

Modellierung der Deformation eines Stahlträgers durch indirekte Dehnungsmessungen

EIKE BARNEFSKE, JENS OHLENDIECK & HARALD STERNBERG

Die Durchbiegung von Stahlträgern ist bei der Überwachung von Bauwerken von besonderem Interesse, um Aussagen zur Stabilität dieser machen zu können. In vielen Fällen ist ein direktes Messen der Durchbiegung nicht möglich, so dass diese über andere Messgrößen bestimmt werden muss und eine Beziehung zwischen verschiedenen Größen zu modellieren ist. Längsdehnungen und Durchbiegungen stehen vereinfacht ausgedrückt für den Fall der mittleren Durchbiegung bei Stahlträgern in einer linearen Beziehung. Werden für die Sensoren aber auf Adaptern am Träger installiert, dann muss der Einfluss dieser im Dehnungs-Durchbiegungs-Modell berücksichtigt werden. Die empirische Bestimmung des Einflusses und die Erstellung eines einfachen Kongruenzmodells für diesen Fall liegen im Fokus dieser Untersuchungen.

1. Einleitung

Stahlträger sind in Bauwerken oft die tragenden Elemente, so dass bei der Überwachung der Standfestigkeit die Durchbiegung der Stahlträger von besonderem Interesse ist. Häufig wird ein Bauwerksmonitoring erst nach der Fertigstellung und einiger Betriebszeit eingerichtet, wenn z. B. Schäden festgestellt werden oder neue Vorschriften dieses verlangen. Die Möglichkeit der Installation von geodätischen Sensoren, wie z. B. Prismen oder Extensometer, ist aus technischen und architektonischen Gründen nach der Fertigstellung nicht immer möglich. Somit sind kleine Sensoren, die kontinuierlich messen und mit geringem Aufwand installiert werden können, von besonderem Interesse für nachträglich installierte Bauwerksüberwachungsnetzwerke. Zu den Sensoren, die diese Eigenschaften erfüllen, zählen u. a. faseroptische Dehnungsmessstreifen, mit denen an einzelnen Punkten oder entlang einer Achse an mehreren Punkten oder kontinuierlich über einen bestimmten Abschnitt Dehnungen gemessen werden können.

Längsdehnungen und Durchbiegungen von Stahlträgern können mittels des statischen Modells des Trägers berechnet werden, so dass die Beziehung zwischen Dehnung und Durchbiegungen durch ein Gleichungssystem beschrieben werden kann. Vereinfacht kann diese Beziehung für die mittlere (maximale) Durchbiegung als linear angenommen werden. Diese einfache Gleichung kann nicht mehr verwendet werden, wenn die Dehnungen nicht auf dem Stahlträger direkt, sondern auf einer am Träger verschweißten Adapterplatte, gemessen werden. Um für diese Messsituation ein Modell aufzustellen, werden mehrere

Biegeversuche durchgeführt. Die Durchbiegung wird bei diesen Versuchen mittels elektronischer Extensometer und die Längsdehnung mit faseroptischen Dehnungsmessstreifen bestimmt.

2. Faseroptische Sensoren

Glasfasern werden als zuverlässige Leitung für die sehr schnelle Übertragung von Daten genutzt. Diese faseroptischen Leitungen sind zudem sensitiv gegenüber mechanischen oder thermischen Einflüssen. Durch die Dehnung oder allgemeiner die Verformung der faseroptischen Leitungen treten Reflexionen an der Hülle der Faser auf, die zur Bestimmung des Ortes und Größe der Verformung verwendet werden. Eine solche Faser wird als kontinuierlicher Sensor bezeichnet, mit dem für einen Bereich von mehreren Kilometern genaue Dehnungen in Faserrichtung bestimmt werden können. Werden höhere Ansprüche an die Mess- und Ortsgenauigkeit, sowie die Messfrequenz gestellt, finden diskrete Sensoren, wie Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Dehnungsmessstreifen, Anwendung. Diese Dehnungsmessstreifen haben einen sensitiven Bereich (das Bragg-Gitter), der i.d.R. wenige Zentimeter lang ist.

2.1. Anwendungen

Faseroptische Sensoren oder Sensoren, die die optischen Fasern als sensitives Element nutzen, werden vermehrt als Alternative für herkömmliche Sensoren bei der Werkstoffentwicklung und zur Bauwerksüberwachung eingesetzt. Dehnungen, Temperaturänderungen und Schwingungen sind die primären Messgrößen, die mit faseroptischen Sensoren bestimmt werden.

Diese Dehnungen und Schwingungen sind bei geodätischen Monitoringanwendungen an komplexen und langgestreckten Bauwerken, wie Tunneln oder Staudämmen, zu bestimmen. BUCHMAYER, F.S. ET AL. (2019) zeigen am Beispiel einer Tunnelbaustelle, dass durch den Einsatz von kontinuierlichen faseroptischen Sensoren in der Tunnelwand mehr Informationen über das Verhalten des Tunnels während der Bauphase gewonnen werden können und Bauunterbrechungen für Vermessungsarbeiten minimiert werden. Neben dem permanenten Monitoring während der Bauphase, können die installierten optischen Fasern auch für das Monitoring während der gesamten Nutzungsdauer verwendet werden (LIENHART, W. ET AL. 2019). Kontinuierliche faseroptische Sensoren ermöglichen zu dem das Messen an vielen hundert Stellen gleichzeitig, wobei nur eine Faser für die Messung installiert werden muss. Zusammen mit der Immunität gegenüber elektromagnetischen Einflüssen sind dieses die zentralen Vorteile von faseroptischen Dehnungsmessstreifen gegenüber elektronischen Dehnungsmessstreifen.

Faseroptische Sensoren, insbesondere FBG Sensoren, können aufgrund der Größe von nur etwa 0,3 mm (Faserdurchmesser) und einem geringen Gewicht in bzw. auf verschiedenen Materialien, wie Glas, Beton oder Stahl, installiert werden. Beispielsweise untersuchen WOSCHITZ, H. & BRUNNER, F.K. (2011) mit einem Raster aus FBG-Dehnungsmessstreifen die Lasteinwirkung von Zügen auf ein elastisches Kompensations-

element im Gleisbett. Eine Steigerung der Stabilität bei Leichtbauteilen aus Glas und Karbon, bei gleichzeitiger Möglichkeit der Überwachung der Bauteile hinsichtlich von kleinsten Rissen konnten BREMER, K. ET AL. 2017, durch das Einweben eines Fasergitters erzielen. FBG-Sensoren werden auch in elastischen Membranen installiert, über dessen Dehnung z. B. der Füllstand eines Flugzeugtanks hochauflösend bestimmt werden kann (MARQUES, C.A.F. ET AL. 2016). Zudem nutzen BARNEFSKE, E. ET AL. (2017) FBG-Dehnungsmessstreifen zur Steuerung von Verschattungsmembranen an Gebäudefassaden mittels eines datenbasierten Modells. Eine Vielzahl der aufgeführten Anwendungen beschäftigt sich mit der Art und Weise, wie faseroptische Sensoren in verschiedenen Materialien installiert werden können, und wie das Verhalten der Bauteile untersucht werden kann.

2.2. Faser-Bragg-Gitter Sensorprinzip

Faser-Bragg-Gitter Messsysteme basieren auf dem physikalischen Prinzip, dass Lichtwellen einer bestimmten Wellenlänge beim Passieren eines Bereiches mit unterschiedlichen Brechungsindizes (z. B. n_1 und n_2) (total)reflektiert werden (Abbildung 1). Das Bragg-Gitter wirkt wie ein optischer Filter, der einen bestimmten Wellenlängenbereich des ausgesendeten Lichtes reflektiert (Bragg-Frequenz (λ_B) und umgebende Frequenzen) und die anderen Lichtwellen passieren lässt.

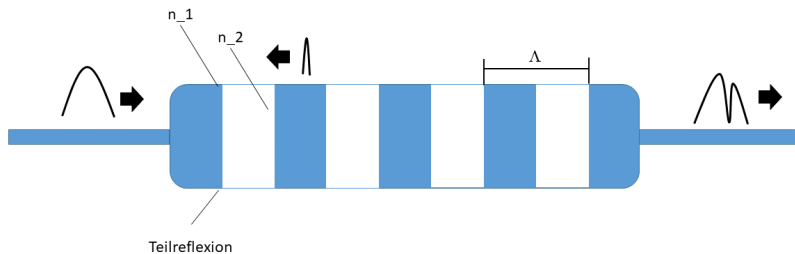


Abbildung 1: Das Prinzip des FBG-Sensors mit den Parametern effektiver Brechungsindex (n_{eff}) und Gitterabstand (Λ).

Die Größe des Gitterabstandes (Λ) bestimmt welcher Wellenlängenbereich reflektiert wird. Im Fall des dritten optischen Fensters von 1500 bis 1600 nm variiert der Gitterabstand zwischen 505 - 535 nm, da der effektive Brechungsindex (n_{eff}) aufgrund der Sensorfertigung etwa 1,5 beträgt (TOSI, D. 2017). Mit Gleichung 1 wird die reflektierte Bragg-Welle (λ_B) berechnet (PFEIFFER, F.C. 2000).

$$\lambda_B = 2 * \Lambda * n_{eff} \quad (1)$$

Der Gitterabstand und der effektive Brechungsindex ändern sich vorrangig aufgrund von Temperaturänderungen und mechanischen Dehnungen im sensitiven Bereich der Faser

(FBG-Sensor). Ist einer der beiden Einflüsse bekannt bzw. kann über einen anderen Sensor bestimmt werden, dann kann die andere Einflussgröße über die Änderung der Wellenlänge ($\Delta\lambda$) und die Kalibrierparameter des Sensors bestimmt werden (TOSI, D. 2017).

Die meisten Interrogatoren für Lichtwellen basieren auf zwei gängigen Verfahren. Das erste Verfahren sieht vor, dass ein breites Spektrum von Lichtwellen gleichzeitig in die Faser gegeben wird. Die reflektierten Lichtwellen werden mittels eines dispersiven Elements aufgespalten und mit einem CCD-Sensor registriert und digital analysiert. Die Auflösungsbeschränkung des CCD-Sensors stellt hier einen Nachteil gegenüber dem zweiten Verfahren dar. Bei diesem zweiten Verfahren wird ein in der Frequenz verstellbarer Laser eingesetzt, der schnell ein Lichtwellenband durchläuft. Die aktuelle Lichtwelle wird immer an den Empfangssensor (Photodiode) übersendet, so dass im Falle einer Reflexion die aktuelle Lichtwelle bekannt ist (LANDMANN, C. & JAMAL, R. 2011).

3. Durchbiegung bei Stahlträgern

Die Durchbiegung eines standardisiert gefertigten Stahlträgers bei verschiedenen Lasten ist über die Materialeigenschaften, die Trägergeometrie, die wirkende Kraft und die Lagerung des Trägers berechenbar. Sind diese Parameter nicht hinreichend bekannt oder werden am Träger Adaptionen vorgenommen, dann müssen die Parameter empirisch bestimmt werden. In dem folgenden Versuch werden die mittlere Durchbiegung und die Längsdehnung eines 140 mm H-Trägers, der mit 15 mm Adaptern bestückt wurde, bei verschiedenen Lasten gemessen. Die Messergebnisse werden mit der berechneten mittleren Durchbiegung und mittleren Längsdehnung verglichen, um den Einfluss, der auf den Träger geschweißten Bleche, zu bestimmen. Die Untersuchungen werden im Bereich der elastischen Verformung des Trägers durchgeführt.

3.1. Durchbiegung und Dehnung des Trägers

Die Durchbiegung und die Dehnung des Trägers sind neben den Materialeigenschaften und der Größe einer Last (Kraft), abhängig von der Lagerung des Trägers und der Position an der die Last wirkt (Lastfall). Der Lastfall auf den sich die folgenden Berechnungen und Versuche beziehen, sieht vor, dass ein Stahlträger mit der Länge 1200 mm horizontal auf zwei Lagern positioniert ist und mit verschiedenen Kräften von 0 bis 140 kN in der Trägermitte belastet wird (Abbildung 2).

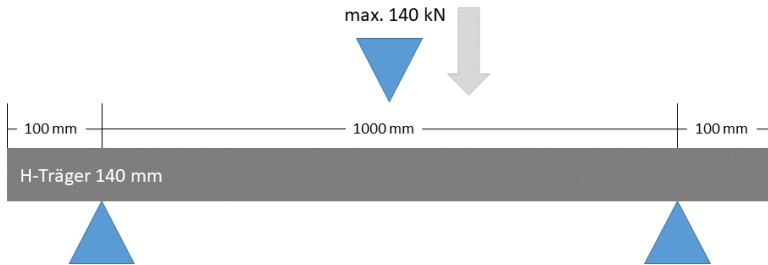


Abbildung 2: Versuchsaufbau für den Lastfall A mit einer wirkenden Kraft in der Stahlträgermitte.

Für den Stahlträger vom Typ HEB 140 gilt ein Elastizitätsmodul (E) von 20.000 kN/cm^2 und ein Flächenträgheitsmoment (I) von 1510 cm^4 mit dem nach Gleichung 2 die maximale Durchbiegung (w) in der Mitte berechnet wird. Die Spannweite (l) mit 1000 mm ist der Abstand zwischen den Lagerpunkten. Die Kraft (F) ist variabel.

$$w = \frac{F * l^3}{E * I * 48} \quad (2)$$

Die maximale Spannung (σ_{max}) am Trägerrand wird mit Gleichung 3 berechnet. Hierfür ist das Biegemoment (M) nach Gleichung 4 zu berechnen. Die Trägerhöhe (h) für den Testträger ist 140 mm .

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I} * \frac{h}{2} \quad (3)$$

$$M = \frac{F * l}{4} \quad (4)$$

Mittels des hookeschen Gesetzes (Gleichung 5), aufgelöst zur Dehnung (ε), kann diese mit dem Elastizitätsmodul berechnet werden.

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma}{E} \quad (5)$$

Unter Verwendungen der Gleichungen 2 bis 5 nach GROSS, D. ET AL. (2012) wurden in 10 kN -Schritten die Durchbiegung und die Dehnung für die Kräfte von 0 bis 140 kN berechnet (Tabelle 1). Die Abweichungen der Messwerte zu diesen berechneten Werten, die oberhalb der Messunsicherheit und der normalen Variation aufgrund der Versuchsbedingungen liegen, sind in dieser Arbeit von Interesse, da diese durch die Einflüsse aufgrund der Adapterplatte stammen.

Tabelle 1: Berechnete Durchbiegung und Längsdehnung für den Stahlträger HEB 140 mit der Spannweite 1000 mm.

Kraft [kN]	Durchbiegung [mm]	Dehnung (längs) [$\mu\text{m}/\text{m}$]
10	0,07	62,10
20	0,15	124,20
30	0,22	186,30
40	0,30	248,40
50	0,37	310,50
60	0,44	372,60
70	0,52	434,71
80	0,59	496,81
90	0,67	558,91
100	0,74	621,01
110	0,81	683,11
120	0,89	745,21
130	0,96	807,31
140	1,04	869,41

3.2. Adaption des Trägers durch Platten

Ein direktes Kleben oder Verschweißen der Dehnungsmessstreifen mit den Oberflächen ist nicht immer möglich, wenn z. B. bestimmte Materialien am Träger nicht befestigt werden dürfen oder die Installationsbedingungen es nicht zulassen, die kleinen empfindlichen Sensoren direkt am Objekt zu verschweißen. Für diese Anwendungen muss der Sensor z. B. auf einer Adapterplatte installiert werden, so dass im folgenden Arbeitsschritt der Adapter am Träger installiert wird (Abbildung 3).

Die Adapterplatten verändern direkt die Dehnung des Trägers, so dass nicht mehr mit den Gleichungen aus Abschnitt 3.1 die Durchbiegung und die Längsdehnung des Trägers bestimmt werden können. Der reine Einfluss der Materialerhöhung kann näherungsweise berechnet werden, wenn die Materialstärke des Trägers um die der Plattenstärke erhöht wird. Nicht berechenbar sind hingegen die Auswirkungen, die durch das Verschweißen des Adapters entstehen. Dadurch, dass der Adapter nur an zwei oder an vier Seiten mit dem Träger verbunden ist, treten zudem lokale Spannungen in diesem Punkt auf und die Dehnung, die in der Platte gemessen wird, kann geringer sein als die im Träger. Zudem hat die Platte selbst, aufgrund der Fertigung und des Materials, ein anderes Dehnungsverhalten

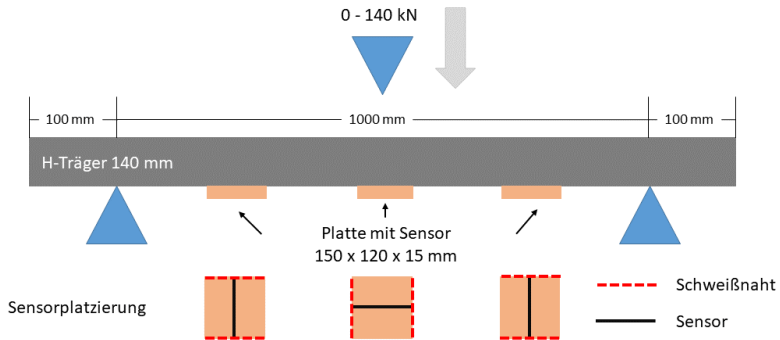


Abbildung 3: Versuchsaufbau mit Adapterplatten für die faseroptischen Dehnungsmessstreifen.

als der Träger. Diese Überlegungen und die Vielzahl an Unbekannten führen dazu, dass eine Modellbildung der Beziehung zwischen Dehnungen im Adapter und Durchbiegung des Trägers nur mit theoretischen Werten allein nicht ausreichend möglich ist und empirische Untersuchungen zu einer Verbesserung des Modells beitragen müssen.

4. Elastische Deformationsversuche mit adaptierten Stahlträgern

Die Durchbiegung und die Dehnung, die mit dem statischen Modell des Trägers für den betrachteten Lastfall in Tabelle 1 berechnet wurden, stehen in einer linearen Beziehung. Ist eine der Größen berechnet bzw. gemessen, dann kann die andere Größe vereinfacht durch eine lineare Gleichung bestimmt werden. Mittels der Messwerte der faseroptischen Dehnungsmessstreifen, die auf der Trägerraußenseite installiert werden können, kann die Trägerdurchbiegung berechnet werden. Für den oben beschriebenen Lastfall kann näherungsweise mit der Gleichung 6 die Durchbiegung in der Trägermitte bestimmt werden.

$$w = 0,0012 * \varepsilon \quad (6)$$

Die Veränderung der Trägergeometrie und das Messen der Dehnungen in der Platte führen allerdings dazu, dass die Gleichung 6 nicht mehr angewandt werden kann. Zur Bestimmung der Beziehung zwischen den Größen wurden die einzelnen Größen in mehreren Versuchsdurchgängen experimentell bestimmt. Die Ergebnisse wurden zur Erstellung eines Kongruenzmodells verwendet, das den Zusammenhang der Größen Dehnung und Durchbiegung durch ein Polynom beschreibt.

In der Versuchsreihe werden die Längs- und Querdehnungen an verschiedenen Positionen auf dem Versuchsträger bestimmt. Im Fokus der Untersuchung liegt die Längsdehnung, mit der in späteren Anwendungen die Durchbiegung zu modellieren ist. Die Durchbiegung wird in unmittelbarer Nähe der wirkenden Kraft und bei den Dehnungsmessstreifen, über zwei elektronische Extensometer (Genauigkeit < 0,01 mm) bestimmt. Synchron zur

Durchbiegung wird die Dehnung in Längs- und Querrichtung mit zwei faseroptischen Dehnungsmessstreifen (Genauigkeit etwa $8 \mu\text{m}/\text{m}$) bestimmt. In jeder Versuchsreihe werden die verschiedenen Lastzustände mit $0,05 \text{ kN}/\text{s}$ angefahren und für eine Zeit von 30 s wird dieser Lastzustand gehalten, bevor der nächste Lastzustand angefahren wird (Stufenform). Nach dem Erreichen des maximalen Belastungszustandes wird in den gleichen Stufen die Last reduziert, bis der Ausgangszustand erreicht ist. Aufgrund von Hysterese im Stahlträger treten kleine Differenzen zum Startwert auf, die sich langsam reduzieren. Das Kongruenzmodell wird mittels mehrerer Messreihen und insgesamt mit mehr als 3000 Messwerten aufgestellt. Wobei nach jeder Messreihe der Träger vollständig entlastet wurde, um die Hysterese zu minimieren.

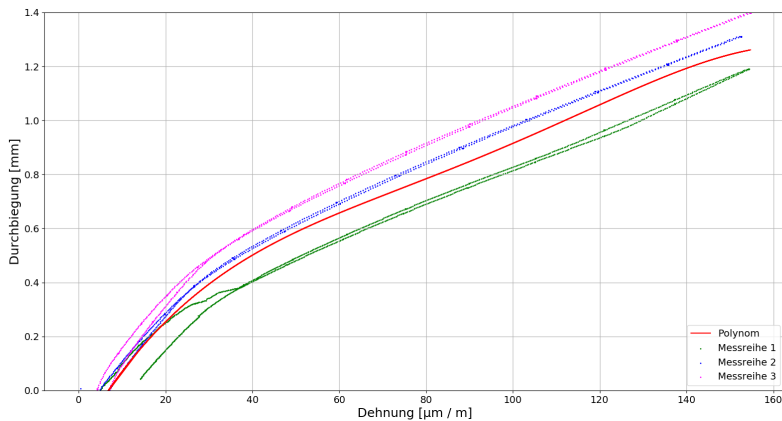


Abbildung 4: Messreihen 1 bis 3, die die Dehnungs–Durchbiegungsbeziehung beschreiben und ein Polynom vierten Grades, als Dehnungs–Durchbiegungs-Modell.

Die Verläufe der Messreihen (Abbildung 4) zeigen, dass durch die Einflüsse des Adapters eine lineare Beziehung nicht für den gesamten Verlauf gelten kann. Aus dem Verlauf der Messwerte sind zwei Abschnitte erkennbar. Der erste Abschnitt für geringe Dehnungen (von 0 bis $30 \mu\text{m}/\text{m}$) verläuft näherungsweise logarithmisch und der zweite Abschnitt (30 bis $160 \mu\text{m}/\text{m}$) entspricht näherungsweise dem linearen Verlauf, wobei der Anstieg signifikant größer ist, als beim Modell der statischen Berechnung (Gleichung 6). Im ersten Abschnitt wirken sich Einflüsse, wie die Messunsicherheit der Sensoren, unvermeidbare Setzungen und zufällige Spannungen im Träger besonders stark aus. Da diese Effekte sowohl im Versuch als auch in späteren Anwendungen auftreten werden, sind diese in einem Modell für den gesamten Verlauf zu berücksichtigen. Für die Modellbildung des gesamten Verlaufs werden die Parameter von verschiedenen Polynomen (ersten bis sechsten Grad) durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und die Parameter hinsichtlich ihrer Signifikanz geprüft. Mit dem Polynom vierten Grades (Gleichung 7) kann der Verlauf der Messreihen am besten beschrieben werden.

$$w = -7,0084 * 10^{-9} \varepsilon^4 + 2,6732 * 10^{-6} \varepsilon^3 - 3,64 * 10^{-4} \varepsilon^2 + 0,2754 \varepsilon - 0,1713 \quad (7)$$

Die Standardabweichung der Funktion beträgt 0,17 mm, die sowohl die zufälligen Messfehler der Sensoren, als auch das zufällige Verhalten des Trägers im Versuch (z. B. Verwindungen des Trägers, Restanteile der Hysterese, kleine Veränderungen der Umgebungsparameter) beinhaltet. Zur vereinfachten Anwendung bei großen Dehnungen wird für den zweiten Abschnitt die Beziehung durch eine lineare Funktion (Gleichung 8) modelliert.

$$w = 0,0069 * \varepsilon - 0,2234 \quad (8)$$

Die Gleichung 8 beinhaltet zum einen eine Verschiebung um etwa -0,2 mm und einer siebenfach größeren Steigung im Vergleich zu Gleichung 6. Die Verschiebung ist durch die Selektion der Messwerte, bei denen nur Dehnungen von größer 30 $\mu\text{m}/\text{m}$ auftreten, zu erklären. Die siebenfach größere Durchbiegung ist durch das Messen der Dehnung im Adapter und einer nicht vollständig spannungsfreien Installation dieser Adapter zu begründen. Das Auftreten der o. g. Einflüsse lässt sich durch die Untersuchungen nachweisen. Ein Bestimmen der Größe der einzelnen Einflüsse ist aber mit diesem Versuchsaufbau nicht möglich. Dieses ist aufgrund der Vielzahl möglicher Einflüsse bei den individuellen Installationsbedingungen auch nicht anzustreben. Zielführend ist hingegen, das Modell durch verschiedene Stahlträger und Versuchsreihen zu verallgemeinern.

Das entwickelte Kongruenzmodell kann für den HEB 140 Stahlträger bei gleicher Installation der Adapter angewendet werden, um aus Dehnungsmessungen die Durchbiegung bzw. die elastischen geometrische Deformation zu bestimmen.

5. Fazit und Ausblick

Faseroptische Dehnungsmessstreifen ermöglichen das hochfrequente, langzeitliche und geometrisch hochgenaue Messen von Dehnungen bei Bauwerken. Ein Installieren der faseroptischen Dehnungsmessstreifen ist aufgrund der geringen Größe, des geringen Gewichts, der Immunität gegenüber elektromagnetischen Einflüssen und der wenigen Verkabelung meist ohne großen Aufwand möglich. In speziellen Fällen können die Dehnungsmessstreifen nicht direkt auf dem zu überwachenden Objekt installiert werden. Für diesen Fall wurde hier ein Mess- und Kalibrieransatz entwickelt, bei dem Dehnungsmessstreifen auf einem Adapter installiert werden. Die Dehnung und die Durchbiegung des Trägers wurden gemessen und ein trägerspezifisches Kongruenzmodell für die Beziehung der Längsdehnung und der Durchbiegung wurde aufgestellt. Die Übertragung des Modells auf andere Trägertypen und das Einbeziehen von Querdehnungen in das Modell sind Gegenstand weiterer Forschungen. Insbesondere bei einer Verallgemeinerung des Modells wird eine Vorausbestimmung der Durchbiegung von kleiner 0,2 mm mit einfachen Gleichungen nicht mehr möglich sein, so dass hierfür datenbasierte Modellierungen angewendet werden.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt der Hamburg Port Authority für die ideelle und finanzielle Unterstützung bei den Versuchen und im Projekt Salzgitterkai zur Entwicklung von alternativen Verfahren und Sensoren bei Monitoringaufgaben.

Literatur

- BARNEFSKE, E., KELLER, F., KLIMASCHIEWSKI, A., SCHRAMME, K., BÖGLE, A., STERNBERG, H. (2017): Modellierung und Laboruntersuchung der Dämpfung von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG) in Membran-Fassadenelementen mit einem photogrammetrischen Dehnungsmesssystem. ZfV, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 5/2017, Wißner Verlag, 271 -278, DOI 10.12902/zfv-0170-2017.
- BREMER, K., WEIGAND, F., ZHENG, Y., ALWIS, L., HELBIG, R., ROTH, B. (2017): Structural health monitoring using textile reinforcement structures with integrated optical fiber sensors. Sensors, 17(2), 345-357.
- BUCHMAYER, F. S., MONSBERGER, C., LIENHART, W. (2019): Benefits of strain and temperature monitoring of conventional tunnel cross sections using distributed fibre optic sensors. In 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM).
- GROSS D., HAUGER W., SCHRÖDER, J., WALL, W. (2012): Technische Mechanik 2, Elastostatik, 11, Springer Verlag.
- JOHNY, J., SUMMERS, J., BHAVSAR, K., JOSEPH, G. P., FUNG, W. K., PRABHU, R. (2017): Theoretical investigation of positional influence of FBG sensors for structural health monitoring of offshore structures. OCEANS 2017, Aberdeen, 1-5.
- LANDMANN, C. & JAMAL, R. (2011): Fasersensoren in der klassischen Messtechnik, Erfassung von Temperatur und Dehnung mit optischen Sensoren. Optik & Photonik, 6(1), 44-47.
- LIENHART, W., BUCHMAYER, F., KLUG, F., MONSBERGER, C. M. (2019): Distributed Fiber Optic Sensing on a Large Tunnel Construction Site: Increased Safety, More Efficient Construction and Basis for Condition-Based Maintenance. International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) Driving data-informed decision-making, ICE Publishing, 595-604.
- MARQUES, C. A. F., POSPORI, A., SAEZ-RODRIGUEZ, D., NIELSEN, K., BANG, O., WEBB, D. J. (2016): Aviation Fuel Gauging Sensor Utilizing Multiple Diaphragm Sensors Incorporating Polymer Optical Fiber Bragg Gratings. IEEE Sensors Journal, 16(15), 6122-6129, DOI:10.1109/JSEN.2016.2577782.
- PFEIFFER, F.C. (2000): Einfluß ionisierender Strahlung auf die Funktionsfähigkeit faseroptischer Bragg-Gitter-Sensoren, Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg.
- TOSI, D. (2017): Review and analysis of peak tracking techniques for fiber bragg grating sensors. Sensors, 17(10), 2368-2403, DOI: 10.3390.
- WOSCHITZ, H. & BRUNNER, F.K. (2011): Dynamic strain measurements using embedded fiber optic sensors. Vermessung & Geoinformation, 2/2011, 191-196.

Kontakt

EIKE BARNEFSKE

JENS OHLENDIECK

HARALD STERNBERG

HafenCity Universität Hamburg

Überseeallee 16

20457 Hamburg

eike.barnefske, harald.sternberg@hcu-hamburg.de