

## Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Danksagung.....</b>   | <b>i</b>    |
| <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>Formelzeichen.....</b>  | <b>viii</b> |
| <b>Kurzfassung.....</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>Abstract .....</b>  | <b>xv</b>   |
| <b>1 Einleitung .....</b>  | <b>1</b>    |
| <b>2 Stand der Technik .....</b>   | <b>3</b>    |
| 2.1 Einteilung von Verbundwerkstoffen .....  | 3           |
| 2.1.1 Einteilung von Verbundwerkstoffen nach der Werkstoffklasse der Matrix-<br>komponente ..... | 3           |
| 2.1.2 Einteilung von Verbundwerkstoffen nach Art der Verstärkungskomponente .....                | 5           |
| 2.2 Spezifische Eigenschaften von Verbundwerkstoffen.....  | 8           |
| 2.2.1 Wirkmechanismen zur Steigerung der Festigkeit.....   | 8           |
| 2.2.2 Wirkmechanismen zur Steigerung der Bruchzähigkeit .....                                    | 10          |
| 2.2.3 Rule of Mixture .....  | 11          |
| 2.3 Methoden zur Charakterisierung von Verbundwerkstoffen.....                                   | 12          |
| 2.3.1 Bestimmung der Dichte .....  | 12          |
| 2.3.2 Bestimmung des E-Moduls .....  | 12          |
| 2.3.3 Bestimmung der Biegefestigkeit .....   | 13          |
| 2.3.4 Bestimmung der Verschleißbeständigkeit .....   | 14          |
| 2.3.5 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität.....  | 14          |
| 2.3.6 Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten .....                                  | 15          |
| 2.4 Konventionelle Herstellung von MKD .....   | 15          |
| 2.4.1 Herstellung von offenporigen Strukturen .....  | 15          |
| 2.4.2 Herstellung des Verbundes.....   | 17          |
| 2.4.3 Defizite konventioneller Herstellungsverfahren von MKD .....                               | 19          |
| 2.5 Formgebung im teilflüssigen Zustand.....   | 22          |
| 2.5.1 Mechanismus der Thixotropie .....  | 22          |
| 2.5.2 Eigenschaften der Aluminiumlegierung A356 .....  | 23          |
| 2.5.3 Verfahrensablauf der Formgebung im teilflüssigen Zustand .....                             | 26          |
| 2.5.4 Verwendete Anlagentechnik.....   | 29          |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.6      | Grundlagen der numerischen Modellierung des Infiltrationsprozesses.....  | 30        |
| 2.6.1    | Materialmodell und numerische Modellierung des Fließverhaltens teilflüssiger Legierungen.....                          | 30        |
| 2.6.2    | Infiltrationswiderstandsmodelle für poröse Medien.....   | 34        |
| 2.7      | Fazit aus dem Stand der Technik .....  | 36        |
| <b>3</b> | <b>Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit .....</b>   | <b>39</b> |
| 3.1      | Motivation der Arbeit .....  | 39        |
| 3.2      | Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise .....  | 41        |
| <b>4</b> | <b>Charakterisierung der Komponenten des Metall-Keramik-Durchdringungsverbundwerkstoffes.....</b>                      | <b>43</b> |
| 4.1      | Eigenschaften der metallischen Komponente .....  | 43        |
| 4.2      | Eigenschaften der keramischen Komponente .....   | 44        |
| 4.2.1    | Chemische Zusammensetzung der Keramik $Al_2O_3$ .....  | 45        |
| 4.2.2    | Morphologie der keramischen Komponente .....   | 46        |
| 4.2.3    | Physikalische und mechanische Eigenschaften der keramischen Komponente....   | 50        |
| 4.3      | Benetzungsverhalten der Aluminiumlegierung A356 auf Aluminiumoxidoberflächen.  | 50        |
| 4.4      | Grenzflächenreaktionen zwischen der infiltrierenden Aluminiumlegierung und Aluminiumoxid.....                          | 51        |
| <b>5</b> | <b>Entwicklung eines numerischen Infiltrationswiderstandsmodells.....</b>  | <b>54</b> |
| 5.1      | Simulationsmodell für die Formgebung im teilflüssigen Zustand.....   | 54        |
| 5.2      | Numerische Modellierung des Infiltrationsvorgangs .....  | 56        |
| 5.2.1    | Modellierung des Fließverhaltens der Aluminiumlegierung A356.....  | 56        |
| 5.2.2    | Modellierung der offenporigen Struktur .....   | 57        |
| 5.3      | Experimenteller Versuchsablauf zur Validierung und Kalibrierung des Infiltrationsvorgangs.....                         | 64        |
| 5.4      | Evaluierung des Infiltrationswiderstandsmodells .....  | 67        |
| 5.4.1    | Bewertung der Modellierungsmöglichkeiten .....   | 67        |
| 5.4.2    | Validierung anhand experimenteller Untersuchungen .....  | 70        |
| 5.5      | Kalibrierung des Infiltrationswiderstandsmodells .....   | 73        |
| <b>6</b> | <b>Entwicklung eines Formgebungsprozesses zur Herstellung von Metall-Keramik-Durchdringungsverbundwerkstoffen.....</b> | <b>79</b> |
| 6.1      | Auslegung der Probenkörpergeometrie .....  | 79        |
| 6.2      | Untersuchte Prozessparameter.....  | 80        |
| 6.3      | Grenzwerte der Zielgrößen .....  | 81        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.4      | Numerische Betrachtung des Formgebungsprozesses .....   | 84         |
| 6.4.1    | Numerische Berechnung der Infiltration der offenporigen Struktur .....                          | 84         |
| 6.4.2    | Bewertung der numerischen Versuchsergebnisse .....  | 85         |
| 6.5      | Experimentelle Betrachtung des Formgebungsprozesses .....                                       | 102        |
| 6.5.1    | Entwicklung des Versuchswerkzeuges.....   | 102        |
| 6.5.2    | Experimenteller Versuchsablauf.....   | 105        |
| 6.5.3    | Bewertung der experimentellen Versuchsergebnisse .....  | 106        |
| 6.6      | Bewertung der Versuchsergebnisse .....  | 117        |
| 6.6.1    | Formfüllung der MKD.....  | 117        |
| 6.6.2    | Restporosität der MKD.....  | 118        |
| 6.6.3    | Beschädigung der keramischen Komponente.....  | 119        |
| 6.7      | Festlegen eines Prozessfensters und Handlungsanweisungen zur Herstellung von MKD .....          | 119        |
| <b>7</b> | <b>Charakterisierung des hergestellten Metall-Keramik-Durchdringungsverbundwerkstoffes.....</b> | <b>121</b> |
| 7.1      | Mechanische Eigenschaften des MKD .....   | 121        |
| 7.1.1    | Dichte des MKD .....  | 121        |
| 7.1.2    | E-Modul des MKD .....   | 122        |
| 7.1.3    | Biegefesteitigkeit des MKD .....  | 122        |
| 7.1.4    | Verschleißbeständigkeit des MKD .....   | 124        |
| 7.2      | Versagensverhalten des MKD infolge mechanischer Beanspruchung .....                             | 125        |
| 7.2.1    | Fraktographische Beurteilung.....   | 126        |
| 7.2.2    | Verschleißbild.....   | 127        |
| 7.3      | Thermophysikalische Eigenschaften des MKD .....   | 128        |
| 7.3.1    | Spezifische Wärmekapazität des MKD .....  | 128        |
| 7.3.2    | Thermischer Ausdehnungskoeffizient des MKD .....  | 129        |
| 7.4      | Eigenschaftsprofil der hergestellten MKD und dessen Vorhersagemöglichkeiten.....                | 129        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>  | <b>131</b> |
| 8.1      | Zusammenfassung.....  | 131        |
| 8.2      | Ausblick und weiterer Handlungsbedarf.....  | 134        |
| <b>9</b> | <b>Anhang .....</b>   | <b>136</b> |
| 9.1      | Vollfaktorielle Versuchsmatrix .....  | 136        |
| 9.2      | Berechnung der geometrischen Größen für das Infiltrationswiderstandsmodell .....                | 139        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 9.3       | Berechnung der porösen Eigenschaften.....                       | 140        |
| 9.4       | Berechnung der Größen der Infiltrationswiderstandsmodelle ..... | 141        |
| 9.5       | Numerische Versuchsergebnisse .....                             | 143        |
| 9.6       | Experimentelle Versuchsergebnisse .....                         | 144        |
| <b>10</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                               | <b>145</b> |
|           | <b>Curriculum Vitae .....</b>                                   | <b>153</b> |