

Distributed Fiber Optic Crack Monitoring on Concrete Structures: Model-Informed Sensor Selection

DISSERTATION

Vorgelegt an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

von

Max Herbers, M.Sc.
geb. am 04.09.1992 in Lingen

Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx Institut für Massivbau Technische Universität Dresden
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Claßen Institut für Massivbau RWTH Aachen
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine Institut für Baustoffe Technische Universität Dresden
Einreichung:	03.04.2026
Verteidigung:	14.09.2026

Abstract

Distributed fiber optic sensors (DFOS) offer substantial potential for crack monitoring on concrete structures by enabling continuous strain measurements with high spatial resolution over long sensor lengths. In particular, coherent optical frequency domain reflectometry (c-OFDR) enables early crack detection, precise crack localization and detailed assessment of complex crack patterns.

However, reliable DFOS-based crack monitoring critically depends on the interaction between DFOS type, installation method, and measurement settings. An inadequate DFOS/adhesive combination (DAC) may either attenuate strain peaks, leading to undetected cracks, or cause excessive strain concentrations, resulting in fiber breakage and signal degradation. Despite numerous influencing parameters, the design of DFOS monitoring systems is still largely based on empirical knowledge.

The primary objective of this thesis was to develop a framework for physically informed DAC selection. To this end, experimental investigations were conducted to characterize the bond behavior of various DACs under static and cyclic loading. In addition, the influence of different installation methods on the strain transfer was analyzed, resulting in the derivation of semi-empirical bond models. The results revealed pronounced influences of bond stiffness, sensor length, and the associated spatial resolution on the measurable crack width. With increasing bond stiffness and DFOS length, the measurable crack width decreases markedly, while overly compliant bond behavior compromises crack detection and quantification.

Based on these findings, the strain curve prediction (SCP) framework was developed to calculate crack-induced strain distributions for arbitrary crack patterns while explicitly accounting for DAC-specific bond behavior and measurement limitations. The SCP framework reliably reproduces the key characteristics of DFOS strain measurements, including overlapping effects, peak attenuation due to plastic deformations, and the occurrence of measurement dropouts. This capability enables systematic parameter studies to identify a balanced DAC stiffness tailored to the crack pattern to be monitored. Additionally, nomograms were derived that illustrate the relationship between measurable crack width, DFOS length and bond stiffness.

While the previous investigations focused on the design of DFOS monitoring systems, the final part of this thesis addresses the field of data evaluation and knowledge extraction. To this end, the integral method for crack width calculation in reinforced concrete structures was validated and extended to pre-stressed concrete applications. Crack widths derived from DFOS strain measurements show high agreement with reference measurements for both DFOS embedded in concrete and bonded to reinforcement.

This dissertation therefore addresses both the planning and operation phase of a DFOS-based crack monitoring. By systematically linking bond models with measurement-related limitations within the SCP framework, a foundation is established for informed DAC selection. This enables the acquisition of high-quality strain measurements with sufficient peak prominence, enabling reliable crack detection and crack width calculation. Consequently, this work contributes to more robust and reliable DFOS-based crack monitoring, applicable to both new and existing concrete structures.

Keywords: Crack monitoring; Concrete structures; Distributed fiber optic sensor (DFOS); Coherent optical frequency domain reflectometry (c-OFDR); Bond behavior; Sensor selection.

Kurzfassung

Verteilte faseroptische Sensoren (DFOS) bieten ein erhebliches Potenzial für das Rissmonitoring an Betonbauwerken, da sie kontinuierliche Dehnungsmessungen mit hoher räumlicher Auflösung über große Sensorlängen ermöglichen. Insbesondere die kohärente optische Frequenzbereichsreflektometrie (c-OFDR) erlaubt eine frühzeitige Risserkennung, eine präzise Risslokalisierung sowie eine detaillierte Erfassung komplexer Rissbilder.

Ein zuverlässiges DFOS-basiertes Rissmonitoring hängt jedoch wesentlich vom Zusammenspiel zwischen Sensortyp, Installationsmethode und Messeinstellungen ab. Eine ungeeignete Sensor-Kleber-Kombination (DAC) kann Dehnungsspitzen entweder so stark abschwächen, dass Risse nicht erkannt werden, oder zu übermäßigen Dehnungskonzentrationen führen, die Sensorbrüche und eine Verschlechterung der Signalqualität verursachen. Trotz der Vielzahl relevanter Einflussgrößen basiert die Auslegung von DFOS-Monitoringsystemen bislang weitgehend auf Erfahrungswissen.

Das vorrangige Ziel dieser Arbeit bestand darin, ein Verfahren für eine physikalisch fundierte Auswahl geeigneter DACs zu entwickeln. Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um das Verbundverhalten verschiedener DACs unter statischen und zyklischen Einwirkungen zu charakterisieren. Darüber hinaus wurde der Einfluss unterschiedlicher Installationsmethoden auf den Dehnungstransfer analysiert und daraus semi-empirische Verbundmodelle abgeleitet. Die Ergebnisse zeigten ausgeprägte Einflüsse der Verbundsteifigkeit, der Sensorlänge und der damit verbundenen räumlichen Messauflösung auf die messbare Rissbreite. Mit zunehmender Verbundsteifigkeit und DFOS-Länge nahm die messbare Rissbreite deutlich ab, während ein zu nachgiebiges Verbundverhalten die Risserkennung und -quantifizierung beeinträchtigte.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde das Strain-Curve-Prediction-(SCP)-Framework entwickelt. Mit diesem können rissinduzierte Dehnungsverteilungen für beliebige Rissbilder berechnet werden, wobei das DAC-spezifische Verbundverhalten und messtechnische Grenzen explizit berücksichtigt werden. Das SCP-Framework reproduziert zuverlässig die wesentlichen Charakteristika der Dehnungsverläufe, darunter Überlagerungseffekte, eine Abminderung von Dehnungsspitzen infolge plastischer Verformungen sowie das Auftreten von Messausfällen (Dropouts). Dadurch sind systematische Parameterstudien möglich, mit denen sich eine auf das zu überwachende Rissbild abgestimmte, ausgewogene DAC-Verbundsteifigkeit ermitteln lässt. Zusätzlich wurden Nomogramme hergeleitet, welche die Zusammenhänge zwischen messbarer Rissbreite, DFOS-Länge und Verbundsteifigkeit aufzeigen.

Während die vorhergehenden Untersuchungen auf die Auslegung von DFOS-Monitoringsystemen ausgerichtet waren, befasst sich der zweite Teil dieser Arbeit mit der Datenauswertung und Informationsgewinnung. Hierzu wurde die Integralmethode zur Rissbreitenbestimmung in Stahlbetonbauteilen validiert und auf Anwendungen im Spannbeton erweitert. Die aus DFOS-Dehnungsmessungen ermittelten Rissbreiten zeigten sowohl für in Beton eingebettete als auch für auf der Bewehrung applizierte DFOS eine hohe Übereinstimmung mit Referenzmessungen.

Diese Dissertation behandelt damit sowohl die Planungs- als auch die Betriebsphase eines DFOS-basierten Rissmonitorings. Durch die systematische Verknüpfung von Verbundmodellen und messtechnischen Grenzen innerhalb des SCP-Frameworks wurde eine Grundlage für eine fundierte DAC-Auswahl geschaffen. Dadurch können qualitativ hochwertige Dehnungsmessungen mit ausreichend ausgeprägten

Dehnungsspitzen erzielt und somit eine zuverlässige Risserkennung und Rissbreitenbestimmung ermöglicht werden. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zu einem robusteren und zuverlässigeren DFOS-basierten Rissmonitoring, das sowohl bei neuen als auch bei bestehenden Betonbauwerken eingesetzt werden kann.

Schlagwörter: Rissmonitoring; Betonbauwerke; Verteilte faseroptische Sensoren (DFOS); Kohärente optische Frequenzbereichsreflektometrie (c-OFDR); Verbundverhalten; Sensorauswahl.