}$ bei 10°C, 30°C, 50°C und 70°C vom Öl mit 17ppm zum Öl mit 69ppm

Mit der Gleichung 3 war es möglich das frequenzabhängige dielektrische Verhalten von unterschiedlichen Temperaturen und Feuchtigkeiten mit einer ausreichenden Genauigkeit nachzubilden. Bei der Identifikation der Messdaten, muss beachtet werden, dass das **ÖL – Verhalten** mit einem trockenen Öl beschrieben wird, damit eine eindeutige Trennung zwischen **ÖL- und Feuchtigkeitsverhalten** möglich ist. Die Schwierigkeit liegt darin, die Feuchtigkeit vom Öl sehr klein (<8ppm) und über dem Messzeitraum konstant zu halten.

2.3. Identifikation des Papier-Systems

Für die Versuche wurde ein glattes Isolierpapier von Siemens nach DIN VDE 0311-35 verwendet, dass in Transformatoren verarbeitet wird. Vor der Messung wurde das Isolierpapier getrocknet und mit Shell-Diala D imprägniert. Die Papierfeuchtigkeit vor der Messung wurde nach VDE 0370 Teil 20 bestimmt und betrug bei einer Ausheiztemperatur von 130°C / 0,3% und bei einer Ausheiztemperatur von 200°C / 0,46%. Nach der Messung konnte keine wesentliche Feuchtigkeitsänderung festgestellt werden. Die Abbildung 8 zeigt den typischen Impedanzverlauf von hochwertigen ölprägnierten Papierisoliervstoffen. Im Frequenzbereich von 1Hz bis 1MHz liegt der Betrag der Dielektrizitätskonstanten zwischen 2,9 und 3. Bei Frequenzen unterhalb von 1Hz ver-

größern sich der Real- und der Imaginärteil der DF.

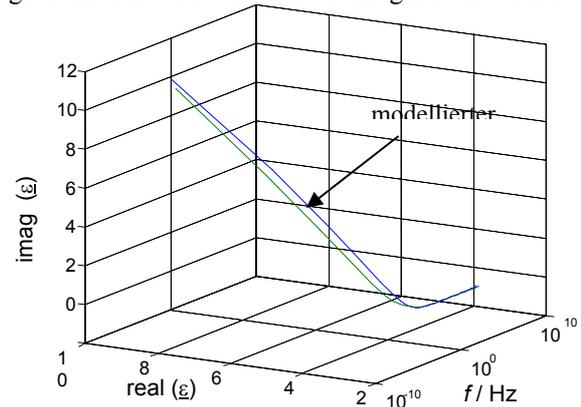


Abbildung 8 Dielektrizitätsfunktion $\epsilon_{\text{trocken}}(\omega)$ bei 20°C von Isolierpapier mit 0,3% Wassergehalt

Der Basisverlauf konnte mit der Gleichung 3 mit den folgenden Daten

$$\epsilon_r(\omega) = 2,92 + \frac{94 - 2,92}{1 + (j\omega \cdot 18000)^{0,75}}$$

nachgebildet werden.

Wie in der Abbildung 8 zu erkennen ist, läuft die modellierte Kurve etwas parallel zur gemessenen Kurve des Isolierpapiers.

Es weist daraufhin, dass eine zweite Relaxationszeit τ_2 das Papiersystem beeinflusst. Für die weitere Betrachtung wird von einer Relaxationszeit ausgegangen, da die Veränderungen durch Temperatur und Feuchte größer sind.

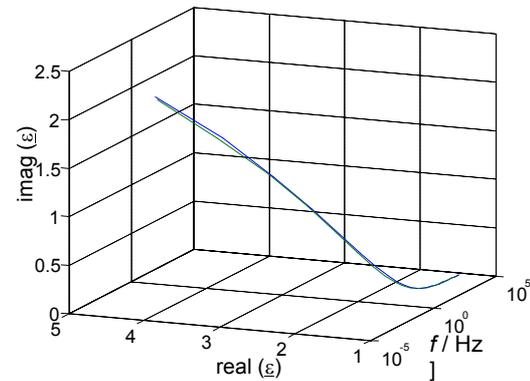
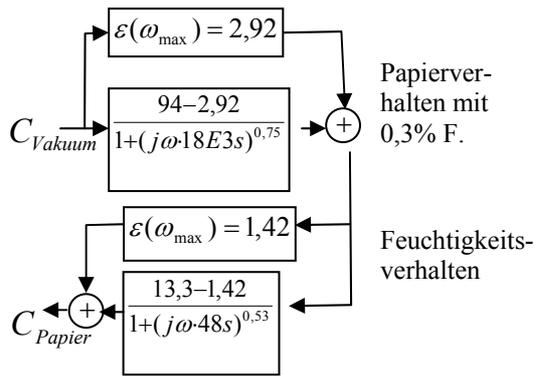


Abbildung 9 Übergangsfunktion $\epsilon_{\text{feuchte}}(\omega)$ bei 20°C vom Papier mit 4,1% Wassergehalt und mit modellierter Cole-Cole-Verlauf

Um das Feuchtigkeitsverhalten nachzubilden, wurde die Cole-Cole Gleichung (siehe Gl.: 3) verwendet, da die DF kein typisches Debye-Verhalten zeigt. Die identifizierten Parameter können der folgenden Darstellung entnommen werden.



Der Abstand wird durch Papiertoleranzen und Einbautoleranzen beeinflusst und verursacht eine Dielektrizitätsabweichung von ca. $\pm 0,2$. Die Einflüsse von unterschiedlichen Temperaturen auf ein trockenes Papier (0,3%) wurden im Frequenzbereich von 10mHz bis 40kHz gemessen.

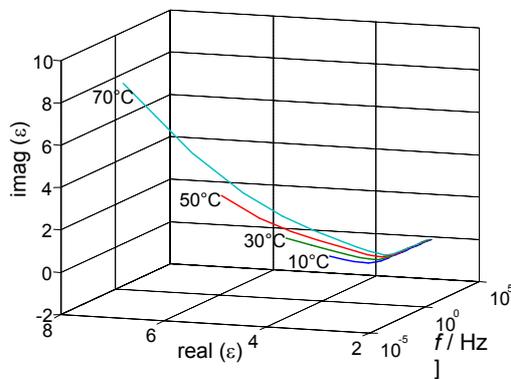


Abbildung 10 Dielektrizitätsfunktion $\epsilon_{\text{Papier}}(\omega)$ bei 10°C, 30°C, 50°C und 70°C und bei einer konstanten Wassergehalt von 0,3%

Wie im Öl-System ist die stärkste Temperaturabhängigkeit ebenfalls im unteren Frequenzbereich ($< 10\text{Hz}</math>).$

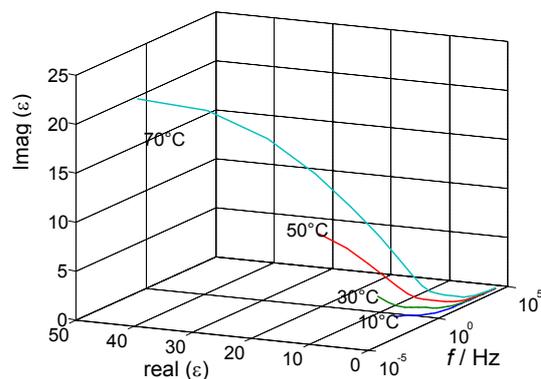


Abbildung 11 Übertragungsfunktion $\epsilon_{\text{feuchte}}(\omega)$ bei 10°C, 30°C, 50°C und 70°C vom Papier mit 0,3% zum Papier mit einem Wassergehalt von 4,1%

An der Übertragungsfunktion für die Feuchtigkeit ist der Einfluss der Temperatur wesentlich stärker als beim Öl-System. Wie in der Abbildung 11 zu erkennen ist, ist die Dielektrizitätszahl $\epsilon(10\text{mHz}, 10^\circ\text{C}) \approx 4$ und bei $\epsilon(10\text{mHz}, 70^\circ\text{C}) \approx 40$. Dies

hat zur Folge, dass die Temperatur für die Feuchtigkeitbestimmung durch dielektrische Messungen nicht vernachlässigt werden kann.

3. Zusammenfassung

Bei allen Abbildungen wurde deutlich, dass das Öl- und Papiersystem bei kleinen Frequenzen die größte Veränderung bezüglich der Feuchtigkeit und Temperatur aufweist. Im Frequenzbereich über 10Hz näherte sich die Dielektrizitätsfunktion vom Öl- und Papiersystem einer Konstante an.

Um diese Verläufe nachzubilden wurde der Modellierungsansatz von Cole-Cole für dielektrische Materialien verwendet und eine multiplikative Änderung der Dielektrizitätsfunktion nach Gleichung 4. Dabei hat es sich gezeigt, dass bei Verwendung einer Relaxationszeit die meisten Messungen nachgebildet werden konnten. Das Öl-System konnte mit einer Debye-Funktion angenähert werden. Im Gegensatz dazu musste das Papiersystem mit einem Exponenten α zwischen 0,5 und 0,8 modelliert werden. Dies kann zum einen damit begründet werden, dass an den Kontaktflächen zwischen Elektrode und Papier Grenzflächeneffekte auftreten [2], [3]. Weiterhin kann es auf eine inhomogene Struktur hinweisen, die durch die Imprägnierung und die Art der Einbindung der Öl-Moleküle herrühren kann.

Die gefundenen Modelle für die Dielektrizitätsfunktion sind rein phänomenologische Beschreibungen der experimentell gefundenen Kurven, denen keine theoretischen Modelle zugrunde liegen. Jedoch ergibt sich so die Möglichkeit einer einheitlichen Parametrisierung von dielektrischen Messgrößen, was eine Voraussetzung für den Vergleich von unterschiedlichen Zuständen ist, wie z. B. bei unterschiedlichen Temperaturen und Feuchtigkeiten.

4. Literaturverzeichnis

[1] Novocontrol Technologies: Alpha-A High Resolution Dielectric, Conductivity, Impedance and Gain Phase Modular Measurement System; User's Manual; 4/2004

[2] Macdonald, J. R.: *Impedance Spectroscopy*; J.Wiley & Sons, New York, 1987; ISBN 0-471-83122-0

[3] Hamann, Carl H., Vielstich, W.: *Elektrochemie*; 3. Auflage; WILEY-YCH-Verlag; 1998; ISBN 3-527-27894-X