

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die Erhärtung von Portlandzement	5
2.1	Hydratationsmechanismen und -produkte	5
2.1.1	Überblick.....	5
2.1.2	Eigenschaften der C-S-H- und CH-Phasen	6
2.1.3	Aft-, AFm-, C-A-H- und C-A-S-H-Phasen	7
2.1.4	Hydratationsproduktentwicklung über die Zeit	8
2.1.5	Hydratationswärmeabfuhr	10
2.2	Gefügeentwicklung des Zementsteins	11
2.2.1	Aufbau der Zementsteinstruktur	11
2.2.2	Strukturmodelle	12
2.2.3	Hydratationsgradabhängige Volumenanteile	18
2.2.4	Zusammenhang zwischen Struktur und Festigkeit	21
2.2.5	Einfluss der Temperatur auf die Mikrostruktur und die Festigkeit	23
2.3	Hydratationskinetik von Portlandzement.....	24
2.3.1	Einteilung in kinetische Phasen	24
2.3.2	Ursachen für die verschiedenen kinetischen Phasen	25
2.3.3	Einfluss verschiedener Parameter auf die Hydratationskinetik	35
2.4	Modelle zur Beschreibung der Hydratationskinetik.....	37
2.4.1	Überblick.....	37
2.4.2	Beschreibung der Kinetik in Phase III mit dem <i>JMAK</i> -Modell	39
2.4.3	Beschreibung der Kinetik in Phase IV und V mit dem <i>Jander</i> -Modell	40
2.5	Zusammenfassung und offene Fragen	41
3	Einfluss inerter Zusatzstoffe auf die Erhärtung von Zement	43
3.1	Einleitung	43
3.2	Grundlegende Wirkungsmechanismen.....	45
3.2.1	Physikalischer Effekt	45
3.2.2	Chemischer Effekt	49
3.3	Beeinflussung der Hydratationskinetik	50
3.3.1	Wirkungsursachen	50
3.3.2	Einfluss auf die Hydratationswärmeentwicklung	52
3.4	Beeinflussung der Gefügeentwicklung.....	53
3.4.1	Einfluss auf die Hydratationsprodukte.....	53

3.4.2	Hydratationsproduktvolumen und Porosität	54
3.4.3	Einfluss auf die Festigkeit	56
3.5	Besonderheiten beim Zusatz von Alumosilikaten	58
3.5.1	Einfluss auf die Zementhydratation	58
3.5.2	Einfluss auf die Betoneigenschaften.....	59
3.6	Zusammenfassung und offene Fragen	60
4	Wechselwirkungen und Partikelanordnung im Zementleim	61
4.1	Einleitung	61
4.2	Entwicklung der Ionenkonzentration in der Porenlösung	61
4.3	Interpartikuläre Wechselwirkungen in Zementsuspensionen	63
4.3.1	Überblick.....	63
4.3.2	Kolloidale Wechselwirkungen – <i>DLVO</i> -Theorie.....	63
4.4	Partikelanordnung in Zusatzstoff- und Zementsuspensionen	68
4.4.1	Stabilität von Zementsuspensionen nach der <i>DLVO</i> -Theorie	68
4.4.2	Oberflächenladung und Zetapotenzial von Zementpartikeln	69
4.4.3	Struktur im frischen Zementleim	70
4.5	Zusammenfassung und offene Fragen	73
5	Untersuchungsprogramm und Methoden	75
5.1	Überblick	75
5.2	Probenherstellung und –präparation	76
5.2.1	Wahl der Ausgangsstoffe	76
5.2.2	Rezepturen.....	77
5.2.3	Mischvorgang und Lagerung.....	77
5.2.4	Probenvorbereitung (Trocknung der Proben)	77
5.3	Untersuchungsmethoden.....	79
5.3.1	Korngrößenverteilung, spezifische Oberfläche und Glühverlust	79
5.3.2	Wasseranspruch und Packungsdichte des Leims	81
5.3.3	Zetapotenzial und Partikelgrößenverteilung mittels Elektroakustik	82
5.3.4	Sedimentationsverhalten	87
5.3.5	Löslichkeit der Quarze und Alumosilikate	89
5.3.6	Hydratationswärmeentwicklung mittels Kalorimetrie	90
5.3.7	Untersuchung des chemisch gebundenen Wassers.....	92
5.3.8	Röntgenbeugungsanalysen	94
5.3.9	Thermogravimetrische Analysen	95
5.3.10	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen	97

4	5.3.11 Festigkeitsuntersuchungen.....	98
6	5.3.12 Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie	98
8	6 Untersuchungsergebnisse.....	101
8	6.1 Eigenschaften der Ausgangsstoffe.....	101
9	6.1.1 Chemische und physikalische Eigenschaften der Ausgangsstoffe.....	101
0	6.1.2 Oberflächenladung und Zetapotenzial	109
L	6.1.3 Löslichkeit der Quarze und Alumosilikate.....	118
L	6.2 Beeinflussung der Gefügestruktur im frischen Zementleim	120
1	6.2.1 Wasseranspruch nach <i>Puntke</i> und initiale Partikelpackung	120
3	6.2.2 Ergebnisse der Sedimentationsanalysen.....	122
3	6.2.3 Zusammenfassung zum Einfluss auf die Gefügestruktur im	
3	frischen Zementleim	128
8	6.3 Beeinflussung der Hydratationskinetik	129
8	6.3.1 Überblick.....	129
9	6.3.2 Ergebnisse aus quasi-isothermer Kalorimetrie.....	130
0	6.3.3 Hydratationsgradiententwicklung über die Zeit.....	139
3	6.3.4 Anpassung mit den <i>JMAK</i> - und <i>Jander</i> -Modellfunktionen.....	145
5	6.3.5 Einfluss der Temperatur – scheinbare Aktivierungsenergie.....	153
5	6.3.6 Zusammenfassung zum Einfluss auf die Hydratationskinetik	158
6	6.4 Beeinflussung der Gefügeentwicklung.....	160
6	6.4.1 Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalysen	160
7	6.4.2 Ergebnisse der thermogravimetrischen Analysen.....	163
7	6.4.3 Ergebnisse der Porositätsanalysen (Hg-Porosimetrie).....	169
7	6.4.4 Festigkeitsentwicklung von Zementstein und Mörtel.....	170
9	6.4.5 Zusammenfassung zum Einfluss auf die Gefügestruktur	172
9	7 Modell zum Einfluss hochfeiner, inerter Zusatzstoffe auf die	
9	Hydratationskinetik und die Gefügeentwicklung bei der	
1	Zementhydratation.....	175
2	7.1 Modellkomponenten	175
7	7.1.1 Oberflächenladung der Zementpartikel in wässriger Lösung	175
9	7.1.2 Anordnung der Zusatzstoffpartikel im frischen Zementleim	176
0	7.1.3 Keimbildungsfunktion der Zusatzstoffe	178
2	7.2 Anwendung des Modells	181
4	7.2.1 Vorbemerkung	181
5	7.2.2 Auswirkung der Partikelanordnung auf die Hydratationskinetik und	
7	die Gefügeentwicklung (Prinzip).....	181

7.2.3	Anwendung auf verschiedene Zusatzstoff-/Zementsysteme	184
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	189
	Quellenverzeichnis	195
	Abbildungsverzeichnis.....	209
	Tabellenverzeichnis.....	215
Anhang 1	Daten aus der Literatur.....	217
Anhang 2	Berechnungen.....	218
Anhang 3	Eigenschaften der Ausgangsstoffe	224
Anhang 4	Ergebnisse an frischen Suspensionen	233
Anhang 5	Ergebnisse zur Hydratationskinetik	243
Anhang 6	Ergebnisse zur Gefügeentwicklung	260