

Dipl.-Ing. Roland Jakel, Bremen

**Ein Beitrag zur Berechnung
und konstruktiven
Gestaltung keramischer
Bauteile, angewendet am
Beispiel eines keramischen
Heißgasventilatorrades**

Reihe **1**: Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente

Nr. **280**

HLuHB Darmstadt



13732817

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Inhaltsverzeichnis | V |
| Verzeichnis der verwendeten Symbole | VIII |
| 1. Einführung und Zielsetzung | 1 |
| 2. Festigkeitsstreuung und Größeneinfluß | 4 |
| 2.1 Elementare Beschreibung mittels der Weibull-Verteilung | 4 |
| 2.1.1 Weibull-Verteilung für einachsige Beanspruchung | 4 |
| 2.1.2 Normieren des Weibullintegrals – Spannungsdichtefunktion | 10 |
| 2.1.3 Effektiv beanspruchtes Volumen | 12 |
| 2.1.4 Parameterbestimmung und statistische Auswertung | 13 |
| 2.2 Probleme bei der Extrapolation auf andere Bauteilvolumen | 18 |
| 3. Globale Beschreibung des keramischen Mehrachsigsigkeitsverhaltens | 20 |
| 3.1 Mehrachsigsigkeitshypothesen nach dem PIA-Modell | 20 |
| 3.1.1 Barnett-Freudenthal-Approximation | 21 |
| 3.1.2 Weibull-Stanley-Theorie | 24 |
| 3.1.3 Hypothese der positiven Hauptdehnungen nach Beierlein | 26 |
| 3.1.4 Vergleich der Hypothesen nach dem PIA-Modell für konkrete Lastfälle | 30 |
| 3.2 Mehrachsigsigkeitshypothese nach Weibull | 32 |
| 4. Lokale Beschreibung des keramischen Mehrachsigsigkeitsverhaltens | 37 |
| 4.1 Bruchmechanische Betrachtungsweise | 37 |
| 4.1.1 Einführung in das bruchmechanische Versagensmodell | 37 |
| 4.1.2 Vergleich bruchmechanischer Mehrachsigsigkeitskriterien | 44 |
| 4.1.2.1 Modus I-Kriterium | 44 |
| 4.1.2.2 Kriterium der komplanaren Energiefreisetzungsrates | 45 |
| 4.1.2.3 Empirische Kriterien | 49 |
| 4.2 Weitere lokale Fehlermodelle | 55 |
| 4.2.1 Porenmodelle | 55 |
| 4.2.2 Elliptisches Fehlermodell | 58 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5. | Diskussion der Mehrachsigkeitshypothesen und -kriterien | 60 |
| 5.1 | Probleme bei der Verifizierung von Mehrachsigkeitshypothesen | 60 |
| 5.2 | Bewertung der vorgestellten globalen und lokalen Kriterien | 65 |
| 5.3 | Hinweise für die Anwendung der gängigsten Mehrachsigkeitshypothesen | 67 |
| 5.4 | Anregungen zur Entwicklung einer neuen Mehrachsigkeitshypothese | 70 |
| | | |
| 6. | Berücksichtigung des Zeiteinflusses der Belastung | 73 |
| 6.1 | Phänomenologisch-statistisches Modell nach Nadler | 73 |
| 6.2 | Bruchmechanisches Modell des unterkritischen Rißwachstums | 79 |
| 6.3 | Vergleich von phänomenologischem und bruchmechanischem Modell | 86 |
| | | |
| 7. | Entwicklung eines Computerprogramms zur numerischen Ausfallwahrscheinlichkeitsberechnung keramischer Bauteile | 89 |
| 7.1 | Festlegung von Programmstruktur und Programmfähigkeiten | 89 |
| 7.2 | Verknüpfung der Weibullstatistik mit der Methode der Finiten Elemente | 93 |
| 7.3 | Einbinden der Mehrachsigkeitshypothesen | 96 |
| 7.4 | Einbinden des Lebensdauermodells | 99 |
| 7.5 | Weitere anwendungsorientierte Merkmale des Programms | 99 |
| 7.6 | Zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten | 102 |
| | | |
| 8. | Konstruktive Gestaltung keramischer Bauteile | 104 |
| 8.1 | Konstruktionsprinzipien für Keramik – monolithisch oder modular? | 104 |
| 8.2 | Druck- oder Zugbeanspruchungen? | 109 |
| 8.3 | Elementare Ähnlichkeitsgesetze für keramische Bauteile | 110 |
| 8.4 | Gestaltungsrichtlinien | 112 |

| | |
|---|------------|
| 9. Konstruktive Gestaltung und Berechnung am Beispiel eines vollkeramischen SiSiC-Heißgasradialventilators | 117 |
| 9.1 Stand der Technik bei Heißgasventilatoren | 117 |
| 9.2 Werkstoffauswahl und Charakterisierung | 118 |
| 9.3 Konstruktive Gestaltung des Laufrades | 120 |
| 9.4 Gestaltung einer Welle-Nabe-Verbindung für den Hochtemperatureinsatz | 125 |
| 9.5 Herstellung des Lüfterrades | 127 |
| 9.6 Experimentelle Erfassung des Oberflächeneinflusses | 129 |
| 9.6.1 Bearbeitungs-, Temperatur- und Oxidationseinfluß | 129 |
| 9.6.1.1 Versuchsanlagen und Versuchsdurchführung | 131 |
| 9.6.1.2 Versuchsergebnisse | 132 |
| 9.6.2 Weitere Festigkeitsuntersuchungen | 137 |
| 9.6.2.1 Oberflächenbearbeitungsalternativen | 140 |
| 9.6.2.2 Ermüdungsverhalten des Lüfterradwerkstoffes | 142 |
| 9.6.2.3 Mehrachsigsigkeitsverhalten des Lüfterradwerkstoffes | 144 |
| 9.6.3 Schlußfolgerungen aus den Festigkeitsversuchen | 146 |
| 9.7 Wahrscheinlichkeitstheoretische Auslegung des Laufrades | 147 |
| 9.7.1 Reine Fliehkraftbeanspruchung | 148 |
| 9.7.2 Stationärer Betrieb mit thermischer Beanspruchung | 151 |
| 9.7.3 Instationärer Betrieb: Thermoschock | 153 |
| 9.8 Anmerkungen zur Qualitätssicherung | 155 |
| 9.9 Durchgeführte Versuche mit dem Heißgasventilator | 156 |
| 10. Zusammenfassung | 159 |
| Anhang | 161 |
| A1. Bruchspannungstabellen der durchgeführten Versuche | 161 |
| A2. Literatur- und Quellenverzeichnis | 163 |