

## Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen .....	VII
Kurzfassung .....	XI
Abstract .....	XII
Übersicht .....	1
Einleitung .....	2
1 Alterungsmechanismen von Polymerisierungen für Hochspannungskabel .....	7
1.1 Grundlegender Aufbau von vernetztem Polyethylen (VPE) .....	7
1.1.1 Herstellung, Formulierung und Einsatz von VPE in Kabelanlagen .....	7
1.1.2 Kenndaten des verwendeten Modellkabels .....	15
1.2 Alterungsrelevante Faktoren und deren Wirkung auf den Isolationszustand von VPE ..	17
1.2.1 Raumladungen .....	18
1.2.2 Nanometrische Hohlraumbildung .....	20
1.2.3 Thermisch-oxidative Polymerdegradation .....	24
2 Charakterisierung und Zustandsbewertung von VPE-isolierten Kabeln .....	27
2.1 Elektrische und dielektrische Verfahren .....	27
2.1.1 Zerstörende Verfahren .....	27
2.1.1.1 Restfestigkeitsprüfung .....	28
2.1.1.2 Raumladungsmessung .....	28
2.1.2 Zerstörungsfreie Verfahren .....	30
2.1.2.1 Dielektrische Spektroskopie .....	30
2.1.2.2 Teilentladungsmessung .....	31
2.2 Nicht elektrische Verfahren .....	33
2.2.1 Positronen-Annihilations-Spektroskopie (PAS) .....	33
2.2.2 Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) .....	34
3 Experimentelle Untersuchungen und deren theoretische Grundlagen .....	36
3.1 Laboralterung von VPE-isolierten Kabeln .....	36
3.1.1 Versuchsanlagen .....	38
3.1.2 Alterungsprogramm .....	39
3.2 Bestimmung der elektrischen Anfangs- und Restfestigkeit .....	40
3.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung .....	40
3.2.2 Auswertung und Ergebnisdarstellung .....	42
3.3 Dielektrische Spektroskopie im Zeitbereich .....	44
3.3.1 Isotherme Depolarisation (ITD) .....	44
3.3.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung .....	46
3.3.1.2 Variation charakteristischer Umgebungsparameter .....	50
3.3.1.3 Auswertung und Ergebnisdarstellung .....	51
3.3.2 Thermisch stimulierte Depolarisation (TSD) .....	53
3.3.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung .....	57
3.3.2.2 Variation charakteristischer Versuchsparameter .....	60
3.3.2.3 Auswertung und Ergebnisdarstellung .....	61
3.4 Dielektrische Spektroskopie im Frequenzbereich .....	62
3.4.1 Versuchsaufbau und -durchführung .....	67
3.4.2 Auswertung und Ergebnisdarstellung .....	68
3.5 Physikalische Analyse von VPE .....	68
3.5.1 Magnetische Kernresonanz (NMR) .....	69
3.5.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung .....	73
3.5.1.2 Auswertung und Ergebnisdarstellung .....	77
3.5.2 FTIR-Spektroskopie .....	78

3.5.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung .....	81
3.5.2.2	Auswertung und Ergebnisdarstellung .....	82
3.5.3	Dichtemessung .....	85
3.5.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung .....	86
3.5.3.2	Auswertung und Ergebnisdarstellung .....	87
4	Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse .....	88
4.1	Anfangsfestigkeit des untersuchten Modellkabels .....	88
4.2	Restfestigkeitsverhalten gealterter VPE-isolierter Modellkabel .....	90
4.2.1	Einfluss der Alterungstemperatur und der -feldstärke .....	91
4.2.2	Einfluss der Alterungsdauer .....	95
4.3	Verhalten charakteristischer Kennwerte von isothermen Depolarisations- stromverläufen .....	96
4.3.1	Einfluss der Alterungstemperatur, der -feldstärke und der -dauer .....	96
4.3.2	Einfluss der Umgebungsbedingungen .....	104
4.4	Thermisch stimuliertes Depolarisationsverhalten von VPE-isolierten Kabeln .....	106
4.4.1	Einfluss der Alterungstemperatur und der -feldstärke .....	107
4.4.2	Einfluss der Alterungsdauer .....	110
4.5	Dielektrische Spektroskopie von VPE-isolierten Kabeln im Frequenzbereich .....	112
4.5.1	Einfluss der Alterungstemperatur und der -feldstärke .....	112
4.5.2	Einfluss der Alterungsdauer .....	115
4.6	Einfluss verschiedener Vorbeanspruchungen auf die physikalische Analyse von VPE .....	119
4.6.1	NMR-Untersuchungen .....	119
4.6.2	FTIR-Spektroskopien .....	122
4.6.3	Dichtemessungen .....	129
5	Wissenschaftliche Visualisierung spärlich verteilter 3D-Daten aus Untersuchungen an laborgealterten VPE-isolierten Kabeln .....	132
5.1	Flächen- und Volumendarstellung .....	132
5.1.1	Polygonale Oberflächennetze .....	133
5.1.2	Freiformflächen .....	134
5.1.3	„scattered data modelling“ .....	138
5.1.3.1	Shepard-Verfahren .....	139
5.1.3.2	Delaunay-Triangulation .....	140
5.1.3.3	Radiale Basisfunktionen (RBF) .....	144
5.1.4	Visualisierung von Volumina .....	149
5.2	Datenstruktur und Arbeitsweise des Modellierungsverfahrens .....	152
5.2.1	Einfluss frei wählbarer Gleichungsparameter auf die Genauigkeit von multivariaten Approximationen mit RBF .....	153
5.2.2	Einfluss des RBF-Typs auf die Glattheit von Flächenformulierungen spärlich verteilter Daten .....	155
5.2.3	Bestimmung von Volumendarstellungen auf der Basis von Flächenformulierungen .....	156
5.3	Anwendung des Modellierungsverfahrens am Beispiel von Versuchsdaten aus elekt- rischen Restfestigkeitsuntersuchungen .....	160
5.3.1	Experimentelle Daten bis $t_a \leq 5000$ h mit zusätzlich interpolierten Werten bis $t_a \leq 5000$ h .....	160
5.3.2	Experimentelle Daten bis $t_a \leq 8760$ h mit zusätzlich interpolierten Werten bis $t_a \leq 10$ a .....	161
	Zusammenfassung .....	164
	Schrifttum .....	170