

Fraunhofer-Institut  
für Chemische Technologie ICT

Philipp Rosenberg

Entwicklung einer RTM  
Prozessvariante zur kavitätsdruck-  
geregelten Herstellung von  
Faserverbundstrukturbauteilen

Wissenschaftliche Schriftenreihe  
des Fraunhofer ICT  
Band 85

FRAUNHOFER VERLAG

# Inhaltsverzeichnis

|   |            |
|---|------------|
| <b>Kurzfassung .....</b>  | <b>I</b>   |
| <b>Abstract.....</b>  | <b>II</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis.....</b>  | <b>III</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>   | <b>V</b>   |
| <b>Formelzeichen.....</b>   | <b>VI</b>  |
| <b>1 Einleitung.....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Ausgangssituation .....   | 2          |
| 1.2 Motivation .....  | 3          |
| 1.3 Zielsetzung.....  | 4          |
| <b>2 Stand der Technik und Forschung.....</b>   | <b>5</b>   |
| 2.1 Die RTM-Prozesskette .....  | 5          |
| 2.1.1 Preforming .....  | 6          |
| 2.1.2 Der Hochdruck-RTM Prozess.....  | 7          |
| 2.1.3 Faser- und Matrixmaterialien für das Resin Transfer Molding.....                | 9          |
| 2.1.4 Sandwichstrukturen im RTM Verfahren.....  | 10         |
| 2.2 Anlagentechnik für den Hochdruck Resin Transfer Molding Prozess .....             | 11         |
| 2.2.1 Mischen und Dosieren der Matrix beim Resin Transfer Molding Verfahren.....      | 11         |
| 2.2.2 Pressentechnik für den Resin Transfer Molding Prozess .....                     | 12         |
| 2.2.3 Hochdruck-RTM Werkzeugtechnik und -merkmale.....                                | 12         |
| 2.3 Die Harzinjektion im RTM Verfahren .....  | 14         |
| 2.3.1 Bestimmung von Porosität und Faservolumengehalt flächiger Textilhalbzeuge ..... | 14         |
| 2.3.2 Zum Kavitätsdruckverlauf bei der Injektion .....                                | 15         |
| 2.3.3 Der Kavitätsdruck bei Kompression und Aushärten .....                           | 16         |
| <b>3 Anlagentechnik und Versuchswerkstoffe .....</b>                                  | <b>17</b>  |
| 3.1 Anlagentechnik .....  | 17         |
| 3.2 Auswahl der Versuchswerkstoffe.....   | 21         |
| 3.3 Ermittlung der Laminatkenngößen .....   | 23         |
| <b>4 Methodische Prozessentwicklung .....</b>   | <b>24</b>  |
| 4.1 Prozessanalyse.....   | 25         |
| 4.1.1 Analyse des Injektionsschrittes .....   | 25         |
| 4.1.2 Analyse des Kavitätsdrucks nach der Injektion.....                              | 27         |
| 4.2 Charakterisierung der Versuchswerkstoffe .....                                    | 29         |
| 4.2.1 Bestimmung der Permeabilität der Lagenaufbauten .....                           | 29         |
| 4.2.2 Kompaktierung der Textilhalbzeuge, Faserklemmung und Harzdichtung.....          | 32         |
| 4.2.3 Prozessnahe Messung der Harzviskosität.....                                     | 38         |
| 4.3 Einstellungsmerkmale des HP-RTM-Plattenwerkzeugs.....                             | 40         |
| 4.4 Versuchsaufbau und Vorgehensweise bei den Prozessuntersuchungen .....             | 42         |
| 4.5 Untersuchung des Vakuumschrittes.....   | 45         |
| 4.6 Untersuchung der HP-IRTM Variante .....   | 49         |
| 4.6.1 Einfluss der Presskraft auf den Kavitätsdruck bei der HP-IRTM Variante.....     | 49         |
| 4.6.2 Beeinflussung des Kavitätsdrucks durch die Presskraft nach der Injektion .....  | 56         |
| 4.6.3 Einfluss der Werkzeugeinstellung auf den Druckverlauf bei der Injektion.....    | 58         |
| 4.6.4 Variation der Harzmenge .....   | 60         |
| 4.6.5 Variation des Massenstroms bei der Harzinjektion.....                           | 62         |
| 4.6.6 Temperatur- und Viskositätsverlauf bei der Harzinjektion .....                  | 66         |
| 4.6.7 Simulative Abschätzung druckrelevanter Parameter beim HP-IRTM .....             | 71         |
| 4.7 Untersuchung der HP-CRTM Variante .....   | 74         |
| 4.7.1 Einfluss des Werkzeugspaltes auf den Kavitätsdruck bei der Injektion .....      | 74         |
| 4.7.2 Einfluss der Kompressionszeit auf den Kavitätsdruckverlauf.....                 | 78         |
| 4.8 Prozessentwicklung.....   | 80         |
| 4.8.1 Definition des Prozessablaufs .....   | 81         |
| 4.8.2 Sensorik und Regelung .....   | 83         |
| 4.8.3 Entwicklung und Verknüpfung der Teilprozessschritte .....                       | 84         |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>5</b> | <b>Prozessvalidierung .....</b>   | <b>88</b>  |
| 5.1      | Prozessvalidierung auf Plattenebene .....                                   | 88         |
| 5.1.1    | Validierung der Pressure-Controlled Injection RTM Variante .....            | 91         |
| 5.1.2    | Validierung der Pressure-Controlled Compression RTM Variante.....           | 94         |
| 5.1.3    | Diskussion der Validierungsversuche auf Plattenebene .....                  | 97         |
| 5.2      | Prozessvalidierung an einer komplexen Bauteilstruktur .....                 | 104        |
| 5.2.1    | Beschreibung des Bauteils, der Materialien und des Preformherstellung ..... | 104        |
| 5.2.2    | RTM-Werkzeug und Versuchseinstellungen .....                                | 107        |
| 5.2.3    | Versuchsplanung und Ergebnisse.....   | 109        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>                                    | <b>122</b> |
|          | <b>Literaturangaben .....</b>   | <b>127</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>  | <b>133</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis .....</b>  | <b>137</b> |
|          | <b>Anhang .....</b>   | <b>138</b> |
|          | <b>Lebenslauf.....</b>  | <b>146</b> |