

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 Strukturbauteile.....	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 Prüfkonzpts	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: Prüfkzept.....	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