

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Beton als Zahnradwerkstoff .....</b>	<b>3</b>
2.1	Stand der Forschung/Technik .....	3
2.1.1	Klassifizierung von Beton / Normative Regelung.....	3
2.1.2	Ultrahochleistungsbeton .....	4
2.1.3	Einsatz von Beton außerhalb des Bauwesens .....	4
2.1.4	Zahnräder .....	9
2.1.4.1	Zahnradarten und Zahnradgetriebe .....	9
2.1.4.2	Flankenprofile von Stirnrädern .....	10
2.1.4.3	Tragfähigkeit von geradverzahnten Stirnrädern .....	11
2.1.4.4	Fertigungsverfahren von Zahnrädern.....	18
2.2	Anforderungen an Zahnradwerkstoffe .....	18
2.3	Bewertung von Beton hinsichtlich der Eignung als Zahnradwerkstoff .....	21
2.3.1	Tragfähigkeit.....	21
2.3.2	Gewicht/Masse .....	22
2.3.3	Maßhaltigkeit .....	22
2.3.4	Homogenität und Luftporengehalt.....	25
2.3.5	Oberflächenbeschaffenheit .....	25
2.4	Fazit.....	26
<b>3</b>	<b>Voruntersuchungen zu UHPC/RPC .....</b>	<b>29</b>
3.1	Festlegung der Ausgangsmischungen für die Voruntersuchungen .....	29
3.2	Einfluss der thermischen Behandlung auf die Betonfestigkeiten.....	31
3.3	Einfluss unterschiedlicher Fasern auf die Betonfestigkeiten .....	32
3.4	Einfluss des Mischers auf die Betonfestigkeiten .....	37
3.5	Einfluss einer Vakuumbehandlung auf die Betonfestigkeiten.....	39
3.6	Fazit .....	41
<b>4</b>	<b>Entwicklung geeigneter Mischungszusammensetzungen.....</b>	<b>43</b>
4.1	Einfluss unterschiedlicher Zuschläge auf die Druck-, Biegezug- und Verschleißfestigkeit .....	43
4.2	Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICCs .....	46
4.3	Fazit .....	50

<b>5</b>	<b>Charakterisierung wichtiger Werkstoffkennwerte ausgewählter Mischungszusammensetzungen</b>	<b>51</b>
5.1	Festlegung der zu charakterisierenden Mischungszusammensetzungen	51
5.2	Versuchsübersicht	52
5.3	Mischungsherstellung	54
5.4	Frischbetoneigenschaften	55
5.4.1	Frischbetonrohdichte	55
5.4.2	Ausbreitmaß	55
5.4.3	Luftporengehalt	55
5.4.4	Frischbetontemperatur und Hydratationswärmeentwicklung	56
5.5	Festbetoneigenschaften	58
5.5.1	Festbetonrohdichte	58
5.5.2	Druckfestigkeit	59
5.5.3	Drucktragverhalten	61
5.5.4	Elastizitätsmodul	63
5.5.5	Dynamischer Elastizitätsmodul (Resonanzfrequenzmethode)	63
5.5.6	Biegezugfestigkeit	65
5.5.7	Zugfestigkeit, Zugtragverhalten und Zug-E-Modul	66
5.5.8	Spaltzugfestigkeit	70
5.5.9	Kleinlasthärte (Vickershärte)	70
5.5.10	Schwindmaß/Dimensionsstabilität	72
5.5.11	Wärmeausdehnung	76
5.5.12	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität	78
5.5.13	Verschleißfestigkeit nach Böhme	79
5.5.14	Porengrößenverteilung und Porosität	81
5.5.15	Wassereindringversuche	84
5.5.16	Frost-Tausalz-Widerstand/CDF-Test	84
5.5.17	Schmierstoffbeständigkeit	89
5.5.18	Säurebeständigkeit	92
5.5.19	Dämpfung	94
5.6	Zusammenfassung und Fazit	96
<b>6</b>	<b>Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für Zahnräder aus UHPC</b>	<b>99</b>
6.1	Herstellungsverfahren - Voruntersuchungen	99
6.1.1	Trennende Fertigung	99
6.1.2	Urformende Fertigung	101
6.1.3	Fazit	104

6.2	Form- und Schalungsbau .....	105
6.2.1	Welle-Nabe-Verbindung (WNV) .....	105
6.2.2	Berücksichtigung des Schwindens des Betons .....	107
6.2.3	Oberflächenrauheit .....	108
6.3	Prototypbau.....	113
6.4	Fazit .....	115
7	<b>Untersuchungen zur Zahnußtragfähigkeit von Betonzahnrädern.....</b>	117
7.1	Geeignete Zahnradgeometrie.....	117
7.2	Analytische Bestimmung der Zahnuß-Nennspannung.....	119
7.3	Numerische Berechnung der Zahnußspannung mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) .....	123
7.4	Numerische Untersuchungen zur Zahnußtragfähigkeit.....	126
7.5	Zahnrad-Demonstrator (Eigenentwicklung) .....	130
8	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	133
8.1	Zusammenfassung.....	133
8.2	Ausblick.....	134
9	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	137
<b>Anhang A – Stand der Forschung/Technik.....</b>		153
A.1	Klassifizierung von Beton.....	153
<b>Anhang B – Voruntersuchungen zu UHPC/RPC.....</b>		155
B.1	Festlegung der Ausgangsmischung für die Voruntersuchungen.....	155
B.2	Einfluss unterschiedlicher Fasern auf die Betonfestigkeiten .....	156
B.3	Einfluss des Mischers auf die Betonfestigkeiten.....	160
B.4	Einfluss einer Vakuumbehandlung auf die Betonfestigkeiten .....	160
<b>Anhang C – Entwicklung geeigneter Mischungszusammensetzungen.....</b>		161
C.1	Einfluss unterschiedlicher Zuschläge auf die Druck-, Biegezug- und Verschleißfestigkeit .....	161
C.2	Siliciumcarbid als Zuschlag für Beton .....	162
C.2.1	Herstellung und Aufbereitung.....	162
C.2.2	Materialeigenschaften und Verwendung .....	165
C.3	Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICCs .....	166
C.4	Weitere Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICC.....	168
C.5	Tabellen zu „Weitere Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICC“ ....	174

---

<b>Anhang D – Charakterisierung wichtiger Werkstoffkennwerte ausgewählter Mischungszusammensetzungen .....</b>	<b>178</b>
D.1 Mischungsherstellung .....	178
D.2 Übersicht über die Anzahl der Probekörper .....	178
D.3 Drucktragverhalten .....	180
D.4 Zugfestigkeit, Zugtragverhalten und Zug-E-Modul .....	182
D.5 Kleinlasthärte (Vickershärte) .....	184
D.6 Schwindmaß/Dimensionsstabilität .....	185
D.7 Verschleißfestigkeit nach Böhme .....	187
D.8 Frost-Tausalz-Widerstand/CDF-Test .....	188
D.9 Schmierstoffbeständigkeit .....	190
D.10 Säurebeständigkeit .....	190
D.11 Festigkeitsentwicklung .....	194
<b>Anhang E – Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für Zahnräder aus UHPC .....</b>	<b>195</b>
E.1 Oberflächenrauheit .....	195
E.2 Prototypbau .....	195
<b>Anhang F – Untersuchungen zur Zahnußtragfähigkeit von Betonzahnrädern</b>	<b>196</b>
F.1 Geeignete Zahnradgeometrie .....	196
F.2 Analytische Berechnung der Zahnußspannung nach DIN 3990-3 [69] .....	198
F.3 Analytische Berechnung der Flankenpressung nach DIN 3990-2 [67] .....	203
F.4 Numerische Berechnung der Zahnußspannung mittels der FEM .....	205
F.5 Numerische Untersuchungen zur Zahnußtragfähigkeit .....	206
F.6 Zahnräder-Demonstrator (Eigenentwicklung) .....	208
<b>Anhang G – Aus dieser Arbeit hervorgegangene Thesen .....</b>	<b>209</b>