

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 Strukturbildung	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 Strukturbildung 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