

Dr.-Ing. Wolfgang R. Habel

**Faseroptische Sensoren  
für hochauflöste  
Verformungsmessungen  
in der Zementsteinmatrix**

*HLuHB Darmstadt*  
  
15852410

Forschungsbericht 246  
Berlin 2003

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	
1.1	Situation und Problemstellung	13
1.2	Zielsetzung	14
1.3	Gliederung der Arbeit	15
1.4	Quellenangaben	16
<b>2</b>	<b>Faseroptische Sensoren für die Messung von Werkstoffverformungen</b>	
2.1	Historie	17
2.2	Struktur faseroptischer Sensorsysteme	19
2.3	Lichtwellenleiter als Grundbaustein des Fasersensors - Physikalische Grundlagen und Aufbau	19
2.4	Einbettung von Sensoren in die Zementsteinmatrix und relevante Kenngrößen	23
2.4.1	Bedeutung der Meßbasis	23
2.4.2	Meßtechnische Definitionen und Begriffsvereinbarungen	24
2.4.3	Verhalten der Sensorfaser bei thermischen und mechanischen Einflüssen	26
2.4.4	Fasersensor als Einschluß in der Matrix	28
2.5	Auswahl und Beschreibung der Mikrodehnungssensoren	30
2.5.1	BRAGG-Gitter-Sensor als intrinsischer Fasersensor	30
2.5.2	Fabry-Pérot-Sensor als extrinsischer Fasersensor	36
2.5.3	Vergleich von Faser-BRAGG-Gitter- und Fabry-Pérot-Sensoren	44
2.6	Quellenangaben	45
<b>3</b>	<b>Beanspruchung faseroptischer Mikrodehnungssensoren in der Zementsteinmatrix</b>	
3.1	Anforderungsprofil an einbettbare Mikrodehnungssensoren	49
3.2	Betonchemische Beanspruchung	49
3.3	Mechanische Beanspruchung	51
3.4	Literaturübersicht zu werkstoffintegrierten faseroptischen Sensoren	52
3.4.1	Struktur-integrierte Fasersensoren allgemein	52
3.4.2	In zementgebundene Baustoffe integrierte optische Fasern und Sensoren	53
3.5	Quellenangaben	54
<b>4</b>	<b>Verhalten optischer Standardfasern (für Sensoren) im alkalischen Milieu der Zementsteinmatrix</b>	
4.1	Optisches Glas für Fasersensoren	57
4.1.1	Struktur des optischen Glases	57
4.1.2	Optische Eigenschaften	58
4.1.3	Ausgangsmaterial Lichtwellenleiter	58
4.1.4	Mechanische Eigenschaften	59
4.1.5	Prüfverfahren zur Bestimmung der Zugfestigkeit	60
4.2	Veränderungen unter betonchemischem Einfluß	62
4.2.1	Coatings	63
4.2.2	Glasoberfläche	67
4.2.3	Verfahren zur Bestimmung der Festigkeit bei chemischem Angriff	75
4.2.4	Festigkeitsverhalten unbeschichteter optischer Glasfasern unter Umgebungsbedingungen	76
4.2.5	Festigkeitsverhalten betonchemisch beanspruchter, unbeschichteter optischer Glasfasern	77
4.2.6	Lebensdauerabschätzung für betonchemisch beanspruchte, ungeschützte optische Glasfasern	80
4.3	Fazit - Glasbehandlung oder Sensorcoating?	81
4.4	Quellenangaben	83

<b>5.</b>	<b>Optimierung der Adhäsionseigenschaften optischer Fasern für die Einbettung</b>	
5.1	Bedeutung der adhäsiven Eigenschaften eingebetteter Glasfasern - Haftungsmechanismen	87
5.2	Verfahren zur Vorhersage der adhäsiven Eigenschaften	88
5.2.1	Theoretische Grundlagen	89
5.2.2	Experimentelle Bestimmung der charakteristischen Größen	90
5.2.3	Benetzung unbehandelter optischer Standard-Glasfasern	94
5.2.4	Benetzung von Zementmörtel-Oberflächen	94
5.3	Verbesserung der Benetzbarkeit optischer Glasfasern durch Modifizierung im Sauerstoffplasma	94
5.3.1	Auswahl und Erzeugung des Plasmas	95
5.3.2	Einfluß auf die Faseroberfläche und die Benetzung	96
5.3.3	Einfluß auf die Festigkeit	96
5.4	Chemische Modifizierung mit Silanen als Haftvermittler	98
5.4.1	Auswahl und Beschreibung der verwendeten Silane	98
5.4.2	Benetzungseigenschaften von silanisierten optischen Standardfasern	100
5.4.3	Festigkeit von silanisierten optischen Glasfasern in Porenlösung	102
5.5	Ergebnisse zur Steuerung der Benetzbarkeit optischer Fasern unter Berücksichtigung der Faserfestigkeit	103
5.6	Quellenangaben	103
<b>6</b>	<b>Alternative Coatings auf Sensorfasern und ihr Verhalten unter Porenlösungseinfluß</b>	
6.1	Manuell aufgebrachte Beschichtungen	105
6.2	Hochvernetzte Plasmapolymerbeschichtung	105
6.2.1	Herstellung	105
6.2.2	Benetzungseigenschaften	107
6.2.3	Struktur der Oberfläche bei Porenlösungsangriff	108
6.2.4	Festigkeitseigenschaften	108
6.3	Langkettiges ORMOCER-Coating	110
6.3.1	Aufbau	110
6.3.2	Verhalten bei Porenlösungsangriff	110
6.3.3	Festigkeitseigenschaften	110
6.4	Fazit	111
6.5	Quellenangaben	111
<b>7</b>	<b>Verbund faseroptischer Sensoren mit der Zementsteinmatrix</b>	
7.1	Mikromechanik des Dehnungsübergangs von der Matrix in den Fasersensor	113
7.1.1	Analytische Beschreibung der Spannungsverläufe am eingebetteten glatten Fasersensor	113
7.1.2	FEM-Modellierung der Spannungsverläufe am eingebetteten steifen Fabry-Pérot-Sensor	118
7.1.3	Einflüsse auf die Haftfestigkeit	119
7.1.4	Verlust der Sensorfunktion durch Erreichen der Haftfestigkeit oder durch Rißbildung in der Matrix	120
7.2	Verfahren und Gerätetechnik zur Bewertung der Faserhaftung	123
7.2.1	Einzelfaserauszug-(Pull-out-)Methode	123
7.2.2	Einzelfasereindrück-(Indentation-)Methode	125
7.2.3	Vergleich der Verfahren und Wahl der Testmethodik	126
7.3	Indentation-Tests an ausgewählten Prüflingen	126
7.3.1	Konventionell beschichtete und unbeschichtete Fasern	127
7.3.2	Silanisierte Fasern	128
7.3.3	Fasern mit Plasmapolymer-Coating	129
7.3.4	Fasern mit ORMOCER-Coating	129
7.4	Fazit	130
7.5	Quellenangaben	131

<b>8</b>	<b>Beispielmessungen mit eingebetteten flexiblen und steifen Fasersensoren</b>	
8.1	Anfangsverformung eines Einpreßmörtels - gemessen in Anlehnung an das Prüfverfahren nach DIN EN 445	133
8.1.1	Beschreibung der Meßaufgabe und der Sensoren	133
8.1.2	Einbau der Sensoren und Lagerung des Prüfgefäßes	134
8.1.3	Ergebnisse	134
8.2	Anfangsverformungen von Zementleim bei Veränderung der Rezeptur	135
8.2.1	Beschreibung der Meßaufgabe und der Sensoren	135
8.2.2	Einbau der Sensoren	136
8.2.3	Meßprogramm und Ergebnisse	136
8.3	Vergleich der Meßempfindlichkeit eingebetteter flexibler EFPI-Sensoren mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren im jungen Mörtel	138
8.3.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	139
8.3.2	Wahl der Sensoren und Voruntersuchungen	139
8.3.3	Einbau der Sensoren	139
8.3.4	Ergebnisse	139
8.4	Fazit und Diskussion der Meßgenauigkeit	141
8.4.1	Meßgenauigkeit eingebetteter flexibler Fasersensoren	141
8.4.2	Meßgenauigkeit eingebetteter steifer Fasersensoren	142
8.5	Quellenangaben	143
<b>9</b>	<b>Resümee und Ausblick</b>	
9.1	Dauerhaftigkeit	145
9.2	Dehnungsübertragung	146
9.3	Leistungsgrenzen	146
9.4	Offene Fragen – Ausblick auf weiterzuführende Arbeiten	147
<b>Anlagen:</b>		
A1.	Faser-Fabry-Pérot-Sensoren - Physikalische Grundlagen	151
A2.	Simulation des betonchemischen Angriffs optischer Glasfasern	157
A3.	Zugfestigkeitsuntersuchungen an optischen Glasfasern - Theoretisches Modell und Experimentiertechnik	163
A4.	Oberflächenenergetische Untersuchungen an optischen Glasfasern zur Optimierung der Adhäsion	175
A5.	Modifizierung von Glasoberflächen und Herstellung alternativer Coatings - Gerätetechnik	187
A6.	Modell und Versuchseinrichtung zur Abschätzung des Dehnungsübergangs von der Zementsteinmatrix in die Sensorfaser	191