

Modellierung und Laboruntersuchung der Dämpfung von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG) in Membran-Fassadenelementen mit einem photogrammetrischen Dehnungsmesssystem

Eike Barnefske, Friedrich Keller, Artjom Klimaschewski, Kai Schramme, Annette Bögle und Harald Sternberg

Zusammenfassung

Gebäude mit intelligenten Membranelementen als Fassade reagieren auf Licht- und Windeinflüsse durch selbstständiges Anpassen der Verhüllung. Das selbstständige Verhüllen schont die Umwelt und trägt zu einem optimalen Gebäudeklima bei. Zur Minimierung des Verschleißes der Membran muss die Membrandehnung kontrolliert und die Spannkraft angepasst werden. Für die Bestimmung von Materialdehnungen unter Laborbedingungen ist das photogrammetrische Dehnungsmesssystem GOM ARAMIS ein etabliertes Messsystem. An Gebäudefassaden aus Membranen können Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG) installiert und Materialdehnungen bestimmt werden. Die Installation der FBG-Sensoren führt zu einer Membranversteifung und gedämpfte Dehnungen werden gemessen. Diese Arbeit untersucht den Einsatz von FBG-Sensoren und ARAMIS für Dehnungsmessungen bei Membran-Fassaden. Die Dämpfung der FBG-Sensoren wird mittels einer linearen Übergangsfunktion und einem nicht-linearen künstlichen neuronalen Netz (KNN) modelliert und getestet.

Summary

Buildings with intelligent façades made of membrane elements respond to the influences of light and wind by automatically adopting their envelope. The automated covering reanalyzed by stretching the membrane, contributes to an eco-friendly and optimal climate inside the building. To minimize the wearing of the membrane at any state, the strain of the membrane is monitored and the clamping force is controlled. ARAMIS is a standard method for measuring material expansion under laboratory conditions. Fiber-Bragg-Grating-sensors (FBG) can be installed on a building façade made of membranes and allow the measurement of strain within the membrane. The installation of sensors causes stiffening, which will be registered as a subdued expansion by the FBG sensors. This work investigates the use of FBG sensors and ARAMIS for strain measurements of membrane façades. The subdued expansion of the FBG sensor is modeled by a linear transfer function and a non-linear artificial neural network (ANN).

Schlüsselwörter: Faseroptische Dehnungsmessung, ARAMIS, FBG, intelligente Fassade, KNN, lineare Übergangsfunktion

1 Einleitung

Ein umweltschonendes und optimales Raumklima in Gebäuden kann durch intelligente Fassaden aus Membranelementen erzielt werden. Membranen als Gebäudehülle finden heute verbreitet Anwendung bei Stadien, wie



Krasach 2016

Abb. 1: Dachkonstruktion des Hamburger Volksparkstadions

bei dem Hazza Bin Zayed Stadion (Vereinigte Arabische Emirate) oder dem Dach des Hamburger Volksparkstadions (Abb. 1). Die Membranelemente der intelligenten Fassaden bestehen aus gespanntem Polyesterstoff oder Textilien. Ein selbstständiges Öffnen und Verhüllen des Gebäudes je nach Lichteinfall, Windlast oder eines anderen Umweltparameters erfolgt durch eine automatisierte Regelung. Um eine Membran über einen Zeitraum von mehreren Jahren ohne nennenswerten Verschleiß zu nutzen und die Geometrie der Gebäudehülle zu bewahren, muss die Spannung der Membran bei wechselnden Umwelteinflüssen aufrechterhalten werden. Eine optimale Spannung der Membran wird durch das Spannen oder Entspannen der Membran über Ankerpunkte erreicht. In einem interdisziplinären Projekt der Studiengänge Bauingenieurwesen und Geomatik an der HafenCity Universität Hamburg wurden die Dehnungseigenschaften einer vorgespannten textilen Membran, die die Form einer Hyperfläche hat, untersucht.

Die Messung der Membrandehnung für die Regelung von Elementen einer intelligenten Fassade stellt eine Vielzahl von Anforderungen an ein Vermessungsverfahren dar. Auf einer dünnen, vorgespannten Membran sind

mehrere Messstellen mit einer Messfrequenz von bis zu 10 Hz zu beobachten. Die Installation des Vermessungssystems muss für eine gesamte Gebäudefassade möglich sein, wobei die Membran so wenig wie möglich durch die Messungen zu beeinflussen ist.



Abb. 2:
Prototyp des Fassadenelements zur Bestimmung von Dehnungen mit FBG-Sensoren und ARAMIS

Die Anforderungen an das Messsystem und die Leistungsuntersuchungen von Dehnungsmesssystemen (Barnefske et al. 2016) sprechen für eine Verwendung von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG), einer speziellen Art von faseroptischen Sensoren (FOS) zur Dehnungsmessung an einer Membran. Eine Vielzahl von FOS können mit geringem Installationsaufwand an einer Messfaser und an verschiedenen Stellen (Woschitz und Brunner 2011) einer Membran installiert werden. Ein Einweben von FOS in eine textile Membran ist aufgrund des geringen Gewichtes und des kompakten Durchmessers (Samiec 2011) eine Installationsmöglichkeit, die nicht die Optik der Fassade beeinflusst und ein Messen von Dehnungen im Gewebe ermöglicht. Die FBG-Sensoren liefern mit einer hohen Messfrequenz und hochauflösten Dehnungsänderungen optimale Eingangswerte für eine automatische adaptive Membran. In einer Versuchsreihe, die im Labor durchgeführt wurde, werden an einem Prototyp des Fassadenelements (Abb. 2) Dehnungen bestimmt und untersucht, die durch ein Verformen der Hyperfläche hervorgerufen werden. Das photogrammetrische Messsystem ARAMIS wurde als Vergleichsmesssystem für die Dehnungsmessung verwendet. Mit dem ARAMIS-System sind ein berührungsloses Messen und das Bestimmen von großen Dehnungen auf Membranen möglich. Die Membranen werden dazu mit einem stochastischen Muster versehen. Das Muster wird händisch oder durch Aufdruck auf die Membran aufgebracht.

Die Installation der FBG-Sensoren auf einer Membran beeinflusst unvermeidbar die Steifigkeit der Membran an den Messstellen. Den Einfluss einer gedämpften Dehnung gilt es festzustellen und an den Messwerten anzuwenden,

um ein automatisches Regeln der Stellung der Membran-Elemente zu ermöglichen.

In dieser Arbeit werden zwei Ansätze der Modellierung einer Dämpfung durch die Installation der FBG-Sensoren vorgestellt und hinsichtlich ihrer Genauigkeit überprüft. Die Modellierung der Dämpfung erfolgt zum einen mittels einer linearen Übergangsfunktion zwischen den gemessenen Dehnungen mit ARAMIS und FBG-Sensoren (Abschnitt 4). Zum anderen wird die Nutzung von nicht-linearen künstlichen neuronalen Netzen (KNN) beim überwachten Lernen in Anlehnung an die Arbeit von Alkaiem et al. (2016) für die Modellierung von Übergängen zwischen den gemessenen Dehnungen herangezogen (Abschnitt 5). Die Übergangsfunktion und das trainierte KNN beschreiben die Beziehung zwischen den Messwerten beider verwendeten Dehnungsmesssysteme. Diese Beziehung ermöglicht das Transformieren der Messwerte der FBG-Dehnungen in den Wertebereich der ARAMIS-Messwerte, die als nicht-gedämpfte Dehnungen im Rahmen der Messgenauigkeit betrachtet werden können.

2 Dehnungsmesssysteme

Photogrammetrische und faseroptische Dehnungsmesssysteme nutzen unterschiedliche Beobachtungsgrößen, um Dehnungen in Bauteilen und Werkstoffen zu detektieren. Je nach Aufgabenstellung, dem zu untersuchenden Material und der geforderten Messgenauigkeit haben die Messsysteme Vorteile für die Dehnungserfassung. Entscheidend für das Messen von Dehnungen in einem Fassadenelement sind, neben der Installationsmöglichkeit in einem System und den damit verbundenen Systemkosten, eine kontinuierliche, automatische Aufzeichnung und Auswertung der Beobachtungen.

2.1 Photogrammetrische Dehnungsmessung

Das photogrammetrische Dehnungsmesssystem ARAMIS der Firma GOM wird als Referenzsystem verwendet, da mit diesem System sowohl faserverstärkte Membrane und nicht verstärkte Membrane flächig beobachtet werden können (Schramme und Bögle 2016). Photogrammetrische Dehnungsmesssysteme werden zur Bestimmung von Deformationen auf der Oberfläche eines Messobjektes verwendet. Vor der Messung muss die Probenoberfläche vorbereitet werden. Die Oberfläche muss ein Muster aufweisen (Abb. 3), damit die Software die Pixel der Kamerabilder eindeutig zuordnen kann. Am besten eignen sich stochastische Muster, die an das Messvolumen, die Kameraauflösung und die Facettengröße angepasst sind. Die Sensoreinheit ist vor jedem Einsatz mit Hilfe eines abgestimmten Kalibrierobjektes zu kalibrieren, um die Maßhaltigkeit der Messergebnisse zu gewährleisten.

Beim ARAMIS-System werden zwei 5M-CCD-Kameras mit 8 mm-Objektiven verwendet. Im Anschluss an

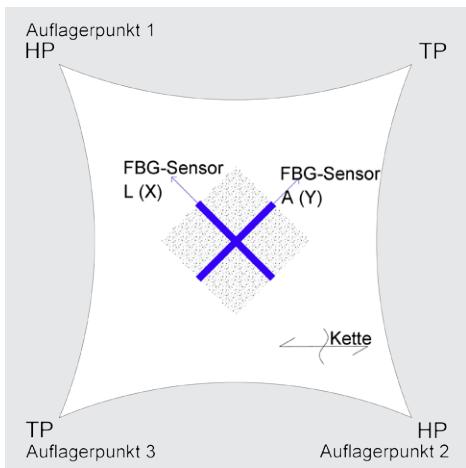


Abb. 3:
Positionen
des sto-
chastischen
Musters
(ARAMIS)
und der
FBG-Sen-
soren

die Oberflächenvorbereitung und die Systemkalibrierung können Bildaufnahmen mit 15 Hz durchgeführt werden. Die Dehnungen der Membran werden in einem Bereich (100×100 mm) in der Mitte der Membran bestimmt (Abb. 3). Dieser Bereich weist die größte zu erwartende Dehnung von bis zu $70.000 \mu\text{m/m}$ auf und ist für die Analyse der Eigenschaften der textilen Membran von größtem Interesse. Die Berechnung der Dehnungen erfolgt anhand der Veränderung der Lage von rechteckigen Bildausschnitten (Facetten). Aus jeder gültigen Facette resultiert nach der Berechnung ein Messpunkt. Die Berechnungszeit und die Genauigkeit sind abhängig von der Facettengröße, der Facettenüberlappung und der Qualität des Kontrastes des aufgebrachten Musters. Die Größe einer quadratischen Facette beträgt bei den durchgeföhrten Versuchen 19 Pixel, was einer Fläche von etwa 13×13 mm entspricht. Dies entspricht der Standardfacette in ARAMIS und ist ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungszeit. Aufgrund der in der Untersuchung gewählten Parameter ist eine theoretische Genauigkeit von $20 \mu\text{m/m}$ zu erwarten. Um eine lückenlose Erfassung zu gewährleisten, überlappen sich die Facetten um 21 % (GOM 2013).

2.2 Faseroptische Dehnungsmessstreifen

Ein faseroptischer Dehnungsmessstreifen ist ein FOS, mit dem mechanische Deformationen und Temperaturänderungen gemessen werden können. FOS-Systeme bestehen aus einer lichtsignal-emittierenden Quelle, einer Photodiode, die das reflektierte Lichtsignal registriert, sowie sensitiven optischen Fasern (Sensor) und Transportfasern. Verschiedene Bauarten von FOS ermöglichen

das hochfrequente Messen von Dehnungen einer gesamten Faser oder an diskreten Stellen (Brunner 2009). Für die Messung von Dehnungen in einer adaptiven Membran-Fassade werden FBG-Sensoren, die an einzelnen relevanten Stellen in der Membran installiert sind, getestet.

Das Spektrum des Lichtsignals für das Messen mit den FBG-Sensoren beträgt in der Untersuchung 1.510 bis 1.555 nm und wird durch einen Interrogator emittiert. Die Lichtwellen dieses Spektrums werden durch die Transportfasern zum FBG-Sensor geführt. Der FBG-Sensor ist ein Bereich der optischen Faser, in dem ein periodisches Gittermuster mit den Abständen (Λ) und einer Brechzahl (n) eingelassen ist. An diesem Gittermuster wird die korrespondierende Wellenlänge des Lichtsignals (λ_B) nach Gl. 1 zurück zum Interrogator reflektiert (Abb. 5). Die reflektierte Welle wird mit einem optischen Spektrometer registriert und einem Sensor zugeordnet (Abb. 4). Lichtwellen, die nicht reflektiert werden, werden weiter durch die optische Faser geleitet, bis diese an einem Gittermuster der korrespondierenden Wellenlänge reflektiert werden oder die Faser endet (Habel und Brunner 2011).

$$\lambda_B = 2 * \Lambda * n \quad (1)$$

Eine Änderung der Wellenlängen (λ_B) jedes Sensors wird durch die mechanische Dehnung oder eine Temperaturänderung hervorgerufen. Aufgrund von geringen Änderungen der Temperatur verändert sich die Länge der optischen Faser und somit der Gitterabstand. Je nach Material der Faser und dem verwendeten Lichtspektrum entspricht eine Wellenlängenänderung ($\Delta\lambda$) von 0,0001 nm einer Temperaturänderung von $0,1^\circ\text{C}$ oder $1 \mu\text{m/mm}$ (Kersey et al. 1997). Unter Annahme einer konstant herrschenden

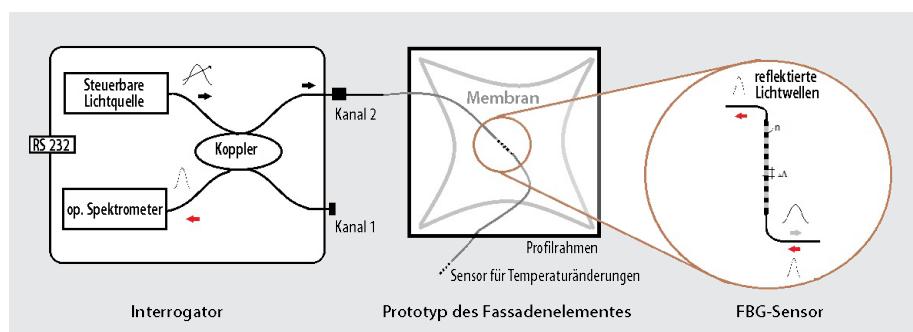


Abb. 4: Installation und Prinzip der FBG-Sensoren beim Messen von Dehnungen in einem adaptiven Fassadenelement aus Membran

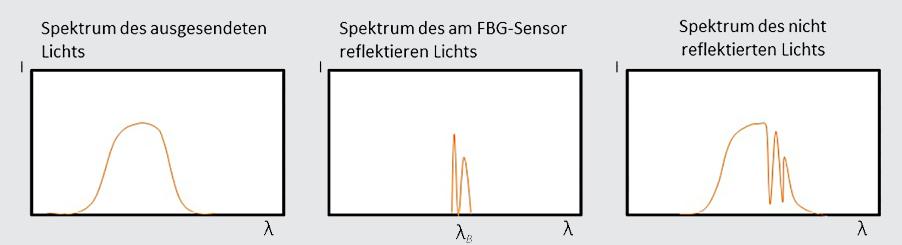


Abb. 5: Lichtspektren im FBG-Sensor-System

Tab. 1: Messauflösung, -genauigkeit und -rate des Interrogators: FiberPro SFI700

Auflösung der Wellenlängen- und Dehnungsmessung	0,001 nm ~0,8 µm/mm
Genauigkeit der Wellenlängen- und Dehnungsmessung	0,01 nm ~8 µm/mm
Aufzeichnungsrate	5 Hz (max. 10 Hz)

den Temperatur wird die Dehnung mit der registrierten Wellenlängenänderung ($\Delta\lambda$) und einem Parameter $S1$ für jeden FBG-Sensor berechnet werden (Gl. 2) (Woschitz und Brunner 2011). Der Parameter $S1$ wird durch den Hersteller bei der initialen Kalibrierung des FBG-Sensors bestimmt und fasst die Parameter der Wellenlänge und des Materials für den jeweiligen Sensor zusammen.

$$\text{Strain} = \Delta\lambda * S1 \quad (2)$$

Das in der Untersuchung verwendete Messsystem ist der FiberPro SFI700 Interrogator, an dem zwei Sensoren für die Dehnungsmessungen in der Membran sowie ein baugleicher Sensor für die Kompensation der Temperaturänderungen an einer Faser angeschlossen werden. Der FBG-Sensor für die Temperaturänderungen wird an einem Ende fixiert und ist an dem anderen Ende lose, so dass ausschließlich Wellenlängenänderungen auf die Temperaturänderungen zurückzuführen sind. Die zu erwartende Genauigkeit der Dehnungsmessung (Tab. 1) ist in der gleichen Größenordnung, wie beim ARAMIS bei einem kleinen Messvolumen und optimalen Aufnahmedingungen, anzunehmen. Für die Untersuchungen im Labor kann von gleichgenau bestimmten Dehnungen ausgegangen werden.

3 Dehnungsmessungen im adaptiven Fassadenelement

Der Prototyp des adaptiven Fassadenelementes besteht aus einem textilen Gewebe, das an vier Ankerpunkten eines Würfels (Kantenlänge 2 m) befestigt ist. Zwei diagonal gegenüberliegende Ankerpunkte können in der Höhe verschoben werden, so dass sich die Form der Hyperfläche verändert und die Fassade geöffnet und geschlossen werden kann (Abb. 6). Durch die Verstellung der Ankerpunkte, verändert sich die Spannung in der textilen Membran. Um eine vordefinierte Sollspannung der Membran halten zu können, muss die Dehnungsänderung der Membran an verschiedenen Orten mit einer hohen Aufzeichnungsrate bestimmt werden, um die Vorspannkraft über die Ankerpunkte zu regulieren. Ziel ist es, dass die Membran in jedem Zustand ausreichend gespannt ist, da ansonsten Windlasten die Membran beschädigen können, wodurch sich Risse bilden können. Dieses Nachsteuern

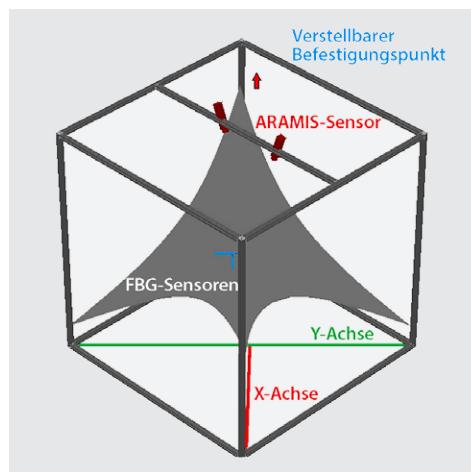


Abb. 6:
Prototyp des
adaptiven
Fassaden-
elements
für Test-
messungen
mit aus-
tauschbarer
Membran

soll in einer sich anschließenden Projektphase über Motoren und Schienensysteme automatisiert erfolgen. In der ersten Phase sind Materialien und die Eignung von FBG-Sensoren für die Dehnungsmessungen in einer textilen Membran zu testen. Hierfür wird eine Versuchsreihe mit manueller Ansteuerung der Ankerpunkte durchgeführt. Die durch das Verstellen auftretenden Zugkräfte werden mittels Kraftmessdosen bestimmt und als weitere Steuerparameter neben der Membrandehnung für die Regelung des automatisierten adaptiven Fassadenelements verwendet.

In der Versuchsreihe werden verschiedene Lastfälle abgebildet und die Spannung in der textilen Membran mit ARAMIS und FBG-Sensoren bestimmt. Die unterschiedlichen Lastfälle werden durch das Verschieben der Ankerpunkte hervorgerufen. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde festgestellt, dass die FBG-Sensoren auf der textilen Membran aufgrund der Installation eine gedämpfte Dehnung gegenüber dem ARAMIS-System messen. In der späteren Anwendung an einer Gebäudefassade soll auf eine externe Beobachtung der Membran verzichtet werden, da dies eine eigene Installationsebene benötigt. Um die wahren Dehnungen für eine Steuerung zu erhalten, wird eine Beziehung zwischen den Dehnungen des ARAMIS-Systems und der FBG-Sensoren aufgestellt. Diese Beziehung in Form einer Übergangsfunktion oder eines KNN kann auf die FBG-Sensoren gewendet werden, so dass die Dämpfung aus den FBG-Dehnungen entfernt wird.

3.1 Experimentelle Dehnungsmessung mit ARAMIS

Eine flächenhafte Messung der Dehnung in der Membran ist mit dem ARAMIS-System durchgeführt worden. Hierfür wird das Messsystem an einem Profil des Fassadenelementes mittig in etwa 1,5 m Höhe über der initialen Stellung der Membran fest installiert. Das ARAMIS-System ist so ausgerichtet, dass die Achsen des Koordinatensystems in etwa parallel zu den Diagonalen des Würfels verlaufen (Abb. 6). In dieser Position kann mit dem Mess-

system die Mitte der Membranoberfläche erfasst werden, die die stärkste Dehnung durch das Versetzen eines Befestigungspunktes aufweist. Aus der gesamten Fläche werden Teilflächen an den Messstellen der FBG-Sensoren extrahiert. Diese Teilflächen werden für die Modellierung der Beziehung zu den FBG-Dehnungen verwendet.

3.2 Experimentelle Dehnungsmessung mit FBG-Sensoren

Die zwei FBG-Sensoren sind mittig orthogonal zueinander auf der vorgespannten Membran im Ausgangszustand installiert. Die X-Achse verläuft diagonal zwischen den zu versetzenden Ankerpunkten. Die Y-Achse wird durch die beiden tiefliegenden festen Ankerpunkte definiert (Abb. 6).

Die Datenaufzeichnung der Messwerte, der in Reihe geschalteten Sensoren, erfolgt für jeden Versatz des Befestigungspunktes ohne Unterbrechung. Der Nullzustand wird durch keine Dehnung der Sensoren festgelegt, so dass die registrierten Dehnungen relativ zum Nullzustand bestimmt werden.

4 Lineare Modellierung der Übergangsfunktion

Die Dehnung der Membran wird nach jeder Verschiebung eines Ankerpunktes bestimmt, so dass für jeden Zustand der Hyperfläche die Dehnung mit ARAMIS und den FBG-Sensoren registriert wird. Ausreißer in den FBG-Messwerten werden durch das Versetzen von Ankerpunkten hervorgerufen und vor weiteren Berechnungen mittels eines Tiefpassfilters eliminiert (Abb. 7). Die Entwicklung eines Systems aus Schienen und Motoren, durch den Studiengang Bauingenieurwesen, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Dieses System soll ein gleichmäßiges

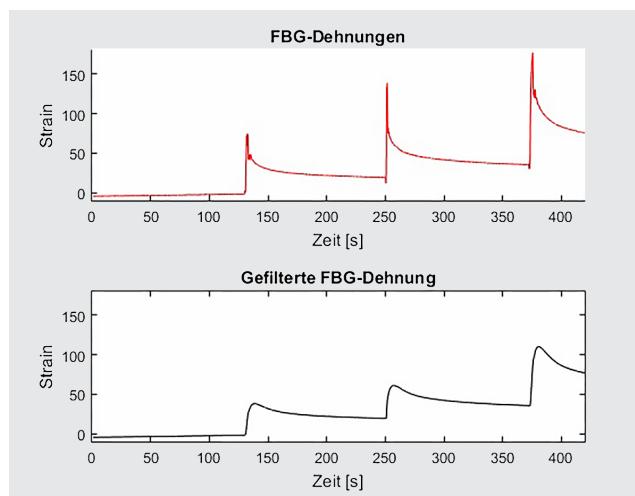


Abb. 7: Messwerte der FBG-Sensoren vor und nach Tiefpassfilterung

Adaptieren der Membran bei großen Kräften ermöglichen, so dass diese Ausreißer nicht mehr erwartet werden. In der Untersuchung wird mit beiden Messsystemen die Dehnung in jedem Zustand bestimmt, so dass zu erwarten ist, dass die Ergebnisse der Dehnungsmessungen im Rahmen der Messunsicherheit identisch sind. Aufgrund der punktuellen Steifigkeit in der Membran durch die FBG-Sensoren werden erhebliche Differenzen zwischen ARAMIS- und FBG-Dehnungen festgestellt. Die registrierte FBG-Dehnung ist geringer als die Dehnung, die mit dem ARAMIS-System gemessen wird. Diese Unterschiede in der Dehnungsmessung werden mittels einer Übergangsfunktion modelliert.

Eine einfache Form der Erstellung einer Übergangsfunktion ist das Addieren oder Multiplizieren der FBG-Messwerte mit einer konstanten Zahl. Dieser Ansatz ist aufgrund des Anhebens (Stufenform) und der unterschiedlich stark auftretenden Dehnungen nicht möglich. Anstelle einer konstanten Zahl wird für die Modellierung der Messwertbeziehung eine lineare Übergangsfunktion angewendet. Diese Übergangsfunktion beschreibt den Zusammenhang zwischen den gemessenen FBG- (D_{FBG}) und ARAMIS-Dehnungen (D_{ARAMIS}) für jeden korrespondierenden Messwert. Die Parameter (a , b und c) der Übergangsfunktion (Gl. 3) werden für jeden FBG-Sensor durch eine Ausgleichung bestimmt. Eine eigene Übergangsfunktion ist für jeden FBG-Sensor notwendig, da unterschiedliche Dehnungsrichtungen in der Membran durch das Verändern der Geometrie der Hyperfläche hervorgerufen werden.

$$D_{ARAMIS} = \frac{a * D_{FBG}^2 + b * D_{FBG}}{D_{FBG}^2 + c * D_{FBG}} \quad (3)$$

Die Übergangsfunktion wird zum einen an den Daten, die für die Ausgleichung verwendet wurden, angewandt (Abb. 8) und zum anderen wird die Funktion an einem zweiten unabhängigen Datensatz desselben Lastfalls getestet (Abb. 9). Zur Bewertung der Übergangsfunktion wird die Abweichung aller transformierten FBG-Dehnungen bestimmt.

In den Abb. 8 und 9 sind für jede Messstelle die Dehnungen beider Messsysteme dargestellt. Die durchschnittliche Abweichung (2σ) zwischen transformierten FBG- und gemessenen ARAMIS-Dehnungen, bezogen auf die maximale Dehnung für den Datensatz mit dem die Funktion aufgestellt wird, beträgt 5,8 %. Wird die Übergangsfunktion auf den zweiten Datensatz desselben Lastfalls angewandt, ist die durchschnittliche Abweichung (2σ) 6,6 %.

Aus den Abb. 8 und 9 kann entnommen werden, dass die Größe der Abweichungen mit der Verschiebung der Ankerpunkte der Membran maßgeblich beeinflusst werden. Der verwendete Testdatensatz mit einer stufenförmigen Änderung der Dehnung ist ein besonderer Fall für die Modellierung einer Übergangsfunktion, welcher nur annäherungsweise mit der verwendeten lineareren Über-

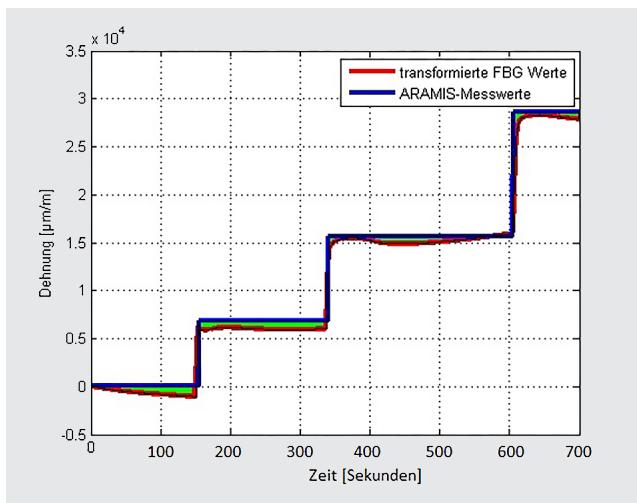


Abb. 8: Transformierte FBG-Werte und ARAMIS-Messwerte für die Initialisierungsmessungen in Y-Richtung

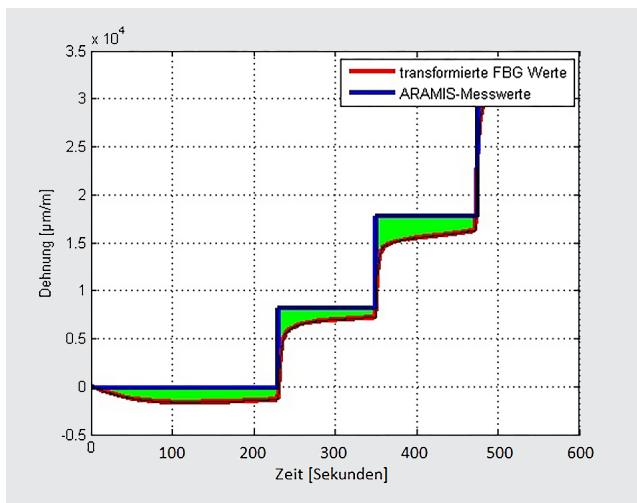


Abb. 9: Transformierte FBG-Werte und ARAMIS-Messwerte für die Test-Messung in Y-Richtung

gangsfunktion beschrieben werden kann. Durch die Entwicklung eines motorisierten Schienensystems zum Halten und Verstellen der Form der Membran-Fassade sind keine stufenförmigen Änderungen der Dehnungen zu erwarten, so dass mit einer linearen Funktion die Übergänge zwischen den Messwerten mit geringen Abweichungen bestimmt werden können. Nachdem das Halte- und Regelsystem für die Angelpunkte am Prototyp installiert ist, wird die Übergangsfunktion erneut über alle möglichen Lastfälle bestimmt.

5 Modellierung mit künstlichen Neuronalen Netzen

KNN sind in der Statistik, der Informatik, den Wirtschafts- und den Ingenieurwissenschaften eine etablierte Methode für das Erstellen von Prognosen auf Grundlage von komplexen Daten oder für das automatisierte Klassifizieren von großen Datenmengen. Prominente Anwendungen für

KNN sind u.a. Spracherkennungssoftware (Abdel-Hamid et al. 2013) und das Erkennen von Objekten in digitalen Bildern, wie bei der Google-Bildersuche (Zheng et al. 2009). In geodätischen Anwendungen werden KNN vereinzelt beim Erstellen von Modellen für Überwachungsmessungen (Neuner 2012, Alkaiem et al. 2016), dem Ableiten von Steuergrößen, wie der Anzahl von Schritten bei der Fußgänger-Navigation (Reiterer et al. 2010, Kupke et al. 2016), eingesetzt.

KNN sind informationsverarbeitende Strukturen, die dem natürlichen Nervensystem des Menschen nachempfunden sind (Kruse et al. 2011). Ein KNN verarbeitet Daten aufgrund von Wissen, welches über Beispieldaten erlernt wird. Anders als bei traditionellen Informationsverarbeitungssystemen, bei denen jeder Verarbeitungsschritt und jede mögliche Eingabe programmiert werden muss, werden beim KNN Gewichte zwischen einzelnen Verarbeitungseinheiten (Neuronen) angepasst, so dass bei einer Eingabe die gewünschte Zielausgabe erfolgt. Hierfür ist beim überwachten Lernen ein Trainingsdatenset, bestehend aus Soll-Eingaben und -Ausgaben zu erstellen und auf ein KNN anzuwenden. Je genauer und vielfältiger die Trainingsdaten sind, desto besser die Verarbeitungsleistungen des KNN (Rey und Wender 2011). Insbesondere bei der Verarbeitung von großen Datensätzen und einer Vielzahl von möglichen Werten ist für die Ausgabe eine Datenverarbeitung mit KNN oftmals effektiver, genauer und zuverlässiger als das Aufstellen von komplexen Algorithmen.

Die Struktur eines KNN, d.h. die Anzahl der Verarbeitungseinheiten und -schichten, ist neben den Trainingsdaten und den Lernregeln für die Leistung der Datenverarbeitung bestimmend. Für die Wahl der Struktur (Abb. 10) wird auf Vorwissen über KNN für den Anwendungsfall der Modellierung einer Beziehung von Messwerten zurückgegriffen (Demuth und Beale 2002). Durch ein iteratives Vorgehen erfolgt eine Optimierung der KNN-Struktur.

Im Folgenden wird das KNN (Abb. 10) für die Modellierung der Beziehung zwischen den zwei gemessenen Dehnungen mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus

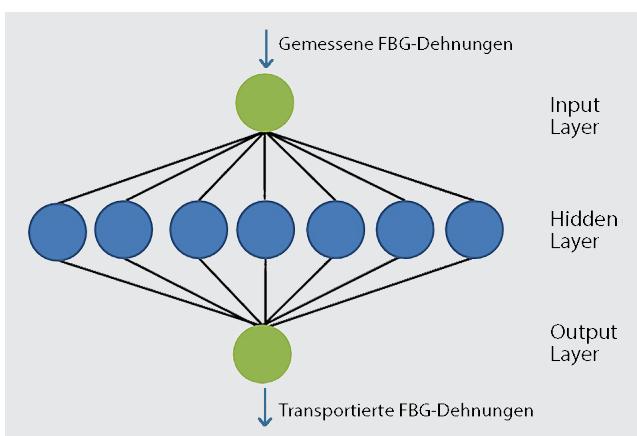


Abb. 10: Struktur des verwendeten künstlichen neuronalen Netzes

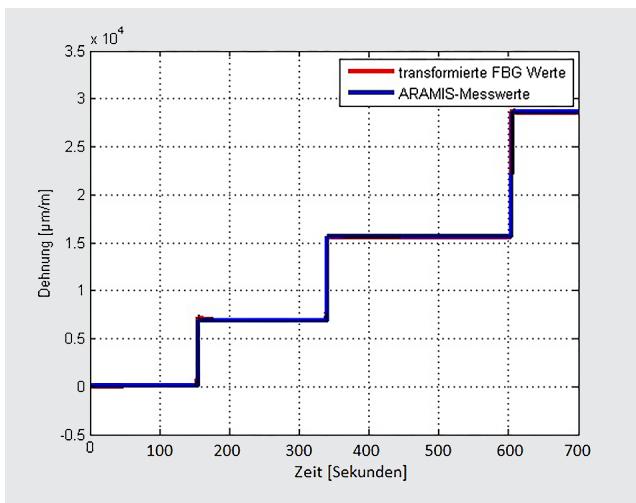


Abb. 11: Mit KNN transformierte FBG-Werte und ARAMIS-Messwerte für die Initialemessung in Y-Richtung

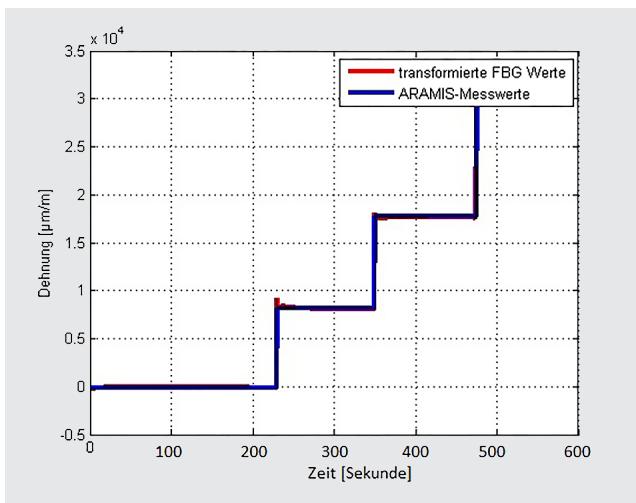


Abb. 12: Mit KNN transformierte FBG-Werte und ARAMIS-Messwerte für die Test-Messung in Y-Richtung

(LMA) trainiert. Dieser Algorithmus ist für das genaue und effiziente Modellieren einer Beziehung von Wertepaaren bei weniger als hundert Kanten und vorhandenen Zieldaten geeignet. Allgemein wird der LMA zur Lösung von nicht-linearen Ausgleichsproblemen verwendet. Beim Trainieren von KNN mit diesem Algorithmus werden in einem modifizierten Backpropagationen-Verfahren die Gewichte aufgrund der kleinsten Abweichungen zu den Soll-Ausgabewerten angepasst. Eine detaillierte Beschreibung des LMA für das Training von KNN ist bei Hagan und Menhaj (1994) gegeben. Dieser iterative Prozess wird wiederholt, bis ein Grenzwert für den Netzfehler (Abweichung zwischen Netzausgabe und Sollausgabe) nicht mehr überschritten wird oder eine definierte Anzahl der Iteration durchlaufen ist (Rey und Wender 2011). Das trainierte KNN ist nun mit unbekannten Trainingsdaten zu validieren, bevor es für eine Modellierung der Beziehung zwischen den Dehnungsmessungen verwendet werden kann.

Die in Abschnitt 4 für das Bestimmen der Übergangsfunktion verwendeten Datensätze werden für das Trai-

nieren des KNN benutzt. Nach dem Training des KNN kann mit der modellierten Beziehung für die beiden Datensätze des Lastfalls eine Transformation erfolgen. Die Abweichungen der transformierten FBG-Dehnungen zu den gemessenen ARAMIS-Dehnungen sind für die gesamte Messreihe in den Abb. 11 und 12 dargestellt. Eine durchschnittliche Abweichung (2σ) von 2,0 %, bezogen auf die maximale Dehnung, kann beim Anwenden des KNN auf den Datensatz, mit dem das Netz trainiert wurde, festgestellt werden. Unter Verwendung des trainierten KNN auf einen anderen Datensatz desselben Lastfalls kann die Dehnung mit einer durchschnittlichen Abweichung von 4,1 % bestimmt werden. Aufgrund der Stufenform der Zieldaten sind die größten Differenzen an dem Stufenbeginn und -ende festzustellen. An diesen Stellen wurde der Befestigungspunkt verschoben. Die doppelt so große durchschnittliche Abweichung ist auf diese Stellen zurückzuführen. Geringe Abweichungen sind in den Bereichen einer gleichmäßigen Dehnung der Membran zu verzeichnen.

6 Vergleich der Modellierung und Bewertung für die Anwendung

Zwei Verfahren zur Transformation der gedämpften FBG-Dehnung wurden vorgestellt. Durch das Verwenden einer linearen Übergangsfunktion kann eine Überführung der Messwerte erfolgen. Die durchschnittliche Abweichung der Dehnungen beträgt 6,6 %, bezogen auf die maximale gemessene Dehnung in der Membran. Für denselben Datensatz können unter der Verwendung eines trainierten KNN die FBG-Dehnungen mit einer durchschnittlichen Abweichung von 4,1 % überführt werden.

In der Anwendung eines adaptiven Fassadenelementes wird die Dehnungsmessung zur Regelung benötigt, so dass aufgrund der hohen Aufzeichnungsrate einzelne fehlerhafte Dehnungsmessungen keine Relevanz für die Regelung haben. In der Untersuchung kann festgestellt werden, dass die Dämpfung durch den FBG-Sensor mittels KNN mit einer geringeren Abweichung modelliert werden kann. Die Verwendung eines KNN eignet sich für die Transformation der Dehnungen besser, da Ausreißer und sprunghafte Messwerte besser verarbeitet werden können.

Die Auswirkungen der durchschnittlichen Messfehler von kleiner als 6,6 % bzw. 4,1 %, bezogen auf die maximale gemessene Dehnung, sind für die Regelung einer Membran-Fassade nicht relevant. Aufgrund einer ersten Prognose für die untersuchten Lastfälle führt ein Fehler von kleiner als 10 % zu keiner optisch feststellbaren Verformung, einem Faltenwurf oder einer Überdehnung der Membran. Es ist zu prüfen, ob unter den praktischen Bedingungen die modellierten Übertragungsmodelle für eine zielführende Regelung ausreichend gut bestimmt werden konnten.

7 Fazit und Ausblick

Das kontinuierliche Messen von Dehnungen zur Regelung einer intelligenten, adaptiven Membran-Fassade ist eine Herausforderung für die Messtechnik. Durch die Installation von FBG-Sensoren, an diskreten Stellen in der Membran, kann eine Dehnung der Membran durch das Einwirken von Windlasten oder durch ein aktives Verformen der Hyperfläche durch das Verschieben von Ankerpunkten gemessen werden. Die FOS können an durchsichtigen oder reflektierenden Membranen installiert werden. Diese Membranen sind durch die optische Messtechnik nicht ohne das Aufbringen von Mustern oder das Einfärben messbar. Die Installation der FOS verändert die lokalen Dehnungseigenschaften an den Installationsstellen auf der Membran.

An einem Testelement der Membran-Fassade, auf dem ein stochastisches Muster vorhanden ist und FBG-Sensoren installiert sind, sind Dehnungen mit Hilfe der optischen und faseroptischen Messtechnik bestimmbare. Die hervorgerufene Versteifung der Membran durch die Installation der FBG-Sensoren hat festgestellt, dass eine schwächere Dehnung gemessen wird. Die Dämpfung der Dehnungsmessung wird durch eine lineare Übergangsfunktion sowie durch ein KNN modelliert. Es zeigt sich, dass die gedämpften Dehnungen mittels dieser Modellierungen mit einer durchschnittlichen Abweichung von kleiner als 6,6 % (lineare Funktion) und kleiner als 4,1 % (KNN) bestimmt werden können.

Diese ersten Ansätze können für eine adaptive textile Membran herangezogen werden und sind unter Laborbedingungen für eine Regelung der Membran verwendbar. Unter praktischen Bedingungen, wie an einer Gebäudefassade mit starken Krafteinwirkungen durch Wind, ist die festgestellte Unsicherheit der Modellierung unter Umständen zu groß. Hierfür werden weitere Untersuchungen zur Installation von FOS-Sensoren in textilen Membranen durchgeführt. Ein weiteres Anwendungsfeld neben verhüllenden Membranen stellen Membranoberflächen dar, die mit Solarzellen besetzt sind (Ferwagner 2011). Diese Membranen weisen eine größere Festigkeit auf und dürfen für einen einwandfreien Betrieb nur geringe Dehnungen erfahren. Insbesondere ist für diese Membranen eine zeitlich und geometrisch präzise Regelung notwendig, die zu entwickeln ist.

Dank

Dank gilt der Firma Holcim (Deutschland) GmbH, A member of LafargeHolcim, für die Unterstützung u.a. im Rahmen eines interdisziplinären Projektes zwischen den Studiengängen Geomatik und Bauingenieurwesen bei der Beschaffung von Messsystemen und Untersuchungsmaterialien.

Literatur

- Abdel-Hamid, O., Deng, L., Yu, D. (2013): Exploring convolutional neural network structures and optimization techniques for speech recognition. *Interspeech*, 3366–3370.
- Alkaiem, L., Keller F., Sternberg, H. (2016): Analysis of inclination measurement by means of artificial neural networks – A comparison of static and dynamic networks. 3rd JISDM 2016, 29–31 March, Vienna, Austria.
- Barnefske, E., Keller, F., Gehmert, C., Sternberg, H. (2016): A Comparison of Strain Measurement Systems in a Tensile Experiment. 78th FIG Working Week 2016, May 2–6, Christchurch, New Zealand.
- Brunner, F.K. (2009): Faseroptische Sensorik: Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie. *Öst. Z. f. Vermessung & Geoinformation*, 97, 335–342.
- Demuth, H., Beale, M. (2002): Neural Network Toolbox For Use with MATLAB, User's Guide, Version 4, Natick.
- Ferwagner, T. (2011): Lightweight Photovoltaics, International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures. Structural Membranes 2011, Barcelona, Spain.
- GOM (2013): ARAMIS, User Information, Software.
- Hagan, M.T., Menhaj, M.B. (1994): Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE transactions on Neural Networks*, 5(6), 989–993.
- Habel, W., Brunner, F.K. (2011): Faseroptische Sensoren für den Einsatz im Monitoring: ein Überblick. *AVN*, 6/2011, 204–211.
- Kersey, A.D., Davis, M.A., Patrick, H.J., LeBlanc, M., Koo, K.P., Askins, C.G., Putman, M.A., Friebel, E.J. (1997): Fiber grating sensors. *Journal of lightwave technology*, 15(8), 1442–1463.
- Kraasch, R. (2016): Hamburger Volksparkstadion im Stadtteil Hamburg-Bahrenfeld. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RK_1009_98_31_Volksparkstadion.jpg, letzter Zugriff 12/2016.
- Kruse, R., Borgelt, C., Klawonn, F., Moewes, C., Ruß, G., Steinbrecher, M. (2011): Computational Intelligence: Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze. Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze, Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- Kupke, J., Willemsen, T., Keller, F., Sternberg, H. (2016): Development of a step counter based on artificial neural networks. *Journal of Location Based Services*, 161–177.
- Neuner, H. (2012): Model selection for system identification by means of artificial neural networks. *Journal of Applied Geodesy*, 6 (3–4), 117–124.
- Reiterer, A., Egly, U., Vicovac, T., Mai, E., Moafipoor, S., Grejner-Brzezinska, D.A., Toth, C.K. (2010): Application of artificial intelligence in Geodesy – A review of theoretical foundations and practical examples. *Journal of Applied Geodesy*, 4(4), 201–217.
- Rey, G.D., Wender, K.F. (2011): Neuronale Netze: Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung. 2. Auflage, Verlag Hans Huber.
- Samiec, D. (2011): Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungs-messung mit sehr hoher Ortsauflösung. *Photonik*, 6, 34–37.
- Schramme, K., Bögle, A. (2016): Maintaining the Tension of Adaptable Membrane Structures. Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016, »Spatial Structures in the 21st Century« 26–30 September, 2016, Tokyo, Japan.
- Woschitz, H., Brunner, F.K. (2011): Dynamic strain measurements using embedded fiber optic sensors. In: *Vermessung & Geoinformation*, 2/2011, 191–196.
- Zheng, Y.-T., Zhao, M., Song, Y., et al. (2009): Tour the World: building a web-scale landmark recognition engine. *Proceedings of conference on computer vision and pattern recognition 2009*, 1085–1092.

Kontakt

Eike Barnefske, M.Sc. | Dr.-Ing. Friedrich Keller | Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg | Artjom Klimaschewski, B.Eng. und IWE | Kai Schramme, M.Sc. | Prof. Dr.-Ing. Annette Bögle

HafenCity Universität Hamburg

Überseeallee 16, 20457 Hamburg
vorname.nachname@hcu-hamburg.de
www.hcu-hamburg.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodesie.info.