

FORTSCHRITT-
BERICHTE

VDI

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**

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 Mehrachslichkeitshypothesen und -kriterien	60
5.1	Probleme bei der Verifizierung von Mehrachslichkeitshypothesen	60
5.2	Bewertung der vorgestellten globalen und lokalen Kriterien	65
5.3	Hinweise für die Anwendung der gängigsten Mehrachslichkeitshypothesen	67
5.4	Anregungen zur Entwicklung einer neuen Mehrachslichkeitshypothese	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 Mehrachslichkeitshypothesen	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	Mehrachsigkeitsverhalten 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