

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Ausgangssituation und Motivation .....   | 1         |
| 1.2      | Analyse der Aufgabenstellung .....   | 3         |
| 1.3      | Gliederung der Arbeit.....   | 6         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Technik und Forschung</b>   | <b>8</b>  |
| 2.1      | Faserverstärkte Kunststoffe .....  | 8         |
| 2.1.1    | Matrixsysteme und Fasermaterialien .....                                       | 8         |
| 2.1.2    | Textile Halbzeuge und Fertigungstechnologien .....                             | 9         |
| 2.1.3    | Resin Transfer Molding .....   | 10        |
| 2.2      | Trennmittel.....   | 13        |
| 2.2.1    | Trennmittel auf Werkzeugen und deren Reinigung.....                            | 15        |
| 2.2.2    | Folien in der Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen .....              | 16        |
| 2.2.3    | Vorbehandlung von FVK-Oberflächen für das Lackieren .....                      | 20        |
| 2.3      | Plasmaoberflächentechnik .....   | 21        |
| 2.3.1    | Plasmazustand.....   | 21        |
| 2.3.2    | Plasmapolymerisationsprozess .....   | 21        |
| 2.3.3    | Niederdruckplasma.....   | 22        |
| 2.4      | Beschichtungssysteme .....   | 24        |
| 2.4.1    | Beschichtung von faserverstärkten Kunststoffen .....                           | 26        |
| 2.5      | Haftung.....   | 28        |
| 2.5.1    | Definition der Haft- und Verbundfestigkeit .....                               | 28        |
| 2.5.2    | Adhäsionstheorien.....   | 29        |
| 2.6      | Dichtungslösungen für Trennfolien im RTM Prozess .....                         | 34        |
| 2.6.1    | Dichtungsrahmen mit Dichtungsschnüren .....                                    | 34        |
| 2.6.2    | Automatisierungsgrad für Fertigungsprozesse.....                               | 34        |
| <b>3</b> | <b>Versuchsbeschreibung</b>  | <b>36</b> |
| 3.1      | Plasmareaktor und die durchgeführten Plasmabeschichtungen.....                 | 36        |
| 3.2      | Verwendete Trägerfolien und Lacke .....  | 40        |
| 3.3      | Verfahren zur Charakterisierung von Oberflächen .....                          | 42        |
| 3.3.1    | Oberflächenenergie mittels Kontaktwinkelmessung .....                          | 42        |
| 3.3.2    | Oberflächenspannung mit Wilhelmy-Plattenmethode und polarer Anteil.....        | 43        |
| 3.3.3    | Reflektometrische Interferenzspektroskopie .....                               | 44        |
| 3.3.4    | Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) .....                                | 44        |
| 3.3.5    | Messung der OH-Gruppendichte durch Dibutylzinndilaurat .....                   | 45        |
| 3.3.6    | Lichtmikroskop .....   | 46        |
| 3.3.7    | Rasterelektronenmikroskop (REM).....   | 46        |
| 3.3.8    | Bildbearbeitung und -auswertung der REM Aufnahmen .....                        | 47        |
| 3.3.9    | Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) .....                                 | 47        |
| 3.3.10   | Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX).....                                    | 47        |
| 3.3.11   | Profilometer.....  | 48        |
| 3.4      | Prüfverfahren zur Quantifizierung der Verbundfestigkeit und Schichtdicke ..... | 48        |
| 3.4.1    | Gitterschnittprüfung nach DIN 2409.....  | 48        |
| 3.4.2    | Abreißversuch nach DIN 4624.....   | 49        |
| 3.4.3    | Schälversuch nach DIN 8510-2 und DIN 29862 .....                               | 50        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.4.4    | Zugversuch nach DIN 527 .....  | 51         |
| 3.4.5    | Schichtdicke bei biaxialer Dehnung .....   | 54         |
| 3.5      | Versuchsstand zur Bestimmung der Schichtdicke von definiert gedehnten Folien .....   | 56         |
| 3.6      | Bestimmung der Druckänderung durch strukturierte Folien .....                        | 56         |
| 3.7      | Methoden zur Charakterisierung von Dichtungslösungen .....                           | 58         |
| 3.7.1    | Leckage und externe Anpresskraft .....   | 59         |
| 3.7.2    | Haltekraft .....   | 60         |
| 3.7.3    | Anforderungen an die Automatisierung der Dichtungslösung .....                       | 61         |
| <b>4</b> | <b>Charakterisierung von Lacktransferfolien in der FVK Produktion</b> .....          | <b>62</b>  |
| 4.1      | Chemische Zusammensetzung der plasmapolymere Beschichtung .....                      | 62         |
| 4.2      | Mechanisches Verhalten des Folie-Lack-Verbunds bei Dehnung .....                     | 64         |
| 4.3      | Einfluss der Querkontraktion auf die Schichtdickenänderung des Lacks .....           | 70         |
| 4.3.1    | Uniaxialer Dehnungszustand .....   | 70         |
| 4.3.2    | Biaxialer Dehnungszustand .....  | 71         |
| 4.4      | Druckänderung durch strukturierte Folien .....                                       | 75         |
| 4.5      | Übertragbarkeit von Strukturen auf die Lackoberfläche .....                          | 77         |
| <b>5</b> | <b>Automatisierbare Dichtungslösung zur Applikation von Lacktransferfolien</b> ..... | <b>79</b>  |
| 5.1      | Untersuchung der Einflussparameter auf die externe Anpresskraft .....                | 79         |
| 5.2      | Untersuchung der Einflussparameter auf die Haltekraft .....                          | 80         |
| 5.3      | Untersuchung der Einflussparameter auf die Dichtigkeit .....                         | 81         |
| 5.4      | Automatisierungsgrad des Dichtungsrahmens .....                                      | 83         |
| <b>6</b> | <b>Grenzfläche zwischen Lack und Plasmabeschichtung</b> .....                        | <b>84</b>  |
| 6.1      | Einfluss der Gasverhältnisse bei der Plasmabeschichtung auf die Schälkräfte .....    | 84         |
| 6.2      | Bruch plasmapolymere Beschichtungen auf Trägerfolien .....                           | 92         |
| 6.3      | Übertrag der plasmapolymere Beschichtung beim Abziehen der Folie .....               | 94         |
| 6.4      | Überlackierbarkeit von RTM Bauteilen .....   | 97         |
| 6.5      | Einfluss der Dehnung auf die Verbundfestigkeit .....                                 | 102        |
| <b>7</b> | <b>Modell für den Mechanismus des gedehnten Lacktransferprozesses</b> .....          | <b>103</b> |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung</b> .....   | <b>106</b> |
| <b>9</b> | <b>Ausblick</b> .....  | <b>110</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b> .....  | <b>112</b> |
|          | <b>Anhang</b> .....  | <b>126</b> |
| <b>A</b> | <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....   | <b>128</b> |
| <b>B</b> | <b>Tabellenverzeichnis</b> .....   | <b>132</b> |
| <b>C</b> | <b>CAD Zeichnungen</b> .....   | <b>133</b> |
| <b>D</b> | <b>Programmcode zur Auswertung der Rissbilder</b> .....                              | <b>137</b> |
| <b>E</b> | <b>Schichtzusammensetzung aus XPS Untersuchung</b> .....                             | <b>139</b> |
| <b>F</b> | <b>Durchmesser der O-Ringe</b> .....   | <b>140</b> |
| <b>G</b> | <b>Rissbilder der plasmapolymere Beschichtung unter Dehnung</b> .....                | <b>141</b> |