

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis  | I  |
| Abkürzungsverzeichnis   | IV |
| 1 Einleitung  | 5  |
| 1.1 Motivation  | 5  |
| 1.2 Ausgangssituation   | 6  |
| 1.3 Zielstellung der Arbeit                                     | 9  |
| 2 Stand der Technik   | 11 |
| 2.1 Fertigungstechnologien                                      | 11 |
| 2.1.1 Harzinjektions- und Imprägnierungstechnologie (Benchmark) | 12 |
| 2.1.1.1 Textile Halbzeuge                                       | 12 |
| 2.1.1.2 Preforming  | 14 |
| 2.1.1.3 Resin Transfer Moulding                                 | 16 |
| 2.1.1.4 Nasspressen   | 17 |
| 2.1.2 Fibre Placement   | 18 |
| 2.1.2.1 Dry Fibre Placement                                     | 19 |
| 2.1.2.2 Prepreg Placement                                       | 21 |
| 2.1.3 Direkte Herstellungstechnologien                          | 26 |
| 2.1.3.1 Wickeln   | 26 |
| 2.1.3.2 Pultrusion  | 28 |
| 2.1.4 Zusammenfassung   | 29 |
| 3 Prozesskonzeption für die additive CFK-Fertigung              | 31 |
| 3.1 Härtungstechnologien  | 33 |
| 3.1.1 Thermische Härtung  | 35 |
| 3.1.1.1 Konduktions- und Konvektionshärten                      | 35 |
| 3.1.1.2 Widerstands- und Induktionshärten                       | 36 |
| 3.1.1.3 Infrarot- und Mikrowellenhärten                         | 37 |
| 3.1.2 Strahlungshärtung   | 39 |
| 3.1.2.1 Elektronen- und x-Ray-Strahlhärten                      | 39 |
| 3.1.2.2 UV-Strahlhärten   | 41 |
| 3.1.3 Zusammenfassung   | 44 |
| 3.2 Materialauswahl   | 45 |
| 3.2.1 Carbonfaseroving  | 45 |
| 3.2.2 Matrixharz  | 46 |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.3 | Auswahl UV-Lampentechnik                                   | 50 |
| 4     | Versuchsprinzipien und Methodenwahl                        | 53 |
| 4.1   | Prinzipieller Versuchsaufbau                               | 53 |
| 4.2   | Auswahl der Charakterisierungsmethoden                     | 54 |
| 4.2.1 | Dynamische Differenz-Kalorimetrie                          | 55 |
| 4.2.2 | ATR-Infrarotspektroskopie                                  | 58 |
| 4.2.3 | Dynamisch-Mechanische Analyse                              | 60 |
| 4.2.4 | Thermogravimetrische Analyse                               | 63 |
| 4.2.5 | Dickenkompressionsprüfung                                  | 64 |
| 4.2.6 | Querschlifffräparation                                     | 65 |
| 5     | Reinharzuntersuchungen                                     | 66 |
| 5.1   | Prozessfenster Vortemperatur Reinharz                      | 67 |
| 5.1.1 | Exothermie Reinharz  | 68 |
| 5.1.2 | Temperaturabhängiger Aushärtegrad im Reinharz              | 69 |
| 5.2   | Prozessfenster Belichtungszeit Reinharz                    | 73 |
| 5.2.1 | Belichtungsabhängiger Reinharz Aushärtegrad                | 73 |
| 5.2.2 | Belichtungsabhängige Glasübergang im Reinharz              | 75 |
| 5.3   | Reinharzmodell nach DiBenedetto                            | 79 |
| 5.4   | Zusammenfassung  | 80 |
| 6     | Laminatuntersuchungen                                      | 81 |
| 6.1   | Vorbetrachtungen   | 82 |
| 6.1.1 | Ausgangszustand des Carbonfaserrovings                     | 82 |
| 6.1.2 | Spreizung des Carbonfaserrovings                           | 83 |
| 6.1.3 | Kalibrierung des Carbonfaserrovings                        | 84 |
| 6.2   | Versuchsvorrichtung  | 87 |
| 6.3   | Harzauftrag  | 88 |
| 6.4   | Prozessfenster Vortemperatur im Einzelschichtlaminat       | 90 |
| 6.4.1 | Absorptionseffekt  | 90 |
| 6.4.2 | Temperaturabhängiger Aushärtegrad im Einzelschicht-Laminat | 91 |
| 6.5   | Prozessfenster Belichtungszeit im Einzelschichtlaminat     | 94 |

---

|                            |  |     |
|----------------------------|--|-----|
| 6.5.1                      | Belichtungsabhängiger Aushärtegrad im Einzelschichtlaminat | 94  |
| 6.5.2                      | Belichtungsabhängige Glasübergang im Einzelschichtlaminat  | 96  |
| 6.6                        | Einzelschichtlaminatmodell nach DiBenedetto                | 99  |
| 6.7                        | Zusammenfassung  | 100 |
| 6.8                        | Prozessfenster Mehrschichtlaminat                          | 101 |
| 6.8.1                      | Lichtmikroskopische Aufnahmen                              | 101 |
| 6.8.2                      | REM-Aufnahmen  | 103 |
| 7                          | Monitoring   | 104 |
| 7.1                        | Messprinzip  | 105 |
| 7.2                        | Versuchsanordnung  | 106 |
| 7.3                        | Härtungsverlauf  | 108 |
| 8                          | Business Case  | 112 |
| 8.1                        | Herstellkosten   | 112 |
| 8.2                        | Abschätzung des Investitionsaufwands                       | 114 |
| 9                          | Zusammenfassung und Ausblick                               | 117 |
| 9.1                        | Zusammenfassung  | 117 |
| 9.2                        | Ausblick   | 120 |
| Anhang                     |  | 121 |
| Abbildungsverzeichnis      |  | 125 |
| Tabellenverzeichnis        |  | 131 |
| Literaturverzeichnis       |  | 132 |
| Danksagung                 |  | 148 |
| Wissenschaftliche Arbeiten |  | 149 |