

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Motivation und Ziel der Arbeit	3
3	Leistungstransformatoren	5
3.1	Betrieb und Aufbau	5
3.1.1	Allgemeiner Aufbau	6
3.1.2	Kessel und Ölausdehnungsgefäß	7
3.1.3	Wicklungen	8
3.1.4	Magnetkern	9
3.1.5	Stufenschalter	9
3.2	Alterung von Leistungstransformatoren	10
3.3	Lebensdauer und Diagnosebedarf von Leistungstransformatoren	11
4	Diagnoseverfahren für Leistungstransformatoren	13
4.1	Einleitung	13
4.2	Ölanalytik	14
4.2.1	Dielektrische Eigenschaften des Isolieröls	15
4.2.2	Gas-in-Öl-Analyse	15
4.2.3	Furan-Analyse	15
4.3	Diagnose der Wicklungen	16
4.3.1	Messung des Wicklungswiderstands	16
4.3.2	Messung der Übersetzung	19
4.4	Diagnose des Isolationssystems	19
4.4.1	Messung der Kapazität und des Verlustfaktors	20
4.4.2	Messung des Isolationswiderstands	21
4.4.3	Komplexe dielektrische Messverfahren	22
4.5	Diagnose des mechanischen Aufbaus	26
4.5.1	Messung der Kurzschlussimpedanz	26
4.5.2	Messung des Leerlaufstroms	28
4.5.3	Messung der Übertragungsfunktion	29
5	Grundlagen der Übertragungsfunktion	31
5.1	Systemtheorie	31

5.2	Vierpoltheorie.	34
5.3	Modellbildung von Transformatoren	36
5.4	Mathematische Vergleichsverfahren	39
5.4.1	DL/T911-2004	39
5.4.2	NCEPRI	41
5.4.3	Kohärenzfunktion und Fehlerzahl	42
6	Messung der Übertragungsfunktion an Transformatoren	45
6.1	Theorie des Verfahrens.	45
6.1.1	Messung im Zeitbereich	46
6.1.2	Messung im Frequenzbereich	52
6.2	Internationale Arbeitsgruppen und Normung	58
6.2.1	Cigré WG A2.26	58
6.2.2	Arbeitsgruppe des IEEE	58
6.2.3	Normung innerhalb der IEC.	59
6.3	Vor-Ort-Messung der Übertragungsfunktion.	59
6.3.1	Vorbereitung des Messobjekts	61
6.3.2	Dokumentation der Messung	62
6.3.3	Vergleich von Messungen im Zeit- und Frequenzbereich	62
6.3.4	Mehrkanalige Messung im Zeitbereich	65
6.3.5	Messaufbau	65
6.3.6	Verwendete Messimpedanz	69
6.3.7	Magnetisierung des Kerns	70
6.3.8	Messspannung	71
6.3.9	Länge der verwendeten Messleitungen	72
6.3.10	Erdungssystem	74
6.3.11	Störungen.	79
6.4	Reproduzierbarkeit der gemessenen Übertragungsfunktion	80
6.4.1	Wiederholung von Messungen mit gleichem Aufbau.	81
6.4.2	Einfluss der Temperatur	82
6.4.3	Transport von Leistungstransformatoren	84
6.4.4	Messung mit Stromwandlern	86
6.4.5	Messung mit verschiedenen Geräten	87
6.4.6	Verschleiß des Stufenschalters	89
6.4.7	Kondensatordurchführungen	91
7	Auswertung der Übertragungsfunktion	95
7.1	Zeitbasierter Vergleich	95
7.2	Phasenbasierter Vergleich	98
7.2.1	Maschinentransformatoren	99

7.2.2	Netztransformatoren	101
7.3	Vergleich baugleicher Transformatoren	104
7.3.1	Baugleiche Maschinentransformatoren	104
7.3.2	Maschinentransformatoren mit einer baugleichen Wicklung	107
7.3.3	Netztransformatoren	108
7.3.4	Zusammenfassung	119
7.4	Übertragungsfunktion von Doppelstocktransformatoren	119
8	Verfahren zur Verkürzung der Diagnosedauer	123
8.1	Zeitbedarf bei konventioneller Messtechnik	123
8.2	Universelles Anschlusssystem.	124
8.2.1	Aufbau des Signalverteilers	126
8.2.2	Aufbau der Anschlussleitungen.	127
8.2.3	Aufbau der Anschlussklemmen.	128
8.3	Allpolige Messung der Übertragungsfunktion	128
8.3.1	Problemstellung und Konzept	129
8.3.2	Zentraler Signalverteiler	131
8.3.3	Anschaltboxen an den Anschlüssen des Transformators.	132
8.3.4	Durchgeführte Messungen	134
8.4	Zusammenfassung	136
9	Ergebnisse und Ausblick	137
9.1	Vor-Ort-Messung der Übertragungsfunktion.	137
9.2	Algorithmische Bewertung der Übertragungsfunktionen.	138
9.3	Verkürzung der Diagnosedauer	139
9.4	Ausblick	139
A	Messabweichungen und Messunsicherheiten.	141
A.1	Messabweichungen	141
A.2	Messunsicherheiten	144
B	Verwendete FRA-Geräte	147
C	Programme	149
C.1	Bewertungsalgorithmus DL/T911-2004	149
C.2	Bewertungsalgorithmus NCPERI	150
C.3	Bewertungsalgorithmus Fehlerzahl	151
Abbildungen		153
Tabellen		159
Literaturverzeichnis.		163
Abkürzungen und Formelzeichen		173