

Dipl.-Ing. Ulrike Glaese, Hannover

Entwicklung eines automa- tisierten Monitoring-Systems für Hochspannungskabel

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **212**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Prüfmethoden	3
3	Monitoring	6
3.1	Definition	7
3.2	Ziele	7
3.3	Bekanntes Monitoring-Methoden	7
3.4	Monitoring-Systeme	10
4	Monitoring von bereits verlegten Kabeln	11
4.1	Alterung und Messung von Hochspannungskabeln und Probekörpern . .	11
4.1.1	Versuchsstände zur Alterung und Messung	11
4.1.1.1	Versuchsstand zur Erzeugung von Wasserbäumchen-Strukturen in Probekörpern mit quasi-homogener Feldverteilung	12
4.1.1.2	Versuchsstand zur Alterung und Messung von Kabeln	14
4.1.2	Ergebnisse der kontinuierlichen Alterung von Kabeln und Probekörpern .	15
4.1.2.1	Ergebnisse der Probekörperalterung	15
4.1.2.2	Ergebnisse der Kabelalterung	15
4.2	Kapazität und Verlustfaktor zur Bestimmung des Isolationszustandes . . .	16
4.2.1	Messung der Kapazität C und des Verlustfaktors \tan	17
4.2.1.1	Dielektrische Messungen an Probekörpern	17
4.2.1.2	Dielektrische Messungen an Kabeln	18
4.2.2	Beeinflussung der Kapazität durch Wasserbäumchen	19
4.2.2.1	Kapazitäten von Probekörpern	19
4.2.2.2	Kapazitäten laborgealterter Kabel	20
4.2.2.3	Kapazitäten betriebsgealterter Kabel	20
4.2.3	Beeinflussung des Verlustfaktors durch Wasserbäumchenwachstum	21
4.2.3.1	Verlustfaktoren von Probekörpern	21
4.2.3.2	Verlustfaktoren laborgealterter Kabel	22
4.2.3.3	Verlustfaktoren betriebsgealterter Kabel	23
4.2.4	Aussagekraft der Kapazitäts- und Verlustfaktormessungen	23
4.3	Gleichstromkomponente des Ladestroms von Kabeln zur Bestimmung von water trees in der Isolierung von VPE-Kabeln	24
4.3.1	Messung der Gleichstromkomponente I_{dc}	25
4.3.1.1	Messung der Gleichstromkomponente I_{dc} in Probekörpern	25
4.3.1.2	Messung der Gleichstromkomponente I_{dc} in Kabeln	26
4.3.2	Beeinflussung der Gleichstromkomponente durch Wasserbäumchen	28
4.3.2.1	Gleichstromkomponente in Probekörpern	28
4.3.2.2	Gleichstromkomponente in laborgealterten Kabeln	29
4.3.2.3	Gleichstromkomponente in betriebsgealterten Kabeln	31
4.3.2.4	Gleichstromkomponente bei Vor-Ort-Messungen an betriebsgealterten Kabeln	35
4.3.3	Theorie zur Entstehung der Gleichstromkomponente	36
4.3.4	Aussagekraft der Gleichstromkomponente	39

5	Wassersensoren	40
5.1	Der elektrochemische Wassersensor ISIS	41
5.1.1	Auswahl der Werkstoffe	44
5.1.1.1	Metalle für den Sensordraht	44
5.1.1.2	Wasserdurchlässige Trennschichten als Sensorumhüllung	46
5.1.1.3	Elektrolytflüssigkeiten zum Ionentransport	48
5.1.2	Meßschaltung für den ISIS-Wassersensor	50
5.1.3	Ortungsgleichungen für ISIS-Wassersensoren	51
5.1.4	Der ISIS-A-Sensor	52
5.1.4.1	Aufbau des ISIS-A-Wassersensor	52
5.1.4.2	Genauigkeit des ISIS-A	52
5.1.4.3	Wassermengen	53
5.1.5	Der ISIS-B-Sensor	54
5.1.5.1	Aufbau des ISIS-B-Sensors	55
5.1.5.2	Ortungsgenauigkeit des ISIS-B-Sensors	55
5.1.6	Der ISIS-C-Sensor	56
5.1.6.1	Aufbau ISIS-C-Sensors	57
5.1.6.2	Messungen mit dem ISIS-C-Sensor	57
5.1.6.2.1	Messungen im Prüfgefäß	57
5.1.6.2.2	Ortungsmessungen mit dem ISIS-C-Sensor im Kabel	60
5.1.6.3	Verhalten des ISIS-C-Sensors bei Vorhandensein von Wechselspannung	62
5.1.6.3	Ortungsmessungen mit dem ISIS-C-Sensor	64
5.1.7	Der ISIS-D-Sensor	66
5.1.7.1	Aufbau des ISIS-D-Sensors	66
5.1.7.2	Messungen mit dem ISIS-D-Sensor	67
5.1.7.2.1	Messungen mit dem ISIS-D-Sensor im Prüfgefäß	67
5.1.7.2.2	Messungen mit dem ISIS-D-Sensor im Kabel	68
5.1.7.3	Ortungsmessungen mit dem ISIS-D-Sensor	68
5.1.8	Vergleich der verschiedenen ISIS-Sensoren	69
5.1.9	Mechanisches und thermisches Verhalten der Kabel mit ISIS-Sensoren	69
5.1.9.1	Verhalten des ISIS-Sensors bei Kabelbiegung	69
5.1.9.2	Verhalten des ISIS-Sensors bei verschiedenen Temperaturen	69
5.2	Der ELWiS-Sensor	71
5.2.1	Meßschaltung	72
5.2.2	Ortungsgleichung für den ELWiS-Sensor	73
5.2.3	Meßaufbau	74
5.2.4	Variation verschiedener Betriebsgrößen	74
5.2.4.1	Variation von Material und Widerstandsbelag	74
5.2.4.2	Variation des Meßwiderstands R_m	76
5.2.4.3	Variation der Wassermenge	77
5.2.4.4	Variation der Spannungsart, -form und -größe	78
5.2.5	Betrachtung und Erläuterung der Versuchsergebnisse	79
5.2.6	Mechanisches und thermisches Verhalten ELWIS-Sensoren in Kabeln	86
5.2.6.1	Verhalten des ELWIS-Sensors bei Kabelbiegung	86
5.2.6.2	Verhalten des ELWIS-Sensors bei verschiedenen Temperaturen	87
5.3	Aussagekraft der Mesungen mit Wassersensoren	87
6	Monitoring bei hohen Gleichspannungen	88
6.1	Probekörperalterung mit Gleichspannung	89

6.1.1	Versuchsaufbau	89
6.1.2	Ergebnisse der Alterung von Probekörpern bei hohen Gleichspannungen	90
6.2	Gleichspannungsalterung von 12/20 kV-Kabeln	90
6.2.1	Meßaufbau	90
6.2.2	Ergebnisse der Kabelalterung bei hohen Gleichspannungen	92
6.3	Alterung von VPE bei hohen Gleichspannungen	93
7	Monitoring-System und Automatisierung	94
7.1	Modell für ein automatisiertes Kabelmonitoring-System	95
7.1.1	Beschreibung des automatisierten Meßsystemaufbaus	96
7.1.2	Filter zur Unterdrückung von Störungen im Rahmen eines automatisierten Meßsystemaufbaus	96
7.1.1	Programm 'MoniKa' für den automatisierten Meßsystemaufbau	97
7.2	Meßaufbau zur Simulation des Betriebs von langen Kabeln mit Wassersensoren und automatisierter Fehlerortung	100
7.2.1	Theoretische Vorüberlegungen	100
7.2.1.1	Herleitung der ISIS-Ortungsgleichung für Wassereinbrüche in einem dreiphasigen System	102
7.2.1.2	Herleitung der ELWiS-Ortungsgleichung für Wassereinbrüche in einem dreiphasigen System	104
7.2.1.3	In den Meßkreis induzierte Spannungen	108
7.2.1.4	Im Meßkreis auftretende kapazitive Ströme	111
7.2.1.5	Rechnergestützte Simulation der wechsellspannungsverläufe im Wassersensor	112
7.2.2	Simulationsmessungen mit dem ISIS-Sensor	116
7.2.2.1	Einphasiger Betrieb des ISIS-Wassersensors	116
7.2.2.1.1	Versuchsaufbau für den einphasigen Betrieb des ISIS-Wassersensors	116
7.2.2.1.2	Ergebnisse der Messungen mit dem einphasigen ISIS-Versuchsstand	118
7.2.2.2	Dreiphasiger Betrieb des ISIS-Wassersensors	118
7.2.2.2.1	Aufbau des dreiphasigen ISIS-Simulationsstandes	119
7.2.2.2.2	Ergebnisse der Messungen mit dem dreiphasigen ISIS-Versuchsstand	120
7.2.3	Simulationsmessungen mit dem ELWiS-Sensor	121
7.2.3.1	Einphasiger Betrieb des ELWiS-Wassersensors	121
7.2.3.1.1	Versuchsaufbau für den einphasigen Betrieb des ELWiS-Wassersensors	121
7.2.3.1.2	Ergebnisse der Messungen mit dem einphasigen ELWiS-Versuchsstand	123
7.2.3.2	Dreiphasiger Betrieb des ELWiS-Sensors	127
7.2.3.2.1	Aufbau des dreiphasigen ELWiS-Simulationsstandes	127
7.2.3.2.2	Ergebnisse der Messungen mit dem dreiphasigen ELWiS-Versuchsstand	128
7.3	Resümee Automatisierung und System	130
8	Zusammenfassung	131
8.1	Kapazität und Verlustfaktor	131
8.2	Gleichstromkomponente	132
8.3	Wassersensoren	132
8.3.1	ISIS-Wassersensor	133
8.3.2	ELWiS-Sensor	133
8.4	Hohe Gleichspannungen	134
8.5	Automatisierung und System	134
	Literatur	135