

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzreferat.....	I
Abstract.....	II
Vorwort.....	III
Verwendete Symbole und Abkürzungen	IX
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
1.1 Einführung und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Mechanische Wellen in zementgebundenen Baustoffen	3
2.1.1 Wellenarten und elastische Parameter	3
2.1.2 Kenngrößen des Schallfeldes	8
2.1.3 Wechselwirkung mechanischer Wellen	8
2.1.4 Wellenausbreitung in frischen zementgebundenen Systemen	11
2.2 Methoden zur Anregung und Erfassung von Ultraschall	25
2.2.1 Piezoelektrische Prüfkopfsysteme.....	27
2.2.2 Laserbasierte Anregung von Ultraschall.....	31
2.2.3 Laserbasierte Erfassung von Ultraschall	42
2.3 Angewandte akustische Prüfverfahren zur zerstörungsfreien Erfassung struktureller Veränderungen	47
2.3.1 Ultraschall-Transmissionsverfahren.....	47
2.3.2 Tomographische Messverfahren	49
2.3.3 Eigen- und Resonanzfrequenzmessungen	53
2.4 Zerstörungsfreie Charakterisierung der Strukturbildung und Homogenität frischer zementgebundener Systeme – Kenntnisstand.....	55
2.4.1 Hydratation von Portlandzement.....	55
2.4.2 Strukturbildung, Wellenausbreitung und elastische Eigenschaften.....	57
2.4.3 Akustische zerstörungsfreie Prüfverfahren.....	59
2.5 Zerstörungsfreie Charakterisierung struktureller Veränderungen zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe – Kenntnisstand	64
2.5.1 Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff	64
2.5.2 Alkali-Kieselsäure-Reaktion	66
3 Messverfahren zur kontinuierlichen, zerstörungsfreien Charakterisierung der Struktur- bildung	71
3.1 Problemstellung.....	71

3.2	Systemkomponenten, Systemsteuerung und Datenerfassung	72
3.3	Prüfformen für Zementleim, Mörtel und Beton	73
3.4	Charakterisierung der Prüfkopfsysteme.....	75
3.4.1	Frequenzcharakteristik	77
3.4.2	Richtcharakteristik	80
3.4.3	Temperaturabhängige Verzögerungszeiten	82
3.5	Detektion des Ersteinsatzes von Ultraschallsignalen.....	85
3.5.1	Manuelle Auswerteverfahren	85
3.5.2	Automatische Auswerteverfahren.....	86
3.5.3	Algorithmus zur Detektion des Ersteinsatzes	87
3.5.4	Modellierung experimenteller Daten der Ausbreitungsgeschwindigkeiten.....	92
3.6	Reproduzierbarkeit gewonnener Messdaten	94
3.7	Einflussfaktoren, Messgrößen und Ergebnisparameter zur Charakterisierung frischer zementgebundener Systeme.....	95
3.7.1	Materialien und Methoden	96
3.7.2	Ergebnisse und Diskussion	96
3.8	Schlussfolgerungen.....	109
4	Messsystem zur laserbasierten Untersuchung zementgebundener Baustoffe.....	115
4.1	Systemkomponenten, Systemsteuerung und Datenerfassung	115
4.2	Charakterisierung des Messsystems.....	118
4.2.1	Nd:YAG-Anregungslaser	118
4.2.2	2D-Scanning-Vibrometer	121
4.2.3	Systemspezifische Verzögerungszeiten	125
4.3	Berechnung der Messpunktpositionen.....	126
5	Untersuchungen zur laserbasierten Anregung und Erfassung von Ultraschall	127
5.1	Problemstellung.....	127
5.2	Signalcharakteristik.....	128
5.2.1	Materialien und Methoden	128
5.2.2	Ergebnisse und Diskussionf.....	128
5.2.3	Schlussfolgerungen	131
5.3	Richtcharakteristik.....	131
5.3.1	Materialien und Methoden	131
5.3.2	Ergebnisse und Diskussion	132
5.3.3	Schlussfolgerungen	133

5.4	Ablationsdynamik.....	133
5.4.1	Materialien und Methoden	133
5.4.2	Ergebnisse und Diskussion.....	135
5.4.3	Schlussfolgerungen.....	137
5.5	Laserinduzierte Oberflächenveränderungen	138
5.5.1	Materialien und Methoden	138
5.5.2	Ergebnisse und Diskussion.....	139
5.5.3	Schlussfolgerungen.....	143
5.6	Einflussfaktoren und Prozessoptimierung der ablativen Ultraschallanregung	144
5.6.1	Materialien und Methoden	144
5.6.2	Ergebnisse und Diskussion.....	150
5.6.3	Schlussfolgerungen.....	162
5.7	Verfahrensgrenzen der kombinierten laserbasierten Anregung und Erfassung	163
5.7.1	Materialien und Methoden	164
5.7.2	Ergebnisse und Diskussion.....	165
5.7.3	Schlussfolgerungen.....	169
6	Ortsaufgelöste Bewertung der Strukturbildung und Homogenität mit Laser-Ultraschall.....	171
6.1	Problemstellung.....	171
6.2	Adaption von Laser-Ultraschall zur Untersuchung frischer Systeme	173
6.3	Übersicht untersuchter Anwendungsfelder von Laser-Ultraschall	175
6.4	Erfassen der Strukturbildung und Homogenität zementgebundener Systeme	176
6.4.1	Materialien und Methoden	177
6.4.2	Ergebnisse und Diskussion.....	178
6.4.3	Schlussfolgerungen.....	186
6.5	Simultane Erfassung von Longitudinal- und Scherwellen während der Struktur- bildung zementgebundener Systeme	187
6.5.1	Materialien und Methoden	187
6.5.2	Ergebnisse und Diskussion.....	188
6.5.3	Schlussfolgerungen.....	188
6.6	Bewertung der Homogenität von Laborproben und Betonbauteilen	189
6.6.1	Materialien und Methoden	190
6.6.2	Ergebnisse und Diskussion.....	192
6.6.3	Schlussfolgerungen.....	197
6.7	Relation zwischen den zerstörungsfreien Kennwerten und der Homogenität	198

7	Ortsaufgelöste Beurteilung der Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe mit Laser- Ultraschall.....	199
7.1	Problemstellung.....	199
7.2	Adaption von Laser-Ultraschall für tomographische Untersuchungen	200
7.3	Charakterisieren struktureller Gefügeveränderungen aus einem Frost-Tausalz- Angriff.....	203
7.3.1	Materialien und Methoden	203
7.3.2	Ergebnisse und Diskussion.....	206
7.3.3	Schlussfolgerungen.....	215
7.4	Charakterisieren struktureller Gefügeveränderungen aus einer Alkali-Kieselsäure- Reaktion.....	216
7.4.1	Materialien und Methoden	216
7.4.2	Ergebnisse und Diskussion.....	219
7.4.3	Schlussfolgerungen.....	224
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	225
8.1	Messverfahren zur kontinuierlichen, zerstörungsfreien Charakterisierung der Strukturbildung.....	225
8.2	Laserbasierte Charakterisierung zementgebundener Baustoffe.....	226
	Quellen.....	230
	Normen und Regelwerke	252
	Eigene Publikationen	256
	Anlagen	259