

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	2
1.2 Motivation und Ziele	3
2 Untersuchungsgegenstand.	5
2.1 Grundlagen 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 Isolieröl auf Mineralölbasis	10
2.2.1 Herkunft, Aufbereitung und molekularer Aufbau	10
2.2.2 Alterungsprozesse	12
2.3 Cellulose	14
2.3.1 Herkunft, Aufbereitung und molekularer Aufbau	14
2.3.2 Alterungsprozesse	16
3 Grundlagen und Theorie	17
3.1 Dielektrika	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 Modelle 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 Messverfahren zur Materialanalyse und dielektrischer Diagnose	38
3.3.1 Karl-Fischer-Titrationsverfahren	38
3.3.2 Messung des durchschnittl. viskosimetr. Polymerisationsgrades \overline{DP}_v	40
3.3.3 Bestimmung des Säuregehalts	41
3.3.4 Messverfahren zur dielektrischen Diagnose	42

4	Modelle für Öl-Papier-Isolationssysteme	47
4.1	Mathematisches 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 Transformationsansätze	56
4.2	Theorie des Isolationsschichtmodells	57
4.2.1	Idealisiertes Isolationsschichtmodell im homogenen Feld	58
4.2.2	Zylindrisches Isolationsschichtmodell	60
4.3	Isolationsschichtmodell 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	Experimentelle Untersuchungen	75
5.1	Versuchsaufbau für Labormessungen im Frequenz- und Zeitbereich	75
5.1.1	Messzelle	75
5.1.2	Messaufbau und -ablauf	78
5.1.3	Messunsicherheit des Messsystems	81
5.2	Isolieröl 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 $\tan \delta$ -Messung nach IEC 60247	95
5.3	Imprägniertes 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 Isolationzustandes	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 FDS-Messung	118
6	Zusammenfassung und Ausblick	119
A	Mathematische Zusammenhänge und Herleitungen	123
A.1	Verluste im Dielektrikum	123
A.2	Leitwert und spezifische Leitfähigkeit bei Isolatoren.	124
A.3	Maxwellsche Gleichungen	125

A.4	Kramers-Kronig-Beziehungen	125
B	Messunsicherheit	127
B.1	Fortpflanzung systematischer Messabweichungen	128
B.2	Fortpflanzung zufälliger Messabweichung.	128
B.3	Messunsicherheit mit komplexen Zahlen	129
C	Alterungsmechanismen und chemische Reaktionsgleichung	131
C.1	Allgemeines zur Alterung	131
C.2	Alterung der Cellulose	131
C.3	Öl-Alterung	133
D	Nomenklatur und Formeln	135
D.1	Nomenklatur	135
D.2	Cole-Cole-Funktion	135
D.3	Basismodell für Leistungstransformatoren ohne Leisten	136
E	Programme	137
E.1	Anpassungsprogramm für das Cole-Cole-Modell mit Leitfähigkeit.	137
E.2	Anpassungsprogramm für das Basismodell ohne Leisten	141
F	Tabellen	145
F.1	Anforderungen an neue und gebrauchte Isolieröle	145
Literaturverzeichnis.		147