

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Methodisches Vorgehen	7
2.1	Qualitätsmethoden	7
2.1.1	Kano-Modell	7
2.1.2	Reifegradmodelle	8
2.2	Technologiebewertung	11
2.3	Statistische Methoden	13
2.3.1	Statistische Versuchsplanung und Auswertung	13
2.3.2	Verfahren für den Fähigkeitsnachweis	17
2.3.3	Bewertung klassifizierender Bildverarbeitungssysteme	18
2.4	Digitale Bildverarbeitung	20
2.4.1	Statistische Beschreibung von Bildinformationen	20
2.4.2	Punkt- und Nachbarschaftsoperationen	20
2.4.3	Morphologische Operationen	22
2.4.4	Segmentierung und Lageerkennung	22
2.4.5	Frequenzraumfilterung mittels Fouriertransformation	23
3	Faserverbundkunststoffe	24
3.1	Verwendete Werkstoffe und Herstellungsprozesse	24
3.1.1	Einteilung der textilen Halbzeuge	24
3.1.2	Carbonfasern	25
3.1.3	UD-Gelege	27
3.1.4	Vliesstoffe	29
3.1.5	Stacks	30
3.1.6	Binderpreforms	32
3.1.7	Schalenförmige Strukturbauten	32
3.2	Stand der Technik zur Prozessanalyse	34
3.2.1	Definitionen von Merkmalen und Variabilität	34
3.2.2	Merkmale und Variabilität von textilen Halbzeugen	36
3.2.3	Einfluss von Merkmalen und Variabilität textiler Halbzeuge in den Verarbeitungsprozessen zu Bauteilen	38

3.2.4	Zusammenfassung und Fazit.....	42
4	Mess- und Prüfverfahren für Faserverbundkunststoffe	44
4.1	Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP).....	45
4.1.1	Optische Verfahren	45
4.1.2	Elektrisches Verfahren: Wirbelstromprüfung	49
4.2	Stand der Technik zur Charakterisierung und Qualitätsbewertung von Carbonfaser-Halbzeugen.....	53
4.2.1	Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren	53
4.2.2	Halbzeugspezifische Merkmale und Verfahren	55
4.2.3	Zusammenfassung und Fazit.....	58
5	Prüfkonzept zur zerstörungsfreien Halbzeugprüfung	61
5.1	Reifegradmodell für das Prüfkonzept	61
5.2	Anforderungen an das Prüfkonzept	63
5.2.1	Technologische Anforderungen	63
5.2.2	Wirtschaftliche Anforderungen.....	65
5.3	Beschreibung der Zielmerkmale	66
5.4	Auswahl der Prüfverfahren	73
5.5	Bewertungsszenarien und Zielbauteile	74
5.5.1	Bewertungsszenarien	74
5.5.2	Zielbauteile und -materialien.....	75
5.5.3	Potential-/Risikoanalyse der Szenarien	77
5.6	Prototypische Umsetzung des Prüfkonzepts	80
5.6.1	Anforderungen an die Einzelkomponenten.....	80
5.6.2	Umsetzung der modularen Prototypen-Prüfzelle.....	83
6	Technologie- und Prototypen-Entwicklung.....	85
6.1	Industriekamera	85
6.1.1	Einflussgrößenanalyse.....	86
6.1.2	Geometriemessung.....	88
6.2	Messdatenauswertung Industriekamera.....	90
6.2.1	Datenimport und Vorverarbeitung.....	90
6.2.2	Zielmerkmale	92

6.2.3	Industriekamera Software-Toolbox.....	94
6.3	Laser-Lichtschnittverfahren	96
6.3.1	Einflussgrößenanalyse.....	97
6.3.2	Vakuumfolie	97
6.3.3	Auflösung und Messdauer	102
6.3.4	Druck auf Stack, Laserabstand und Stack-Orientierung.....	104
6.4	Messdatenauswertung Laser-Lichtschnittverfahren	108
6.4.1	Datenimport und Vorverarbeitung.....	108
6.4.2	Bewertung der Messdaten-Qualität	111
6.4.3	Lokale Dicke von Stacks.....	113
6.4.4	Zielmerkmale	115
6.4.5	Laser Software-Toolbox.....	120
6.5	Bildgebendes Wirbelstromverfahren.....	122
6.5.1	Einflussgrößenanalyse.....	123
6.5.2	Sensortyp und Sensorwinkel	124
6.6	Vergleich der Prüfverfahren	132
6.6.1	Bestimmung des lokalen Flächengewichts	132
6.6.2	Kompaktierungsmessungen	135
6.6.3	Messzeitermittlung	138
6.6.4	Technologievergleich für die Serienintegration.....	142
7	Technologie- und Prototypen-Validierung.....	146
7.1	Prozessanalyse.....	146
7.1.1	Einfluss von Dickstellen in Gelege-Stacks auf das Kompaktierungsverhalten	147
7.1.2	Einfluss von Dickstellen in Vlieskomplex-Stacks auf den RTM-Prozess	151
7.1.3	Einfluss von linienförmigen Dickstellen in Gelege-Stacks auf lokale Preform-Merkmale	154
7.1.4	Einfluss von lokalen Faserverdichtungen und Gassen in Gelege-Stacks auf den Injektionsprozess	160
7.1.5	Zusammenfassung der Prozessanalyse	165
7.2	Qualitätsbewertung	166
7.2.1	Messgerätefähigkeit der Dickenmessung mittels Laser	166
7.2.2	Klassifikationsleistung der entwickelten Auswerteverfahren	175

7.2.3 Zusammenfassung der Prüfprozesseignung	179
7.3 Fazit	181
8 Wirtschaftlich-technische Umsetzungsperspektive	182
8.1 Entwicklung und Implementierung eines Bewertungsmodells.....	182
8.1.1 Methodenauswahl	183
8.1.2 Annahmen und Ablauf der Bewertung	185
8.1.3 Implementierung in Software-Tool	186
8.2 Informationen und Kennzahlen zur Bewertung.....	187
8.2.1 Betriebskosten und Fehlerkostenpotential.....	187
8.2.2 Investitionskosten	197
8.3 Bewertung der Integrationsszenarien des Prüfkonzepts	199
8.4 Konzeptanpassungen und Vorgehen zur Serienintegration	202
8.4.1 Hardware	202
8.4.2 Software und Steuerungstechnik	207
8.4.3 Kennzahlen und Datenmodell zur Produktionsdatenerfassung.	209
8.4.4 Vorgehen	213
9 Zusammenfassung	214
10 Ausblick	218
11 Summary	221
12 Outlook	225
13 Verzeichnisse	228
13.1 Abkürzungen.....	228
13.2 Abbildungen	231
13.3 Tabellen	242
14 Literatur	247
15 Betreute studentische Arbeiten.....	273

16 Anhang A: Prüfkonzept.....	276
16.1 Reifegradkriterien.....	276
16.2 Übersicht der Zielmerkmale.....	282
16.3 Ergebnisse der Nutzwertanalysen	283
16.4 Ergänzende Ergebnisse der Potential-/Risikoanalyse.....	286
16.5 Vorversuche mit ausgewählten Prüfverfahren.....	288
16.6 Materialübersicht Stack-Lagenaufbauten	292
17 Anhang B: Technologieentwicklung	293
17.1 Laser-Lichtschnittverfahren: Ergänzende Versuchsdaten und Auswertungen	293
17.2 Laser-Lichtschnittverfahren: Ergänzende Abbildungen, Auswerteparameter und Berechnungen zur Messdatenauswertung.....	297
17.3 Industriekamera: Ergänzende Abbildungen zur Messdatenauswertung	302
17.4 Bildgebendes Wirbelstromverfahren: Ergänzende Versuchsdaten und Auswertungen.....	303
17.5 Technologievergleich: Ergänzende Versuchsdaten und Berechnungen.....	308
17.6 Auszüge der Prüfanweisung der Prototypen-Prüfzelle	311
17.7 Genutzte Software zur Messdatenauswertung	313
18 Anhang C: Technologievalidierung	314
18.1 Prozessanalyse: Ergänzende Versuchsdaten, Ergebnisse und Auswertungen	314
18.2 Qualitätsbewertung: Ergänzende Versuchsdaten, Ergebnisse und Auswertungen	321