

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>X</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>XI</b>
<b>Übersicht .....</b>	<b>XII</b>
<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>4</b>
1.1 Arten und Aufbau des Hochspannungskabels .....	4
1.2 Kabelgarnituren.....	6
1.2.1 Kabelmuffen.....	7
1.2.2 Kabelendverschluss.....	8
1.3 Fehlerarten in Hochspannungskabeln.....	9
1.3.1 Leiter-Schirm-Fehler.....	9
1.3.2 Überschlagfehler .....	10
1.3.3 Feuchte Fehler .....	10
1.3.4 Intermittierende Fehler.....	11
1.3.5 Erdfühliche Fehler (Erdfehler, Mantelfehler) .....	11
1.4 Fehlerortung an Kabelstrecken .....	11
1.4.1 Vorortungsmethoden.....	12
1.4.2 Nachortung .....	15
1.5 Leitungstheorie.....	16
1.5.1 Leitungsgleichungen .....	16
1.5.2 Differentialgleichungen der elektrischen Leitung.....	16
1.5.3 Lösung der Leitungsgleichungen .....	18
1.5.4 Wellenausbreitung.....	20
1.5.5 Stromverdrängung.....	24
1.5.6 Proximity-Effekt .....	25
1.6 Vierpoltheorie und Eingangsimpedanz.....	26
1.6.1 Kurzschluss- und Leerlaufimpedanz.....	27

1.6.2	Resonanzfrequenzen einer verlustlosen Leitung.....	27
1.6.3	Resonanzfrequenzen einer verlustbehafteten Leitung.....	28
1.6.4	Wellengrößen und Streuparameter.....	29
1.7	Berechnung der Parameter des Kabelersatzschaltbildes.....	31
1.7.1	Widerstandsbelag .....	33
1.7.2	Induktivitätsbelag .....	35
1.7.3	Kapazitätsbelag .....	37
1.7.4	Leitwertbelag.....	38
1.7.5	Wellenimpedanz.....	40
<b>2</b>	<b>Entwicklung und Verifikation der Simulationsmodelle .....</b>	<b>41</b>
2.1	Prüflingsbeschreibung.....	41
2.1.1	Prüfling A: Einadriges Mittelspannungskabel .....	41
2.1.2	Prüfling B: Einadriges Mittelspannungskabel .....	42
2.1.3	Prüfling C: Einadriges Mittelspannungskabel .....	44
2.1.4	Prüfling D: Dreadriges Mittelspannungskabel.....	45
2.1.5	Prüfling E: Dreadriges Mittelspannungskabel .....	46
2.1.6	Prüfling F: HVDC-Kabel .....	47
2.2	Aufbau und Optimierung eines FDA-Simulationsmodells.....	48
2.2.1	Verifikation des Modells .....	53
2.2.2	Optimierung des Modells .....	54
2.2.3	Querfehlersimulation.....	62
2.2.4	Längsfehlersimulation.....	65
2.3	Modellierung einer Kabelmuffe.....	67
2.4	Aufbau und Optimierung eines TDR-Simulationsmodells.....	71
2.4.1	Verifikation und Optimierung des Modells .....	74
<b>3</b>	<b>Vergleich zwischen FDA- und TDR-Verfahren .....</b>	<b>77</b>
3.1	Einfluss der Kabellänge .....	77
3.1.1	FDA-Simulation.....	78
3.1.2	TDR-Simulation.....	82
3.1.3	Grenzen der FDA- und TDR-Simulationsmodelle .....	87
3.2	Sensitivität der Querfehlererkennung .....	90
3.2.1	FDA-Simulation.....	90
3.2.2	TDR-Simulation.....	94

3.2.3	Experimentelle Untersuchung zur Sensitivität der Fehlerdetektion....	95
3.3	Einfluss des Fehlerortes von Querfehlern.....	101
3.3.1	FDA-Simulation.....	101
3.3.2	TDR-Simulation.....	106
3.4	Einfluss einer Kabelmuffe auf FDA-Simulationen.....	107
3.5	Experimentelle Untersuchung zur Sensitivität der Fehlerlokalisierung .....	109
3.5.1	Lokalisierung von Geometrieänderungen.....	110
<b>4</b>	<b>Entwicklung einer automatisierten FDA-Technik zur Querfehlerortung.....</b>	<b>118</b>
4.1	Grundlegende Ideen des Algorithmus.....	118
4.1.1	Unterscheidung zwischen nieder- und hochohmigen Fehlern .....	118
4.1.2	Analytische Betrachtung der Entstehung der Resonanzstellen.....	121
4.1.3	Einfluss der Fehlerparameter .....	124
4.1.4	Dämpfungsperiodizität der Resonanzstellen.....	126
4.1.5	Differenzierung zwischen nahen und fernen Fehlern .....	127
4.1.6	Bestimmung der Fehlerposition .....	132
4.2	Funktionsweise des Fehlerortungsalgorithmus für Querfehler .....	133
4.2.1	Unterscheidung zwischen nieder- und hochohmig .....	134
4.2.2	Unterscheidung zwischen hochohmigen Nah- und Fernfehlern .....	137
4.2.3	Reflexionsfaktorperiodizität bei hochohmigen Fehlern.....	140
4.2.4	Dämpfungsperiodizität der Peaks bei hochohmigen Fehlern.....	143
4.2.5	Berechnung der Fehlerposition .....	146
4.3	Auswertung der Fehlerortungen für simulierte Fehlerszenarien.....	148
4.3.1	Auswirkungen des Fehlerwiderstandes und des Fehlerortes .....	148
4.3.2	Auswirkungen der Kabellänge .....	152
4.3.3	Fehlerortungen an einem simulierten HVDC Kabel .....	157
4.4	Experimentelle Untersuchungen zur Querfehlerortung .....	159
<b>5</b>	<b>Entwicklung einer automatisierten FDA-Technik zur Längsfehlerortung ...</b>	<b>162</b>
5.1	Grundlegende Ideen des Algorithmus.....	162
5.1.1	Verfahren zur Bestimmung der Fehlerposition .....	162
5.1.2	Einfluss der Fehlerparameter auf die Berechnung der Impedanzen ..	165
5.1.3	Berechnung der Fehlerposition .....	172
5.2	Funktionsweise des Fehlerortungsalgorithmus für Längsfehler .....	174
5.2.1	Ermittlung der Periodizität der Resonanzverschiebungen .....	175
5.2.2	Unterscheidung zwischen induktiven und kapazitiven Fehlern.....	175

5.2.3 Unterscheidung zwischen nahen und fernen Fehlern.....	177
5.3 Auswertung für simulierte Fehlerszenarien .....	178
5.3.1 Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Leitungsbeläge.....	178
5.3.2 Ortungsergebnisse bei längeren Kabelstrecken .....	179
5.3.3 Fehlerortungen an einem simulierten HVDC Kabel .....	181
5.4 Experimentelle Untersuchungen zur Längsfehlerortung .....	182
<b>6 Entwicklung eines online Fehlerortungsverfahrens.....</b>	<b>187</b>
6.1 Schirmströme .....	188
Transiente Schirmströme .....	188
6.2 Modellbildung und grundlegende Untersuchungen .....	190
6.2.1 Variation der Fehlerwiderstände .....	191
6.2.2 Variation der Fehlerorte .....	193
6.2.3 Variation der Erdungsmöglichkeiten .....	196
6.2.4 Diskussion der grundlegenden Untersuchungen .....	200
6.3 Transformation des Simulationsmodells auf lange Kabelstrecken .....	200
6.3.1 Simuliertes Modell .....	200
6.3.2 Einflüsse des Erdungskonzeptes und des Fehlerwiderstandes.....	201
6.3.3 Darstellung und Auswertung der Schirmströme .....	207
6.3.4 Diskussion der Ergebnisse .....	209
6.4 Simulation ultralanger Kabelstrecken.....	210
6.4.1 Simuliertes Modell .....	210
6.4.2 Auswertung der Erdungsströme .....	211
6.4.3 Auswertung der Schirmströme.....	212
6.4.4 Ortung niederohmiger Fehler.....	214
6.4.5 Ortung hochohmiger Fehler .....	218
6.4.6 Diskussion der Ergebnisse .....	222
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>223</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>228</b>
<b>Lebenslauf .....</b>	<b>238</b>