

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Bauwerksüberwachung . . . . .	1
1.2	Gliederung der Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Stahlbeton - Parameter zur Zustandsanalyse</b>	<b>4</b>
2.1	Historisches . . . . .	4
2.2	Betontechnische Grundlagen . . . . .	5
2.2.1	Definition . . . . .	5
2.2.2	Inhaltsstoffe . . . . .	6
2.2.2.1	Zement . . . . .	6
2.2.2.2	Gesteinskörnung . . . . .	7
2.2.2.3	Zusatzstoffe . . . . .	7
2.2.2.4	Fasern . . . . .	7
2.2.2.5	Bewehrung . . . . .	8
2.2.3	Bildung von Zementstein . . . . .	8
2.2.4	Die Entwicklung des Porenraums . . . . .	12
2.2.5	Betonkorrosion . . . . .	14
2.2.5.1	Chemische Angriffe . . . . .	14
2.2.5.2	Physikalische Angriffe . . . . .	15
2.2.5.3	Biologische Angriffe . . . . .	15
2.2.6	Stahlkorrosion . . . . .	16
2.3	Feuchtigkeit . . . . .	18
2.3.1	Einleitung . . . . .	18
2.3.2	Bindungsarten . . . . .	19
2.3.3	Maß der Feuchte . . . . .	21
2.3.4	Speicher- und Transportmechanismen in Beton . . . . .	22
2.3.5	Dielektrische Eigenschaften . . . . .	26
2.4	pH-Wert . . . . .	27
2.4.1	Grundlagen . . . . .	27
2.4.2	Carbonatisierung . . . . .	28

## Inhaltsverzeichnis

2.5	Chlorideintrag in Stahlbetonbauwerke . . . . .	29
2.5.1	Grundlagen . . . . .	29
2.5.1.1	Externe Chloridquellen . . . . .	30
2.5.1.2	Transport- und Bindungsvorgänge . . . . .	30
2.5.2	Auswirkungen hoher Chloridkonzentrationen . . . . .	31
2.6	Konsequenzen für Bauwerkssensoren . . . . .	33
2.6.1	Messung relativer Feuchte . . . . .	33
2.6.2	Messung des pH-Werts . . . . .	35
2.6.3	Messung des Chloridgehalts . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Aktuelle Maßnahmen der Bauwerksüberwachung</b>	<b>37</b>
3.1	Messsysteme . . . . .	37
3.1.1	Feuchte . . . . .	37
3.1.1.1	Dielektrische Verfahren . . . . .	38
3.1.1.2	Optische Verfahren . . . . .	40
3.1.1.3	Alternative Verfahren . . . . .	40
3.1.2	Chlorid . . . . .	41
3.1.3	pH-Wert . . . . .	42
3.2	Faseroptische Sensoren . . . . .	42
3.2.1	Grundlagen der Faseroptik . . . . .	42
3.2.1.1	Optik (Licht/Farbigkeit) . . . . .	42
3.2.1.2	Glasfasern . . . . .	44
3.2.1.3	Messtechnik . . . . .	46
3.2.2	Aufbau und Funktion . . . . .	47
3.2.3	Sensormaterialien . . . . .	49
3.2.3.1	Material zur Bestimmung der relativen Feuchte . . . . .	50
3.2.3.2	Material zur Bestimmung des pH-Werts . . . . .	57
3.2.3.3	Material zur Bestimmung der Chloridkonzentration . . . . .	60
3.3	Bauwerksüberwachung im Denkmalschutz . . . . .	63
3.3.1	Motivation . . . . .	63
3.3.2	Faseroptische Sensoren in der Fatimakirche (Kassel) . . . . .	64
3.3.3	Zusammenfassung . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Elektrooptisches Sensorsystem</b>	<b>75</b>
4.1	Sensoraufbau . . . . .	75
4.2	Das MORES-Modul . . . . .	76
4.2.1	Emitter . . . . .	78

4.2.1.1	Feuchtesensoren . . . . .	79
4.2.1.2	pH-Sensoren . . . . .	82
4.2.1.3	Chloridsensoren . . . . .	83
4.2.1.4	Abstrahlung der Emitter . . . . .	84
4.2.1.5	Zusammenfassung . . . . .	85
4.2.2	Reflektoren . . . . .	85
4.2.3	Kalibrationsdioden . . . . .	91
4.2.3.1	Referenzdiode . . . . .	91
4.2.3.2	Die Temperaturdiode . . . . .	92
4.3	Elektronik . . . . .	93
4.4	Messdatenerfassung . . . . .	95
4.5	Sensor . . . . .	96
4.5.1	Auswertung . . . . .	96
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse und Ausblick</b>	<b>100</b>
5.1	Elektrooptische Sensoren . . . . .	100
5.1.1	pH-Wert-Messung . . . . .	100
5.1.2	Relative Feuchte . . . . .	102
5.1.3	Chlorid . . . . .	106
5.1.4	Temperaturabhängigkeit . . . . .	108
5.1.5	Übersprechen . . . . .	110
5.1.6	Zusammenfassung . . . . .	113
5.2	Faseroptische Sensoren . . . . .	115
5.3	Vergleich von faseroptischen und elektrooptischen Sensoren . . . . .	117
5.3.1	Feuchtigkeitsmessungen . . . . .	117
5.3.2	pH-Wert-Messungen . . . . .	117
5.3.3	Schnelltest für Chlorid . . . . .	118
5.4	Ausblick für elektrooptische Sensoren in der Bauwerksüberwachung . . . . .	119
5.4.1	Verwendung in einem autarken Messsystem . . . . .	119
5.4.2	Konzept . . . . .	120
5.4.3	Literatur . . . . .	121
5.4.3.1	Energiespeicher . . . . .	121
5.4.3.2	Energiequellen . . . . .	122
5.4.3.3	Weitere Komponenten . . . . .	126
5.4.4	Fazit . . . . .	127
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>