

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Zusammenfassung	II
Symbolverzeichnis	VI
<b>1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Warmespannungen</b>	<b>2</b>
2.1.1 Ursachen für Warmespannungen	2
2.1.2 Wärmeleitung	3
2.1.3 Thermisch-elastische Grundgleichungen	4
<b>2.2 Feuerfeste Werkstoffe unter Spannung</b>	<b>7</b>
2.2.1 Festigkeitsverhalten feuerfester Materialien	7
2.2.2 Bruchmechanik	7
2.2.2.1 <i>Linear elastische Bruchmechanik (LlBM)</i>	8
2.2.2.2 <i>Nichtlineare Bruchmechanik</i>	14
2.2.3 Schädigungsprozesse	17
2.2.3.1 <i>Diffuse Mikronissbildung</i>	18
2.2.3.2 <i>Rissausbreitung</i>	19
<b>3 THERMOSCHOCKEXPERIMENTE UND DEREN BEURTEILUNGSKRITERIEN</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Genormte Prüfverfahren zur Bestimmung der TWB feuerfester Werkstoffe</b>	<b>21</b>
3.1.1 DIN EN 993-11 Prüfverfahren für dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse – Bestimmung der Temperaturwechselbeständigkeit	21
3.1.2 DIN 51068 Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe – Bestimmung des Widerstandes gegen schroffen Temperaturwechsel – Wasserabschreckverfahren für feuerfeste Steine	22
3.1.3 ASTM Standards	22
<b>3.2 Spezielle und ungenormte Prüfverfahren zur Bestimmung der TWB feuerfester Werkstoffe</b>	<b>23</b>

...

<b>3 3</b>	<b>Beurteilungskriterien zum Thermoschockverhalten feuerfester Werkstoffe</b>	<b>26</b>
3 3 1	Schädigungsparameter	27
3 3 2	Schadenstoleranzparameter	28
<b>4</b>	<b>MODELLIERUNG DER WARMESPANNUNG</b>	<b>34</b>
<b>4 1</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>34</b>
<b>4 2</b>	<b>Losung des Warmespannungsproblems</b>	<b>35</b>
4 2 1	Instantane Wärmeleitung	36
4 2 1 1	Körper mit hohem Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit zum Wärmeübergangskoeffizienten	36
4 2 1 2	Körper mit niedrigem Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit zum Wärmeübergangskoeffizienten	38
4 2 1 3	Körper mit nicht vernachlässigbarem Wärmeübergangswiderstand	39
4 2 1 4	Monotone Aufheizung der Körperoberfläche	43
4 2 2	Warmespannungsfeld	43
4 2 2 1	Dünne Viereckplatte von gleichmäßiger Dicke	44
4 2 2 2	Rechtwinkliges Prisma / Stein	46
<b>4 3</b>	<b>Vorhersagefähigkeit des Modells</b>	<b>47</b>
4 3 1	Berechnung des Temperatur- und Warmespannungsfeldes	47
4 3 2	Verfeinerte Berechnung der Thermoschockgutewerte	48
4 3 2 1	Schädigungsparameter	48
4 3 2 2	Schadenstoleranzparameter	52
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTELLER AUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG</b>	<b>54</b>
<b>5 1</b>	<b>Thermoschockversuchsanlage</b>	<b>54</b>
5 1 1	Bestimmung der Temperaturverteilung	56
5 1 2	Probengeometrie	56
<b>5 2</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>57</b>
<b>5 3</b>	<b>Untersuchte Materialien</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION</b>	<b>60</b>
<b>6 1</b>	<b>Thermoschockversuche</b>	<b>60</b>
6 1 1	Instantane Temperaturfelder	60
6 1 2	Warmespannungsrechnung	62
6 1 3	Schädigung des Probekörpers	66

6 1 3 1	<i>Visuelle Beobachtung</i>	66
6 1 3 2	<i>Messung der Ultraschalllaufzeit</i>	67
6 1 3 3	<i>Korrelation zwischen der beobachteten Schädigung des Probekörpers und den berechneten Wärmespannungen</i>	69
<b>6 2</b>	<b>Modellierung</b>	<b>71</b>
6 2 1	Einfluss der materialspezifischen Kennwerte und der Thermoschockbedingungen	73
6 2 2	Überprüfung der Vorhersagefähigkeit des Modells	75
6 2 2 1	<i>Übereinstimmung zwischen der ermittelten Temperaturverteilung und der aus dem Modell errechneten Temperaturverteilung</i>	76
6 2 2 2	<i>Experimentelle Überprüfung der vorläufig berechneten Thermoschockquoten</i>	79
6 2 2 3	<i>Vorläufig berechnete Thermoschockquoten für die industrielle Anwendung</i>	81
6 2 3	Anpassung des Modells zur Beurteilung der DIN 51068 Norm (Wasserabschreckverfahren für feuerfeste Steine)	83
6 2 3 1	<i>Temperaturverteilung in einer Platte – Überlagerung zweier halbunendlicher Körper</i>	84
6 2 3 2	<i>Temperaturverteilung in einem Zylinder und einer Kugel</i>	87
<b>7</b>	<b>KURZFASSUNG</b>	<b>92</b>
7 1	Modellierung	92
7 2	Thermoschockexperiment	95
7 3	Ergebnisse	96
7 4	Schlussfolgerungen	97
<b>8</b>	<b>ANHANG</b>	<b>99</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>103</b>