

Inhaltsverzeichnis

Vorwortxix

1 Einleitung..... 1

1.1 Motivation.....1

1.2 Problemstellung und Zielsetzung 2

1.3 Aufbau der Arbeit 4

2 Grundlagen.....7

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-Verbund11

2.2.1 Faserverstärkte Kunststoffe 12

2.2.2 Naturfaserverbundwerkstoffe.....14

2.2.3 Herstellungsverfahren 15

2.2.4 Versagensmechanismen von Faserverbundwerkstoffen18

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

**3 Stand der Technik: Lebensdauervorhersage mittels
hochfrequenter Wechselströme..... 33**

3.1 Lebensdauervorhersage von mechanisch-dynamisch belasteten
Leitungen33

3.1.1 Mechanisches Schädigungsverhalten von Kabeln und
Leitungen33

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 | Sensortechnologien zur mechanischen Überwachung von Naturfaserverbundwerkstoffen | 47 |
| 3.3.1 | Akustische Sensorik..... | 48 |
| 3.3.2 | Faseroptische Sensorik | 49 |
| 3.3.3 | Piezoelektrische Sensorik..... | 50 |
| 3.3.4 | Weitere Sensortechnologien für Kohle- und Glasfaserverbundwerkstoffe | 51 |
| 3.4 | Der Leitungssensor im Vergleich zum Stand der Technik | 53 |
| 4 | Mechanisches Schädigungsverhalten von elektrischen Leiterwerkstoffen | 55 |
| 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 |
| 5 | HF-Charakterisierung von nicht-impedanzkontrollierten Leitungen über deren mechanische Lebensdauer | 103 |
| 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 |
| 6 | Dielektrische Eigenschaften von Naturfaserverbundwerkstoffen | 137 |
| 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 |
| 7 | Lebensdauervorhersage von Naturfaserverbundwerkstoffen mittels hochfrequenter Wechselströme | 151 |
| 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 | μCT-Untersuchung | 172 |
| 7.6.4 | Röntgenuntersuchung | 173 |
| 7.6.5 | Shearographie | 174 |
| 7.7 | Zwischenfazit in Bezug auf die Sensorentwicklung | 176 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 179 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 179 |
| 8.2 | Ausblick | 182 |
| | Literaturverzeichnis | 185 |
| | Eigene Veröffentlichungen | 209 |
| | Anhang A: Mechanisches Schädigungsverhalten Leiterwerkstoffe | 215 |
| A1 | Kurzbeschreibung: Metallographie des Leiterwerkstoffs 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 |
| | Anhang B: HF-Charakteristik nicht-impedanzkontrollierte Leitungen | 229 |
| B1 | Messergebnisse YDyp 2x1,5 mm ² | 229 |

| | |
|--|------------|
| B2 Messergebnisse OMYP 2x1,5 mm ² | 233 |
| B3 Messergebnisse Längung YDYp 2x1,5 und OMYP 2x1,5 | 237 |
| B4 Messergebnisse Lautsprecherkabel 2x1,5 mm ² | 239 |
| B5 Messergebnis OMYP 2x1,5 mit abweichender Länge | 240 |
| Anhang C: Komplexwertige relative Permittivität von Naturfaserwerkstoffen | 241 |
| 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 |
| Anhang D: Messergebnisse Leitungssensor | 243 |
| D1 Messergebnisse statische Belastung Naturfaserwerkstoff | 243 |
| D2 Messergebnisse dynamische Belastung Naturfaserwerkstoff | 245 |
| Abbildungsverzeichnis | 247 |
| Tabellenverzeichnis | 259 |