

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>xix</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung .....	2
1.3 Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>7</b>
2.1 Der Leiterwerkstoff Kupfer.....	7
2.1.1 Gitterstruktur des Leiterwerkstoffs Kupfer.....	8
2.1.2 Elektrische Eigenschaften des Leiterwerkstoffs Kupfer .....	8
2.1.3 Mechanische Eigenschaften des Leiterwerkstoffs Kupfer .....	9
2.2 Faser-Kunststoff-Verbund .....	11
2.2.1 Faserverstärkte Kunststoffe .....	12
2.2.2 Naturfaserverbundwerkstoffe.....	14
2.2.3 Herstellungsverfahren .....	15
2.2.4 Versagensmechanismen von Faserverbundwerkstoffen .....	18
2.3 Hochfrequenztechnik .....	22
2.3.1 Zweitor .....	22
2.3.2 Streuparameter .....	23
2.3.3 Leitungstheorie .....	24
2.3.4 Skin- und Proximity-Effekt.....	28
2.4 Komplexwertige relative Permittivität.....	29
<b>3 Stand der Technik: Lebensdauervorhersage mittels hochfrequenter Wechselströme.....</b>	<b>33</b>
3.1 Lebensdauervorhersage von mechanisch-dynamisch belasteten Leitungen .....	33
3.1.1 Mechanisches Schädigungsverhalten von Kabeln und Leitungen .....	33
3.1.2 Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Übertragung von hochfrequenten Wechselströmen .....	38

3.1.3 Lebensdauervorhersage von mechanisch dynamisch belasteten Leitungen mittels hochfrequenter Wechselströme.....	39
3.2 Komplexwertige relative Permittivität von Naturfaserverbundwerkstoffen .....	43
3.2.1 Komplexwertige relative Permittivität von Flachsfaserverbundwerkstoffen.....	43
3.2.2 Komplexwertige relative Permittivität von weiteren Pflanzenfaserverbundwerkstoffen.....	46
3.3 Sensor technologien zur mechanischen Überwachung von Naturfaserverbundwerkstoffen .....	47
3.3.1 Akustische Sensorik.....	48
3.3.2 Faser optische Sensorik .....	49
3.3.3 Piezoelektrische Sensorik .....	50
3.3.4 Weitere Sensor technologien für Kohle- und Glasfaserverbundwerkstoffe .....	51
3.4 Der Leitungssensor im Vergleich zum Stand der Technik .....	53
<b>4 Mechanisches Schädigungsverhalten von elektrischen Leiterwerkstoffen .....</b>	<b>55</b>
4.1 Methodik zur Analyse des Schädigungsverhaltens .....	55
4.1.1 Probenauswahl für mechanische Belastungsprüfung .....	55
4.1.2 Mechanische Belastungsprüfungen für Leiterwerkstoffe....	56
4.2 Oberflächenrauheit auf Kupferleitern durch Biegebelastung.....	57
4.3 Ursächliche Faktoren für die Ausbildung von Oberflächenrauheit infolge mechanischer Beanspruchungen .....	59
4.3.1 Metallographie von mechanisch belasteten Kupferleitern .	59
4.3.2 REM-Untersuchung von mechanisch belasteten Kupferleitern .....	63
4.4 Oberflächenrauheit durch alle relevanten Belastungsarten .....	65
4.5 Ausbildung der Oberflächenrauheit und Strukturausbildung über die mechanische Lebensdauer eines Kupferleiters .....	67
4.5.1 Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der mechanischen Alterung.....	67

4.5.2 Strukturausbildung in Abhängigkeit der mechanischen Alterung.....	69
4.6 Rauheitsausbildung von Leitungen unterschiedlichen Querschnitts .....	71
4.7 Einfluss von Rekristallisation auf das Schädigungsverhalten .....	76
4.7.1 Beschreibung der harten und weichen Kupferproben .....	76
4.7.2 Modifizierte Biegeprüfung nach DIN EN 50396 zur mechanischen Alterung der Kupferproben .....	78
4.7.3 Oberflächenrauheit durch Biegebelastung.....	79
4.7.4 Metallographie der harten und weichen Kupferproben .....	81
4.8 Schädigungsverhalten ausgewählter Kupfer-, Aluminium- und Nickellegierungen.....	83
4.8.1 Kupferbasislegierungen .....	85
4.8.2 Aluminiumbasislegierungen.....	88
4.8.3 Nickelbasislegierungen.....	92
4.9 Auswahl des Leiterwerkstoffs für die Verwendung als elektromechanisches Sensorelement.....	96
4.10 Zwischenfazit in Bezug auf die Sensorentwicklung .....	100
<b>5 HF-Charakterisierung von nicht-impedanzkontrollierten Leitungen über deren mechanische Lebensdauer .....</b>	<b>103</b>
5.1 Probenauswahl der nicht-impedanzkontrollierte Leitungen .....	104
5.2 Mechanische und elektrische Prüf- und Messtechnik .....	105
5.2.1 Mehrfachbiegeanlage mit zwei Rollen .....	105
5.2.2 Netzwerkanalysator und in-situ Adapter.....	107
5.2.3 Bestimmung der Impedanz .....	108
5.2.4 Zugprüfung.....	109
5.3 Elektrische Charakterisierung der Leitungen.....	110
5.4 Betrag der Transmission $S_{21}$ .....	111
5.5 Phasengang der Transmission $S_{21}$ .....	113
5.6 Optische Analyse des Schädigungsverhaltens.....	115
5.7 Einfluss der Längung auf die Transmissionseigenschaften .....	120
5.8 Änderung der effektiven relativen Permittivität .....	123

5.9	Luftspalt an der Leiteroberfläche .....	124
5.9.1	Optischer Nachweis Luftspalt .....	124
5.9.2	Einfluss Luftspalt auf Phase.....	125
5.10	Diskussion der Messergebnisse.....	129
5.11	Zwischenfazit in Bezug auf die Sensorentwicklung .....	134
<b>6</b>	<b>Dielektrische Eigenschaften von Naturfaserverbundwerkstoffen .....</b>	<b>137</b>
6.1	Proben zur Bestimmung der Dielektrischen Eigenschaften .....	137
6.2	Elektrische Messtechnik zur Bestimmung der Permittivität.....	139
6.2.1	Messaufbau für Frequenzbereich 1 kHz bis 200 kHz .....	139
6.2.2	Messaufbau für Frequenzbereich 1 MHz bis 1 GHz .....	141
6.3	Mikrostruktur der Naturfaserverbundwerkstoffe .....	142
6.4	Messergebnisse der relativen komplexen Permittivität .....	144
6.5	Diskussion der Ergebnisse.....	148
6.6	Zwischenfazit in Bezug auf die Sensorentwicklung .....	149
<b>7</b>	<b>Lebensdauervorhersage von Naturfaserverbundwerkstoffen mittels hochfrequenter Wechselströme .....</b>	<b>151</b>
7.1	Anforderungen an Sensorintegration und Probengeometrie .....	151
7.1.1	Sensorkonfiguration zur Führung der TEM-Welle .....	152
7.1.2	Parallelität der Sensorelemente .....	152
7.1.3	Linearität der Sensorelemente .....	152
7.1.4	Impedanzanpassung an Messtechnik .....	153
7.1.5	Kontaktierung des Sensorelements.....	153
7.1.6	Geometrie des Naturfaserwerkstoff-Prüfkörpers .....	153
7.2	NFK-Probe mit integriertem Leitungssensor .....	153
7.3	Mechanische und elektrische Prüftechnik .....	155
7.3.1	3-Punkt-Biegeversuch.....	155
7.3.2	Netzwerkanalysator .....	156
7.4	Elektrische Charakterisierung der Proben.....	157
7.4.1	Bestimmung der Impedanz .....	157
7.4.2	Temperatureinfluss.....	158

7.5 Änderung der HF-Charakteristik über die mechanische Lebensdauer .....	160
7.5.1 Statischer 3-Punkt Biegeversuch zur inhomogenen Schädigung .....	160
7.5.2 Dynamischer 3-Punkt-Biegeversuch zur homogenen Schädigung .....	164
7.5.3 Variation der Ausbreitungskonstante zur Bestimmung relevanter Einflussgrößen .....	168
7.6 Analyse des Schädigungsverhaltens von Naturfaserwerkstoffen mit integriertem Leitungssensor .....	170
7.6.1 Schliffbilder .....	170
7.6.2 Durchleuchtung der Probe .....	171
7.6.3 $\mu$ CT-Untersuchung .....	172
7.6.4 Röntgenuntersuchung .....	173
7.6.5 Shearographie .....	174
7.7 Zwischenfazit in Bezug auf die Sensorentwicklung .....	176
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>179</b>
8.1 Zusammenfassung .....	179
8.2 Ausblick .....	182
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>185</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen .....</b>	<b>209</b>
<b>Anhang A: Mechanisches Schädigungsverhalten Leiterwerkstoffe</b>	<b>215</b>
A1 Kurzbeschreibung: Metallographie des Leiterwerkstoffes Cu-ETP .....	215
A2 Korngrößenbestimmung des Kupferleiters Ho7V-U .....	217
A3 Mechanische Eigenschaften des Kupferleiters Ho7V-U .....	218
A4 Mechanisches Schädigungsverhalten Kupfer-, Aluminium- und Nickellegierungen .....	219
<b>Anhang B: HF-Charakteristik nicht-impedanzkontrollierte Leitungen .....</b>	<b>229</b>
B1 Messergebnisse YDYP 2x1,5 mm <sup>2</sup> .....	229

B2 Messergebnisse OMYP 2x1,5 mm <sup>2</sup> .....	233
B3 Messergebnisse Längung YDYP 2x1,5 und OMYP 2x1,5 .....	237
B4 Messergebnisse Lautsprecherkabel 2x1,5 mm <sup>2</sup> .....	239
B5 Messergebnis OMYP 2x1,5 mit abweichender Länge .....	240
<b>Anhang C: Komplexwertige relative Permittivität von Naturfaserwerkstoffen .....</b>	<b>241</b>
C1 Proben für die Bestimmung der relativen Permittivität.....	241
C2 Messaufbau Plattenkondensator Frequenzbereich 1 kHz bis 200 kHz.....	242
C3 Validierung der Messaufbauten mittels PTFE.....	242
<b>Anhang D: Messergebnisse Leitungssensor .....</b>	<b>243</b>
D1 Messergebnisse statische Belastung Naturfaserwerkstoff.....	243
D2 Messergebnisse dynamische Belastung Naturfaserwerkstoff.....	245
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>247</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>259</b>