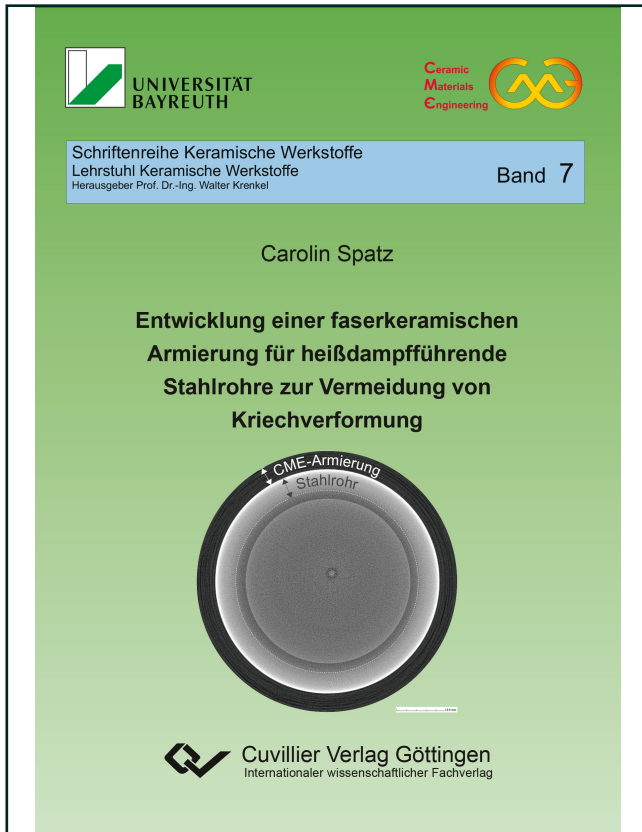




Carolin Spatz (Autor)

# Entwicklung einer faserkeramischen Armierung für heißdampfführende Stahlrohre zur Vermeidung von Kriechverformung



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7113>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>x</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xii</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>Danksagung</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>3</b>
1.1 Konzept des Metall-Keramik-Hybridrohrs . . . . .	3
1.2 Zielsetzung . . . . .	5
1.3 Vorgehensweise . . . . .	5
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1 Kraftwerkstechnik . . . . .	7
2.1.1 Fossilbefeuerte Kraftwerke . . . . .	7
2.1.2 Stahl-Werkstoffe in der Kraftwerkstechnik . . . . .	8
2.2 Metall-Keramik-Verbunde . . . . .	10
2.3 Keramische Verbundwerkstoffe . . . . .	13
2.3.1 Eigenschaften . . . . .	13
2.3.2 Herstellungsverfahren . . . . .	16
2.3.2.1 Gasphaseninfiltration . . . . .	16
2.3.2.2 Flüssigsilicierung . . . . .	17
2.3.2.3 Sinterprozess . . . . .	18
2.3.2.4 Polymerinfiltrations-Verfahren . . . . .	19
2.3.3 Siliciumorganische Polymere und daraus abgeleitete Keramiken . . . . .	19
2.3.3.1 Polysiloxane . . . . .	21
2.3.3.2 Pyrolyse . . . . .	22
2.3.3.3 Mikrostruktur der abgeleiteten SiCO-Keramiken . . . . .	23
2.3.3.4 Füllstoffe . . . . .	24
2.3.3.5 Composite . . . . .	25
2.4 Matrixwerkstoffe basierend auf natürlich vorkommenden Oxiden . . . . .	26
2.4.1 Keramische Gießmassen, Feuerfest-Werkstoffe . . . . .	26
2.4.2 Geopolymere . . . . .	27
2.5 Finite Element Analyse . . . . .	29
2.5.1 Geschichte der Finite Elemente Analyse . . . . .	29
2.5.2 Verfahren der Finiten Element Analyse . . . . .	30



<b>3</b>	<b>Verwendete Methoden und Werkstoffe</b>	<b>32</b>
3.1	Finite Element Analyse . . . . .	32
3.1.1	Finite-Element-Modell . . . . .	32
3.1.2	Kennwerte der Simulationen . . . . .	34
3.1.3	Analytische Kontrolle . . . . .	36
3.2	Verwendete Materialien . . . . .	36
3.2.1	Fasern . . . . .	36
3.2.1.1	Aluminiumoxid- und Mullitfasern . . . . .	37
3.2.1.2	Quarzglas-Fasern . . . . .	39
3.2.1.3	Kohlenstoff-Fasern . . . . .	39
3.2.2	Matrixwerkstoffe . . . . .	41
3.2.2.1	Keramische Gießmassen . . . . .	41
3.2.2.2	Geopolymere . . . . .	41
3.2.2.3	Si-Polymere (Polysiloxane) . . . . .	42
3.3	Probenherstellung . . . . .	43
3.3.1	Warmpressen . . . . .	43
3.3.2	Faserwickelverfahren . . . . .	45
3.3.2.1	Dornwickelmaschine . . . . .	45
3.3.2.2	CADWIND . . . . .	45
3.3.2.3	Wickeln . . . . .	45
3.3.2.4	Vernetzung . . . . .	46
3.3.3	Pyrolyse . . . . .	47
3.4	Analytik . . . . .	48
3.4.1	Thermogravimetrie (gekoppelt mit Massenspektrometrie) . . . . .	48
3.4.2	Elementaranalyse . . . . .	49
3.4.3	Helium-Pyknometrie . . . . .	50
3.4.4	Dilatometrie . . . . .	51
3.5	Mechanische Prüfung . . . . .	52
3.5.1	Einzelfaserzugversuch . . . . .	52
3.5.2	Bend Stress Relaxation Test . . . . .	53
3.5.3	Biegeversuche zur Ermittlung der Biege- und Schubfestigkeiten . . . . .	53
3.5.4	Zugversuch . . . . .	54
3.5.5	Berstversuch . . . . .	55
3.6	Mechanisch-thermischer Test der Metall-Keramik-Hybridrohre . . . . .	55
3.7	Computer-Tomographie . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>58</b>
4.1	Konzeptionelle Auslegung mittels Finite Elemente Analyse . . . . .	58
4.1.1	Unarmiertes Stahlrohr . . . . .	58
4.1.2	Metall-Keramik-Hybridrohr mit identischen Wandstärken des Stahlrohrs und der CMC-Armierung . . . . .	59
4.1.3	Metall-Keramik-Hybridrohr mit variierender Wandstärke der CMC-Armierung . . . . .	60
4.1.4	Metall-Keramik-Hybridrohr mit variierenden Werkstoffkennwerten der CMC-Armierung . . . . .	62
4.1.5	Metall-Keramik-Hybridrohr mit variierender Spaltbreite zwischen Stahlrohr und CMC-Armierung . . . . .	65
4.1.6	Diskussion der FEM-Simulationen . . . . .	66



4.2	Faseruntersuchungen . . . . .	68
4.2.1	Thermogravimetrische Analysen . . . . .	68
4.2.2	Einzelfaserzugversuche . . . . .	69
4.2.3	Untersuchung der Kriechbeständigkeit – Bend Stress Relaxation Test . . . . .	71
4.2.4	Diskussion der Faser-Untersuchungen . . . . .	72
4.3	Ergebnisse der Matrixuntersuchungen . . . . .	72
4.3.1	Geopolymere und keramische Gussmassen . . . . .	73
4.3.1.1	Thermogravimetrische Analysen . . . . .	73
4.3.1.2	Elementaranalyse . . . . .	74
4.3.1.3	Diskussion der Geopolymere und keramischen Gießmassen . . . . .	75
4.3.2	Polysiloxane . . . . .	76
4.3.2.1	Elementaranalyse . . . . .	76
4.3.2.2	Thermogravimetrische Analyse der Siloxane . . . . .	78
4.3.2.3	Oxidationsbeständigkeit von inert pyrolysierten Siloxanen . . . . .	82
4.3.2.4	Füllstoffzugabe zu Silres® H62 C . . . . .	83
4.3.2.5	Lineare Ausdehnung . . . . .	85
4.3.2.6	Diskussion der Siloxanmatrix-Untersuchungen . . . . .	86
4.4	Entwicklung der CMC-Werkstoffe basierend auf Polysiloxan-Matrices . . . . .	87
4.4.1	Thermische Vorbehandlung der ausgewählten Verstärkungsfasern . . . . .	88
4.4.2	Einfluss des Wickelwinkels auf die Festigkeit von oxidkeramischen Rohrkörpern . . . . .	90
4.4.3	Variation der Atmosphäre während der Pyrolyse . . . . .	92
4.4.4	Diskussion der oxidkeramischen Verbundwerkstoffe . . . . .	94
4.5	Metall-Keramik-Hybridrohre . . . . .	98
4.5.1	Herstellung der Metall-Keramik-Hybridrohre . . . . .	98
4.5.2	Thermomechanische Prüfung des Metall-Keramik-Hybridrohrs 1 . . . . .	99
4.5.3	Thermomechanische Prüfung des Metall-Keramik-Hybridrohrs 2 . . . . .	100
4.5.4	Diskussion der thermomechanischen Prüfungen . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>103</b>
<b>6</b>	<b>Conclusion and Outlook</b>	<b>106</b>
	<b>Anhang</b>	<b>109</b>
A	Quellcode der FEM-Berechnungen . . . . .	109
B	Berechnung der Füllstoff-Anteile . . . . .	128
C	Berechnung des optimalen Wickelwinkels . . . . .	132
D	Berechnung der Umfangsspannung im Berstversuch . . . . .	134
E	Einzelfaserdurchmesser der Einzelfaserzugversuche . . . . .	135
F	CT-Aufnahmen des Metall-Keramik-Hybridrohres 1 . . . . .	136
	<b>Literatur</b>	<b>137</b>
	<b>Eigene wissenschaftliche Veröffentlichungen</b>	<b>147</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>149</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>151</b>