
Einsatz von faseroptischen DMS in interdisziplinären Projekten

Christian HESSE, Ulrich MEYER und Michael ZUMHOLZ

Kurzfassung

Das vorliegende Paper beschreibt den praktischen Einsatz faseroptischer DMS für die kontinuierlich und hochfrequente Überwachung der Dachstruktur einer großen Produktionshalle zur statischen und dynamischen Nachrechnung, die Vor- und Nachteile sowie die praktischen Herausforderungen bei der Installation dieses Sensortyps.

Auf Basis der gemessenen Langzeit-Monitoring-Daten konnte die vorhandene Schädigung der Struktur unter Zuhilfenahme verschiedener Auswertemethoden wie beispielsweise einer Rainflow-Analyse beurteilt werden. Zusammen mit bisherigen und geplanten Produktionszahlen und der damit korrelierten zukünftigen Belastung der Tragstruktur konnte eine gute Prognose hinsichtlich der Restlebensdauer errechnet werden.

1 Einleitung

1.1 Grundlagen

Die Dehnungsmessung von Werkstoffen durch Applikation von Sensoren auf deren Oberfläche ist eine seit langem übliche Technik, um Spannungszustände und Deformationen an Bauteilen, Maschinen und sonstigen technischen Strukturen zu bestimmen.

Überwiegend kommen hierzu metallische DMS zum Einsatz, die zwar eine gewisse Erfahrung bei der Installation erfordern, sensorisch aber mit sehr geringen Kosten in Relation zur Sensitivität der Messung verbunden sind. Dehnungsmessungen mit DMS kommen auch außerhalb der Geodäsie häufig zum Einsatz.

Handelsübliche metallische DMS sind für wenige Euro zu erwerben, die für das Auslesen der Daten notwendigen Messverstärker liegen im Bereich von 5.000 bis 10.000 €.

Obwohl das Prinzip der Messung von Längenänderungen mittels optischer Sensoren schon mehrere Dekaden bekannt ist (HILL et al. 1978), kommen faseroptische Sensoren in der geodätischen Praxis bislang eher selten zum Einsatz.

Einen guten Überblick über faseroptische Messtechnik geben DÖRING et al. (2016) sowie LIENHART et al. (2021) im Hinblick auf ihren Einsatz bei ingenieurgeodätischem Monitoring von Tunnelquerschnitten.

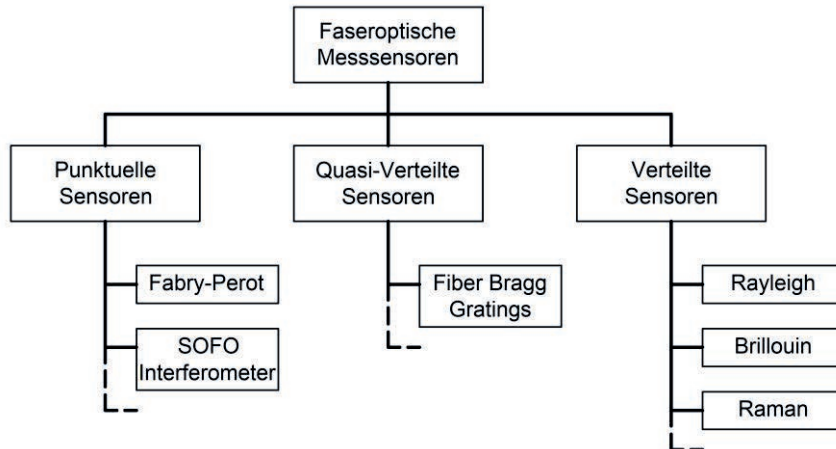


Abb. 1: Sensorkategorien faseroptischer Sensoren (MONSBERGER 2015)

Grundsätzlich werden faseroptische Sensoren entsprechend ihres Funktionsprinzips sowie der Sensorcharakteristika, wie in Abbildung 1 dargestellt, in drei Kategorien eingeteilt (MONSBERGER 2015).

Für das vorliegende Projekt wurden, unter anderem bedingt durch das Angebot des Herstellers, Sensoren auf Basis von Fiber Bragg Gratings (FBG) verwendet. Diese erlauben zum einen Leitungslängen, die für ingenieurgeodätische Zwecke ausreichend sind, und können zudem mit Abtastraten von bis zu 2 kHz ausgelesen werden.

Der MXFS Interrogator (Abb. 4) des Herstellers HBK erlaubt einen präzisen Messmodus mit bis zu 100 Hz sowie einen High-Speed-Modus mit den erwähnten 2 kHz. Es ist jedoch zu beachten, dass bei hohen Abtastraten die Leitungslänge bis zum jeweiligen Sensor zwingend mit konfiguriert werden muss.

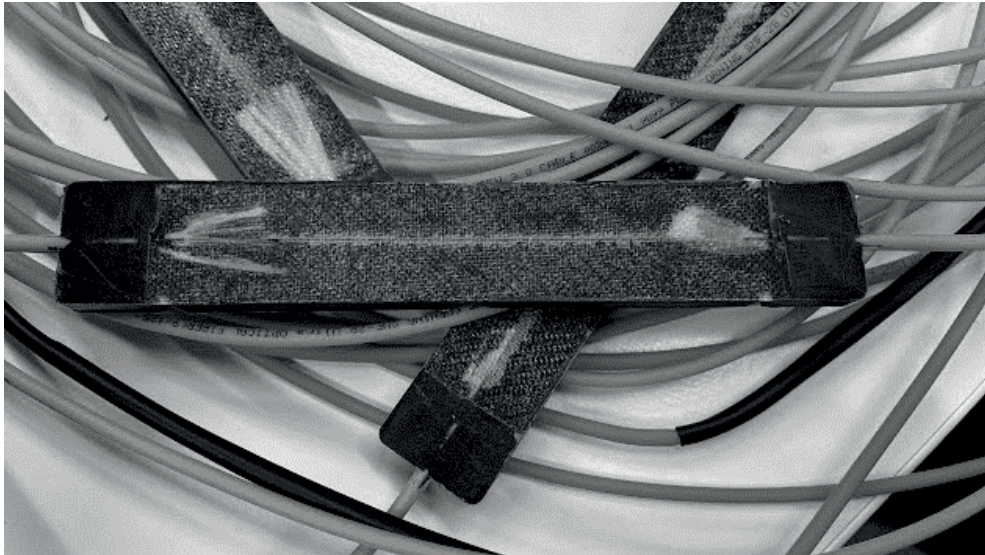


Abb. 2: FBG-Sensor (Rückseite)

Die Abbildung 2 zeigt drei FBG Composite-Sensoren samt Anschlusskabeln von ihrer Rückseite. Der eigentliche Dehnungsaufnehmer ist hierbei in ein Kunststoffgehäuse eingegossen und somit sehr unempfindlich gegenüber externen Einflüssen. Eine Beschichtung mit PU-Lack oder Kautschuk, wie von metallischen DMS bekannt, ist bei faseroptischen Installationen nicht erforderlich.

Die Gehäusegröße beträgt für Composite-Sensoren 20 x 130 mm, wobei jedoch nicht die gesamte Höhe eine Aufnahme von Dehnungen erlaubt. Es sind zudem auch Bauformen zum Einbetonieren sowie für eine Applikation mittels Punktschweißung verfügbar, die insbesondere bei Installationen hilfreich ist, bei denen eine Trocknungszeit nicht abgewartet werden kann.

Dehnungssensoren (Composite-Strain-Sensor) und Temperatursensoren (Composite-Temperature-Sensor) sind äußerlich gleich, unterscheiden sich nur durch die Tatsache, dass der faseroptische Kern des Temperatursensors keine kraftschlüssige Verbindung mit dem Material eingeht, auf das er geklebt wird. Er könnte alternativ auch über Klebeband oder Kabelbinder montiert werden, sofern nicht die unmittelbare Oberflächentemperatur des Materials gemessen werden soll.

Für die Datenerfassung der FBG-Sensoren stehen herstellenseitig zwei Varianten zur Verfügung, das „portable Bragg Meter“ (Abb. 3) mit eigenem Display sowie der MXFS Interrogator (Abb. 4) als „Headless-System“, das auf Hutschiene montiert werden kann und auch in diesem Projekt zweifach zum Einsatz kam.

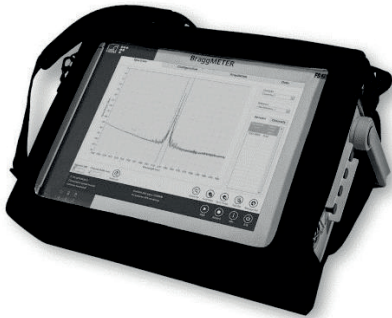


Abb. 3: HBK portable Bragg Meter



Abb. 4: HBK MXFS Interrogator

Der MXFS Interrogator (Abb. 4) besitzt insgesamt 8 Eingänge mit jeweils 16 Kanälen, kann also gleichzeitig 128 Sensoren auslesen. Er wird über 24 V betrieben und ist somit „batterietauglich“.

Interessant ist auch die in diesem Projekt genutzte Möglichkeit, zwei parallel laufende MXFS über die vorhandenen Ethernet-Schnittstelle im Bereich weniger Millisekunden zeitlich zu synchronisieren, was insbesondere für dynamische Messungen von erheblichem Vorteil ist.

Das in Abbildung 3 abgebildete portable Bragg Meter eignet sich vor allem für die Prüfung der Installation sowie der Leitungsqualität vor Ort oder während der Vorbereitung im Büro.

1.2 Vor- und Nachteile faseroptischer DMS

Einer der wesentlichen Vorteile der faseroptischen Messtechnik ist insbesondere bei linearen Installationen, wie sie bei Ingenieurbauwerken oder hier bei Achsen von Dachtragwerken vorkommen, die serielle Verkabelung aller Sensoren.

Zudem wird für die Ankopplung optischer Sensoren nur eine Leitungsfaser benötigt, im Gegensatz zu metallischen DMS, bei denen bei größeren Leitungslängen die Sechsen-Leiter-Technik zum Einsatz kommt, um Spannungsabfall und Widerstandsdifferenzen entlang des Kabels und zwischen den Adern messtechnisch zu kompensieren.

Eine Installation metallischer DMS kann zudem nicht über derart große Entfernungen stattfinden, sodass die entsprechenden Messverstärker im vorliegenden Fall innerhalb der Dachstruktur hätten installiert werden müssen, inklusive der Leitungsführung für 230 V und Datenkommunikation zum Messrechner, was durch faseroptische Sensoren vermieden wurde.

Die Signalleitung ist allerdings gleichzeitig die Achillesferse der faseroptischen Messtechnik, da sie Mindeststrahlen für die Verlesung, in diesem Fall von 30 mm, voraussetzt und anfällig gegen Knickungen ist. Die Empfindlichkeit der Kabel, respektive des Glasfaserkerns mit einem Durchmesser von nur wenigen Mikrometern, kann beispielsweise dazu führen, dass alleine durch das Eigengewicht eines von der Decke hängenden Kabels Knicke entstehen können, die zu einer Kappung des Messsignals führen und im verlegten Zustand optisch häufig nicht zu erkennen sind.

Sehr hilfreich ist hierbei allerdings die Möglichkeit, die „Sichtbarkeit“ eines jeden Sensors entlang des Kabels in der Spektraldarstellung bereits während der Installation prüfen zu können. Hierdurch können Schadstellen im Kabel mit vertretbarem Aufwand direkt vor Ort ermittelt werden.

Grundsätzlich sind die meisten Sensoren mit offenem Kabel wie auch mit Stecker lieferbar, die Dämpfung an Steckverbindungen verhindert jedoch die Installation längerer Linien mit vielen Sensoren. In diesem Fall, der auch für Permanentinstallationen zu empfehlen ist, muss das Splicing in der Regel vor Ort stattfinden.

Ein weiterer Vorteil faseroptischer Sensoren ist die Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störquellen, die Korrosionsfreiheit sowie die Möglichkeit, bestehende Kabeltrassen ohne weiteres zu nutzen, was auch in diesem Projekt von großem Vorteil war.

Auch das stromlose Messprinzip macht sich in Fällen positiv bemerkbar, in denen Installationen in feuchten Umgebungen oder gar unter Wasser dauerhaft betrieben werden sollen. Die Installation kann in diesen Fällen auch mittels Punktschweißung erfolgen, falls eine trockene Oberfläche für das Kleben von Composite-Sensoren nicht gewährleistet werden kann.

2 Projekt Monitoring Dachstruktur

2.1 Aufgabenstellung

Für die statische Nachrechnung einer großen Produktionshalle mit einer Länge von mehr als 200 m sollte die Tragwerksstruktur der Dachkonstruktion auf Zug-Druck-Verformungen im Hinblick auf die Häufigkeit von Lastwechseln, aber insbesondere auch bezüglich der Größenordnung der Zug-Druck-Deformationen hin untersucht werden.

Eine Besonderheit dieser Halle ist, dass insgesamt vier große Hallenkräne mit jeweils zwei daran laufenden Traversen und darunter verfahrbaren Katzen an der Dachkonstruktion aufgehängt sind. Diese Kräne hängen an an jeweils drei Achsen der Fachwerkträger und werden über eine Distanz von bis zu 200 m betrieben.

Abbildung 5 zeigt einen der Fachwerkträger entlang einer Hauptachse des Tragwerks mit dem darunter befindlichen Kranbahnträger.

Auf Basis der in Kapitel 1.2 genannten Vorteile faseroptischer Sensorik sowie der durch den Produktionsbetrieb gesetzten engen zeitlichen Rahmenbedingungen für die Installation des Monitoringsystems, wurden faseroptische DMS für diese Messaufgabe gewählt. Bedingt durch die bereits langjährige Zusammenarbeit mit der Firma HBM (heute HBK) im Bereich der metallischen DMS wurde das MXFS System von HBM für dieses Projekt favorisiert.

Zur statischen Nachrechnung und Bewertung der Restlebensdauer im Hinblick auf eine Intensivierung der Krannutzung sollte an insgesamt 94 Positionen die Zug- beziehungsweise Druckbelastung der Fachwerkträger kontinuierlich während des Betriebes, also den realen Lastsituation, durch ein permanentes Monitoringsystem gemessen werden.

Zusätzlich wurden über die gesamte Halle insgesamt 20 Temperatursensoren installiert, um trotz vorhandener Klimatisierung der Halle mögliche systematische Effekte durch Temperaturexpansion kompensieren zu können.

Aufgrund der sehr guten Ergebnisse des installierten Monitoringsystems wurde die Installation in einer zweiten Phase um 36 weitere DMS sowie 5 Temperatursensoren erweitert, so dass das System aktuell in einer finalen Ausbaustufe mit 130 faseroptischen DMS und 25 Temperatursensoren arbeitet.



Abb. 5: Dachstruktur mit Fachwerkträger und darunter befindlichem Kranbahnbalcken

2.2 Installation der faseroptischen DMS

Die Installation der DMS in der Dachstruktur erfolgte von den in der Halle befindlichen Kränen aus unter Beachtung der notwendigen Absicherung. Um Überschneidungen mit dem Produktionsbetrieb zu vermeiden, wurden alle Installationen am Wochenende durchgeführt.

Die Installation erfolgte in insgesamt 4 Schritten:

1. Vorbereitung der Messstelle
2. Kleben der Sensoren und Verlegen der faseroptischen Kabel
3. Splicen der faseroptischen Leitungen
4. Konfiguration der Sensorik und Kalibrierung der Gesamtsystems

Für die Qualität der Messwerte ist insbesondere eine sorgfältige Vorbereitung der Applikationsstelle von entscheidender Bedeutung. Im Falle der Fachwerkträger war die Installationsstelle auf einer Fläche von 4 x 15 cm zunächst von der vorhandenen Korrosionsschutzbeschichtung zu befreien, wofür ein Dreiecksschleifer mit Absaugvorrichtung verwendet wurde.

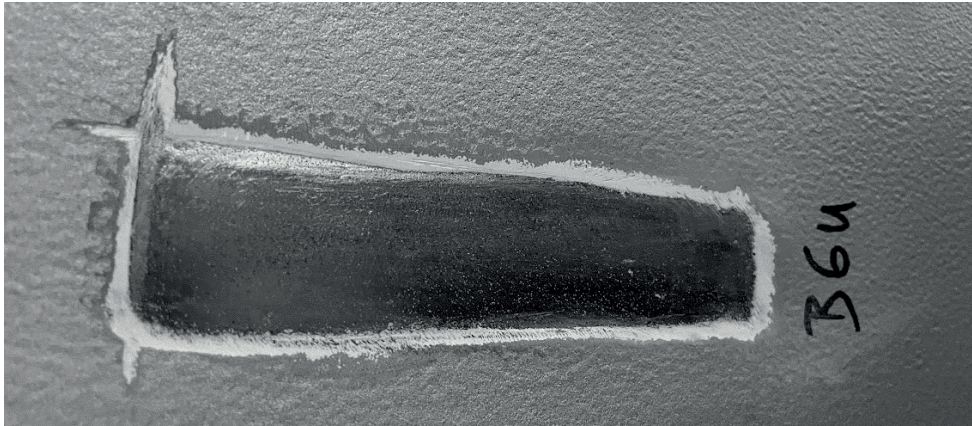


Abb. 6: Installationsstelle mit entfernter Korrosionsschutzbeschichtung

Anschließend wurde die Installationsstelle in mehreren Durchgängen intensiv mit Reinigungsalkohol gesäubert, um eine möglichst kraftschlüssige Verbindung der Sensoren mit der Metalloberfläche zu gewährleisten. Aufgrund der Höhe des Installationsortes von etwa 25 m und der dadurch erforderlichen Absturzsicherung sowie der Sicherung sämtlicher Werkzeuge und Installationsmittel konnte im Durchschnitt eine Installationsstelle je 20 min vorbereitet werden.



Abb. 7: Installierter DMS an einem Fachwerkträger

Die Vorbereitung in Form des Abschleifens sowie der Reinigung wurde aus logistischen Gründen vor dem eigentlichen Kleben der Sensoren durchgeführt, da von einer Kranposition aus an bis zu drei Achsen gleichzeitig gearbeitet werden konnte.

Das Kleben der faseroptischen Sensoren erfolgte in einem zweiten Schritt zusammen mit dem Verlegen der zuvor im Büro gespliceten Anschlussleitungen der Sensoren zum jeweils nächsten DMS.

Als Klebstoff kam ein Zwei-Komponenten-Kleber vom Typ DP490 des Herstellers 3M zum Einsatz, der je nach Temperatur eine Aushärtezeit zwischen 24 und 48 Stunden besitzt. Für die Montage wurden je Sensor vier Ringmagnete mit Öse verwendet, um einen konstanten Anpressdruck der Sensoren auf die Materialoberfläche während der Aushärtezeit zu gewährleisten. Auch die Magnete wurden mit Kabelbindern vor dem Hertunterfallen gesichert.

Abbildung 7 zeigt die Klebestelle vor dem Splicen des Kabels mit fixierten Leitungen, um die minimalen Biegeradien von 30 mm während der weiteren Montage nicht zu unterschreiten. Das Klebeband wurde nach Aushärten durch Klebesockel und Kabelbinder ersetzt.

Direkt im Anschluss an das Kleben der Sensoren erfolgte die Ankopplung des Sensors an das LWL-Kabel, das bereits vom Vorsensor an die neue Installationsstelle herangelegt wurde.



Abb. 8: Splicen der Zuleitung zum Sensor in der Dachstruktur

Abbildung 8 zeigt das Splicen der Zuleitung zum Sensor in der Dachstruktur. Als sehr vorteilhaft erweist sich hierbei die Möglichkeit, das Splicegerät batteriebetrieben zu nutzen, sodass auf eine Stromzuleitung verzichtet werden kann.

Auch die direkte Funktionsprüfung des Sensors, sofern die Line aus Sicht des Datenloggers nach „hinten“ heraus erweitert wird, ist bereits direkt nach dem Kleben möglich. Dieser Umstand erweist sich nicht zuletzt wegen der Knickanfälligkeit der Sensorkabel als sehr vorteilhaft, auch wenn vor dem Aushärten des Klebers noch keine Deformationen aufgezeichnet werden können.