

Auswahl von FBG-basierten optischen Sensoren, Interrogatoren und Software für zuverlässige Messungen

Autor

Cristina Barbosa,
Produktmanagerin, Optik

HBM Test and Measurement



Faser-Bragg-Gitter (FBG)-basierte optische Messketten – eine Einführung

Dieser Artikel soll Systemintegratoren und Ingenieuren dabei helfen, die passenden Komponenten für optische Multiphysik-Überwachungslösungen auszuwählen. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da alle wichtigen Bauwerke - wie Brücken, Gebäude, Rohrleitungen und Tunnel - Dehnung und Strukturschädigungen verursachenden Faktoren ausgesetzt sind. Ohne eine zuverlässige und genaue Überwachung von Dehnung, Temperatur und anderen physikalischen Parametern werden Fehlfunktionen und strukturelle Probleme möglicherweise nicht erkannt, was katastrophale Folgen haben kann.

Im Folgenden werden wir die Strukturüberwachung (SHM – Structural Health Monitoring) als Disziplin betrachten und Ihnen zeigen, wie eine typische optische Messkette auf Basis von Faser-Bragg-Gittern (FBG) – mit mehreren Sensoren in einer Glasfaser, Interrogatoren und PC-Software – einfach gestaltet werden kann.



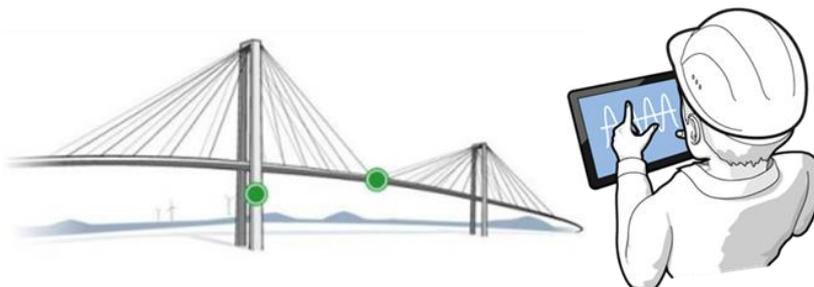
Eine typische optische Messkette: Kombinieren Sie die FBG-Sensoren von HBM mit den optischen Interrogatoren und der Schnittstelle zur Überwachung Ihrer Anwendung..

Strukturüberwachung - Ausfälle vermeiden, anstatt Schäden zu reparieren

Große und teure Bauwerke wie Tunnel, Brücken und Rohrleitungen benötigen eine regelmäßige, kostengünstige Überwachung ihrer baulichen Unversehrtheit. Dies gewährleistet Sicherheit und Zuverlässigkeit.

Die Strukturüberwachung (SHM) spielt hier eine entscheidende Rolle [1], da sie einen proaktiven Ansatz bei Wartung und Überwachung verfolgt, anstatt auf Schäden zu warten und sie dann zu reparieren. Diese proaktive Vorgehensweise kann Geld sparen und ungeplante Ausfallzeiten der Struktur verhindern.

Aus Kostengründen, Unsicherheit, welche Sensoren verwendet werden sollen, und aufgrund von Schwierigkeiten bei der Interpretation von Dehnungsdaten wird die Notwendigkeit des Aufbaus einer zuverlässigen und genauen Strukturüberwachung wichtiger Infrastruktur jedoch häufig außer Acht gelassen. Dies wird zu einem Problem, wenn durch Dehnung verursachte strukturelle Schäden auftreten. Und das geschieht regelmäßig, da die zivile Infrastruktur ständigen Belastungen und Umwelteinflüssen ausgesetzt ist, die im Laufe der Zeit Verschleiß und Strukturschädigungen verursachen.



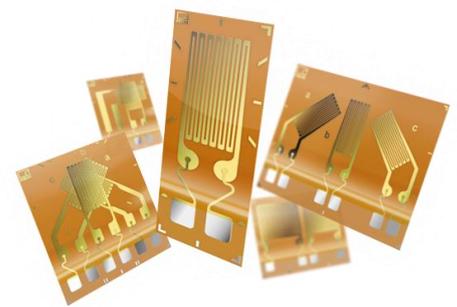
So verschlechtert sich der Zustand von Brücken durch steigendes Verkehrsaufkommen, Klimaveränderungen und widrige Witterungsbedingungen [2-3]. Auch schlechte Bauweisen, seismische Aktivität und Bautätigkeiten in unmittelbarer Nähe spielen eine Rolle [4]. Und ohne konsequente Überwachung ist es unmöglich, Fehlfunktionen und strukturelle Probleme zu erkennen oder vorherzusagen, was katastrophale Folgen haben kann. In den Vereinigten Staaten muss jede Brücke alle zwei Jahre einer Sichtprüfung unterzogen werden, um zu verhindern, dass es zu solchen Strukturproblemen kommt [5].

Laut der ASCE 2017 Infrastructure Report Card haben jedoch nahezu 10 % der Brücken in den Vereinigten Staaten irgendwie geartete Strukturprobleme, die sie anfällig machen [6]. Und in Kanada weist fast ein Drittel der rund 75.000 Autobahnbrücken strukturelle Mängel auf [7]. Wenn diese strukturellen Mängel nicht identifiziert und behoben werden, kann dies zu hohen Wartungskosten, zur Sperrung lokaler Infrastruktur und – im schlimmsten Fall – zum Einsturz eines Bauwerks und Todesfällen führen. Daher gibt es einen riesigen Markt für Technologie, die hilft, Infrastrukturverschleiß einfach und kostengünstig zu überwachen [8].

Verwendung von konventionellen resistiven Dehnungssensoren

Seit den 1940er Jahren ist der resistive Dehnungsmessstreifen der Maßstab für die Dehnungsüberwachung an Bauwerken [9]. Resistive Dehnungsmessstreifen bringen jedoch bestimmte Einschränkungen mit sich, was manchmal einfache und zuverlässige Messungen erschwert.

Beispielsweise kann die Anzahl der benötigten Elektrokabel sich als Herausforderung erweisen. Grund dafür ist, dass lange Kabel teuer sind und viele von ihnen bei der Verwendung in großen Bauwerken mit vielen Messstellen schwer zu handhaben sind [10], trotz technischer Lösungen zur Messung elektrischer Dehnung über Entfernungen von bis zu mehreren hundert Metern und für beide Technologien [4].



Faser-Bragg-Gitter-Technologie: Eine innovative Lösung für die Strukturüberwachung

Optische Sensoren, die auf der Fiber-Bragg-Gitter (FBG)-Technologie basieren, bieten eine attraktive Alternative zu herkömmlichen elektrischen Messketten.

Denn die FBG-Technologie bietet Vorteile wie die Möglichkeit der Verwendung mehrerer Sensoren in einer einzigen Glasfaser, eine insgesamt leichte, passive Bauweise und eine geringe Dämpfung, die eine Installation über große Entfernungen ermöglicht. Diese Technologie ist zudem unempfindlich gegen elektromagnetische Störungen (EMI) und Sensoren sind stabiler gegenüber Umwelteinflüssen als elektrische Dehnungsmessstreifen (daher können sie rauen Bedingungen standhalten). Darüber hinaus sind sie preislich wettbewerbsfähig, wenn es um eine mittlere bis hohe Kanalanzahl und die Gesamtkosten geht [12, 13].

Die Vorteile von FBG-basierten Sensoren:



- Unempfindlich gegen elektromagnetische Störeinflüsse (EMI)
- Geringe Dämpfung, Installation über große Entfernungen möglich
Mehrere Sensoren in derselben Leitung möglich. Dies reduziert Kabellänge und Komplexität und vereinfacht die Installation, was kostengünstiger ist
- Hält rauen Bedingungen stand und minimiert den Bedarf an komplexen oder teuren Schutzlösungen
- Langfristige Signalstabilität (keine Drift) mit absoluter Null Referenz (zugehörige Messungen auch bei zeitlicher Streuung)

Anwendungsfelder der FBG-Technologie

Durch die Möglichkeit der einfachen Verwendung mit der Software Ihres Lieferanten und Integration in jeden Einzel-PC hat die FBG-Technologie im Laufe der Zeit einen großen Marktanteil erreicht. Sie wird jetzt in einer Vielzahl von Sensoranwendungen eingesetzt [13].

So wird sie beispielsweise in verschiedenen Anwendungen zur Strukturüberwachung im Bauingenieurwesen eingesetzt, einschließlich Straßen- und Eisenbahninfrastruktur, jedoch auch in Bereichen wie geologische Strukturen, Öl und Gas, Überwachung von Schiffsrümpfen in der Schiffsindustrie, Luft- und Raumfahrtindustrie und bei der Temperaturvalidierung in der Automobilindustrie..

Weitere Vorteile der FBG-Technologie:

- Multiplexing von vielen und sogar unterschiedlichen Sensoren in einer Faser. In diesem Fall weisen alle Sensoren verschiedene Wellenlängen auf, wodurch sich der für das Sensornetzwerk erforderliche Verdrahtungsaufwand verringert.
- Langfristige Signalstabilität und hohe Systemlebensdauer, auch bei großen Schwingungsbelastungen. Dadurch ist es weniger wahrscheinlich, dass Sensoren auf Fahrbahnen und Brücken, wo es durch steigendes Verkehrsaufkommen zu Bauwerksverschleiß kommt, ausfallen.
- Entfernung und Kabellänge wirken sich nur minimal auf die Messgenauigkeit aus. Da FBG-Sensoren eine geringe Dämpfung aufweisen, sind die Daten immer zuverlässig. Dies gilt auch dann, wenn das Datenerfassungssystem mehrere Kilometer vom am weitesten entfernten Sensor positioniert ist.
- Glasfasern sind im Vergleich zu Kupferkabeln dünner und leicht.
- Und, wie bereits erwähnt, wird die FBG-Technologie in keiner Weise von elektromagnetischen Störungen (EMI) oder Hochfrequenzstörungen (RFI) beeinflusst, was eine Sensorinstallation in der Nähe sicherheitskritischer Bauteile wie Bahnoberleitungen und Stromabnehmer ermöglicht.
- Diese FBG-Sensoren können auch in Umgebungen mit hoher Explosionsgefahr und unter anderen rauen Bedingungen eingesetzt werden.



Optische Messketten: Das Komplettpaket für SHM

Der passende Sensor stellt nur ein Drittel der Lösung für eine optische Komplettmesskette dar. Darüber hinaus benötigen Sie den passenden optischen Interrogator und die richtige Software, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen.

Und diese drei Bestandteile - Sensor, Interrogator und Software - bilden Ihre optische Komplettmesskette.

Kurz gesagt, der Sensor misst Spannung, Temperatur, Beschleunigung, Kraft oder sogar Neigung. Der optische Interrogator (die zweite Komponente der Kette) wird auch als Datenerfassungssystem bezeichnet. Es handelt sich um ein optoelektronisches Instrument, das die FBG-Sensoren 'liest'. Und mit der Software können Sie Ihre Messdaten anzeigen, aufzeichnen und analysieren.



Worauf sollten Sie bei der Auswahl dieser Komponenten achten?

1. Sensorik

Hier sind einige Fragen, die es zu stellen, und Dinge, die es zu beachten gilt, wenn es um die Auswahl der passenden, auf der FBG-Technologie basierenden optischen Sensoren geht:

- Wo sollen die Sensoren installiert werden und welches ist das bevorzugte Installationsverfahren? Sensoren können je nach Ausführung verschraubt, geschweißt oder verklebt werden, was bedeutet, dass ein bevorzugtes Installationsverfahren Ihre Optionen eingrenzen kann. Bei einer metallischen Struktur beispielsweise ist das Punktschweißen die erste Wahl; handelt es sich bei der Struktur jedoch um einen LNG-Tank (explosionsgefährdete Umgebung), müssen wir möglicherweise auf die Oberfläche geklebte Sensoren umsteigen.
- Wie groß ist der erwartete Messbereich an jeder Messstelle? Und was ist mit Ermüdungsbeständigkeit? Verschiedene Sensoren haben unterschiedliche Mess- und Ermüdungsgrenzen. Die erforderlichen Messungen können die Anzahl der zur Auswahl stehenden Sensoren begrenzen.
- Wie hoch ist das Know-how Ihres Installationsteams? Sensoren und Sensor-Arrays können entweder mit Steckern geliefert werden, um eine einfache Installation zu ermöglichen, ohne dass spezielle Werkzeuge oder Schulungen erforderlich sind, oder aber ohne Stecker für mehr Flexibilität. Dies erfordert jedoch auch ein Team, das für die Durchführung der Spleißverbindungen vor Ort zur Verfügung steht.
- Welcher Umgebung werden die Sensoren ausgesetzt? Müssen sie dielektrisch sein? Benötigen sie verstärkte Kabel? Unterschiedliche Sensoren bieten unterschiedliche Schutzniveaus für den Sensor selbst und die Kabel.

2. Interrogatoren

Bedenken Sie, dass Ihr Interrogator die von Ihren Sensoren erzeugten Werte messen soll. Hier sind einige Dinge, auf die Sie bei der Wahl eines Interrogators achten sollten:

- Wie hoch ist die erforderliche Abtastrate? Eins der Ausschlusskriterien für das zu verwendende Modell ist die Erfassungsgeschwindigkeit des Geräts.
- Welche absolute Genauigkeit wird bei der Wellenlängenmessung benötigt? Bei FBG-Sensoren kann die Auflösung und absolute Genauigkeit bestimmt werden, und zwar nicht nur mit den Fehlern, die mit den Kalibrierverfahren verbunden sind, sondern auch mit der Auflösung und Genauigkeit des Interrogators in Kombination mit dem Kennwert der Sensoren. Einige Geräte verfügen über einen absoluten, auf NIST rückführbaren Bezug, der höhere Genauigkeiten bei der Bestimmung der Wellenlänge jedes FBG gewährleistet.
- Wie viele Faser-Bragg-Gitter sollen gemessen werden? Der verfügbare Wellenlängenbereich der Interrogatoren zusammen mit der Anzahl der optischen Anschlüsse entspricht der Messleistung des Systems. Die Anzahl der Sensoren, die mit jedem Gerät gemessen werden können, ist von mehreren Faktoren abhängig:
 - dem Wellenlängenbereich, den jeder Sensor für die gesamte Messung benötigt, im Verhältnis zum verfügbaren Wellenlängenbereich des Geräts
 - den optischen Verlusten in der Sensorleitung durch Verbindungen und Verkabelung im Verhältnis zum Dynamikbereich des Geräts
 - der Verarbeitungskapazität des Geräts
- Suchen Sie nach einem Industriegerät für den Dauerbetrieb oder nach einem System, das in Tests oder während der Installation eingesetzt werden soll? Geräte mit Batterien und integrierten Computern können eine bessere Wahl für kurzzeitige und räumlich getrennte Messungen sein. Andere Geräte sind in verschiedenen Formfaktoren erhältlich und eignen sich ideal beispielsweise für den Einbau in 19-Zoll-Racks.
- Welches Maß an Softwarekomplexität benötigt Ihr System? Nicht jede Software ist mit allen Interrogatortypen kompatibel.

3. Software

Bei der Auswahl der Software sind einige wichtige Aspekte zu beachten:

- Wie benutzerfreundlich ist die Software-Oberfläche? Welche Art von visuellem Feedback ist erforderlich? Komplexe und schwer bedienbare Software kann unnötige Probleme verursachen, und ohne Software oder Treiber ist zum Betrieb des Geräts ein Team von spezialisierten Entwicklern erforderlich.
- In welcher Form benötigen Sie die Messdaten? Sind Cloud-Speicherung und IoT-Streaming erforderlich? Können Sie die Daten auf einem USB-Laufwerk speichern?
- Gibt es mehrere Geräte im Messsystem, die eine synchronisierte Messung erforderlich machen? Komplexere Software ermöglicht die Kombination von mehr als einem Gerät (einschließlich verschiedener Gerätetypen), wohingegen einfachere Software auf ein einzelnes Gerät beschränkt ist

- Wird die Software für eine einzige Anwendung benötigt? Ein vielseitiges Softwaresystem kann gleichermaßen zuverlässig sowohl für den mobilen Einsatz vor Ort als auch für Labortests sein.
- Ist der Bediener mit Englisch vertraut? Nicht alle Softwareoptionen sind in verschiedenen Sprachen verfügbar.

Fazit

Optische Sensoren auf der Basis der Faser-Bragg-Gitter-Technologie haben viele Vorteile gegenüber herkömmlichen resistiven Dehnungsmessstreifen. Beide Sensortypen können sich in verschiedenen Anwendungen auch ergänzen, von den Bereichen zivile Infrastruktur über Luft- und Raumfahrt bis hin zu Labortests und Energie.

Um diese Vorteile nutzen zu können, müssen Sie jedoch die richtigen Sensoren, Interrogatoren und Software für Ihre optische Messkette auswählen. Wir hoffen, dass diese kurze Darstellung der Grundlagen Ingenieuren und Systemintegratoren helfen kann, die richtigen Entscheidungen zu treffen, wenn es um genaue und zuverlässige Dehnungsmessungen geht..

Über Produkte und Dienstleistungen von HBM

Ingenieure weltweit verlassen sich auf genaue und zuverlässige Messdaten, die mit Sensoren, Interrogatoren und Software von HBM erfasst werden.

So ermöglichen unsere optischen Sensoren der Produktlinie newLight – basierend auf der FBG-Technologie – große Dehnungsmessbereiche mit Langzeitstabilität. Diese Sensoren sind die beste Wahl für die Strukturüberwachung (SHM), da sie schnell und einfach installiert werden können und auch für raue Umgebungen geeignet sind.

Auf Interrogatorseite bieten Geräte von HBM rund um die Uhr hochauflösende statische und dynamische Messungen. So haben wir beispielsweise das brandneue Modell MXFS für die Strukturüberwachung entwickelt. Zusammen mit unseren optischen Sensoren sorgt dieser Interrogator für eine ununterbrochene Messkette.

Das letzte Glied in Ihrer optischen Messkette ist schließlich die Software von HBM. Unsere Datenerfassungssoftware (beispielsweise catman) verwaltet Millionen von Datensätzen und hilft Ihnen, schnell zu Ergebnissen zu kommen.

Ein wichtiger Vorteil der Produkte von HBM ist die Möglichkeit, Sensoren, Interrogatoren und Software entsprechend Ihren Anforderungen zu kombinieren. Wir bieten ein komplettes Produktportfolio für SHM, das Ihnen alles an die Hand gibt, was Sie für genaue und zuverlässige Dehnungsmessungen benötigen. Tabelle 1 unten zeigt die Kompatibilität von Interrogatoren und Software von HBM. Für weitere Informationen zu diesen Produkten und zur Auswahl der passenden Komponenten für Ihre optische Messkette, wenden Sie sich bitte an uns.

Quellen

[1] Engineering.com, "Italy's Morandi Bridge Collapse—What Do We Know?", 2018.
<https://new.engineering.com/story/italys-morandi-bridge-collapse-what-do-we-know>

[2] Alampalli, S., Ettouney, M., "Role of Structural Health Monitoring In Bridge Security". Bridge Structures 4(3,4), 143-154, 2008.
https://www.researchgate.net/publication/245494458_Role_of_structural_health_monitoring_in_bridge_security

[3] E.Cheilakou et al. "Strain Monitoring System For Steel And Concrete Structures" Procedia Structural Integrity 10, 25-32, 2018.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532>

[4] Cristina Barbosa "Optical Fiber Sensors vs. Conventional Electrical Strain Gauges for Infrastructure Monitoring Applications", HBM.
<https://www.hbm.com/en/6482/white-paper-optical-fiber-sensors-vs-conventional-electrical-strain-gauges/>

[5] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, "State of the Practice and Art for Structural Health Monitoring of Bridge Substructures" (No. FHWA-HRT-09-040)], 2014.
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/09040/>

[6] American Society of Civil Engineers, 2017 Infrastructure Report Card, 2017.
<https://www.infrastructurereportcard.org/cat-item/bridges/>

- [7] National Research Council Canada (NRCC), Construction Innovation, "Critical Concrete Infrastructure: Extending The Life of Canada's Bridge Network".
<https://www.nrc-cnrc.gc.ca/ci-ic/en/article/v18n1-5/>
- [8] Gastineau, A., Johnson, T., & Schult A. "Bridge Health Monitoring and Inspections—A Survey of Methods", Minnesota Department of Transportation, 2009.
https://www.researchgate.net/publication/282912591_Bridge_Health_Monitoring_and_Inspection_-_A_Survey_of_Methods
- [9] The Strain Gauge User's Handbook, Chapman and Hall, 1992.
https://books.google.co.uk/books?id=YrNr00vhF_gC&printsec=frontcover&dq=resistive+strain+gauges&hl=en&sa=X&ved=0ahUKewjBxdDgxMvjAhVJTSAKHWQIAroQ6AEIKjAA#v=onepage&q=resistive%20strain%20gauges&f=false
- [10] Ramakrishnan et al. "Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials", Sensors, 16 (1), 99, 2016. <https://doi.org/10.3390/s16010099>
- [11] Vishay Precision Group, "Noise Control in Strain Gage Measurements" Tech Note TN-501-2.
<http://www.vishaypg.com/docs/11051/tn501.pdf>
- [12] Sabri et al. "Fiber Optic Sensors: Short Review and Applications", DOI: 10.1007/978-981-287-128-2_19, 2015.
https://www.researchgate.net/publication/278680033_Fiber_Optic_Sensors_Short_Review_and_Applications
- [13] Campanella et al., "Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications", Sensors, 18(9):3115, 2018.
https://www.researchgate.net/publication/327710750_Fibre_Bragg_Grating_Based_Strain_Sensors_Review_of_Technology_and_Applications
- [14] Peters et al. "Fiber Optic Sensors For Assessing And Monitoring Civil Infrastructures", Sensor Technologies for Civil Infrastructures, 1, 121-158, 2014. <https://doi.org/10.1533/9780857099136.121>
- [15] Ma et al. "Fiber Bragg Gratings Sensors for Aircraft Wing Shape Measurement: Recent Applications and Technical Analysis", Sensors (Basel), 19(1): 55, 2019.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6339136/>