

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
1 Einleitung	3
1.1 Relevanz	4
1.2 Forschungsstand	5
1.3 Problemstellung	6
1.4 Aufbau der Arbeit	6
2 Multiphysikalische Grundlagen	9
2.1 Grundlagen des Leiterwerkstoffs Kupfer	9
2.2 Aufbau ausgewählter Leitungen	11
2.3 Korrosion von Kupfer	13
2.3.1 Elektrochemische Korrosion von Kupfer	14
2.3.2 Korrosionsarten	15
2.4 Rauheitsparameter, deren Berechnung und Bedeutung	19
2.4.1 Profilparameter	19
2.4.2 Flächenparameter	20
2.5 Hochfrequenz (HF)-Eigenschaften ausgewählter Leitungsgeometrien	22
2.5.1 Koaxialleitung	23
2.5.2 Paralleldrahtleitung	23
2.5.3 Planare Wellenleiter	24
2.6 Messung und Darstellung von Hochfrequenz (HF) Messergebnissen	27
2.6.1 Streuparameter	27
2.6.2 Darstellung von Reflexions- und Transmissionsgrößen im Smith-Diagramm	29
2.6.3 Darstellung nach Betrag und Phase	31
2.7 Skin- und Proximity-Effekt	31
2.8 Realisierung von Anpassungsgliedern im Hochfrequenzbereich	33
2.8.1 Viertelwellentransformator ($\lambda/4$ -Leiter)	34
2.8.2 Gekoppelte Transmission Lines	34
2.8.3 Baluns	35
2.8.4 Netzwerke aus konzentrierten Bauelementen	35
3 Stand der Technik in der Schadensanalyse	37
3.1 Kategorisierung von Leitungsmesstechnik	37

3.2	Begriffsdefinition	38
3.3	Etablierte Verfahren und Abgrenzung zum Kabelmonitoring-System	39
3.3.1	Distributed Acoustic Sensing (DAS)	40
3.3.2	Frequenzbereichsreflektometrie (FDR)	40
3.3.3	Leitungsresonanzanalyse (LIRA)	41
3.3.4	Murray Loop Testing	41
3.3.5	TanDelta-Messung	41
3.3.6	Teilentladungsmessung	42
3.3.7	Zeitbereichsreflektometrie (TDR)	42
3.4	Experimentelle Verfahren in der Erforschung	42
3.4.1	Kabelmikrofonie	42
3.4.2	Wechselwirkungen zwischen Skineffekt und Rauheit	43
3.4.3	Modellierung inhomogener Schäden an Leitungen	45
3.4.4	Konzeptionierung eines In-situ-Kabelradars	45
3.4.5	Time-Frequency Domain Reflectometry (TFDR)	46
3.4.6	Broadband Powerline	46
3.4.7	Phase Noise on fretted RF connectors	46
3.4.8	Multiphysikalische Betrachtung von Kabeln und Leitungen	47
3.4.9	Übersicht bestehender Ansätze	49
4	Ziel der Arbeit & Methodischer Ansatz	51
4.1	Parameterraum	53
4.2	Zeitlicher Ablauf	55
5	Mechanisches Alterungsverhalten dynamisch belasteter Leitungen	57
5.1	Untersuchung der relevanten Schädigungsmechanismen	57
5.2	Abgrenzung homogener und inhomogener Schäden	58
5.3	Entstehung von Rauheit durch unterschiedliche mechanische Kräfte	59
5.4	Zugrundeliegende Verschleißmechanismen	61
6	HF-Messungen an impedanzkontrollierten Leitungen über Lebensdauer	65
6.1	Vorstellung des Messaufbaus	65
6.2	Ergebnisse RG58 (Vortest)	67
6.3	Ergebnisse CLF200	69
6.3.1	Schrittweise Analyse von CLF200	71

6.3.2	Betrachtung der Rauheit	72
6.3.3	Fazit CLF200	72
6.4	Ergebnisse Hyperflex 5	73
6.4.1	Schrittweise Analyse von Hyperflex 5	74
6.4.2	Betrachtung der Rauheit	75
6.4.3	Analyse des Schirms	76
6.4.4	Fazit Hyperflex 5	78
6.5	Ergebnisse Helukat 600	79
6.5.1	Schrittweise Analyse von Helukat 600	80
6.5.2	Betrachtung der Rauheit	81
6.5.3	Fazit Helukat 600	82
6.6	Ergebnisse Helukat 600 flex	83
6.6.1	Schrittweise Analyse von Helukat 600 flex	83
6.6.2	Betrachtung der Rauheit	84
6.6.3	Fazit Helukat 600 flex	84
6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	85
7	Probenpräparation für elektrische Messungen	91
7.1	Probencasting	91
7.2	Dynamische Alterung der Proben	94
7.3	Gefügeveränderung durch Glühen	96
7.4	Erzeugung von Korrosion auf CU-Leitern	97
7.5	Übersicht der erzeugten Proben	102
8	Entwicklung Messaufbau	103
8.1	Anforderungen und Randbedingungen	103
8.2	Impedanzkontrollierte Leiteranordnung	104
8.3	Konzeptionierung der Messfassung	105
8.4	PCB Design	109
8.4.1	BauteilAuswahl	109
8.4.2	Trace Design	110
8.5	Kalibrierstrategie und -normale	112
8.6	In-situ Adapter	114
8.7	Inspektion der Lötstellen	116
8.8	Vorstellung Messaufbau	118
9	Messergebnisse, Auswertung und Diskussion	121
9.1	Verifikation des Messaufbaus	122
9.1.1	Funktionalität der Kalibrierung und Präzision	122
9.1.2	Wiederholgenauigkeit	126

9.1.3	Erprobte Optimierungen	128
9.1.4	Offene Optimierungsmöglichkeiten	129
9.2	Charakterisierung des Übertragungsverhaltens	131
9.3	Alternative Kalibrierstandards	132
9.4	Langzeitstabilität der Messwerte	133
9.5	Transmissionsdämpfung mechanisch gealterter Kupferleiter .	134
9.6	Transmissionsphase und Gruppenlaufzeit mechanisch gealterter Leiter	139
9.7	Auswertung Verlustleistung	144
10	Zusammenfassung und Ausblick	147
10.1	Zusammenfassung	147
10.2	Ausblick	148
	Literaturverzeichnis	151
	Anhang	163
A1:	Wissenschaftlicher Output	163
A2:	Mechanische Konstruktion Messfassung	167
A3:	Elektrische Konstruktion Messfassung	170
A4:	Vorlage Dokumentation Kalibrierung	176
	Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	177