

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Motivation der Arbeit	1
1.2	Zentrale Defizite und daraus abgeleitete Ziele der Arbeit	6
1.3	Vorgehen zur Zielerreichung	7
2	Qualitätssicherung an Carbonfaser-Rovings	9
2.1	Defekte in Carbonfasern	9
2.2	Prüf- und Messtechnik für Carbonfaser-Rovings	14
2.2.1	Genormte Offline-Prüfung	15
2.2.2	Laseroptische Messsysteme	16
2.2.3	Kameraoptische Messsysteme	18
2.3	Identifiziertes Defizit	20
3	Technische Zielsetzung	22
4	Methodische Auswahl des Prüfverfahrens	24
4.1	Definition zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP)	25
4.2	Vorauswahl geeigneter, zerstörungsfreier Prüfverfahren	26
4.3	Kurzbeschreibung geeigneter, zerstörungsfreier Prüfverfahren	29
4.3.1	Ultraschallprüfung	29
4.3.2	Wirbelstromverfahren	32
4.3.3	Radiografische Prüfverfahren	37
4.3.4	Thermografie	41
4.4	Anforderungen zur Bewertung der vorausgewählten ZfP	47
4.5	Methodische Bewertung der vorausgewählten ZfP	48
5	Funktionsprinzip des Wirbelstromverfahrens	52
5.1	Elektromagnetische Grundlagen	52
5.2	Auswertung der Impedanz	57
5.3	Einflüsse auf das Wirbelstromverfahren	61
5.3.1	Leitfähigkeit	61
5.3.2	Frequenz	61
5.3.3	Skin-Effekt	63
5.3.4	Lift-Off	66

5.3.5	Sensortyp	67
5.3.6	Spulengeometrie	70
5.3.7	Wechselwirkungen	71
5.4	Das Hochfrequenz-Wirbelstromverfahren	72
5.5	Messkette des Wirbelstromverfahrens	75
5.5.1	Aufnehmer	77
5.5.2	Anpasser	77
5.5.3	Ausgeber	79
5.6	Stand der Technik, Patentsituation und Stand der Forschung	80
5.6.1	Stand der Technik	80
5.6.2	Internationale Patentsituation	81
5.6.3	Stand der Forschung	82
5.7	Funktionsnachweis	85
6	Zwischenfazit	87
7	Entwicklung des multimodalen Sensorsystems	89
7.1	Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Messsystems	89
7.2	Versuchsaufbau	91
7.2.1	Tribologischer Prüfstand: ITA-Tribometer	91
7.2.2	Prototyp des Wirbelstromsensors	93
7.2.3	Manipulation der Faserschädigung	94
7.2.4	Adaption des Prüfstands	98
7.3	Übersicht der wichtigsten Entwicklungsschritte	103
7.4	Entwicklung einer Inline-Reinigung mittels Druckluftmodul	104
7.5	Verhinderung von Faserablagerungen mittels PTFE-Inlay	108
7.6	Kameraoptische Datenbereinigung	109
7.6.1	Datenbasis und Datenvorverarbeitung	111
7.6.2	Multiple lineare Regression	113
7.6.3	Erweiterung des Regressionsmodells um nichtlineare Terme	116
7.6.4	Bereinigung der Magnitude	117
7.6.5	Validierung bei wechselnder Schädigung	119
7.7	Fazit der Entwicklung des multimodalen Sensorsystems	120
8	Auswertung der multimodalen Messgrößen	123
8.1	Verwendete Datenbasis	125

8.1.1	Datensätze mit im Labor manipulierter Schädigung	125
8.1.2	Datensätze mit realer Schädigung auffälliger Spulen	127
8.2	Klassifizierung mittels künstlichen neuronalen Netzen	128
8.2.1	Definition und Motivation	128
8.2.2	Entwicklung eines vorwärts gerichteten neuronalen Netzes	130
8.2.3	Klassifizierung von im Labor manipulierten Schädigungsgraden	136
8.2.4	Klassifizierung von realen Schädigungsgraden	137
8.3	Cluster-Analyse über Machine Learning-Algorithmen	138
8.3.1	Definition und Motivation	138
8.3.2	Vorauswahl eines geeigneten Clustering-Algorithmus	139
8.3.3	Entwicklung eines hierarchischen Cluster-Algorithmus	142
8.3.4	Hierarchische Cluster-Analyse von im Labor manipulierten Schädigungsgraden	146
8.3.5	Hierarchische Cluster-Analyse von realen Schädigungsgraden	148
8.4	Statistische Prozesskontrolle mittels Qualitätsregelkarte	150
8.4.1	Definition und Motivation	150
8.4.2	Auslegung einer Qualitätsregelkarte	152
8.4.3	x-Qualitätsregelkarte für im Labor manipulierte Schädigungsgrade	156
8.4.4	x-Qualitätsregelkarte für reale Schädigungsgrade	156
8.5	Nutzwertanalyse der verschiedenen Auswertungsmethoden	157
8.6	Fazit	161
9	Ausbreitung von Wirbelströmen in Carbonfaser-Rovings	163
9.1	Adaption der klassischen Wirbelstromtheorie	165
9.1.1	Klassische Wirbelstromtheorie	165
9.1.2	Adaption auf Durchlaufsensoren	166
9.1.3	Adaption Werkstoffe mit anisotoper Leitfähigkeit	168
9.2	Ableitung einer Hypothese zum Einfluss der Schädigung auf die elektrische Leitfähigkeit eines Carbonfaser-Rovings	170
9.3	Überprüfung der Hypothese	172
9.3.1	Entwicklung einer Inline-Resistanzmessung	173
9.3.2	Versuchsdurchführung und -ergebnisse	175
9.3.3	Statistische Analyse	176

9.3.4	Kontrollversuche	178
9.3.5	Bewertung der Gültigkeit der Hypothese	179
9.4	Ableitung einer schematischen Darstellung zur Ausbreitung von Wirbelströmen in geschädigten CF-Rovings	179
9.5	Fazit	183
10	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	185
10.1	Carbonfaser-Hersteller	187
10.2	Carbonfaser-Verarbeiter	194
10.3	Gesamtheitliche Betrachtung	199
11	Zusammenfassung	201
12	Ausblick	205
12.1	Integration in einen textilen Veredelungsprozess	205
12.2	Bewertung anhand des Industrie 4.0-Maturity-Index	211
12.3	Adaption auf weitere Werkstoffklassen	213
13	Summary	216
14	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	220
14.1	Abbildungsverzeichnis	220
14.2	Tabellenverzeichnis	228
15	Literaturverzeichnis	230
16	Verzeichnis Studentischer Arbeiten	267
17	Anhang A: Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen	271
17.1	Abkürzungsverzeichnis	271
17.2	Formelverzeichnis – Latein	272
17.3	Formelverzeichnis – Griechisch	276
18	Anhang B: Basisdaten zur methodischen Bewertung	277
19	Anhang C: Versuchsparameter	281
20	Anhang D: Zusätzliche Informationen	285