

## Inhaltsverzeichnis

---

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Symbol- und Abkürzungsverzeichnis                                        | v  |
| 1 Einleitung und Zielstellung der Arbeit                                 | 1  |
| 2 Literaturübersicht und Stand der Technik                               | 3  |
| 2.1 Besonderheiten zellularer Strukturen . . . . .                       | 3  |
| 2.1.1 Verfahren zur Herstellung abgeformter, offenzelliger Schaumkeramik | 3  |
| 2.1.2 Verarbeitung wässriger Suspensionen . . . . .                      | 5  |
| 2.1.3 Fließverhalten keramischer Suspensionen . . . . .                  | 7  |
| 2.1.4 Zusammenhang der Einflussgrößen im Bezug zur Schaumkeramik         | 8  |
| 2.1.5 Kenngrößen von Schaumkeramik . . . . .                             | 9  |
| 2.1.6 Modelle zur Beschreibung der Schaumstruktur . . . . .              | 13 |
| 2.1.7 Mechanische Eigenschaften keramischer Schäume . . . . .            | 18 |
| 2.2 Hochtemperaturwerkstoffe . . . . .                                   | 26 |
| 2.2.1 Materialien für Hochtemperaturanwendungen . . . . .                | 26 |
| 2.2.2 Siliciumcarbid . . . . .                                           | 30 |
| 2.2.3 Materialverhalten von SiC bei hohen Temperaturen . . . . .         | 37 |
| 2.2.4 Modelle zur Lebensdauervorhersage . . . . .                        | 53 |
| 2.3 Der Porenbrenner . . . . .                                           | 55 |
| 2.3.1 Vorbemerkungen . . . . .                                           | 55 |
| 2.3.2 Flammenausbildung und -stabilisierung . . . . .                    | 55 |
| 2.3.3 Verringerung von Schadstoffemissionen . . . . .                    | 56 |
| 2.3.4 Betriebsverhalten von Porenbrennern . . . . .                      | 57 |
| 2.3.5 Arten und Anwendung von Porenbrennern . . . . .                    | 58 |
| 3 Experimentelles Vorgehen                                               | 59 |
| 3.1 Probenpräparation . . . . .                                          | 60 |
| 3.1.1 Materialauswahl . . . . .                                          | 60 |
| 3.1.2 Probenherstellung . . . . .                                        | 60 |
| 3.1.3 Sonderverfahren . . . . .                                          | 62 |
| 3.2 Materialentwicklung . . . . .                                        | 63 |
| 3.3 Materialuntersuchung . . . . .                                       | 64 |
| 3.3.1 Auslagerung in ruhender Luftatmosphäre . . . . .                   | 65 |

|       |                                                                                                           |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.2 | Untersuchung im Brennerprüfstand „Marathon“ . . . . .                                                     | 66  |
| 3.3.3 | Untersuchung im Heißgasprüfstand . . . . .                                                                | 69  |
| 3.3.4 | Untersuchung im Rohrofenprüfstand . . . . .                                                               | 70  |
| 3.4   | Analysemethoden . . . . .                                                                                 | 72  |
| 3.4.1 | Überwachung der Auslagerungsversuche . . . . .                                                            | 72  |
| 3.4.2 | Abgasuntersuchung . . . . .                                                                               | 73  |
| 3.4.3 | Optische Analyseverfahren . . . . .                                                                       | 73  |
| 3.4.4 | Computertomographie . . . . .                                                                             | 75  |
| 3.4.5 | Röntgenographische und chemische Analyse . . . . .                                                        | 76  |
| 3.4.6 | Partikelgrößenanalyse, Zeta-Potentialmessung und Quecksilberporosimetrie . . . . .                        | 76  |
| 3.4.7 | Festigkeitsuntersuchung . . . . .                                                                         | 77  |
| 4     | Ergebnisdarstellung und Diskussion                                                                        | 79  |
| 4.1   | Oberflächencharakterisierung . . . . .                                                                    | 79  |
| 4.1.1 | Neues Strukturmodell für die Abschätzung der äußeren und inneren Oberfläche keramischer Schäume . . . . . | 79  |
| 4.1.2 | Vergleich zu bekannten Modellen aus der Literatur . . . . .                                               | 82  |
| 4.2   | Gefügeoptimierung bei <i>SSiC</i> -Schaumkeramik . . . . .                                                | 86  |
| 4.2.1 | Übersicht zu den durchgeföhrten Variationen . . . . .                                                     | 86  |
| 4.2.2 | Maßnahmen zur Absenkung der Gefügeporosität . . . . .                                                     | 88  |
| 4.2.3 | Alternative Herstellungsverfahren und Probengeometrien . . . . .                                          | 95  |
| 4.2.4 | Maßnahmen zur Verbesserung der mechanischen Stabilität der <i>SSiC</i> -Schaumkeramik . . . . .           | 100 |
| 4.2.5 | Kurzzusammenfassung zur Gefügeoptimierung . . . . .                                                       | 102 |
| 4.3   | Ergebnisse der Auslagerungsuntersuchungen in trockener Luftatmosphäre                                     | 103 |
| 4.3.1 | Bedeutung der Primäroxidschichtbildung . . . . .                                                          | 103 |
| 4.3.2 | Temperaturabhängigkeit der Oxidationsrate . . . . .                                                       | 105 |
| 4.3.3 | Einfluss von Verunreinigungen . . . . .                                                                   | 108 |
| 4.3.4 | Gestalt der Oxidschicht . . . . .                                                                         | 109 |
| 4.3.5 | Einfluss der Gefügeporosität auf das Oxidationsverhalten . . . . .                                        | 111 |
| 4.3.6 | Resümee der Oxidationsuntersuchungen in trockener Luftatmosphäre                                          | 114 |
| 4.4   | Ergebnisse des Brennerprüfstands „Marathon“ . . . . .                                                     | 115 |
| 4.4.1 | Temperaturverteilung im Reaktor . . . . .                                                                 | 115 |
| 4.4.2 | Ableitung der Belastungsbedingungen im Brennerprüfstand . . . . .                                         | 117 |
| 4.4.3 | Makroskopische Beurteilung des Probenzustands . . . . .                                                   | 118 |
| 4.4.4 | Die Auswirkung des Brennereinsatzes auf das Gefüge . . . . .                                              | 120 |
| 4.4.5 | Masseänderung der Porenkörper während des Brennereinsatzes . . . . .                                      | 122 |
| 4.4.6 | Berechnete Oxidationsraten für Porenbrennerbedingungen . . . . .                                          | 125 |
| 4.4.7 | Defektausbildung innerhalb der Brennerschäume . . . . .                                                   | 130 |
| 4.4.8 | Resümee der Oxidationsuntersuchungen im Brennerprüfstand . . . . .                                        | 133 |

|       |                                                                                          |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5   | Einsatz von Schaumkeramik bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten . . . . .                 | 134 |
| 4.6   | Degradationsuntersuchungen im Rohrofenprüfstand . . . . .                                | 135 |
| 4.6.1 | Oxidationsverhalten in simulierter Porenbrennerumgebung . . . . .                        | 136 |
| 4.6.2 | Materialveränderungen während des Einsatzes . . . . .                                    | 138 |
| 4.6.3 | Bewertung der Festigkeitsdegradation . . . . .                                           | 140 |
| 4.6.4 | Resümee der Untersuchungen im Rohrofenprüfstand . . . . .                                | 143 |
| 4.7   | Umgebungsabhängiges Oxidationsverhalten von <i>SSiC</i> -Schaumkeramik .                 | 143 |
| 4.8   | Lebensdauerabschätzung . . . . .                                                         | 145 |
| 5     | Zusammenfassung                                                                          | 153 |
|       | Literaturverzeichnis                                                                     | 159 |
|       | Abbildungsverzeichnis                                                                    | 177 |
|       | Tabellenverzeichnis                                                                      | 185 |
| A     | Anhang                                                                                   | 189 |
| A.1   | Einfluss der Porosität auf das mechanische Verhalten . . . . .                           | 189 |
| A.2   | Herleitung des Innenkugel-Hohlsteg-Modells . . . . .                                     | 190 |
| A.2.1 | Steglängenberechnung über das Äquivalenzvolumen und die Querschnittsfläche . . . . .     | 190 |
| A.2.2 | Steglängenberechnung über eine Innenkugel . . . . .                                      | 191 |
| A.2.3 | Das IKHS-Modell . . . . .                                                                | 192 |
| A.3   | Zusammensetzung von Brenn- und Rauchgas . . . . .                                        | 194 |
| A.3.1 | Zusammensetzung der eingesetzten Gase . . . . .                                          | 194 |
| A.3.2 | Verbrennungsreaktionen . . . . .                                                         | 195 |
| A.3.3 | Berechnung der Partialdrücke im Brenngas . . . . .                                       | 195 |
| A.4   | Kontrollmessung der Ofentemperaturen . . . . .                                           | 196 |
| A.5   | Übersicht aller durchgeführten Auslagerungsversuche in ruhender Luftatmosphäre . . . . . | 197 |
| A.6   | Übersicht aller durchgeführten Brennerversuche im Langzeitprüfstand „Marathon“ . . . . . | 200 |
| A.7   | Darstellung der Temperaturverteilung im Brennerprüfstand „Marathon“                      | 205 |
| A.8   | Übersicht aller durchgeführten Versuche im Rohrofenprüfstand . . . . .                   | 206 |
| A.9   | Tabellenübersichten und zusätzliche Erläuterungen . . . . .                              | 210 |