

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen	VII
Kurzfassung	XI
Abstract	XII
Übersicht	I
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 Altersrelevante 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