

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Zusammenfassung .....                                                                 | 10 |
| Abbildungsverzeichnis .....                                                           | 12 |
| Tabellenverzeichnis .....                                                             | 16 |
| Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen .....                                         | 17 |
| 1 Einleitung .....                                                                    | 19 |
| 1.1 Ausgangssituation .....                                                           | 19 |
| 1.2 Anlass für das Forschungsvorhaben .....                                           | 20 |
| 2 Stand der Wissenschaft und Technik .....                                            | 22 |
| 2.1 Thermoplastische Verbundwerkstoffe .....                                          | 22 |
| 2.1.1 Thermoplastische Prepregs .....                                                 | 22 |
| 2.1.2 Kurzfaserverstärkte Thermoplaste .....                                          | 23 |
| 2.2 Kombinationsverfahren zur Herstellung von Thermoplast-Verbundstrukturen .....     | 23 |
| 2.2.1 Spritzgießen .....                                                              | 25 |
| 2.2.2 Thermoformen .....                                                              | 26 |
| 2.2.3 Herausforderungen des einstufigen Prozessablaufs .....                          | 28 |
| 2.3 Simulationsmethoden für Hinterspritzverfahren .....                               | 29 |
| 2.3.1 Integrierte Simulationsansätze .....                                            | 29 |
| 2.4 Modellierung der Verbundfestigkeit thermoplastischer Kunststoffverbindungen ..... | 30 |
| 2.4.1 Autohäsionsmodelle .....                                                        | 30 |
| 2.4.2 Kontaktmodelle .....                                                            | 32 |
| 2.4.3 Verbundfestigkeitsmodelle .....                                                 | 35 |
| 2.5 Verbundfestigkeitsprüfung .....                                                   | 36 |
| 2.5.1 Prüfmethode zur Festigkeitsermittlung thermoplastischer Verbindungen .....      | 36 |
| 2.5.2 Hinterspritzte Prüfkörper und Prüfmethode .....                                 | 37 |
| 2.6 Fazit zum Stand der Technik .....                                                 | 40 |
| 3 Forschungsziel und Vorgehensweise .....                                             | 41 |
| 3.1 Forschungsziel .....                                                              | 41 |
| 3.1.1 Forschungsergebnisse .....                                                      | 42 |
| 3.1.2 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse .....                              | 43 |
| 3.2 Methodischer Ansatz zur Erreichung des Forschungsziels .....                      | 43 |
| 4 Materialien und Prüfmethode .....                                                   | 45 |
| 4.1 Organobleche .....                                                                | 45 |
| 4.2 Spritzgießgranulate .....                                                         | 46 |

---

|       |                                                                       |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3   | Materialcharakterisierung .....                                       | 47  |
| 4.3.1 | Zugversuche .....                                                     | 47  |
| 4.3.2 | Scherrahmenversuch .....                                              | 52  |
| 4.3.3 | Rheologische Eigenschaften .....                                      | 56  |
| 4.3.4 | Thermische Eigenschaften .....                                        | 57  |
| 4.4   | Herstellung von Verbundprüfkörpern .....                              | 60  |
| 4.4.1 | Versuchseinrichtung .....                                             | 60  |
| 4.4.2 | Rippenprüfkörper .....                                                | 61  |
| 4.4.3 | Zugscherprüfkörper .....                                              | 64  |
| 4.5   | Verbundprüfung .....                                                  | 65  |
| 4.5.1 | Probenvorbereitung .....                                              | 65  |
| 4.5.2 | Normalzugprüfung .....                                                | 65  |
| 4.5.3 | Zugscherprüfung .....                                                 | 69  |
| 5     | Numerische Prozesssimulation .....                                    | 71  |
| 5.1   | Spritzgießsimulation .....                                            | 71  |
| 5.1.1 | Rippenprüfkörper .....                                                | 71  |
| 5.1.2 | Technologiedemonstrator .....                                         | 72  |
| 5.2   | Thermoformsimulation .....                                            | 74  |
| 6     | Modellierung der Verbundfestigkeit für Hinterspritzprozesse .....     | 78  |
| 6.1   | Modellierungsansatz .....                                             | 78  |
| 6.2   | Kontaktmodell .....                                                   | 79  |
| 6.3   | Autohäsionsmodell .....                                               | 81  |
| 6.4   | Verbundfestigkeitsmodell .....                                        | 83  |
| 6.5   | Numerische Implementierung .....                                      | 84  |
| 7     | Modellbasierte Verbundfestigkeitsvorhersage auf Prüfkörperebene ..... | 87  |
| 7.1   | Grenzflächenanalyse .....                                             | 87  |
| 7.2   | Prozesssimulation und Grenzflächendaten .....                         | 89  |
| 7.3   | Validierung am Rippenprüfkörper .....                                 | 95  |
| 8     | Untersuchungen am Technologiedemonstrator .....                       | 97  |
| 8.1   | Demonstrator- und Werkzeugentwicklung .....                           | 97  |
| 8.2   | Fertigung .....                                                       | 99  |
| 8.3   | Grenzflächenanalyse .....                                             | 100 |
| 8.4   | Verbundfestigkeitsanalyse .....                                       | 102 |
| 8.5   | Integrierte Prozesssimulation .....                                   | 105 |
| 8.5.1 | Fluid-Struktur-Interaktion .....                                      | 105 |
| 8.5.2 | Thermoformsimulation .....                                            | 106 |

---

|       |                                                                                          |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.5.3 | Superpositionierte Fluidflusssimulation.....                                             | 109 |
| 8.6   | Validierung am Technologiedemonstrator .....                                             | 114 |
| 9     | Ergebnisse und Ausblick.....                                                             | 118 |
| 9.1   | Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse<br>für KMU ..... | 119 |
| 10    | Literatur.....                                                                           | 121 |