



Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Einsatz von Energiekabeln im Energieversorgungsnetz	2
1.2	Schädigungs- und Alterungsmechanismen bei Kabeln	3
1.3	Energiekabeldiagnostik	5
1.3.1	Spannungsprüfungen	6
1.3.2	Nicht-destruktive Diagnostik	7
1.3.2.1	Verlustfaktormessung ($\tan \delta$)	7
1.3.2.2	Wiederkehrspannungsmessung (RVM)	7
1.3.2.3	Impedanzspektroskopie (PDC/IRC/FDS)	7
1.3.2.4	Teilentladungsmessung (TE-Messung)	8
1.4	Stand der Technik bei der Kabel-TE-Messung	9
1.5	Herausforderungen bei der Kabel-TE-Messung.	10
1.5.1	Dämpfung und Dispersion von Impulsen	10
1.5.2	Methoden zur Ankunftszeitbestimmung	10
1.5.3	Blindlänge	11
1.5.4	Überlagerung von Reflektogrammen.	13
1.5.5	Mischkabelstrecken	14
1.5.6	Einkopplung von Störsignalen.	15
1.5.6.1	Störunterdrückung im Bereich des Messaufbaus	17
1.5.6.2	Störunterdrückung am TE-Messsystem	17
1.5.6.3	Störunterdrückung durch digitale Signalverarbeitung	18
1.5.7	Mechanische Fehlerquellen.	18
1.5.8	Objektive Verarbeitung der Daten	18
1.6	Ziele der Arbeit	19
2	Teilentladungsmessung	21
2.1	Grundlagen der Teilentladungsmessung	21
2.1.1	Teilentladungsarten	21
2.1.1.1	Äußere Teilentladungen	22
2.1.1.2	Oberflächenentladungen	22
2.1.1.3	Innere Teilentladungen	22



2.1.2	Bestimmung der scheinbaren Ladung	23
2.1.2.1	Quasiintegration	24
2.1.2.2	Integration im Zeitbereich	24
2.1.3	Messsysteme für die TE-Messung	25
2.1.3.1	Klassischer TE-Messkreis	25
2.1.3.2	Unkonventionelle TE-Auskopplung	26
2.2	Teilentladungsdiagnostik an Energiekabeln	27
2.3	Verfahren zur Vor-Ort-Messung von TE in Kabeln	27
2.3.1	Offline-Teilentladungsmessung an Energiekabeln	28
2.3.1.1	Komponenten des Prüfaufbaus	28
2.3.1.2	Messablauf	29
2.3.2	Online-Teilentladungsmessung an Energiekabeln	30
2.3.3	Erfassung von TE an Garnituren	30
2.4	Methoden zur Ortung von TE in Energiekabeln	31
2.4.1	Reflektometrie im Zeitbereich (TDR)	31
2.4.2	Modellbasiertes Ortungsverfahren	33
2.5	Methoden zur Bestimmung der scheinbaren Ladung in Energiekabeln	34
2.5.1	Doppelimpulse	34
2.5.2	Dämpfungskompensierte Ladungsbestimmung	34
2.5.3	Auswertung der Impulsamplituden	35
2.5.4	Integration im Zeitbereich	36
2.5.5	Quasiintegration	36
3	Modellierung	39
3.1	Aufbau von Energiekabeln	39
3.2	Eigenschaften und Modellbildung von Energiekabeln	40
3.2.1	Allgemeine Leitungsgleichungen	41
3.2.2	Leitungsgleichungen in Vierpolform	45
3.2.2.1	Eingangsimpedanz einer Leitung mit Abschluss	46
3.2.3	Leitung mit Abschlüssen und Quelle am Leitungsanfang	46
3.2.4	Leitung mit Abschlüssen und ortsabhängiger Quelle.	48
3.2.5	Bestimmung der Leitungsbeläge	49
3.2.6	Bestimmung der Modellparameter	53
3.2.6.1	Koaxialkabelstrecke	53
3.2.6.2	VPE-Kabelstrecke	54
3.2.7	Mathematische Beschreibung eines Teilentladungsimpulses	56
3.2.7.1	Doppelexponentialfunktion	57
3.2.7.2	Symmetrischer Gaußimpuls	57

3.2.8	Ladungsbestimmung bei der Modellierung von Kabel-TE	59
3.2.9	Verifikation der Kabelmodelle.	59
3.2.10	Modellierung von Mischkabelstrecken und Verzweigungen.	61
3.3	Modellbasiertes Ortungsverfahren.	63
3.3.1	Funktionsweise des Ortungsprozesses	64
3.3.2	Flächendifferenzverfahren	64
3.3.3	Kreuzkorrelationsverfahren.	65
3.3.4	Ladungsbestimmung	66
4	Aufbau eines Offline-Kabel-TE-Messsystems	67
4.1	Anforderungen an ein Kabel-TE-Messsystem	67
4.2	Messaufbau.	68
4.3	Geschirmte kapazitive Ankoppeleinheit	69
4.3.1	Aufbau	69
4.3.2	Hochspannungsfiterdurchführung	71
4.3.3	Frequenzantwort der geschirmten Ankoppeleinheit	72
4.3.4	Unterdrückung leitungsgebundener Störsignale	73
4.3.5	Unterdrückung gestrahlter Störsignale	74
4.4	Induktive Auskopplung	78
4.5	Ankopplungsvierpol	81
4.6	Bestimmung der Übertragungsfunktionen	83
4.7	Bestimmung der Eingangsimpedanzen	84
4.8	Mesrechner und Software	86
5	Signalverarbeitung	91
5.1	Methoden zur Rausch- und Störunterdrückung	91
5.1.1	Fourier-Analyse	92
5.1.2	Wavelet-Analyse	93
5.1.2.1	Wavelet-Transformation	93
5.1.2.2	Diskrete Wavelet-Transformation (DWT)	94
5.1.2.3	Second Generation Wavelet Transformation (SGWT)	98
5.1.2.4	De-noising mittels Hard- und Soft-Thresholding	100
5.1.3	Empirical Mode Decomposition (EMD)	101
5.1.3.1	Der EMD-Algorithmus	102
5.1.3.2	Der Sifting-Prozess	103
5.1.3.3	EMD-De-noising durch partielle Rekonstruktion	105
5.1.3.4	Schwellwertbasiertes EMD-De-noising (EMD-DT)	108
5.1.3.5	Interval-Thresholding (EMD-IT)	109
5.1.3.6	Iterative Intervall-Thresholding (EMD-IIT)	110



5.1.3.7	Clear Iterative Interval-Thresholding (EMD-CIIT)	111
5.2	Bestimmung der Ankunftszeit von Impulsen	114
5.2.1	Peak Detektion (PP)	115
5.2.2	Schwellwertmethode (SM).	115
5.2.2.1	Schwellwertbestimmung nach Donoho	116
5.2.2.2	Iterative Schwellwert-Methode	117
5.2.3	Energiekriterium (EC)	117
5.2.4	Akaike Information Criterion (AIC)	119
5.2.5	Phasenmethode (PM)	120
5.2.6	Autokorrelationsmethode (AK)	122
5.2.7	Simulationen	124
6	Ergebnisse	127
6.1	Modellierung von Kabelstrecken	128
6.2	Simulative Untersuchungen an Koaxialkabeln	130
6.2.1	Qualifikation der Ortungsverfahren	130
6.2.2	Qualifikation der De-noising Verfahren	134
6.2.3	Kompensation der Dämpfung bei der Ladungsbestimmung	140
6.3	Untersuchungen an einer Energiekabelstrecke im Labor	142
6.3.1	Lokalisierung mittels TDR.	142
6.3.2	Lokalisierung mittels modellbasierter Ortung	148
6.4	Auswertung von TE-Messungen an realen Strecken	150
6.4.1	Automatisierte Verarbeitung von Kabel-TE Messdaten.	150
6.4.1.1	Kalibration	150
6.4.1.2	Vorverarbeitung Messdatensatz	151
6.4.1.3	Identifikation und Ortung von Reflektogrammen	151
6.4.1.4	Darstellung des Ortungsergebnisses	153
6.4.2	Ergebnisse SGWT-De-noising.	153
6.4.3	Ergebnisse der partiellen Rekonstruktion mittels EMD	155
6.4.4	Erhöhung der Ortungsgenauigkeit bei realen Kabelstrecken	156
7	Zusammenfassung	159
7.1	Ausblick	161
	Literaturverzeichnis	163