Dielektrische Modellierung von Öl-Papier-Isolationssystemen im Frequenzbereich zur Diagnose von Leistungstransformatoren



Cuvillier Verlag Göttingen

Dielektrische Modellierung von Öl-Papier-Isolationssystemen im Frequenzbereich zur Diagnose von Leistungstransformatoren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Fridericiana Karlsruhe genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Wi.-Ing. Dietmar Giselbrecht aus Weiler im Allgäu.

Tag der mündlichen Prüfung:	24. Juli 2008
Hauptreferent:	Prof. Dr Ing. Thomas Leibfried
Korreferent:	Prof. Dr Ing. Stefan Tenbohlen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2008 Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2008

978-3-86727-705-1

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2008 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen. 1. Auflage, 2008 Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-705-1

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH)* der Universität Karlsruhe (TH) in den Jahren 2003 bis 2008. Hiermit möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt und begleitet haben.

Ein besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried für die fachliche Unterstützung, die eingebrachten Verbesserungsvorschläge und die Übernahme des Hauptreferats. Insbesondere möchte ich mich für das uneingeschränkte Vertrauen bedanken, das er mir entgegengebracht hat, indem er mir die Promotion ermöglichte und die gestalterische Freiheit ließ, um meine Ideen in die Forschungsarbeit einzubringen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen vom *Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik* an der Universität Stuttgart gebührt mein Dank für die Übernahme des Korreferats und sein Interesse an der vorliegenden Arbeit, sowie für die eingebrachten Verbesserungsvorschläge.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IEH, bestehend aus den derzeitigen und ehemaligen wissenschaftlichen Mitarbeitern, dem Werkstattpersonal, dem Personal im Hauptprüfungsausschuss (HPA) und dem Sekretariat, danke ich für die Unterstützung in fachlichen und alltäglichen Fragen und nicht zuletzt für die gute Zusammenarbeit.

An dieser Stelle möchte ich Frau Charlotte König und Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Kürner danken, die mir den Weg zur Promotion eröffnet haben und somit positiv auf meinen Lebenslauf Einfluss nahmen.

Außerdem möchte ich mich bei drei meiner Kollegen namentlich bedanken:

Herrn Dipl.-Ing. Mischa Nagel danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit im Themengebiet der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV).

Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Timo Wenzel und Herrn Dipl.-Ing. Bernd Buerschaper für das angenehme Arbeitsklima und Ihre freundschaftliche und menschliche Art.

Diese Dissertation entstand durch die Unterstützung meiner Diplomanden und Studienarbeitern, die durch Ihre Arbeit wesentlich an diesem Werk beigetragen haben. Auch meinen langjährigen wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich bei meinen Nebentätigkeiten und bei der Forschungsarbeit tatkräftig unterstützt haben. Ihnen danke ich von ganzem Herzen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Adolf J. Schwab bedanke ich mich für die immer gewährte persönliche, fachliche Unterstützung und für die offenen Gespräche.

Ein persönlicher Dank geht an Herrn Dr.-Ing. Oliver Ofenloch für das Korrekturlesen und die zugehörigen Diskussionen in seiner Freizeit, und an Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Krügel für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Ideen, die die Forschungsarbeit mitgestaltet haben.

Der größte Dank geht an meine Eltern, Ida und Erich Giselbrecht. Sie haben mich im bisherigen Lebensweg stets unterstützt und auch den notwendigen Rückenhalt gegeben, um diesen Weg zu gehen.

Nicht genug kann ich mich bei meiner Frau Dipl.-Ing. Christiana Wiewer bedanken, die mich mit ihrer aufrechten und liebevollen Art stets unterstützt, motiviert und ihre eigenen Belange oft zurückgestellt hat. Vor allem hat sie zu einem großen Anteil am Zustandekommen und Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Karlsruhe im Juli 2008,

D. Giclbrecht

Inhaltsverzeichnis

Vo	rwort						Ш
Ve	rzeich	nis der	Abkürzungen und Formelzeichen				IX
1	Einle	eitung					1
	1.1	Stand	der Technik				2
	1.2	Motiv	ation und Ziele				3
2	Unte	ersuchu	Ingsgegenstand.				5
	2.1	Grund	llagen zum Aufbau von Leistungstransformatoren				6
		2.1.1	Allgemeiner Aufbau				6
		2.1.2	Kessel				7
		2.1.3	Eisenkern des Aktivteils.				7
		2.1.4	Wicklungen				8
		2.1.5	Streukanal				9
	2.2	Isolier	öl auf Mineralölbasis				10
		2.2.1	Herkunft, Aufbereitung und molekularer Aufbau				10
		2.2.2	Alterungsprozesse				12
	2.3	Cellulo	ose				14
		2.3.1	Herkunft, Aufbereitung und molekularer Aufbau				14
		2.3.2	Alterungsprozesse				16
3	Grundlagen und Theorie						
	3.1	Dielek	xtrika				17
		3.1.1	Allgemeines zum Dielektrikum				17
		3.1.2	Polarisationsmechanismen und Relaxationszeit				19
		3.1.3	Dielektrisches Systemverhalten im Zeit- und Frequenzbereich				22
		3.1.4	Viskosität von Flüssigkeiten				25
		3.1.5	Spezifische Leitfähigkeit von viskosen Flüssigkeiten.				26
	3.2	Model	lle für Dielektrika im homogenen elektrischen Feld				28
		3.2.1	RC-Ersatzschaltungen und RC-Netzwerke				28
		3.2.2	Debye-Relaxationsmodell				31
		3.2.3	Modelle mit Relaxationszeitverteilung				33
		3.2.4	Modelle mit RQ-Elementen				37
	3.3	Messv	verfahren zur Materialanalyse und dielektrischer Diagnose				38
		3.3.1	Karl-Fischer-Titrationsverfahren				38
		3.3.2	Messung des durchschnittl. viskosimetr. Polymerisationsgrades	\overline{DF}	\bar{v}_v		40
		3.3.3	Bestimmung des Säuregehalts				41
		3.3.4	Messverfahren zur dielektrischen Diagnose				42

4	Mod	elle für	Öl-Papier-Isolationssysteme					47
	4.1	Mathe	matisches Modell für Dielektrika					48
		4.1.1	Allgemeines Relaxationsmodell mit Leitfähigkeit					48
		4.1.2	Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit					48
		4.1.3	Komplexe Bewertungsfunktion.					50
		4.1.4	Anpassung der Modellparameter					52
		4.1.5	Übersicht der Messdatendarstellungen und Transformation	nsa	nsä	itze		56
	4.2	Theori	e des Isolationsschichtmodells					57
		4.2.1	Idealisiertes Isolationsschichtmodell im homogenen Feld					58
		4.2.2	Zylindrisches Isolationsschichtmodell					60
	4.3	Isolatio	onsschichtmodell für Leistungstransformatoren					62
		4.3.1	Basismodell für Leistungstransformatoren ohne Leisten					63
		4.3.2	Basismodell für Leistungstransformatoren mit Leisten .					68
		4.3.3	Anpassung der Transformatorparameter					70
		4.3.4	Einfluss der Temperatur des Isolationssystems					71
		4.3.5	Einfluss des inhomogenen Streukanal-Rands.					74
5	Expe	erimente	elle Untersuchungen					75
	5.1	Versuc	hsaufbau für Labormessungen im Frequenz- und Zeitberei	ch				75
		5.1.1	Messzelle					75
		5.1.2	Messaufbau und -ablauf					78
		5.1.3	Messunsicherheit des Messsystems					81
	5.2	Isolierö	il auf Mineralölbasis					85
		5.2.1	Vorbereitung der Isolierölproben					86
		5.2.2	Einfluss der Feldstärke auf die Kapazitätsmessung .					86
		5.2.3	Einfluss des Wassergehalts auf die Kapazitätsmessung.					88
		5.2.4	Einfluss der Temperatur auf die Kapazitätsmessung					90
		5.2.5	Betriebsmäßige und künstlich gealterte Isolieröl-Proben					93
		5.2.6	Öl-Modell und $ an \delta$ -Messung nach IEC 60247					95
	5.3	Impräg	niertes Papier und Transformerboard					96
		5.3.1	Vorbereitung der Papier- und Transformerboard-Proben					96
		5.3.2	Einfluss der Öl-Imprägnierung auf die Kapazitätsmessung					98
		5.3.3	Einfluss des Wassergehalts auf die Kapazitätsmessung.					100
		5.3.4	Einfluss der Temperatur auf die Kapazitätsmessung					105
		5.3.5	Thermische Alterung von Isolierpapier und Pressboard.					109
	5.4	Ansatz	zur Diagnose und Überwachung des Isolationszustandes					111
		5.4.1	Messdaten und die darin enthaltene Information					113
		5.4.2	Auswertung und Darstellung der Messdaten					114
		5.4.3	Überwachung von Leistungstransformatoren mit der EDS-	-M	essi	ıng		118
6	Zusa	mmenf	assung und Ausblick					119
A Mathematische Zusammenhänge und Herleitungen						123		
••	A.1	Verlust	te im Dielektrikum					123
	A.2	Leitwe	rt und spezifische Leitfähigkeit bei Isolatoren					124
	A.3	Maxwe	ellsche Gleichungen					125
			5					

	A.4	Kramers-Kronig-Beziehungen	125
В	Mess	sunsicherheit	127
	B.1	Fortpflanzung systematischer Messabweichungen	128
	B.2	Fortpflanzung zufälliger Messabweichung	128
	B.3	Messunsicherheit mit komplexen Zahlen	129
С	Alte	erungsmechanismen und chemische Reaktionsgleichung	131
	C.1	Allgemeines zur Alterung	131
	C.2	Alterung der Cellulose	131
	C.3	Öl-Alterung	133
D	Nom	nenklatur und Formeln	135
	D.1	Nomenklatur	135
	D.2	Cole-Cole-Funktion	135
	D.3	Basismodell für Leistungstransformatoren ohne Leisten	136
Е	Prog	gramme	137
	E.1	Anpassungsprogramm für das Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit.	137
	E.2	Anpassungsprogramm für das Basismodell ohne Leisten	141
F	Tabe	ellen	145
	F.1	Anforderungen an neue und gebrauchte Isolieröle	145
Lite	eratui	irverzeichnis	147

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

CPE	Constant Phase Element
	(Konstantphasenelement)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DZ	\mathbf{D} ielektrizitäts \mathbf{z} ahl
\overline{DP}_v	\mathbf{D} urchschnittl. \mathbf{v} iskosimetr. \mathbf{P} olymerisationsgrad
FDS	Frequency Domain Spectroscopy
\mathbf{FFT}	Fast Fourier Transform
IRC	Isotherme \mathbf{R} elaxations \mathbf{s} tromanalyse
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
KFM	\mathbf{K} arl- \mathbf{F} ischer- \mathbf{M} essung
KFT	Karl-Fischer-Titration
NZ	\mathbf{N} eutralisations \mathbf{z} ahl
OS	O ber s pannung
Pa	Papier oder Kraft-Isolierpapier
Pb	\mathbf{P} ress b oard oder Transformerboard
PDC	Polarisation- and Depolarisation Current
	(Polarisations-/ Depolarisationsstrom)
RVM	Recovery Voltage Measurement
	Rückkehrspannungsanalyse
SSE	Sum of Squared Errors
	(Summe quadratischer Abweichungen)
St	${f St}$ ufenwicklung
US	Unterspannung
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker e. V.

Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
_		0
A	Fläche der Plattenkondensatorelektrode	m^2
B	magnetische Flußdichte	Vs/m^2
$\underline{B}(\omega)$	komplexe Bewertungsfunktion	
C	Kapazität	As/V
\underline{C}	komplexe Kapazität	As/V
C_0	Vakuumkapazität	As/V
\underline{C}_{Mess}	gemessene komplexe Kapazität	As/V
$\Im(\underline{C}) = C''$	Imaginärteil von \underline{C}	As/V
$\Re(\underline{C}) = C'$	Realteil von \underline{C}	As/V
D	elektrische Flussdichte	As/m^2
d	Plattenabstand	m
E_A	Aktivierungsenergie	$_{\rm J/mol},$
$ec{E}$	allgemein elektrische Feldstärke	V/m
E_r	elektrisches Feld im Dielektrikum	V/m
E_P	durch Polarsation erzeugtes Gegenfeld	V/m
E_0	elektrisches Feld ohne Dielektrikum	V/m
$ec{F}$	allgemein Kraftvektor	Ν
$\vec{F_{\eta}}_{i}$	Reibungskraftvektor	Ν
$ec{F_i}$	Kraftvektor des Dipols i	Ν
$f = \omega/2\pi$	Frequenz	1/s
f(t)	dielektrischen Antwortfunktion	
$G(\log au)$	Dichtefunktion der Relaxationszeit	
H	magnetische Feldstärke	A/m
\underline{I} bzw. \underline{I}_{eff}	komplexer Effektivwert des Stromes	А
$\Re(\underline{I}) = I'$	Realteil des Stromes	А
$\Im(\underline{I}) = I''$	Imaginärteil des Stromes	А
i(t)	zeitlicher Stromverlauf	А
$i_{depol}(t)$	zeitlicher Depolarisationsstrom	А
$i_{pol}(t)$	zeitlicher Polarisationsstrom	А
$i(\omega)$	We chsels trom $i(t) = \hat{i}\sin(\omega t)$	А
i(t)	We chsels trom $i(t) = \hat{i}\sin(\omega t)$	А
\hat{i}	Spitzenwert des Stromes	А
$\vec{J}(t)$	zeitabhängige Stromdichtefunktion	A/m^2
$\vec{J}(\omega)$	frequenzabhängige Stromdichtefunktion	A/m^2
j	Stromdichte	A/m^2
j	komplexe Zahl $\sqrt{-1}$	
L	Induktivität	Vs/A
$\vec{l_i}$	Abstandsvektor der Ladungsschwerpunkte des Dipols i	m
$ec{M_i}$	Drehmomentvektor des Dipols i	Nm
M_P	magnetische Polarisation	
n^{-}	Exponent für die symmetrische Relaxationszeitvertei-	
	lung	

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
ai	Geschwindigkeitsvektor	m/s
\vec{v}	Dipolmomentvektor des Dipols i	/ S
p_i p	Polarisation	As/m^2
D.	Polarisation dos Dipols <i>i</i>	As/m^2
I_{i}	instantana Palarisation	As/m
I_{∞}	Communication	As/2
D(4)	memortane Polorisation	As/2
I(t)	Ladung des Dipols <i>i</i>	
q_i	Ladung des Dipois i	As
Q P	ohmscher Widerstand	AS O
	all memoine Cockenstante 8, 214472 1/ 1 K	7.7
n_m	ungehlene Gaskonstante 8, 514472 / mol·K	
$\frac{D}{D}$	Einheitaannung fün $t > 0$ ist $c(t) = 1$ const 0	
$s(\iota)$	Eliments sprung für $t > 0$ ist $s(t) = 1$, sonst 0	V
	Effectivement des Coordinations	ĸ
U bzw. U_{eff}	Enektivwert der Spannung	V
U_c	Maximalamplitude eines Spannungssprungs	V
U_0	Spannungsamplitude einer Wechselspannung	V
$u(\omega)$	Wechselspannung	V
u(t)	We check set by the set of the s	V
	Spitzenwert oder Scheitelwert der Spannung	V
W_{ppm}	Wassergehalt in Gewichtsanteilen in ppm	mg/kg
W %	Wassergehalt in Massenprozent	%
X_C	kapazitiver Widerstand	Ω
Z	Impedanz	Ω
$\tan \delta$	dielektrischer Verlustfaktor	,
δ	Verlustwinkel	rad
$\delta(t)$	Dirac-Funktion bzw. Dirac-Impuls $\delta(t) = ds(t)/dt$	
$\underline{\varepsilon}$	komplexe Dielektrizitätsfunktion	
$\Re(\underline{\varepsilon}) = \varepsilon'$	Realteil der komplexen Dielektrizitätsfunktion	
$\Im(\underline{\varepsilon}) = \varepsilon''$	Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätsfunktion	
ε_r	Dielektrizitätszahl	
ε_0	elektrische Feldkonstante $8,85410^{-12}$ As/Vm	
ε_{∞}	instantane Polarisation	
ε_s	Dielektrizitätsänderung der Gesamtpolarisation	
$\Delta arepsilon_{lpha}$	Dielektrizitätsänderung der α -Relaxation	/ -
η	dynamische Viskosität	Ns/m^2
ϑ	Temperatur	°C, K
Q	spezifischer Widerstand	$\Omega \cdot \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$
σ	spezifische Leitfähigkeit	$m/\Omega \cdot mm^2$
au	allgemein Relaxationszeit	S
$ au_lpha$	Relaxationszeitkonstante der α -Relaxation	S
Φ	magnetischer Fluss	Vs
arphi	Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom	rad
χ_e	materialabhängige elektrische Suszeptibilität	
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz	1/s

.

Kapitel 1

Einleitung

Die Diagnostik zur Ermittlung des Zustandes eines Leistungstransformators hat in den letzten Jahren aus technischen und wirtschaftlichen Gründen eine enorme Bedeutung erlangt. Für die elektrische Energieversorgung liegt ein Schwerpunkt in der wirtschaftlichen Ausnutzung der Leistungstransformatoren. Hierbei ist es wichtig, dass das Ausfallrisiko minimal ist und rechtzeitig erkannt wird, wann der Transformator repariert oder ausgetauscht werden muss.

Dabei hängt der sichere Betriebszustand und somit die restliche Einsatzdauer eines ölgefüllten Leistungstransformators überwiegend vom Zustand des Isolationssystems zwischen Oberspannungs- und Unterspannungswicklung, dem so genannten Streukanal, ab. Kurzzeitige Überlastungen und Alterungsmechanismen, die durch Sauerstoff, Wasser und erhöhte Temperatur erzeugt, verstärkt und beschleunigt werden, verschlechtern die dielektrische und mechanische Isolationseigenschaft. Somit ist der Materialzustand des Isolationssystems ein Kriterium für die Restlaufzeit und für die Ausfallwahrscheinlichkeit des Transformators.

Die dielektrische Diagnostik am Leistungstransformator hat das Ziel, den Zustand der Feststoffisolation, insbesondere im Bereich des Streukanals, zu ermitteln und zu beurteilen. Um dieses durchführen zu können, werden verschiedene Informationen, wie Online- und Offline-Messdaten, Konstruktionsaufbau, Umgebungsbedingungen, Art und Eigenschaft der Isoliermaterialien und deren Auswirkungen auf das Systemverhalten benötigt. Welche Informationen notwendig sind, um eine ausreichende Diagnose durchzuführen, ist aus heutiger Sicht noch nicht vollständig geklärt. Des Weiteren sind dem Anwender diagnostischer Verfahren die Informationen über die Betriebslaufzeit und den Wicklungsaufbau von den meisten Transformatoren nur unzureichend oder gar nicht bekannt, was die Diagnose erschwert.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der FDS-Diagnosemessung (Frequency Domain Spectroscopy), die zu den Offline-Verfahren gehört, da der Transformator zur Messung vom Netz genommen werden muss. Ein besonderes Augenmerk liegt zunächst in der mathematisch-physikalischen Modellierung, um herauszufinden, welche Informationen in der FDS-Messung an öl-papierisolierten Leistungstransformatoren tatsächlich vorhanden sind und welchen Einfluss die Parameter auf die Messergebnisse haben. Durch Modelle werden die komplexen Zusammenhänge der einzelnen Einflussparameter verdeutlicht. Auf diese Weise kann die Aussage bezüglich des Isolationszustandes besser beurteilt werden. Zusätzlich wird auf Messfehler, mögliche Interpretationsfehler und Interpretationsgrenzen hingewiesen. Die Voraussetzung für die Zustandsdiagnose sind experimentelle Untersuchungen im Labor. Der Messaufbau für hochohmige Isoliermaterialien muss so konzipiert sein, dass die Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit der Messungen mit einer geringen Messabweichung möglich ist. Durch die geringen Leitfähigkeiten der Isoliermaterialien muss besonders auf den Stromfluss im Messaufbau sowie in und auf den Proben geachtet werden. Hierzu müssen der Materialzustand, die Messtechnik und der Messaufbau über den jeweiligen Messzeitraum stabil sein. Da der entwickelte Messaufbau diese Anforderungen erfüllt, konnten die Materialeigenschaften, der Einfluss der Temperatur bei unterschiedlichem Materialzustand und Geometrieanordnung näher untersucht werden und das experimentelle Ergebnis in das entwickelte Modell einfließen.

Unter wohldefinierten Bedingungen durchgeführte Labormessungen im Frequenzbereich ermöglichten, dass das dielektrische Verhalten der untersuchten Materialien mit der empirischen Relaxationsfunktion von Havriliak und Negami auf das Cole-Cole-Modell reduziert und überprüft werden kann. Mit Hilfe der Messungen an Leistungstransformatoren wurde das bisher zur dielektrischen Modellierung des Isolationssystems verwendete RC-Modell verbessert und ergänzt. Die mathematische Darstellung durch das Cole-Cole-Modell zeigt, wie die einzelnen Materialeigenschaften und die Geometriefaktoren die komplexe Kapazitätsmessung verändern, aber auch welche Materialeigenschaften und Geometriefaktoren notwendig sind, um einen Messverlauf nachzubilden. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, das anhand der komplexen Kapazitätsmessung im Frequenzbereich mit standardisierten nichtlinearen Lösungsverfahren die Modellparameter mit den jeweiligen Nebenbedingungen bestimmt.

Da die thermische Überbelastung von Leistungstransformatoren die Lebensdauer des Isolationssystems verkürzt, wurde auch der thermische Alterungsprozess von Öl-Papier-Isolationssystemen im Labor näher untersucht. Hierzu wurden die dielektrischen Eigenschaften im Frequenzbereich bei erhöhter Temperatur über einen längeren Zeitraum gemessen. Auf diese Weise konnten die Veränderung durch die künstliche Alterung visualisiert und Rückschlüsse auf die Veränderung des Isolationssystems durch thermische Isolationsalterung im Leistungstransformator gemacht werden.

1.1 Stand der Technik

An der ETH Zürich wurden die Grundlagen zur Bestimmung des Zustandes von Öl-Papier-Isolationssystemen im Zeit- und Frequenzbereich entwickelt [30], [69].Vor Ort wird am Leistungstransformator eine Offline-Messung im Frequenz- oder Zeitbereich durchgeführt. Im Zeitbereich wird der Polarisationsstrom nach dem Anlegen einer konstanten Gleichspannung gemessen. Direkt nach dem Abschalten der Gleichspannung wird der Depolarisationsstrom erfasst (PDC-Messung). Im Frequenzbereich wird die komplexe Kapazität von wenigen mHz bis in den Bereich von 1 kHz bestimmt (FDS-Messung). Prinzipiell liefern die PDC- und FDS-Messung zur Zustandsdiagnose die gleichen Ergebnisse, sofern ein lineares dielektrisches Systemverhalten angenommen wird [19].

Bei der Transformatordiagnose wird ausgehend von den bekannten Geometriedaten der Hauptisolation ein gesamtes RC-Netzwerk für den jeweiligen Streukanal erstellt. Das resultierende Streukanal-Netzwerkmodell betrachtet die US- und OS-Wicklung als Mantelabwicklung, die zur Darstellung als zwei gleich großen Platten idealisiert wird. Zwischen den Platten existiert ein homogenes elektrisches Feld, und die Randfelder werden vernachlässigt. Mit der weiteren Annahme, dass die Materialien ein lineares, isotropes dielektrisches Verhalten haben, können die einzelnen Leisten, Ölkanäle und Transformerboardschichten, wie in der Abbildung 1.1 gezeigt, zusammengefasst werden. Die einzelnen RC-Schaltungsmodelle für die Isolierstoffe, wie Öl, Leisten und Transformerboard, werden aus einer Materialdatenbank entnommen, und das theoretische berechnete Systemverhalten mit der zu untersuchenden Messung am Transformator verglichen. Die beste Übereinstimmung zwischen berechnetem Systemverhalten und der Messung am Objekt sowie die Kenntnis über den Zustand der Referenzprobe liefert eine Abschätzung über den Zustand des Transformators [30].



Abb. 1.1: Schematischer Ablauf der dielektrischen Zustandsdiagnose von Leistungstransformatoren.

Die Parameter der Referenzprobe in Form eines dielektrischen RC-Schaltungsmodells werden durch gezielte Messungen an einer einfachen Platten-Kondensatoranordnung mit definierten konditionierten Isoliermaterialien gewonnen. Die erzielten Messdaten im Zeitbereich oder im Frequenzbereich und die Information des Materialzustandes, wie z. B. Materialproben mit unterschiedlichem Wassergehalt, werden in einer Materialdatenbank zur späteren Analyse abgelegt.

Außerdem erhält man bei jeder Messung am Leistungstransformator einen so genannten "Fingerprint", der bei späteren Messungen am gleichen Leistungstransformator zum Vergleich dient, um deutliche Veränderungen zu erkennen.

1.2 Motivation und Ziele

Die Kenntnis über den geometrischen Aufbau der Hauptisolation des Leistungstransformators ist bisher für die FDS- und PDC-Diagnoseverfahren notwendig, um einigermaßen verlässliche Ergebnisse zu erhalten. In der Praxis zeigte sich, dass in vielen Fällen der notwendige Isolationsaufbau nicht zur Verfügung steht und nur bedingt mittels Kenndaten abgeschätzt werden kann. Dies wurde durch eine statistische Auswertung von bekannten Leistungstransformatoren bestätigt. Zum einen liegt das daran, dass die unterschiedlichen Hersteller von Transformatoren über den Bauzeitraum von ca. 40 Jahren den Aufbau kontinuierlich verändert haben, und zum anderen beeinflussen die Materialkosten im jeweiligen Baujahr den inneren Aufbau eines Transformators. Erschwerend kommt hinzu, dass spezifische Kundenwünsche beim Bau eines Transformators ebenfalls eine wesentliche Rolle bei der Auslegung des Transformators spielten.

Die Modellierung und Analyse mit RC-Netzwerken und Referenzproben kann nur bekannte Materialzustände bewerten. Durch die vielfältigen Einflüsse auf das Isolationssystem, wie z. B. Geometrieaufbau, Materialarten, Messtemperatur, Wassergehalt und Säuregehalt, müssen in der Materialdatenbank alle möglichen Parameter und die zugehörigen Referenzmessungen enthalten sein, um eine ausreichend genaue Diagnose durchzuführen. Sind nicht umfangreiche Materialdaten in der Datenbank enthalten, so kann dies die Zustandsdiagnose erschweren oder sogar zur Fehlinterpretationen führen.

Zunächst ist für den Diagnostiker grundsätzlich wichtig zu wissen, welche Informationen in der Messung stecken oder welche Referenzproben in der Materialdatenbank vorliegen müssen, um eine gezielte Beurteilung des Isolationssystems im Transformator durchzuführen. Hier stellt sich die Frage, welche Materialeigenschaften und -zustände tatsächlich gemessen werden können und welchen Einfluss Transformatorgeometrie und Messtemperatur auf die Messergebnisse haben. Eine weitere Schwierigkeit liegt im rechtzeitigen Erkennen von Messfehlern und die Beurteilung der Messgenauigkeiten. Um die Messung zu kontrollieren, ist ein geeignetes Modell notwendig, welches das dielektrische Systemverhalten ausreichend genau nachbildet.

Als Resümee kann gesagt werden, dass die FDS- und PDC-Diagnoseverfahren zunächst geeignete und leicht anwendbare Methoden sind, um die Veränderungen im Isolationssystem zu erfassen. Die Grundlage beider Verfahren basiert auf dem dielektrischen Systemverhalten. Das Problem liegt bisher in der Interpretation der Messergebnisse. Hier stößt das RC-Netzwerkmodell mit Referenzproben an seine Grenzen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein alternatives Modell zu entwickeln, das die Grenzen der bisherigen RC-Netzwerke überwinden kann. Das neue Material- und Transformatormodell soll die physikalische Interpretation beinhalten, eine mathematische Darstellung und Verarbeitung ermöglichen. Insbesondere ist die Unterteilung der in den dielektrischen Messungen enthaltenen Information in Geometrieaufbau und Materialeigenschaften von Bedeutung, damit die Ursache für die Veränderung besser zugeordnet werden kann. Um die Ursache für die Veränderung in Messungen bestimmen zu können, sind Messungen an definierten Isoliermaterialien und die Identifikation der einzelnen Materialparameter erforderlich. Außerdem sind noch keine standardisierten dielektrische Messverfahren vorhanden, die die Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit sicherstellen.

Kapitel 2

Untersuchungsgegenstand

Das entwickelte Modell zur Beschreibung des dielektrischen Verhaltens von Dielektrika und aus verschiedenen Dielektrika zusammen gesetzten Isolationssystemen wird in der Diagnostik von Leistungstransformatoren eingesetzt. Hierbei ist die Isolation zwischen der Oberspannungswicklung (OS) und der Unterspannungswicklung (US) von Interesse, der sog. *Streukanal.* Im ersten Abschnitt werden die Grundlagen zum Aufbau von Leistungstransformatoren angesprochen und kurz auf die wesentlichen Baugruppen, Komponenten und den Aufbau von Leistungstransformatoren eingegangen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Aufbau des Streukanals und den dort eingesetzten Materialien. In den weiteren Abschnitten wird auf die Herstellung, den chemischen Aufbau und die Alterungsmechanismen der einzelnen Materialien näher eingegangen.

Um bei den geplanten Versuchen in angemessenen Zeiträumen zu aussagefähigen Ergebnissen zu gelangen, wurden die Messungen überwiegend mit einer Sorte von Isolieröl- und Isolierpapier durchgeführt. Dadurch geht das Probenmaterial nicht als zusätzlicher Parameter in die Untersuchung mit ein. Dabei wurden handelsübliche Materialien gewählt, damit die Versuchsergebnisse auf praktische Anwendungen übertragbar sind. Substanzen aus *natürlichen anorganischen Isolierstoffen*, wie Harz oder Kunststoffe, wurden nicht untersucht. Zu den gewählten Materialien gehören die folgenden *natürlichen organischen Isolierstoffe* [4, S. 5]:

- das Isolieröl auf Mineralölbasis (Shell Diala D),
- imprägniertes und nicht-imprägniertes Papier,
- imprägniertes und nicht-imprägniertes Transformerboard TIV, auch als Preßspan oder Pressboard bezeichnet und
- Probenmaterialien aus verschrotteten Maschinen- oder Netzkoppeltransformatoren.

Das Mineralöl wird von der Fa. Deutsche Shell AG, Hamburg hergestellt und erfüllt die Spezifikation der DIN 57370-1 (VDE 0370-1) für neue Isolieröle der Klasse A, siehe Tabelle F.1 im Anhang [67, S. 28].

Papier und Transformerboard entsprechen der Normanforderung nach IEC 60554-1:1977 (VDE 0311-10) und EN 60641-3-1 (VDE 0315-3-1) und wurden von der Fa. Weidmann Transformerboard Systems AG, Rapperswil / Schweiz und der Fa. Siemens AG,PTD, Transformers, Nürnberg, bereitgestellt.

Bei den aus gealterten Leistungstransformatoren entnommenen Materialproben kann in den meisten Fällen keine Aussage über den Hersteller gemacht werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Anforderungen im Neuzustand den oben genannten Proben entsprachen.

2.1 Grundlagen zum Aufbau von Leistungstransformatoren

2.1.1 Allgemeiner Aufbau

Der Leistungstransformator lässt sich in mehrere Baugruppen und Komponenten zerlegen. Er besteht grundsätzlich aus dem Kessel, den Durchführungen, der Kühlanlage, dem Ölausdehnungsgefäß und dem Aktivteil [58].



Abb. 2.1: Schnitt durch einen dreiphasigen Maschinentransformator mit Beschreibung der grundsätzlichen Baugruppen (Siemens/Trafo-Union).

Das Herzstück eines Transformators ist der Aktivteil, der im Wesentlichen aus dem Eisenkern mit Pressgestell, den Wicklungen sowie konstruktiven Elementen zur Einspannung der Wicklung besteht. Die meisten Transformatoren verfügen über eine angezapfte Wicklung, die so genannte Stufenwicklung, über die mit einem Stufenschalter die Übersetzung in einem bestimmten Bereich geändert werden kann. Die Abbildung 2.1 zeigt in der Schnittdarstellung die einzelnen Baugruppen eines Transformators. Die Kühlanlage wird zur Kühlung des Öls benutzt. Das Öl hat im Transformator die Doppelaufgabe der Kühlung und der elektrischen Isolation. Für die dielektrische Diagnose ist die Feststoffisolation zwischen der US- und OS-Wicklung von Bedeutung.

In den folgenden Abschnitten wird ergänzend auf den Kessel, den Eisenkern und die Wicklung eingegangen, um so einen Überblick über den gesamten Aufbau eines Leistungstransformators zu erhalten.

2.1.2 Kessel

Der Kessel bildet die Hülle eines Transformators. Am Kessel werden alle Baugruppen befestigt und die Transporthalterung angebracht. Im Innern des Kessels befindet sich das Aktivteil mit den Verbindungsleitungen zum Stufenschalter und den Durchführungen. Der gesamte Kessel ist mit Isolieröl gefüllt, d. h. der Aktivteil befindet sich vollständig im Isolieröl.

Abhängig von der Temperatur verändert das Isolieröl sein Volumen. Um den entstehenden Über- oder Unterdruck zu kompensieren, wird eine Verbindung mit der umgebenden Atmosphäre benötigt. Eine direkte Verbindung würde aber bewirken, dass die Isolierfähigkeit der Isoliermaterialien durch die Luftfeuchtigkeit herabgesetzt wird. Zu diesem Zweck werden Luftentfeuchter in die Verbindungsleitung installiert. Die Luftentfeuchter sind mit Silica Gel gefüllt und müssen regelmäßig getauscht werden, was einen gewissen Wartungsaufwand zur Folge hat, weswegen auch hermetisch abgeschlossene Transformatoren eingesetzt werden [63]. Zum Ausgleich des Isolieröls wird bei größeren Transformatoren ein Ölausdehnungsgefäß am Transformator angebracht. Bei kleineren Transformatoren wird die Volumenänderung des Öls oft durch Faltwellen in der Kesselwand ausgeglichen. Eine Alternative bietet ein Gummisack, der in das Ausdehnungsgefäß gelegt wird und diesen luftdicht verschließt. Dadurch wird auch ein Feuchtigkeitsaustausch zwischen Öl und Umgebung verhindert. Es ist immer noch umstritten, wie stark dieser Gummisack über die Jahre bei dauerndem Kontakt mit Öl verschlissen wird und somit der hermetische Abschluss nicht mehr gewährleistet ist [28].

Zur Kühlung werden entweder Kühlanlagen oder Radiatoren an den Außenseiten des Transformators angebracht. Über das Öl wird die in den Wicklungen und Konstruktionsteilen entstehende Wärme an die Umgebung abgegeben.

Eine weitere Baugruppe, die Auswirkung auf die Kesselform hat, sind die Durchführungen, die je nach Anforderungen seitlich oder auf dem Kesseldeckel angebracht sind. Der Abstand der Durchführungen zueinander und zum Kessel hängt jeweils von der Spannungsebene des einzelnen Wicklungssystems ab.

2.1.3 Eisenkern des Aktivteils

Der Eisenkern stellt die Hauptkomponente des Transformators dar, mit dessen Hilfe Wechselspannungen und -ströme induktiv auf andere Spannungs- und Stromwerte übersetzt werden können. Wird z. B. an der US-Wicklung eine Wechselspannung angelegt, so fließt ein Wechselstrom, der im Eisenkern einen magnetischen Fluss $\Phi(t)$ erzeugt. Da derselbe magnetische Fluss die OS-Wicklung durchsetzt, wird dort durch die höhere Windungszahl eine höhere Wechselspannung induziert.

Eine wichtige Kenngröße des Eisenkerns ist seine Hysterese. Ein guter Eisenkernwerkstoff

ist kaltgewalztes korn-orientiertes Elektroblech. In einem massiven Eisenkern würden sehr hohe Verluste durch Wirbelströme entstehen. Die durch das magnetische Wechselfeld entstehenden Wirbelströme können durch eine Blechung des Kerns parallel zur Richtung des magnetischen Flusses stark verringert werden. Je dünner die Bleche, umso geringer sind die Verluste.

Mit zunehmender Leistung nähert man sich der Eisensättigung, weswegen Transformatoren mit einer magnetischen Flussdichte von 1,5 bis 1,75 Tesla betrieben werden. Die Spannung in der US-Wicklung und die Anzahl der Windungen legen den minimalen Querschnitt des Eisenkerns fest. Der Abstand des Kerns zur Wicklung wird durch die Spannung in der Wicklung bestimmt, und muss je nach Isolation einen definierten Mindestabstand zwischen Kern und Spule einhalten.

Aus den unterschiedliche Kernbauformen haben sich als Standard der Drei-Schenkel-Kern bei dreiphasigen Leistungstransformatoren und der Fünf-Schenkel-Kern bei größeren dreiphasigen Maschinen- und Netzkuppeltransformatoren durchgesetzt. Die Verbindung der einzelnen Schenkel wird als Joch bezeichnet [28].

2.1.4 Wicklungen

Bei Maschinentransformatoren gibt es die Unterspannungs- (US), Oberspannungs- (OS) und die Stufenwicklung (vgl. Abb.: 2.2). An der Stufenwicklung sind Anzapfungen angebracht und mit dem Stufenschalter verbunden. Auf diese Weise kann die Oberspannung mit dem Stufenschalter in diskreten Spannungsschritten verändert werden. Die Anzapfungen sind auf der Oberspannungsseite angebracht, weil dort zum einen geringere Ströme fließen und zum anderen durch die höhere Anzahl an Windungen eine feinere Abstufung möglich ist. Zusätzlich können weitere Wicklungen existieren, wie z. B. die Mittelspannungswicklung bei Netzkuppeltransformatoren.

Prinzipiell gibt es zwei wesentliche Wicklungsarten: die Lagenwicklung und die Spulenwicklung. In den meisten Fällen wird die Lagenwicklung für die US-Wicklung und die Spulenwicklung für die OS-Wicklung verwendet. Die Wicklungen selbst bestehen aus einzelnen Leiterbündeln, auch als Drillleiter bezeichnet. Diese Leiterbündel bestehen aus "verdrillten" Einzelleitern die gegeneinander lackisoliert und zum Teil auch papierisoliert sind. Die verdrillte Anordnung der Einzelleiter im Leiterbündel wird so geführt, dass alle Einzelleiter die gleiche Strecke in jeder Position in der Wicklung zurücklegen. Durch diese Anordnung wird erreicht, dass durch das magnetische Streufeld im Bereich der Wicklungen eine möglichst geringe Spannung zwischen den Einzelleitern des Drilleiters induziert wird. Dies trägt wesentlich zur Verringerung der Verluste in den Wicklungen bei [56, S. 40].

Die Wärmeabfuhr erfolgt über die Oberfläche der Leiter. Da die einzelnen Lagen räumlich sehr eng beieinander liegen, werden bei mehrlagigen Wicklungen zusätzliche Kühlkanäle eingebracht. Die radialen und axialen Abstände werden durch Distanzstücke und Leisten aus Transformerboard bestimmt. Die Wärme wird mit Hilfe des Isolieröls, das durch den Kühlkanal fließt, abgeführt.

Die Papierisolation wird zwischen den einzelnen Lagenwicklung gestuft eingesetzt, wobei sich die Anzahl der Papierschichten bzw. die Papierdicke nach dem Potentialunterschied richtet, der zum Ende der Lage hin ansteigt. Die letzte Lage der Wicklung wird mit einem Schrumpfband gestützt, das ein Verschieben durch Stromkräfte beim Kurzschluss verhindern soll. An den Wicklungsenden werden Endstreifen aus Pressboard eingelegt. Die Endstreifen erleichtern die Handhabung während der Fertigung. Ihr eigentlicher Verwendungszweck ist es aber, den Isolationsabstand zwischen Kern und Wicklung bei der eingebauten Spule zu gewährleisten.

Die einzelnen Wicklungen werden mit einer Hydraulikpresse eingespannt, um so den Kurzschlusskräften entgegenzuwirken. Bei einem auftretenden Kurzschluss würde es ohne Stabilisierung der Wicklungen zu einer mechanischen Verformung und somit zur Zerstörung des Transformators kommen.

2.1.5 Streukanal

Als Streukanal wird der Bereich zwischen OS- und US-Wicklung bezeichnet. Er besteht je nach Bauart aus mehreren Schichten Papier, Transformerboard und Öl, die der Isolation und Feldsteuerung zwischen OS- und US- Wicklung dienen. Durch die Barrieren aus Transformerboard oder Papier werden kürzere Ölstrecken und damit höhere Spannungsfestigkeiten erreicht. Im Gegensatz zu mehrlagigem Papier behält das Transformerboard seine Form bei und kann mechanisch belastet werden. Dadurch ist es möglich, selbsttragende Bauteile aus Transformerboard zu fertigen und im Endbereich der Wicklungen dem Verlauf der Äquipotentiallinien anzunähern. Die Abbildung 2.2 zeigt einen Querschnitt des Streukanals und die drei wesentlichen Feldbereiche.



Abb. 2.2: Schnitt durch den Wicklungsaufbau eines Leistungstransformators.

Die elektrischen Feldbereiche A, B und C stehen hierbei für:

- A: zylindrischer Feldbereich
- B: Randfeld im Bereich der Wicklungsenden
- C: horizontaler Feldbereich

Der Feldbereich A kann bei Leistungstransformatoren als homogen angenommen werden, da das Verhältnis zwischen Wicklungsdurchmesser und Wicklungsabstand relativ groß ist, $\frac{d}{r} >> 1$. Die Abstände zwischen Wicklung und Joch im Feldbereich C sind größer, da hier Feldinhomogenitäten vorkommen. Eine Feldstärkenabschwächung wird hier durch den Einsatz von Schirmelementen, wie Schirmringe oder Jochschilder, und durch die Anzahl an Barrieren erreicht. Der inhomogene Feldbereich B ist für den Entwickler von Interesse. Zum einen sind die Feldstärken durch die Zuleitungen und die Randfelder zwischen Kern, OS- und US-Wicklung erhöht. Zum anderen werden Form und Verlauf der Äquipotentiallinien nicht exakt getroffen. Dies führt zu Tangentialfeldstärken im Transformerboard. Dadurch ist die elektrische Festigkeit in diesem Bereich kleiner. Hinzu kommt, dass das Verhältnis von Isolieröl zum Transformerboard deutlich größer ist als im nahezu homogenen Feldbereich A. Dadurch sinkt die elektrische Belastbarkeit. Außerdem können sich durch die Übergänge in den Ecken Gase ansammeln, die zu Teilentladungen führen [52].

Die dielektrische Diagnostik am Leistungstransformator will den Zustand der Feststoffisolation insbesondere in den Isolationsbereichen A und B ermitteln und beurteilen. Um die Entwicklung von geeigneten Modellen zu vereinfachen, wird der inhomogene Feldbereich B oft vernachlässigt und das elektrische Feld zwischen OS- und US-Wicklung als homogen betrachtet (siehe Kapitel 4).

2.2 Isolieröl auf Mineralölbasis

Das Isolieröl Shell Diala D ist eines der am meisten verwendeten Öle in Leistungstransformatoren. Es besitzt sehr gute Eigenschaften hinsichtlich Alterungsbeständigkeit und elektrischer Isolation (vgl. Anhang F.1). Hinzu kommt ein extrem gutes Kälteverhalten, das durch die speziell raffinierten naphtenischen Grundöle ohne Zugabe von Additiven erreicht wird. Es hat sich in Transformatoren aller Leistungsstufen, vom kleinen Ortsnetzbis zum Maschinentransformator, über Jahrzehnte bewährt. Auch in anderen elektrischen Geräten wie Gleichrichtern, Wandlern und Schaltern beherrscht Shell Diala D die auftretenden elektrischen und thermischen Beanspruchungen.

2.2.1 Herkunft, Aufbereitung und molekularer Aufbau

Mineralöl gehört zur Gruppe der *natürlichen organischen Isolierstoffe* und wird durch fraktionierte Destillation aus Erdöl gewonnen. Das Erdöl besteht überwiegend aus Kohlenwasserstoffen, geringen Anteilen von sauerstoff-, stickstoff- und schwefelhaltigen Verbindungen und anorganischen Bestandteilen, wie Salze und Metalle [6, S. 491]. Zur Verbesserung der Isoliereigenschaft von Mineralöl werden am Rohprodukt weitere Vorbehandlungen, wie z.B. Entgasung, Entwässerung und Entsalzung, durchgeführt [38, S. 81]. Hierbei entsteht das Isolieröl mit Grenztemperaturen von ca. -30 °C bis 110 °C.

Isolieröl auf Mineralölbasis setzt sich überwiegend aus gesättigten Kohlenwasserstoffen mit naphtenischer oder paraffinischer Struktur und geringen Anteilen von ungesättigten, aromatischen Kohlenwasserstoffen zusammen. Zusätzlich können je nach Qualität des Isolieröls geringe Spuren an sauerstoff-, stickstoff- und schwefelhaltigen Verbindungen enthalten sein. Die gesättigten Kohlenwasserstoffe sind chemisch stabiler als die ungesättigten und somit alterungsbeständiger. Die prozentualen Anteile der hauptsächlichen chemischen Bestandteile im Shell Diala D sind [27, S. 30], nach den verbindlichen Richtlinien der International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC):

- 40% Alkane (Paraffine),
- 55% Cycloalkane (Cyclo-Paraffine bzw. Naphtene),
- 5% Aromaten und
- Spuren von Alkenen (Olefine).

Alkane weisen nur Einfachbindungen auf, wobei die Kohlenstoffatome meist in geraden, seltener in verzweigten Ketten angeordnet sind, so genannte Iso-Alkane. Die Iso-Alkane besitzen meist Verzweigungen von Methylgruppen. Die Isomere haben die gleiche Summenformel aber einen unterschiedlichen Aufbau. Diesen Zusammenhang nennt man Konstitutionsisomerie (siehe Abb.: 2.3).

Da die Kohlenstoffketten mit der maximalen Anzahl von Wasserstoff-Atomen belegt sind und keine weiteren Wasserstoffatome aufnehmen können, bezeichnet man sie als gesättigte Kohlenstoffverbindungen. Sie zeichnen sich vor allem durch relativ hohe Reaktionsträgheit gegenüber vielen Chemikalien und sehr guten elektrischen Isoliereigenschaften aus. Allerdings gehen Alkane Redoxreaktionen ein, insbesondere mit Sauerstoff und den Halogenen, wie Flur oder Chlor, da sich ihre Kohlenstoffatome im stark reduzierten Zustand befinden. Die Kettenlänge beeinflusst den Siedepunkt und die Schmelztemperatur. Durch die Art und Weise der Kristallisation wird das Fließvermögen bzw. die Viskosität über die Temperaturen stark beeinflusst. Hinzu kommt, dass die Viskosität die Leitfähigkeit beeinflusst (siehe Abschnitt 3.1.5). Um eine ausreichende Fließeigenschaft bei tiefen Temperaturen zu erhalten, wird der Anteil von Alkanen in Mineralöl reduziert.



Abb. 2.3: Strukturformel der Alkane und Iso-Alkane.

Cycloalkanesind Kohlenwasserstoffe, die aus einem oder mehreren Ringen bestehen und wie die Alkane nur Einfachbindungen aufweisen. Sie gehören ebenfalls zu den gesättigten Kohlenstoffverbindungen. Sie zeichnen sich durch ihre Reaktionsträgheit gegenüber vielen Chemikalien aus, die jedoch etwas geringer ist als bei den Alkanen. Auch Cycloalkane besitzen hervorragende elektrische Isolationseigenschaften. Durch die Molekülform ist die Kristallisation erschwert, was zu einer deutlichen Absenkung des Schmelzpunktes auf unter $-50\,^{\circ}\mathrm{C}$ führt.



Abb. 2.4: Strukturformel der Cyclo-Alkane.

Aromatische Kohlenwasserstoffe besitzen mindestens ein zyklisches Molekül mit abwechselnder Reihenfolge von Einfach- und Doppelbindungen von Kohlenstoffatomen, so genannte konjugierte Doppelbindungen. Aromaten sind mehrfach ungesättigte Verbindungen, die relativ reaktionsfreudig sind und mit vielen Substanzen unter Anlagerung an die Doppelbindung reagieren. Dies wird als Additions- oder Anlagerungsreaktion bezeichnet.



Abb. 2.5: Strukturformel der aromatischen Kohlenwasserstoffe.

In Spuren sind im Mineralöl *Alkene* enthalten. Früher wurden *Alkene* auch als Olefine bezeichnet. Sie weisen Einfach- und Doppelbindungen auf, die sich an beliebiger Position befinden können. Alkene sind ungesättigte Verbindungen und im Gegensatz zu den Alkanen reaktionsfreudiger. Die schwache Doppelbindung bietet, wie bei den Aromaten, einen Angriffspunkt für die Additionsreaktion.



Abb. 2.6: Strukturformel der Alkene.

Wie oben erwähnt, sind Alkane mit Kettenlängen von C_9 bis C_{20} , Cycloalkane und Aromaten die Hauptbestandteile des mineralölbasierten Isolieröls. Weiterhin ist mit Substitutionen von Wasserstoff- und Sauerstoffatomen, verzweigten Kettenformen wie Iso-Alkanen, mit ungesättigten Kohlenwasserstoffen und mit heterogenen Komponenten, die durch Spuren von Schwefel, Stickstoff und Metallen gebildet werden, im Isolieröl zu rechnen. Durch diese Verunreinigung wird die benötigte Reaktionsenergie herabgesetzt und eine natürliche Alterung eingeleitet und beschleunigt. Außerdem wird die thermische Stabilität verschlechtert.

Es soll hier noch erwähnt werden, dass weitere Isolierflüssigkeiten existieren, die höhere thermische Stabilitäten aufweisen. Hierzu gehören Pentaerythrit-Ester, Siliconöl mit der Bezeichnung Polydimethylsiloxan, aber auch Rapsöle werden aus ökologischem aber auch ökonomischem Interesse verstärkt diskutiert [27].

2.2.2 Alterungsprozesse

Die Geschwindigkeit der natürlichen Alterung hängt von mehreren Faktoren wie z. B. Temperatur, Licht, Sauerstoff, Katalysatoren, elektrische Beanspruchung sowie Gas- und Wassergehalt aber auch Verunreinigungen in der Isolierflüssigkeit ab.

Die Alterung der flüssigen Kohlenwasserstoffe ist durch chemische Reaktionen gekennzeichnet. Die chemische Stabilität des Isolieröls wird durch die Bindungsenergien der C-H- sowie

der C-C-Einfach- und Doppelbindungen bestimmt. Verunreinigungen und Katalysatoren, wie Eisen und Kupfer, setzen die Bindungsenergie herab, und die chemische Reaktion kann unter Mitwirkung von reaktionsfähigen Stoffen eingeleitet, aber auch beschleunigt werden.

Insbesondere führt die Oxidation an den Alkanen - durch den Sauerstoff der Luft - zu einer Vielzahl von Produkten wie Carbonsäure, Ketonen, Aldehyden, Ester und Alkoholen. Bei den Abspaltungsprozessen werden wiederum Wasser (H_2O) und Sauerstoff (O_2) frei, die weitere Reaktionen verursachen. Im Anhang C.3 ist ein Ausschnitt der Reaktionsgleichung dargestellt, die in der Dissertation [4, S. 60] genauer beschrieben werden. Mit den Zersetzungsprodukten, wie

- Carbonsäure (-COOH),
- Alkohole (-OH) und
- CO-Verbindungen

können durch Polykondensation und Polymerisation feste Produkte entstehen, die als Ölschlamm bezeichnet werden.

Für Cycloalkane oder Aromaten lassen sich analoge Oxidationsschemata entwickeln, die ebenfalls Säuren und Ölschlamm erzeugen. Es sollte beachtet werden, dass die Oxidation nur eine Zersetzungsreaktion ist und weitere Reaktionsmechanismen ebenfalls die Eigenschaften des Isolieröls verändern.

Zur Bestimmung des Alterungszustandes dienen bisher die Neutralisationszahl, der Verlustfaktor und das Aussehen des Isolieröls. EN 60422:2006 (VDE 0370-2) gibt Grenzwerte für den Verlustfaktor und die Neutralisationszahl für ölisolierte Betriebsmittel in Abhängigkeit der Bemessungsspannung an.

Der Verlustfaktor steht mit der Erhöhung der Leitfähigkeit im Zusammenhang, da durch die Zersetzungsprodukte die Zahl der Ionen erhöht wird (vgl. Abschnitt 3.1.5); das gilt auch für die Neutralisationszahl, die den Säuregehalt angibt. Experimentelle Untersuchungen am Isolieröl Shell Diala D im Frequenzbereich von 1 mHz bis 40 kHz zeigen, dass die Leitfähigkeitsveränderungen ein wesentliches Kennzeichen für die Alterung sind.

Um die Eigenschaften von Isolieröl zu verbessern, werden dem Isolieröl Inhibitoren und Passivatoren beigemischt, so genannte Additve.

Ist das Additiv im Isolieröl ein Antioxidationsmittel, dann wird von einem inhibierten oder spureninhibierten Isolieröl gesprochen, sonst ist es ein nichtinhibiertes Isolieröl, wie Shell Diala D. Die Inhibitoren verbessern die Oxidationsstabilität. Hierbei werden die Oxidationsprodukte in dielektrisch unschädliche Verbindungen umgewandelt.

Passivatoren dienen dem Korrosionsschutz von Metalloberflächen. Durch die Zugabe wird die Metalloberfläche mit einem Schutzfilm überzogen, der die Oxidationsprozesse durch Wasser, Sauerstoff oder korrosivem Schwefel verhindert. Außerdem werden Metallspuren im Öl gebunden und dadurch die katalytische Wirkung aufgehoben oder reduziert [67].

Weitere Additive dienen zur Verbesserung des Kälteverhaltens, Verminderung der elektrostatischen Aufladung, Verbesserung des Raffinationsprozesses oder als Entschäumer.

Im Laufe der Zeit verbrauchen sich die Inhaltstoffe der Additive und müssen erneuert werden.

In dieser Arbeit wurde überwiegend Shell Diala D verwendet. Hierbei wird das Isolieröl, das direkt vom Lieferanten angeliefert wird, als neu, neuwertig oder als ungebraucht be-

zeichnet. Eine weitere Unterscheidung wird in der Art der Alterung vorgenommen. Die künstliche Alterung wird nur durch erhöhte Temperatur zwischen 85 °C-130 °C erzeugt. Die real gealterten Proben stammen von Materialproben direkt aus den Transformatoren oder Schaltanlagen. Bei diesen Proben ist die Belastungsvergangenheit meist unbekannt. Die Art und Stärke der Verunreinigungen durch Säuren, Materialteilchen im Isolieröl sind zum Teil bestimmt worden.

2.3 Cellulose

Die Cellulose ist der Hauptbestandteil von Papier und Transformerboard, welches als festes Isoliermaterial in Transformatoren eingesetzt wird. Zur Herstellung von Transformerboard wird geschichtetes Isolierpapier ohne Bindemittel nass vergautscht [52, S. 25]. Aus diesem Grund wird zunächst nicht zwischen Transformerboard und Papier unterschieden. Der Begriff Pressboard ist das Synonym von Transformerboard. Der Begriff Transformerboard wurde durch die Firma Weidmann geprägt [27, S. 39]. Für Papier werden auch die Bezeichnung Kraft-Isolierpapier oder Cellulosepapier für elektrotechnische Zwecke verwendet. Kraft-Isolierpapier ist nach Norm IEC 60554-1:1977 (VDE 0311-10) ein Papier, das vollständig aus Weichholz-Zellstoff nach dem Sulfatverfahren hergestellt wird. Somit ist die Grundsubstanz von Papier und Transformerboard die Cellulose.

Im folgenden Abschnitt wird kurz auf die Herkunft, Herstellung und molekulare Struktur der Cellulose eingegangen. Für weitere Informationen sei auf die Fachliteratur [52], [53] verwiesen. Danach werden die Alterungsmechanismen und -produkte kurz erläutert. Von Bedeutung für die vorliegende Arbeit sind Alterungsprodukte, welche die FDS-Messung und die PDC-Messung beeinflussen.

2.3.1 Herkunft, Aufbereitung und molekularer Aufbau

Als Rohstoff zur Zellstoffgewinnung für die Elektrotechnik kommt nahezu ausschließlich Weichholz (Kieferholz) zur Anwendung, das aus

- 40 % 50 % Cellulose,
- 25 % 30 % Lignin,
- + $25\,\%$ $30\,\%$ Hemicellulosen (Kohlenhydrate) und
- 2% 9% Extraktstoffe, wie z. B. Harze, Fette und Kieselsäure

besteht. Durch chemische und mechanische Aufschlussverfahren wird die Cellulose von den übrigen Substanzen befreit, so dass am Ende fast reine Cellulose zurückbleibt. Für die Herstellung von Kraft-Isolierpapier wird das Sulfatverfahren verwendet, da im Unterschied zu den andern Verfahren, die langen Cellulosefasern eine höhere Festigkeit aufweisen. Der Nachteil gegenüber den anderen Verfahren, wie z. B. dem Sulfitverfahren, ist der geringere Ertrag.

Die α -Cellulose ist ein fadenförmiges Makromolekül, das die β -Glucoseringe periodisch über eine Sauerstoffbrücke zwischen dem 1. und 4. Kohlenstoffatom miteinander verbindet - die chemische Bezeichnung lautet: Polymer aus β -anhydro-1,4-Glucose [4, S. 53], [52, S. 23-25]. In der Natur kommt Cellulose in reiner Form nur selten vor, häufig ist sie mit Hemicellulosen zu netzartigen Strukturen vergesellschaftet. Zwei β -Glukoseringe bilden die

Grundeinheit der Cellulose, die so genannte Cellubiose. Das Makromolekül besteht nach [53, S. 144] aus ca. 1000-5500 Glucoseringen ($C_6H_{10}O_5$) mit drei Hydroxylgruppen (-OH). Weiterhin werden über die Hydroxylgruppen Querverbindungen gebildet, so dass ein kristalliner Aufbau entsteht - sog. Mizellen. Da die Glucoseringe eine Länge von ca. 1 µm aufweisen, beträgt die Länge des Makromoleküls 1000 µm-5500 µm.



Abb. 2.7: Strukturformel eines Cellulosemoleküls.

Die Abbildung 2.7 zeigt eine vereinfachte Strukturformel einer Cellulosekette. Es bleiben z. B. Carboxylgruppen unberücksichtigt, die in geringer Zahl von ca. 1 % bei Celluloseketten vorhanden sind und die dielektrische Eigenschaft durch Ionenaustauschvermögen beeinflussen [4, S. 53]. Weitere Substanzen und Chemikalien aus dem Verarbeitungsprozess lassen sich bei der Herstellung der Cellulose nicht vermeiden. Je nach Herstellungsverfahren, aber auch um die Eigenschaft zu beeinflussen, bleiben Spuren oder Anteile der Substanzen im Papier oder Transformerboard enthalten. Zu den wesentlichen Substanzen gehören:

- Hemicellulosen, auch Polyose genannt, sind Kohlenhydrate mit einem durchschnittlichen viskosimetrischen Polymerisationsgrad (\overline{DP}_v) kleiner als 200 [52, S. 21]. Sie besitzen Gruppen von komplexen Polysaccharid-Polymeren wie Xylose, Glucose, Galactose und Arabinose [45, S. 7]. In geringen Mengen wird die mechanische Festigkeit der Cellulose-Materialien durch Wasserstoffbrücken verbessert.
- Pektin ist ein Polymer aus 1,4-β-D-Galakturonsäure. Die Carboxylgruppen am C₆-Atom der Galakturonsäure sind zu unterschiedlichen Anteilen mit Methyl- oder Acetylgruppen verestert [45, S. 7].
- Lignin ist ein phenolisches Polymer, das mit anderen Zellwandbestandteilen in Wechselwirkung tritt und die Fasern miteinander "verkittet" [45, S. 7].

Die chemische Struktur, die Anordnung der Hydroxylgruppen, Carboxylgruppen oder Xylan-Moleküle und die Spurenelemente beim Cellulose-Herstellungsprozess beeinflussen im Wesentlichen das mechanische, elektrische, thermische und chemische Verhalten der Cellulose-Materialien. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass reine Cellulose nahezu unpolar ist und keine freien Ladungen hat und somit sehr gute dielektrische Eigenschaften aufweist. Die dielektrischen Eigenschaften werden überwiegend durch die Elemente verändert, die bedingt durch den Herstellungsprozess in Spuren enthalten sind oder durch die Umgebungsbedingungen aufgenommen werden.

Es ist bekannt, dass reine Cellulose-Materialien in der Lage sind, Wasser physikalisch unter Quellung zu binden. Durch die faserartigen Grundgerüste der Cellulose und Hemicellulosen wird verursacht, dass feinste kapillarartige Hohlräume das Wasser aufnehmen. Dabei quellen diese Cellulose-Materialien, wofür deren hydrophile Polysaccharid-Ketten verantwortlich sind.

Durch die Imprägnierung des Cellulose-Materials mit Isolieröl, wird zunächst die Aufnah-

mefähigkeit des Wassers stark reduziert. Außerdem werden die Ionen im Öl von Cellulose-Materialien aufgenommen und neutralisiert.

2.3.2 Alterungsprozesse

Die Alterung des Papiers äußert sich in seiner Farbänderung und seiner erhöhten Sprödigkeit. Die Tatsache, dass das Papier spröde und brüchig wird, ist auf den Zerfall der Makromoleküle in kürzere Ketten zurückzuführen. Die Länge der Molekülketten wird mit der Messung des durchschnittlichen viskosimetrischen Polymerisationsgrades nach IEC 60450:2004 (VDE 0311-21) bestimmt. Der \overline{DP}_v -Wert von neuen Papierproben liegt über 1000 und bei gealterten unter 350. Eine kurze Beschreibung des Verfahrens kann im Abschnitt 3.1.4 nachgelesen werden.

Die hauptsächlichen Einflussgrößen der Alterung und die zugehörigen Reaktionen der einzelnen Einflussgrößen sind:

- hohe Temperatur \Rightarrow Pyrolyse
- Anwes enheit von Sauerstoff \Rightarrow Oxidation
- Anwesenheit von Wasser \Rightarrow Hydrolyse

Die *Pyrolyse* ist der maßgebende Vorgang, der zur mechanischen und elektrischen Alterung führt. Bei der Pyrolyse wird durch die Wärme die Schwingungsenergie vieler Atome oder Atomgruppen zeitweise auf die C-H-, C-O- oder C-C-Bindungen konzentriert, dabei können diese Verbindungen brechen. Dieser Vorgang kann grundsätzlich an jeder Stelle des Cellulose-Moleküls stattfinden [4, S. 55]. Da die Sauerstoffbrücken zwischen den Glucoseringen am stärksten belastet werden, kommt es dabei auch zu einer Verkürzung der Molekülketten. Dieser Vorgang kommt zwangsweise zum Stillstand, wenn die Energie in den kürzeren Molekülketten nicht mehr ausreicht, um weitere Bindungen aufzubrechen. Beim Spaltprozess innerhalb der Molekülkette entsteht Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂), Wasser (H₂O), Wasserstoff (H₂) und geringe Mengen an Methan (CH₄) [52].

Die Oxidation ist für die Zersetzung der Cellulose verantwortlich und erfolgt bei der üblichen Betriebstemperatur von Leistungstransformatoren unter dem Einfluss von größeren Mengen von Sauerstoff. Unter Vakuum oder im Ölbehälter kann die Oxidationsgeschwindigkeit stark gesenkt werden. Bei der Oxidation werden die Hydroxylgruppen (OH) am Glucosering angegriffen. Der schematische Ablauf der Zersetzung durch die Temperatur und Oxidation ist im Anhang C.2 beschrieben.

Die *Hydrolyse* beeinflusst hauptsächlich die Zersetzung der Cellulose in kürzere Molekülketten. Bei der Zersetzung entsteht wieder Wasser, das den laufenden Zersetzungsprozess beschleunigt. Im Gegensatz dazu wird die Zersetzung von Isolieröl von Wasser kaum beeinflusst [53, S. 146].

Kapitel 3

Grundlagen und Theorie

3.1 Dielektrika

In diesem Abschnitt wird auf die wesentlichen physikalischen Grundlagen und die Eigenschaften von flüssigen und festen Dielektrika bzw. Isoliermaterialien eingegangen. Diese Grundlagen dienen dem besseren Verständnis der vorliegenden Arbeit.

3.1.1 Allgemeines zum Dielektrikum

Nach M. Faraday wird das isolierende Medium zwischen zwei Ladungen Dielektrikum genannt. Ein ideales Dielektrikum ist nicht leitfähig, weil keine freien positiven oder negativen Ladungen existieren, die innerhalb des Dielektrikums von einer Seite zur anderen Seite fließen können.

Wird ein Isolator in ein elektrisches Feld gebracht, durchdringt das elektrische Feld den Isolator, und eine Kraft wirkt auf die gebundenen Ladungen im Isoliermaterial. Beim Vergleich der Kapazität eines Plattenkondensators mit und ohne Dielektrikum stellt man fest, dass die Kapazität mit Dielektrikum größer ist als ohne Dielektrikum. Mikroskopisch gesehen liegt der Grund im Isoliermaterial, das aus gebundenen positiven und negativen Ladungen besteht. Dabei hängt die Kapazität von der Anzahl der Dipole und von der Größe des Dipolmoments ab. Im Folgenden werden die physikalischen Grundlagen dargestellt, die aus der Literatur [31, B111-B116] und [15, S. 199-216] entnommen sind.

Durch das elektrische Feld im Isoliermaterial werden in den Atomen und Molekülen Dipolmomente \vec{p}_i induziert, die sich nach dem elektrischen Feld ausrichten. Der elektrische Dipol *i* ist im Gesamtverhalten elektrisch neutral und besteht aus zwei Punktladungen, die ein entgegengesetztes Vorzeichen haben. Das Dipolmoment wird definiert als

$$\vec{p}_i = q_i \cdot \vec{l}_i \,. \tag{3.1}$$

Der Abstand $\vec{l_i}$ ist der direkte Abstand der positiven und negativen Ladungsschwerpunkte. Im homogenen elektrischen Feld \vec{E} wirkt zum einen eine Kraft $\vec{F_i} = q_i \cdot \vec{E}$ auf die positive und negative Ladung q_i des Dipols *i*. Die resultierende Kraft ist in einem homogenen Feld gleich Null. Weiterhin bewirkt das Kräftepaar ein Drehmoment $\vec{M_i} = \vec{p_i} \times \vec{E}$ auf den Dipol *i*, der sich in Feldrichtung ausrichtet.

Im inhomogenen elektrischen Feld sind die Kräfte auf die positive und negative Ladung im Betrag und Richtung verschieden, so dass neben dem Drehmoment eine resultierende Kraft auftritt, die das Material zusätzlich mechanisch belastet.

Die Polarisation \vec{P} in As/m² eines Mediums wird definiert als *Dipolmoment pro Volumen*einheit bzw. die vektorielle Addition aller Einzeldipole \vec{p}_i pro Volumeneinheit. Weiterhin gilt für die Polarisation

$$\vec{P} = \chi_e \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \tag{3.2}$$

wobei ε_0 die elektrische Feldkonstante in ^{As}/Vm ist. χ_e ist die einheitslose materialabhängige elektrische Suszeptibilität, die als eine Federkonstante zwischen zwei Ladungen interpretiert werden kann. Die Suszeptibilität und die Dielektrizitätszahl ε_r beschreiben beide die dielektrische Eigenschaft und sind verknüpft durch

$$\varepsilon_r = (1 - \chi_e). \tag{3.3}$$

Durch die Polarisation der Dipolelemente im elektrischen Feld entstehen unbewegliche positive und negative Polarisationsladungen Q_P im Abstand $\vec{l_P}$. Hierbei wird eine Polarisationsfeldstärke $\vec{E_P}$ erzeugt, die dem elektrischen Vakuumfeld $\vec{E_0}$ entgegengesetzt ist, so dass die Feldstärke im Inneren des Dielektrikums verkleinert wird. Die resultierende gesamte Feldstärke ist

$$\vec{E_r} = \vec{E_P} + \vec{E_0} = \vec{E_0} + \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0}.$$
 (3.4)

Anstatt mit der Polarisation oder Polarisationsladung zu rechnen, wird der elektrische Verschiebungsvektor \vec{D} eingeführt, um damit die Verschiebung der positiven und negativen Ladung im Dielektrikum durch das äußere Feld zu charakterisieren. Mit Gl. (3.2) und Gl. (3.3) gilt für die elektrische Verschiebung

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E_0} + \vec{P} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E_0} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E_0} .$$
(3.5)

Im isotropen Dielektrikum kann ε_r und somit auch χ_e als skalare Größe betrachtet werden. Hingegen muss beim anisotropen Dielektrikum, da die Eigenschaft von der Richtung abhängt, die Richtung des \vec{D} und des \vec{E} berücksichtigt werden. ε_r ist also i. Allg. ein Tensor. In dieser Arbeit wird grundsätzlich angenommen, dass das verwendete Dielektrikum isotrop ist und somit die dielektrische Eigenschaften der einzelnen Materialien skalare Größen sind, die mit der Dielektrizitätszahl oder mit der Suszeptibilität beschrieben werden können. Vorab soll hier schon erwähnt werden, dass die Dielektrizitätszahl von verschiedenen Parametern, wie Temperatur ϑ , Feldstärke \vec{E} , Wassergehalt $W_{\%}$, Alter usw. abhängen kann, was zu einer Dielektrizitätsfunktion $\varepsilon(\vartheta, E, W_{\%}, ...)$ führt. Die Veränderung des Dielektrikums und somit der Verlauf der Dielektrizitätsfunktion wird in dieser Arbeit näher untersucht.

Die Größe der Dielektrizitätszahl wird durch den molekularen Aufbau der Materie bestimmt. Zum Beispiel haben unpolare, symmetrische Moleküle ein kleines ε_r und polare, unsymmetrische Moleküle hingegen deutlich größere Dielektrizitätszahlen. Die Ursache liegt in den Polarisationsmechanismen die im nächsten Abschnitt 3.1.2 näher erläutert werden.

Zur Bestimmung der Ladung oder der Kapazität eines Kondensators, kann der $Gau\betasche$ Satz verwendet werden. Die allgemeine Form für das elektrische Feld in Materie lautet

$$\oint_{A} \vec{D} \cdot d\vec{A} = \oint_{A} \varepsilon_{r} \varepsilon_{0} \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q, \qquad (3.6)$$

wobei Q die innere Ladung in As eines Volumens ist und A der Oberfläche des Volumens entspricht. Prinzipiell variiert im atomaren Bereich die Feldstärke im Dielektrikum von Ort zu Ort. Somit kann der Verschiebungsvektor oder der Feldstärkevektor nur als ein Mittelwert über einen großen Volumenbereich betrachtet werden. Dies gilt auch für die später zu diskutierenden Messergebnisse, die ebenfalls nur einen Mittelwert für die gesamte Probe darstellen.

3.1.2 Polarisationsmechanismen und Relaxationszeit

Wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, wird durch das elektrische Feld auf eine ortsgebundene positive und negative Ladung eine Kraft $\vec{F}_i = q_i \vec{E}$ erzeugt, die eine Polarisation des Dielektrikums bzw. Isolierstoffs bewirkt. Die Abbildung 3.1 zeigt die vier grundsätzlichen Polarisationsmechanismen [15, S. 199-208], [37, S. 76], [31, B114-B115], [35, S. 123-131].





Die Deformations polarisation, siehe Abbildung 3.1(a), kann unterteilt werden in Elektronen- und Atompolarisation.

Bei der Elektronenpolarisation werden die Atome durch den Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes deformiert. Die negative Elektronenhülle und der positive Atomkern verschieben sich durch die Coulombsche Kraft gegensätzlich, so dass die Ladungsschwerpunkte der positiven und negativen Ladung nicht mehr aufeinanderfallen.

Bei der Atompolarisation werden unpolare Moleküle durch das elektrische Feld deformiert. In diesem Fall verschiebt sich die Atomhülle des Moleküls, was ebenfalls zu einem etwas größeren induzierten Dipol führen kann als bei der Elektronenpolarisation.

Da die Umorientierung des induzierten Dipols durch die Deformation nur ein geringes Trägheitsmoment entgegenwirkt, können die Dipole einem schnellen Wechselfeld gut folgen. Dementsprechend sind die Relaxationszeiten der Deformationspolarisation τ_{Def} sehr klein. Dieses hat zur Folge, dass die Resonanzverluste erst bei hohen Frequenzen sichtbar werden (vgl. Abb.:3.2). Die *Gitterpolarisation* entsteht bei Materialstrukturen, die mit positiven und negativen Gitterbausteinen ein Kristallgitter bilden. Durch das Einwirkung eines \vec{E} -Feldes werden diese Gitterbausteine in Feldrichtung verschoben (siehe Abb.:3.1(b)). Im Resonanzbereich der Gitterbausteine entstehen hohe Polarisationsverluste.

Ein weiterer Polarisationseffekt ist die Orientierungspolarisation, die durch rotatorische Ausrichtung der polaren Moleküle oder Molekülgruppen entsteht. Polare, asymmetrische Moleküle haben die Eigenschaft, dass der Schwerpunkt der positiven und negativen Ladung nicht zusammenfällt und diese ein permanentes Dipolmoment erzeugen. Die ungeordneten Dipole im Dielektrikum sind nach außen zunächst elektrisch neutral. Durch die Einwirkung eines \vec{E} -Feldes erhalten die Dipole eine Orientierung in Feldrichtung und erzeugen eine Polarisierung des Dielektrikums.

Da hier im Gegensatz zur Deformationpolarisation nicht einfach nur eine Verschiebung, sondern eine rotatorische Bewegung stattfindet, ist die Polarisationgeschwindigkeit durch das Massen-Trägheitsmoment der permanenten Dipole entsprechend langsamer und wird je nach Größe der Dipole im niedrigeren Frequenzbereich sichtbar. In Abbildung 3.1(c) ist das Prinzip der Orientierungspolarisation dargestellt.

Die *Grenzflächenpolarisation*, auch als Raumladungspolarisation bezeichnet, beschreibt den Stau von Ladungsträgern an Grenzflächen zwischen Stoffen mit unterschiedlicher Leitfähigkeit. Dieses führt zu Polarisationsverlusten, die durch das Umladen von Teilkapazitäten entstehen. In Abbildung 3.1(d) ist dieses dargestellt. Diese Art der Polarisation kommt oft in Öl-Papier-Isolationssystemen vor, da sich die geringen Leitfähigkeiten von Papier und Öl dennoch deutlich voneinander unterscheiden.

Durch die unterschiedlichen Polarisationsmechanismen wird die Dielektrizitätszahl verändert, die bei steigender Frequenz grundsätzlich kleiner wird. Da es sich um mehrere Polarisationsmechanismen handelt, besteht die Gesamtpolarisation P_s eines Dielektrikums aus einer Summe von P_i

$$P_s = \sum_i P_i. \tag{3.7}$$

In dieser Arbeit wird hauptsächlich die Systemantwort eines Dielektrikums analysiert, das mit einem elektrischen Wechselfeld erregt wird. Bei einem elektrischen Wechselfeld $E_0(\omega)$ werden die Dipole versuchen, dem Feld zu folgen, d.h. das induzierte Feld $E_{Dip}(\omega)$ ändert ebenfalls mit der Frequenz ω seine Polarität. Die Stärke des Gegenfeldes $E_{Dip}(\omega)$ hängt z. B. von der Anzahl der Dipolmomente, die an der Polarisation beteiligt sind und vom Polarisationsmechanismus ab. Die Dipole der einzelnen Polarisationsarten sind aufgrund ihrer Trägheit nicht in unendlich kurzer Zeit ausgerichtet, sondern brauchen eine Zeit $\tau > 0$ um sich zu drehen. Diese Zeit τ wird als Relaxationszeit bezeichnet. Ändert das angelegte Feld E_0 seine Polarität, so wird sich der Dipol umorientieren und eine mechanische Drehung oder Verschiebung vornehmen. Je nachdem wie groß das Massen-Trägheitsmoment der Dipole ist, verändert sich die Relaxationszeit τ . Steigt die Frequenz immer weiter an, so wird es dem Dipol, aufgrund seiner Massenträgheit, immer schwerer fallen dem elektrischen Feld unverzögert zu folgen. Irgendwann ist die Frequenz erreicht, bei der der Dipol der Frequenz nicht mehr folgen kann. Dipole mit kleiner Massenträgheit können sich schneller drehen als große schwere Dipole. Natürlich ist irgendwann eine Grenze erreicht bei der selbst die "schnellsten" Dipole der Feldänderung nicht mehr folgen können und somit keinen Beitrag mehr zum Gegenfeld leisten. Bei sehr hohen Frequenzen wird nicht mehr die Dielektrizitätszahl verwendet, sondern mit den Größen der Optik als Brechungsindex n über die

Wellenlänge angegeben. Der Zusammenhang ist $\varepsilon_r = n^2$.

Im Frequenzbereich wird eine komplexe Dielektrizitätszahl $\underline{\varepsilon}$ (siehe Anhang A.1) verwendet. Der Imaginärteil steht für die Verluste im realen Dielektrikum. Die Ursache der Verluste durch Polarisation wurden oben bereits beschrieben. Die Verluste durch die Leitfähigkeit werden im nächsten Abschnitt erläutert. Hier soll vorab nur bemerkt werden, dass die Leitfähigkeitsverluste nur den Imaginärteil verändern, der bei kleinen Frequenzen ansteigt. Dies bedeutet, dass die Verluste durch die Leitfähigkeit größer werden.



Abb. 3.2: Polarisationsmechanismen im Frequenzspektrum als komplexe Dielektrizitätszahl dargestellt.

Die Abbildung 3.2 zeigt den komplexen Verlauf der Dielektrizitätszahl. Der Realteil zeigt eine stufenweise Veränderung der Dielektrizitätszahl, die durch die verschiedenen Polarisationsmechanismen erzeugt wird. Grundsätzlich gilt, dass bei steigender Frequenz die Relaxationszeit der einzelnen Polarisationsmechanismen kleiner werden und somit die Relaxationszeiten wie folgt sortiert sind:

$$\tau_{Grenz} > \tau_{Orient} > \tau_{Gitter} > \tau_{Deform}.$$

Es soll noch beachtet werden, dass reale Isoliermaterialien nur in Ausnahmefällen eine feste Relaxationzeitkonstante haben. Überwiegend handelt es sich um eine Relaxationszeitverteilung, da verschiedene Dipole aufgrund einzelner Polarisationsmechanismen existieren können.

Weiterhin haben die Temperatur und die Feldstärke einen Einfluss auf die Polarisationsmechanismen. Da hier nur der Frequenzbereich von mHz bis MHz betrachtet wird, hat überwiegend die Grenzflächen- und die Orientierungspolarisation eine Auswirkung auf die hier betrachteten Messgrößen [37, S. 243].

Eine Erhöhung der Feldstärke kann die komplexe Dielektrizitätszahl und somit auch den

Verlust anheben. Diese Feldstärken werden bei der zerstörungsfreien Zustandsanalyse nicht verwendet und hier nicht berücksichtigt.

Die Temperatur des Dielektrikums beeinflusst offensichtlich die Orientierungs- und die Grenzflächenpolarisation. Bei der Orientierungspolarisation werden mit steigender Temperatur die Dipole beweglicher, so dass die Orientierungspolarisation sich zu höheren Frequenzen verschiebt.

Die Grenzflächenpolarisation ist aufgrund der temperaturabhängigen Leitfähigkeit ebenfalls temperaturabhängig. Bei steigender Temperatur erhöht sich für die meisten elektrischen Isolierstoffe die Leitfähigkeit. Somit verschiebt sich die Grenzflächenpolarisation zu anderen Frequenzen.

Einen besonderer Fall stellen Mischdielektrika mit deutlich unterschiedlichen Leitfähigkeiten dar, wie z. B. geschichtetes Isolieröl und Transformerboard. Dieser Isolationsaufbau wird üblicherweise in Leistungstransformatoren verwendet und wird im Abschnitt 4.2 näher untersucht.

3.1.3 Dielektrisches Systemverhalten im Zeit- und Frequenzbereich

Zur Diagnose von dielektrischen Systemen spielt das dynamische Systemverhalten im Frequenz- und Zeitbereich eine große Rolle. Um eine Systemantwort zu erhalten, kann eine Sprungantwortmessung oder Frequenzgangmessung durchgeführt werden. Durch die endliche Messzeit, erhält man bei beiden Verfahren immer einen Ausschnitt des gesamten Systemverhaltens. Das hier beschriebene dielektrische Systemverhalten ist die Grundlage für die Modellierungsmethode im Zeit- und Frequenzbereich, die im Abschnitt 4.1.1 näher erläutert wird.

Die Grundlagen der makroskopischen elektromagnetischen Phänomene können mit den vier Gleichungen von Maxwell (siehe Anhang A.3) bestimmt werden. Zunächst gilt bei richtungsunabhängigen Materialeigenschaften, d. h. für isotrope Materialien, nach Maxwell:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E_0} + \vec{P} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E_0} \qquad \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M_P}) = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$
(3.8)

D	elektrische Flussdichte	B	magnetische Flussdichte
E	elektrische Feldstärke	H	magnetische Feldstärke
P	elektrische Polarisation	M_P	magnetische Polarisation

Mit Hilfe des Ampereschen Gesetzes A.3 von Maxwell aus dem Jahr 1865 [47] und der Gleichung (3.8) kann das *dielektrische Systemverhalten im Zeitbereich* hergeleitet werden. Werden beide Gleichungen zusammengesetzt, dann erhalten wir

$$\vec{J}(t) := \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E}(t) + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[\vec{E}(t) + \vec{P}(t) \right] \,. \tag{3.9}$$

Der Term $\sigma \vec{E}(t)$ der Stromdichtefunktion $\vec{J}(t)$ in A/m^2 beschreibt den Einfluss der Leitfähigkeit im elektrischen Feld. Der zweite Term steht für die Vakuum-Verschiebungsstromdichte und der letzte Term beinhaltet die Polarisationsstromdichte. Die einzelnen Terme sind hierbei abhängig vom zeitlich veränderlichen \vec{E} -Feld.

Wird berücksichtigt, dass wir immer nur einen Ausschnitt des Systems messen, dann kann

der Anteil durch die Polarisation $\vec{P}(t)$ in As/m² in ein schnelles und ein langsames Polarisationsverhalten unterteilt werden [34]:

$$\vec{P}(t) = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E}(t) + \Delta \vec{P}(t) = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E}(t) + \varepsilon_0 \int_0^t f(\tau) \vec{E}(t-\tau) d\tau.$$
(3.10)

 $\varepsilon_0 \chi_e \vec{E}(t)$ repräsentiert die schnellen Polarisationsvorgänge, die dem angelegten elektrischen Feld ohne Verzögerung folgen können. Die langsamen Polarisationsvorgänge werden mit dem Faltungsprodukt zwischen der dielektrischen Antwortfunktion f(t) und dem elektrischen Feld bestimmt. Dieses Faltungsprodukt beinhaltet den "memory effect", hierbei hängt der Polarisationszustand nicht nur vom Zeitpunkt t ab, sondern auch von den vorhergegangenen Polarisationen. Man sagt auch, das Dielektrikum habe ein "Gedächtnis". Welche Form dabei f(t) hat, hängt von den langsamen Polarisationsmechanismen ab und ist materialspezifisch.

Die Grenze zwischen langsamer und schneller Polarisation ist zunächst fließend, da es vom jeweiligen Messverfahren und Messbereich abhängt. Grundsätzlich sind unter den schnellen Polarisationsvorgängen abgeschlossene Polarisationen gemeint - hier auch als *instantane Polarisation* P_{∞} bezeichnet, die dem angelegten elektrischen Feld $\vec{E}(t)$ ohne nennenswerte Verzögerung folgen können. Auf die langsamen Polarisationsvorgänge im Frequenzbereich von wenigen mHz bis MHz wird später näher eingegangen.

Setzt man Gleichung (3.10) in die Stromdichtefunktion (3.9) ein, dann erhält man die dielektrische Systemantwort als Stromdichtefunktion

$$\vec{J}(t) = \sigma \vec{E}(t) + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[\underbrace{(1 + \chi_e)}_{\varepsilon_\infty} \vec{E}(t) + \int_0^t f(\tau) \vec{E}(t - \tau) d\tau \right] .$$
(3.11)

Analog der Zeitabhängigkeit von $\vec{J}(t)$ in $^{A}/m^{2}$ läßt sich die Frequenzabhängigkeit analysieren. Wir betrachten in dieser Arbeit nur ein sinusförmiges elektrisches Wechselfeld der Form $E(t) = E_{0} \sin(\omega t)$. Mit der weiteren Annahme, dass das Dielektrikum linear, homogen, isotrop und nichtmagnetisch ist, kann die Gleichung (3.11) zunächst in den Frequenzbereich transformiert werden:

$$\underline{J}(\omega) = \sigma \underline{E}(\omega) + \mathbf{j}\omega\varepsilon_0 \left[\underbrace{(1+\chi_e)}_{\varepsilon_{\infty}} \underline{E}(\omega) + \underline{f}(\omega)\underline{E}(\omega)\right].$$
(3.12)

Durch die Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich vereinfacht sich das Faltungsintegral zu einer Multiplikation von komplexen Größen. Die dimensionslose komplexe Antwortfunktion und die komplexe elektrische Suszeptibilität $\chi(\omega)$ ist definiert durch

$$\underline{f}(\omega) = \int_0^\infty f(t)e^{-j\omega t}dt$$

=
$$\int_0^\infty f(t)\cos(\omega t)dt - j\int_0^\infty f(t)\sin\omega t)dt$$

=
$$\chi'(\omega) - j\chi''(\omega) = \underline{\chi}(\omega).$$
 (3.13)
Die Kramers-Kronig-Beziehungen (A.4) setzen Imaginär- und der Realteil der komplexen elektrischen Suszeptibilität für die langsamen Polarisationsvorgänge $\underline{\chi}(\omega)$ in Form einer Integralgleichung miteinander in Beziehung. [43]. Wird die komplexe Systemantwort durch die komplexe Suszeptibilität in Gleichung (3.12) ersetzt, kann mit der Gleichung die Stromdichte

$$\underline{J}(\omega) = \mathbf{j}\omega \cdot \varepsilon_0 \left[\underbrace{\left(\mathbf{1} + \chi_e + \chi'(\omega)\right)}_{\varepsilon'(\omega)} - \mathbf{j} \underbrace{\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \omega} + \chi''(\omega)\right)}_{\varepsilon''(\omega)} \right] \underline{\underline{E}}(\omega)$$
(3.14)

beschrieben werden. Man erkennt, dass sich die Stromdichte durch die komplexe Dielektrizitätszahl $\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - \mathbf{j}\varepsilon''(\omega)$ und die elektrische Feldstärke ergibt. Vereinfacht lautet die Gleichung (3.14):

$$\underline{J}(\omega) = \mathbf{j}\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \underline{\varepsilon}(\omega) \cdot \underline{E}(\omega) \,. \tag{3.15}$$

Der Realteil $\Re(\underline{\varepsilon}(\omega)) = \varepsilon'(\omega)$ setzt sich zusammen aus der instantanen Dielektrizitätszahl $\varepsilon_{\infty} = 1 + \chi_e$ und einem additiven frequenzabhängigen Anteil $\chi'(\omega)$ zusammen, der durch die langsamen Polarisationsmechanismen bestimmt wird. Beide Größen beeinflussen das reine dielektrische Kapazitätsverhalten. Der Imaginärteil $\Im(\underline{\varepsilon}(\omega)) = \varepsilon''(\omega)$ setzt sich additiv aus den frequenzabhängigen Polarisationsverlusten $\chi''(\omega)$ und der spezifischen Leitfähigkeit σ in S/m zusammen. Es ist zu erkennen, dass die Leitfähigkeit eine reine imaginäre Größe darstellt und nicht in Beziehung mit dem Realteil der komplexen Dielektrizitätszahl steht. Mit steigender Frequenz $\omega \to \infty$ strebt $\Im(\underline{\varepsilon}(\omega)) \to 0$ und mit fallender Frequenz $\omega \to 0$ strebt $\Im(\underline{\varepsilon}(\omega)) \to \infty$, da die Leitfähigkeit dominiert. Weiterhin sind die Dielektrizitätsverluste $\varepsilon''(\omega)$ in Phase mit der Stromdichte und der Realteil $\varepsilon'(\omega)$ eilt dem elektrischen Feld um 90° voraus, was dem Verhalten einer Kapazität entspricht.



Abb. 3.3: Dielektrisches Systemverhalten als komplexe Dielektrizitätsfunktion $\varepsilon(\omega)$ im unteren Frequenzbereich von 0, 1 mHz bis 0, 1 MHz.

Grundsätzlich steht nur die im Frequenzbereich liegenden Polarisationen mit der Kramers-Kronig-Beziehung im engen Zusammenhang. Leitfähigkeit und instantane Polarisation können *nur* im Realteil oder im Imaginärteil erkannt werden. Dieses muss später bei der Anpassung der Parameter beachtet werden.

Die Abbildung 3.3 verdeutlicht das Frequenzverhalten der komplexen Dielektrizitätsfunktion. Zur Darstellung gibt es noch zwei Anmerkungen: Als erstes ist der Imaginärteil grundsätzlich positiv, aber aus Übersichtlichkeitsgründen wird der Imaginärteil an der f-Achse gespiegelt. Als zweites wird in dieser Arbeit nicht der tan δ dargestellt, sondern nur der Verlustwinkel δ , da der Verlustwinkel bei Leitfähigkeit gegen $\pi/2$ strebt. Auf diese Weise wird der Anteil durch Leitfähigkeit besser erkannt und die Darstellung bleibt endlich.

Um die komplexe Dielektrizitätszahl zu messen, wird an der Probe eine sinusförmige Wechselspannung angelegt und die Systemantwort als Strom gemessen. Anhand des Strom- und Spannungsverlaufs über der Frequenz kann die Impedanz oder die komplexe Kapazität bestimmt werden (siehe Absch. 3.3.4). Im Idealfall ist das dielektrische Verhalten unabhängig von der Feldstärke und ein homogenes Feld liegt vor. Mit dieser Annahme kann die Stromdichtegleichung (3.15) mit der Fläche A in m² multipliziert werden, und wir erhalten den folgenden Stromverlauf $\underline{i}(\omega)$ in A:

$$\underline{i}(\omega) = \underline{J}(\omega) \cdot A = \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \underline{\varepsilon}(\omega) \cdot \underline{E}(\omega) \cdot A$$
$$= \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \underline{\varepsilon}(\omega) \cdot \underline{U}(\omega) \cdot C_0 . \tag{3.16}$$

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Messungen im Zeitbereich oder Frequenzbereich die gleichen Informationen beinhalten, wenn das dielektrische Material linear, homogen und isotrop ist. Der Unterschied liegt im Messaufbau und an der Art der Messung. Im Zeitbereich können die schnellen Veränderungen im hochohmigen Material nur sehr schwer erfasst werden. Hingegen liegt die Schwierigkeit im Frequenzbereich bei kleinen Frequenzen, da der Strom durch das hochohmige Material sehr klein ist.

3.1.4 Viskosität von Flüssigkeiten

Bewegt sich ein Körper in einer Flüssigkeit, so entsteht eine Reibungskraft \vec{F}_{η} , die bei laminaren Fließverhalten proportional zur Geschwindigkeit \vec{v} ist

$$\vec{F}_{\eta} = \beta \cdot \vec{v} \,. \tag{3.17}$$

Die Proportionalitätskonstante β hängt von der Oberflächenform, Oberflächengröße, der dynamischen Viskosität η der Flüssigkeit und vom Scherflächenabstand x (Flüssigkeitsabstand vom Körper zum Rand) ab. In differentieller Schreibweise lautet die Gleichung für die viskose Reibungskraft [68, S. 33], [50, S. 778]

$$dF_{\eta} = \eta \frac{dA \cdot dv}{dx} \,. \tag{3.18}$$

Die auftretende Proportionalitätskonstante η heißt dynamische Viskosität in Ns/m². Der Quotient dF_{η}/dA heißt Scherspannung τ . Zeigen Flüssigkeiten die Besonderheit, dass die Viskosität unabhängig von der Geschwindigkeit oder dem Schergefälle dv/dx ist, dann wird diese als newtonsche Flüssigkeit bezeichnet, ansonst als nicht-newtonsche Flüssigkeit. Das verwendete Isolieröl auf Mineralstoffbasis ist in guter Näherung ein Newtonsches Fluid [27, S. 105].

Die dynamische Viskosität von Mineralölen verändern sich bei unterschiedlichem Druck, Temperatur und Geschwindigkeitsveränderungen. Die dynamische Viskosität von Mineralölen nimmt mit steigender Temperatur ab und kann oft mit der Arrhenius-Andrade-Ansatz

$$\eta(T) = \eta_0 \cdot e^{\left(\frac{E_A}{R_m \cdot T}\right)} \tag{3.19}$$

oder mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden. Hierbei ist η_0 eine temperaturunabhängige Konstante, E_A die Aktivierungsenergie für den Fließvorgang, R_m die allgemeine Gaskonstante und T die absolute Temperatur in K ist [50, S. 782].

Die Viskositätsänderung durch den Druck kann mit der Formel

$$\eta(p,T) = \eta_1(T)\alpha^p \tag{3.20}$$

angenähert werden, wenn die Temperaturfunktion beim normalem Luftdruck $\eta_1(T)$ und Viskositäts-Druck-Koeffizienten α bekannt ist [31, D36]. Für eine genauere Bestimmung der Abhängigkeit vom Druck muss eine Kennlinie experimentell bestimmt werden.

Die kinematische Viskosität ν und die dynamische Viskosität η steht mit der Dichte ρ in folgender Beziehung

$$\eta = \rho \cdot \nu \,.$$

Die dynamische Viskosität wird meist mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters bestimmt. Weitere Messverfahren für die Bestimmung der dynamischen oder kinematischen Viskosität sind:

- Vogel-Ossag Viskosimeter nach DIN 51561 und DIN 51569,
- Ubbelohde Viskosimeter nach DIN 51562 Teil 1 und
- Kugelfallviskosimeter.

Im Kugelfallviskosimeter wird das Gesetz von Stokes angewendet. Speziell für eine Kugel mit dem Radius r in einer laminaren bzw. wirbelfreien Strömung gilt das Reibungsgesetz von Stokes mit $F_{\eta} = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$.

3.1.5 Spezifische Leitfähigkeit von viskosen Flüssigkeiten

Die spezifische Leitfähigkeit von viskosen Flüssigkeiten wird durch positive und negative Ionen und durch freie Elektronen in der Flüssigkeit beeinflusst. Die freien Elektronen spielen erst bei hohen Feldstärken eine Rolle [37, S. 245]. In dieser Arbeit wird von niedrigen Feldstärken ausgegangen und somit nur die Ionenleitung in viskosen Flüssigkeiten näher betrachtet.

Da die Ionen durch die viskose Flüssigkeit wandern, beeinflusst die Viskosität die spezifische Leitfähigkeit. Somit spiegelt sich das Temperaturverhalten von viskosen Flüssigkeiten im Temperaturverhalten der spezifischen Leitfähigkeit (vgl. Abschnitt 5.2.4) wieder. Es lässt sich mit der Tatsache erklären, dass die Ionen durch das Anlegen einer elektrischen Feldstärke \vec{E} im Öl in Richtung des elektrisches Feldes fließen. Wird angenommen, dass die geladenen Teilchen in der viskosen Flüssigkeit eine Kugelform mit dem Radius r_i haben, dann stellt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen der elektrostatischen Kraft $\vec{F}_{stat,i} = q_i \cdot \vec{E}$ auf ein geladenes Teilchen q_i und der mit dem Stokesche Reibungskraft $F_{\eta,i}$ bei einer konstanten Geschwindigkeit \vec{v}_i ein:

$$\vec{F}_{stat,i} = \vec{F}_{\eta,i}$$

$$q_i \cdot \vec{E} = 6\pi \cdot \eta(T) \cdot r_i \cdot \vec{v}_i$$

$$\vec{v}_i = \frac{q_i \cdot \vec{E}}{6\pi \cdot \eta(T) \cdot r_i}.$$
(3.21)

Die Geschwindigkeit \vec{v}_i in m/s der Ionengruppe *i* hängt von der dynamischen Viskosität, Radius des Ions, elektrischen Feld und von der positiven oder negativen Ladung des Ions ab. Die beweglichen Ionen in der Flüssigkeit verursachen einen Stromfluss, der sich aus zwei gegensätzlich fließenden Strömen von Anionen und Kationen zusammensetzt. Für die Stromdichte j_i einer geladenen Ionengruppe gilt [31, B166]:

$$\vec{J}_i = n_i \cdot q_i \cdot \vec{v}_i \,, \tag{3.22}$$

wobei n_i die Anzahl der Ionen *i* pro Volumen ist. Wird die Ionengeschwindigkeit gemäß Gl. (3.21) in die Gl. (3.22) eingesetzt, erhalten wir mit der Stromdichte $\vec{J_i} = \sigma_i \cdot \vec{E}$

$$\sigma_i(T) \cdot \vec{E} = n_i \cdot q_i \cdot \frac{q_i \cdot \vec{E}}{6\pi \cdot \eta(T) \cdot r_i}$$

$$\sigma_i(T) = n_i \cdot \frac{q_i^2}{6\pi \cdot r_i} \cdot \frac{1}{\eta(T)}$$
(3.23)

die Beziehung des spezifischen Leitfähigkeitsbeitrags σ_i in S/m der Ionengruppe *i* zur dynamischen Viskosität $\eta(T)$. Wird die Arrhenius-Andrade-Ansatz (3.19) für Flüssigkeiten in die Gleichung (3.23) eingesetzt, erhalten wir die Temperaturabhängigkeit von $\sigma_i(T)$

$$\sigma_i(T) = \sigma_{0,i} \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R_m \cdot T}\right)} \qquad \text{mit} \quad \sigma_{0,i} = n_i \cdot \frac{q_i^2}{6\pi \cdot r_i \cdot \eta_0} \,. \tag{3.24}$$

 $\sigma_{0,i}$ ist eine temperaturunabhängige Konstante für den spezifischen Leitfähigkeitsbeitrag der Ionengruppe *i*. Die Summe aller Ionengruppen in einer viskosen Flüssigkeit ergeben die temperaturabhängige spezifische Leitfähigkeit $\sigma(T)$ der Flüssigkeit

$$\sigma(T) = \sum_{i=1}^{\infty} \sigma_i(T)$$
$$= \sigma_0 \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R_m \cdot T}\right)} \qquad \text{mit} \quad \sigma_0 = \sum_{i=1}^{\infty} \left(n_i \cdot \frac{q_i^2}{6\pi \cdot r_i \cdot \eta_0}\right). \tag{3.25}$$

Aus dem exponentiellen Ansatz, kann die Aktivierungsenergie E_A graphisch ermittelt werden, wenn die logarithmierte spezifische Leitfähigkeit $\sigma(T)$ über der reziproken absoluten Temperatur in K aufgetragen wird.

Es sollte beachtet werden, dass die Gleichung (3.25) eine idealisierte Annäherung ist. Zum Beispiel wird mit zunehmender Temperatur der Einfluss der Brownschen Molekularbewegung größer, was in der Gleichung nicht berücksichtigt wird. Zudem sind die Bewegungsrichtungen der positiven und negativen Ionen gegensätzlich und somit können sich die geradlinigen und gleichförmigen Bewegungen gegenseitig stören. Diffusionsprozesse beeinflussen ebenfalls durch die resultierende Kraft aus dem Konzentrationsgradienten die Ionenbewegung [50, S. 410]. Auch die Annahme, dass die Ionen kugelförmig sind, trifft nur im Idealfall zu und beeinflusst ebenfalls die Leitfähigkeit.

3.2 Modelle für Dielektrika im homogenen elektrischen Feld

In diesem Abschnitt werden die gängigsten Modelle für Dielektrika vorgestellt. Das RC-Ersatzschaltbild gehört zu den klassischen Darstellungsformen und wird in dieser Arbeit zur Erklärung und Beschreibung des elektrischen Verhaltens verwendet. Für die Analyse und die mathematische Modellierung kommt ein reduziertes empirisches Modell auf der Basis der Havriliak-Negami-Funktion zur Anwendung, das so genannte Cole-Cole-Modell. Zur Ergänzung wird das RQ-Modell erwähnt, das äquivalent zum empirischen Cole-Cole-Modell ist.

3.2.1 RC-Ersatzschaltungen und RC-Netzwerke

Einfache RC-Ersatzschaltung

Die einfachste und übersichtlichste Methode ein Dielektrikum grob anzunähern, ist eine Reihen- oder Parallelschaltung eines idealen Widerstands R_s oder R_p und einer idealen Kapazität C_s oder C_p , die auch als RC-Glied bezeichnet wird. Diese Ersatzschaltung beschreibt die Eigenschaft eines Dielektrikums unvollständig. Der Vorteil liegt in der Einfachheit und der direkten physikalischen Interpretierbarkeit.

Wird das einfache RC-Ersatzschaltbild zur Beschreibung vom Dielektrikum verwendet, dann steht der Widerstand für den Stromfluss und somit auch für die Leitfähigkeitsverluste im Dielektrikum. Die ideale Kapazität spiegelt die momentane Dielektrizitätskonstante wieder. Das einfache Parallel- oder Reihen-RC-Ersatzschaltbild, wie in der Abbildung 3.4 dargestellt, ist allerdings nicht in der Lage einen großen Frequenzbereich oder Parameterbereich ausreichend genau zu beschreiben.



Abb. 3.4: Einfaches Ersatzschaltbild einer RC-Parallelschaltung und -Reihenschaltung.

Setzt man die komplexe Impedan
z $\underline{Z}_s=\underline{Z}_p$ und den Verlustfaktor $\tan\delta_s=\tan\delta_p$ gleich,

dann kann die serielle RC-Schaltung in die parallele RC-Schaltung mit den Gleichungen

$$R_{p} = R_{s} \left(1 + \left(\frac{X_{Cs}}{R_{s}} \right)^{2} \right)$$
$$X_{Cp} = X_{Cs} \left(1 + \left(\frac{R_{s}}{X_{Cs}} \right)^{2} \right) \text{ mit } X_{C} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$
(3.26)

umgerechnet werden. Für Materialien, die keine ausgeprägten Polarisationsmechanismen besitzen, wie z. B. Mineralöl, kann dieser Ansatz im Frequenzbereich von wenigen mHz bis zu kHz verwendet werden. Das Modellieren wird nur dann erschwert, wenn der Widerstand oder die Kapazität von weiteren Parametern abhängt. Hierzu gehören vor allem die Einflüsse durch die Temperatur oder durch die Alterungsmechanismen.

RC-Polarisationsersatzschaltung

Zur Beschreibung von Materialien mit Polarisationsmechanismen, kann die einfache RC-Parallel-Ersatzschaltung durch eine Parallelschaltung von mehreren RC-Glieder erweitert werden. Die Abbildung 3.5 zeigt die Parallelschaltung von mehreren RC-Seriengliedern, die zur Beschreibung der Polarisationsmechanismen verwendet wird. Eine wichtige Bedingung ist hierbei, dass das Material ein lineares Polarisationsverhalten aufweist.

Das Ersatzschaltbild besteht aus der Vakuumkapazität C_0 und dem Isolationswiderstand R_{∞} . Die Erhöhung der Kapazität durch Polarisationsmechanismen wird durch die Parallelschaltung von RC-Gliedern angenähert, dabei entspricht $\tau_i = R_i \cdot C_i$ der Relaxationszeitkonstante für einen Polarisationsmechanismus mit dem Index *i*.



Abb. 3.5: RC-Netzwerk höherer Ordnung

Viele Polarisationsvorgänge liegen außerhalb des Messbereichs und müssen nicht als einzelne Relaxationszeitkonstanten betrachtet werden. Man kann diese RC-Glieder und die Vakuumkapazität C_0 durch eine instantane Kapazität $C_{\infty} = \varepsilon_{\infty}C_0$ zusammenfassen, die auch als *Hochfrequenzkapazität* bezeichnet wird [37, S. 254-262]. Die restlichen RC-Glieder für die Polarisation *i* beschreiben die langsamen und im Messbereich liegenden Polarisationsmechanismen, wie es in Gleichung (3.10) beschrieben ist.

Welche Informationen in diesen Polarisationsmechanismen stecken, kann mit Hilfe von Materialmessungen im Frequenz- oder Zeitbereich analysiert werden. Ein Spannungssprung $U_0 \cdot s(t)$ ergibt die folgende zeitliche Stromantwort i(t):

$$i(t) = \left(\frac{1}{R_{\infty}} + \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{1}{R_{i}} \cdot e^{-\frac{t}{R_{i}C_{i}}}\right)\right) \cdot U_{0} \cdot s(t) + \varepsilon_{\infty}C_{0} \cdot \delta(t) \cdot U_{0}.$$
(3.27)

 $\delta(t)$ ist der Dirac-Impuls. Analog dazu ist die Systemantwort im Frequenzbereich

$$\underline{i}(\omega) = \left(\frac{1}{R_{\infty}} + \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\mathbf{j}\omega C_{i}}{1 + \mathbf{j}\omega R_{i}C_{i}}\right)\right) \cdot \underline{U}(\omega) + \mathbf{j}\omega\varepsilon_{\infty}C_{0}\underline{U}(\omega).$$
(3.28)

Mit der dielektrischen Systemantwort im Zeitbereich oder Frequenzbereich werden die einzelnen RC-Glieder ermittelt. Die Anzahl der RC-Glieder hängt von der Relaxationszeitverteilung ab. Je breiter die Verteilung ist desto mehr RC-Glieder müssen verwendet werden, was auch die Parameterzahl erhöht. Bisher wird oft eine feste Anzahl von RC-Gliedern verwendet und die Polarisationskonstante τ auf den Messbereich logarithmisch oder linear verteilt. Die Modellierung und Parametergenerierung kann bei Houhanessian [30, S. 18ff.] detailierter nachgelesen werden.

Die aus der Systemantwort generierten Ersatzelemente bilden nur die Messung ab und können keinem Polarisationsmechanismus direkt zugeordnet werden. Die Zuordnung der Einflussparameter wie Feldstärke, Temperatur oder Materialzustand auf die Veränderung der einzelnen Kapazitäten C_i oder Widerstände R_i ist kaum möglich. Hingegen können für C_{∞} und R_{∞} zum Teil die Einflussparameter zugeordnet werden. Bei der Analyse werden Vergleichsproben verwendet, um so den Zustand des Materials abzuschätzen.

Isolationsschichtmodell mit RC-Ersatzschaltungen

Zur Modellierung des dielektrischen Systemverhaltens bei mehreren parallelen und seriellen Materialschichten, werden die RC-Ersatzschaltungen, wie oben beschrieben, zu einem RC-Netzwerk zusammengeführt.



Abb. 3.6: RC-Netzwerk und schematischer Isolationsaufbau zwischen US- und OS- Wicklung.

Die Abbildung 3.6(a) zeigt einen schematischen Isolationsaufbau zwischen der US- und OS-Wicklung eines Transformators. Der Isolationsaufbau besteht aus Pressboard-Barrieren, welche die Ölstrecke zwischen OS- und US-Wicklung unterteilen. Zur Abstützung der Barrieren und auch der außen liegenden Wicklung dienen Leisten aus Pressboard.

Da der Durchmesser der Wicklungen viel größer ist als der Wicklungsabstand, wird angenommen, dass zwischen US- und OS-Wicklung beim Anlegen einer Messspannung ein homogenes Feld vorliegt. Die Wicklungen werden als Kondensatorplatten angesehen. Randfelder oder Oberflächeneffekte werden vernachlässigt. Mit dieser Idealisierung kann der Isolationsaufbau vereinfacht werden, in dem alle Leisten, Öl-Kanäle und Pressboards zusammengefasst werden. Wir erhalten somit ein vereinfachtes Isolationsschichtmodell wie in Abbildung 3.6(b) dargestellt.

Für jedes verwendete Material wird eine geeignete RC-Schaltung aus der Datenbank zugeordnet, die über Materialmessungen ermittelt wurde. Das Öl-Systemverhalten wird mit einer Parallelschaltung vom Widerstand R_l und einer Kapazität C_l nachgebildet. Das Pressboard und die Leisten werden mit einer Parallelschaltung von mehreren RC-Seriengliedern modelliert. Zusammengesetzt erhält man ein komplettes RC-Netzwerk, wie in Abb. 3.6(b) dargestellt. Wenn alle RC-Parameter bekannt sind, dann kann die Systemantwort im Frequenz- oder Zeitbereich ermittelt und mit einer Originalmessung am Transformator verglichen werden.

Aus heutiger Sicht werden zur Diagnose von Leitungstransformatoren überwiegend noch die RC-Modelle verwendet. Der Vorteil liegt in der graphischen Darstellung und der einfachen Handhabung der RC-Parameter. Mit einem bekannten Isolationsaufbau können die RC-Parameter aus Vergleichsproben errechnet werden, und somit der Zustand des Isolationssystems abgeschätzt werden. In der Praxis zeigt sich, dass der notwendige Isolationsaufbau oft nicht zur Verfügung steht, aber auch die Modellierung mit RC-Netzwerken unübersichtlich wird und auf Grenzen stößt, die die Zustandsdiagnose erschweren oder sogar zu Fehlinterpretationen führen. Hinzu kommt, dass der Einfluss der Messtemperatur bei der RC-Modellierung und -Analyse nur zum Teil berücksichtigt wird. Weitere chemische und mechanische Alterungserscheinungen in der Transformatorisolation können nur zum Teil oder gar nicht analysiert werden. Der Grund dafür ist, dass keine geeigneten Vergleichsproben in einer Materialdatenbank vorliegen. Zusätzlich können die Messgenauigkeiten und Messfehler durch äußere Umwelteinflüsse die Analyse erschweren.

3.2.2 Debye-Relaxationsmodell

Debye betrachtete in seiner Veröffentlichung [11] entkoppelte Dipole in zähflüssigen Materialien. Die Sprung-Antwortfunktion im Zeitbereich eines einzelnen Dipols wird beschrieben mit

$$f(t) = \frac{\Delta\varepsilon}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$
(3.29)

Für die genaue Herleitung der Debye-Gleichungen sei auf die Literatur [46, S. 30-34] verwiesen. Die Zeitkonstante τ in Gleichung (3.29) wird als Relaxationszeitkonstante bezeichnet. Mit Hilfe der Fourier-Transformation kann die Antwortfunktion (3.29) vom Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt werden, und es ergibt sich die komplexe Debye-Relaxationsfunktion bzw. komplexe Debye-Funktion. Mit der Debye-Funktion wird *ein Relaxationsverhalten* der komplexen Dielektrizitätszahl $\underline{\varepsilon}$ über der Frequenz $f = \omega/2\pi$ nachgebildet:

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' - \mathbf{j}\varepsilon'' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + \mathbf{j}\omega\tau}$$
(3.30)

ε_{∞}	instantane Polarisation,
$\Delta \varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$	Dielektrizitätsänderung der Relaxation,
au	Relaxationszeitkonstante in s.

Die instantane Polarisation ε_{∞} steht für die Polarisationsmechanismen bei hohen Frequenzen, die nicht mehr im Frequenzbereich der Messung liegen und als konstant angesehen werden. Der zweite Term mit τ und $\Delta \varepsilon$ steht für einen Polarisationsmechanismus, der innerhalb des Messbereichs liegt. Die Relaxationszeitkonstante gibt Auskunft über die Polarisationsart. Der Faktor $\Delta \varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}$, ist die Differenz zwischen der Dielektrizitätszahl bei 0 Hz und der instantanen Polarisation und steht für die Intensität der Polarisation. Wird $\underline{\varepsilon}$ in Realteil und Imaginärteil zerlegt, so lautet der Realteil

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta \varepsilon}{1 + \omega^2 \tau^2} , \qquad (3.31)$$

und für den Imaginärteil folgt

$$\varepsilon'' = \frac{\omega \tau \cdot \Delta \varepsilon}{1 + \omega^2 \tau^2} \,. \tag{3.32}$$

Diese beiden Gleichungen für die Frequenzabhängigkeit des Real- bzw. Imaginärteils der Dielektrizitätszahl im elektrischen Wechselfeld sind als Debye-Gleichungen bekannt. Die Debye-Gleichung ist mit einer Zeitkonstanten dargestellt. Die Zeitkonstante bezeichnet den Punkt an dem der Imaginärteil ein Minimum und der Realteil einen Wendepunkt hat. Der Verlauf des Imaginärteils ist dabei symmetrisch, um den Frequenzpunkt $\omega_0 = 2\pi \cdot \frac{1}{\tau}$ angeordnet [46, S. 34]. Die Abbildung 3.7 zeigt den Debye-Verlauf mit Real- und Imaginärteil in der Nyquist-Darstellung und über die Frequenz. Bei der Nyquist-Darstellung ergibt sich ein exakter Halbkreis.



Abb. 3.7: Verlauf einer Debye-Funktion.

Das Debye-Relaxationsmodell kann mit einem RC-Netzwerk modelliert werden. Prinzipiell entspricht es einer Parallelschaltung einer Kapazität und eines seriellen RC-Gliedes. Die Kapazität entspricht der instantanen Polarisation, und das serielle RC-Glied steht für einen Polarisationsmechanismus.

Bei mehreren Zeitkonstanten ist eine Summe von Debye-Funktionen erforderlich. Ähnlich dem RC-Netzwerk kann dieses allerdings zu einer unübersichtlichen Darstellung führen. Hinzu kommt, dass die meisten Materialien kein ideales Verhalten aufzeigen und die Relaxationszeitkonstante eine Verteilung mit unterschiedlicher Intensität der Relaxationen ist. Abhilfe schafft hier der Übergang zu einer Relaxationszeitverteilung in Abhängigkeit von τ [54, S. 12].

3.2.3 Modelle mit Relaxationszeitverteilung

Modelle mit Relaxationszeitverteilungen ermöglichen die Nachbildung des dielektrische Verhaltes von Materialien, die mehrere Relaxationsmechanismen mit unterschiedlicher Intensität haben. Die normierte Gewichtungsfunktion $G(\log \tau)$, auch als Dichtefunktion der Relaxationszeit bezeichnet, repräsentiert den Anteilsfaktor an der Dielektrizitätsveränderung $\Delta \varepsilon$ zum Relaxationszeitpunkt $\tau > 0$ [46, S. 35], [65]. Die Gewichtungsfunktion ist auf *eins* normiert:

$$\int_0^\infty G(\log \tau) d \, \log \tau = 1 \,. \tag{3.33}$$

Der Verlauf der Gewichtungsfunktion über τ fasst alle Relaxationsmechanismen zusammen. Wird die Debye-Gleichung im Zeitbereich (3.29) und im Frequenzbereich (3.30) mit $G(\log \tau)$ erweitert, erhalten wir für den Zeitbereich

$$f(t) = \Delta \varepsilon \int_0^\infty G(\log \tau) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdot d \,\log \tau \,. \tag{3.34}$$

Für den Frequenzbereich gilt

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon_{\infty} + \Delta \varepsilon \int_{0}^{\infty} \frac{G(\log \tau)}{1 + j\omega\tau} \cdot d \log \tau \,. \tag{3.35}$$

Wie zu sehen ist, ändert sich die Debye-Gleichung dahingehend, dass das Integral über die Gewichtungsfunktion zusätzlich eingesetzt wird. Für nur eine Relaxationszeit τ_1 geht die Gleichung (3.35) in die Debye-Gleichung über, da $G(\log \tau_1) = \delta(\log \tau_1)$ ist.

Die Funktion $G(\log \tau)$ beinhaltet alle Informationen, welche durch Relaxationsprozesse erzeugt werden. Somit hängt $G(\log \tau)$ auch von Parametern ab, die die Polarisationsprozesse beeinflussen, wie z. B. Alterung und Temperatur. Für die Analyse spielt der Verlauf der Relaxationszeitverteilungen eine zentrale Rolle, um so materialspezifische Veränderungen und Eigenschaften zu erkennen.

Es gibt verschiedene Methoden im Zeitbereich und Frequenzbereich, um die Relaxationszeitverteilungen aus Messungen zu identifizieren und darzustellen.

Die Identifikationsmethoden von [40] und [51] beruhen auf numerischen Verfahren, mit denen die Messungen im Zeitbereich ausgewertet werden können. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt stark von der Messgenauigkeit und der Anzahl der Messpunkte ab. Ob diese Methode für die PDC-Analyse (siehe Abschnitt 3.3.4) geeignet ist, muss noch näher untersucht werden.

In [65] wird ein Identifikationsverfahren vorgestellt, das die Relaxationszeitverteilungen aus einer Frequenzmessung ermittelt. Das Prinzip basiert auf einer Summe von Debye-Funktionen, wobei die Relaxationszeiten festgelegt werden und die Dielektrizitätsänderung $\Delta \varepsilon_i$ einer Debye-Funktion *i* mit der Least-Square-Methode approximiert wird. Um die Qualität der Ergebnisse zu verbessern, wird in diesem Verfahren die Monte-Carlo-Technik [13] angewendet. Hierbei wird die Anzahl der diskreten τ_i -Werte situationsabhängig verändert, um so die Genauigkeit der approximierten Gewichtungsfunktion zu verbessern.

Um Frequenzmessungen anzunähern, werden zahlreiche empirische Funktionen verwendet, wie z. B. die Cole-Cole-Funktion, die Cole-Davidson-Funktion, die Havriliak-Negami-Funktion oder die Kirkwood-Fuoss-Funktion. Für die Annäherung der Verläufe mit Kirkwood-Fuoss-Funktionen sei auf [39] verwiesen. Für eine kurze Zusammenfassung der weiteren Modelle von Jonscher, Chew und Sen, Bergmann, Keither und Rosenberg sei auf [65] verwiesen. Die hier verwendeten Frequenzmodelle basieren auf der empirischen Havriliak-Negami-Funktion [26].



Abb. 3.8: Darstellung der unterschiedlichen empirischen Frequenzmodelle.

Die schematischen Verläufe der komplexen Dielektrizitätsfunktion mit der empirischen Debye-Funktion, Cole-Cole-Funktion und der Cole-Davidson-Funktion sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Der komplexe Verlauf entsteht durch die unterschiedliche Annahme von $G(\log \tau)$, die symmetrisch bei der Cole-Cole-Funktion und asymmetrisch bei der Cole-Davidson-Funktion ist.

Cole-Cole-Funktion

K. S. Cole und R. H. Cole haben im Jahr 1941 empirische Ansätze [10] für ein komplexes Dielektrizitätsverhalten $\underline{\varepsilon}(\omega)$ veröffentlicht:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + (\mathbf{j}\omega\tau)^{n_{\alpha}}}$$
(3.36)

 $\begin{aligned} \varepsilon_{\infty} &\in [1,\infty[& \text{instantane Polarisation,} \\ \Delta \varepsilon &\in [0,\infty[& \text{Dielektrizitätsänderung der Relaxationen,} \\ \tau &\in [0,\infty[& \text{Relaxationszeitkonstante in s und} \\ n_{\alpha} &\in]0,1] & \text{symmetrischer Verteilungsexponent.} \end{aligned}$

Mit dieser Funktion wird das Verhalten durch eine symmetrische Gewichtungsfunktion G(s) mit $s = \log(\tau/\tau_0)$ nachgebildet, die das Maximum bei der Relaxationszeit τ_0 hat. n_{α} beeinflusst die Breite der Gewichtsfunktion. Bei $n_{\alpha} = 1$ enspricht die Cole-Cole-Funktion einer Debye-Funktion und somit kann es einem Relaxationsverhalten zugeordnet werden. Wenn der Exponent n_{α} zwischen 0 und 1 liegt, dann wird der Halbkreis symmetrisch gestaucht (siehe Abb.: 3.9). Hiermit werden mehrere Relaxationszeitkonstanten simuliert, die symmetrisch um τ_0 angeordnet sind. Die Verkleinerung von n_{α} ist ein Maß für Inhomogenität im Material und Messaufbau. Beschränkt man sich auf Messaufbau bedingt sind, so kommt nur die Inhomogenität der Leitfähigkeit und zum Teil Orientierungspolarisationseffekte als Ursache dafür in Frage.

Die Abbildung 3.9 zeigt den grundsätzlichen Verlauf der Cole-Cole-Funktion bei konstanter Relaxationszeit τ und bei verschiedenen n_{α} . Abgesehen von ε_{∞} steht der Imaginärteil und



Abb. 3.9: Cole-Cole-Funktion mit fallendem Exponenten.

der Realteil über die Kramers-Kronig-Beziehung im Zusammenhang (siehe Anhang A.4). Somit kann die Messung mit dem Realteil und Imaginärteil kontrolliert und analysiert werden.

Die Gewichtungsfunktion G(s) der Cole-Cole-Funktion ist symmetrisch zur Relaxationszeit τ_0 und kann ausgedrückt werden als:

$$G(s) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin((1 - n_{\alpha})\pi)}{\cosh(n_{\alpha}s) - \cos(n_{\alpha}\pi)},$$
(3.37)

wobei $s = \log(\tau/\tau_0)$ ist. Die Gewichtungsfunktion lässt sich mit unendlich vielen Relaxationszeitkonstanten darstellen und durch eine endliche Anzahl von Zeitkonstanten τ_i annähern. Als geeignet erweist sich eine ungerade Anzahl von Zeitkonstanten, die symmetrisch um das Maximum angeordnet werden.



Abb. 3.10: Gewichtungsfunktion G(s) in Abhängigkeit von n_{α} .

Die Gewichtungsfunktion G(s) nach Gleichung (3.37) ist in der Abbildung 3.10 für $n_{\alpha} = 0, 9, n_{\alpha} = 0, 8$ und $n_{\alpha} = 0, 7$ dargestellt. Hierbei ist die Symmetrie und der Zusammenhang zwischen n_{α} und der Verteilungsbreite graphisch zu erkennen. Probleme ergeben sich wenn die Belavationsverteilung eines Materials nicht symmetrisch

Probleme ergeben sich, wenn die Relaxationsverteilung eines Materials nicht symmetrisch, sondern asymmetrisch verteilt ist.

Cole-Davidson-Funktion

R. H. Cole und D. W. Davidson [9] haben eine weitere empirische Ansatz für komplexe Dielektrizitätsverläufe $\underline{\varepsilon}(\omega)$ entwickelt. Der Funktionsaufbau ist ähnlich der Cole-Cole-Funktion. Sie unterscheidet sich im Nenner mit dem Exponenten n_{β} und lautet:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon}{(1 + \mathbf{j}\omega\tau_0)^{n_{\beta}}}$$
(3.38)

ε_{∞}	$\in [1,\infty[$	instantane Polarisation,
$\Delta \varepsilon$	$\in [0,\infty[$	Dielektrizitätsänderung der Relaxationen,
au	$\in [0,\infty[$	Relaxationszeitkonstante in s und
n_eta	$\in \left]0,1\right]$	asymmetrischer Verteilungsexponent.

Durch den Exponenten n_{β} wird eine asymmetrische Gewichtungsfunktion G(s) mit $s = \log(\tau/\tau_0)$ nachgebildet. Die Cole-Davidson-Funktion reduziert sich zur Debye-Funktion, wenn $n_{\beta} = 1$ ist. In der Abbildung 3.11 ist der Einfluss des Exponentes n_{β} auf $\underline{\varepsilon}(\omega)$ dargestellt.



 ${\bf Abb. \ 3.11: \ Cole-Davidson-Funktion \ mit \ fallendem \ Exponenten.}$

Durch die Verkleinerung des Exponenten wird der symmetrische Verlauf zunehmend asymmetrisch. Die zugehörige Gewichtungsfunktion G(s) nach [46, S. 39] lautet

$$G(s) = \begin{cases} \frac{\sin(n_{\beta}\pi)}{\pi} \left[\frac{10^{s}}{1-10^{s}}\right]^{n_{\beta}} & s < 0\\ 0 & s \ge 0 \end{cases}$$
(3.39)

wobei

$$s = \log(\tau/\tau_0)$$

ist. Wie in der Gleichung zu erkennen ist, handelt es sich um eine unstetige Funktion. Unstetige Funktionen erhöhen grundsätzlich den Arbeitsaufwand vor allem bei der Programmierung und der Simulation. Im experimentellen Teil dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die Modellierung vom Öl-Papier-Isolationssystem mit asymmetrischer Verteilung nicht notwendig war.

Havriliak-Negami-Funktion

Havriliak und Negami haben in ihren Veröffentlichungen [26] und [55] die Cole-Cole-Funktion und Cole-Davidson-Funktion zusammengeführt. Ihre kombinierte empirische Dielektrizitätsfunktion lautet:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon}{\left[1 + (\mathbf{j}\omega\tau_0)^{n_{\alpha}}\right]^{n_{\beta}}}, \qquad (3.40)$$

ε_{∞}	$\in \left]1,\infty\right[$	instantane Polarisation,
$\Delta \varepsilon$	$\in [0,\infty[$	Dielektrizitätsänderung der Relaxationen,
au	$\in [0,\infty[$	Relaxationszeitkonstante,
n_{lpha}	$\in \left]0,1 ight]$	symmetrischer Verteilungsexponent und
n_{eta}	$\in \left]0,1\right]$	asymmetrischer Verteilungsexponent.

Diese Relaxationsfunktion hat zwei wesentliche Eigenschaften: Erstens deckt sie ein großes Spektrum an gemessenen komplexen Dielektrizitätsverläufen ab. Zweitens die Funktion beinhaltet alle bisher beschriebenen Funktionen [55, S. 162]. Zum Beispiel erhält man die Debye-Funktion, wenn alle Exponenten $n_{\alpha} = n_{\beta} = 1$ sind. Die Cole-Cole-Funktion ergibt sich mit $n_{\beta} = 1$ und $0 < n_{\alpha} \leq 1$.

Die allgemeine Gewichtungsfunktion für die Havriliak-Negami-Funktion nach [65] ist

$$G(s) = \frac{10^{sn_{\alpha}n_{\beta}}\sin(n_{\beta}\Theta)}{\pi(10^{2sn_{\alpha}} + 2 \cdot 10^{sn_{\alpha}}\cos(n_{\alpha}\pi) + 1)^{\frac{n_{\beta}}{2}}}$$
(3.41)

 mit

$$\Theta = \arctan\left[\frac{\sin(n_{\alpha}\pi)}{10^{sn_{\alpha}} + \cos(n_{\alpha}\pi)}\right] \quad \text{und} \quad s = \log(\tau/\tau_0)$$

gegeben. Im Rahmen dieser Arbeit ist allerdings nie der Fall eingetreten, dass eine asymmetrische Zeitverteilung bei Öl-Papier-Isolationssystemen benötigt wurde. Meistens konnte der gemessene Verlauf mit einer Summe von wenigen Cole-Cole-Funktionen nachgebildet werden. Somit ist die Cole-Cole-Funktion mit der zugehörigen Gewichtungsfunktion eine elementare Funktion, um die dielektrische Eigenschaften von Öl und Cellulose nachzubilden.

3.2.4 Modelle mit RQ-Elementen

Das RQ-Element besteht aus einer Parallelschaltung eines Konstantphasenelements (CPE) und eines Widerstandes. Für n = 1 entspricht das Konstantphasenelement einer Kapazität Q = C, für n = 0 einem Widerstand Q=1/R und für n = -1 einer Induktivität Q=1/L. Speziell für n = 1 ist das RQ-Element eine RC-Parallelschaltung (siehe Abb.:3.4). Das Konstantphasenelement ist ein analytisches Element, das nur in einigen Spezialfällen eine direkte physikalische Bedeutung besitzt. Mit dem RQ-Element können symmetrisch gestauchte Halbkreise in der Ortskurvendarstellung erzeugt werden, genau wie bei der Cole-Cole-Funktion. Der Exponent n ist hierbei ein Maß für die Breite der Gewichtungsfunktion, was auch der elektrischen Inhomogenität entspricht. Ein Darstellung der Impedanz eines **RQ-Elemtents** ist durch

$$\underline{Z}_{RQ}(\omega) = R_{\infty} + \frac{R - R_{\infty}}{1 + (j\omega)^n RQ}$$
(3.42)

gegeben [46, S. 93]. Für die Zeitkonstante τ_0 und die Kreisfrequenz ω gilt:

$$\tau_0 = (RQ)^{1/n}$$
 und $\omega = 2\pi f$.

Der Vorteil des RQ-Glieds liegt darin, dass man sich ein aufwändiges RC-Netzwerk erspart. Ein RQ-Element kann theoretisch durch unendlich viele RC-Glieder nachmodelliert oder durch endlich viele RC-Glieder angenähert werden [29, S. 26].

Das Modell mit dem RQ-Elementen ist für "niederohmige" Systeme geeignet. Für Messungen am Dielektrikum wird oft die komplexe Kapazität gemessen, die mit einer komplexen Dielektrizitätszahl beschrieben wird. Im Prinzip ist diese Methode äquivalent zu Gleichung (3.36). Ein Unterschied zwischen beiden Methoden liegt darin, dass das RQ-Element einen rein analytischen Ausdruck darstellt. Hingegen stellt die Cole-Cole-Funktion die Beziehung zwischen Polarisationsmechanismen im Material her und die physikalischen Materialeigenschaften werden in der Gleichung verwendet.

3.3 Messverfahren zur Materialanalyse und dielektrischer Diagnose

Zur Analyse werden verschiedene Mess- und Diagnoseverfahren verwendet. Zunächst soll eine kurzer Überblick über die hauptsächlich verwendeten Messverfahren zur Materialanalyse und deren physikalischen Prinzipie gegeben werden. Diese Kenntnis ist für den Anwender notwendig, um die Messergebnisse besser beurteilen zu können.

Danach werden weitere gängige Diagnosemessverfahren vorgestellt, die zur Transformatoranalyse verwendet werden. Hiermit soll der Leser einen kleinen Einblick erhalten, welche alternativen Offline-Messungen es gibt. Als Anmerkung soll noch erwähnt werden, dass die PDC-Messung die Messung im Zeitbereich und die FDS-Messung im Frequenzbereich ist. Beide Messverfahren liefern -mathematisch betrachtet- identische Ergebnisse (vgl. Abschnitt 3.1.3).

3.3.1 Karl-Fischer-Titrationsverfahren

Im Jahr 1935 wurde von Karl Fischer erstmals das Titrationsverfahren (KF-Titration) als "Neues Verfahren zur maßanalytischen Bestimmung des Wassergehaltes von Flüssigkeiten und festen Körpern" publiziert [17]. Der Ausgangspunkt für die Entwicklung des Karl-Fischer-Titrationsverfahrens war die Bunsen-Reaktion, bei der Jod und das Schwefeldioxid unter Anwesenheit von Wasser oxidiert:

$$2\mathrm{H}_2\mathrm{O} + \mathrm{SO}_2 + \mathrm{J}_2 \to \mathrm{H}_2\mathrm{SO}_4 + 2\mathrm{HJ} \quad \text{(ohne Alkohol)}. \tag{3.43}$$

Weitere Forschungsarbeiten von Smith, Bryant und Mitchell [59] klärten Unklarheiten des Reaktionsmechanismus und verbesserten somit das Titrationverfahren. Hinzu kam, dass die Entwicklung des Titrationsgerätes rasch fortgeschritten war, die zum einen den Messaufbau und zum andern die Genauigkeit der Messung optimierten. Das Karl-Fischer-Titrationsverfahren beruht darauf, dass das Wasser in einer Probe mit einer Base-Alkohol-Lösung aus Jodid-Ionen prinzipiell nach Reaktionsgleichung (3.43) reagiert. Durch die anodische Oxidation von Jodid wird das erforderliche Jod erzeugt, und die Ladung Q an der Arbeitselektrode gemessen. Ein Mol Jod reagiert stöchiometrisch mit einem Mol Wasser. Somit kann der Wassergehalt mit der gemessenen Ladung und der Gleichung (3.44) bestimmt werden.

Die hierfür eingesetzten Geräte besitzen zwei Elektrodenpaare. Die Arbeitselektrode erzeugt das Jod und misst die benötigte Ladungsmenge.

Die Messelektrode wird zur Prüfung des Endpunkts benötigt, ob das erzeugte Jod abgebaut werden kann oder in der Lösung verbleibt. Mit dem Faradayschen Gesetz

$$Q = I \cdot t = m/M \cdot z \cdot F \tag{3.44}$$

- Q Ladung,
- I Titrationsstrom,
- t Zeit,
- m Masse des umgesetzten Wassers,
- M Molmasse des Wassers,
- z stöchiometrische Wertigkeit und
- F Faraday-Konstante

werden aus der zugeführten elektrischen Ladungsmenge die Menge des elektrochemisch erzeugten Jods berechnet. Gemäß der Karl-Fischer-Reaktionsgleichung lässt sich daraus die umgesetzte Wassermenge bestimmen. Wichtige Voraussetzungen für die Genauigkeit der Messung ist es, den Strom und die Zeit exakt zu bestimmen. Deshalb müssen die Elektroden eine definierte Geometrie und räumliche Anordnung besitzen, damit der Stromfluss und somit die Ladung genau gemessen werden können. So weist die Anode eine große Oberfläche auf, die Kathode dagegen besteht aus einem dünnen Platindraht.

Für die Bestimmung des Wassergehalts der Ölproben wurde ein Aquameter KFM 1000 der Fa. BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH und bei der Feststoffprobe ein Aqua 40.00 der Fa. Analytik Jena AG verwendet. Beide arbeiten nach dem Karl-Fischer-Titrationsverfahren. Bei KFM 1000 wird die Probe direkt in die Lösung gespritzt und beim Aqua 40.00 wird der Wasserdampf in die Lösung geleitet.

In der Arbeit wurde das coulometrischen Titrationsverfahren nach EN60814 (VDE 0370-20) angewendet. Die genaue Reaktionsgleichung sowie Messaufbau und Messverfahren können in der Norm nachgelesen werden. Zur Bestimmung des Mineralöls wurde das *Direkte Titration von niedrigviskosen Flüssigkeiten* verwendet und der relative Wassergehalt mit der folgenden Formel berechnet:

$$W_{ppm} = \frac{m}{M}$$

 $\begin{array}{ll} W_{ppm} & \mbox{relativer Wassergehalt in ppm, } \mbox{mg/kg oder } \mbox{\mug/g}, \\ m & \mbox{Menge des titrierten Wassers in } \mbox{\mug}, \\ M & \mbox{Masse an Isolierflüssigkeit in g}. \end{array}$

Im Gegenzug wurde das imprägnierte Transformerboard oder Papier in einem Heizgefäß nahe dem Karl-Fischer-Gerät erhitzt. Der ausgetriebene Wasserdampf wird mit Hilfe eines Stromes trockenen Stickstoffes quantitativ in das Titrationsgefäß überführt und der Wassergehalt in Massenprozent $W_{\%}$ mit der Formel:

$$W_{\%} = \frac{m_2 - m_1}{M} \cdot 10^{-4}$$

bestimmt. Dabei ist:

 $W_{\%}$ Wassergehalt in Massenprozent %,

- m_1 die bei der Blindtitration gemessene Masse des Wassers in mg,
- m_2 die bei der Titration der Probe gemessene Masse des Wassers in mg,

M die Masse der Papierprobe in g.

Dieses Verfahren wird in der Norm als Verdampfungsverfahren bezeichnet. Nach EN60814 (VDE 0370-20) müsste die Ausheizung bei 130-140 °C vorgenommen werden, hier wurde die Ausheiztemperatur auf 200 °C gesetzt. Bei 200 °C geht die Messung schneller und liefert außerdem zuverlässige Ergebnisse [8].

3.3.2 Messung des durchschnittlichen viskosimetrischen Polymerisationsgrades \overline{DP}_v

In IEC 60450:2004 (VDE 0311-21) wird die Bestimmung des durchschnittlichen viskosimetrischen Polymerisationsgrades (\overline{DP}_v -Wert) von neuen und gealterten cellulosehaltigem Elektroisolierstoffen beschrieben.

Der \overline{DP}_v -Wert gibt die Anzahl der β -Glukose-Monomere $C_6H_{10}O_5$ ohne Wasser im Cellulosemolekül an. Diese Größe gibt Auskunft über den Zersetzungsgrad einer Cellulose und somit in welchem Alterungszustand die Cellulose sich befindet. Bei neuwertigem bzw. ungebrauchtem Papier liegt der \overline{DP}_v -Wert über 1000 und bei stark gealterten unter 150.

Zur Bestimmung des \overline{DP}_v -Werts wird ein indirektes Messverfahren verwendet, das zunächst die spezifische Viskosität ν_s eines gelösten Papiers in Kupferethylendiaminhydroxid (Cuen) ermittelt.

$$\nu_s = \frac{\text{Viskosität der Papierlösung} - \text{Viskosität des Lösungsmittels}}{\text{Viskosität des Lösungsmittels}}$$

Mit Hilfe der spezifischen Viskosität ν_s und der Konzentration c der Lösung wird die Grenzviskosität wie folgt berechnet:

$$\nu = \lim_{c \to 0} \left(\frac{\nu_s}{c} \right).$$

Um die Grenzviskosität zu errechnen, wird eine empirische Formel nach Norm verwendet

$$\nu_s = \nu \cdot c \cdot 10^{k \cdot \nu \cdot c},$$

wobei k die Martinsche Konstante ist und für Isolierpapier k = 0, 14 beträgt. Der Wert von $\nu \cdot c$ kann mit einem Näherungsverfahren, wie z. B. Newtonsches Iterationsverfahren, errechnet oder aus einer graphischen Darstellung der empirischen Formel abgelesen werden.

Der durchschnittliche viskosimetrische Polymerisationsgrad \overline{DP}_v steht zur Grenzviskosität in folgender Beziehung:

$$\nu = K \cdot \overline{DP}_v^{\alpha}$$

wobei K und α charakteristische Koeffizienten nach Mark Houwink des Polymer-Lösungssystems und des Monomers sind. Für das Isolierpapier-Cuen-Lösungssystem sind die Koeffizienten K = 0,0075 und $\alpha = 1$ gegeben.

3.3.3 Bestimmung des Säuregehalts

In der Materialanalyse wird zur Diagnose von Mineralöl und Isoliermaterial der Säuregehalt bestimmt. Grundsätzlich soll ein ungebrauchtes oder neuwertiges Isolieröl auf Mineralölbasis neutral und frei von jeglichen säurehaltigen Verbindungen sein.

Die Deutung der sauren und basischen Eigenschaften führt zu verschiedenen Theorien. Nach *Brönsted* (1923) sind Teilchen, die Protonen abgeben können (Protonendonatoren), Säuren und Teilchen, die Protonen aufnehmen können (Protonenakzepotoren), Basen. Somit beschreibt diese Definition keine Stoffklasse, sondern das Verhalten einer Reaktion, die nur möglich ist, wenn eine Säure und eine Base vorhanden sind. Diese Säure-Base-Reaktionen wird auch als Protolyse bezeichnet. Die Reaktion kann mit neutralen Teilchen oder mit Ionen als Säuren und Basen ablaufen [5, S. 284].

Die Protolyse ist oft ein reversibler Prozess. Zur Neutralisation von sauren Proben wird eine basische Lösung und umgekehrt wird für basische Proben saure Lösungen verwendet. Der Verlauf der Neutralisation lässt sich durch den Verlauf einer Leitfähigkeitsmessung verfolgen. Die Leitfähigkeit von Flüssigkeiten hängt von der Anzahl der Ionen in der Lösung, der Ionenladung und der Beweglichkeit der Ionen ab (vgl. Absch. 3.1.5). Wenn die Probe neutralisiert ist, ist die Leitfähigkeit minimal, da die Anzahl der leitfähigen Ionen durch Säuren oder Basen minimal ist. Die quantitative Bestimmung der Säure- bzw. Basenmenge in der Probe wird durch die Zugabe einer bestimmten basischen bzw. sauren Lösung mit bekannten Gehalt als *Titration* bezeichnet. Das bekannte Lösungsmittel nennt man *Titrationsmittel*. Die Abbildung 3.12 zeigt den schematischen Verlauf der Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Menge des Titrationsmittels, wie z. B. Kaliumhydroxid (KOH) für Isolieröle.



Abb. 3.12: Schematischer Verlauf der Leitfähigkeit in Abhängigkeit eines Titrationsmittels.

Die Bestimmung des Säuregehalts von Isolierflüssigkeiten nach IEC 62021-1:2003 (VDE 0370-31) wird über die pH-Messung mit einen potentiometrischen Titriergerät bestimmt. Bei diesem Verfahren wird Kaliumhydroxid als Titrationsmittel verwendet. Die Öl-Probe wird im Lösungsmittel gelöst und potentiometrisch unter Verwendung einer Glasindikato-relektrode und einer Referenzelektrode titriert. Die Messung ist beendet, wenn die Probe

einen pH-Wert von 11,5 erreicht hat.

Mit Messungen wurde festgestellt, dass dies dem Wendepunkt der Leitfähigkeit des Isolieröls entspricht. Der Vorteil des pH-Grenzwerts liegt in der Reproduzierbarkeit der Messung, vor allem dann, wenn der Wendepunkt sehr schwach ausgeprägt ist, wie beim Isolieröl. Der Säuregehalt wird in ${}^{\rm mg \, KOH/g_{Oel}}$ mit einer Abweichung von 0,01 angegeben und wird auch als Neutralisationszahl (NZ) bezeichnet.

3.3.4 Messverfahren zur dielektrischen Diagnose

Messverfahren, die zur dielektrischen Diagnose verwendet werden, müssen die zur Analyse geforderten dielektrischen Materialeigenschaften erfassen können. Im Abschnitt 3.1.3 ist das dielektrische Systemverhalten im Zeit- und Frequenzbereich beschrieben. Ausgehend von diesem mathematischen Konstrukt sind Messverfahren für die dielektrische Diagnose entwickelt worden, die im Zeit- und Frequenzbereich arbeiten. Im Folgenden soll kurz auf das Prinzip der FDS-Messung (Frequency Domain Spectroscopy) und der PDC-Messung (Polarization and Depolarization Currents) näher eingegangen werden. Weitere Messverfahren zur Diagnose von Leistungstransformatoren und Hochspannungskabeln werden kurz erwähnt.

FDS-Messung

Bei der FDS-Messung wird die Stromantwort i(t) eines kapazitiven Isolationssystems durch das Anlegen einer Wechselspannung u(t) über einen definierten Frequenzbereich erfasst. Die Spannung u(t) wird dazu mit einer definierten Kreisfrequenz $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ und einer Maximalamplitude von \hat{u} auf das zu untersuchende Isolationssystem gegeben. u(t) hat einen Strom i(t) mit der Amplitude \hat{i} zur Folge, der die selbe Frequenz wie die Spannung hat, aber durch das hochohmige System sehr gering und um den Phasenwinkel φ_i verschoben ist. Die Beziehungen zwischen u(t) in V, i(t) in A sind von den dielektrischen Materialeigenschaften abhängig, wie z. B. der Permitivität ε oder Leitfähigkeit σ in ^S/m, und durch die Probengeometrie. Die Erregerspannung wird durch

$$u(t) = \hat{u}\cos(\omega t + \varphi_u) = \Re\left\{\hat{u}\,e^{(j\omega t + \varphi_u)}\right\} = \Re\left\{\underline{u}(t)\right\}$$
(3.45)

beschrieben, die Stromantwort durch

$$i(t) = \hat{i}\cos(\omega t + \varphi_i) = \Re\left\{\hat{i}e^{(j\omega t + \varphi_i)}\right\} = \Re\left\{\underline{i}(t)\right\}.$$
(3.46)

Zwischen den entsprechenden Phasen von u(t) und i(t) herrscht die Phasenverschiebung $\varphi = \varphi_i - \varphi_u$. Da bei der Frequenzgangmessung ω verändert wird, empfiehlt es sich, die komplexe Darstellung des Probenstromes $\underline{i}(\omega)$ und der Spannung $\underline{u}(\omega)$ einzuführen, dabei sind \underline{U} und \underline{I} die komplexen Effektivwerte von Spannung und Strom. Das Verhältnis der komplexen Spannung zur komplexen Stromstärke ergibt die komplexe Impedanz für die jeweilige Frequenz mit

$$\underline{Z}(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) = \frac{\underline{u}(\omega)}{\underline{i}(\omega)} = \frac{\underline{U}(\omega)}{\underline{I}(\omega)}.$$
(3.47)

Die komplexe Kapazität kann mit der komplexen Impedanz für unterschiedlichen Frequenzen mit

$$\underline{C}(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) = \frac{1}{j\omega\underline{Z}(\omega)}$$
(3.48)

berechnet werden. Wie in der Theorie im Abschnitt 3.1.2 gezeigt, ist die Kapazität von den Polarisationseffekten innerhalb des Dielektrikums und von der Leitfähigkeit des Materials abhängig. Der Impedanzverlauf und der komplexe Kapazitätsverlauf stehen somit in direktem Zusammenhang mit der komplexen Dielektrizitätszahl. Mathematisch lässt sich die Beziehung zwischen Dielektrizitätszahl und Kapazität mit

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - \mathbf{j}\varepsilon''(\omega) = \frac{1}{\mathbf{j}\omega\underline{Z}(\omega)} \cdot \frac{1}{C_0}$$
(3.49)

beschreiben. C_0 ist die reale Vakuumkapazität des Isolationssystems oder eine gewählte Referenzkapazität, wie z. B. die Kapazität C_{1000} bei 1000 Hz. Für den Realteil ε' und dem Imaginärteil ε'' der komplexen Dielektrizitätszahl gilt $\varepsilon' > 0$ und $\varepsilon'' > 0$. Der Verlauf der komplexen Dielektrizitätszahl beschreibt somit ein Probenmaterial und seine Eigenschaften können charakterisiert und beurteilt werden (vgl. Abschnitt 3.1.3).

PDC-Messung

Bei der PDC-Messung handelt es sich um eine Sprungantwortmessung im Zeitbereich. Dazu wird ein Spannungssprung auf das Isolationssystem gegeben und der Stromfluss gemessen. Anhand des Verlaufs des Stromes können die Systemeigenschaften des untersuchten Dielektrikums erfasst und analysiert werden [37, S. 411]. In der praktischen Anwendung wird ein Feldsprung $E(t) = E_0 \cdot s(t)$ mit einem Spannungssprung $u(t) = U_0 \cdot s(t)$ an einer Kapazität erzeugt. Die Abbildung 3.13 zeigt den schematischen Verlauf des Spannungssprungs und den resultierenden Stromverlauf. Der resultierende Strom bei anliegender Gleichspan-



Abb. 3.13: Schematischer Verlauf des resultierenden Polarisations- und Depolarisationsstromes nach einem Spannungssprung.

nung wird Polarisationsstrom $i_{pol}(t)$ bzw. Ladestrom genannt. Nach der Aufladezeit t_L der Kapazität wird dieser kurzgeschlossen und der Entladestrom bzw. Depolarisationsstrom gemessen.

Der Stromverlauf ergibt sich aus der Stromdichtegleichung (3.11) mit der Annahme eines homogenen elektrischen Feldsprungs $E(t) = E_0 \cdot s(t)$. Die Stromdichte

$$\vec{J}(t) = \sigma E_0 \cdot s(t) + \varepsilon_0 \varepsilon_\infty E_0 \cdot \delta(t) + \varepsilon_0 f(t) E_0 \cdot s(t)$$
(3.50)

beschreibt die Systemantwort eines linearen Isolationssystems im Zeitbereich für $t \ge 0$. Da ein homogenes Feld angenommen wird, kann die Anordnung als Plattenkondensator mit einer Fläche A und einem Plattenabstand d betrachtet werden. Durch Multiplikation von Gleichung (3.50) mit A erhalten wir

$$i(t) = \varepsilon_0 \cdot A \cdot E_0 \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot s(t) + \varepsilon_\infty \cdot \delta(t) + f(t) \cdot s(t) \right].$$
(3.51)

Wenn das homogene Feld mit $E_0 = U_0/d$ und die Vakuumkapazität mit $C_0 = \varepsilon_0 A/d$ in Gleichung (3.51) eingesetzt werden, dann erhalten wir den Stromverlauf

$$i(t) = C_0 U_0 \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot s(t) + \varepsilon_\infty \cdot \delta(t) + f(t) \cdot s(t) \right]$$
(3.52)

nach einem Spannungssprung U_0 . Der Dirac-Impuls $\delta(t)$ mit dem Verstärkungsfaktor ε_{∞} steht für die schnellen Polarisationsmechanismen. Wie in Abbildung 3.13 zu erkennen ist, wird der Impuls bei einer realen PDC-Messung nicht erfasst, da die Messzeit erst nach der Startzeit t_s beginnt. Die Anteile, die die spezifische Leitfähigkeit σ und der Antwortfunktion f(t) für die langsamen Polarisationsmechanismen abbildet, ist im Polarisationsstrom enthalten. Der Verlauf des Polarisationsstroms für eine reale PDC-Messung lautet für $t_L > t \ge t_s > 0$

$$i_{pol}(t) = C_0 U_0 \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} + f(t) \right] \,. \tag{3.53}$$

Für den Depolarisationsstrom ergibt sich für $t > t_L$ nach [30, S. 13] die folgende Formel

$$i_{depol}(t) = -C_0 U_0[f(t) - f(t + t_L)], \qquad (3.54)$$

wobei t_L der Zeitpunkt ist, zu dem die Kapazität kurzgeschlossen wird und der Depolarisationsstrom erfasst wird.

Beide Gleichungen (3.53) und (3.54) stehen im Zusammenhang mit den Eigenschaften des Dielektrikums. Eine Möglichkeit zur Auswertung einer PDC-Messung bietet die Erstellung eines Ersatzschaltbildes für das Dielektrikum. Dabei können anhand der im Ersatzschaltbild ermittelten Parameter Aussagen über den Zustand des Dielektrikums gemacht werden. Für eine genauere Einführung in diese Methodik sei auf [30] verwiesen.

RVM-Messung

Die RVM-Messung (Recovery Voltage Method) basiert auf den Phänomen der wiederkehrenden Spannung und erfasst langsame Polarisationseffekte [41]. Hierbei wird mit einer Gleichspannungsquelle U_0 die zu untersuchende Kapazität aufgeladen. Nach Ablauf der Ladezeit t_L wird die Kapazität nach der halben Ladezeit $t_k = \frac{1}{2}t_L$ kurzgeschlossen [37, S. 409]. Danach wird der Kurzschluss wieder aufgehoben und die wiederkehrende Spannung gemessen. Eine Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass die Eingangsimpedanz des Messsystems extrem hochohmig ist, da sich sonst das Isolationsystem über die Impedanz des Messsystems entladen würde [37, S. 408]. Die wiederkehrende Spannung beinhaltet die Messinformationen. Ursache für die Rückkehrspannung sind Polarisationseffekte. Besteht beispielsweise ein Dielektrikum aus zwei Medien, so bildet sich an der Grenzfläche zwischen

den Medien eine Ladung. Durch den kurzzeitigen Kurzschluss wird diese Ladung nicht abgebaut. Wird der Kurzschluss wieder aufgehoben bildet sich die Rückkehrspannung aus [37, S. 408/409]. In Abbildung 3.14 ist der Verlauf einer solchen Rückkehrspannung dargestellt.



Abb. 3.14: Entstehung der Rückkehrspannung [37, S. 408].

Die Auswertung kann dann mit Hilfe eines so genannten Polarisationsspektrums erfolgen. Hierzu wird eine ganze Serie von RVM-Messungen durchgeführt. Dabei wird von Messung zu Messung schrittweise die Ladezeit erhöht [41, S. 2], wobei das Verhältnis zwischen Ladezeit t_L und Entladezeit t_k konstant bleibt [37, S. 409]. Bei jeder der einzelnen Messungen wird dabei das Maximum der Rückkehrspannung und deren Anstieg $\frac{dU_R}{dt}$ aufgezeichnet. Anschließend wird das Polarisationsspektrum gebildet, indem das Maximum der Rückkehrspannung über die Ladezeit aufgetragen wird.

Ein Problem bei der RVM-Messung ist der große Zeitaufwand, den die Messung erfordert. Es müssen mehrere Rückkehrspannungen aufgenommen werden. Jede Einzelmessung besteht aus vier Phasen. Zunächst muss in der ersten Phase das Dielektrikum aufgeladen werden (Ladephase). In dieser Ladephase findet auch die Polarisation des Dielektrikums statt. Danach findet die Entladephase statt, in der das Dielektrikum kurzgeschlossen wird. Anschließend wird der Kurzschluss aufgehoben und die Rückkehrspannung aufgezeichnet. Hinzu kommt, dass nach jeder Messung das zu untersuchende Isolationssystem komplett entladen werden muss, um die darauf folgende Messung nicht zu beeinflussen, was auch als Depolarisationsphase bezeichnet wird [37, S. 410].

Kapitel 4

Modelle für Öl-Papier-Isolationssysteme

Um analytische Untersuchungen oder eine Vorhersage des beobachteten Systems zu machen, werden, je nach geforderter Genauigkeit, unterschiedliche Modelle verwendet. Mit einem mathematischen Modell werden die wesentlichen Parameter von natürlichen Phänomenen erfasst und diese mit Hilfe von Systemgleichungen oder experimentellen Kenndaten zur Vorhersage und Beurteilung des beobachteten Systems genutzt. Für die mathematische Modellbeschreibung eines Systems gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten [18, S. 92]:

Zum einen werden mit Hilfe der physikalischen Grundgesetze die Systemeigenschaft abgeleitet. Zur Verbesserung des physikalischen Modells fließen Stoffkonstanten und gewonnene Zusammenhänge durch empirische Messversuche in das Modell ein.

Zum anderen kann das System für eine physikalische Modellbildung zu komplex sein, oder die Zusammenhänge sind nicht genau bekannt. In diesem Fall kann mit Frequenzgangoder Sprungantwortmessungen am System die Systemgleichung identifiziert werden. Diese Variante lässt Systeme mit mehreren Eingängen und Ausgängen, nichtlineare Systemeigenschaften und starke Störüberlagerungen nur schwer identifizieren.

In dieser Arbeit werden beide Methoden verwendet. Zur Identifikation des Öl-Papier-Isolationssystems wurden die Frequenzgangmessung und zum Teil die Sprungantwortmessung an Materialproben durchgeführt. Als Modell für das Isolationssystem wird ein physikalisch-mathematisches Modell verwendet, das zum einen die physikalische Materialeigenschaften und Zusammenhänge beinhaltet und zum anderen mit einer empirischen Funktion beschrieben wird. Zu diesem Modell wurde zusätzlich ein Verfahren entwickelt, das die notwendigen Parameterwerte aus der komplexen Kapazitätsmessung mit einem Rechner generieren kann.

Aufbauend auf das Modell für ein Dielektrikum wird im Abschnitt 4.2 die Theorie des Isolationsschichtmodells vorgestellt, welche die Grundlagen für die Modellierung eines Streukanals in Leistungstransformatoren darstellt. Am Ende des Kapitels wird das verbesserte Transformatormodell vorgestellt und analysiert, inwieweit das Modell lösbar ist und welche Auswirkungen die Geometrie- und Materialparameter auf das Systemverhalten haben.

4.1 Mathematisches Modell für Dielektrika

4.1.1 Allgemeines Relaxationsmodell mit Leitfähigkeit

Im Abschnitt 3.2.3 sind die empirischen Relaxationsmodelle beschrieben. Hierbei ist die Havriliak-Negami-Funktion die allgemeinste Form, um eine Relaxationsverteilung darzustellen. Wird diese Funktion additiv mit der Leitfähigkeitsfunktion (vgl Gl. (3.14))

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = -\mathbf{j}\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \omega} \tag{4.1}$$

und weiteren Relaxationsverteilungen erweitert, dann erhalten wir folgende allgemeine Gleichung:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = -j \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \omega}\right)^N + \varepsilon_\infty + \sum_{\nu=1}^Y \left[\frac{\Delta \varepsilon_\nu}{(1 + (j\omega\tau_\nu)^{n_\nu})^{m_\nu}}\right]$$
(4.2)

σ	spezifische Leitfähigkeit,
N	Korrekturexponent für die Leitfähigkeit,
ε_0	Dielektrizitätskonstante,
ε_{∞}	instantane Polarisation,

 $\nu.$ Relaxation:

$\Delta \varepsilon_{\nu}$	Dielektrizitätsänderung der ν -Relaxation,
$ au_ u$	Relaxationszeitkonstante der ν -Relaxation,
$n_{ u}$	Exponent für die symmetrische Relaxationszeitverteilung,
$m_{ u}$	Exponent für die asymmetrische Relaxationszeitverteilung.

Wir bekommen auf diese Weise eine Beschreibung des dielektrischen Systemverhaltens, die aus der Havriliak-Negami-Gleichung mit unterschiedlichen Zeitverteilungen und der Leitfähigkeit eines Mediums hervorgeht.

Prinzipiell sind dieser Modellansatz und der RC-Modellansatz äquivalent. Der Vorteil des obigen Ansatzes liegt zunächst darin, dass eng zusammenliegende Relaxationen zu einer Verteilung zusammengefasst werden, und somit die Anzahl der Parameter deutlich kleiner ist als beim RC-Modell. Außerdem sind für die Modellierung von Öl-Papier-Isolationssystemen nicht alle Modellparameter notwendig. Zum Beispiel haben experimentelle Messungen an Öl und Papier gezeigt, dass die Parameter N und m_{ν} der Gl. (4.2) auf N = 1 und $m_{\nu} = 1$ gesetzt werden können. Hinzu kommt, dass die Anzahl ν der Relaxationsverteilungen je nach Messbereich begrenzt ist. Für die verwendeten Isoliermaterialien sind in den meisten Fällen zwei Relaxationsverteilungen ausreichend, die als α und β -Relaxation bezeichnet werden. Die vereinfachte Modellgleichung wird in dieser Arbeit als *Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit* bezeichnet und im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

4.1.2 Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit

Die folgende Funktion ist die Basisfunktion für Öl-Papier-Isolationsysteme, um das dielektrische Verhalten mit einem mathematischen Modell zu beschreiben. Grundsätzlich besteht das Cole-Cole-Modell aus drei wesentlichen Elementen: Leitfähigkeit, instantane Polarisation und Relaxationen. Die Relaxationen werden hier mit steigender Frequenz als α -, β -, ... Relaxation bezeichnet. Die Relaxationen beschreiben hierbei die Polarisationsmechanismen im gemessenen Frequenzbereich; bei jeder Relaxation wird dabei von einer symmetrischen Gewichtungsfunktion $G_{\alpha}(s)$ bzw. $G_{\beta}(s)$ gemäß der Gleichung (3.37) ausgegangen. Die konstante instantane Polarisation fasst das Polarisationsverhalten bei hohen Frequenzen zusammen, die nicht im Messbereich liegen. Die Funktion lautet [55, S. 162], [46]:

$$\underline{\varepsilon}(\omega,\vartheta) = -\mathbf{j}\frac{\sigma(\vartheta)}{\varepsilon_0\cdot\omega} + \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon_\alpha(\vartheta)}{1 + [\mathbf{j}\omega\tau_\alpha(\vartheta)]^{n_\alpha}} + \frac{\Delta\varepsilon_\beta(\vartheta)}{1 + [\mathbf{j}\omega\tau_\beta(\vartheta)]^{n_\beta}}$$
(4.3)

$\sigma(artheta)$	Leitfähigkeit,
ϑ	Temperatur,
ε_0	Dielektrizitätskonstante
ε_{∞}	instantane Polarisation,

α -Relaxation :	
$\Delta arepsilon_{lpha}(artheta)$	Dielektrizitätsänderung der α -Relaxation,
$ au_{lpha}(artheta)$	Relaxationszeitkonstante der α -Relaxation,
n_{lpha}	Exponent für die sym. Relaxationszeitverteilung,

β -Relaxation :	
$\Delta \varepsilon_{eta}(\vartheta)$	Dielektrizitätsänderung der β -Relaxation,
$ au_eta(artheta)$	Relaxationszeitkonstante der β -Relaxation,
n_{eta}	Exponent für die sym. Relaxationszeitverteilung.

Wird die komplexe Dielektrizitätsfunktion mit der reellen Vakuumkapazität C_0 multipliziert, erhält man die komplexe Kapazität <u>C</u>. Die komplexe Kapazität eines Mediums kann mit einer FDS-Messung (frequency domain spectroscopy), wie in Abschnitt 3.3.4 beschrieben, gemessen werden.

Die imaginären Größen stehen für den Verlust und beinhalten die Relaxationsmechanismen und das Leitfähigkeitsverhalten. Wie in Gleichung (4.3) zu erkennen ist, ist die Leitfähigkeit eine rein imaginäre Größe. Die Relaxationen bilden sich im Imaginär- und im Realteil ab und stehen im engen Zusammenhang.

Die Vorteile des Cole-Cole-Modells sind die geringe Anzahl der Modellparameter, die eindeutige Zuordnung der Parameter zu den physikalischen Größen und die kompakte mathematische Schreibweise. Diese genannten Punkte eröffnen für die Analyse und Diagnostik neue Ansätze, um die Abhängigkeit der einzelnen Parameter bezüglich Temperaturverhalten oder Alterungsmechanismen besser zuzuordnen. Der Hauptvorteil der mathematischen Schreibweise des Cole-Cole-Modells liegt in der einfachen Beschreibung von mehreren Isolationsschichten. Hinzu kommt auch die relativ einfache Anwendung von Rechnerprogrammen, die die Daten speichern, die Parameter automatisch anpassen und somit eine rechnerunterstützte Diagnose ermöglichen.

Der Nachteil liegt darin, dass die Relaxationsverteilungen mit einer empirischen Funktion nachgebildet wird, die nur symmetrische Verteilungen berücksichtigt. Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Anpassung der *komplexen Kapazitätsmessung*, da es kaum standardisierte Lösungsverfahren für nichtlineare komplexe Gleichungssysteme gibt. Das Verfahren zur Anpassung der Parameter und die Angabe der Anpassungsgenauigkeit wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.1.3 Komplexe Bewertungsfunktion

Die komplexe Bewertungsfunktion (<u>B</u>-Funktion) hat zwei Aufgaben. Erstens können mit dieser Funktion die Parameter der komplexen Cole-Cole-Funktion angepasst werden (siehe 4.1.4). Zweitens erlaubt die <u>B</u>-Funktion die Genauigkeit der Anpassung anzugeben. Somit können die Modelle qualitativ beurteilt und bewertet werden.

Das Prinzip der komplexen Bewertungsfunktion $\underline{B}(\omega)$ ist eine elementweise Division der einzelnen komplexen Kapazitäten \underline{C}_{Medium} der jeweiligen Frequenz einer Messung durch einen Referenzkapazitätsmesswert oder einen Modellfunktionswert $\underline{C}_{Referenz/Modell}$:

$$\underline{B}(\omega) = B'(\omega) + jB''(\omega) = \frac{\underline{C}_{Medium}}{\underline{C}_{Referenz/Modell}} = 1 + j0 + \underline{S}(\omega) = 1 + \underline{S}(\omega).$$
(4.4)

Durch die Division werden die einzelnen Parameter, wie Leitfähigkeit, Relaxation und instantane Polarisation in den Real- oder Imaginärteil der <u>B</u>-Funktion transformiert. Auf diese Weise sind alle komplexen Messinformationen im Realteil oder im Imaginärteil der <u>B</u>-Funktion enthalten. Diese Eigenschaft der <u>B</u>-Funktion soll zunächst anhand von idealisierten Beispielen verdeutlicht werden und danach für das Cole-Cole-Modell näher beschrieben werden.

Wird eine komplexe Messung \underline{C}_{Medium} durch eine komplexe Modellfunktion \underline{C}_{Modell} dividiert, die das Verhalten des Materials exakt nachbildet, ergibt sich der in Abbildung 4.1 dargestellten Verlauf der <u>B</u>-Funktion.



Abb. 4.1: Verlauf der komplexen Bewertungsfunktion bei ideal angepasstem Modell mit komplexer Messstörung <u>S</u>.

Die Abbildung 4.1 zeigt, dass $\Re(\underline{B}(\omega)) = 1$ und $\Im(\underline{B}(\omega)) = 0$ sind und eine unabhängige komplexe Störung <u>S</u> additiv überlagert ist. Prinzipiell steht der Imaginär- und Realteil der <u>B</u>-Funktion über die Kramers-Kronig-Beziehung (siehe Anhang A.4) in einem mathematischen Zusammenhang. Sollte zum Beispiel der Imaginärteil der Bewertungsfunktion B'' = 0 sein, dann muss der Realteil der Bewertungsfunktion immer B' = 1 sein. Wenn die Kramers-Kronig-Beziehung nicht erfüllt wird, kann bei linearen Systemen von einer "Fehlmessung" ausgegangen werden. Dies kann vor allem zur Kontrolle der FDS-Messung genutzt werden. Steht der Imaginärteil nicht in Beziehung mit dem Realteil, dann äußert sich der Messfehler z. B. daran, dass der Imaginärteil Null ist und der Realteil von eins abweicht. Werden die Parameter mit einer ausreichenden Genauigkeit bestimmt, dann kann davon ausgegangen werden, dass die Messung keine systematische Fehler aufzeigt.

Entspricht das Modell \underline{C}_{Modell} nicht exakt dem Verhalten von \underline{C}_{Medium} , dann verändert sich der Verlauf $\underline{B}(\omega)$ und der Abweichungsfaktor oder Genauigkeitsfaktor kann direkt am Verlauf des Realteil $\Re\{\underline{B}(\omega)\}$ über der Frequenz $f = \omega/2\pi$ abgelesen werden:

- Im niedrigen Frequenzbereich wird der Abweichungsfaktor der Leitfähigkeit von der Messung zur Referenz dargestellt, siehe Abbildung 4.2.
- Im mittleren Frequenzbereich kann die Veränderung der Relaxationen erkannt werden, was die Abbildung 4.3 verdeutlicht. Je nach Relaxationsmechanismus verschiebt sich die Veränderung auf andere Frequenzen. In Abschnitt 3.1.2 sind die einzelnen Relaxationsmechanismen beschrieben.
- Im hohen Frequenzbereich wird die Abweichung der instantanen Polarisation von Modell und Messung angezeigt. Die Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch einen Faktor von 5/4, was der Division der instantanen Polarisationen entspricht.

Zur Bewertung der Anpassung wird in dieser Arbeit die maximale Abweichung Δy in % im gemessenen Frequenzbereich $f \in [f_{min}, f_{max}]$ angegeben:

$$\Delta y = \max[|\Re\{\underline{B}(\omega)\} - 1|] \cdot 100\% \quad \text{mit} \quad \omega = 2\pi f \tag{4.5}$$

Die Abbildung 4.2 zeigt die <u>B</u>-Funktion, wenn sich die Leitfähigkeit und die instantane Polarisation zwischen Messung und Modell um einen konstanten Faktor unterscheiden. Als Beispiel wurden dazu die folgenden Daten gewählt:

$$\underline{C}_{Medium}(\omega) = C_0 \left(\frac{2E - 12}{j\omega\varepsilon_0} + 5 + \frac{10}{1 + (j\omega 10)^1} \right)$$
$$\underline{C}_{Modell}(\omega) = C_0 \left(\frac{1E - 12}{j\omega\varepsilon_0} + 4 + \frac{10}{1 + (j\omega 10)^1} \right)$$

und mit der Gleichung (4.4) die <u>B</u>-Funktion berechnet.



Abb. 4.2: Verlauf der komplexen Bewertungsfunktion bei unterschiedlicher Leitfähigkeit und instantaner Polarisation.

Hierbei wird deutlich, dass bei einem ausreichend großen Frequenzbereich der Abweichungsfaktor $\Re\{\underline{B}(\omega)\}$ der Leitfähigkeitsveränderung bei der kleinsten Frequenz und der Faktor für die instantane Polarisation bei der höchsten Frequenzen abgeschätzt werden kann. Bei welcher Frequenz die Faktoren genau abgelesen werden können, hängt von der Größe der einzelnen Parameter und vom Frequenzintervall der Messung ab.

Werden die Relaxationsparameter τ oder $\Delta \varepsilon$ verändert, dann ergibt sich der Verlauf wie in der Abbildung 4.3 dargestellt. Als Beispiel wurden dazu die folgenden Daten gewählt:

$$\underline{C}_{Medium}(\omega) = C_0 \left(\frac{1E - 12}{j\omega\varepsilon_0} + 4 + \frac{10}{1 + (j\omega5)^1} \right)$$
$$\underline{C}_{Modell}(\omega) = C_0 \left(\frac{1E - 12}{j\omega\varepsilon_0} + 4 + \frac{10}{1 + (j\omega10)^1} \right)$$

und mit der Gleichung (4.4) die <u>B</u>-Funktion berechnet.



Abb. 4.3: Verlauf der komplexen Bewertungsfunktion bei Veränderungen in der Relaxation.

Eine genaue Interpretation der graphische Veränderung durch die Relaxationsparameter ist nur bedingt möglich und sollte mit Hilfe von Modelldaten vorgenommen werden. Grundsätzlich kann diese Darstellung zur Trendanalyse verwendet werden, um so einen einfachen Überblick zu bekommen, ob sich das Isolationssystem in der Zeit zwischen zwei Messungen verändert hat. Wird beispielsweise eine Messung zum Zeitpunkt $t = t_0$ durchgeführt (Referenzmessung) und dann später zum Zeitpunkt $t = t_1$ ($t_1 > t_0$) wiederholt, so kann durch die Anwendung der komplexen <u>B</u>-Funktion <u>B</u>(ω, t) die Veränderungen des Isolationssystems beobachtet werden [24]. Es sollte dennoch beachtet werden, das der Einfluss durch die Temperatur ebenfalls eine Veränderung im Verlauf der <u>B</u>(ω, t) bewirkt und eventuell mit einem Modell kompensiert werden muss.

4.1.4 Anpassung der Modellparameter

Die <u>B</u>-Funktion kann genutzt werden, um die Parameterwerte für die Modelle, die im Abschnitt 4.1.1 und 4.1.2 beschrieben sind, mit einem Programm zu bestimmen und die Anpassgenauigkeit des Modells anzugeben. Dazu wird die gemessene komplexe Kapazität \underline{C}_{Mess} durch einem komplexen Term \underline{C}_B elementweise dividiert:

$$\underline{B}(\omega) = \frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{\underline{C}_{B}(\omega)} = \frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{C_{0} \cdot \left[-j\frac{\sigma_{B}}{\varepsilon_{0} \cdot \omega} + \varepsilon_{B}\right]}$$
(4.6)

Diese komplexe <u>B</u>-Funktion enthält dadurch alle Messinformationen der Kapazitätsmessung im Realteil $\Re\{\underline{B}(\omega)\}$ oder im Imaginärteil $\Im\{\underline{B}(\omega)\}$. Somit können die Modellparameter mit Hilfe von realen numerischen Näherungsverfahren berechnet werden, indem entweder der Imaginär- oder Realteil des nichtlinearen Gleichungssystems betrachtet und eine der folgenden Gleichungen gelöst wird:

$$\Im\left\{\frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{C_{0}\cdot\left[-j\frac{\sigma_{B}}{\varepsilon_{0}\cdot\omega}+\varepsilon_{B}\right]}\right\} = \Im\left\{\frac{\underline{C}_{Modell}(\omega,.)}{C_{0}\cdot\left[-j\frac{\sigma_{B}}{\varepsilon_{0}\cdot\omega}+\varepsilon_{B}\right]}\right\}$$
(4.7)

$$\Re\left\{\frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{C_0\cdot\left[-j\frac{\sigma_B}{\varepsilon_0\cdot\omega}+\varepsilon_B\right]}\right\} = \Re\left\{\frac{\underline{C}_{Modell}(\omega,.)}{C_0\cdot\left[-j\frac{\sigma_B}{\varepsilon_0\cdot\omega}+\varepsilon_B\right]}\right\}.$$
(4.8)

Wegen der Besonderheit, dass die größten Veränderungen im mittleren Frequenzbereich von $\Im{\{\underline{B}(\omega,.)\}}$ liegen, wurde meistens der Imaginärteil numerisch gelöst.

Der komplexe Term $\underline{C}_B(\omega)$ beeinflusst die Konditionierung der Messdaten. Eine geeignete Konditionierung der Messdaten ist gegeben, wenn gilt $\Re\{\underline{B}(\omega) \approx 1\}$ für $\omega \to \infty$ und $\omega \to 0$. Für diesen Fall müssen nur noch die Relaxationsparameter gefunden werden. Die Abbildung 4.4 zeigt einen Verlauf der Bewertungsfunktion, wenn die Messdaten durch eine ideale Funktion $\underline{C}_B(\omega)$ elementweise dividiert werden und den notwendigen Messbereich, in dem alle Informationen enthalten sind.



Abb. 4.4: <u>B</u>-Funktion bei einer idealen Konditionierung der Messdaten.

 C_0 entspricht einer theoretischen Vakuumkapazität, die durch Berechnung oder Messung bekannt ist oder geeignet gewählt werden muss. Eine geeignete Wahl wäre eine Normierung, indem z. B. für C_0 die reale Kapazität $\Re\{\underline{C}_{Mess}(\omega_{max})\}$ eingesetzt wird. Hierbei ergibt sich ein Abweichungsfaktor von

$$\varepsilon_{\omega_{max}} = \frac{\underline{C}_{Mess}(\omega_{max})}{C_0}$$

der die instantane Polarisation normiert $\varepsilon_{\infty} \simeq 1$, die spezifische Leitfähigkeit σ und die

Dielektrizitätsänderung der Relaxation $\Delta \varepsilon_{\nu}$ um den Abweichungsfaktor verkleinert.

Ist C_0 festgelegt und der Kurvenverlauf einer Kapazitätsmessung im oberen Frequenzbereich konstant, dann kann ein ideales ε_B mit

$$\varepsilon_B = \frac{\underline{C}_{Mess}(\omega_{max})}{C_0} \tag{4.9}$$

berechnet werden. Ein Problem stellt die Bestimmung von σ_B dar, da die verwendeten Dielektrika sehr hochohmig sind und der Messbereich zu den tieferen Frequenzen nicht ausreicht, um den Wert direkt zu bestimmen. Deswegen wird zunächst ein diskreter Wertebereich für die Leitfähigkeit σ_B geschätzt (siehe Anhang E.1) und für jedes σ_B das nichtlineare Gleichungssystem (4.7) oder (4.8) durch eine rekursive Anwendung der nichtlinearen LS-Methode gelöst. Hierbei wird die "Nonlinear Least Squares-Curve Fitting Toolbox" von MATLAB verwendet. Die optimale Lösung des Modells $\underline{C}_{Modell}(\omega, .)$ und somit die optimale Leitfähigkeit σ_B wird an der Summe der quadratischen Abweichung (SSE) zwischen Modellergebnisse und Messung erkannt. Die Abbildung 4.5 zeigt einen SSE-Verlauf über die Leitfähigkeit σ_B .



Abb. 4.5: Summe quadratischer Abweichungen (SSE) aufgetragen über die Leitfähigkeit σ_B .

Bei der Anwendung des Näherungsverfahrens von MATLAB kann es vorkommen, dass manche Fit-Ergebnisse die Parameterwerte nicht ideal treffen. Dies äußert sich durch "Ausreißer" im SSE-Kurvenverlauf. Ist das Minimum von SSE gefunden, dann sind die optimalen Parameterwert der Modellfunktion, wie z. B. σ , $\Delta \varepsilon_{\nu}$, τ_{ν} , n_{ν} und ε_{∞} bestimmt.

Mit dem idealen Verlauf der Bewertungsfunktion kann der notwendige Messbereich für symmetrische Relaxationsverteilungen abgeschätzt werden. Die niedrigste Frequenz liegt beim Nulldurchgang der $\Im{\underline{B}(\omega, .)}$ und als höchste Frequenz kann eine Frequenz gewählt werden, sobald $\Im{\underline{B}(\omega, .)} \approx 0$ wieder erreicht. In Abbildung 4.4 wäre der notwendige Frequenzbereich zur Bestimmung der Modellparameter für symmetrisch verteilte Relaxationen zwischen $2 \cdot 10^{-3}$ Hz und 10 Hz.

Zur Kontrolle wird die Bewertungsfunktion (4.4) verwendet und die Messdaten durch die angenäherten Modelldaten elementweise dividiert. Die maximale Genauigkeit kann mit der maximalen Abweichung Δy (siehe Gl. 4.5) angegeben werden. Wenn in dieser Arbeit eine Anpass- bzw. Fit-Abweichung von maximal 3% angegeben wird, dann bedeutet dies, dass der Realteil der Bewertungsfunktion zwischen $0,97 \leq \Re\{\underline{B}(\omega)\} \leq 1,03$ im gemessenen Frequenzbereich liegt.

Die Existenz einer eindeutigen Lösung hängt vom Modell, vom vorgegebenen Mengenbereich der Modellparameter, von der Art der Relaxationsverteilung und vom Frequenzbereich, in dem die komplexe Kapazität gemessen wurde, ab. Für die Öl-Papier-Isolationssysteme haben empirische Messungen gezeigt, dass ein Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit und zwei symmetrischen Relaxationsverteilungen (4.3), auch als α - und β -Relaxationsverteilung bezeichnet, notwendig ist, um die Frequenzmessung im Rahmen der Messgenauigkeit nachzubilden.

Das oben beschriebene Prinzip wurde überwiegend zur Bestimmung der Cole-Cole-Parameter und der Parameter des einfachen Transformatormodells verwendet. Die jeweiligen Quellcodes der einzelnen Programme sind im Anhang E.1 und E.2 zu finden. Der Programmablauf für die Bestimmung der Parameterwerte des Cole-Cole-Modells soll kurz vorgestellt werden. Das zu lösende Gleichungssystem mit der Cole-Cole-Funktion (4.3) als Modellfunktion lautet:

$$\Im\left\{\frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{C_{0}\cdot\left[-j\frac{\sigma_{B}}{\varepsilon_{0}\cdot\omega}+\varepsilon_{B}\right]}\right\} = \Im\left\{\frac{-j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_{0}}+\varepsilon_{\infty}+\frac{\Delta\varepsilon_{\alpha}}{1+(j\omega\tau_{\alpha})^{n_{\alpha}}}+\frac{\Delta\varepsilon_{\beta}}{1+(j\omega\tau_{\beta})^{n_{\beta}}}}{-j\frac{\sigma_{B}}{\varepsilon_{0}\cdot\omega}+\varepsilon_{B}}\right\} \quad (4.10)$$

Gesucht sind hierbei die Modellparameterwerte von σ , $\Delta \varepsilon_{\alpha}$, $\Delta \varepsilon_{\beta}$, τ_{α} , τ_{β} , n_{α} , n_{β} und ε_{∞} . Diese Gleichung kann mit dem "Curve Fitting Toolbox" von MATLAB nur dann gelöst werden, wenn die oben genannten Bedingungen erfüllt sind. Hier muss der Mengenbereich für die Modellparameter geeignet eingestellt werden und darauf geachtet werden, dass sich die α - und β - Relaxationen nicht überschneiden können. Der Programmablauf ist in Abbildung 4.6 dargestellt.



Abb. 4.6: Programmablauf zur Bestimmung der Cole-Cole-Modellparameter.

Zunächst müssen vom Benutzer die Messdaten und eine Referenzkapazität bzw. Vakuumkapazität C_0 eingegeben werden. Am Probebehälter kann C_0 je nach Genauigkeit durch eine Messung mit Helium, Stickstoff oder Luft bestimmt werden. Danach wird der Wert der instantanen Polarisation ε_B nach Gleichung (4.9) berechnet. Um den Einfluss der Messabweichungen zu minimieren, wird für ε_B ein Mittelwert aus mehreren Messwerten im höheren Frequenzbereich verwendet. Der Startwert der Leitfähigkeit σ_B wird mit dem Imaginärteil der Messung und einem Cole-Cole-Modell mit einer Relaxation grob approximiert. Ausgehend von der gefundenen Leitfähigkeit σ_B werden weitere Werte hinzugefügt und die Gleichung (4.10) für jedes σ_{B_x} numerisch gelöst. Wird das Minimum von SSE nicht erreicht, dann wird der Leitfähigkeitsbereich erweitert bis das minimale $\sigma_{SSE min}$ gefunden wird oder die Versuchsanzahl überschritten ist. Ist $\sigma_{SSE min}$ gefunden, dann werden die resultierenden Modellparameterwerte und die maximale Abweichung ausgegeben. Der Verlauf der Abweichung

min. Abweichung (0,97) <
$$\Re \left\{ \frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{\underline{C}_{Modell}(\omega)} \right\} < \max$$
. Abweichung (1,03)

dient hierbei als Kontrolle, ob das gewählte Modell geeignet ist und mit welcher Genauigkeit das Modell angenähert wurde. Dieses Prinzip wird auch bei der Anpassung der Transformatorparameter verwendet und kann im Abschnitt 4.3.3 nachgelesen werden.

Als Alternative, um die Parameterwerte für das Modell zu bestimmen, kann der Real- und Imaginärteil der Kapazitätsmessung zunächst getrennt gelöst werden. Die entstehenden Lösungen für den Real-, Imaginärteil und tan δ werden danach miteinander abgeglichen, um so eine gesamte Lösung zu erhalten. Dieser Ansatz wurde untersucht und erwies sich als ungeeignet [1, S. 37]. Die Untersuchung zeigte, dass die einzelnen Kurvenverläufe zwar optisch gut getroffen werden, jedoch einzelne Parameterwerte stark abweichen können. Der Hauptgrund ist, dass die Relaxationsmechanismen relativ schwach ausgeprägt sind und eine hohe Relaxationszeit besitzen. Die hohe Relaxationszeit bewirkt eine Verschiebung der Relaxationen zu tieferen Frequenzen. In diesem Frequenzbereich überlagert sich additiv der Leitfähigkeitsverlauf mit den Relaxationsverläufen. Hinzu kommt, dass die Messabweichung (siehe Abschnitt 5.1.3) im unteren Frequenzbereich größer ist.

4.1.5 Übersicht der Messdatendarstellungen und Transformationsansätze

Zur Analyse und Diagnose von Isolationssystemen ist es zweckmäßig, eine übersichtliche Darstellung der Messdaten zu wählen. Weiterhin ist es sinnvoll, dass die Messungen im Zeitbereich und im Frequenzbereich durchgeführt werden, um die Aussage der Diagnose zu verbessern. Grundsätzlich ist bei linearen und zeitinvarianten Systemen die in der Mes-



Abb. 4.7: Übersicht der Messdatendarstellungen und Transformationen.

sung enthaltenen Informationen bei beiden Messverfahren identisch. In der Praxis kommen Einflüsse durch den Messaufbau und die Messzeit hinzu, was zu einer Begrenzung der Information in den jeweiligen Messungen führt. Die jeweiligen Informationen überschneiden sich nur teilweise. So kann die FDS-Messung eher die schnelleren und die PDC-Messung die langsameren Polarisationsmechanismen erfassen. Eine Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich ergänzt und kontrolliert die Messergebnisse. In der Abbildung 4.7 ist ein Ausschnitt dargestellt, wie die Messdaten dargestellt (graue Felder) werden können und welche Transformationswege es gibt. Zur Darstellung der Daten gibt es die folgende Möglichkeiten:

- Eine graphische Darstellung der *orginalen FDS- oder PDC-Messungen*. Hier können grobe Messfehler und deutliche Veränderungen erkannt werden.
- Der Verlauf der *Bewertungsfunktion* ermöglicht die Veränderungen zu einer Referenzmessung oder einem Referenzmodell graphisch darzustellen und zu bewerten (siehe Abschnitt 4.1.3). Die Referenzmessung kann eine Messung aus der Vergangenheit oder eine Vergleichsprobe sein [24].
- *Modelle mit Relaxationszeitverteilungen*, wie im Abschnitt 3.2.3 beschrieben, geben einen genauere Auskunft über die physikalischen Veränderungen und Materialeigenschaften und beschreiben mathematisch das dielektrische Systemverhalten.
- Mit der Relaxationsgewichtungsfunktion $G(\log \tau)$ werden nur die Veränderung der Relaxationsmechanismen betrachtet. Wenn das Materialverhalten bekannt ist, kann zum Teil die Ursache für die Veränderung zugeordnet werden. Diese Darstellung wurde in dieser Arbeit nur ansatzweise verwendet und sollte für die weitere Analyse näher betrachtet werden.
- Die *RC-Netzwerkmodelle* bzw. *Debye-Modelle* visualisieren das elektrische Verhalten als Ersatzschaltbild (vgl. Abschnitt 3.2.1). Hierbei erkennt man nur zum Teil die Materialeigenschaften, wie die Leitfähigkeit und die instantane Polarisation. Relaxationsmechanismen werden als Summe von RC-Gliedern dargestellt, die nur schwer zu interpretieren sind.

Die Transformation der Messdaten in die einzelnen Darstellungsarten können in direkte und indirekte Transformationen eingeteilt werden [2]. Die direkten Transformationen, zu denen auch die diskrete Laplacetransformation gehört, berechnen direkt aus den Messwerten im Frequenzbereich die Werte im Zeitbereich und umgekehrt.

Ansätze zur direkten Bestimmung der Gewichtungsfunktion ausgehend vom Zeitbereich sind in [40] und [51] beschrieben und ausgehend vom Frequenzbereich in [65].

Bei der indirekten Transformation wird über einen "Zwischenschritt" die erforderliche Darstellungsart erreicht. Ein Beispiel dafür ist die Bestimmung der empirischen Modellparameter mit Hilfe der Bewertungsfunktion.

Es muss beachtet werden, dass bei jeder diskreten Transformation durch die Ungenauigkeit der Messung und der Approximation der Messdaten die Messinformationen verringert oder verfälscht werden können und somit die Aussagekraft beeinflusst wird.

4.2 Theorie des Isolationsschichtmodells

In Abschnitt 3.2.1 wurde mit Hilfe der RC-Netzwerke ein Öl-Papier-Isolationsschichtmodell im homogenen Feld vorgestellt. Hier wird eine mathematische Modelldarstellung und Herleitung für ein homgenes und zylindrisches Feld vorgestellt. Die mathematische Modelldarstellung berücksichtigt, dass die Parameter im engen Zusammenhang mit den elektrischen Materialeigenschaften stehen und somit die Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften, Geometrie des Transformators und Messverfahren leichter kombiniert werden können und auch leichter verstanden werden können. Das mathematische Modell soll ergänzend zum bisherigen RC-Modellansatz die Diagnose von Leistungstransformatoren verbessern. Hierbei ist der Modellaufbau für den Streukanal im Transformator und die Verwendung eines PCs, um die Kenndaten automatisch zu ermitteln, von Interesse. Diese Kenndaten können dann zur Analyse von Leistungstransformatoren verwendet werden.

Die Grundlage für das Isolationsschichtmodell im homogenen und zylindrischen Feld wird im folgenden Abschnitt und in [62] beschrieben. Danach wird das Modell für den Streukanal vorgestellt. Mit diesem Modell werden die Einflüsse der einzelnen Isolationsschichten, Materialien, Randeffekte sowie Einfluss der Temperatur auf die komplexe Kapazitätsmessung erläutert.

4.2.1 Idealisiertes Isolationsschichtmodell im homogenen Feld

Das Isolationsschichtmodell beschreibt das Impedanzverhalten in Form einer komplexen Kapazität, das durch verschiedene Isolationsschichten im homogenen Feld erzeugt wird. Die Abbildung 4.8 stellt einen idealisierten Streukanalaufbau eines Leistungstransformators aus rechteckigen Medien im homogenen Feld dar.

Jedes Medium, wie z. B. Isolieröl (Shell Diala D), Papier oder Transformerboard, hat ein spezielles komplexes dielektrisches Verhalten im Frequenzbereich, das durch ein RC-Modell (siehe Abschnitt 3.2.1) oder mit einem Relaxationsmodell mit Leitfähigkeit (siehe Abschnitt 4.1.1) nachgebildet werden kann. Dieses wird als komplexe Kapazität $\underline{C}_{M_x}(\omega, \vartheta, .)$ verstanden, die von Frequenz, Temperatur, Alter und weiteren Parametern abhängen kann, aber von der Feldstärke unabhängig ist. Im homogenen elektrischen Feld ist die Stromrichtung



Abb. 4.8: Isolationsschichtmodell im homogenen Feld.

bekannt, daher muss das Impedanzverhalten senkrecht zum elektrischen Feld nicht beachtet werden. In Abbildung 4.8 ist die schematische Darstellung und das Ersatzschaltbild von mehreren Isolationsschichten mit den notwendigen geometrischen Kenngrößen wie Fläche des Mediums $A_x = l_x \cdot b_x$, Dicke des Mediums d_x , sowie die Anzahl der Schichten in Strombzw. Feldrichtung schematisch dargestellt.

Die komplexe Kapazität \underline{C}_x eines Mediums beinhaltet alle dielektrischen Eigenschaften. Die komplexe Kapazität der einzelnen Medien ergibt sich durch:

$$\underline{C}_{x}(\omega,\vartheta,.) = \frac{\underline{\varepsilon}_{x}(\omega,\vartheta,.)\cdot\underline{\varepsilon}_{0}\cdot A_{x}}{d_{x}} = \underline{\varepsilon}_{x}(\omega,\vartheta,.)\cdot C_{0_{x}}$$
(4.11)

$\underline{C}_x(\omega,\vartheta,.)$	komplexe Kapazität des Mediums x ,
$\underline{\varepsilon}_x(\omega, \vartheta, .)$	komplexe Dielektrizitätsfunktion des Mediums x ,
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz,
ϑ	Temperatur,
ε_0	elektrische Feldkonstante,
A_x	Fläche des Mediums x,
d_x	Flächenabstand des Mediums x ,
C_{0_x}	Vakuumkapazität des Mediums x .

Die komplexe Kapazitätsfunktion (4.11) beschreibt das Verhalten eines Mediums im Frequenzbereich in Abhängigkeit der Temperatur ϑ und weiteren Einflussparametern. Für Öl-Papier-Isolationssysteme reicht in den meisten Fällen die Cole-Cole-Funktion mit Leitfähigkeit aus, um den komplexen Dielektrizitätsverlauf mathematisch zu beschreiben. Das gesamte Systemverhalten berechnet sich, wie in der Schaltungstheorie, aus der Parallelschaltung und Reihenschaltung der einzelnen komplexen Kapazitäten $\underline{C}_{M_x}(\omega, \vartheta, .)$. Für das in Abbildung 4.8 skizzierte System erhalten wir

$$\frac{1}{\underline{C}_{ges}(\omega,\vartheta,.)} = \frac{2}{\underline{C}_{M_2}(\omega,\vartheta,.)} + \frac{2}{\underline{C}_{M_1}(\omega,\vartheta,.) + \underline{C}_{M_3}(\omega,\vartheta,.)} \,. \tag{4.12}$$

Wie in den Gleichungen (4.11) und (4.12) erkennbar ist, können im homogenen Feld die identischen Materialienschichten $d_{x_{M_2}}$ zusammengefasst werden mit

$$d_{M_2} = \sum_{x=1}^{N} (d_{xM_2})$$
 und $d_{M_1} = \sum_{x=1}^{N} (d_{xM_1})$.

Dadurch kann das Modell vereinfacht werden, und wir erhalten die folgende Darstellung:



Abb. 4.9: Vereinfachtes Isolationsschichtmodell im homogenen Feld.
Die Gesamtkapazität des vereinfachten Isolationsschichtmodells berechnet sich zu:

$$\frac{1}{\underline{C}_{ges}} = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot A} \left[\frac{d_{M_2}}{\underline{\varepsilon}_{M_2}} + \frac{d_{M_1}}{k_{A_x} \cdot \underline{\varepsilon}_{M_1} + (1 - k_{A_x}) \cdot \underline{\varepsilon}_{M_3}} \right]$$
(4.13)

d_{M_x}	Summe der Schichtdicke des Mediums x,
$\underline{\varepsilon}_{M_r} = \underline{\varepsilon}_{M_r}(\omega, \vartheta, .)$	komplexe Dielektrizitätsfunktion des Mediums x,
k_{A_x}	Flächenfaktor $k_{A_x} = A_{M_x}/A$ des Mediums x,
A	Gesamtfläche senkrecht zum elektrischen Feld,
$arepsilon_0$	elektrische Feldkonstante.

Der Flächenfaktor k_{A_x} berücksichtigt maximal zwei unterschiedliche Medien pro Schicht. Es gilt

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

Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Isolationsschichtmodells zur Diagnose sind geringe Grenzflächeneffekte, 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 [22].

Multipliziert man die Gleichung (4.13) mit der Vakuumkapazität C_0 , dann erhält man die komplexe Dielektrizitätsfunktion $\underline{\varepsilon}_{qes}$ des gesamten Isolationssystems:

$$\frac{1}{\underline{\varepsilon}_{ges}} = \frac{C_0}{\underline{C}_{ges}} = \frac{1}{d} \left[\frac{d_{M_2}}{\underline{\varepsilon}_{M_2}} + \frac{d_{M_1}}{k_{A_1} \cdot \underline{\varepsilon}_{M_1} + (1 - k_{A_1}) \cdot \underline{\varepsilon}_{M_3}} \right]$$

Wird der Elektroden
abstanddin die Klammer multipliziert, dann ergibt sich mit dem Schichtdickenfaktor
 k_{M_x}

$$k_{M_x} = \frac{d_{M_x}}{d}$$

und damit für die gewichtete komplexe Dielektrizitätsfunktion:

$$\frac{1}{\underline{\varepsilon}_{ges}} = \frac{C_0}{\underline{C}_{ges}} = \frac{k_{M_2}}{\underline{\varepsilon}_{M_2}} + \frac{k_{M_1}}{k_{A_1} \cdot \underline{\varepsilon}_{M_1} + (1 - k_{A_1}) \cdot \underline{\varepsilon}_{M_3}}.$$
(4.14)

Untersuchungen im Labor an einfachen Öl-Papierschichten zeigten, dass bei verschiedenen Anordnungen der Schichten die Modellierung mit den Messergebnissen bei verschiedenen Temperaturen gut übereinstimmen. Für die Modellierung von Leistungstransformatoren sind nicht alle Bedingungen erfüllt (siehe Abschnitt 4.3). Dennoch kann das *Isolationsschichtmodell im homogenen Feld* verwendet werden, um qualitative Aussagen über einen Leistungstransformator aus einer FDS-Messung abzuleiten.

4.2.2 Zylindrisches Isolationsschichtmodell

Die Gleichung (4.13) ermöglicht die Modellierung von Isolationsschichten im homogenen Feld. Hierbei können die Isolationsschichten beliebig angeordnet werden. Wird wiederum angenommen, dass die Materialeigenschaften isotrop und von der Feldstärke unabhängig sind, dann kann eine zylindrische Anordnung wie folgt angenähert werden:

Die Isolationsschicht wird in diesem Fall als Hohlzylinder betrachtet. Somit kann die Anordnung der Isolationsschicht im Modell nicht verschoben werden, und der Radius geht in die Modellgleichung ein.



Abb. 4.10: Zylindrisches Isolationsschichtmodell

Der Ansatz der Gleichung lautet:

$$\frac{1}{\underline{C}_{ges}(\omega,\vartheta,.)} = \frac{1}{\underline{C}_{M_2}(\omega,\vartheta,.)} + \frac{1}{\underline{C}_{M_1}(\omega,\vartheta,.) + \underline{C}_{M_3}(\omega,\vartheta,.)} + \dots$$
(4.15)

Wird die Gleichung mit der Vakuumkapazität C_0

$$\underline{C}_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h}{d} \quad \text{mit} \quad r_0 = \frac{d}{\ln r_a - \ln r_i} \quad \text{und} \quad d = \sum d_x \tag{4.16}$$

multipliziert und angenommen, dass die Kapazitäten der einzelnen Medien \underline{C}_x infolge des kleinen Abstandes d_x als homogener Plattenkondensator angenähert werden können und $d = r_a - r_i$ ist, dann erhält man

$$\frac{1}{\underline{\varepsilon}_{ges}} = \frac{1}{\frac{r_{M_2}}{r_0} \cdot \frac{d}{d_{M_2}} \underline{\varepsilon}_{M_2}} + \frac{1}{\frac{h_{M_1}}{h} \cdot \frac{r_{M_1}}{r_0} \cdot \frac{d}{d_{M_1}} \underline{\varepsilon}_{M_1} + \frac{h_{M_3}}{h} \cdot \frac{r_{M_3}}{r_0} \cdot \frac{d}{d_{M_3}} \underline{\varepsilon}_{M_3}} + \dots$$
(4.17)

Wie in Gleichung (4.17) zu erkennen ist, werden die einzelnen komplexen Dielektrizitätsfunktionen $\underline{\varepsilon}_x(\omega, \vartheta, .)$ durch die Gewichtungsfaktoren

$$\frac{h_{M_x}}{h} \cdot \frac{r_{M_x}}{r_0} \cdot \frac{d}{d_{M_x}} = k_{h_x} \cdot \frac{r_{M_x} \ln \frac{r_a}{r_i}}{d_{M_x}}$$

multipiziert. Hierbei entspricht

$$k_{Ax} = \frac{h_{M_x}}{h} \cdot \frac{r_{M_x}}{r_0}$$

dem Flächenfaktor k_{Ax} vom Medium x zur theoretischen Gesamtfläche und $(1 - k_{Ax})$ ist der Anteil des zweiten Mediums. h_{M_x} ist die Höhe eines Mediums x. Zum Beispiel könnte das Medium 3 niedriger als die gesamt Höhe h sein, dadurch vergrößert sich der Flächenfaktor für das Medium 1. Im Idealfall gilt $h = h_{M_x}$. Weiterhin ist in Abbildung 4.10 zu erkennen, dass der Radius $r_{M_1} = r_{M_3}$ und der Abstand $d_{M_1} = d_{M_3} = d_1$ gleich sind. Dadurch wird die Anzahl der Gewichtungsfaktoren verkleinert auf $k_{h1} \cdot k_{rd1}$ und k_{rd2} . Bei mehreren Schichten wird analog vorgegangen. Die komplexe Dielektrizitätsfunktion des zylindrischen Isolationsschichtmodells lautet somit:

$$\frac{1}{\underline{\varepsilon}_{ges}} = \frac{1}{k_{rd2} \cdot \underline{\varepsilon}_{M_2}} + \frac{1}{k_{h1} \cdot k_{rd1} \cdot \underline{\varepsilon}_{M_1} + (1 - k_{h1}) \cdot k_{rd1} \cdot \underline{\varepsilon}_{M_3}} + \dots$$
(4.18)

$\underline{arepsilon}_x(\omega,artheta,.)$	komplexe Dielektrizitätsfunktion des Mediums x,
$k_{Ax} = k_{hx} \cdot k_{rdx}$	Flächenfaktor des Mediums x ,
$k_{hx} = h_{M_x}/h$	Höhenfaktor des Mediums x ,
$k_{rdx} = [r_{M_x}(\ln r_a - \ln r_i)]/d_{M_x}$	Radius- und Schichtdickenfaktor des Mediums x ,
h	Höhe des Hohlzylinders,
h_{M_x}	Höhe des Mediums x,
r_{Mx}	mittlerer Hohlzylinderradius des Mediums x,
$r_0 = \frac{d}{\ln r_a - \ln r_i}$	theoretischer mittlerer Hohlzylinderradius,
$d = r_a - r_i$	gesamter Elektrodenabstand ,
r_a	Außenradius,
r_i	Innenradius.

Es sollte bedacht werden, dass die einzelnen Hohlzylinderschichten als homogene Plattenkondensatoren angenähert wurden. Somit ist die Gleichung (4.18) nur eine Annäherung der Realität. Da die Hohlzylinderschichten den Isolationsschichten zwischen US-Wicklung und OS-Wicklung eines Leistungstransformators entsprechen, ist die Genauigkeit durch die Anzahl der Schichten, vom Radius und von der Schichtdicke abhängig. Hier gilt grundsätzlich, wenn der Radius r_{Mx} viel größer ist als die Schichtdicke d_x , dann ist die Annäherung ausreichend.

4.3 Isolationsschichtmodell für Leistungstransformatoren

Wie bei jedem physikalischen Modell müssen für das Isolationsschichtmodell für Leistungstransformatoren bestimmte Annahmen und Vereinfachungen akzeptiert werden. Dabei gilt es, einen möglichst guten Kompromiss zwischen Einfachheit des Modells und der damit erreichbaren Genauigkeit zu finden [44, S. 21-22].

So könnte man beispielsweise versucht sein, in der Modellierung eines Leistungstransformators eine räumlich dreidimensionale Betrachtung des Isolationssystems anzustreben. Im Rahmen dieser Arbeit geht es aber letztlich darum, verlässliche Aussagen über den Zustand des Isolationssystems zu treffen und die Grenzen des Messverfahrens aufzuzeigen. Wie sich zeigen wird, reicht für die meisten Fälle eine räumlich zweidimensionale Betrachtung in Form eines homogenen Plattenkondensators aus.

Die erste grundlegende Vereinfachung des hier vorgestellten Modells besteht zunächst darin, das komplexe Dielektrizitätsverhalten von Öl, Papier, Pressboard mit einer Leitfähigkeit, einer symmetrischen Relaxationsverteilung und einer instantanen Polarisation zu beschreiben. Als zweite Vereinfachung wird die Geometrie des Streukanals als ein Zwei-Isolationsschichtsystem betrachtet, das nur aus Öl und Pressboard besteht. Dieses *Reduzier*- te Isolationsschichtmodell für Leistungstransformatoren oder Basismodell für Leistungstransformatoren wird im folgendem Abschnitt beschrieben und in den weiteren Abschnitten verbessert, um so Schritt für Schritt die Genauigkeit und somit auch die Verlässlichkeit der Diagnose zu verbessern.

4.3.1 Basismodell für Leistungstransformatoren ohne Leisten

Das tatsächliche dielektrische Verhalten bei einer Diagnosemessung im Streukanal eines Leistungstransformators ist so komplex, dass eine exakte Simulation der Messergebnisse zum einen die Grenzen der bisherigen Modellmöglichkeiten übersteigen würden und zum anderen oft das dielektrische Systemverhalten des Materials und die Geometrie unzureichend bekannt sind. Zusätzlich erschweren die Störungen, die der Messung überlagert sind, die Analyse.

Für die Modellierung des Streukanals wird dieser zunächst als ein Zwei-Isolationsschichtsystem mit folgenden Annahmen und Vereinfachungen betrachtet:

- Es existiert ein homogenes Feld zwischen der US- und OS-Wicklung. Diese Annäherung kann gemacht werden, wenn r_a groß und der Elektrodenabstand $d = r_a r_i$ sehr klein ist.
- Die dielektrische Eigenschaft von Pressboard kann mit einer symmetrischen Relaxationsverteilung, Leitfähigkeit und der instantanen Polarisation wie folgt beschrieben werden:

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

• Die komplexe Dielektrizitätsfunktion für Mineralöl hat kein Relaxationsverhalten und lautet:

$$\underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega,\vartheta) = -\mathbf{j}\frac{\sigma_{Oel}(\vartheta)}{\varepsilon_0\cdot\omega} + \varepsilon_{Oel_{\infty}}.$$

- Die Leisten im Ölkanal werden vernachlässigt, d. h $k_L = 0$ (siehe Abschnitt 4.3.2).
- Die Isolationsschichten bestehen aus einem flüssigen (Mineralöl) und festen (Pressboard) Dielektrikum, die beide senkrecht zum homogenen elektrischen Feld stehen.
- Die Oberflächenleitfähigkeit zwischen den Isolationsschichten werden vernachlässigt, da die meisten Isolationsschichten senkrecht zum homogenen elektrischen Feld stehen.
- Die Effekte direkt an der Oberfläche der einzelnen Isolationsschichten werden vernachlässigt.
- Weiterhin wird angenommen, dass ein Ölkanal von der US- zur OS- Wicklung existiert. Der Grund kann das Zusammenfügen der einzelnen Pressboardschichten, Risse im Pressboard oder eine lange Ölstrecke zwischen US- und OS- Wicklung am Rand des Streukanals sein.

Die Abbildung 4.11 zeigt hierzu den schematischen Aufbau des Transformatormodells und sein Ersatzschaltbild.



Abb. 4.11: Schematischer Aufbau des Basismodells für Leistungstransformatoren ohne Leisten.

Analog zum Isolationsschichtmodell im homogenen Feld (4.14) lautet die Modellgleichung für den Streukanal im Leistungstransformator

$$\frac{1}{\underline{\varepsilon}_T(\omega,\vartheta)} = \frac{C_0}{\underline{C}_T(\omega,\vartheta)} = \frac{k_{Oel}}{\underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega,\vartheta)} + \frac{k_{Pb}}{k_A \cdot \underline{\varepsilon}_{Pb}(\omega,\vartheta) + (1-k_A) \cdot \underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega,\vartheta)} \,. \tag{4.19}$$

Dabei ist der Öl-Schichtdickenfaktor k_{Oel} und der Pressboard-Schichtdickenfaktor k_{Pb} als Anteil der einzelnen Schichtdicken zum Elektrodenabstand definiert, also $k_x = d_x/d$. Da die beiden Größen stets positiv sind und $k_{Oel} + k_{Pb} = 1$ gilt, kann ein Schichtdickenfaktor ersetzt werden mit $k_{Oel} = 1 - k_{Pb}$ bzw. $k_{Pb} = 1 - k_{Oel}$. Der Flächenanteil der Pressboard-Fläche und Öl-Fläche zur Gesamtfläche A wird mit dem effektiven Flächenfaktor $k_A = A_{Pb}/A$ festgelegt. Dieser Faktor wird durch die Annahme begründet, dass zwischen OS- und US- Wicklung ein Ölkanal existiert. Anhand von Messungen am realen Leistungstransformatoren wird diese Annahme dadurch bestätigt, dass die Modellierung mit der Messung am Transformator genauer übereinstimmt, wenn der Flächenfaktor $k_A \in]0, 1]$ ist. Mit den weiteren Voraussetzungen erhalten wir das Basismodell für Leistungstransformatoren:

$$\frac{1}{\underline{\varepsilon}_T(\omega,.)} = \frac{k_{Oel}}{\underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega,.)} + \frac{(1-k_{Oel})}{k_A \cdot \underline{\varepsilon}_{Pb}(\omega,.) + (1-k_A) \cdot \underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega,.)} = \frac{C_0}{\underline{C}_T(\omega,.)}$$
(4.20)

mit der komplexen Dielektrizitätsfunktion des Mineralöls

$$\underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega,\vartheta) = -j(\frac{\sigma_{Oel}(\vartheta)}{\varepsilon_0\cdot\omega}) + \varepsilon_{Oel_{\infty}}$$

und der komplexen Dielektrizitätsfunktion des Pressboards

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

$\underline{\varepsilon}_x(\omega,.)$	komplexe Dielektrizitätsfunktion des Materials x ,
$\underline{C}_T(\omega,.)$	komplexe Kapazität des Transformators im Frequenzbereich,
\underline{C}_{0}	Vakuumkapazität des Transformators,
$\underline{\varepsilon}_T(\omega,.)$	komplexe Dielektrizitätsfunktion des gesamten Transformators,
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz,
θ	Temperatur des Materials,
ε_0	elektrische Feldkonstante,
$k_A = A_{Pb}/A$	effektiver Flächenfaktor des Pbs zur Gesamtfläche A ,
$k_{Oel} = d_{Oel}/d$	Schichtdickenfaktor des Öls,
d	gesamte Breite des Streukanals,
$\sigma_x(artheta)$	spezifische Leitfähigkeit des Materials x ,
$\varepsilon_{x_{\infty}}$	instantante Polarisation des Materials x ,
$\Delta arepsilon$	Dielektrizitätsänderung der Pb-Relaxation,
Τ	Relaxationszeitkonstante der Pb-Relaxation,
n	Exponent für die Relaxationszeitverteilung.

Wie aus der Modellgleichung (4.20) ersichtlich ist, hängt das gesamte Dielektrizitätsverhalten des Transformators von vier wesentlichen Parametern ab:

- von der komplexen Dielektrizitätfunktion der einzelnen Materialien,
- vom Öl- bzw. Papier-Schichtdickenfaktor,
- vom Flächenfaktor und
- von der Vakuumkapazität.

Die Faktoren k_{Oel} und C_0 sind durch die Geometrie des Streukanals bestimmt. Die Dielektrizitätsfunktion beinhaltet die dielektrischen Materialeigenschaften. Der Flächenfaktor k_A ist ein unbekannter Faktor, der die gesamte Leitfähigkeit des Transformatormodells beeinflusst.

Die unbekannten Größen $\underline{\varepsilon}_x$ und k_A sind nicht eindeutig zu bestimmen, da z. B. die Gleichung

$$k_A \cdot \underline{\varepsilon}_x(\omega, \vartheta) = k_A \cdot \left(-j \frac{\sigma(\vartheta)}{\varepsilon_0 \cdot \omega} + \varepsilon_{x_\infty} \right) \stackrel{!}{=} -j \frac{10^{-15}}{\varepsilon_0 \cdot \omega} + 4$$

mit den reellen Zahlen $k_A \in]0, 1], \sigma(\vartheta) \in [0, 10^{-6}]$ in S/m und $\varepsilon_{\infty} \in [1, 10]$ mehrere Lösungen besitzt. Um die Lösungsmenge zu verkleinern, kann der Wertebereich für die Materialeigenschaften mit Hilfe von definierten Messungen am Material reduziert werden. Grundsätzlich sind die Materialeigenschaften von Mineralöl, Pressboard und Papier charakteristisch und liegen bei Mineralöl im Wertebereich von $\sigma_{Oel} \in [10^{-13}, 10^{-10}]$ in S/m und $\varepsilon_{Oel\infty} \in [1.7, 2.5]$. Der Wertebereich von imprägnierten Pressboard liegt bei $\sigma_{Pb} \in [10^{-17}, 10^{-14}]$ in S/m und $\varepsilon_{Pb\infty} \in [3, 5]$. Im Kapitel 5 werden Modelle für die komplexe Dielektrizitätsfunktion $\underline{\varepsilon}_x(\omega, \vartheta, .)$ vorgestellt. Der bisherige Ansatz für $\underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega, \vartheta)$ für neuwertiges Mineralöl entpricht den experimentellen Messungen (vgl. Abschnitt 5.2). Der Ansatz für $\underline{\varepsilon}_{Pb}(\omega, \vartheta)$ für imprägniertes Pressboard oder Papier muss nach Abschnitt 5.3 je nach Materialzustand mit einer bis drei symmetrischen Relaxationsverteilungen modelliert werden. Dies wird aber in diesem Abschnitt zunächst vernachlässigt und nur eine symmetrische Relaxationsverteilung berücksichtigt. Die instantane Polarisation wird im Gegensatz zur spezifischen Leitfähigkeit durch Temperatur, Wassergehalt und Alterungsmechanismen nur geringfügig beeinflusst und kann als konstant angesehen werden.

Die Abbildungen 4.12-4.14 zeigen beispielhaft den Einfluss der Geometriedaten und Materialeigenschaften des Streukanals auf die komplexe Kapazitätsmessung. Hierbei wurde die Modellgleichung (4.20) verwendet. Ausgehend von den Geometrieparametern $k_A = 0,995$ und $k_{Oel} = 0,5$ und den Materialparametern $\varepsilon_{Oel\infty} = 2, \sigma_{Oel} = 1 \text{ pS/m}, \varepsilon_{Pb\infty} = 4, \Delta \varepsilon = 0$ und $\sigma_{Pb} = 0, 1 \text{ fS/m}$ ist in der Abbildung 4.12 der Einfluss der Geometriedaten dargestellt.



Abb. 4.12: Einfluss der Geometrieparameter auf den Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion.

Wie oben erwähnt, beeinflusst der Flächenfaktor k_A den Verlauf des Imaginärteils der Dielektrizitätsfunktion im unteren Frequenzbereich, d. h letztlich die gesamte Leitfähigkeit. Der Realteil der Messung verändert sich bei variierendem k_A nur geringfügig. Der Schichtdickenfaktor k_{Oel} verändert die Stärke des Relaxationsverhaltens und verschiebt die instantane Polarisation. Dies wird dadurch begründet, dass der Anteil vom Papier oder Mineralöl verändert wird. Beide Geometrieparameter sind voneinander unabhängig und weisen eine relativ starke Empfindlichkeit bzgl. Parameterveränderung auf. Dieses ermöglicht eine Bestimmung der Parameterwerte, wenn die Materialdaten bekannt sind.

Die materialspezifischen Eigenschaften beeinflussen ebenfalls den Kurvenverlauf (siehe Abb.:4.13). Die größte Veränderung verursacht die Leitfähigkeit des Mineralöls, was durch die Frequenzverschiebung des Relaxationsverhaltens ersichtlich wird. Der Hauptgrund liegt in der Leitfähigkeitsdifferenz zwischen Pressboard und Öl, was zu einer Grenzflächenpolarisation führt (siehe Abschnitt 3.1.2). Die Veränderung der instantanen Polarisation des Pressboards verhält sich ähnlich wie der Schichtdickenfaktor k_{Oel} . Die Einflüsse durch die Leitfähigkeit des Pressboards und der instantanen Polarisation des Mineralöls sind zwar



vorhanden, aber in der Auswirkung auf den Kurvenverlauf gering.

Abb. 4.13: Einfluss der Materialdaten auf den Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion.

Bisher wurde in den Abbildungen 4.12-4.13 angenommen, dass das Pressboard und Mineralöl kein Relaxationsverhalten hat. Durch experimentelle Messungen hat sich gezeigt, dass diese Annahme für Mineralöl zutrifft, aber für Pessboard oder Papier ist diese Annahme nur eine grobe Modellierung der Realität (siehe Abschnitt 5.3).

Wird die Materialeigenschaft des Pressboards um eine Relaxation erweitert, dann erhält der gesamte Messverlauf ein zweites Relaxationsverhalten. Die Abbildung 4.14 zeigt den Einfluss von zwei unterschiedlichen Relaxationen, die dem Pressboard zugeordnet wurden, im Vergleich zu dem Verlauf der komplexen Dielektrizitätszahl ohne Relaxationsverhalten im Pressboard (roter Referenzverlauf) mit den Standardwerten wie oben.

Hier ist zu erkennen, dass das Relaxationsverhalten des Pressboards von der Relaxationszeitkonstante abhängt und dadurch die Position im Frequenzbereich festlegt. Werden die Leitfähigkeit des Pressboard und die instantane Polarisation des Mineralöls als bekannt betrachtet, dann können alle anderen Parameterwerte in den meisten Fällen angenähert werden, falls das der Messung überlagerte Rauschen nicht zu groß ist.

Dieses Modell stellt eine starke Vereinfachung der Realität dar. Wie gut es die Realität abbildet, hängt von den bekannten und unbekannten Materialparametern und Geometrieparametern ab. Trotzdem ist dieses Basismodell geeignet, um eine Diagnose durchzuführen, wenn die Geometriedaten unbekannt aber die Materialarten bekannt sind. Weiterhin kann mit diesem Modell kontrolliert werden, ob eine Kapazitätsmessung die Kramers-Kronig-Bedingung erfüllt, d. h. Teile vom Imaginärteil und Realteil der Kapazitätsmessung müssen in einem mathematischen Zusammenhang stehen. Somit kann bei einer guten Anpassung der Modellparameter, davon ausgegangen werden, dass bei der Messung kein Fehler aufgetreten ist.



Abb. 4.14: Einfluss des Relaxationsprozesses im Pressboard auf den Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion.

Eine Verbesserung des Modells wird durch die Berücksichtigung der Leisten im Ölkanal erreicht. Hierbei müssen weitere Geometriedaten bekannt sein, um eine eindeutige Lösung zu bekommen. Auf das Basismodell mit Leisten wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

4.3.2 Basismodell für Leistungstransformatoren mit Leisten

Das vorhergehende Modell berücksichtigt die Geometrie eines Transformators nur zum Teil. Bei bekanntem Aufbau des Streukanals kann das Basismodell optimiert werden, wenn die Leisten im Ölkanal berücksichtigt werden. Für diesen Fall ist der Einfluss auf den Kurven-



Abb. 4.15: Schematischer Aufbau des Basismodells für Leistungstransformatoren mit Leisten.

verlauf je nach Anzahl und Breite der Leisten unterschiedlich stark. Durch die Berücksichtigung der Leisten kann die Genauigkeit der zu identifizierten Materialeigenschaften verbessert werden. Zu den weiteren Geometriedaten gehören der Kernradius, die Wicklungshöhe, die Anordnung und Größe der einzelnen Isolationsschichten. Kernradius, Wicklungshöhe und Streukanalbreite stecken indirekt in der Vakuumkapazität C_0 . Die Randeffekte des Streukanals werden, wie im *Basismodell ohne Leisten*, nicht berücksichtigt. Die Hohlzylinderanordung der einzelnen Materialien kann vernachlässigt werden, wenn der Innenradius groß und die Streukanalbreite klein ist. In diesem Fall kann der Streukanal als homogener Bereich betrachtet werden. Somit muss das Basismodell nur um die Anteile der Leisten erweitert werden. Abbildung 4.15 zeigt den schematischen Aufbau.

Durch das Einbringen der Leisten muss der Term für den Ölkanal in Gleichung (4.19) mit dem dielektrischen Systemverhalten der Leisten ergänzt werden. Aus (4.19) wird damit

$$\frac{1}{\underline{\varepsilon}_T(\omega)} = \frac{k_{Oel}}{k_L \cdot \underline{\varepsilon}_L(\omega) + (1 - k_L) \cdot \underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega)} + \frac{(1 - k_{Oel})}{k_A \cdot \underline{\varepsilon}_{Pb}(\omega) + (1 - k_A) \cdot \underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega)}.$$
 (4.21)

Hierbei ist $k_L = A_L/A$ der Leisten-Flächenfaktor und $\underline{\varepsilon}_L(\omega)$ die komplexe Dielektrizitätsfunktion der Leisten. Die restlichen Parameter sind identisch zur (4.19). Da das Material der Leisten dem Pressboard oft sehr ähnlich ist, kann zur Vereinfachung der Gleichung die Dielektrizitätsfunktion der Leisten $\underline{\varepsilon}_L$ mit der Dielektrizitätsfunktion des Pressboards $\underline{\varepsilon}_{Pb}$ gleich gesetzt werden. Ohne diese Vereinfachung können die Materialparameter aus einer Messung an einem Transformator auch bei bekannter Geometrie nicht ermittelt werden. Die Abbildung 4.16 zeigt den Einfluss der Leisten auf die komplexe Dielektrizitätsfunktion.



Abb. 4.16: Einfluss der Leisten im Ölkanal auf den Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion.

Wie zu sehen ist, wird die gesamte instantane Polarisation und die Position der Relaxation verändert. Dies kann auch durch das Öl-Pressboard-Verhältnis und eine Veränderung der instantanen Polarisation von Pressboard oder Mineralöl erreicht werden. Dies hat zur Folge, dass bei unbekannter Geometrie keine eindeutige Lösung für Materialcharakteristika $\underline{\varepsilon}_{Oel}$ und $\underline{\varepsilon}_{Pb}$ existiert.

4.3.3 Anpassung der Transformatorparameter

Die im vorherigen Abschnitt entwickelten Modellgleichungen sind nur in wenigen Sonderfällen analytisch lösbar. In der Regel muss ein numerisches Verfahren zur Lösung herangezogen werden, das es ermöglicht, die Parameterwerte für eine komplexe Modellfunktion zu bestimmen. Hierbei wurde das in Abschnitt 4.1.4 beschriebene Prinzip verwendet. Zum Lösen der Modellgleichung wird die gemessene komplexe Kapazität \underline{C}_{Mess} durch einen komplexen Term \underline{C}_{B} elementweise dividiert:

$$B(\omega) = \frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{\underline{C}_{B}(\omega)} = \frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{C_{0} \cdot \left[-j\frac{\sigma_{B}}{\varepsilon_{0} \cdot \omega} + \varepsilon_{B}\right]}.$$

Auf diese Weise erhalten wir eine komplexe <u>B</u>-Funktion, die alle Informationen im Realoder im Imaginärteil beinhaltet. Der komplexe Teiler beeinflusst die Konditionierung der Messdaten so, dass die Störungen in den Eingabedaten geringen Einfluss auf das Ergebnis hervorrufen. Eine geeignete Konditionierung der Messdaten ist gegeben (vgl. Abb. 4.4), wenn $\Re\{\underline{B}(\omega)\} \approx 1$ für $\omega \to \infty$ und $\omega \to 0$.

Grundsätzlich handelt es sich bei beiden Modellen für Leistungstransformatoren mit und ohne Leisten, um nichtlineare Gleichungssysteme. Dies kann damit begründet werden, dass das Relaxationsverhalten im Pressboard einen Exponenten n hat. Mit der <u>B</u>-Funktion kann das nichtlineare Gleichungssystem mit Hilfe reeller numerischer Verfahren gelöst werden, indem im Frequenzbereich eine der folgenden Gleichungen gelöst wird:

$$\Im\left\{\frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{C_{0}\cdot\left[-j\frac{\sigma_{B}}{\varepsilon_{0}\cdot\omega}+\varepsilon_{B}\right]}\right\} = \Im\left\{\frac{\underline{C}_{Modell}(\omega,.)}{C_{0}\cdot\left[-j\frac{\sigma_{B}}{\varepsilon_{0}\cdot\omega}+\varepsilon_{B}\right]}\right\}$$
(4.22)

$$\Re\left\{\frac{\underline{C}_{Mess}(\omega)}{C_0\cdot\left[-\mathbf{j}\frac{\sigma_B}{\varepsilon_0\cdot\omega}+\varepsilon_B\right]}\right\} = \Re\left\{\frac{\underline{C}_{Modell}(\omega,.)}{C_0\cdot\left[-\mathbf{j}\frac{\sigma_B}{\varepsilon_0\cdot\omega}+\varepsilon_B\right]}\right\}.$$
(4.23)

Die Parameter der Modellfunktion $\underline{C}_{Modell}(\omega, .)$ hängen vom jeweiligen Modellansatz ab, und die Existenz einer oder mehrerer Lösungen muss für das jeweilige Modell überprüft werden.

Die Konvergenz des numerischen Verfahrens hängt zum einen vom Mengenbereich der einzelnen Parameter und zum anderen von dem numerischen Verfahren selbst ab. Eine genaue Untersuchung der Konvergenz, Stabilität, Kondition, Effizienz der einzelnen numerischen Verfahren für dieses Problem und die Anzahl der notwendigen bekannten Parameter wurde nicht durchgeführt. Es wurde überwiegend auf Plausibilität und durch gezielte Testmessungen überprüft, inwieweit das Verfahren sinnvolle Ergebnisse liefert. Hierbei wurde die "Nonlinear Least Squares-Curve Fitting Toolbox" von MATLAB verwendet. Der MATLAB-Quellcode für das *Basismodell ohne Leisten* kann im Anhang E.2 nachgeschlagen werden. Bisher muss bei unbekannter Geometrie das Basismodell ohne Leisten verwendet werden. Material von Pressboard und Leisten als identisch angenommen wird.

Um die Lösungsmenge einzugrenzen, müssen alle unbekannten Parameter auf einen geeigneten Mengenbereich begrenzt werden. Für Öl-Papier-Isolationssysteme hat sich der folgende Mengenbereich als günstig erwiesen:

• Der theoretische Vakuumkapazitätsbereich C_0 eines Leistungstransformators kann mit der Dielektrizitätszahl der einzelnen Materialien und mit der Kapazitätsmessung bei 1000 Hz wie folgt abgeschätzt werden:

$$\underline{\varepsilon}_T(1000 \ Hz,.) = \Re[\underline{C}_T(1000 \ Hz,.)]/\underline{C}_0 \ \in \ [2,\,5].$$

- Der Ölkanal- oder Rissfaktor liegt bisher im Bereich $k_A = A_{Pb}/A \in [0.9, 1.0].$
- Das Öl-Pressboardverhältnis liegt bei unbekannter Geometrie im Bereich $k_{Oel} = d_{Oel}/d \in [0.2, 0.8]$ und kann bei bekannter Geometrie als Konstante betrachtet werden.
- Bei bekannter Geometrie ist der Leisten-Flächenfaktor eine Konstante im Bereich von $k_L = A_L/A \in [0.2, 0.5]$, sonst $k_L = 0$.
- $\sigma_{Oel} \in [0.1, 100]$ in pS/m entspricht dem spezifischen Leitfähigkeitsbereich von Mineralöl bei unterschiedlicher Temperatur und Alterungszustand.
- $\varepsilon_{Oel_{\infty}} \approx 2.1$ wird als bekannt angesehen oder kann durch Ölproben bestimmt werden.
- $\sigma_{PB} \approx 0.1 \,\text{fS/m}$ kann als bekannt angenommen werden, da der Wert nur eine geringe Auswirkung auf die Messung hat.
- Der Bereich der instantanen Polarisation von Pressboard ist $\varepsilon_{PB_{\infty}} \in [3, 5]$.
- Bei $\Delta \varepsilon \in [0, \infty]$ kann die obere Grenze in Abhängigkeit vom jeweiligen Materialzustand und -eigenschaft begrenzt werden, um das Lösungsverfahren zu optimieren.
- Die Relaxationszeitkonstante hängt von der kleinsten Messfrequenz f_{min} ab und liegt im Bereich $\tau \in [0, 1/f_{min}]$ in s.
- Der symmetrische Verteilungsfaktor der Relaxationszeit liegt im Bereich von $n \in [0.2,\,1.0]$

Wie zu erkennen ist, werden $\varepsilon_{Oel_{\infty}}$ und σ_{PB} festgesetzt und somit als bekannt angenommen. Dies ist notwendig, um eine eindeutige Lösung zu erhalten. Eine weitere Eingrenzung der Parametermenge ist in manchen Fällen sinnvoll, um zum einen die Geschwindigkeit des Lösungsverfahrens zu erhöhen und zum anderen die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern.

4.3.4 Einfluss der Temperatur des Isolationssystems

Die komplexe Kapazitätsmessung an Leistungstransformatoren hängt von vielen Parametern ab. Dennoch sollte der Temperatureinfluss gesondert betrachtet werden, da die Materialeigenschaften sich durch die Temperatur besonders stark verändern. Der Streukanal liegt zwischen den Wicklungen. Durch die axiale und radiale Temperatur-Verteilung zwischen den Wicklungen wird der Streukanal ebenfalls thermisch beeinflusst. Die Temperatur der Isolierstoffe im Streukanal wird zum einen durch Umwelteinflüsse, wie Umgebungstemperatur, Regen, Wind, Sonneneinstrahlung und zum anderen vom Abkühlungsverhalten des Streukanals zwischen dem Abschaltzeitpunkt und Messendzeitpunkt beeinflusst.

Für die Kapazitätsmessung wäre eine konstante und bekannte Temperatur der Wicklungen und somit im Streukanal des Transformators über den Messzeitraum ideal, da in diesem Fall die temperaturabhängigen Materialien einen definierten Zustand bezüglich der Temperatur haben. Durch die Temperatur wird hauptsächlich die Leitfähigkeit des Mineralöls und das Relaxationsverhalten im Pressboard verändert. Bei konstanter Temperatur können die Ergebnisse der Messdaten gut analysiert werden, da keine Verzerrung der Ergebnisse durch die Temperatur vorherrscht (siehe Abbildung 4.18). Dies gilt bei einer nicht gleichförmigen Temperaturverteilung im Transformator nur näherungsweise.



Abb. 4.17: Schematische Darstellung der Temperaturverteilung einer Transformatorwicklung.

Grundsätzlich kann zwischen den Wicklungen von einer axialen und radialen Temperaturverteilung ausgegangen werden. In Abbildung 4.17 ist die Betrachtungsweise der Temperaturverteilung im Betrieb schematisch nach [32, IEC 354] und [33, IEC 76-2] dargestellt. Der Verlauf der radialen Temperaturverteilung hängt vom Wärmestrom zwischen den Materialien ab, und wird als konstant angenommen. Die axiale Temperaturverteilung kann mit der Vereinfachung, wie es in der Abbildung 4.17 dargestellt ist, näher betrachtet werden. Der vereinfachte Temperaturverlauf kann mit Hilfe der Messpunkte $\vartheta_{Oel-unten}, \vartheta_{Oel-oben}$ und $\vartheta_{Cu-mitte}$ bestimmt werden. Die Öl-Temperatur kann direkt gemessen werden. Der Mittelwert für die Kupfertemperatur wird indirekt über den Widerstand der Wicklung bestimmt [56, S. 16]. Mit dem Temperaturverteilung linear abgeschätzt werden. Liegen die Temperaturverläufe von Öl und Wicklung eng zusammen, dann kann die axiale Temperaturverteilung als konstant betrachtet werden.

Die bisherigen Transformatormodelle gehen von einer konstanten Temperaturverteilung im Streukanal aus. Um den axialen Temperaturverlauf nachzubilden, muss dass bisherige Modell axial diskret unterteilt werden, in Form einer axialen Parallelschaltung von mehreren komplexen Modell-Kapazitäten. Als Beispiel, wie sich die komplexe Kapazität eines Transformators verändert, wurde das Basismodell ohne Leisten $\underline{C}_{Modell}(h, \vartheta)$ verwendet, wobei die axiale Höhe h gedrittelt wurde. Für den grob approximierten Kapazitätsverlauf des Transformators ergibt sich:

$$\underline{C}_{Gesamt} = \underline{C}_{Modell}(h/3, \vartheta_{unten}) + \underline{C}_{Modell}(h/3, \vartheta_{mitte}) + \underline{C}_{Modell}(h/3, \vartheta_{oben})$$

Die Abbildung 4.18 zeigt den exemplarischen Temperaturverlauf mit drei diskreten Temperaturen $\vartheta_{unten} = 25 \,^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_{Mitte} = 40 \,^{\circ}\text{C}$ und $\vartheta_{oben} = 55 \,^{\circ}\text{C}$. Weiterhin wurde angenommen, dass nur die spezifische Öl-Leitfähigkeit eine Temperaturabhängigkeit mit $\sigma_{Oel}(25 \,^{\circ}\text{C}) = 0,323 \,^{\text{pS/m}}$, $\sigma_{Oel}(40 \,^{\circ}\text{C}) = 0,765 \,^{\text{pS/m}}$ und $\sigma_{Oel}(55 \,^{\circ}\text{C}) = 1,48 \,^{\text{pS/m}}$ aufweist. Die restlichen Parameter werden als temperaturunabhängig betrachtet und die gleichen Modelldaten, wie in den Abbildungen 4.12-4.14, verwendet.



Abb. 4.18: Komplexer Kapazitätsverlauf bei einer konstanten Temperatur $\vartheta = 40$ °C und mit einer axialen Temperaturverteilung von $\vartheta = 25$ °C bis $\vartheta = 55$ °C.

Wie in Abbildung zu erkennen ist, wird der Relaxationsverlauf durch den Einfluss eines axialen Temperaturprofils flacher und breiter. Dieses Verhalten entspricht einer Veränderung des Relaxationsverhaltens, das bei einer unbekannten Geometrie und unbekannten Temperaturverlauf fälschlicherweise als ein Pressboardverhalten interpretiert werden kann. Anhand dieses Beispiels zeigt sich, wie wichtig es ist, die Temperaturverteilung längs der Transformatorwicklung zu kennen oder die Messung bei einer konstanten Temperatur durchzuführen.

Eine exakte Berechnung der Öl-Papier-Parameter im Transformator mit bekannter Temperaturverteilung ist aufgrund unscharfer Ausgangsdaten noch nicht möglich. Jede Messung von Betriebsgrößen, wie die untere und obere Öltemperatur oder die mittlere Wicklungstemperatur, ist mit Ungenauigkeiten verbunden. Hinzu kommen noch weitere Materialparameter, die ebenfalls von der Temperatur abhängen. Dies hat zur Folge, dass sich die Anzahl der unbekannten Modellparameter stark erhöht und eine eindeutige Lösung des Systems nicht mehr gegeben ist. Aus diesem Grund kann bisher der Isolationszustand nur bewertet werden, wenn bei der FDS-Messung die Isolationstemperatur konstant ist oder als konstant angenommen wird.

4.3.5 Einfluss des inhomogenen Streukanal-Rands

Der inhomogene Randbereich ober- und unterhalb der Wicklung beeinflusst ebenfalls die komplexe Kapazitätsmessung. Die Arten und Ausführungen der einzelnen Isolationsschichten sind im Transformatorenbau vielfältig. Der Entwurf eines geeigneten inhomogenen Isolationsmodells im Frequenzbereich, das für alle existierenden Aufbautypen gilt, wäre entweder unverhältnismäßig kompliziert oder sehr ungenau. Deshalb wurde der Randbereich im bisherigen Modell komplett vernachlässigt. Inwieweit der Randbereich die Messung beeinflusst, konnte noch nicht überprüft werden, da solche Messungen bisher noch nicht durchgeführt wurden und die Abschätzung mit vereinfachten Modellen keine sicheren Aussagen zulassen. Hinzu kommt, dass noch überprüft werden muss, inwieweit die Materialien ein lineares Verhalten bezüglich der vorhandenen Messfeldstärke haben.

Eine grobe Annäherung an das Randfeld kann mit der Annahme geschaffen werden, dass sich das Öl-Pressboardverhältnis k_{Oel} im Randbereich vergrößert. Mit dieser Annahme würde man die folgende Abschätzung erhalten:

$$\underline{C}_{Modell} = k_h * \underline{C}_h + (1 - k_h) * \underline{C}_{Rand}.$$

Über den Wert $k_h \in [0, 1]$ kann der Anteil der Kapazität des homogenen Bereichs der Isolationsschicht angegeben werden. \underline{C}_{Rand} gibt das Randverhalten an, zum Beispiel durch die Erhöhung des Öl-Pressboardverhältnis k_{Oel} . Diese grobe Annäherung zeigt auf, dass auch diese Abweichung mit dem homogenen Basismodell von Leistungstransformatoren modellierbar ist, aber die Modellparameter je nach Randbedingungen wenig oder stark abweichen. Vor allem das Öl-Pressboardverhältnis k_{Oel} wird größer, wenn bei der Randkapazität der Öl-Pressboardanteil erhöht wird. Ein Teil wird auch dem Pressboardverhalten zugeordnet. Somit wird die Bestimmung des Pressboardzustands erschwert. Grundsätzlich hängt die Größe des Fehlers vom Anteil des homogenen Bereichs k_h und von der Art der komplexen Randkapazität ab.

Bisherige Anpassungen der Modellparameter von real gemessenen Leistungstransformatoren mit bekannter Geometrie lassen erwarten, dass der Randbereich eine untergeordnete Rolle spielt, wenn der Schichtdickenfaktor des Öls k_{Oel} gut getroffen wird oder sogar geringfügig kleiner ist.

Kapitel 5

Experimentelle Untersuchungen

Die Modellierung des Streukanals basiert auf den Kenntnissen der Materialmessungen im Labor. Mit den Materialmessungen an Isolieröl, Isolierpapier und Transformerboard konnte das empirische Materialmodell auf die notwendigen Parametern und Parameterbereiche reduziert und auf seine Eignung überprüft werden. Darüber hinaus dienen die Messungen an definierten Materialien als Referenz, um die Diagnosemessungen am Leistungstransformator besser interpretieren und bewerten zu können. Bevor der Einfluss durch Wasser, Temperatur und thermische Alterung auf die Messergebnisse und Materialparameter ausführlich diskutiert wird, soll zunächst der Versuchsaufbau, Versuchsablauf und die Messunsicherheit für die Frequenz- und Zeitbereichsmessung vorgestellt werden. Abschließend wird ein Ansatz zur Transformatordiagnose und Überwachung aufgezeigt.

5.1 Versuchsaufbau für Labormessungen im Frequenz- und Zeitbereich

Die Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften von flüssigen und festen Isoliermaterialien im Frequenz- und Zeitbereich bei Temperaturen zwischen -20 °C und 140 °C beinhaltet einige Schwierigkeiten bezüglich des Messaufbaus, der Gestaltung und Vorbereitung des Probenmaterials, sowie der Messgenauigkeit und Messgrenzen des gesamten Messsystems. In diesem Abschnitt soll der Versuchsaufbau und die Problematik der einzelnen Komponenten erörtert werden. Die Beschreibung der Messgrenzen und Messunsicherheit ist für die spätere Auswertung der Materialmessungen von Bedeutung.

5.1.1 Messzelle

Als Versuchsanordnung zur Impedanzmessung (FDS) und Spannungs-Sprungantwortmessung (PDC) wurde eine kapazitive Messzelle benutzt, bei der sich das zu untersuchende Messmedium als Dielektrikum zwischen zwei Elektroden in der Messzelle befindet. Zur Charakterisierung der Stoffeigenschaften des festen und flüssigen Isoliermaterials muss die Messzelle folgende Anforderungen möglichst genau erfüllen:

- homogenes elektrisches Feld,
- geringe Leitfähigkeit,
- geeignete Elektrodengeometrie und -material,

- chemische und thermische Beständigkeit,
- einfache Reinigung,
- geringe Messunsicherheit und
- hohe Messstabilität im gesamten Messsystem und Messzeitraum.

Eine ideale Messzellengeometrie zur Bestimmung der Stoffeigenschaften zeichnet sich durch ein homogenes elektrisches Feld im untersuchenden Messmedium bei minimalen Randeffekten und Streukapazitäten aus. Durch das homogene Feld werden alle Bereiche des Materials gleich stark beansprucht. Diese Forderung wird nur von einer idealen planparallelen Elektrodenanordnung erfüllt, wie es die folgende Abbildung 5.1 veranschaulicht.



Abb. 5.1: Systemantwort eines idealen Kondensators im Frequenz- und Zeitbereich.

Ein idealer Kondensator weist im Frequenzbereich einen konstanten Realteil der komplexen Kapazität auf, der Imaginärteil ist Null. Im Zeitbereich bewirkt ein Spannungssprung einen exponentiell fallenden Ladestromverlauf. Die rechte Abbildung 5.1 zeigt schematisch das zugehörige Systemverhalten für t > 0.

Eine gute Annäherung eines idealen Kondensators ist gegeben, wenn das Verhältnis der Plattenfläche zum Plattenabstand sehr groß ist, die Leitfähigkeit des Plattenkondensators nahezu Null ist und die Kapazität über dem Frequenzbereich konstant bleibt. Da die Leitfähigkeit und die Dielektrizitätszahl des Öl-Papier-Isolationssystems sehr klein sind, kommt die Messzelle einem idealen Kondensator sehr nahe. Aus diesem Grund darf zwischen den Elektrodenplatten nur das gemessene Medium sein. Werden zur Messung von Flüssigkeiten Abstandshalter zur Trennung der Messplatten verwendet, so können diese durch Veränderungen des E-Felds und ihrer Oberflächenleitfähigkeit die Messung verfälschen.

Am verwendeten Messkondensator wurde am Schirm ein Feingewinde angebracht. Damit kann der Plattenabstand variabel eingestellt werden, und die negativen Einflüsse durch den Abstandhalter gehen nicht in die Messung ein. Durch den Schirm werden Messstörungen von äußeren Umwelteinflüssen verringert und die Streukapazität weitgehend konstant gehalten. Die Messzelle wurde, wie in der Abbildung 5.2 dargestellt, konzipiert und realisiert [22, S. 2].

Dem Elektrodenmaterial kommt bei der Impedanzmessung, ähnlich wie bei elektrochemischen Systemen, eine große Bedeutung zu: Zum einen ist zwischen der Elektrode und Isoliermaterial eine Oxidschicht, die je nach Elektrodenmaterial das Messergebnis beeinflusst. Zum anderen entstehen Grenzschichten zwischen Isoliermaterial und der vorhandenen Oxidschicht. In Abhängigkeit von der Frequenz der angelegten Messspannung unterliegt diese Grenzschicht bedingt durch Umladungsprozessen, elektrochemischen Reaktionen oder fortschreitendem Schichtaufbau einer stetigen Veränderung und kann dadurch das Messergebnis verfälschen. Die Stärke und die Entstehungsgeschwindigkeit der elektrochemischen Reaktionen an der Oberfläche sind vom Elektrodenmaterial und vom Messmedium abhängig.



Abb. 5.2: Schematischer Aufbau der Messzelle für die Isoliermaterialmessungen im Frequenz- und Zeitbereich.

DIN EN 60247 (VDE 0380-2) empfiehlt zur Untersuchung von Isolierflüssigkeiten eine polierte Elektrodenoberfläche, die mit der zu prüfenden Flüssigkeit keine chemische Wechselwirkung eingeht. Die Elektroden dürfen nicht von Reinigungsmitteln angegriffen werden. Als ein geeignetes Material zur Untersuchung aller Arten von isolierenden Flüssigkeiten werden Zellen aus nichtrostendem Stahl vorgeschlagen. Aluminiumlegierungen sollten nicht verwendet werden, da sie durch alkalische Reinigungsmittel angegriffen werden. Weiterhin wird erwähnt, dass sich beschichtete Oberflächen als weniger zufrieden stellend erwiesen als Vollmetallelektroden. Hingegen haben sich vergoldete, vernickelte oder rhodinierte Oberflächen bewährt, sofern sie gut beschichtet sind und unbeschädigt bleiben.

Nach [16, S. 63] verursachen unterschiedliche Gitterstrukturen der aufgebrachten Beschichtung bis hin zu technologisch bedingten Einlagerung von Fremdstoffen in der Beschichtung eine weitere Beeinflussung der Messergebnisse.

Stabile Eigenschaften über einen langen Messzeitraum werden mit massiven nichtrostenden Edelstahl-Elektroden (X8CrNiS189), auch V2A genannt, erzielt. Hierbei sind die Vorteile eines im Untersuchungsmedium inerten Elektrodenmaterials mit der massiven Ausführung des Elektrodenkörpers kombiniert.

Nicht nur die chemische Beständigkeit, sondern auch die Temperaturfestigkeit sind für die Messzelle von Bedeutung, da bei der Untersuchung von Isoliermaterial auch das Temperaturverhalten und die künstliche Alterung bei Temperaturen bis 140 °C eine wichtige Rolle spielen. Um den Innendruck bei der Temperaturänderung konstant zu halten, wurde ein hermetisch abgeschlossener Ausgleichsbehälter angebracht. Bei der Auswahl des Messzellen-Materials wurde darauf geachtet, dass kein Material Feuchtigkeit ans Medium abgeben oder mit dem Medium reagieren kann und die Temperaturfestigkeit gewährleistet ist. Schirm und Elektrode sind aus X8CrNiS189 (V2A) gefertigt und mit einer temperaturbeständigen Floatglasplatte getrennt. Zur Abdichtung wurden thermisch und chemisch beständige O-Ringe (80FKM610) verwendet. Somit hat das zu prüfende Material nur mit dem nichtrostendem Stahl und der Floatglasplatte Kontakt.

Zur Befestigung der Elektrodenplatten wurden hochohmige Pertinax-Schrauben gefertigt, die von außen die Elektrodenplatten fixieren. Weitere Durchgangsschrauben wurden zur Befüllung des Behälters mit flüssigem Probenmaterial am Schirm angebracht.

Die Kontaktierung der Elektrodenplatte zum BNC-Kabel erfolgte über einen Gewindestift und SMA-BNC-Adapter mit Teflonisolation. Die technische Auslegung der Messzelle ist in der Abbildung 5.2 veranschaulicht. Ein letztes wichtiges Kriterium der Messzelle ist die Möglichkeit der einfachen Reinigung. Dies wurde durch die einfache Zerlegbarkeit und durch die Bauteilanordnung realisiert.

5.1.2 Messaufbau und -ablauf

Um geeignete Daten zu gewinnen, bedarf es einer Grundausstattung, die gewährleistet, dass sowohl der Messzelle ein definiertes Signal zugeführt werden kann, als auch dass die jeweilige Empfindlichkeit des Messsystems zur Erfassung des Antwortsignals ausreicht. Der Messaufbau besteht bei der vorliegenden Arbeit aus folgenden Geräten:

- Alpha-A Analyser von Novocontrol Technologies GmbH & Co.KG
 - Frequenzbereich von $3\,\mu\mathrm{Hz}$ bis $20\,\mathrm{MHz}$
 - Impedanz
bereich von $0,01\,\Omega$ bis $10^{14}\,\Omega$
 - Kapazitätsbereich von 1 fF bis 1 F
 - Bias von -40 V bis -40 V (Gleichspannungüberlagerung)
 - Amplituden spannung von $1\,\mathrm{mVrms}$ bis $3\,\mathrm{Vrms}$
- 4-Wire Impedance Interface ZG4
- Temperaturmessung an der Messzelle mit Keithley 197 und PT100
- Spannungsquelle und Picoampermeter mit Keithley 6487
 - Spannungsbereich von $\pm 200\,\mu\mathrm{V}$ bis $\pm 500\,\mathrm{V}$
 - Messbereich von $10\,\mathrm{fA}$ bis $20\,\mathrm{mF}$
- BNC-Weiche
 - Umschaltung auf Impedanz- und Spannungssprung-Messkreis
 - Weitere Anschlüsse für maximal vier Messzellen
- Klimaschrank WK11-600 von Weiss Umwelttechnik GmbH

Alle oben erwähnten aktiven Gerätewerden mit einem zentralen Rechner über den IEC-Bus und die serielle Schnittstelle gesteuert. Dieser Rechner erfasst und speichert gleichzeitig die von den Messgeräten aufgenommenen Daten. Die eingesetzte Software ist MATLAB, die sich durch die vielen integrierten mathematischen Tools besonders für solche Aufgaben eignet. Denkbar sind auch Programmiersprachen, wie HP VEE und LabVIEW, oder Hochsprachen, wie C++. Die Abbildung 5.3 zeigt den schematischen Messaufbau für die Materialmessung im Zeitund Frequenzbereich. Im Klimaschrank befindet sich die Messzelle. Am Schirm der Messzelle ist der Temperatursensor PT100 angebracht, mit dem die Messzellentemperatur überwacht wird. Die Koaxialkabel führen von der Messzelle zur Weiche. Je nach Weicheneinstellung wird eine Messung im Zeitbereich (Keithley 6487) oder im Frequenzbereich (Alpha-A Analyser) durchfgeführt. Der PC dient, wie oben erwähnt, zur Steuerung der einzelnen Instrumente und zur Speicherung der Daten.



Abb. 5.3: Messaufbau für die Messung im Frequenz- und Zeitbereich.

Die Hauptschwierigkeiten bei der Messung von Öl-Papier-Isolationssystemen liegen in den kleinen Dielektrizitätskonstanten $2 \le \varepsilon \le 5$ bei 1 kHz und in der niedrigen spezifischen Leitfähigkeit $\sigma < 1 \text{ nS/m}$. Beide Größen haben zur Folge, dass bei einer vorgegeben Messspannung von maximal 20 V ein sehr geringer Strom fließt und somit interne und externe Störeinflüsse die Messergebnisse stark verfälschen können. Daher wurde eine große Sorgfalt auf die Elimination externer Störeinflüsse durch die Abschirmung der Zuleitung und auf die kapazitive Anordnung selbst gelegt. Weitere externe Störeinflüsse, wie z. B. veränderliche klimatische Bedingungen während der Messung, wurden durch den Aufbau in einem Klimaschrank begrenzt.

Um stabile Messungen mit Öl-Papier-Isolationssystemen bei unterschiedlichen Bedingungen durchführen zu können, muss darauf geachtet werden, dass die Messung erst nach einer geeigneten Stabilisierungszeit gestartet wird. Ist die Stabilisierungszeit zu kurz, wird die Messung verfälscht, da nicht alle Ausgleichsvorgänge beendet wurden. Die internen Störeinflüsse werden von den Messinstrumenten, Verbindungskabeln und der Messzelle verursacht und können nur begrenzt verringert werden.

Das Alpha-A Analyser mit dem ZG4 ermöglicht eine 2-Wire oder ein 4-Wire Messung. Alle Messungen, die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt wurden, wurden mit der 2-Wire Methode durchgeführt. Bei der 2-Wire-Messmethode wurde vom Messgerät aus ein Koaxialkabel mit Teflonisolierung bis zur Messzelle verwendet. Die vorhandenen systematischen Einflüsse bis zur Messzelle werden durch ein Kalibrierset des Alpha-A Analysers mit der Koaxialleitung zur Messzelle weitgehend eleminiert. Die Messunsicherheit der Messzelle wird mit Hilfe von Wiederholungsmessungen und dem theoretischen Wissen über das ideale Messzellenverhalten abgeschätzt. Auf diese Weise können die systematischen Fehler und die zufällige Messabweichung der Messzelle bestimmt (siehe Abschnitt 5.1.3) werden.

Bei der Charakterisierung der Öl-Papier-Isolationssyteme im Frequenz- und Zeitbereich wurde meist im Bereich von 10 °C bis 90 °C mit 10 °C oder 15 °C Schritten gemessen. Diese Temperaturen wurden mit dem Klimaschrank angefahren und mit dem Temperatursensor PT100 an der Messzelle kontrolliert. Zur Steuerung der einzelnen Komponenten wurde der in Abbildung 5.4 dargestellt Programmablauf verwendet.



Abb. 5.4: Flussdiagramm des Messablaufs im Frequenz- und Zeitbereich.

Mit dem Start des Messablaufs wird zunächst die Klimakammer auf die angestrebte Solltemperatur gefahren. Dabei wird immer wieder die Temperatur der Messzelle überprüft. Bedingung für den Start der eigentlichen Messung ist nicht die Ist-Temperatur des Klimaschranks, sondern die Ist-Temperatur der Messzelle. Nachdem die Messzelle die Solltemperatur erreicht hat, beginnt die eigentliche Messung. Abhängig von der vorherigen Festlegung des Messablaufs, startet eine Frequenz- oder Zeitbereichsmessung. Die Temperatur des Behälters wird dabei während der Messung konstant gehalten und mit dem Temperatursensor an der Messzelle überprüft. Jede Messung beginnt mit einer Stabilisierungszeit, die für jeden Messablauf individuell festgelegt wird. Die Stabilisierungszeit soll sicherstellen, dass der Messbehälter innen wie außen dieselbe Temperatur hat. Außerdem werden dadurch die Ausgleichsvorgänge innerhalb des Mediums abgewartet, damit sich das Messmedium in einem nahezu homogenen Zustand ohne Ausgleichsvorgängen befindet. Ist eine Frequenz- bzw. Zeitbereichsmessung durchgelaufen, so wird zunächst geprüft, ob im Messablauf eine Wiederbelungsmessung eine weitere Messgelle eine andere Temper

im Messablauf eine Wiederholungsmessung, eine weitere Messzelle oder eine andere Temperatur vorgesehen ist. Sind noch weitere Messungen bei anderen Temperaturen vorgesehen, so fährt der Klimaschrank auf die entsprechende Temperatur, wartet und führt die weiteren Messungen durch. Wenn alle Messungen abgefahren sind, werden die Daten gespeichert und mit MATLAB graphisch dargestellt und die ersten Plausibilitätskontrollen durchgeführt.

Die Reihenfolge des Messablaufs ist beliebig veränderbar und wird mit den Parametern im Messablauf festgelegt. In diesem Messablauf werden alle Einstellparameter der einzelnen Messgeräte ausgehend von der Grundeinstellung der einzelnen Messgeräte gesetzt. Für die meisten Messungen im Frequenzbereich wurde ein Standardmessablauf verwendet. Dessen Parameter sind:

- Stabilisierungszeit: 3600 s,
- Bias ist 0 V,
- Scheitelwert der Wechselspannung $\hat{u} = 2 V$,
- Frequenzbereich von 40 kHz bis 1 mHz mit einem Schrittfaktor von 2,
- Temperaturschritte sind 10 °C, 25 °C, 40 °C, 55 °C, 70 °C und 85 °C.

Wenn nicht anders erwähnt, wird der Standardmessablauf vorausgesetzt. Die Temperatur ist messungsspezifisch und wird immer angegeben. Weiterhin wurde für Messungen der Scheitelwert \hat{u} verändert, der ebenfalls bei Abweichung des Standards angegeben werden.

5.1.3 Messunsicherheit des Messsystems

Eine zentrale Fragestellung bei der Entwicklung eines Messsystems ist die Messunsicherheit, die eine Auskunft über die erreichte Messgenauigkeit, Messgrenzen und Fehler im Messaufbau liefert. An dieser Stelle soll die Messunsicherheit des Messsystems im Labor untersucht werden, um so die Messergebnisse in den folgenden Kapiteln besser bewerten zu können. Die Grundlagen zur Bestimmung der Messunsicherheit können im Anhang B nachgelesen werden. Für die Messung an Leistungstransformatoren kann analog vorgegangen werden; dies soll hier nicht behandelt werden.

Ein Messergebnis ist nur dann vollständig, wenn es von der Angabe einer Messunsicherheit begleitet wird. Zur Ermittlung der Messunsicherheit werden je nach Industriezweig und Aufgabenstellung zum Teil recht unterschiedliche Verfahren eingesetzt. In Deutschland gibt es mit der DIN 1319-Normenreihe eine Anleitung zur Bestimmung der Messunsicherheit. Die Ermittlungsmethode entspricht der Methodik, die bei zufälligen Messabweichungen verwendet wird. Mittels einer mehrfachen Durchführung der Messung unter gleichen Bedingungen wird der beste Schätzwert der Messgröße aus dem arithmetischen Mittelwert errechnet. Die Streuung um den arithmetischen Mittelwert wird durch die empirische Varianz des Mittelwerts charakterisiert.

Untersucht wird der gesamte Messaufbau *ohne* und *mit* der Messzelle. Diese Trennung wird vorgenommen, da die Messzellen in verschiedene Anordnungen zusammengesetzt werden können, wie z.B. durch eine Reihenschaltung oder Parallelschaltung. Die Messunsicherheiten werden nach DIN 1319-3 mit einem theoretischen Modell und mit Wiederholungsmessungen ermittelt. Zusätzlich zu den Messergebnissen kann mit der Annahme, dass die zufälligen Abweichungen für die Messungen nahezu normalverteilt sind, das Vertrauensniveau gewählt werden. In dieser Arbeit wird grundsätzlich von einem Vertrauensintervall von $\pm 3\sigma$ ausgegangen, was bei ca. acht Wiederholungsmessungen einem Vertrauensniveau von mindestens 99% enstpricht. Die Wiederholungsmessung des Messaufbaus ohne Messzelle wurde wie folgt durchgeführt:

Zuerst wurde die Messzelle vom übrigen Messaufbau entfernt und mit dem Kalibrierset das Messsystem bis zur Messzelle kalibriert. Nach dieser Kalibrierung wurden vier Tage lang 25 wiederholte Messungen mit offenen Koaxialkabel im Klimaschrank durchgeführt. Die Position und die Länge der Messleitung entsprach der Anordnung mit Messzelle. Der Messablauf und die Temperatur im Klimaschrank von 25 °C wurden dabei nicht verändert. In der Abbildung 5.5 ist ein Auszug dieser offenen Kapazitätsmessung dargestellt.



Abb. 5.5: Wiederholungsmessungen mit offenen Koaxialkabeln.

Es ist zu erkennen, dass es sich bei dieser Wiederholungsmessung nicht um ein reines Messrauschen handelt, da offenbar ein Muster vorhanden ist. Im Frequenzbereich von 100 mHz bis 40 kHz sind systematische Abweichungen gut erkennbar. Bei kleineren Frequenzen überwiegt die zufällige Messabweichung. Die systematischen Messabweichungen werden durch den Messaufbau mit Klimaschrank, Kabeln und Messgerät verursacht. Eine Veränderung der Kabellänge hatte keinen erkennbaren Einfluss auf die Messergebnisse. Die Position des Kabelendes wurde nicht näher untersucht, da zum einen der Abstand zur Masse oder der Abstand der Kabelenden zueinander die Kapazität ändert. Außerdem liegt die Position der Messleitungen fest, da die Messzelle den Abstand zur Masse und zwischen den Messleitungen vorgibt.

Was jedoch viel wichtiger ist, ist die Größenordnung der Messabweichungen. Die maximale Kapazitätabweichung $|\underline{C}|$ bewegt sich in einer Größenordnung von $3 \cdot 10^{-14}$ F. Bei den durchgeführten Materialmessungen befindet sich die Kapazität im Bereich von $>10^{-11}$ F. Die Messunsicherheiten des Messaufbaus ohne Messzelle haben offensichtlich einen sehr kleinen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Außerdem ist zu bedenken, dass diese Messung an offenen Kabeln durchgeführt wurde. Bei einer Messung am Dielektrikum werden die außeren Störungen durch das geerdete Messzellengehäuse zunächst abgeleitet, aber durch die Ausgleichströme im Schirm ergibt sich ein geringer Einfluss auf das Messergebnis, so dass die zufälligen Messabweichungen je nach horizontaler Position im Klimaschrank etwas unterschiedlich sind. Die vertikale Position der Kabeln sind durch die Messzelle festgelegt.

Für den Messaufbau ohne Messzelle werden die systematischen Abweichungen als zufällige Abweichungen betrachtet. Hieraus folgt ein arithmetischer Mittelwert $\underline{z}(\omega) = 0 + j0$ und eine empirische frequenzabhängige Standardabweichung 3s, die in der Abbildung 5.5 abgelesen werden kann.

Die Messgenauigkeit des gesamten Messaufbaus mit Messzelle kann mit dem theoretischen Wissen einer idealen Kapazitätsmessung und mit den Wiederholungsmessungen abgeschätzt werden. Hierbei wurden bei einer konstanten Temperatur von $25 \,^{\circ}$ C und bei einem Elektrodenabstand von 0,3 mm fünfundzwanzig Messungen durchgeführt.



Abb. 5.6: Wiederholungsmessungen der komplexen Kapazität des kompletten Messaufbaus mit einem Elektrodenabstand d von 0, 3 mm bei 70 $^{\circ}\mathrm{C}.$

Die Abbildung 5.6 zeigt, dass die systematischen Abweichungen klein sind. Die zufälligen Abweichungen werden mit der empirischer Varianz s^2 charakterisiert und haben bei einer Frequenz von 38 mHz ein Maximum $s^2(f) = 2,73 \cdot 10^{-25}$ (siehe Gl. (5.2)). In der Darstellung des Verlustwinkels δ wird die Messunsicherheit über den Frequenzbereich deutlich. Die maximale Abweichung tritt ebenfalls bei 38 mHz auf. Dies liegt daran, dass die Varianz des Realteils deutlich größer ist als die Varianz des Imaginärteils (siehe Gl. (5.2)).

Messungen bei tiefen und hohen Temperaturen zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die zufällige Messabweichung. Beim Realteil der Kapazität zeigte die Messzelle eine deutliche systematische Messabweichung bezüglich der Temperatur. Bei steigender Temperatur wird der Elektrodenabstand etwas größer, da die Ausdehnungskoeffizienten von Pertinax, Glas und Metall unterschiedlich sind. Dieser Einfluss sollte bei exakten Messungen an Flüssigkeiten beachtet werden. Die Kapazitätsabweichung der Messzelle liegt bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta \vartheta = 70$ °C unter drei Prozent und hat folgenden theoretischen Zusammenhang:

$$C'(\Delta\vartheta) \approx \frac{A_{th} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{d_0 + \alpha_r \cdot l_0 \cdot \Delta\vartheta}$$
(5.1)

$C'(\Delta \vartheta)$	Realteil der komplexen Kapazität \underline{C} der Messzelle,
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz,
ε_0	elektrische Feldkonstante,
ε_r	Dielektrizitätskonstante,
A_{th}	theoretische Elektrodenfläche (siehe Gl. (5.4)),
d	Elektrodenabstand,
l_0	Anfangslänge,
$lpha_r$	Längenausdehnungskoeffizient.

 l_0 entspricht der Breite der beiden Glasscheiben und beträgt hier 20 mm. Der resultierende Längenausdehnungskoeffizient setzt sich aus den einzelnen Materialien zusammen. Da der Längenausdehnungskoeffizient der Floatglasscheibe zu vernachlässigen ist, ergibt sich für $\alpha_r \approx \alpha_{V2A} - \alpha_{Pertinax} = 0,000064 \, 1/\kappa$. Um die Genauigkeit zu verbessern, kann die Messzelle bei Bedarf mit Stickstoff gefüllt und die Referenzkapazität bei unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen werden.

Bei einem Elektrodenabstand von 2 mm konnte nur bis zu einer Frequenz von 38 mHz gemessen werden. Danach brach der Alpha-A Analyser von Novocontrol die Messung aufgrund der dann zu geringen Impedanz ab. Die empirische Varianz im verkürzten Messbereich wurde dabei nicht größer als beim kleineren Abständen und lag innerhalb der maximalen Varianz, wie er bei einem Elektrodenabstand von 0,3 mm gemessen wurde. Die maximale empirische Varianz für den kapazitiven Messaufbau im Frequenzbereich von $1 \text{ mHz} \leq f \leq 40 \text{ kHz}$ bei einem Elektrodenabstand von 0,3 mm ist (vgl. Abbildung 5.6):

$$s_{c-max}^{2}(f) = \max_{f} [s_{c}^{\prime 2}(f)] + \max_{f} [s_{c}^{\prime \prime 2}(f)] = 2,56 \cdot 10^{-25} + 1,42 \cdot 10^{-26} = 2,732 \cdot 10^{-25} .$$
(5.2)

 $s_c'^2(f)$ steht für die empirische Varianz des Realteils der Kapazitätsmessung und $s_c''^2(f)$ für den Imaginärteil. Die ermittelte Standardabweichung mit Messzelle ist somit 10 mal größer als die Standardabweichung ohne Messzelle. Dies liegt zum einen an der Anzahl der Kontaktierungsstellen in der Messzelle und zum anderen am Schirmungehäuse, das bedingt durch die Größe und Form eine größere elektromagnetische Einkopplungsmöglichkeit bietet. Der empirische Mittelwert der komplexen Kapazität, wie in der Abbildung 5.6 dargestellt, ist:

$$\underline{\bar{C}}(f) = \overline{C}'(f) + j\overline{C}''(f) = 3,61 \cdot 10^{-10} + j2,1 \cdot 10^{-14} \approx \overline{C}'.$$
(5.3)

Mit Hilfe der empirischen Messungen und einem Modell kann die Genauigkeit des Messystems abgeschätzt werden. Hierzu werden, ausgehend vom Vertrauensintervall von 3s bei einer Normalverteilungsannahme der empirischen komplexen Kapazität <u>C</u> und dem Cole-Cole Modell mit Leitfähigkeit (4.3), die Genauigkeitsgrenzen der Messzelle ermittelt. Zur groben Abschätzung der unteren Leitfähigkeitsgrenze wird angenommen, dass die maximale empirische Abweichung $\sqrt{\max_f [s_c''^2(f)]} = s_{c_{max}}''$ bei 1 mHz liegt und keine Relaxations-

mechanismen vorliegen. In diesem Fall $3s_{c_{max}}^{\prime\prime}$ mit der Leitfähigkeitsfunktion (3.14) gleich gesetzt:

$$\underline{\varepsilon}(\omega)C' = -\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}C' = -3s''_{c_{max}} \text{ mit } \omega = 2\pi \cdot 0,001 \text{ Hz}$$

$$\sigma = \frac{\omega\varepsilon_0 3s''_{c_{max}}}{\bar{C}'} = \frac{2\pi 0,001\varepsilon_0 3\sqrt{1,42\cdot 10^{-26}}}{3.61\cdot 10^{-10}} = 5,51\cdot 10^{-17} \text{ S/m}.$$

Die maximale Abweichung des Realteils der Kapazität ist $\sqrt{\max_f [s_c'^2(f)]} = s_{c_{max}}'$. Daraus folgt eine Abweichung des Realteils der Dielektrizitätsfunktion $s_{\varepsilon'}$ bei einem Vertrauensintervall von $\pm 3s$

$$\pm 3s_{\varepsilon'} = \frac{\pm 3s'_{c_{max}}}{\bar{C}'} = \frac{\pm 3 \cdot \sqrt{2,56 \cdot 10^{-25}}}{3,61 \cdot 10^{-10}} = \pm 0,0042.$$

Bei Materialmessungen wird man erkennen, dass die Abweichungen größer sind. Dies liegt daran, dass die Ausgleichsvorgänge, Verunreinigungen in der Materialprobe und die Aufbautoleranz, wie Parallelität der Elektrodenoberfläche oder Elektrodenabstand, hinzukommen.

Der Behälter wurde für Abstände zwischen 0 mm < d < 3 mm ausgelegt, um bei verschiedenen Materialstärken messen zu können. Wird bei einem realen Plattenkondensator der Elektrodenabstand variiert, dann verändert sich die Kapazität in Abhängigkeit des Abstands und der Randkapazität. Für die Frequenzmessung spielt die Fläche eine untergeordnete Rolle, da die Vakuumkapazität C_0 sehr gut durch Messung mit der stickstoffgefüllten Anordnung bestimmt werden kann. Die theoretische Elektrodenfläche wird für die Auswertung der Zeitbereichsmessung benötigt, um die spezifische Leitfähigkeit zu bestimmen. Hierzu kann die Gleichung

$$A_{th} = \frac{C' \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \quad \text{mit} \quad A_{th} = D_{th}^2 \pi/4 \tag{5.4}$$

verwendet werden. A_{th} ist die theoretische Elektrodenfläche und D_{th} der theoretische Durchmesser.

Bisher wurde die Messunsicherheit im Frequenzbereich betrachtet. Hierbei hat sich gezeigt, dass der reale Messaufbau einem theoretischen idealen Messaubau, wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, sehr nahe kommt.

5.2 Isolieröl auf Mineralölbasis

Isolieröle sind komplexe Materialsysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften und einer Vielzahl von Alterungsmechanismen (siehe Anhang C.1). Um mit der Methode der Impedanzmessung die Eigenschaften von Isolieröl charakterisieren zu können, müssen die einzelnen Einflussgrößen und der Einfluss auf die komplexen Kapazitätsmessung ermittelt werden. Zu den Einflussgrößen gehöhren die elektrische Feldstärke, verursacht durch unterschiedlichen Elektrodenabstand oder unterschiedliche Messspannungen, der Wassergehalt im Öl, das Temperaturverhalten und die chemische Veränderung im Isolieröl durch natürliche oder künstliche (thermisch forcierte) Alterung. In diesem Abschnitt werden hauptsächlich die Isolieröle auf Mineralölbasis betrachtet, die der DIN EN 60296 (VDE 0370 Teil 1) "Flüssigkeiten für elektrotechnische Anwendungen - Neue Isolieröle für Transformatoren und Schaltgeräte" entsprechen. Die gewonnenen Erkenntnisse können in einem weiteren Schritt zur Diagnose von ölgefüllten Betriebsmitteln, wie z.B. Leistungstransformatoren, verwendet werden.

Untersucht wurde in diesem Zusammenhang neuwertiges Isolieröl (Shell-Diala D) sowie künstlich und betriebsmäßig gealterte Isolieröl-Proben von Leistungstransformatoren der Firma E.ON.

5.2.1 Vorbereitung der Isolierölproben

Um reproduzierbare Messungen durchführen zu können, wurde das Isolieröl in einen definierten Zustand gebracht. Hierzu wurden die Proben vor der Messung getrocknet, entgast und bei Bedarf befeuchtet.

Trocknen und Entgasen des Isolieröl:

Da das Öl hydrophob ist, wirkt das Isolieröl wasserabweisend. Im Normalfall enthält ein 1 kg Öl bei der Anlieferung etwa 5 – 10 mg Wasser, dies entspricht 5 – 10 ppm [52, S. 39]. Um Isolieröl zu trocknen und zu entgassen, ist eine Lagerung der Proben für 1-2 Tage unter Vakuum (100 mbar) bei einer Temperatur von 60 °C ausreichend. Eine Temperatur über 90 °C, die den Trocknungsvorgang beschleunigen würde, ist bei Isolieröl nicht zu empfehlen; derartig hohe Temperaturen verstärken die Zersetzung der Ölproben.

Einstellung des Wassergehalts im Isolieröl:

Zur Befeuchtung von Isolieröl gibt es kein übliches oder gar genormtes Verfahren. Deshalb wurde in dieser Arbeit ein Standard zur Befeuchtung von ungebrauchten Öl-Proben festgelegt. Im ersten Schritt wurden die Proben getrocknet und entgast. Danach wurden die Öl-Probe der freien Atmosphäre ausgesetzt oder in einem Klimaschrank mit erhöhter Luftfeuchtigkeit offen gelagert. Ziel war dabei, nicht einen bestimmten Wassergehalt zu erhalten, sondern nur unterschiedliche Stufen für die Feuchtigkeit. Eine genauere Einstellung des Wassergehalts ist nur möglich, wenn die Einstellung der Luftfeuchtigkeit und Temperatur im Klimaschrank sehr genau ist. Das Wasser wurde mit dem Karl-Fischer-Titrationsverfahren (siehe Abschnitt 3.3.1) bestimmt.

Künstliche Alterung der Isolieröle und orginale Öl-Proben:

Um neuwertiges Isolieröl künstlich zu altern, wurde das Isolieröl auf eine erhöhte Temperatur gebracht. Durch die Temperaturbeanspruchung wird die Alterung beschleunigt. Zur thermischen Alterung der Proben wurden Temperaturen zwischen 90 °C-120 °C je nach gewünschter Alterungsgeschwindigkeit gewählt.

Orginale Öl-Proben von Leistungstransformatoren wurden zunächst ohne Vorbehandlung gemessen und danach bei Bedarf, wie oben beschrieben, getrocknet, entgast oder der Wassergehalt in der Öl-Probe verändert.

5.2.2 Einfluss der Feldstärke auf die Kapazitätsmessung

Die Feldstärke hat bei einem idealen Dielektrikum keinen Einfluss auf die Dielektrizitätzzahl. Jedoch zeigen manche reale Dielektrika eine Abhängigkeit der Dielektrizitätszahl von der Feldstärke. Die Feldstärken liegen bei der FDS- und PDC-Messung an Transformatoren in den meisten Fällen unter 10 V/mm. Aus diesem Grund wurde der Einfluss der Feldstärke unter 10 V/mm im Temperaturbereich von $10 \degree \text{C-85} \degree \text{C}$ untersucht, indem der Abstand von 0, 25 mm, 0, 5 mm, 1, 0 mm und 2, 0 mm des Messbehälters verändert und die Spannungsamplitude $\hat{u} = 2 \text{ V}$ konstant gehalten wurde. Alternativ wurde der Abstand konstant gehalten und die Spannungsamplitude variiert. Beide Möglichkeiten wurden untersucht und ergaben die gleichen Ergebnisse bei einer Feldstärke unter 10 V/mm.



Abb. 5.7: Komplexe Dielektrizitätsfunkion von Shell Diala D bei 30° C mit Feldstärken zwischen 1V/mm - 8V/mm (Wassergehalt 10-15 ppm).

Die Abbildung 5.7 zeigt die komplexen Dielektrizitätsverläufe $\varepsilon(\omega, E)$ bei unterschiedlichen Abständen über dem Frequenzbereich von 1 mHz bis 40 kHz. In diesem Bereich bleibt der Realteil ε' nahezu unabhängig von der Feldstärke. Die geringe Abweichung wird zum einen durch die mechanische Toleranz beim Verstellen des Abstands verursacht. Zum andern ist eine geringe systematische Veränderung erkennbar. Der Imaginärteil ε'' wird im unteren Frequenzbereich überwiegend durch die Leitfähigkeit beeinflusst. Es ist zu erkennen, dass die Leitfähigkeit bei steigendem Abstand geringfügig größer wird und im Bereich von 0,096 pS/m $< \sigma < 0,182$ pS/m liegt. Die Ursache liegt hauptsächlich nicht an der Veränderung der Feldstärke, sondern daran, dass sich der Wassergehalt im Mineralöl durch die Messzeit von ca. 6 Tagen kontinuierlich verändert hat. Bei der Feldstärke von 8 V/mm lag der Wassergehalt bei 10 ppm und die Leitfähigkeit bei $\sigma = 0,096$ pS/m. Nach ca. fünf Tagen wurde bei einer Feldstärke von 1 V/mm gemessen und der Wassergehalt lag bei 15 ppm und die zugehörige Leitfähigkeit bei $\sigma = 0,182$ pS/m.

Damit ist experimentell abgesichert, dass der Einfluss der Feldstärke bei der Anwendung des Verfahrens zur Diagnose von Leistungstransformatoren vernachlässigbar ist, wenn die Feldstärke zwischen OS und US $< 10 \,\text{V/mm}$ beträgt. Außerdem ist der Einfluss durch Wasser, Säuren oder alkalischen Bestandteilen im Mineralöl auf den komplexen Dielektrizitätsverlauf deutlich größer. Wie in der Abbildung 5.7 zu erkennen ist, besteht der Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion aus einem konstanten Realteil, der kein Relaxationsverhalten aufweist, und einem Imaginärteil, der durch die Leitfähigkeit verändert wird.

Somit kann das Isolieröl im Frequenzbereich zunächst wie folgt modelliert werden:

$$\underline{\varepsilon}(\omega, .) = \frac{\sigma(.)}{j\omega\varepsilon_0} + \varepsilon_{\infty}(.).$$
(5.5)

Das Fehlen eines Relaxationsverhaltens von Isolieröl in dem betrachteten Frequenzbereich, liegt daran, dass die Grenzflächenpolarisation und Orientierungspolarisation im niedrig viskosen Isolieröl nicht existieren. Die vorhandenen Veränderungen des Realteils im mHz-Bereich liegen einerseits im Bereich der Messunsicherheit und andererseits sind dies Oberflächeneffekte an der Messelektrode. An der Elektrodenoberfläche bildet sich eine dünne Ladungsschicht, die durch die Leitfähigkeitsveränderung eine Grenzflächenpolarisation erzeugt. Diese Erscheinung wird bei erhöhtem Wasser- und Säuregehalt noch deutlicher.

5.2.3 Einfluss des Wassergehalts auf die Kapazitätsmessung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Wassergehalts auf die Dielektrizitätsfunktion von Isolieröl betrachtet. Zur Untersuchung wurden neuwertige Isolieröle und Orginalproben von Leistungstransformatoren verwendet. Bei den Orginalproben wurde zunächst ohne Vorbehandlung und anschließend die getrocknete Probe gemessen, um so herauszufinden welcher Einfluss das Wasser im Isolieröl auf die Messergebnisse hat. Grundsätzlich bezitzt das Isolieröl keine Relaxationsmechanismen. Dennoch wird das Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit und zwei Relaxationsmechanismen (4.3) verwendet, damit die Oberflächeneffekte mit modelliert werden.

Zunächst soll ein *neuwertiges Isolieröl (Shell-Diala D)* bei unterschiedlichem Wassergehalt betrachtet werden. Um das Mineralöl zu befeuchten, wurde es mehrere Tage der Umgebungsatmosphäre ausgesetzt, bis es einen erhöhten Wassergehalt von 18 ppm erlangt hat. Die Messungen wurde bei einer Temperatur von $40 \,^{\circ}$ C durchgeführt und der Elektrodenabstand der Messzelle betrug 1 mm; die mit Stickstoff-Füllung gemessene Kapazität der Messzelle betrug 113 pF. Für das feuchte Isolieröl kann die folgende Dielektrizitätsfunktion angegeben werden:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = -\mathbf{j}\frac{3,71 \cdot 10^{-12}}{\varepsilon_0 \omega} + 2,14 + \frac{3,873}{1 + (\mathbf{j}\omega 146,58)^{0,95}} + \frac{0,158}{1 + (\mathbf{j}\omega 13,50)^{0,93}}$$
(5.6)

Das getrocknete Mineralöl hatte vor und nach der Messung einen Wassergehalt von 11 ppm und wurde ebenfalls mit dem gleichen Standardmessablauf (siehe Abschnitt 5.1.2) gemessen. Mit dem Approximationsprogramm ergeben sich die folgenden Modellparameter für die Messung am trockenen Isolieröl:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = -j\frac{3,34 \cdot 10^{-13}}{\varepsilon_0 \omega} + 2,15 + \frac{2,1 \cdot 10^{-14}}{1 + (j\omega 1,1 \cdot 10^4)^1} + \frac{2,2 \cdot 10^{-14}}{1 + (j\omega 1000)^1}$$
(5.7)

Die maximale Abweichung zwischen Modell und Messungen lag bei allen Messungen unter 4%. Dies kann am Realteil der <u>B</u>-Funktion abgelesen werden (siehe Abbildung 5.8).

Wie an den Modellfunktionen der einzelnen Messungen zu erkennen ist, ist der Einfluss der α - und β - Relaxationen beim trockenen Isolieröl sehr klein. Das feuchte Isolieröl zeigt im mHz-Bereich ein Relaxationsverhalten, das den Oberflächeneffekten an der Elektrode zugeordnet wird.

Der größte Unterschied zwischen trockenem und feuchtem Isolieröl zeigt sich im Imagiärteil der komplexen Dielektrizitätsfunktion aus, wie in der Abbildung 5.8 ersichtlich ist. Die instantane Polarisation ist nahezu identisch [1], [21].



Abb. 5.8: Frequenzabhängige komplexe Dielektrizitätsfunktion von feuchtem und trockenem Mineralöl (Shell-Diala-D) bei einer Temperatur von 40 °C.

Der Imaginärteil im mHz-Bereich ist ein Indikator für die Leitfähigkeitsveränderung. Beim erhöhtem Wassergehalt steigt die spezifische Leitfähigkeit, um einen Faktor von zehn an. Die α - und β - Relaxationen zeigen nur Veränderungen im mHz-Bereich. Zusammenfassend kann das vereinfachte Öl-Modell gemäß (5.5) das dielektrische Verhalten von feuchten oder trocken neuwertigen Isolieröl nachbilden.

Bei Untersuchungen an Originalproben von Hochspannungstransformatoren hatte die Öl-Probe Trafo112 vor dem Trocknen einen Wassergehalt von 31,7 ppm und nach dem Trocknen 10 ppm. Das Anpassungsergebnis für die feuchte originale Isolierölprobe bei einer Temperatur von 40 °C lautet:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = -j \frac{2.59 \cdot 10^{-11}}{\varepsilon_0 \omega} + 2,15 + \frac{486.20}{1 + (j\omega 1.1 \cdot 10^4)^1} + \frac{0.42}{1 + (j\omega 1000)^{0.67}}$$
(5.8)

und für die trockene originale Isolier
ölprobe bei 40° ${\it C}$ erhält man folgende Modell
daten:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = -j \frac{1.18 \cdot 10^{-11}}{\varepsilon_0 \omega} + 2.14 + \frac{0.0624}{1 + (j\omega 174)^1} + \frac{0.0012}{1 + (j\omega 0.2486)^1}$$
(5.9)

Werden die beiden Messungen miteinander verglichen (vgl. Abb.:5.8), so zeigt sich kein wesentlicher Unterschied im Verlauf der realen Dielektrizitätszahl über dem Frequenzbereich. Nur der Verlauf des Imaginärteils ist minimal verändert. Dieser Leitfähigkeitsunterschied ist bei anderen Messtemperaturen ebenfalls vorhanden. Die Veränderung durch die α - und β - Relaxationen sind, wie in den oberen Gleichungen zu sehen ist, unbedeutend und können vernachlässigt werden.

Die Ursache für die Leitfähigkeitsänderung ist zum einen dem Einfluss des Wassergehalts und zum anderen dem Gehalt an Partikeln und Säuren im Öl zuzuschreiben (vgl. 3.3.3. Dies wird bestätigt, wenn die spezifische Leitfähigkeit von allen vier Isolieröl-Proben bei einer konstanten Temperatur graphisch verglichen wird. In Abbildung 5.9 erkennt man die starke Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit von trockenem neuwertigem Mineralöl zum feuchten Mineralöl um einen Faktor von ca. 10. Die Leitfähigkeit der trockenen zur feuchten orginalen Öl-Probe wird hingegen nur verdoppelt. Der Unterschied zwischen der trockenen Öl-Probe Trafo112 zum neuwertigen Mineralöl ist mit einen Faktor von 37 signifikant.



Abb. 5.9: Spezifische Leitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehalts von neuwertigen Shell-Diala D und der Öl-Probe Trafo112 bei einer Temperatur von 40 °C.

Allerdings konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden, in welcher Form das Wasser im Öl vorliegt. So ist zu erwarten, dass die geringe Menge des Wassers bei neuwertigem Öl in Form einer Emulsion vorliegt. Im Gegensatz dazu sind bei gealtertem Transformatoröl die Dissoziationprodukte und die Ankopplung des Wassers mit diesen Produkten die Hauptursache für die Leitfähigkeitsveränderung im Öl. Diese Annahme könnte bestätigt werden, wenn die Dissoziationsprodukte entfernt werden, und das aufbereitete Isolieröl das gleiche Verhalten wie das neuwertige Isolieröl aufweist.

Weitere Messergebnisse bezüglich betriebsmäßig und künstlich gealtertem Mineralöl werden im Abschnitt 5.2.5 beschrieben. Die bisherige Modellgleichung (5.5) reicht ebenfalls aus, um die Veränderung durch das Wasser im Isolieröl vereinfacht nachzubilden. Demnach verändern das Wasser und der Alterungszustand die Leitfähigkeit $\sigma(.)$ des Isolieröls. ε_{∞} zeigt nur eine geringe Veränderung, die nur unter Laborbedingungen erkannt wird. Aus diesem Grund wird die instantane Polarisation als konstant angesehen.

5.2.4 Einfluss der Temperatur auf die Kapazitätsmessung

Grundsätzlich kann das dielektrische Verhalten von Isolieröl mit der instantanen Polarisation und einem Parameter für die Leitfähigkeit beschrieben werden. Dies entspricht einer Parallelschaltung von Kapazität und Widerstand. Das zugehörige Öl-Modell (5.5) berücksichtigt bisher kein Relaxationsverhalten und keine Temperaturabhängigkeit.

Bei Messungen mit unterschiedlichen Temperaturen zeigte sich ebenfalls, dass ein Relaxationsverhalten nur schwach vorhanden ist und durch die Leitfähigkeitsunterschiede an der Elektodenoberfläche verursacht wird. Die Abbildung 5.10 zeigt typische Verläufe der komplexen Dielektrizitätsfunktion eines neuwertigen Isolieröls (Shell-Diala D) mit einem Wassergehalt von 12 ppm im Temperaturbereich von -10 °C bis 85 °C.



Abb. 5.10: Temperaturverhalten der komplexen Dielektrizitätsfunktion von neuwertigen Isolieröl (Shell-Diala D).

Ab einer Temperatur von 55 °C zeigen die Messergenisse im Frequenzbereich eine Veränderung des Realteils. Diese Veränderungen sind vermutlich Polarisationseffekte an der Elektrodenoberfläche, die erst bei höheren Temperaturen in Erscheinung treten. Da das Relaxationsverhalten erst bei Frequenzen unter 5 mHz und bei erhöhten Temperaturen in Erscheinung tritt, kann es für die meisten Anwendungenfälle vernachlässigt werden. Der Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätsfunktion zeigt dagegen eine deutliche Temperaturabhängigkeit und somit eine Erhöhung der Leitfähigkeit an. Am Verlustwinkel von $\delta > \pi/4$ rad kann erkannt werden, ab welcher Grenzfrequenz die Leitfähigkeit überwiegt. Mit dem vereinfachten Öl-Modell nach Gleichung (5.5) ergeben sich folgende Parameter für die Messung (siehe Tab.: 5.2).

Temperatur ϑ in °C	spezif. Leitfähigkeit σ in S/m	instantane Polarisation ε_∞
-20	$3, 16 \cdot 10^{-15}$	2,21
-5	$1,58 \cdot 10^{-14}$	2, 19
10	$9,27 \cdot 10^{-14}$	2, 17
25	$3,23 \cdot 10^{-13}$	2, 15
40	$7,65 \cdot 10^{-13}$	2,14
55	$1,48 \cdot 10^{-12}$	2, 12
70	$2,81 \cdot 10^{-12}$	2,11
85	$3,96 \cdot 10^{-12}$	2,11

Tab. 5.2: Öl-Modellparameter für neuwertiges Isolierlöl (Shell Diala D) bei unterschiedlichen Temperaturen.

Beim Auftragen der spezifischen Leitfähigkeit über die Temperatur zeigt das neuwertige Isolieröl eine exponentielle Abhängigkeit. Dieses exponentielle Verhalten wurden bei allen Messfluiden, die in dieser Arbeit und in [16] untersucht wurden, bestätigt. Die Ursache für die temperaturabhängige Leitfähigkeit ist im Abschnitt 3.1.5 beschrieben und hängt von der Viskosität, Ionenanzahl und Ionenladung in der Flüssigkeit ab. Die Arrhenius-Gleichung (3.25) beschreibt die Veränderung der Leitfähigkeit in Abhängigkeit der reziproken absoluten Temperatur mit Hilfe der Aktivierungsenergie. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung einer exponentiellen Funktion

$$\sigma(\vartheta) = a \cdot exp(-b \cdot \vartheta) \,.$$

Beide Funktionen können nur abschnittsweise das Temperaturverhalten nachbilden, da die Leitfähigkeit von neuwertigem oder ungebrauchtem Isolieröl (Shell-Diala D) einen Knick unterhalb von 15 °C aufweist. Mit der Arrhenius-Gleichung kann dieser Verlauf mit zwei Aktivierungsenergien beschrieben werden. Die Vergrößerung der Aktivierungsenergie unterhalb von 15 °C kann durch eine geringe Viskositätserhöhung begründet sein. Außerdem hat es sich gezeigt, dass die Arrhenius-Gleichung im Temperturbereich von 10 °C bis 85 °C das Temperaturverhalten am Besten modelliert. Diese Form der Modellierung hat zwei wesentliche Vorteile. Der erste Vorteil ist die Komprimierung der Messdaten. Der zweite Vorteil ist, dass ein konstanter systematischer Fehler in der Impedanzmessung keine Auswirkung auf die Berechnung der Aktivierungsenergie [16, S. 18] hat.

In der Arrhenius-Darstellung der gemessenen spezifischen Leitfähigkeit ergeben sich Kurven, die sich in ihrem Anstieg unterscheiden, wenn es sich um unterschiedliche Messfluide und Viskositäten handelt. Bei gleichen Messfluiden mit unterschiedlichem Alterungszustand verschiebt sich die Kurve nahezu parallel. Die Tabelle 5.3 zeigt, dass $-E_A/R_m$ für neuwertiges und künstlich gealtertes Shell-Diala D fast identisch sind.



Abb. 5.11: Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von neuwertigen Shell-Diala D und orginalen Ölproben von Leistungstransformatoren.

Die Abbildung 5.11 illustriert das Verhalten der spezifischen Leitfähigkeit der verschiedenen Öl-Proben über die reziproken Temperatur, die so genannte Arrhenius-Darstellung. Die Aktivierungsenergie E_A lieg bei Mineralöl im Temperaturbereich von $[15 \,^{\circ}\text{C}, 85 \,^{\circ}\text{C}]$ bei $E_A = 4824 * R_m$. Die Messwerte für die instantane Polarisation des neuwertigen Mineralöls (Shell Diala D) sind in der Tabelle 5.2 aufgelistet. Die minimalen Veränderung von ε_{∞} wird im geringen Maße vom Medium und hauptsächlich durch die Messzelle verursacht, da die Messzelle eine geringfügige Temperaturabhängigkeit aufweist, die im Abschnitt 5.1.3 beschrieben ist. Ein temperaturabhängiges Isolieröl-Modell für das komplexe Kapazitätsoder Dielektrizitätsverhalten ist:

$$\underline{\varepsilon}(\omega,\vartheta)) = \frac{\sigma(\vartheta)}{j\omega\varepsilon_0} + \varepsilon_{\infty} \quad \text{mit} \quad \sigma(\vartheta) = \sigma_0 \cdot \exp(\frac{-E_A}{R_m(\vartheta + 273, 15)}).$$
(5.10)

 σ_0 ist eine temperaturunabhängige spezifische Leitfähigkeit, die vom jeweiligem Wassergehalt oder Alterungszustand abhängt (vgl. Abschnitt 5.2.3). Als untere Grenze können die Kennwerte eines neuwertigen Isolieröls verwendet werden. Für ungebrauchtes trockenes Shell-Diala D (12 ppm) ergeben sich folgende Koeffizienten im Temperaturbereich von 15 °C bis 85 °C: $\sigma_0 = 3,5805 \,\mu\text{S/m}, \, \varepsilon_{\infty} = 2,15 \,\,\text{und} \, E_A/R_m = 4824 \,\,\text{K}.$

5.2.5 Betriebsmäßige und künstlich gealterte Isolieröl-Proben

Um die Modellgleichung (5.10) auf die Brauchbarkeit zur Modellierung von betriebsmäßig gealterten Isolierölproben von Leistungstransformatoren zu überprüfen, wurden unterschiedliche Isolieröle näher untersucht. Die Tabelle 5.3 zeigt einen kleinen Ausschnitt der

Proben	$\begin{array}{c} \text{Verlust-} \\ \text{faktor} \\ \tan \delta \end{array}$	Wasser- gehalt (ppm)	Durchschlags- spannung (kV)	Neutralisations- zahl $(mg \text{ KOH/g Oel})$	$\sigma_0~({ m S/m})$	ε_{∞}	$(K)^{-E_A/R_m}$
neues Öl	0,001	12	>60 **)	<0,03 **)	3,580E-6	2,15	-4824
Trafo049	0,007	5	74	0,02	4,510E-4	2,14	-5935
Trafo125	0,005	7	78	< 0,02	9,659E-5	2,16	-5507
Trafo140	0,011	10	76	0,06	4,450E-5	2,13	-4881
Trafo139	0,016	14	73	0,06	-	2,12	-
$Trafo138^*$)	0,024	9	74	0,10	4,275E-5	2,14	-4626
$Trafo112^*$)	0,016	10	-	-	9,692E-5	2,14	-4963
künst. gealt. Öl (2000h)	0,086	5	-	-	2,749E-4	2,13	-4901
Rapsöl	0,026	-	>60 **)	-	9,363E-3	2,97	-6450
*) siehe auch Abbildung 5.11 **) Kennwerte vom Hersteller							

Tab. 5.3: Übersicht der untersuchten Isolieröl-Proben mit Materialkenndatenund Modellparametern.

Proben und die zugehörigen Parameter für die Modellgleichung (5.10), die bei einer Temperatur von $15 \,^{\circ}$ C bis $85 \,^{\circ}$ C ermittelt wurden. Um das Isolieröl künstlich zu altern wurde es 2000 h mit einer Temperatur von $120 \,^{\circ}$ C unter hermetischem Abschluss gelagert und danach die Temperaturverlaufsmessung durchgeführt.

Die betriebsmäßig gealterten Isolierölproben stammen aus verschiedenen Leistungstransformatoren der Firma E.ON. Die Probenbezeichnung sowie die einzelnen Materialkenndaten können aus der Tabelle 5.3 entnommen werden.

Die Materialkenndaten des neuwertigen Isolieröls entsprechen den Forderungen der Norm: VDE 0370 Teil 1 und 2. Ergänzend zum Isolieröl auf Mineralölbasis wurde Rapsöl gemessen. Das Rapsöl zeichnet sich durch höhere Werte für Dielektrizitätskonstante bei 50 Hz und die Viskosität aus. Die Abbildung 5.12 zeigt die einzelnen komplexen Dielektrizitätsfunktionen, die bei einer Temperatur von 25 °C gemessen wurden.

Deutlich ist an den Transformator-Ölproben zu erkennen, dass der Imaginärteil der kom-



Abb. 5.12: Bei 25 °C gemessene komplexe Dielektrizitätsfunktion von neuwertigem Shell-Diala D, Öl-Proben von Leistungstransformatoren, nach 2000 h bei 120 °C künstlich gealtertem Shell-Diala D und neuwertigem Rapsöl

plexen Dielektizitätsfunktion im Bereich der tieferen Frequenzen mit zunehmender Neutralisationszahl (NZ) immer stärker abfällt und somit auf eine Erhöhung der Leitfähigkeit hinweist. Hingegen ist der Realteil bis zu einer Frequenz von 5 mHz konstant. Werden nun die einzelnen Messungen mit Gleichung (5.10) approximiert, so zeigt sich, dass die instantante Polarisation nahezu konstant ist und das Verhältnis von $-E_A/R_m$ eine große Abweichung aufweist. Die Aktivierungsenergie E_A wird hauptsächlich von der Viskosität bestimmt. Jedoch weisen z. B. die Isolierölproben Trafo139 und Trafo138 eine Krümmung auf, die auf eine temperaturabhängige Viskosität hinweist. Da nicht bekannt ist, mit welcher Ölsorte diese beiden Transformatoren gefüllt sind, konnte dieses Verhalten an einer Vergleichsprobe nicht näher untersucht werden. Die restlichen Isolieröle zeigen nahezu konstante Aktivierungsenergien E_A . Die Aktivierungsenergie des neuwertigen und des künstlich gealterten Shell-Diala D sind nahezu identisch.

Im Abschnitt 5.2.3 wurde gezeigt, dass der Wassergehalt die Leitfähigkeit beeinflusst. Jedoch hängt die Leitfähigkeit viel stärker von der Neutralisationszahl ab. Vergleicht man hierzu die einzelnen Messungen in der Arrhenius-Darstellung 5.13, dann erkennt man eine deutliche Verschiebung der Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Neutralisationszahl. Für die Diagnose am Leistungstransformator kann mit Hilfe der berechneten Leitfähigkeit die Isolierölqualität vor Ort abgeschätzt werden. Liegt zum Beispiel die berechnete Leitfähigkeit im Bereich der Probe Trafo049 und Trafo125, dann kann davon ausgegangen werden, dass die Neutralisationszahl des gemessenen Transformatoröls ebenfalls in dem Bereich der Neutralisationszahl dieser Probe liegt. Um genauere Aussagen zu treffen, müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Das dielektrische Verhalten von Rapsöl kann ebenfalls mit der für Mineralöl gefundenen Modellgleichung beschrieben werden. Wie in den Abbildungen 5.12 und 5.13 zu erkennen ist,



Abb. 5.13: Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von neuwertigem Shell-Diala D, Öl-Proben von Leistungstransformatoren und Rapsöl.

weist das neuwertige Rapsöl eine höhere Leitfähigkeit, Dielektrizitätszahl und Viskosität auf. Eine Untersuchung der Veränderungen durch künstliche Alterung würde die Messung ergänzen.

5.2.6 Öl-Modell und $\tan \delta$ -Messung nach IEC 60247

Aus der im vorigen Abschnitt abgeleiteten und verifizierten Modellgleichung für das komplexe Dielektrizitätsverhalten lassen sich ausgehend von einer tan δ -Messung nach IEC 60247 die Parameter der Gleichung (5.10) finden. Zum einen kann mit zwei tan δ -Messung bei unterschiedlichen Temperaturen ein ausreichend genaue Parameterisierung des Modells vorgenommen werden. Zum anderen können vorhandene tan δ -Messungen, die während der vergangenenen Jahre durchgeführt wurden, zur Diagnose hinzugezogen werden.

Zur Herleitung des Zusammenhang zwischen der Modellgleichung und dem dielektrischen Verlustfaktor, wird von der Messung nach Norm ausgegangen. Der dielektrische Verlustfaktor ist bei 90 °C nach IEC 60247 oder IEC 61620 zu messen. Normalerweise wird die Messung nach IEC 60247 bevorzugt.

Rechnerisch lässt sich der tan δ des Isolierstoffs als Verhältnis des Realteils des Stromes I'zum Imaginärteil des Stromes I'' darstellen und kann mit der komplexen Dielektrizitätszahl ebenfalls bestimmt werden. Laut der Bedingung des Modells (5.10) kann für die komplexe Dielektrizitatszahl $\varepsilon' = \varepsilon_{\infty}$ und $\varepsilon'' = \sigma/(\varepsilon_0 \cdot \omega)$ eingesetzt werden und wir erhalten:

$$\tan \delta = \frac{I'}{I''} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\infty} \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega}$$

Ist der dielektrische Verlustfaktor tan δ bei einer bestimmten Frequenz ω bekannt, dann kann der Leitfähigkeitsverlauf errechnet werden. Hierzu muss die Temperatur ϑ bekannt sein, bei der die tan δ -Messung durchgeführt wurde.

Mit der Annahme, dass die Aktivierungsenergie von der Viskosität des Mediums abhängig und unabhängig vom Alterungszustand oder Wassergehalt ist, erhält man den folgenden
Zusammenhang:

$$\tan \,\delta(\vartheta) = \frac{\sigma(\vartheta)}{\varepsilon_{\infty}\varepsilon_0 2\pi f} \quad \text{mit } \sigma(\vartheta) = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_A}{R_m(\vartheta + 273, 15)}\right) \,. \tag{5.11}$$

Zunächst kann mit der Gleichung (5.11) der Verlustwinkel δ , ausgehend von einem existierenden Modell, bestimmt werden. Bei einer bekannten tan δ -Messung kann die temperaturunabhängige Größe σ_0 bestimmt werden, sofern die restlichen Parameter, wie Messtempertur ϑ , Aktivierungsenergie E_A und die Messfrequenz f, bekannt sind. Die Genauigkeit der Modellgleichung zur Beschreibung des dielektrischen Verhaltens von Mineralöl hängt von der tan δ -Messung und von der Annahme der Aktivierungsenergie ab.

5.3 Imprägniertes Papier und Transformerboard

Der Hauptbestandteil von Papier und Transformerboard ist die Cellulose. Für die meisten elektrischen Isolationanwendungen wird Transformerboard und Papier mit Mineralöl imprägniert. Das Transformerboard ist nichts anderes als ein nasses Vergautschen von geschichtetem Isolierpapier ohne Bindemittel [52, S. 25].

Die Einflussparameter, wie Alterungszustand, Temperaturverhalten, Wassergehalt, Feldstärke usw. sind für Cellulose-Isolationssysteme ebenfalls von Bedeutung und werden in diesem Abschnitt näher untersucht. Der Einfluss der Messfeldstärke wird vernachlässigt, da sie klein gegen über der Betriebsfeldstärke ist.

Die experimentellen Messungen bei unterschiedlichen Einflussparametern bestätigten, dass das komplexe Dielektrizitätsverhalten mit dem Cole-Cole-Modell (4.3), bestehend aus der spezifischen Leitfähigkeit, instantanen Polarisation und zwei Relaxationstermen, gut nachgebildet wird [23]. Die Zuordnung der Parameterveränderung auf die Ursachen ist bisher nur zum Teil möglich. Dies erschwert auch die Interpretation und Beurteilung der Messergebnisse, wenn die Ursache unbekannt sind.

Um die Veränderung durch unterschiedliche Einflussparameter anhand von Messdaten im Frequenzbereich zu verdeutlichen, wurde das Material

- Transformerboard (TIV), Produkte der Fa. Weidmann Transformerboard Systems AG, mit einer Materialdicke von 1-2 mm und
- $\bullet\,$ zwei Papierschichten mit einer Materialdicke von $0,15\,\mathrm{mm}$

im Frequenzbereich von $1\,\mathrm{mHz}$ bis $40\,\mathrm{kHz}$ gemessen und die Einflussgrößen gezielt verändert.

5.3.1 Vorbereitung der Papier- und Transformerboard-Proben

Die Cellulose-Proben werden bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30-75 % bei Umgebungsdruck gelagert. Durch die hygroskopische Eigenschaft der Cellulose hat das nichtimprägnierte Cellulosematerial, je nach Gleichgewichtszustand, ein Wassergehalt von 4-12 %. Um die Trocknungszeit möglichst kurz zu halten, muss die Gleichgewichtsbedingung durch die Absenkung des Drucks und die Erhöhung der Temperatur unterhalb des gewünschten Gleichgewichts liegen. Der Unterdruck bewirkt eine Verschiebung des Siedepunkts des Wassers hin zu einer niedrigeren Temperatur, verglichen mit $100 \,^{\circ}$ C bei atmosphärischen Bedingungen. Hierbei geht der Aggregatzustand des Wassers vom flüssigen zum gasförmigen Zustand über. Der entstehende Wasserdampf in der Cellulose wird durch den Dampfdruckunterschied über die feinen Poren an die Oberfläche befördert. Die Temperaturerhöhung unterstützt die Umwandlung des Aggregatzustands und setzt die Bindungsenergie des Wassers an der Cellulose herab, was den Trocknungsvorgang beschleunigt [52, S. 35].

Zur Trockung und anschließender Imprägnierung der Papier- und Transformerboard-Proben wurde in dieser Arbeit ein Standardablauf verwendet. Hierbei wurden die Cellulose-Proben in einem Zeitraum von 48 h im Vakuumschrank bei einer Temperatur von 100-110 °C getrocknet. Die Dauer für den Trocknungsvorgang hängt von der Dicke des Probenmaterials ab. Es gilt generell, je dünner das Material ist, desto schneller geht die Trocknung von statten. Bei 0, 15 mm dicken Papier- und maximal 1 mm dicken Pressboardproben sind 48 h bei 100-110 °C mehr als ausreichend, um den Wassergehalt in der Probe unter 0,3 % herabzusetzen.

Nach der Trocknung kann die Imprägnierung mit Isolieröl erfolgen. Um ein schnelles eindringen des Öls zu gewährleisten, empfiehlt es sich, das Öl vor der Imprägnierung auf ca. 60 °C zu erwärmen. Die erhöhte Temperatur setzt die Viskosität und Oberflächenspannung des Öls herab, dadurch kann das Öl besser in die Poren eindringen. Bei der Imprägnierung wird die Feststoffisolierung aus Cellulose unter Vakuum mit Öl imprägniert. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass Gaseinschlüsse vermieden werden. Nach der Imprägnierung wird die Temperatur in der Vakuumkammer auf 60 °C herabgesetzt, um das Imprägnieröl nicht thermisch zu belasten und um die Materialprobe kurzeitig trocken zu lagern.

Die Herstellung von Materialproben mit erhöhtem Wassergehalt birgt einige Schwierigkeiten. Eine ideale Probe besitzt eine homogene Feuchtigkeitsverteilung über das gesamten Materialvolumen. Bei den Papierproben kann durch die geringe Materialdicke davon ausgegangen werden, dass die Feuchtigkeitsverteilung konstant ist. Beim Transformerboard ist diese Bedingung nur erfüllt, wenn die Probe über eine längere Zeit einer konstanten Feuchtigkeit ausgesetzt wird. Weiterhin hängt die Messgenauigkeit des Karls-Fischer-Titrationsverfahrens von mehreren Faktoren ab [8]. Ein Rundversuch an verschiedenen Laboren vom Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart zeigte eine deutliche Abweichung der Messergebnisse [42].

Um den Wassergehalt im gesamten Volumen der Materialprobe gleichmäßig zu erhöhen, wurde die Probe nach dem Trocknen und Imprägnieren in ein Ölbad gelegt. Die Materialproben konnten so über das Öl langsam das Wasser aus der umgebenden Atmosphäre aufnehmen, wodurch eine differenziertere Befeuchtung möglich wurde. Auf diese Weise wird eine nahezu konstante Wassergehaltsverteilung in der Materialprobe erreicht. In [20] wird die zeitliche Abhängigkeit der Feuchtigkeitsaufnahme bei unterschiedlichen Bedingungen vorgestellt. Mit Hilfe der *Moisture Equilibrium Curves* [14] kann der maximale Wassergehalt im Transformerboard mit der Feuchtigkeitsmessung des Öls in der Probenwanne abgeschätzt werden. Mit einer Referenzprobe, die ebenfalls im Ölbad liegt, kann der aktuelle Wassergehalt genauer bestimmt werden. Hatte die Probe einen gewünschten Feuchtigkeitsbereich erreicht, dann wurde die Probe in die Messzelle eingebaut, mit dem Isolieröl aus der Probenwanne gefüllt und nach drei Tagen die Frequenzmessung gestartet. Nach der Messung wurde der Wassergehalt mit dem Karl-Fischer-Titrationsverfahren überprüft. Hierbei wurde das Transformerboard im Querschnitt gedrittelt, um so die Feuchtigkeitsverteilung über die Materialdicke abschätzen zu können.

5.3.2 Einfluss der Öl-Imprägnierung auf die Kapazitätsmessung

Es ist zu erwarten, dass nicht-imprägniertes Papier und Pressboard grundsätzlich ein ähnliches dielektrisches Materialverhalten aufweisen. Der wesentliche Unterschied zwischen Papier und Transformerboard ist, dass das Transformerboard aus mehreren Papierlagen besteht. Durch den chemischen Aufbau der Celluloseketten, können die Proben aus reiner Cellulose nahezu als ein ideales Dielektrikum angessehen werden, wobei die vorhandenen Hohlräume mit Luft gefüllt sind.

Die Abbildung 5.14 zeigt die komplexe Kapazitätsmessung von nicht-imprägnierten und imprägnierten Papier im Temperaturbereich von $15\,^{\circ}$ C bis $85\,^{\circ}$ C. Das trockene nicht-



Abb. 5.14: Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion von nicht-imprägnierten Papier (cyan, 2x0, 15 mm, Wassergehalt 1, 1%) und imprägnierten Papier (rot, 2x0, 15 mm, Wassergehalt 0, 57%) in Abhängigkeit der Temperatur.



Abb. 5.15: Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunktion von nicht-imprägnierten Transformerboard TVI (cyan, 1 mm, Wassergehalt 0, 3%) und imprägnierten Transformerboard (rot, 1 mm, Wassergehalt < 0, 3%) in Abhängigkeit der Temperatur.

imprägnierte Papier oder Transformerboard zeigt annähernd ein ideales dielektrisches Verhalten im vorgegebenen Frequenzbereich. Der Realteil der komplexen Dielektrizitätsfunktion ist nahezu konstant und liegt im Mittel bei 2,7. Je nach Verarbeitung liegt die instantane Dielektrizitätszahl von Isoliermaterialien aus Cellulose im Bereich von 2,1 bis 3,3. Im trockenen und nicht-imprägnierten Zustand sind die Relaxationsmechanismen von Cellulose-Isolierstoffe vernachläßigbar.

Der Verlauf des Imaginärteils $\varepsilon^{\prime\prime}$ kann am Verlustwinkel δ in rad erkannt werden, da für kleine δ

$$\varepsilon'' = \tan \delta \cdot \varepsilon' \approx \delta \cdot \varepsilon' \tag{5.12}$$

gilt. Im gemessenen Frequenzbereich ist der Verlustwinkel für nicht-imprägniertes TIV und Papier sehr klein, was auf eine geringe spezifische Leitfähigkeit hindeutet. Am Verlauf des Verlustwinkels ist eine Temperaturabängigkeit erkennbar. Bei steigender Temperatur erhöht sich die Leitfähigkeit. Im Abschnitt 5.3.4 wird auf das Temperaturverhalten näher eingegangen.

Bei einer Temperatur von 25 °C liegt die spezifische Leitfähigkeit bei den gemessenen nichtimprägnierten Papierproben unter 4,2 $^{\rm fS/m}$ und bei den Tansformerboard-Proben unter 1,6 $^{\rm fS/m}$. Die Leitfähigkeit wird bei den Proben hauptsächlich vom Wassergehalt beeinflusst. Zur Modellierung bei konstanter Temperatur kann für das trockene nicht-imprägnierte Papier und Transformerboard ein vereinfachtes Modell, das aus der spezifischen Leitfähigkeit und instantanen Polarisation besteht, verwendet werden:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) \approx \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \,. \tag{5.13}$$

Die Imprägnierung der Cellulose-Proben mit Shell-Diala D verändert die komplexe Kapazitätsmessung im Real- und Imaginärteil. Der Grund liegt zunächst an den unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Materialien. Die Hohlräume sind nicht mehr mit Luft, sondern mit Isolieröl (Shell-Diala D) gefüllt. Hierbei entsteht ein fein vernetztes Mehrstoffsystem mit mikroskopischen Ölkammern und Ölkanälen (Kapillaren), das das Impedanzverhalten wesentlich bestimmt.

Da die Hohlräume nicht mehr mit Luft sondern mit Isolieröl gefüllt sind, erhöht sich die spezifischen Leitfähigkeit. Anhand des Verlustwinkels in der Abbildung 5.14 und 5.15 wird die Veränderung zwischen der imprägnierten und nicht-imprägnierten Messung in Abhängigkeit der Temperatur deutlich.

Eine weitere Aufälligkeit ist, dass die spezifische Leitfähigkeit der imprägnierten Probe σ_{im} größer ist als die von der nicht-imprägnierten Probe σ_{ni} und beide kleiner sind als die Leitfähigkeit vom Isolieröl σ_{Oel} :

$$\sigma_{Oel} > \sigma_{im} > \sigma_{ni}$$
.

Dies weißt auf keine eindeutige Reihen- oder Parallelschaltung von Cellulose und Isolieröl hin, da bei einer Reihenschaltung die gesamte spezifische Leitfähigkeit kleiner als die spezifische Leitfähigkeit der Celluslose und bei einer idealen Parallelschaltung größer als die spezifische Leitfähigkeit des Isolieröls ist. Die imprägnierte Cellulose besteht somit aus einer Parallel- und Reihenschaltung der einzelnen Medien. Der Grund liegt zunächst an den faserigen Cellulosestrukturen der einzelnen Papierschichten und an den mikroskopischen Ölkammern und Ölkanälen. Beim Transformerboard wird, durch vergautschte Papierschichten, die Anzahl der mikroskopischen Ölkanläle stark reduziert und die Strecke des Ölkanals verlängert, was die Leitfähigkeit herabsetzt.

Das fein vernetzte Mehrstoffsystem führt zu Grenzflächenpolarisationen, die im niedriegen Frequenzbereich durch die Veränderung des Realteils der komplexen Dielektrizitätsfunktion sichtbar werden. Die Ursache für diese Veränderung ist die Leitfähigkeitsdifferenz bzw. Leitfähigkeitsverteilung an den Grenzflächen der einzelnen Materialien. Im mittleren Frequenzbereich zeigt sich ein weiterer Polarisationsmechanismus, der durch die unterschiedliche instantane Polarisation erzeugt wird. Da die Differenz der instantanen Polarisationen zwischen Cellulose und Öl gering ist, kann diese Veränderung vernachlässigt werden.

Zusammengefasst kann ein neuwertiges, trockenes und imprägniertes Transformerboard

oder Papier mit der folgenen komplexen Dielektrizitätsfunktion modelliert werden:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon_\alpha}{1 + (j\omega\tau_\alpha)^{n_\alpha}}$$
(5.14)

Hierbei wird vorausgesetzt, dass das Material keine messbare Alterung hat, der Wassergehalt klein und die Messtemperatur konstant ist. Das Ergebnis kann geringfügig verbessert werden, wenn das Cole-Cole-Modell mit zwei Relaxationen (4.3) verwendet wird. Die zugehörigen Kenndaten für das imprägnierte Papier und TIV können aus den Tabellen 5.6 und 5.7 entnommen werden.

5.3.3 Einfluss des Wassergehalts auf die Kapazitätsmessung

Der Einfluss des Wassergehalts wurde an folgenden Proben durch Messungen untersucht:

- Nicht-imprägniertes Transformerboard (TIV) mit einer Materialdicke von 1 mm und einem Wassergehalt zwischen 0,3% und 5,6%.
- Imprägniertes Transformerboard (TIV) mit einer Materialdicke von 1 mm und einem Wassergehalt zwischen 0, 3% und 2, 1%.
- Imprägniertes Papier mit einer Materialdicke von 0, 15 mm und einem Wassergehalt zwischen 0,57% und 4,5%. Hierbei wurden immer zwei Papierlagen gemessen.

Nicht-imprägniertes Transformerboard (TIV)

Die Abbildung 5.16 zeigt die komplexe Dielektrizitätsfunktion $\underline{\varepsilon}$ und den Verlustwinkel δ der getrockneten Materialprobe mit einem Wassergehalt von 0,3% und der gelagerten Probe mit einem Wassergehalt von 5,6%. Bei dieser Probe kann von einer homogenen Feuchtigkeitsverteilung ausgegangen werden. Die Messtemperatur betrug 25°C.



Abb. 5.16: Messung und angepasster Verlauf der komplexen Dielektrizitätsfunk-
tion vom nicht-imprägniertem Transformerboard TIV mit einem Was-
sergehalt von 0, 3% und 5, 6%.

Mit dem Cole-Cole-Modell (4.3) wurde die Messung mit einem Wassergehalt von 5,6 % modelliert.

$$\underline{\varepsilon}(\omega, 25\,^{\circ}\mathrm{C}) = \frac{3.4E - 012}{j\omega\varepsilon_0} + 3.10 + \frac{11.67}{1 + (j\omega182.5)} + \frac{6.8}{1 + (j\omega3.07)^{0.717}}$$

Die gestrichelte Linie entspricht hierbei der Modellfunktion. Die maximale Abweichung ist im Imaginärteil $\Im(\underline{\varepsilon})$ bei 1 mHz zu erkennen und beträgt 6%. Bei dieser Messung sind zwei symmetrisch verteilte Relaxationen im unteren Frequenzbereich zu erkennen. Bei Frequenzen unter 0,05 Hz dominiert das Leitfähigkeitsverhalten, da der Verlustwinkel gegen $\pi/2$ konvergiert. Die α -Relaxation mit der eindeutigen Zeitkonstanten wird durch Grenzflächenpolarisation verursacht. Die β -Relaxation weist eine Relaxationsverteilung auf, da der Exponent deutlich kleiner als 1 ist. Da im Vergleich zur Messung mit 0,3% Wassergehalt nur der Wassergehalt verändert wurde, kann die Ursache durch eine Leitfähigkeitsverteilung im Inneren oder durch die stark unterschiedliche Dielektrizitätszahl von der Cellulose und Wasser verursacht sein. Im späteren Abschnitt zeigt sich, dass die Messungen von gealtertem Transformerboard ebenfalls in diesem Frequenzbereich eine Kapazitätsveränderung aufweisen.

Imprägniertes Transformerboard (TIV)

Die komplexe Dielektrizitätsfunktion von imprägniertem Transformerboard mit einer Materialdicke von 1 mm und einem Wassergehalt zwischen 0, 3 % und 2, 1 % ist in der Abbildung 5.17 dargestellt. Die Messtemperatur betrug 25 °C. Zur Bestimmung des Wassergehalts wurde die Probe schichtweise zerlegt und die Feuchtigkeit im Inneren und an der Oberfläche, nach der Frequenzmessung, gemessen, um so die Homogenität des Wassergehalts zu kontrollieren. Die erste Angabe ist der Wassergehalt der Randschicht und die zweite entspricht dem Wassergehalt im Probenkern.



Abb. 5.17: Imprägniertes Transformerboard TIV mit einem Wassergehalt $W_{\%}$ von 0,3% bis 2,1% bei einer Messtemperatur von 25°C.

In Abbildung 5.17 ist zu erkennen, dass bis zu einem Wassergehalt im Materialkern von 0,8% der komplexe Dielektrizitätverlauf keine wesentliche Ververändung aufweist. Erst ab 1,04% wird eine Veränderung in der Messung deutlich. Die Veränderung im unteren Frequenzbereich weist auf eine Grenzflächenpolarisation hin, die mit der α -Relaxation nachgebildet wird. Die Hauptursache für die Polarisationsmechanismus ist die Leitfähigkeitsverteilung an den Grenzflächen zwischen Mineralöl und Cellulose. Für eine genauere Approximation werden für das Modell zwei Relaxationen benötigt. Die β -Relaxation modelliert die Kurvenverlaufsänderung im mittleren Frequenzbereich. Die Parameter für das Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit (4.3) sind in der Tabelle 5.4 aufgelistet.

Wassergehalt in $\%$	0,3	0,95/0,85	1,28/1,04	2,09/1,86
σ in S/m	9,80E-15	1,57E-14	1,99E-14	7,23E-14
ε_{∞}	$3,\!63$	$3,\!40$	$3,\!57$	$3,\!64$
$\Delta \varepsilon_{lpha}$	0,500	$0,\!375$	$2,\!05$	3,062
$ au_{lpha}$ in s	500	500	$128,\!80$	$152,\!55$
nlpha	$0,\!436$	0,504	0,823	$0,\!677$
$\Delta \varepsilon_{eta}$	0,298	$0,\!481$	0,530	0,535
$ au_{eta}$ in s	1E-006	1E-006	1E-006	1E-006
neta	0,325	$0,\!258$	0,252	0,288

Tab. 5.4: Cole-Cole-Modell
parameter für imprägniertes Transformerboards TIV
mit unterschiedlichem Wassergehalt bei einer Messtemperatur von
 $25\ ^{\circ}\mathrm{C}$. Die maximale Abweichung liegt unter 3 %.

Die Abbildung 5.18 zeigt das Verhalten der spezifischen Leitfähigkeit in Abhängikeit des Wassergehalts. In der logarithmischen Darstellung steigt die Leitfähigkeit fast linear mit



Abb. 5.18: Einfluss des Wassergehalts von TIV auf die spezifische Leitfähigkeit bei 25 °C.

dem Wassergehalt. Die geringe Abweichung vom linearen Anstieg können durch die unterschiedlichen Proben, Messfehler bei der Wassergehaltsbestimmung und im Messsystem sowie durch die Anpassung der Modellparameter an die Messdaten entstehen, da die Messungen und Probenvorbereitung zeitlich auseinander lagen.

Wenn die einzelnen Terme der Cole-Cole-Funktion getrennt betrachtet werden, dann wird der Einfluss des Wassers deutlich. In der Abbildung 5.19 ist die β -Relaxation addiert mit der instantanen Polarisation ε_{∞} dargestellt. Die Addition wurde gemacht, um alle Informationen beizubehalten. Es zeigt sich hier, dass die α -Relaxation im unteren Frequenzbereich die stärkste Veränderung in Abhängigkeit des Wassergehalts aufweist. Die Addition von β -Relaxation und ε_{∞} zeigt hingegen nur eine parallele Verschiebung, die durch die Messtoleranz zur Bestimmung von C_0 und durch den Unterschied der Dielektrizitätszahl von



Wasser ($\epsilon_r \approx 80$) und imprägniertem Transformerboard ($\epsilon_r \approx 4$) entsteht.

Abb. 5.19: Verlauf der einzelnen α -Relaxation und β -Relaxation bei 25 °C.

Beim steigenden Wassergehalt könnte sich die β -Relaxation ebenfalls verändern. Diese Vermutung beruht auf dem Verhalten von Papier mit unterschiedlichem Wassergehalt. Jedoch konnte der Nachweis bisher nicht erbracht werden.

Imprägniertes Papier

Die komplexe Dielektrizitätsfunktion von imprägniertem Papier mit einer Materialdicke von 0, 15 mm und einem Wassergehalt zwischen 0, 3% und 4, 5% wurde mit zwei Papierlagen gemessen und ist in Abbildung 5.20 dargestellt. Die Messtemperatur betrug 25 °C.



Abb. 5.20: Komplexe Dielektrizitätsfunktion von imprägniertem Papier mit einem Wassergehalt von 0,3 % bis 4,5 % bei 25 °C.

Bei imprägniertem Papier liegt die gemessene komplexe Kapazität vollständig im Messbereich des verwendeten Messsystems, dadurch können Veränderungen besser analysiert werden. Außerdem ist durch die geringe Materialdicke das Wasser homogen über das ganze Materialvolumen verteilt. Alle Verläufe, die in der Abbildung 5.20 dargestellt sind, konnten mit dem Cole-Cole-Modell (4.3) mit einer maximalen Abweichung von 3% modelliert werden.

Wassergehalt in $\%$	$0,\!57$	0,92	1,93	4,5
σ in S/m	8,15E-14	1,51E-13	6,86E-13	4,12E-10
ε_∞	3,6	3,9	3,8	4,1
$\Delta \varepsilon_{lpha}$	$0,\!697$	6,648	7,02	1623
$ au_{lpha}$ in s	51,76	500	264,21	$226,\!78$
nlpha	$0,\!667$	0,7154	0,589	$0,\!89$
$\Delta \varepsilon_{eta}$	0,472	0,348	0,592	$16,\!991$
$ au_{eta}$ in s	1E-6	1,38E-5	1E-6	0,0677
neta	$0,\!23$	0,23	$0,\!23$	0,578

Tab. 5.5: Cole-Cole-Modell
parameter für imprägniertes zweilagiges Papier mit
unterschiedlichem Wassergehalt bei einer Messtemperatur von 25 °C.
Die maximale Abweichung liegt unter 3 %.

Bei einem Wassergehalt im Papier unter 2% ist der Kurvenverlauf des Realteils der komplexen Dielektrizitätsfunktion vergleichbar mit dem Kurvenverlauf des imprägnierten Transformerboards TIV.

Die Messung von Papier mit einem Wassergehalt von 4,5 % zeigt eine stark erhöhte Leitfähigkeit und ein ausgeprägtes β -Relaxationsverhalten. Durch den Schirmring der Messzelle ist der Einfluss der Oberflächenleitfähigkeit zunächst verringert, jedoch kann durch geringe Risse oder Inhomogenitäten der Papierstruktur der Schirmring an der Messzelle umgangen werden.



Abb. 5.21: Spezifische Leitfähigkeit von imprägniertem Papier in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei 25 $^{\circ}C$.

Betrachtet man die spezifische Leitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehalts, dann zeigt sich ein exponentielles Verhalten. Bei der logarithmischen Darstellung der Leitfähigkeit verläuft die spezifische Leitfähigkeit von Transformerboard und Papier nahezu linear und zueinander parallel. Die grundsätzlich höhere Leitfähigkeit von imprägnierten Papier ist durch die höhere Anzahl und die geringere Länge der mikroskopischen Ölkanäle (Kapillaren) von Papier im Vergleich zu Transformerboard begründet.

Um die Genauigkeit der Modellierung zu verbessern müssen die Materialproben eine homogene Verteilung des Wassergehaltes aufweisen und die Modelle müssen engmaschig für einen Bereich des Wassergehaltes zwischen 0,3% und 5% vorliegen. Dies könnte durch einen Klimaschrank erreicht werden, der die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit mit der notwendigen Genauigkeit über einen langen Zeitraum konstant hält. Weiterhin wurden die Proben mit einem neuwertigen Öl erstellt. Die Verwendung von gebrauchten Ölen mit bekannter Neutralisationszahl würde das Spektrum an Modellen für Papier und Transformerboard erweitern.

Diese Messungen dienen zum besseren Verständnis, der Auswirkung von Wasser im Isolierstoff auf die komplexe Dielektrizitätsfunktion.

5.3.4 Einfluss der Temperatur auf die Kapazitätsmessung

Bisher wurden alle Messungen bei $25 \,^{\circ}$ C durchgeführt, um den Temperatureinfluss zu minimieren. Der Einfluss der Temperatur auf die Materialien Transformerboard und Papier spiegelt sich, wie beim Öl, ebenso in der Impedanzmessung wieder und kann nur in Sonderfällen vernachlässigt werden. Im folgenden werden zunächst nur Transformerboard und Papier betrachtet, die nur einen geringen Wassergehalt aufweisen. Die Veränderungen in der Impedanzmessung werden dann im Wesentlichen nur durch die Veränderungen der Leitfähigkeit von Öl und Cellulose verursacht. Für die Messungen wurden die Temperaturen $10 \,^{\circ}$ C, $25 \,^{\circ}$ C, $40 \,^{\circ}$ C, $55 \,^{\circ}$ C, $70 \,^{\circ}$ C und $85 \,^{\circ}$ C ausgewählt.

Trockenes nicht-imprägniertes Transformerboard

Die Abbildung 5.22 zeigt die komplexe Dielektrizitätsfunktion über der Frequenz und der Temperatur von nicht-imprägniertem Transformerboard TIV. Das TIV verhält sich nahezu wie ein ideales Dielektrikum über den gemessenen Temperatur- und Frequenzbereich. Die Ursache liegt im Aufbau der Cellulose, da das reine Cellulosemolekül im elektrischen Feld sich nahezu neutral verhält. Der vereinfachte Strukturaufbau einer Cellulosekette (vgl. Abb.: 2.7) berücksichtigt nicht die Anordnung der Hydroxylgruppen, Carboxylgruppen oder Xylan-Molekül und die Spurenelemente vom Cellulose-Herstellungsprozess, die in geringer Zahl vorhanden sind und die dielektrische Eigenschaft beeinflussen [4, S. 54].



Abb. 5.22: Komplexe Dielektrizitätsfunktion von nicht-imprägniertem TIV $(W_{\%} = 0, 3 \%, d = 1 mm)$ in Abhängigkeit der Temperatur.

Für den vorliegenden Fall kann im gewählten Frequenzbereich die Temperaturabhängigkeit der instantanen Polarisation und die spezifische Leitfähigkeit ($\sigma < 1, 6 \, {\rm fS/m}$) vernachlässigt werden. Weiterhin konnten keine Relaxationen identifiziert werden, die auf Spurenelemente hinweisen.

Trockenes imprägniertes Transformerboard

Im Abschnitt 5.3.2 wurde auf die Veränderung der komplexen Kapazität durch die Öl-

Imprägnierung eingegangen. Um das Temperaturverhalten von Mischdielektrika nachzubilden, müssen die einzelnen elektrischen Eigenschaften und die Vernetzung bekannt sein. Bisher konnten die komplexen Dielektrizitätsfunktionen am Transformerboard TIV mit dem Cole-Cole-Modell approximiert werden. Für neuwertiges imprägniertes TIV reichte eine α -Relaxationsverteilung aus, wie in der Abbildung 5.23 und anhand der Modellparameter in der Tabelle 5.6 erkennbar ist. Da $n_{\alpha} < 1$ ist, deutet es auf eine symmetrische Verteilung der spezifischen Leitfähigkeit hin, die nicht von der Cellulose, sondern vom Imprägnier-Öl stammt. Ist $n_{\alpha} \simeq 1$, dann existieren zwei spezifische Leitfähigkeitswerte. Auch Säuren und Wasser in der Feststoffisolation tragen zur Veränderung der Leitfähigkeitsverteilung bei. Die Leitfähigkeitsverteilung bewirkt ein Veränderung im Real- und Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätsfunktion. Diese Veränderung wird im Cole-Cole-Modell, jedoch als eine symmetrische Relaxationszeitverteilung interpretiert. Asymmetrische oder beliebige Relaxationszeitverteilungen werden nur im Extremfall erkannt. Für die Messun-



Abb. 5.23: Komplexe Dielektrizitätsfunktion von imprägniertem TIV $(W_{\%} = 0, 3 \%, d = 1 mm)$ in Abhängigkeit der Temperatur.

gen, die in der Abbildung 5.23, dargestellt sind, konnte zwar ein α -Relaxation identifiziert werden, die auf eine Leitfähigkeitsverteilung hinweist, aber eine genaue Temperaturabhängigkeit konnte nicht zugeordnet werden, da die Veränderung der Kurven zu gering sind und die Messgenauigkeit nicht ausreicht. Um die Genauigkeit zu erhöhen, müsste in diesem Fall die Messfrequenz niedriger sein. Dagegen spricht zum einen die Messzeit, die sich bei jedem Messpunkt verdoppelt, und zum anderen die Verschlechterung der Messvarianz bei niedrigen Frequenzen (siehe Abb.5.6).

Für die Wiedergabe der Messergebnisse von trockenem imprägniertem Transformerboard TIV wurde das Cole-Cole Modell (5.14) verwendet. Die Tabelle 5.6 listet die ermittelten Modellparameterwert auf, die mit dem Programm E.1 bestimmt wurden.

$\vartheta \ [^{\circ}C]$	10.95	24.22	39.21	54.14*)	$69.06^{*})$	$83.98^{*})$
$\sigma~[S/m]$	3.64 E- 15	1.16E-14	$9.85 \text{E}{-}15$	1.19E-14	1.56E-13	1.76E-13
ε_{∞}	3.77	3.82	3.88	3.91	3.94	3.97
$\Delta \varepsilon_{\alpha}$	0.355	0.540	2.472	5.288	2.750	8.644
$ au_lpha$	100	694.81	1000	976.20	100	110.69
nlpha	0.23	0.23	0.545	0.557	0.561	0.639

*) Messung im mHz-Bereich abgebrochen (vgl. Abb. 5.23)

Tab. 5.6: Cole-Cole-Modellparameter für imprägniertes Transformerboard TIV $(W_{\%} = 0, 3 \%, d = 1 mm)$ bei unterschiedlichen Temperaturen.

Die Abbildung 5.24 zeigt die komplexe Differenz des Dielektrizitätsverlauf $\Delta \underline{\varepsilon}(\omega) = \underline{\varepsilon}_{Mess}(\omega) - \underline{\varepsilon}_{Modell}(\omega)$ zwischen Messung und Modell. Dabei ist vor allem erkennbar, dass



Abb. 5.24: Differenz der Messergebnisse des imprägnierten Transformerboards TIV zu dem Cole-Cole Modell mit einer Relaxation in Abhängigkeit von der Messtemperatur ($W_{\%} = 0, 3 \%, d = 1 mm$).

das gewählte Modell eine geringe Abweichung erzielt. $\Delta \underline{\varepsilon}(\omega)$ zeigt im mittleren Frequenzbereich einen systematischen Fehler, der auf eine weitere symmetrische Relaxationszeitverteilung hinweist. Die 85 °C-Messung wurde vom Messgerät abgebrochen.

Trockenes imprägniertes Papier

Das bisherige Verhalten von TIV, das aus mehreren Papierlagen besteht, spiegelt sich auch bei imprägniertem Papier mit zwei Papierlagen wieder. In dieser experimentellen Untersuchung kann man von drei Isolierölschichten und zwei Papierschichten ausgehen. Aus diesem Grund ist die spezifische Leitfähigkeit höher als beim Transformerboard TIV, da die Leitfähigkeit des Isolieröls um einen Faktor von ca. 100 höher liegt.



Abb. 5.25: Komplexe Dielektrizitätsfunktion von imprägniertem Papier ($W_{\%} = 0,57 \ \%, \ d = 0.15 \ mm$) in Abhängigkeit der Temperatur.

Wie auch beim TIV kann die komplexe Dielektrizitätsfunktion mit einer α -Relaxation im Cole-Cole-Modell nachgebildet werden. Die Tabelle 5.7 zeigt die Modellparameter für ein zweilagiges imprägniertes Papier.

Die komplexe Differenz $\Delta \varepsilon(\omega)$ zwischen Messung und Modell, wie in der Abbildung 5.26 dargestellt, zeigt über die unterschiedlichen Temperaturmessungen keine systematische Abweichung auf. Dies bedeutet auch, dass die β -Relaxation nicht in eindeutiger Weise vorhanden ist. Jedoch konnte durch die Verwendung der β -Relaxation die Approximationsgenauigkeit geringfügig verbessert werden. Dies könnte verwendet werden, um die Messdaten zu

$\vartheta \ [^{\circ}C]$	11.04	24.20	39.19	54.12	69.05	83.95
$\sigma [S/m]$	5.01E-14	1.21E-13	6.57E-13	3.16E-12	1.36E-11	5.09E-011
ε_{∞}	3.97	4.00	4.02	4.04	4.06	4.08
$\Delta \varepsilon_{\alpha}$	4.03	20.53	9.16	12.09	25.49	530.06
$ au_lpha$	10000	2524.88	147.19	62.47	75.93	3757.03
nlpha	0.417	0.691	0.723	0.683	0.620	0.606

Tab. 5.7: Modell
parameter für imprägniertes zweilagiges Papier ($W_{\%} = 0, 57 \%$,
d = 1 mm) bei unterschiedlichen Temperaturen.



Abb. 5.26: Differenz der Messergebnisse des imprägnierten Papiers zu dem Cole-Cole Modell mit einer Relaxation in Abhängigkeit der Messtemperatur ($W_{\%} = 0, 57 \%, d = 0, 15 mm$).



Abb. 5.27: Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von neuwertigen imprägnierten Papier und Transformerboard TIV.

komprimieren und für die Modellierung mit Rechneren zu vereinfachen.

Die größte Differenz $\Delta \underline{\varepsilon}(\omega)$ ist bei den Messungen über 70 °C zu erkennen. Die α -Relaxationszeitverteilung ist im gewählten Frequenzbereich ausgeprägter als beim TIV, da eine eindeutige Schichtung von Isolieröl und Cellulose existiert. Dies wird durch hohe n_{α} bestätigt. Eine Temperaturabhängigkeit der α -Relaxationszeitverteilung ist vorhanden.

Wie bisher das Shell-Diala D zeigt das Papier bei der spezifischen Leitfähigkeit eine exponentielle Temperaturabhängigkeit, die mit der Arrhenius-Gleichung beschrieben werden kann. Hingegen kann das TIV durch die Arrhenius-Gleichung nur tendenziell beschrieben werden.

Für die Diagnose ist es wichtig, das Temperaturverhalten von imprägnierten Transformerboard und Papier zu kennen, damit bei unterschiedlicher Messtemperatur gemessene Verläufe (tan δ oder $\Delta \underline{\varepsilon}(\omega, \vartheta)$) korregiert werden können. Bisher kann die Leitfähigkeit abgeschätzt werden. Jedoch konnte die Veränderung an den Relaxationsmechanismen nur grafisch verdeutlicht werden.

5.3.5 Thermische Alterung von Isolierpapier und Pressboard

Die thermische Alterung der Isolation zwischen der US-Wicklung und OS-Wicklung eines Leistungstransformators hängt stark von der thermischen Beanspruchung ab. Um eine vorzeitige Alterung bei einer Transformatordiagnose zu erkennen, muss der Einfluss der thermischen Alterung auf die komplexe Kapazität bekannt sein.

Die thermische Beanspruchung der Isolation während des Betriebs wird mit der Maximaltemperatur innerhalb einer Wicklung abgeschätzt. Nach der Regel von Montsinger kann die Alterungsgeschwindigkeit einer Öl-Papier-Isolation bestimmt werden [48], [49]. Die Regel

$$V_L = 2^{\left(\frac{\vartheta - 98 \circ C}{\Delta \vartheta}\right)}$$

von Montsinger besagt, dass ein Isoliermaterial der Klasse A (Papier, Seide, Baumwolle), wie es in öl-papierisolierten Transformatoren häufig verwendet wird, bei einer Temperaturzunahme von $\Delta \vartheta$ eine Halbierung der relativen Lebensdauer bewirkt [57]. Bei einer Isolationstemperatur von 98 °C wird von einer normalen Alterung ausgegangen. In der Literatur wird für $\Delta \vartheta$ der Wert 6 K angegeben [33], [32].

Der thermische Alterungsprozess von Öl-Papier-Isolationssystemen wurde im Labor näher untersucht. Hierzu wurde die komplexe Kapazität von imprägnierten und nichtimprägnierten Proben verwendet. Die Messung wurde kontinuierlich bei einer Temperatur von 120 °C über einen Zeitraum von 2000 h gemessen. Auf diese Weise konnte die Veränderung durch die künstliche Alterung über die Messzeit visualisiert und Rückschlüsse auf die Veränderung der komplexen Kapazität durch thermische Alterung der Isolation im Leistungstransformator gezogen werden.

Die nicht-imprägnierte Papier- und Transformerboard-Probe zeigte über die Messzeit von 2000 h keine signifikante Veränderung der komplexen Kapazität (siehe Abb.: 5.28 und 5.30). Bei der thermischen Alterung der Celluslose, wie im Anhang C.2 beschrieben, werden die Celluloseketten aufgespalten. Die freiwerdende Zersetzungprodukte, wie Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Wasser, Wasserstoff und geringe Mengen Methan, wurden vom verwendeten Messsystem somit nicht erfasst. Die geringe Wassermenge verdampft durch die hohe Temperatur und entweicht somit aus der Cellulose. Das Gleiche gilt für die gasförmigen Zersetzungsprodukte.

Gegenüber der Kapazitätsmessung von nicht-imprägnierten Material zeigen die imprägnierte Materialproben eine deutliche Veränderung der Kapazität mit der Alterung. Dies wird an der Messung von zweilagigem imprägniertem Papier deutlich. Die Abbildung 5.31 mit Verlustwinkel und Realteil der komplexen Dielektriztätfunktion weisen auf zwei markante Relaxationszeitverteilungen hin. Bei einer Temperatur von 120 °C kann davon ausgegangen werden, dass die Materialprobe trocken ist. Hinzu kommt, dass die reine Cellulose keinen



Abb. 5.28: Messung der komplexen Dielektrizitätsfunktion in Abhängigkeit der Alterungsdauer bei einer Temperatur von 120 °C von nichtimprägnierten Transformerboaord TIV.



Abb. 5.29: Messung der komplexen Dielektrizitätsfunktion in Abhängigkeit der Alterungsdauer bei einer Temperatur von 120 °C von imprägnierten Transformerboa
ord TIV.



Abb. 5.30: Messung der komplexen Dielektrizitätsfunktion in Abhängigkeit der Alterungsdauer bei einer Temperatur von 120 °C von nichtimprägnierten zweilagigen Papier.



Abb. 5.31: Messung der komplexen Dielektrizitätsfunktion in Abhängigkeit der Alterungsdauer bei einer Temperatur von 120 °C von imprägnierten zweilagigen Papier.

signifikanten Einfluss auf die Messung hat. Die extreme thermische Beanspruchung des Isolieröls erzeugt eine Vielzahl von Zersetzungsprodukten, die die Leitfähigkeit erhöhen (siehe Anh.:C.3). Durch die zwei Papierlagen entstehen Grenzschichten mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten, die zwei ausgeprägte Relaxationsmechanismen verursachen können. Die Relaxationsmechanismen sind bei der Messung des imprägnierten Papiers ausgeprägter als bei der Messung des TIV, da durch die Schichtung der Papierproben deutlich mehr Isolieröl zwischen den Elektrodenplatten vorhanden ist, als bei den TIV-Proben.

Die Messungen des Alterungsverhaltens von Papier konnten mit dem Cole-Cole-Modell (4.3) approximiert werden. Die maximale Abweichung lag hierbei unter 5%. Die komplexe Kapazitätsmessung von Papier zeigte nach 2000 h eine weitere Relaxationszeitverteilung auf, welche die maximale Abweichung verursacht und in der Ausprägung sehr klein ist.

Die Anpassung des Transformerboards an das Cole-Cole-Modell war nur zum Teil möglich, da die Anzahl der Messpunkte nicht ausreichte. Der Messabbruch wurde durch das Messgerät iniziiert. Um die Messgrenze zu erweitern, muss die Probenfläche durch eine Parallelschaltung von mehreren Messzellen vergrößert oder die Messspannung erhöht werden.

Zur Kontrolle, dass sich das Messsystem im Messzeitraum durch den Einfluss von imprägnierten Proben nicht verändert hat, wurde eine Messung der komplexen Kapazität während 1200 h bei 85% durchgeführt. Nach der Montsinger Regel sollte eine thermische Alterung, während einer Messzeit von ca. 1200 h bei einer Temperatur unter 85% keine Veränderungen bewirken. Nach 1300 h zeigte die komplexe Kapazität keine wesentliche



Abb. 5.32: Messung der komplexen Dielektrizitätsfunktion in Abhängigkeit der Alterungsdauer bei einer Temperatur von 85 °C von imprägnierten zweilagigen Papier.

Veränderung. Nur die Leitfähigkeit erhöhte sich geringfügig. Diese Veränderung macht sich durch den steigenden Verlustwinkel δ in rad bei 1 mHz bemerkbar.

Aus heutiger Sicht ist die künstliche thermische Alterung eine Möglichkeit, um herauszufinden, welchen Einfluss die Alterung auf die komplexe Dielektrizitätsfunktion hat. Inwieweit die Messergebnisse einer betriebsmäßigen Alterung der Isolierstoffe entsprechen ist noch nicht geklärt.

5.4 Ansatz zur Diagnose und Überwachung des Isolationszustandes eines Leistungstransformators

Die Diagnostik zur Ermittlung des Isolationszustandes eines Leistungstransformators hat in den letzten Jahren aus technischen und wirtschaftlichen Gründen eine erhebliche Bedeutung erlangt. Für die Diagnostik am Leistungstransformator liegt der Schwerpunkt auf dem Isoliersystem zwischen den Wicklungen, da dieses im Wesentlichen die Lebensdauer und die Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt. Hierbei wird versucht, eine kontrollierte Ausschöpfung der Nutzungsdauer zu ereichen, indem ein sich anbahnender Ausfall rechtzeitig erkannt wird.

Um in naher Zukunft die dielektrische Diagnostik zu verbessern, müssen zum einen die Modelle des Isolationssystems überprüft und verbessert werden. Zum andern müssen geeignete Messinformationen von Leistungstransformatoren und Materialproben in einer Datenbank gesammelt und zur Verfügung gestellt werden.

Ein weiteres Transformatormodell wurde im Abschnitt 4.3 vorgestellt. Mit diesem Modell und den Materialmessungen im Kapitel 5 wird zunächst verdeutlicht, welche Informationen in der FDS-Messung vorhanden sind und benötigt werden.

Im folgenden soll ein Diagnoseablauf, für den neuen Modellansatz vorgestellt werden. Die Abbildung 5.33 zeigt den schematischen Diagnoseablauf, ausgehend von der Messung direkt am Transformator bis zur Anpassung der Modellparameter, die später mit Hilfe von vorhandenen Messungen an Leistungstransformatoren oder Materialmessungen aus dem Labor ausgewertet werden.



Abb. 5.33: FDS-Diagnoseablaufdiagramm für Leistungstransformatoren.

Grundsätzlich ist der Ablauf der Diagnose in vier Schritte unterteilt. Im ersten Schritt

wird *vor Ort* eine Messung durchgeführt, bei Bedarf eine Öl-Probe entnommen und die Messung auf Plausibilität und Messfehler untersucht.

Im zweiten Schritt werden die *zusätzlichen Informationen*, wie Abmessungen des Isolationsaufbau oder die Dielektrizitätsfunktion der Öl-Probe, gesammelt. Die besten Anpassungsergebnisse werden erzielt, wenn die Geometrieparameter des Streukanals bekannt und die Leitfähigkeit der Öl-Probe vorhanden ist, da die Anzahl der unbekannten Parameterwerte verkleinert werden können und das Transformatormodell mit Leisten verwendet werden kann.

Als dritter Schritt werden die *Parameterwerte an das jeweilige Transformatormodell angepasst*, auch als "fitting" bezeichnet. Das Modell und das Anpassungsverfahren wurden im Abschnitt 4.3 erläutert.

Abschließend werden die Parameterdaten mit Referenzmessungen, wie Messungen an Materialien mit bekannter Eigenschaften oder geeigneten Messungen an Transformatoren, ausgewertet. Geeignete Messungen an Transformatoren sind z. B. Messungen an neuen Leistungstransformatoren, die eine Aussage über einen "Idealzustand" geben, oder Leistungstransformatoren mit bekannter Vergangenheit.

Im folgenden Abschnitt wird auf die Messdaten und die darin enthaltene Information bei einer Messung der komplexen Kapazität an Leistungstransformatoren sowie auf die Auswertung und Darstellung der Messdaten näher eingegangen.

5.4.1 Messdaten und die darin enthaltene Information

Die FDS-Messung wird vor Ort am freigeschalteten Leistungstransformator zwischen zwei Wicklungen, üblicherweise zwischen der OS- und US-Wicklung, durchgeführt. Vor Ort wirken eine Vielzahl von Störeinflüssen auf die Messung ein, wie z. B. klimatische Umwelteinflüsse oder elektromagnetische Felder. Diese Faktoren beeinflussen die Messung unterschiedlich stark und bewirken systematische und zufällige Messfehler. Wie stark eine Störung die Messung beeinflusst, muss von Fall zu Fall überprüft werden. Um Messungen nachvollziebar zu machen, sollten die folgenden Einflussparamter überprüft und protokolliert werden:

- Die Beschreibung des Transformators, anhand des Typenschilds und Standort.
- Erfassung der Umgebungsbedingung, wie Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und Beschreibung des Wetters.
- Die Beschreibung des Messaufbaus, Messequipments und die Art der Kontaktierungen, hierzu ist die photografische Dokumentation mit einer Digitalkamera äußerst hilfreich.

Der Messaufbau und die zugehörige Messunsicherheit für die FDS-Messung sollte bekannt sein und regelmäßig überprüft werden, um zuverlässige Daten zu erhalten. Grundsätzlich liefert der Hersteller eine grafische Messunsicherheitsspezifikation für das Messgerät in Abhängigkeit der Frequenz, des Widerstands, der Kapazität und Induktivität. Bei dieser Messunsicherheit ist der Messaufbau nicht berücksichtigt und sollte, nach der DIN 1319 Teil 1-4 (vgl. Anhang B und Abschnitt 5.1.3) beschrieben, ermittelt werden.

Die Basis einer Diagnose sind die Messdaten. Um rechtzeitig Messfehler zu erkennen, müssen die Messdaten vor Ort einer Kontrolle unterzogen werden. Hinzu kommt das Erfassen von weiteren Informationen, welche die Diagnose ergänzen und verbessern, wie das Erfassen der Messtemperatur und die Entnahme von Ölproben.

Messdatenkontrolle:

Hochohmige Impedanzmessungen im Frequenzbereich beeinhalten eine Reihe von Schwierigkeiten. So fließt nur ein geringer Strom, der durch Störungen verfälscht werden kann. Durch die notwendigen Messkabel vom Messgerät bis zu den Durchführungen des Transformators, können bei der Vor-Ort-Messung die Messwerte durch weitere Störungseinflüsse verfälscht oder gänzlich unbrauchbar werden. Deshalb ist es wichtig, eine Plausibilitätskontrolle vor Ort durchzuführen. Eine geeignete Plausibilitätskontrolle wäre, die Überprüfung der Kramers-Kronig-Bedingung A.4 mit Hilfe des Cole-Cole-Modells gemäß 4.1.2. Können die Messdaten mit dem Modell ausreichend genau angenähert werden, so kann davon ausgeganen werden, dass die Relaxationsmechanismen in Imaginär- und Realteil in Beziehung stehen. Außerdem wird überprüft, ob das Leitfähigkeitsverhalten im Imaginärteil mit der Theorie übereinstimmt. Sind diese Bedingungen erfüllt, kann es noch vorkommen, dass die Anzahl der Messpunkte für die Anpassung der Transformatormodellparameter nicht ausreichen. Hierzu kann das Transformatormodell ohne Leisten (4.20) verwendet werden, um die notwendige Anzahl der Messpunkte zu bestimmten. Grundsätzlich würde das Transformatormodell ohne Leisten zur Messkontrolle ausreichen. Jedoch ist die Stabilität zur Bestimmung der Parameterwerte nicht gewährleistet.

Messtemperatur:

Die Temperatur des Isolationssystems zwischen OS- und US Wicklung (Streukanal) spielt bei der Auswertung der Daten eine große Rolle, da die Leitfähigkeit von Öl stark temperaturabhängig ist und somit die Messung beeinflusst. Damit die Messergebnisse nicht verzerrt werden, sollte während der Messung die Temperatur des Streukanals weitgehend konstant sein. Die Problematik liegt in der Bestimmung der Temperatur im Streukanal. Sie kann nur indirekt bestimmt werden, z. B. durch die Messung des ohmschen Widerstandes und Berechnung der mittleren Wicklungstemperatur mit Hilfe der Messdaten des Prüfprotokolls des Transformators. Als oft sehr ungenau hat sich die Ablesung der Anzeige für die Öltemperatur erwiesen. Diese Anzeige kann durch Faktoren wie z. B. Sonneneinstrahlung oder Regen verfälscht sein. Die wahre mittlere Wicklungstemperatur kann bis zu ca. 8 K höher oder tiefer liegen, wie Untersuchungen [64] gezeigt haben.

Öl-Probe:

Bei der Auswertung der Messdaten mit einem Transformatormodell hat es sich gezeigt, dass die Öl-Probe die Genauigkeit der Parameterbestimmung verbessern kann, wenn die Geometriedaten des Transformators nicht bekannt sind. Für diesen Fall wäre es sinnvoll, eine Ölprobe vor Ort zu entnehmen und im Labor eine Frequenzmessung durchzuführen. Für den Fall, dass die Geometriedaten des Transformators bekannt sind, könnte eine Öl-Probe das Approximationsergebnis bestätigen, aber auch geringfügig die Genauigkeit erhöhen.

Wenn eine Öl-Probe vor Ort nicht entnommen werden kann, kann eine bereits durchgeführt tan δ -Messung verwendet und die Leitfähigkeit mit der Gleichung (5.11) angenähert werden.

Bei der Öl-Probe muss beachtet werden, dass das Öl nicht direkt aus dem Streukanal entnommen wird und somit die Öl-Daten nur Richtwerte sind.

5.4.2 Auswertung und Darstellung der Messdaten

Mit der Wahl eines geeigneten Transformatormodells werden die Genauigkteit und die Modellparameter für die Materialeigenschaften und Geometriedaten festgelegt. Im Idealfall sind Öl-Proben und Geomtriedaten des Wicklungsaufbau, insbesondere des Streukanals bekannt und im ungünstigsten Fall fehlen beide Informationen (vgl. Abb.: 5.33).

Ausgehend von den ermittelten Parameterwerten des jeweiligen Transformatormodells, den weiteren protokollierten Informationen und vergangenen Öl-Proben- und Transformatormessungen kann eine systematische Untersuchung und Auswertung erfolgen. Die Vorstellung, dass einzelne Materialeigenschaften oder Messverläufe auf eine Zustandsveränderung, wie erhöhter Wassergehalt im Transformerboard, zurückzuführen sind, ist nur in Ausnahmefällen richtig. Meist ist die Eindeutigkeit von Ursache und Wirkung auf die Messung nicht gegeben. Ein einfaches Beispiel ist die Öl-Leitfähigkeit, die durch die Temperatur, Wassergehalt oder durch den Anteil der Ionen im Öl verändert wird. Der Verlauf der gemessenen komplexen Kapazität liefert zunächst keine Aussage über die Ursache. Erst durch eine systematische Untersuchung aller Informationen lässt sich die Ursache eingrenzen.

Bisherige Verfahren zur Interpretation dielektrischer Messungen an Isolationssystemen basieren auf dem Vergleich der Messkurven mit gemessenen Laborkurven. Mit den ermittelten Material- und Geometrieparametern des jeweiligen Modellansatzes können die bisherigen Diagnoseverfahren verbessert und ergänzt werden. Dies kann durch Messungen an Leistungstransformatoren ergänzt werden, die dann als Referenz dienen. Grundsätzlich muss beim Vergleichen einer aktuellen Messung mit einer Referenz auf die Vergleichbarkeit und Modellannahmen geachtet werden, wie z. B. unterschiedliche Temperaturen, bekannte Geometrie oder eine symmetrische Relaxationszeitverteilung im Pressboard.

Das folgende Beispiel eines 600-MVA-Maschinentransformators $(400/30\,{\rm kV})$ soll den Diagnoseablauf verdeutlichen.



Abb. 5.34: Frequenzmessung eines Maschinentransformators und das approximierte Transformatormodell ohne Leisten.

Die Abbildung 5.34 zeigt die Orginalmessung an dem Maschinentransformator und das angepasste Transformatormodell ohne Leisten. Die Geometriedaten ($k_{Oel} = 0.67$) werden als unbekannt angenommen und weitere Informationen, wie Standort oder Messtemperatur, sind unbekannt. Das angepasste Transformatormodell ohne Leisten zeigt eine gute Übereinstimmung, und die maximale Abweichung beträgt 2,5%. Wird der Abweichungsfaktor $\Re(\underline{B})$ der <u>B</u>-Funktion über die Frequenz näher betrachtet, dann ist im Frequenzbereich von 100 mHz bis 1 kHz zu erkennen, dass der Verlauf von $\Re(\underline{B})$ kontinuierlich ist. Nach Abschnitt 4.1.3 weist diese Abweichung auf weitere Relaxationsmechanismen hin, die in ihrer Ausprägung klein sind.

Mit den gewählten Werten, wie spezifische Leitfähigkeit vom Pressboard $\sigma_{Pb} = 1 \, \text{fS/m}$ und die instantane Polarisation von Öl $\varepsilon_{\infty Oel} = 2, 1$ wurden mit dem Programm E.2 die restlichen Geometrie- und Materialparameter ermittelt:

- Geometrieparameter
 - effektiver Flächenfaktor $k_A = 0.9924$
 - Schichtdickenfaktor des Öls $K_{Oel}=0.6032$
 - theoretische Leerkapazitä
t $C_0=4,55\,\mathrm{nF}$
 - Leistenfaktor $k_L = 0$
- Öl-Modellparameter
 - spezifische Leitfähigkeit des Öls $\sigma_{Oel} = 85, 36 \,\mathrm{pS/m}$
 - instantante Polarisation $\varepsilon_{\infty Oel} = 2,1$ (gewählt)
- PB-Modellparameter
 - spezifische Leitfähigkeit des PB
s $\sigma_{Pb}=1E-16\,\mathrm{S/m}$ (gewählt)
 - instantante Polarisation $\varepsilon_{\infty_{Pb}} = 3,21$
 - Dielektrizitätsänderung der Pb-Relaxation $\Delta \varepsilon_{Pb} = 65,96$
 - Exponent für die Relaxationszeitverteilung n = 0,3522
 - Relaxationszeitkonstante der Pb-Relaxation $\tau_{Pb}=14000\,\mathrm{s}$

Nach den Geometriedaten müsste $K_{Oel} = 0,67$ sein. Der ermittelte K_{Oel} -Faktor ist etwas klein. Auch bei anderen Leistungstransformatoren zeigte sich, dass der K_{Oel} -Faktor um ca. 2-10% zu klein bestimmt wird. Auffällig ist hierbei, dass bei einem $K_{Oel} > 0,5$ die Fehler größer werden. Die Ursache könnten die Leisten sein, da sie nicht im Modell berücksichtigt werden.

Die Geometrieparameter können zum einen für bisherige Diagnoseverfahren (siehe Abschnitt 3.3.4) verwendet werden, wenn der Aufbau des Leistungstransformators unbekannt ist. Zum anderen beinhaltet der Faktor k_A eine Aussage über den inneren Isolationszustand. Die Ursache für $k_A < 1$ können kleine Ölkanäle im Transformerboard oder starke Leitfähigkeitsveränderungen in der Feststoffisiolierung zwischen der US- und OS-Wicklung sein. Wenn k_A gegen eins strebt, dann sind die genannten Ursachen unwahrscheinlich.

Der Flächenfaktor k_A beeinflusst die gesamte Leitfähigkeit des Leistungstransformators, die mit dem Approximationsprogramm für das Cole-Cole-Modell E.1 ermittelt werden. Für den Maschinentransformator erhalten wir eine gesamte spezifische Leitfähigkeit von

 $\sigma_{Trafo} = 1,97 \,\mathrm{pS/m}$ und instantane Polarisation von $\varepsilon_{\infty Trafo} = 2,465$. Beim Vergleich der gesamten spezifischen Leitfähigkeit σ_{Trafo} mit weiteren Maschinentransforamtoren zeigt sich, dass dieser Wert mindestens fünfmal höher ist als bei vergleichbaren Transformatoren.

Die Öl-Modellparameter geben eine Auskunft über die Öl-Qualität im Streukanal. Die spezifische Öl-Leitfähigkeit des Maschinentransformators σ_{Oel} kann, bei einer bekannten Messtemperatur in die Abbildung 5.13, eingetragen werden. Die Ursache für die hohe Leitfähigkeit, kann nicht durch Wasser im Öl alleine erreicht werden. In diesem Fall, ist von einem hohen Säure- und/oder Partikelgehalt auszugehen (vgl. Abschnitt 5.2.5). Eine Verbesserung der Beurteilung, wäre mit einer Öl-Probe oder einer bekannten tan- δ -Messung (vgl. 5.2.6) möglich. Aus einer Öl-Probe könnte zusätzlich die Neutralisationszahl des Öls bestimmt werden.

Ein aktueller tan- δ -Messwert kann die Annahme für die Messtemperatur eingrenzen, da die tan- δ -Messung bei einer festgelegten Temperatur durchgeführt wird. Hierbei muss beachtet werden, dass der Entnahmeort nicht in der Nähe des Streukanals ist und somit Abweichungen vorhanden sind. tan- δ -Messwerte früherer Ölanalysen geben der Betriebshistorie eine Auskunft.

Durch den hohen Säure- und/oder Partikelgehalt, wird das komplexe Dielektrizitätsverhalten der Feststoffisolierung des Streukanals stark beeinflusst. Anhand der PB-Modellparameter kann keine genaue Aussage über den Materialzustand gemacht werden. Werden die Parameter in das Cole-Cole-Modell mit einer Relaxationszeitverteilung (siehe Abschnitt 4.3.1) eingegeben, dann kann die approximierte komplexe Dielektrizitätsfunktion berechnet und dargestellt werden. Mit Hilfe von geeigneten Referenzmaterialien kann dieser Verlauf näher beurteilt und bewertet werden. Bisher fehlen noch geeignete Referenzmessungen, da im Rahmen dieser Arbeit überwiegend neuwertige oder künstlich gealterte Materialproben verwendet wurden. Außerdem ist noch nicht geklärt, ob der k_A -Faktor mit einbezogen werden muss, da dieser Faktor die erhöhte Leitfähigkeit der Feststoffisolierung beinhaltet. Wird nur der Realteil mit den Referenzdaten verglichen, dann kann der k_A -Faktor vernachlässigt werden.



Abb. 5.35: Dielektrizitätsverlauf von neuwertigen TIV-Proben, künstlich gealterten Papier- und TIV-Proben und der approximierte Feststoffisolationsverlauf des Maschinentransformator.

Wie in der Abbildung 5.35 deutlich wird, kann nur eine grobe Zustandsabschätzung vorgenommen werden, da z. B. die Messtemperatur unbekannt ist. Es ist dennoch zu erkennen, dass die Referenzen von zwei Leistungstransformatoren fast identisch sind und gegenüber dem Maschinentransformator näher am künstlich gealterten TIV oder neuwertigen Pressboard liegen. Wasser in der Feststoffisolierung kann den Verlauf beeinflussen (vgl. Abb.: 5.17 und 5.20), jedoch ist die stark erhöhte Öl-Leitfähigkeit damit alleine nicht zu erklären. In diesem Fall ist es wahrscheinlicher, dass der Säuregehalt im Öl und in der Feststoffisolierung sowie der Partikelgehalt im Öl die hohe Leitfähigkeit bewirkt.

Für eine weitere Analyse kann auch der Faktor $\Re(\underline{B})$, siehe Abbildung 5.34 über die Frequenz verwendet werden, da der Verlauf auf weitere Relaxationsmechanismen hinweist. Bei den verwendeten Referenztransformatoren lag die maximale Abweichung unter 0,5%. Mit Hilfe von weiteren Referenzmessungen, wie z.B. mit neuen oder vergleichbaren Leistungstransformatoren, könnte die Beurteilung verfeinert werden.

5.4.3 Überwachung von Leistungstransformatoren mit der FDS-Messung

Die FDS-Messungen gehört zu den offline Verfahren, die es ermöglichen, den Isolationszustand von Leistungstransformatoren zu überwachen. Ausgehend von einer Referenzmessung werden die Veränderungen des Isolationssystems überwacht und bewertet. Dabei ist die Kenntnis der Isolationsgeometrie nur dann notwendig, wenn sich die Temperatur des Isolationssystems von Messung zu Messung stark unterscheidet.

Ausgehend von einer Referenzsmessung (Fingerprint) werden die nachfolgenden FDS-Messungen verglichen. Der Vergleich basiert auf dem Prinzip der Bewertungsfunktion, wie im Abschnitt 4.1.3 beschrieben. Durch die komplexe Division der aktuellen Kapazität zum Zeitpunkt t = x mit der komplexen Referenzkapazität zum Zeitpunkt $t = t_0$ oder durch eine idealisierte Referenzkapazität entsteht die komplexe B-Funktion (4.4). Die resultierende B-Funktion separiert die einzelnen Systemeigenschaften, wie die Leitfähigkeit, das Relaxationsverhalten und die Veränderung der instantanen Polarisation. Die Einflussgrößen der einzelnen Systemeigenschaften sind Temperatur, Wassergehalt, Alterungsmechanismen und vom Messaufbau abhängig. Um eine genauere Diagnose durchzuführen, muss der Einfluss der Messtemperatur zur Referenzmessung oder Referenzmodell berücksichtigt werden oder konstant sein. Der Temperatureinfluss zwischen Referenzmessung und Messung zum Zeitpunkt t = x kann mit Hilfe der experimentellen Messungen am Öl-Papier-Isolationssytem bisher zum Teil kompensiert werden, um so die Analyse zu verbessern. Im Idealfall ergibt sich $\underline{B}(\omega) = 1 + j0 + \underline{S}$, was auf keine messbare Veränderung hinweist. Zeigt $B(\omega)$ eine systematische Veränderung, dann kann die Veränderung der Leitfähigkeit, den Relaxationsmechanismen und/oder der instantanen Polarisation zugeordnet werden (siehe Abschnitt 4.1.3). Auf diese Weise kann erkannt werden, ob das Isolationssystem des Leistungstransformators sich verändert hat [24].

Dieses Verfahren kann auch zum Vergleich von Materialmessungen mit Referenzmessungen angewendet werden oder zum Vergleich von ähnlich aufgebauten Leistungstransformatoren, um so vergleichbare Daten aus einer Datenbank zu ermitteln.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit führten zu einer weiteren Modellvariante des Öl-Papier-Isolationssystems zwischen den Wicklungen von Leistungstransformatoren im Frequenzbereich. Das entwickelte Isolationsschichtmodell basiert auf physikalischen Zusammenhängen, die mit der so genannten Cole-Cole-Funktion kombiniert werden. Die Cole-Cole-Funktion stellt einen Spezialfall der *Havriliak-Negami-Funktion* dar und wird zur Beschreibung des dielektrischen Systemverhaltens der einzelnen Materialien verwendet. Die komplexe Dielektrizitätsfunktion berücksichtigt für das jeweilige Material die Relaxationsmechanismen und die Leitfähigkeit.

Physikalisch gesehen wird der zylindrische Streukanal als ein homogener Plattenkondensator angenähert. Das jeweilige dielektrische Materialverhalten wird durch die komplexe Kapazität beschrieben und im Plattenkondensator in Form von Isolationsschichten angeordnet. Dadurch erhält man das mathematische Isolationsschichtmodell zur Diagnose von Leistungstransformatoren im Frequenzbereich. Mit diesem Modell ist es möglich, die Informationen in der Messung der komplexen Kapazität zu analysieren und die Zusammenhänge zwischen Geometriedaten und Materialeigenschaften besser zu differenzieren, zu verstehen und das dielektrische Systemverhalten dem jeweigen Materials zuzuordnen. Durch die Anpassung der Modellparameter an die Kapazitätsmessung des Leistungstransformators erhält man die Parameterwerte, die dem jeweiligen Material und Geometrieaufbau des Streukanals zugeordnet werden können. Die Einteilung der Paramter in Geometrieund Materialparameter und die Kenntnisse über das Systemverhalten von definierten Referenzproben verbessert die Zustandsdiagnose an Leistungstransformatoren.

Zu den Teilaufgaben der vorliegenden Arbeit gehörten die Messung und Modellierung von Materialproben bei definierten Bedingungen, die Entwicklung eines Anpassungsverfahrens zur Bestimmung der Modellparameterwerte und die Entwicklung des Isolationsschichtmodells für Leistungstransformatoren.

Durch die Messung und Modellierung von Materialproben bei definierten Bedingungen kann erkannt werden, welches Modell geeignet ist, um das Systemverhalten ausreichend genau nachzubilden. Werden hierbei Materialproben mit definierten Parametern gemessen, kann das Materialverhalten leichter analysiert werden.

Die grundsätzlichen Schwierigkeiten bei Messung des dielektrischen Verhaltens an Öl-Papier-Isolationssystemen liegen in der kleinen instantanen Dielektrizitätskonstanten und in der niedrigen spezifischen Leitfähigkeit. Die niedrige Leitfähigkeit hat zur Folge, dass bei einer vorgegeben Messspannung ein geringer Strom fließt und somit interne und externe Störeinflusse die Messergebnisse stark beeinflussen können. Die kleine Dielektrizitätskonstante bewirkt eine kleine Messkapazität, die im Bereich der Kapazität des Messaufbaus liegt und durch Temperaturveränderungen beeinflusst wird. Daher wurde große Sorgfalt auf das Messsystem gelegt, um stabile Messungen mit Öl-Papier Isolationssystemen bei unterschiedlichen Bedingungen, wie z. B. Temperatur oder Wassergehalt, zu erhalten. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass die kapazitive Messzelle eine geringere Leitfähigkeit aufweist als die Proben. Messzellengeometrie und -materialien müssen chemisch und thermisch beständig sein, um so eine geringe Messunsicherheit sowie hohe Messstabilität im gesamten Messsystem und Messzeitraum zu ermöglichen.

Anhand der Messergebnisse konnte die komplexe Havriliak-Negami-Funktion auf die so genannte Cole-Cole-Funktion mit Leitfähigkeit reduziert werden. Diese komplexe Funktion ist geeignet, das dielektrische Verhalten von Isolieröl, Papier oder Pressboard mathematisch zu beschreiben. Hierbei zeigte sich, dass das Isolieröl mit einer Leitfähigkeit und einer instantanen Polarisation zu beschreiben ist und eine starke Abhängigkeit von Temperatur und Zersetzungsgrad (Alterungszustands) aufweist. Durch die Zersetzung erhöht sich die Anzahl der Ionen im Isolieröl und somit steigt die Leitfähigkeit an. Pressboard und Papier beinhalten zusätzliche Relaxationsmechanismen. Diese werden zum einen durch die unterschiedliche Leitfähigkeit von Ol und Pressboard verursacht, zum anderen durch Orientierungspolarisationen. Mit Hilfe der experimentellen Messungen wurde versucht, die Parametergrenzen der einzelnen Materialien festzulegen, um später die Anpassung der Parameterwert zu verbessern, und das Systemverhalten der jeweilgen Materialien zu analysieren. Um das genaue Systemverhalten bezüglich der Temperatur, des Wassergehalts, der künstlichen oder betriebsmäßigen Alterung, aber auch der mechanischen oder elektrischen Beanspruchungen zu erforschen, müssen noch gezielte Messungen durchgeführt werden. Messungen an anderen Isoliermaterialien, wie z. B. Epoxidharz mit oder ohne Nanopartikel sind ebenso denkbar.

Das entwickelte Anpassungsverfahren zur Bestimmung der Parameterwerte dient der Bestimmung der Cole-Cole-Modellparameter oder der Parameter des nichtlinearen Isolationsschichtmodells vom Leistungstransformatoren aus Messungen der komplexen Kapazität an einer Materialmessung oder an einem Leistungstransformator.

MATLAB bietet für nichtlineare Gleichungssysteme verschiedene Lösungsverfahren an, die nach dem Prinzip der Least-Square-Methode arbeiten jedoch nur auf reelle Funktionen angewendet werden können. Darum wurde ein neuer Lösungsweg mit der komplexen <u>B</u>-Funktion entwickelt. Das Prinzip der <u>B</u>-Funktion besteht darin, dass die gemessene komplexe Kapazität durch die spezifische Leitfähigkeit σ_B und instantane Polarisation ε_B des Transformators punktweise dividiert wird. Durch diesen Vorgang ist die gesamte Information der komplexen Kapazität im Real- oder im Imaginärteil der <u>B</u>-Funktion enthalten und es können die standardisierten Anpassungsverfahren für nichtlineare Systeme verwendet werden. Ob das Anpassungsverfahren eine eindeutige Lösung findet, hängt zum einen vom Mengenbereich der einzelnen Parameter und vom Modellansatz ab. Die Existenz einer oder mehrerer Lösungen muss für das jeweilige Modell überprüft werden.

Eine Untersuchung bezüglich der Konditionierung mit der Leitfähigkeit σ_B , der instantanen Polarisation ε_B und der Anzahl der notwendigen bekannten und unbekannten Parametern wurde nicht gezielt durchgeführt. Es wurde überwiegend auf Plausibilität und Konsistenz überprüft. Bei der bisherigen Anwendung zeigte sich, dass dieses Verfahren gute Lösungen für komplexe Kapazitätsmessungen im Frequenzbereich erzielt. Dennoch sind die mathematischen Fragestellungen wie Konvergenz, Stabilität, Kondition und Effizienz noch nicht untersucht worden. Das Isolationsschichtmodell für Leistungstransformatoren basiert auf der Materialschichtung im homogenen Feldbereich des Streukanals zwischen zwei Wicklungssystemen. Mit der komplexen Cole-Cole-Funktion können die einzelnen Öl-Papier-Schichten mathematisch beschrieben werden. Das Isolationsschichtmodell besteht aus zwei Schichten: einem Isolieröl-Kanal mit Leisten und aus Pressboard oder Papierlagen mit einem sehr kleinen Ölkanal, der durch Kapillare, Risse oder Fügestellen entstehen kann.

Durch die mathematische Beschreibung der Isolierschichten konnte mit einer Simulation im Frequenzbereich der Einfluss der Geometrieparameter (k_L, k_A, k_{Oel}, C_0) und Materialparameter auf die komplexe Kapazität verdeutlicht werden. Es zeigte sich, dass identische Kapazitätsverläufe mit verschiedenen Parameterkombinationen erzielt werden können. Durch die Mehrdeutigkeit der Parameter auf die Messkurve ist es notwendig, Kenntnis des Mengenbereichs der Material- und Geometrieparameter zu haben, um so die Lösungsmenge einzugrenzen.

Die Anpassung der Modellparameter bei bekannter Geometrie ist nur möglich, wenn angenommen wird, dass die Eigenschaften der Leisten und des Pressboards identisch sind und der Mengenbereich der einzelnen Modellparameter bekannt ist. Mit diesen Annahmen wird ein durchschnittliches Materialverhalten von Isolieröl und imprägniertem Pressboard/Papier ermittelt und in Form einer Cole-Cole-Funktion beschrieben. Bei unbekannter Geometrie muss das Isolationsschichtmodell weiter vereinfacht werden, indem der Leistenanteilsfaktor k_L auf Null gesetzt wird, um so die Anzahl der Parameter zu reduzieren. Als Ergebnis erhält man die restlichen Geometrieparameter und ein durchschnittliches Materialverhalten.

Die Anpassungsgenauigkeit und -ergebnisse wurden mit theoretischen Modellen überprüft. Es zeigte sich bei bekannter Geometrie des Streukanals eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Anpassungsergebnis und einer theoretischen Kapazitätsmessung am Transformator. Bei unbekannter Geometrie hängt die Genauigkeit vom Öl-Pressboard- und vom Öl-Leistenverhältnis ab, wobei auch hier die theoretische Kapazitätsmessung gut getroffen werden. Der Vergleich und die Auswertungen von dielektrischen Messungen am Leistungstransformatoren mit bekanntem Geometrieaufbau zeigten ähnliche Ergebnisse und eine maximale Abweichung vom Modell zur Messung von drei Prozent.

Eine genauere Bestimmung des Isolationsaufbaus in Form von Wicklungshöhe, Durchmesser oder Streukanalbreite ist mit diesem Verfahren nicht möglich, da die Vakuumkapazität C_0 nur mit weiteren Informationen ausführlich modelliert werden kann. Allerdings reichen momentan die bisherigen Geometriekenndaten aus, um die Diagnosegenauigkeit im Vergleich zu der bisherigen Modellierung durch RC-Ersatzschaltungen zu verbessern.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei einem unbekannten Isolationsaufbau eines Transformators der Anteil der Ölkanalschicht zur Pressboardschicht und einer theoretischen Vakuumkapazität gut abgeschätzt werden können. Außerdem kann die komplexe Dielektrizitätsfunktion der einzelnen Materialien extrahiert und den physikalischen Eigenschaften wie Leitfähigkeit, instantane Polarisation oder Relaxationsverhalten zugeordnet werden.

Eine weitere Anwendung ist die Messdatenkontrolle. Hierbei kann vor Ort die FDS-Messung auf Messfehler überprüft, aber auch der Frequenzbereich optimiert werden, was je nach Messung zu einer deutlichen Reduzierung der Messzeit führt.

Das Isolationsschichtmodell hat sich als eine weitere Modellierungsmöglichkeit für Leistungstransformatoren bestätigt. Diese Forschungsarbeit ermöglicht es dem erfahrenen Diagnostiker, die Geometriekenndaten und Materialeigenschaften des Streukanals zu ermitteln. Darüber hinaus bietet dieser Ansatz neue Diagnosemöglichkeiten, die nicht nur auf Referenzmessungen basieren, sondern auch weiter Modellparameter, wie z. B. effektiver Flächenfaktor k_A , extrahiert.

Mit dem Isolationsschichtmodell für Leistungstransformatoren kann erkannt werden, welche Einflüsse die Messung verändern und welche weiteren Messinformationen in der FDS-Messung stecken.

In zukünftigen Arbeiten sollte das Materialverhalten hinsichtlich der Parameter Temperatur, künstliche und betriebsmaßige Alterung und Wassergehalt näher untersucht werden.

Das Modell zur dielektrischen Beschreibung von Isolierstoffen besteht aus vielen Annahmen und ist nur für die komplexe Kapazitätsmessung im Frequenzbereich geeignet. Die Annahme, dass die Relaxationszeit symmetrisch verteilt ist, hat sich bei Materialmessungen oft bestätigt. Jedoch könnte eine genauere Bestimmmung der Verteilungsformen die Auswertung und das Modell verbessern.

Eine Transformation des Modells in den Zeitbereich könnte das Spektrum der Diagnose am Leistungstransformator erweitern.

Anhang A

Mathematische Zusammenhänge und Herleitungen

A.1 Verluste im Dielektrikum

Verluste im Dielektrikum, wie Leitfähigkeit und die Polarisationsverluste, bewirken im Frequenzbereich eine Phasenverschiebung zwischen der Erregerspannung und dem Antwortstrom. Wird von einer idealen Kapazität ausgegangen, so ist eine Phasenverschiebung von 90° zwischen Strom und Spannung zu beobachten.



Abb. A.1: Zeigerdiagramm von Strom und Spannung beim idealen und realen Kondensator.

Am Besten lässt sich dies durch eine komplexe Darstellung von Strom und Spannung nachvollziehen. Der Strom eilt der Spannung um 90 $^{\circ}$ voraus, was bedeutet, dass der komplexe Widerstand des Kondensators eine imaginäre Größe ist:

$$\underline{X}_C = -j\frac{1}{\omega C}.$$
(A.1)

Wird Gleichung (A.1) in das Ohmsche Gesetz eingesetzt, so ergibt sich die 90° -Verschiebung zwischen Strom und Spannung, die in der Abbildung A.1 dargestellt wurde:

$$\underline{I}(\omega) = \frac{U(\omega)}{\underline{X}_C} = -\mathbf{j}\omega C u(\omega) \,. \tag{A.2}$$

In der Realität ist der Winkel kleiner als 90°. Ursache dafür ist ein reeller Strom, der senkrecht auf dem kapazitiven Stromanteil steht und somit einen Gesamtstrom verursacht, der um einen Winkel φ zur Spannung vorauseilt. Für die Phasenverschiebungzwischen

Strom und Spannung gilt damit $\varphi < 90\,^{\circ}.$ Die Abbildung A.1(b) veranschaulicht diesen zusammenhang.

Der reelle Strom durch die Kapazität stellt Verluste innerhalb des Dielektrikums dar. Als Maß für die Verluste wird der Verlustfaktor tan δ angegeben, welcher das Verhältnis zwischen dem Imaginärteil und dem Realteil des komplexen Stromes angibt (siehe Gl. (A.5)). Es ist auch möglich, nur den Verlustwinkel δ zu verwenden. Die Ursache für die Verluste im Material sind im Abschnitt 3 beschrieben. Um die Verluste bei der Kapazität darzustellen, wird eine komplexe Dielektrizitätszahl $\underline{\varepsilon}_r = \varepsilon' - \mathbf{j}\varepsilon''$ eingeführt. Für die Kapazität eines Plattenkondensator ergibt sich damit

$$\underline{C} = \varepsilon_0 \cdot \underline{\varepsilon}_r \cdot \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon' - \mathbf{j}\varepsilon'') \cdot \frac{A}{d}.$$
(A.3)

und für den komplexen Widerstand erhält man

$$\underline{X}_{C} = \frac{1}{\mathbf{j}\omega\underline{C}} = \frac{d}{\mathbf{j}\omega\cdot\varepsilon_{0}\cdot(\varepsilon'-\mathbf{j}\varepsilon'')\cdot A} = \frac{d}{(\mathbf{j}\omega\varepsilon_{0}\varepsilon'+\omega\varepsilon_{0}\varepsilon'')\cdot A}.$$
 (A.4)

In der Gleichung (A.4) ist zum einen zu erkennen, dass der Widerstand \underline{X}_C einen Realund einen Imaginärteil besitzt, wobei der Realteil für die Verluste im Dielektrikum steht. Zum anderen zeigt die Gleichung, dass

$$\tan \delta = \frac{I'}{I''} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{A.5}$$

gilt. Die Modellierungsmethoden, die in dieser Arbeit verwendet werden, basieren auf der komplexen Darstellung der Dielektrizitätkonstanten.

A.2 Leitwert und spezifische Leitfähigkeit bei Isolatoren

Für den elektrischen Leitwert G in S ist der zugehörige reziproke Wert der Widerstand R in Ω . Der Leitwert ist proportional zur Querschnittsfläche A und Länge l. Es gilt: $G = \sigma \cdot A/l$. σ ist eine materialspezifische Größe und wird als spezifische Leitfähigkeit bezeichnet. Ein idealer Isolator besitzt die spezifische Leitfähigkeit $\sigma = 0$. Bei realen Isolatoren ist die spezifische Leitfähigkeit sehr klein und kann mit Hilfe einer Gleichspannung ermittelt werden. Hierbei wird nach Anlegen einer konstanten Spannung der Strom nach einer Zeit t ermittelt, in der alle Polarisationsmechanismen abgeschlossen sind. Für hochohmige Materialien und Materialien mit einer großen Relaxationszeit wird eine lange Messzeit benötigt [30, S. 15]. Die berechnete spezifische Leitfähigkeit wird auch als spezifische Gleichstromleitfähigkeit σ_{DC} bezeichnet.

Im Frequenzbereich beinhaltet der Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätsfunktion die Verluste (vgl. Anh. A.1), und somit auch die spezifische Leitfähigkeit eines Dielektrikums σ_{AC} . Der Wert von σ_{AC} kann durch Anpassung der Gleichung (4.1) bestimmt werden. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die einzelnen spezifischen Leitfähigkeiten gleich gesetzt werden können, und es gilt: $\sigma_{DC} = \sigma_{AC} = \sigma$.

A.3 Maxwellsche Gleichungen

Im Jahre 1864 veröffentlichte James Clerk Maxwell erstmals die nach ihm benannten Gleichungen, welche die einzelnen elektromagnetischen Theorien von Faraday, Coulomb, Ampère usw. zu vier mathematischen Gleichungen vereinigten, die in der allemeinen Form eine Aussage über die enge Verknüpfung von elektrischen und magnetischen Felder geben und eine Aussage über die Quelle der Feldern macht [47].

Integrale Schreibweise:

$$\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_{A} \left(\vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \right) d\vec{A}, \tag{A.6}$$

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int_{A} \vec{B} \cdot d\vec{A}$$
(A.7)

$$\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_{V} \rho \cdot dV = Q, \tag{A.8}$$

$$\oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0, \tag{A.9}$$

Differentielle Schreibweise:

$$\nabla \times \vec{H}d\vec{s} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$
 (A.10)

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},\tag{A.11}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \varrho, \tag{A.12}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0. \tag{A.13}$$

A.4 Kramers-Kronig-Beziehungen

Mit Hilfe der Kramers-Kronig-Beziehung ist eine dielektrische Systemantwort (3.14) ohne Leitfähigkeit bereits vollständig bestimmt, wenn nur der Real- oder nur der Imaginärteil bekannt ist [7], [66] und [60]. Die mathematisch Formulierung lautet:

Sei $F : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ eine meromorphe Funktion, deren Polstelle in der unteren Halbebene liegen. Ferner sei $\Re(F(x))$ für $x \in \mathbb{R}$ eine gerade, $\Im(F(x))$ für $x \in \mathbb{R}$ eine ungerade Funktion und es gilt $\lim_{|x|\to\infty} |F(x)| = 0$. Dann gelten für alle $x \in \mathbb{R}$ die folgenden Gleichungen:

$$\Im\{F(x)\} = -\frac{2}{\pi} \cdot CH \int_0^\infty \frac{x \cdot \Re\{F(\omega)\}}{\omega^2 - x^2} d\omega$$
(A.14)

$$\Re\{F(x)\} = \frac{2}{\pi} \cdot CH \int_0^\infty \frac{\omega \cdot \Im\{F(\omega)\}}{\omega^2 - x^2} d\omega$$
(A.15)

CH bezeichnet den Cauchyschen Hauptwert des auftretenden Integrals

Wird von einer komplexen Dielektrizitätsfunktion oder Kapazitätsfunktion ohne Leitfähigkeit ausgegangen, dann erhält man mit

$$F(\omega) = \underline{\varepsilon}_n(\omega) = \frac{\underline{\varepsilon}(\omega)}{\varepsilon_\infty} - 1 = \frac{\underline{C}(\omega)}{C_\infty} - 1$$

und den Gleichungen (A.14) und (A.14) den folgende Zusammenhang:

$$\Im\{\underline{\varepsilon}_n(\omega_0)\} = -\frac{2}{\pi} \cdot CH \int_0^\infty \frac{\omega_0 \cdot \Re\{\underline{\varepsilon}_n(\omega)\}}{\omega^2 - \omega_0^2} d\omega$$
(A.16)

$$\Re\{\underline{\varepsilon}_n(\omega_0)\} = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot CH \int_0^\infty \frac{\omega \cdot \Im\{\underline{\varepsilon}_n(\omega)\}}{\omega^2 - \omega_0^2} d\omega$$
(A.17)

Die Gleichung (A.16) ermöglicht mit dem Realteil einer Kapazitätsmessung den Imaginärteil der Kapazitätsmessung ohne Leitfähigkeit zu bestimmen. Auf diese Weise kann die Überlagerung der Relaxationsverluste durch die Leitfähigkeitsverluste bei tiefen Frequenzen separiert werden.

Ein numerisches Verfahren in Perl "numerical Kramers-Kronig transformation" wurde an der Universität Potsdam ABKM (2001) entwickelt, das auf dem Prinzip von [60] beruht.

Anhang B

Messunsicherheit

Um aus den Messungen verlässliche Aussagen zu gewinnen, ist es notwendig die Messunsicherheit zu kennen. Aus diesem Grund soll eine kurze Einführung in die allgemeinen Grundlagen zur Bestimmung und Betrachtung der Messunsicherheit bei Experimenten gegeben werden. Die Ausführungen sind im Wesentlichen der Literatur [12, Teil 1-4], [3] und [25] entnommen.

Eine Messung ist immer ein Schätzwert des unbekannten wahren Wertes der zu erfassenden Messgröße. Die Erfahrung zeigt, dass jede Messung stets mit einer erkennbaren Messabweichung behaftet ist. In der Praxis gibt es zahlreiche Einflussgrößen, die zur Messabweichungen vom wahren Wert führen. Die Messabweichung x_{iw} ist formal die Differenz des Messwertes x_i vom wahren Wert x_w [12, Teil 1-4]:

$$x_{iw} = x_i - x_w \,. \tag{B.1}$$

Einflussgrößen für Messabweichungen sind zum Beispiel: Unvollkommenheit des Messsystems und Messobjekts, Umwelteinflüsse und Einflüsse, die durch die Person des Beobachters verursacht werden. Oft wird die Einflussgröße in reversible und irreversible Bestandteile eingeteilt. Hinterlassen die Einflüssgrößen eine bleibende Veränderung am Messsystem, wie z.B. Alterung, so spricht man von irreversiblen Einflüssgrößen. Bei reversiblen Einflüssgrößen bleibt am Messsystem keine bleibende Veränderung. Die Ursachen können Temperatur, Luftfeuchtigkeit usw. sein.

Messabweichungen setzen sich aus mehreren Teilen zusammen. Eine häufige Einteilung ist die Klassifizierung in grobe, systematische und zufällige Messabweichungen:

- *Grobe Messabweichungen* sind Fehler im eigentlichen Sinne. Sie beruhen auf fehlerhaftem Verhalten des Beobachters oder auf offensichtlichen Mängeln des Messsystems.
- Systematische Messabweichungen sind Anteile, die unter gleichen Messbedingungen immer mit gleichem Betrag und Vorzeichen auftreten. Wird eine systematische Messabweichung als solche erkannt, so kann das Messergebnis korregiert werden, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Korrigierte Messergebnisse werden nach der Durchführung einer Korrektur als berichtigte Messergebnisse bezeichnet, ansonsten handelt es sich um unberichtigte Messergebnisse.
- Der Rest wird als zufällige Messabweichungen bezeichnet. Sie unterliegen als un-

kontrollierbare und nicht korrigierbare Abweichungen der mathematischen Statistik. Diese Art von Messabweichungen können nur durch häufige Wiederholungen des Messvorgangs erkannt und durch Ermittlung der Verteilungsfunktion und statistischer Kennwerte beschrieben werden.

Das Diagnosemodell besteht aus empirisch ermittelten Messdaten und aus einem theoretischen mathematischem Modell. Um die Messabweichungen zu berücksichtigen, muss die Theorie der Fortpflanzung von systematischen und zufälligen Messabweichungen in das Modell eingehen. Die Grundlagen werden in den folgende Abschnitten erläutert.

B.1 Fortpflanzung systematischer Messabweichungen

Ist ein empirisches und mathematisches Modell Y = f(X) von mehreren anderen Messgrößen X_1, X_2, \ldots, X_N abhängig und sind die mit den anderen Größen jeweils verbundenen Messabaweichungen $\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_N$ bekannt, dann kann mit Hilfe der Fortpflanzung systematischer Messabweichungen eine Gesamtabweichung Δy bestimmt werden. Die Gesamtabweichung Δy wird bestimmt mit:

$$\Delta y = y - y_w = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_N + \Delta x_N) - f(x_1, x_2, \dots, x_N).$$
 (B.2)

 y_w ist der wahre Wert des Modells Y. Wird die Gleichung (B.2) in eine Taylor-Reihe entwickelt und nach dem ersten Glied abgebrochen, dann läßt sich die systematische Gesamtabweichung aus den partiellen Ableitungen $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ an der Stelle \vec{x}° nach x_i und den Änderungen Δx_i berechnen:

$$\Delta y \approx \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_N} \cdot \Delta x_N = \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \,. \tag{B.3}$$

Durch den Abbruch der Taylor-Reihe, ist die obige Formel nur gültig, wenn $\Delta x_i \ll x_i$ ist. Wie oben beschrieben, können systematische Messabweichungen berichtigt werden. Dies kommt im empirischen und mathematischen Transformatormodell zur Anwendung, wenn die systematischen Messabweichungen der einzelnen empirisch ermittelten Kenndaten einen erkennbaren Einfluss auf die Genauigkeit des Modells haben.

B.2 Fortpflanzung zufälliger Messabweichung

Die Ursachen der zufälligen Messabweichungen sind nicht genau festellbar oder zu beseitigen. Dies gilt für das derzeitige Instrumentarium der Messtechnik. Durch die Verbesserung der Messtechnik, kann es sein, dass zufällige Messabweichung zu systematischen Abweichungen werden.

Wie oben erwähnt, lassen sich zufällige Messabweichungen in ihrer Gesamtheit durch Verteilungsfunktionen und statistischen Kennwerte erfassen und beschreiben. Grundlage für die statistische Behandlung der zufälligen Messabweichung ist die Annahme, dass die Messfehler sich additiv aus zahlreichen voneinander unabhängigen Einzelfehlern zusammensetzen, von denen keiner dominant ist. Aus dem zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung kann gefolgert werden, dass eine zufällige Messabweichung, in den meisten Fälle, als eine normalverteilte Zufallsvariable aufgefaßt werden kann. Bei N Messungen unter Wiederholungsbedingung errechnet sich der arithmetischem Mittelwert \bar{x} als Schätzer für den wahren Wert aus den Einzelwerten x_i durch

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i$$
 (B.4)

Die Anzahl der Wiederholungen bestimmt die Genauigkeit des Mittelwerts. Grundsätzlich gilt für $N \to \infty$, dass der Mittelwert in den wahren Wert $x_w = \mu = \lim_{N \to \infty}$ über geht und als Erwartungswert μ der Grundgesamtheit X bezeichnet wird. Die Varianz der Grundgesamtheit ist ein Maß der Streuung einer Messreihe. Je kleiner die Messabweichung ist, desto kleiner ist die Varianz und somit die Messunsicherheit und Streuung. Die Varianz ist der Mittelwert der quadratischen Abweichung vom Erwartungswert der Grundgesamtheit:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2 \,. \tag{B.5}$$

Da der wahre Wert nicht bekannt ist, muss die Varianz geschätzt werden. Der Schätzer für die Varianz, auch empirische Varianz s^2 genannt, wird mit der folgenden Gleichung bestimmt:

$$s^{2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_{i} - \bar{x})^{2} .$$
 (B.6)

Ein geeignetes Maß für die Streuung der Einzelmessungen ist die empirische Standardabweichung s. Das Ergebnis eines Modells mit unabhängigen Messungen X sei nun durch den Zusammenhang

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \tag{B.7}$$

gegeben, wobei die einzelnen Messgrößen X_i normalverteilt sind und durch die Schätzwerte $y = f(x_1, x_2, \ldots, x_N)$ beschrieben werden. Weiterhin ist für jede Messgröße X_i durch wiederholte Messungen, der Schätzer für die Varianz s^2 und Mittelwert \bar{x}_i bekannt, dann ergibt sich das Gaußsche Fortpflanzunggesetz für zufällige Messabweichung mit:

$$s_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 s_i^2 \,. \tag{B.8}$$

B.3 Messunsicherheit mit komplexen Zahlen

Bisher wurde die Messunsicherheit bei reellen Messwerte untersuchtdurchgeführt. Eine Erweiterung der Messunsicherheit auf komplexe Zahlen ist für die Impedanzmessung von Bedeutung. Die Messunsicherheit wird mit statistischen Kennwerten beschrieben. Zunächst soll die Definition von komplexen Zufallsvariablen eingeführt werden [61]. Seien $X, Y \in$ reelle Zufallsvariablen, dann ist mit Hilfe der komplexen Zahl

$$\underline{Z} = X + jY$$

eine komplexe Zufallsvariable mit Erwartungswert:

$$E(\underline{Z}) = E(X) + jE(Y)$$

und \overline{Z} , die zur \underline{Z} konjungiert-komplexe Zufallsvariable. Die Varianz ergibt sich mit der komplexen Zufallsvariablen und konjungiert-komplexen Zufallsvariable folgendermaßen:

$$Var(\underline{Z}) = E[(\underline{Z} - E(\underline{Z}) \cdot (\overline{\underline{Z}} - E(\overline{\underline{Z}}))]$$

= $Var(X) + Var(Y)$ (B.9)

Wie in der Gleichung (B.9) zu erkennen ist, ist der Realteil und der Imaginärteil voneinander unabhängig. Dies führt dazu, dass die Fortpflanzung von zufälligen komplexen Messabweichungen mit der Methode, wie im Abschnitt B.2 beschrieben, bestimmt werden kann. Hierbei wird der Schätzer für die Varianz gemäß (B.6) und den arithmetischen Mittelwert gemäß (B.4) von Realteil und Imaginärteil getrennt voneinander bestimmt.

Das Ergebnis eines Modells mit unabhängigen komplexen Messungen
 $\underline{\mathbf{Z}}$ sei nun durch den Zusammenhang

$$\underline{Z} = f(\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \dots, \underline{Z}_N)$$

gegeben, wobei die einzelnen Komponenten der Messgrößen $\underline{Z}_i = X_i + jY_i$ normalverteilt sind und durch die Schätzwerte $z = f(x_1 + jy_1, x_2 + jy_2, \dots, x_N + jy_N)$ beschrieben werden. Weiterhin ist für jede Messgröße X_i und Y_i durch wiederholte Messungen, der Schätzer für die Varianzen s_x^2 und s_y^2 und die Mittelwerte \bar{x}_i und \bar{y}_i bekannt, dann ergibt sich das Fortpflanzungsgesetz für die zufällige komplexen Messabweichung zu:

$$s_z^2 = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 s_{x_i}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y_i} \right)^2 s_{y_i}^2 \right],$$

wobei $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ die partielle Ableitung an der Stelle \vec{x}° nach x_i des Realteils und $\frac{\partial f}{\partial y_i}$ die partielle Ableitung an der Stelle \vec{y}° nach y_i des Imginärteils ist. Wird die Gleichung (B.2) für komplexe Zahlen erweitert und um einen Arbeitspunkt linearisiert, dann erhält man die systematischen Gesamtabweichungen von komplexen Zahlen:

$$\Delta \underline{z} \approx \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i + j \frac{\partial f}{\partial y_i} \cdot \Delta y_i \right].$$
(B.10)

Hierbei wird vorausgesetzt, dass die Variablen X und Y unabhängig sind. Die Unabhängigkeit ist für die komplexe Messung am Dielektrikum nicht immer gegeben, da Polarisationsprozesse im Messbereich voneinander abhängig sind.

Anhang C

Alterungsmechanismen und chemische Reaktionsgleichung

C.1 Allgemeines zur Alterung

In dieser Arbeit wird Altern als eine unerwünschte Änderung der Systemeigenschaft besonders der dielektrischen und mechanischen Systemeigenschaft verstanden, die durch zeitliche Veränderungsprozesse der einzelnen Materialien, aus denen das System besteht, verursacht wird. Die Ursache der Alterung liegt im Bestreben aller geschlossenen Systeme und Materialien, zum thermodynamischen Gleichgewicht zu kommen und wird im absoluten Minimum beendet. Der zeitliche Faktor der Alterung spielt hierbei eine wichtige Rolle. Im Labor wird der Alterungsprozess von Materialproben durch eine erhöhte Temperatur beschleunigt, um so in relativ kurzen Zeiten Kenntnisse über die Veränderung zu erlangen. Bei praktisch allen eingesetzten Systemen, die ein erhebliches Wirtschaftsgut darstellten, wie z. B. Leistungstransformatoren, ist es zum einen erwünscht den Zeitpunkt des kritischen Alterungszustands zu kennen und zum anderen die Geschwindigkeit des Alterungsprozess zu reduzieren.

C.2 Alterung der Cellulose

Alterung bedeutet zum einen, dass die Cellulose-Makromoleküle aufgespalten werden und in kürzere Molekülketten zerfallen. Der Polymerisationsgrad gibt dabei die mittlere länge der Molekülketten an. Das heißt, je älter das Material ist, desto kürzer sind die Molekülketten und desto geringer ist der Polymerisationsgrad.

Die erhöhte Betriebstemperatur sorgt dafür, dass sich im Molekülsystem eine größere Schwingungsenergie befindet. Durch die erhöhte Schwingungsenergie können einzelne C-H- und C-C- Verbindungen aufbrechen und die langen Molekülketten zerfallen.

Bei der Zersetzung entsteht Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Wasser, Wasserstoff und geringe Mengen Methan. Wasser entsteht als Reaktionsprodukt sowohl beim Abbau der Cellulose, als auch bei der Alterung des Öls.

Die Wassermoleküle hängen sich an die Celluloseketten und begünstigen zusätzlich deren Abbau [36]. Das bedeutet zum einen, dass es im natürlichen Zerfallsprozess zur Wasserbildung in der Isolation kommt. Es würde also nicht reichen ein Isolationssystem hermetisch


Abb. C.1: Zersetzung der Cellulosemoleküle unter dem Einfluss von Temperatur und Sauerstoff.

abzuriegeln, um zu verhindern, dass Feuchtigkeit im Isolationssystem vorkommt. Zum anderen bedeutet es, dass die Alterung ein sich selbst beschleunigender Prozess ist, da in ihrem Zuge, Katalysatoren (Wasser) entstehen, die den Abbau der Molekülketten forcieren. Es kann sich auch ein ganzes Molekül am Ende einer Kette lösen und zusammen mit den in Wechselbeziehung stehenden Ölkomponenten in Schlamm oder Säure umgewandelt werden. Dieser unlösliche Schlamm hat eine Verharzung des Öls zur Folge.

C.3 Öl-Alterung

Die Oxidation an den gesättigten Kohlenstoffverbindungen durch Sauerstoff führt zu einer Vielzahl von Produkten wie Carbonsäure, Keton, Aldehyd, Ester und Alkohole. Durch die Reaktionen werden weitere Radikale frei, die dadurch den Reaktionsprozess fortführen. Die Abbildung C.3 zeigt einen Ausschnitt der Reaktionsprodukte, die in der Dissertation [4, S. 60] genauer beschrieben werden. Die zugehörigen Reaktionsgleichungen sind:



Abb. C.2: Mögliche Reaktionen für die Isolierölzersetzung durch Sauerstoff.



Abb. C.3: Zersetzungsprodukte beim Oxidationsprozess von Isolieröl

Anhang D

Nomenklatur und Formeln

D.1 Nomenklatur

Vektor
komplexe Zahl, $\Re(\underline{a}) = a'$ und $\Im(\underline{a}) = a''$
Matrix
Konstante
Funktion mit bekannten oder unbekannten Parameter

D.2 Cole-Cole-Funktion

	$\underline{\varepsilon}(\omega,\vartheta) = \frac{\sigma(\vartheta)}{j\omega\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon_\alpha(\vartheta)}{1 + [j\omega\tau_\alpha(\vartheta)]^{n_\alpha}} + \frac{\Delta\varepsilon_\beta(\vartheta)}{1 + [j\omega\tau_\beta(\vartheta)]^{n_\beta}} + .$	•••
$\sigma(.)$	spezifische Leitfähigkeit in $^{\rm S}/m$	
ϑ	Temperatur $^{\circ}C$	
ε_0	Dielektrizitätskonstante	
ε_{∞}	instantane Polarisation	

 $\alpha\text{-Relaxation}$:

$\Delta \varepsilon_{lpha}$	Dielektrizitätsänderung der α -Relaxation
$ au_lpha$	Relaxationszeitkonstante der α -Relaxation
n_{lpha}	Exponent für die symmetrische Relaxationszeitverteilung

 $\beta\text{-Relaxation}$:

$\Delta \varepsilon_{eta}$	Dielektrizitätsänderung der β -Relaxation
$ au_eta$	Relaxationszeitkonstante der β -Relaxation
n_{eta}	Exponent für die symmetrische Relaxationszeitverteilung

Verlustwinkel δ :

$$\delta = \arctan \frac{-\Im(\underline{\varepsilon}(\omega))}{\Re(\underline{\varepsilon}(\omega))}$$

D.3 Basismodell für Leistungstransformatoren ohne Leisten

$$\frac{1}{\underline{\varepsilon}_T(\omega,.)} = \frac{k_{Oel}}{\underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega,.)} + \frac{(1-k_{Oel})}{k_A \cdot \underline{\varepsilon}_{Pb}(\omega,.) + (1-k_A) \cdot \underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega,.)} = \frac{C_0}{\underline{C}_T(\omega,.)}$$

Komplexe Dielektrizitätsfunktion des Mineralöls

$$\underline{\varepsilon}_{Oel}(\omega,\vartheta) = -\mathbf{j}(\frac{\sigma_{Oel}(\vartheta)}{\varepsilon_0\cdot\omega}) + \varepsilon_{Oel_{\infty}} \quad \text{mit} \quad \sigma_{Oel}(\vartheta) = \sigma_{Oel_0}\cdot\exp(\frac{-E_A}{R_m(\vartheta+273,15)}).$$

Komplexe Dielektrizitätsfunktion des Pressboards

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

komplexe Kapazität des Transformators im Frequenzbereich in As/V,
Vakuumkapazität des Transformators in As/V ,
komplexe Dielektrizitätsfunktion des gesamten Transformators,
effektiver Flächenfaktor des Pbs zur Gesamtfläche A ,
Schichtdickenfaktor des Öls,
gesamte Breite des Streukanals in m,
instantante Polarisation des Materials x,
spezifische Leitfähigkeit des Materials x in ^S /m,
temperaturunabhängige spezifische Leitfähigkeit des Materials x in S/m ,
elektrische Feldkonstante $8,85410^{-12}\mathrm{As/Vm},$
allgemeine Gaskonstante $8,314472 \text{ J/mol} \cdot \text{K},$
Aktivierungsenergie in J/mol,
Dielektrizitätsänderung der Pb-Relaxation,
Relaxationszeitkonstante der Pb-Relaxation in s,
Exponent für die Relaxationszeitverteilung,
Temperatur des Materials in in °C,
Kreisfrequenz in s.

Anhang E

Programme

E.1 Anpassungsprogramm für das Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit

Der folgende Quellcode von MATLAB (R2007a) beeinhaltet das Verfahren zur Anpassung der Cole-Cole-Modellparamter. Verwendet wurde das Cole-Cole-Modell (4.3). Der Programmablauf und das Prinzip wurde im Abschnitt 4.1.4 erläutert.

```
function Ausgabe=ColeColeFit(Freq,CP,C0)
% Erwartete Eingabe Werte:
% Freq:
        ein Vektor von Frequenzen in Hz Zeilenvektor
%
   CP
        gemessene komplexen Kapazitäten in F als Zeilenvektor CP=CP'-j*CP"
%
   CO
        Referenzkapazität oder Vakuumkapazitä
%Konstanten:
E0=8.8542E-12;
%Einstellungen:
grob_Anzahl_Sigmaschritt=5;
                         %Intervallänge
Anzahl_Sigmaschritt=23;
                         %Ideal=23 minimum 3 Festgelegter-Bereich ist
ProzentBereich=0.3;
                         %Ideal=0.3=30%
Abbruchfaktor=5;
                        %Ideal=5
%Abruchfaktor < aktuelleGüte/min(Güte)</pre>
%Abweichung vom Sigma=ProzentBereich/(4*Anzahl_Sigmaschritt)
%Ausgaben initieren:
error=' ';
%Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit
ColeColeModell = fittype(['-i*(sigma/(2*pi*x*',num2str(E0,10),'))+e_inf+',...
   'd_epb1/(1+(i*2*pi*x*tau1)^n1)+d_epb2/(1+(i*2*pi*x*tau2)^n2)'])
Norm_CP=CP./C0;
%Startwerte für Sigma und E_inf
fsigma = fittype(['imag(-i*(sigma*1E-15)/(2*pi*10^x*',num2str(E0),...
             ')+(d_Eps/(1+(i*2*pi*10^x*tau)^n)))']);
%
optsigma = fitoptions(fsigma);
```

```
optsigma.StartPoint = [100 1 10000 1];
optsigma.Upper = [inf 1 inf 300];
optsigma.Lower = [0 0.7 0.001 1];
optsigma.DiffMinChange= 1.0000e-018;
optsigma.DiffMaxChange= 0.00001000;
optsigma.MaxFunEvals= 6000;
optsigma.MaxIter= 4000;
optsigma.TolFun= 1.0000e-0016;
optsigma.TolX= 1.0000e-0016;
%durch erstes Fitting Sigma abschätzen
[fs,fsgof,fsoutput] = fit(log10(Freq),imag(Norm_CP),fsigma,optsigma);
sigma=fs.sigma*1E-15;
e_inf=mean(real(Norm_CP(2:5)));
%ENDE ========= Schäter für Sigma und E_inf =======
%Anpassung der Parameterwerte mit grobe Sigma schritten
[fg,gof,output,Guete_sigma,pos_zeile]=imagfit_2relax_sigmaoptimierung(Freq,...
   Norm_CP,sigma,e_inf,ProzentBereich,grob_Anzahl_Sigmaschritt,Abbruchfaktor);
Guete_sigma2=Guete_sigma; %Zwischenspeichern der Ergebnisse
sigma=Guete_sigma(pos_zeile,2);%Bestes SSE-Zwischenergebnis der groben Sigma-Suche
%Anpassung der Parameterwerte mit feine Sigma schritten
[fg,gof,output,Guete_sigma,pos_zeile]=imagfit_2relax_sigmaoptimierung(Freq,...
   Norm_CP,sigma,e_inf,ProzentBereich*2/(Anzahl_Sigmaschritt-1),...
   grob_Anzahl_Sigmaschritt,Abbruchfaktor);
sigma=Guete_sigma(pos_zeile,2);%Bestes SSE-Zwischenergebnis der feinen Sigma-Suche
%Anpassung der Parameterwerte mit optimalen Sigma
[fg,gof,output]=imagfit_2_relaxation(Freq,Norm_CP,sigma,e_inf);
%Zusammenührung der beiden SSE-Zwischenergebnisse.
Guete_sigma=vertcat(Guete_sigma2,Guete_sigma);
Guete_sigma=sortrows(Guete_sigma,2);
Ausgabe.fitd_eps=
                  fg.d_Eps;
Ausgabe.fitd_eps1= fg.d_Eps1;
Ausgabe.fitn= fg.n;
Ausgabe.fitn1= fg.n1;
Ausgabe.fittau= fg.tau;
Ausgabe.fittau1= fg.tau1;
%Ausgabe.fittemp=FDA(m).Temp(1);
Ausgabe.fitsigma=sigma;
Ausgabe.fite_inf=e_inf;
Ausgabe.fitsigma_abw=(Guete_sigma(pos_zeile+1,2)-Guete_sigma(pos_zeile,2))*...
   100/Guete_sigma(pos_zeile,2);
Ausgabe.fite_sse=gof.sse;
Ausgabe.fitFkt=fittype(['CO*(-i*(',num2str(sigma),'/(2*pi*x*',num2str(EO),...
   '))+(',num2str(fg.d_Eps),'/(1+(i*2*pi*x*',num2str(fg.tau),')^',num2str(fg.n),...
   '))+(',num2str(fg.d_Eps1),'/(1+(i*2*pi*x*',num2str(fg.tau1),')^',...
   num2str(fg.n1),'))+',num2str(e_inf),')']);
%Einsetzen der bestimmten Werte in das Modell
kC=ColeColeModell(fg.d_Eps,fg.d_Eps1,e_inf,fg.n,fg.n1,sigma,fg.tau,fg.tau1,Freq);
kCsigma=ColeColeModell(0,0,e_inf,1,1,sigma,1,1,Freq)
yguete=Norm_CP./kCsigma;
Ausgabe.B=yguete;
                      %Bewertungsfunktion
```

```
Ausgabe.G=Norm_CP./kC; %Güte
Ausgabe.guete=Guete_sigma;
Ausgabe.CO=CO;
%Fitfunktion vom Imaginärteil der Bewertungsfunktion.
function [fg,gof,output]=imagfit_2_relaxation(Freq,Norm_CP,sigma,e_inf)
E0=8.8542E-12; %Konstante
fguete = fittype(['0+imag(((d_Eps1/(1+(i*2*pi*10^x*tau1)^n1))+(d_Eps/(1+'...
    '(i*2*pi*10^x*tau)^n)))/(-i*(',num2str(sigma),'/(2*pi*10^x*',num2str(E0),...
    '))+',num2str(e_inf),'))']);
optguete = fitoptions(fguete);
optguete.StartPoint = [2 50 1.0 1.0 200 10];
optguete.Upper = [2E6 10000 1.0 1.0 5000 200];
optguete.Lower = [0 \ 0 \ 0.23 \ 0.23 \ 10 \ 0.000001];
optguete.DiffMinChange= 1.0000e-018;
optguete.DiffMaxChange= 0.00001000;
optguete.MaxFunEvals= 6000;
optguete.MaxIter= 400;
optguete.TolFun= 1.0000e-0016;
optguete.TolX= 1.0000e-0016;
w=2.*pi.*Freq;
yguete=Norm_CP./(-i.*(sigma./(w*E0))+e_inf);
[fg,gof,output] = fit(log10(Freq),imag(yguete),fguete,optguete);
%optimierung der Sigmadaten mit Fitfunktion vom Imaginärteil der Bewertungsfunktion.
function [fg,gof,output,Guete_sigma,pos_zeile]=imagfit_2relax_sigmaoptimierung(Freq,...
   Norm_CP, sigma, e_inf, ProzentBereich, Anzahl_Sigmaschritt, Abbruchfaktor)
%anlegen eines Vektors mit daten rund um den vorgegebenen Sigmapunkt.
sigma_V=linspace(sigma*(1-ProzentBereich/2),sigma*(1+ProzentBereich/2),...
   Anzahl_Sigmaschritt);
Merker=1;
n=1;
MAX_SIGMA_ANZAHL=100;
n_max=length(sigma_V);
Jump=2; %Enthält die Anzahl der Punkte die "Übersprungen" werden,
       %bevor ein Ausreißer als solcher erkannt wird
while ((n <= n_max) && (n_max < MAX_SIGMA_ANZAHL))</pre>
  sigma=sigma_V(n);
  [fg,gof,output]=imagfit_2_relaxation(Freq,Norm_CP,sigma,e_inf);
  Guete_sigma(n,1)=gof.sse;
  Guete_sigma(n,2)=sigma;
  % Wenn 2 Messpunkte in Folge um den Abruchfaktor (5) größer
  % sind als das minimum wird abgebrochen...
  if (Guete_sigma(n,1)/min(Guete_sigma(:,1))>Abbruchfaktor) %vorzeitiger abbruch
     ausreisser=1;
     for k=1:Jump
         if (Guete_sigma(n-k,1)/min(Guete_sigma(:,1))>Abbruchfaktor)
             ausreisser=ausreisser+1;
         end
     end
      if ausreisser==Jump
```

```
error='Vorzeitiger Abbruch, da Guete_sigma(n,1)/min(Guete_sigma(:,1))>5';
          sigma_V=sigma_V(1:n);
          n_max=length(sigma_V);
      end
  end
  if n_max==n && Merker==1
      if length(sigma_V)>1% Im Falle das es mehrere ident. Minimus gibt
          pos_zeile=min(find(Guete_sigma==min(Guete_sigma(:,1))));
      else
          pos_zeile=0;
      end
      %Wenn der minimale Wert am Anfang oder am Ende des Sigma-Intervalls
      %liegt, wird das Intervall in die Richtung verlängert und
      %weiter gemessen.
      switch pos_zeile
          case 1
              Merker=1;
              Schrittprozent=ProzentBereich/(Anzahl_Sigmaschritt-1);
              sigma_V=[linspace(Guete_sigma(1,2)*(1-ProzentBereich-Schrittprozent),...
                  Guete_sigma(1,2)*(1-Schrittprozent),Anzahl_Sigmaschritt), sigma_V];
              Guete_sigma=[[ones(Anzahl_Sigmaschritt,1);Guete_sigma(:,1)],...
                  [ones(Anzahl_Sigmaschritt,1);Guete_sigma(:,2)]];
              n_max=Anzahl_Sigmaschritt;
              n=0;
          case length(Guete_sigma)
              Merker=1;
              Schrittprozent=ProzentBereich/(Anzahl_Sigmaschritt-1);
              sigma_V(n+1:n+Anzahl_Sigmaschritt)=linspace(Guete_sigma(pos_zeile,2)*...
                  (1+Schrittprozent), Guete_sigma(pos_zeile,2)*...
                  (1+Schrittprozent+ProzentBereich), Anzahl_Sigmaschritt);
              n_max=n+Anzahl_Sigmaschritt;
          otherwise
              Merker=0;
      end
  end
  n=n+1;
end
if n_max>=MAX_SIGMA_ANZAHL
    'ABBRUCH: MAX_SIGMA_ANZAHL=100';
end
%=
```

E.2 Anpassungsprogramm für das Basismodell ohne Leisten

Der folgende Quellcode von MATLAB (R2007a) beeinhaltet - aus Übersichtlichkeitsgründennur die Bestimmung der Parameterwerte für das Transformatormodell ohne Leisten (4.20). Der Ablauf des Programms ist im Abschnitt 4.3.3 beschrieben.

```
function TrafoFit(f,CP)
%Fit-Programm für das Basismodell für Leistungstransformatoren ohne Leisten
%==> Leisten-Flächenfaktor KL=0
%Eingabe:
% CP=komplexe Kapazitätsmessergebnisse als Zeilenvektor
% f=Frequenz in [Hz] als Zeilenvektor
persistent e0;
e0=8.85418782E-12;
A=[];
ydataC=CP;%conj(CP');
xdata=f;
yguete=ydataC;
spb=1E-16; %Leitfähigkeit von nicht imprägnierten Pressboard
eol=2.1;
            %Dielektrizitätszahl von Öl bei hohen Freq.
sigma=50;
            %*E-14 [S/m] Leitfähigkeit für die B-Funktion
            %entspricht ungefähr die gesamte Leitfähigkeit des Systems (CP).
e_inf=2.5;
            %instantane Polarisation für die B-Funktion
            %entspricht ungefähr die inst. Polarisation des Systems (CP).
            %Ist abhängig vom CO.
CO=1;%3.1E-9
              %[F]leer Kapazität des Systems.
            %Solange variieren bis eoel und die andern vorgegebenen
            %Nebenbedingungen stimmen.
KOel=[0.3 0.4 0.5 0.6]; %Schätzer für das Öl-Pb-Verhältnis
%============================Bestimmt das optimale Sigma für die B-Funktion
fsigma = fittype(['imag(-i*(sigma*1E-14)/(2*pi*10^x*',num2str(e0),...
    ')+(d_Eps/(1+(i*2*pi*10^x*tau)^n)))']);
    optsigma = fitoptions(fsigma);
        % fsigma(d_Eps1,n1,sigma,tau1,x);
        optsigma.StartPoint = [100 1 10000 1];
        optsigma.Upper = [inf 1 inf 300];
        optsigma.Lower = [0 0.7 0.0001 1];
        optsigma.DiffMinChange= 1.0000e-018;
        optsigma.DiffMaxChange= 0.00001000;
        optsigma.MaxFunEvals= 6000;
        optsigma.MaxIter= 4000;
        optsigma.TolFun= 1.0000e-0016;
        optsigma.TolX= 1.0000e-0016;
    [fs,fsgof,fsoutput] = fit(log10(xdata),imag(ydataC/ydataC(1)/e_inf),fsigma,optsigma);
    sigma=fs.sigma;
 %=
                   ==============ENDE=Bestimmt das optimale Sigma für die B-Funktion
SSE_CO=ones(length(KOel),1)*100 ;
```

```
%Transformatormodell ohne Leisten
trafoBasisModel = fittype(['1./(kol/(-i*(sol/(2*pi*x*e0))+eol)+'...
```

```
'(1-kol)/((1-kA)*(-i*(sol/(2*pi*x*e0))+eol)+'...
                  '(kA)*(-i*(spb/(2*pi*x*e0))+(d_epb/(1+(i*2*pi*x*tpb)^n))+epb)))'])
%==========================Anpassung der Modellparameter
n=1;
for n=1:length(KOel)
    if min(SSE_CO)>1E-4 %Die Start-Schätzwerte eingeben
    CP1000Hz=trafoBasisModel(0,e0,2.1,3.6,0.95,KOel(n),0.9,5E-12,spb,1000,1000');
    else %Schätwerte mit dem bisherigen optimalen Fit
     CP1000Hz=trafoBasisModel(0,e0,eol,fg.epb,fg.kA,KOel(n),fg.n,fg.sol*1E-14,...
         spb,fg.tpb,1000');
    end
    %Schätzer für die Vakuumkapazität
    CO=real(mean(ydataC(1:4))/CP1000Hz);
    ydata=ydataC./C0;
    % B-Funktion der Messdaten
    yguete=ydata./(-i.*(1E-14*sigma./(2*pi*xdata*e0))+e_inf);
    % B-Funktion des Basismodells ohne Leisten
    fguete = fittype(['real((1./(kol/(-i*(1E-14*sol/(2*pi*10^x*',num2str(e0,10),...
        '))+',num2str(eol,10),')+(1-kol)/((1-kA)*(-i*(1.0E-14*sol/(2*pi*10^x*',...
        num2str(e0,10),'))+',num2str(eol,10),')+(kA)*(-i*(',num2str(spb,10),...
        '/(2*pi*10^x*',num2str(e0,10),'))+(d_epb/(1+(i*2*pi*10^x*tpb)^n))+'...
        'epb))))./(-i.*(1E-14*',num2str(sigma,10),'./(2*pi*10^x*',num2str(e0,10),...
        '))+',num2str(e_inf,10),'))']);
    optguete = fitoptions(fguete); %Anpassung mit
    %
                   f guete(d_epb,eol,epb,kA, kol, n,sol*1E-14,spb,tpb,x)
    optguete.StartPoint = [100.00 4.01 0.9999 0.5 0.7 10 10000]; %Startwert
    optguete.Upper = [400.0000 4.5 1.0000 0.8001 1.00 9000 14000];%obere Grenze
    optguete.Lower = [0.00001 3.21 0.900001 0.2005 0.35 10.00 0.001];%untere Grenze
    optguete.Robust= 'on';
    optguete.DiffMinChange= 1.0000e-039;
    optguete.DiffMaxChange= 1.0000E-38;
    optguete.MaxFunEvals= 6000;
    optguete.MaxIter= 1000;
    optguete.TolFun= 1.0000E-0038;
    optguete.TolX= 1.0000E-38;
    [fg,gof,output] = fit(log10(xdata),real(yguete),fguete,optguete)
    A(n).output=output;
    A(n).gof=gof;
    A(n).fg=fg;
    A(n).spb=spb;
    A(n).eol=eol;
    A(n).CO=CO;
    SSE_CO(n)=gof.sse;
    fg=A(find(SSE_CO==min(SSE_CO))).fg;
end
%=======================ENDE=Anpassung der Modellparameter
%Bestimmung der Vakuumkapazität
CP1000Hz=real(trafoBasisModel(fg.d_epb,e0,eol,fg.epb,fg.kA,fg.kol,fg.n,...
    fg.sol*1E-14,spb,fg.tpb,xdata(1:4)') );
CO=real(mean(ydataC(1:4)))/mean(CP1000Hz);
ydata=ydataC./C0;
A(find(SSE_CO==min(SSE_CO))).CO=CO;
```

```
%Ausgabe der besten Lösung
A(find(SSE_CO==min(SSE_CO))).fg%Ausgabe der besten Approximationsparameter
disp('ACHTUNG: sol*1E-14 S/m');
A(find(SSE_CO==min(SSE_CO))).gof %Ausgabe der Approximationsgenauigkeit
CO=A(find(SSE_CO==min(SSE_CO))).CO%Ausgabe von CO
%Basismodell
CPM=trafoBasisModel(fg.d_epb,e0,eol,fg.epb,fg.kA,fg.kol,fg.n,fg.sol*1E-14,...
   spb,fg.tpb,xdata);
%Orginalmessung und Modellverlauf
figure(1);
hold on;
plot(xdata,real(ydata./CPM),'b+-',xdata,imag(ydata./CPM),'b+-');set(gca,'xscal','log');
%komplexe Abweichung
figure(2);
hold on;
plot(xdata,real(CPM),'r+',xdata,imag(CPM),'r+',xdata,real(CP./C0),'bo',...
   xdata,imag(CP./CO),'bo');set(gca,'xscal','log');
```

Anhang F

Tabellen

F.1 Anforderungen an neue und gebrauchte Isolieröle

Eigenschaften	Einheit	Neuöle nach	Betriebsöle nach
		DIN57370 Teil 1	DIN57370 Teil 2
		Klasse A Klasse B	Klasse A Klasse B
Reinheit (Aussehen)	_	klar, frei von Festst.	
Dichte	kg/dm^3		
bei $15^{\circ}C$		$\leq 0,898 \leq 10,873$	
bei 20° C		$\leq 0,895 \leq 10,870$	
Kinematische Viskosität	mm^2/s		
bei 20° C		$\leq 25 \qquad \leq 6$	
bei -30° C		$\leq 1800 \leq 65$	
${f Flammpunkt}$	$^{\circ}C$	$\geq 130 \qquad \geq 100$	
${f Neutralisationszahl}$	mgKOH/g	$\leq 0,03$	$\leq 0, 50$ –
Korrosiver Schwefel		nicht anwesend	
Durchschlagspannung	kV	-nach Vorbehandl	
in Transformatoren			
und Wandlern U_m (1)		≥ 50	
bis 72,5 kV			≥ 30 –
über 72,5kV bis 170 kV			≥ 40 –
über 170 kV			≥ 50 –
in Schaltgeräten $U_m(1)$		≥ 50	
bis 36 kV			≥ 10
über 36 bis 72,5 kV			≥ 15
über 72,5 kV			≥ 20
Dielektrischer Verlust-		-nach Vorbehandl	
faktor tan δ bei 90°C		$\leq 0,005$	$\leq 1 (2)$

(1) Höchste Spannung für Betriebsmittel

(2) Dieser Wert gilt für Leistungstransformatoren ab $U_m = 123 \,\text{kV}$, bei dessen Erreichen empfohlen wird, mit dem Gerätehersteller in Verbindung zu treten.

Eigenschaften	Einheit	Neuöle nach	Betriebsöle nach
		DIN57370 Teil 1	DIN57370 Teil 2
		Klasse A Klasse B	Klasse A Klasse B
Alterungsbeständigkeit			
n. Baader $(140 h/l 10^{\circ} C)$			
Verseifungszahl	mgKOH/g	$\leq 0, 60$	
Schlammgehalt	%-Massenant.	$\leq 0,05$	
Dielektrischer			
Verlustfaktor bei 90° C		$\leq 0, 18$	
Oxidations stabilität			
(1 64 h/10O0C)			
Neutralisationszahl	mgKOH/g	$\leq 0, 30$	
Schlammgehalt	%-Massenant.	$\leq 0,06$	

(1) Höchste Spannung für Betriebsmittel

(2) Dieser Wert gilt für Leistungstransformatoren ab $U_m = 123 \,\text{kV}$, bei dessen Erreichen empfohlen wird, mit dem Gerätehersteller in Verbindung zu treten.

Tab. F.1: Anforderungen an neue und gebrauchte Isolieröle nach DIN 57370 Teil 1 und 2 (VDE 0370-1/2) [68, S. 28].

Literaturverzeichnis

- [1] ADAMIETZ, G.: Impedanzmessungen am Öl-Papier-Dielektrikum. Studienarbeit, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe, 2005.
- [2] ADAMIETZ, G.: Modellierung und Identifikation von Öl-Papier-Isolationssystemen im Frequenz- und Zeitbereich. Diplomarbeit, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe, 2006.
- [3] ADUNKA, F.: Meβunsicherheit-Theorie und Praxis. Vulkan Verlag, Essen, 2 Auflage, 2000.
- [4] AHLEMEYER, W.: Der Einfluss gelöster Gase auf die Alterung eines Öl-Papier-Dielektrikums. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Universität Hannover, 1981.
- [5] ATKINS, PETER W.: Physikalische Chemie. VCH, Weinheim; Basel (Schweiz), 1 Auflage, 1990.
- [6] BAERNS, M.; BEHR, A.; BREHM A.; GMEHLING J.; HOFMANN H.; ONKEN U.; REN-KEN A.: *Technische Chemie*. Wiley-VCH, Weinheim, 2006.
- [7] BANGE, SEBASTIAN: Numerische Kramers-Kronig Transformation. APKM Universität Potsdam.
- [8] BUERSCHAPER, B.; LEIBFRIED, T.; HAHN: Feuchtebestimmung in Transformerboard: Ein Erfahrungsbericht. ETZ, Heft 7, Seite 27, Juli 2004.
- [9] COLE, R. H.; DAVIDSON D. W.: Dielectric Relaxation in Glycole, Propylene Glycol, and n-Propanol. Journal of Chemical Physics, 19:1484-1490, 1951.
- [10] COLE K. S.; COLE, R. H.: Dispersion and Adsorption in Dielectrics. Journal of Chemical Physics, 9:341-351, 1941.
- [11] DEBYE, P.: Polar Molecules. Dover Publikations, New York, 1929.
- [12] DIN, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.:
 DIN 1319: Grundlagen der Messtechnik
 Teil 1:1.95 Grundbegriffe
 Teil 2:1.80 Begriffe für die Anwendung
 Teil 3:5.96 Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße
 Teil 4:2.99 Auswertung von Messungen; Messunsicherheit
- [13] DOLL, J.; FREEMAN, D.L.: Monte Carlo methods in chemistry. IEEE Computational Science and Engineering, 1(1):22-32, Spring 1994.

- [14] DU, Y.; ZAHN, M.; LESIEUTRE B.C.; MAMISHEV A.V. & LINDGREN S.R.: Moisture Equilibrium In Transformer Paper Oil Systems. Electrical Insulation Magazine (IE-EE), 15(1):11-20, January/February 1999.
- [15] FEYNMAN, RICHARD P.; LEIGHTON, ROBERT B.; SANDS MATTHEW: Vorlesung über Physik - Band II: Elektromagnetismus und Struktur der Materie. Oldenbourg Verlag, 2 Auflage, 1991.
- [16] FICHTNER, W.: Impedanzmessungen in organischen Flüssigkeiten geringer Leitfähigkeit und ihr Einsatz zur Untersuchung von Schmierölen. Dissertation, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, Technischen Universität Dresden, 2002.
- [17] FISCHER, K.: Neues Verfahren zur maßanalytischen Bestimmung des Wassergehaltes von Flüssigkeiten und festen Körpern. Angewandte Chemie, Bd. 48(26):394–396, 1935.
- [18] FÖLLINGER, OTTO: Regelungstechnik Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Hütig Verlag Heidelberg, 8 Auflage, 1994.
- [19] GAEFVERT, U.; ADEEN, L.; TAPPER M.; GHASEMI P.; JOENSSON B.: Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostics of Power Transformers.
 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Seiten 825–830, Xi'an, China, 21.-26. June 2000.
- [20] GASSER, H. P.; KRAUSE, C; PREVOST T.: Water Absorption of Cellulosic Insulating Materials used in Power Transformers. ICSD-International Conference on Solid Dielectrics (9th IEEE), Seite 289, Winchester, Hampshire, United Kingdom, 8. -13. July 2007.
- [21] GISELBRECHT, D.; LEIBFRIED, T.: Messungen und Modellierung von Ol-Papier-Isolationssystemen im Frequenz- und Zeitbereich. ETG-Fachtagung (VDE), Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Kassel, Deutschland, 19.-20. September 2006.
- [22] GISELBRECHT, D.; LEIBFRIED, T.: Modelling of Oil-Paper Insulation Layers in the Frequency Domain with Cole-Cole-Functions. IEEE-International Symposium on Electrical Insulation, Seite 59, Toronto, Kananda, 11.-14. June 2006.
- [23] GISELBRECHT, D.; LEIBFRIED, T.: Modelling of Oil-/ Paper Insulation Layers in the Frequency Domain with Cole-Cole-Functions (Part II). ICSD-International Conference on Solid Dielectrics (9th IEEE), Winchester, Hampshire, United Kingdom, 8.
 -13. July 2007.
- [24] GISELBRECHT, D.; LEIBFRIED, T.: Trend Analysis of Power Transformers with FDS-Measurement. ISH-International Symposium on High Voltage Engineering (15th), T7-551, Ljubljana, Slovenia, August 27th - 31th 2007.
- [25] GUM, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Deutsche Übersetzung des Guide to Expression of Uncertainty in Measurments. Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 1 Auflage, 1995.
- [26] HAVRILIAK, S.; NEGAMI S.: A Complex Plane Analysis of α-Dispersion in Some Polymer Systems. Journal of Polymer Science: Part C, 14:99–117, 1966.

- [27] HEMMER, M.: Rapsöl als Isolier- und Kühlmedium in Transformatoren. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technischen Universität Karlsruhe, 2004.
- [28] HERMANN, J.: Verteil-Transformatoren. Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-7785-3998-9.
- [29] HILPERT, T.: Elektrische Charakterisierung von Wärmedämmschichten mittels Impedanzspektroskopie. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technischen Universität Karlsruhe, 2007.
- [30] HOUHANESSIAN, VAHE DER: Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems. Dissertation, Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 1998.
- [31] HÜTTE: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 29 Auflage, 1989.
- [32] IEC 354: Loading guide for oil immersed power Transformers. IEC, 1991.
- [33] IEC 76-2: Power Transformers, Temperature rise. IEC, 1994.
- [34] ILDSTAD, E.; GÄFVERT, P.; SERDYUK Y.V.; GUBANSKI S.M.: Relation Between Return Voltage and Other Methods for Measurements of Dielectric Response. International Symposium on Electrical Insulation (IEEE), Ptittsburg, PA USA, June 5th-8th 1994.
- [35] IVERS-TIFFÉE, ELLEN und WALDEMAR VON MÜNCH: Werkstoffe der Elektrotechnik. Teubner, 10., überarb. u. erw. Aufl. Auflage, 2007.
- [36] KAHLE, MANFRED: *Elektrische Isoliertechnik*. Nummer ISBN 3-540-19369-3. Springer Verlag, 1989.
- [37] KÜCHLER, ANDREAS: *Hochspannungstechnik*. Springer Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 2 Auflage, 2005.
- [38] KIND, D.; KÄRNER, H.: Hochspannungsisolierterchnik für Elektroechniker. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig / Wiesbaden, 2 Auflage, 1982.
- [39] KIRKWOOD, J. G.; FUOSS, R. M.: Anomalous Dispersion and Dielectric Loss in Polar Polymers. Journal of Chemical Physics, 9:329-340, 1941.
- [40] KLIEM, H.; FUHRMANN, P.; ARLT G.: A Numerical Method for the Determination of First-Order Kinetics Relaxation Time Spectra. IEEE Dielectrics and Electrical Insulation, 23(6):919-927, December 1988.
- [41] KOCH, M.; TENBOHLEN, S.: Einflussgrößen und Zuverlässigkeit bei dielektrischen Diagnosemethoden zur Bestimmung des Feuchtegehalts. Regensburger Transformator Kolloquium, Tagungs-CD, Regensburg, 4.-5. November 2004.
- [42] KOCH, M.; TENBOHLEN, S.; BLENNOW J.; HOEHLEIN I.: Reliability and Improvements of Water Titration by the Karl Fischer Technique. ISH-International Symposium on High Voltage Engineering (15th), T10-53, Ljubljana, Slovenia, August 27th - 31th 2007.

- [43] LANDAU, L. P.; LIKHITZ E. M.: *Electrodynamics of Continuous Media, Course of Theoretical Physics*, Band 8. Perganom Press, New York, 2 Auflage, 1982.
- [44] LANDGRAF, C.; SCHNEIDER, G.: Elemente der Regelungstechnik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1 Auflage, 1970.
- [45] LÄMMCHE, S.: Charakterisierung molekularer Parameter von Ballaststoffkomponenten aus Markerbsen und Lupinen im Hinblick auf ihre physiko-chemischen Eigenschaften. Dissertation, Fakultät III - Prozesswissenschaften, Technischen Universität Berlin, 2004.
- [46] MACDONALD, J. ROSS: IMPEDANCE SPECTROCOPY EMPHASIZING SOLID MATERIALS AND SYSTEMS. Nummer ISBN 0-471-83122-0. JOHN WILEY AND SONS, 1987.
- [47] MAXWELL, JAMES CLERK: A treatise on electricity and magnetism. Dover Publ, Unabridged 3. ed. Auflage, 1954.
- [48] MONTSINGER, V. M.: Loading transformers by temperature. Journal AIEE, Seiten 293-297, April 1930.
- [49] MONTSINGER, V. M.: Belastung von Transformatoren nach dem Grade ihrer Erwärmung. etz, Seite 739, 1931, H. 23.
- [50] MOORE, WALTER. J.: Grundlagen der Physikalischen Chemie. Water de Grutyter Verlag, Berlin, 1 Auflage, 1990.
- [51] MOPSIK, F. I.: The Transformation of Time-Domain Relaxation Data into the Frequency Domain. IEEE Dielectrics and Electrical Insulation, 20(6):957-964, December 1985.
- [52] MOSER, H. P.: Transformerboard Die Verwendung von Transformerboard in Grossleistungstransformatoren. Sonderdruck der Zeitschrift SCIENTIA ELECTRICA, H. Weidmann AG, 1979.
- [53] MOSER, H. P.; DAHINDEN V.: Transformerboard II-Eigenschaften und Anwendung von Transformerboard aus verschiedenen Fasern. H. Weidmann AG, Rapperswil, 1987.
- [54] PABST, J.: Komplexe Dielektrizitätszahl von Polymeren in starken elektrischen Feldern untersucht am Beispiel des ataktischen Polystyrols und des Polyurethans. Dissertation, Fachbereich Chemie, Universität Kaiserslautern, 1978.
- [55] S., HAVRILIAK S.; NEGAMI: A Complex Plane Representation of Dielectric. Polymer, The Chemistry, Physics and Technology of High Polymers, 1967.
- [56] SCHÄFER, M.: Thermische Überwachung von Transformatoren. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technischen Universität Stuttgart, 2000.
- [57] SCHULZE, H.: Erhöhung der Lebensdauer und Belastbarkeit von Großtransformatoren durch gleichmäßige Wicklungstemperatur. etz-A, 79:814, 1958, H. 21.
- [58] SCHWAB, ADOLF J.: Elektroenergiesysteme Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. Springer, 2006.

- [59] SMITH, D.M.; BRYANT, W.M.D.; MITCHELL JR. J.: Analytical Procedures Employing Karl Fischer Reagent. I. Nature of the Reagent. J. Am. Chem. Soc., 61:2407–2412, 1939.
- [60] STEEMAN, P. A. M.; VAN TURNHOUT J.: A numerical Kramers-Kronig transform for the calculation of dielectric relaxation losses free from Ohmic conduction losses. Colloid Polym Sci, (275):106-115, 1997.
- [61] STIER, W.: Methoden der Zeitreihenanalyse. Springer, 2001.
- [62] STOIBER, M.: Modellierung von Öl-Papier-Isolationssystemen im Frequenzbereich zur Diagnose von Leistungstransformatoren. Diplomarbeit, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe, 2007.
- [63] TENBOHLEN, S.; HOFMANN, F.; BAUM J.: Wartungsfreiheit und Alterungsstopp durch Hermetikabschluss bei Leistungstransformatoren. Elektrizitätswirtschaft, Jahrgang 102, Heft 5, Dossier Transformatoren:28-32, 2003.
- [64] THIESS, U; LEIBFRIED, T.; HOMAGK C.: Fleetscreening an Leistungstransformatoren - Ein Fallbeispiel. Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2008.
- [65] TUNCER, E.; GUBAŃSKI, S.M.: On dielectric data analysis. Using the Monte Carlo method to obtain relaxation time distribution and comparing non-linear spectral function fits. IEEE Dielectrics and Electrical Insulation, 8(3):310-320, June 2001.
- [66] TUNCER, E.; SERDYUK, Y.V.; GUBANSKI S.M.: Dielectric mixtures: electrical properties and modeling. Dielectrics and Electrical Insulation (IEEE), 9(5):809-828, Oct 2003.
- [67] VDEW-ÖLBUCH, BAND 2: Isolierflüssigkeiten. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke-VDEW-e. V., 7 Auflage, 1996.
- [68] VDEW-ÖLBUCH, BAND 2: *Isolierflüssigkeiten*. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke-VDEW-e. V., 7 Auflage, 1996.
- [69] ZAENGL, W. S.: Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for hv power equipment (transformers, cables, etc.). ISH-International Symposium on High Voltage Engineering (12th), Seiten 76–85, Bangalore, India, August 20-24 2001.

Lebenslauf

Name:	Dietmar Giselbrecht
Geburtsdatum:	19.06.1970
Geburtsort:	Weiler im Allgäu
Familienstand:	verheiratet, 1 Kind

Werdegang:

09/1976 - 07/1980	Grundschule Weiler
09/1980 - 07/1985	Hauptschule Weiler
09/1985 - 07/1986	Berufsgrundschuljahr in Lindau
09/1986 - 07/1988	Ausbildung zum Mechaniker
07/1988 - 07/1991	Zerspanenden Fertigung zur Herstellung von Spritzgussformen, Firma Pfaff GmbH & Co. KG in Röthenbach
09/1991 - 07/1993	Ausbildung zum staatlich geprüften Maschinenbautechniker
10/1993 - 08/1995	Konstruktion und Fertigung von Spritzgussformen, Firma Pfaff GmbH & Co. KG in Röthenbach
07/1995 - 07/1997	Staatliche Berufsoberschule in Kempten Abschluss: fachgebundene Hochschulreife
10/1997 - 02/2003	Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Karlsruhe (TH) Studienrichtung: Unternehmensplanung
06/2003 - 08/2008	Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe (TH)