

Entwicklung eines faseroptischen Deformationsmesssystems

T. Gebhardt, J. Glötzl, M. Kuhne, M-B. Schaller, W. Schwarz

In Zusammenarbeit mit:

MFGPA Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus Universität Weimar

Professur Geodäsie und Photogrammetrie an der Bauhaus Universität Weimar

EINLEITUNG

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde ein faseroptisches Deformationsmesssystem entwickelt, mit dem man z. B. den räumlichen Verlauf eines Bohrlochs ermitteln kann. Dieses neuartige Messsystem bestimmt die Dehnungen von Glasfasern entlang eines stabförmigen Elementes (Bohrsonde) unter Verwendung von faseroptischen Sensoren. Daraus werden dann die räumlichen Krümmungen der Bohrsonde und damit ihr dreidimensionaler Verlauf errechnet.

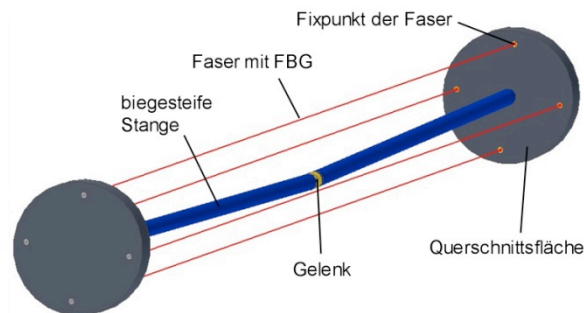


Abb. 1: Prinzipskizze einer Bohrsonde

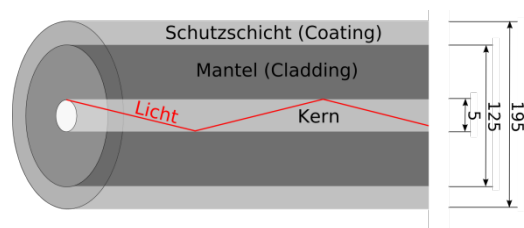
1. FORSCHUNGSPROJEKT

Das von der AiF geförderte PRO INNO II - Forschungsvorhaben „Faseroptisches Deformationsmesssystem“ wurde im Februar 2007 begonnen und im Juli 2009 abgeschlossen. Als Forschungspartner beteiligt waren die Materialforschungs- und prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA), die Firma GLÖTZL Gesellschaft für Baumesstechnik mbH und die Professur Geodäsie und Photogrammetrie an der Bauhaus-Universität Weimar.

2. KOMPONENTEN DES MESSSYSTEMS

3.1 Lichtwellenleiter

Die verwendeten Lichtwellenleiter sind Singlemode-Glasfasern, die aus einem Faserkern aus Quarzglas, einem Quarzglas-Mantel und einer Schutzbeschichtung bestehen, siehe



Skizze nicht maßstäblich, Maße in Mikrometer

Abb. 2: Aufbau der optischen Faser

3.2 Faser-Bragg-Gitter

FBG sind periodische Brechzahländerungen im lichtleitenden Kern von Singlemode-Glasfasern, die Licht einer bestimmten Wellenlänge in der Faser reflektieren, siehe Abb. 3.

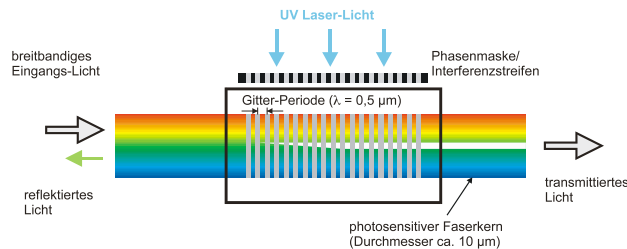


Abb. 3: Prinzip des Faser-Bragg-Gitters [Willsch; Ecke]

Die Wellenlängenänderungen des reflektierten Lichts werden mit einem Spektrometer ermittelt. Die FBG sind von der mechanischen Dehnung und von der Temperatur des Fasergitters gleichermaßen abhängig. In einer Faser können bis zu ca. 20 Sensoren gleichzeitig eingebracht werden. Über einen optischen Schalter können mehrere Fasern an das Spektrometer angeschlossen werden.

3.3 Spektrometer

Als Sensorsystem wurde ein Faser-Bragg-Gitter-Spektrometer des Instituts für Photonische Technologien (IPHT) Jena verwendet. Es arbeitet im nahen Infrarotbereich (790 nm bis 875 nm). Im Spektrometer wird das vom FBG reflektierte Licht in sein Spektrum aufgespalten und auf einen CCD-Zeilensensor geleitet. So können die Lichtintensitäten in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmt werden. Der innere Aufbau des verwendeten Spektrometers ist in Abb. 4 zu erkennen.

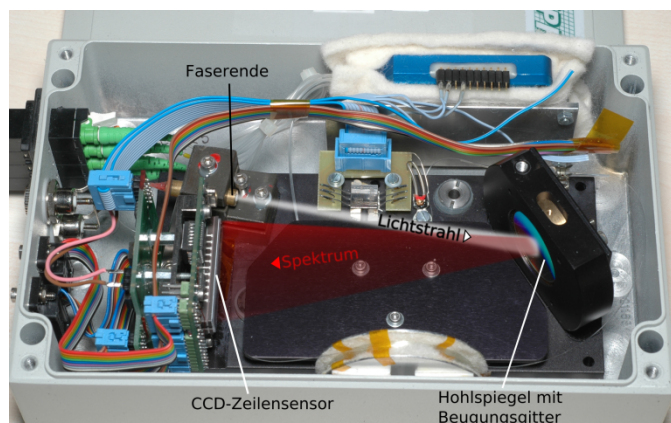


Abb. 4: Innenaufbau des verwendeten Spektrometers

3. BERECHNUNGEN

4.1 Bestimmung der Wellenlänge

Aus den in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessenen Lichtintensitäten berechnet die entwickelte Software die Pixelposition des Intensitätsmaximums eines Sensors mit einer Standardabweichung von ca. 0,03 Pixel. Daraus wird dann mit Hilfe einer Kalibrierfunktion (Gauß-Funktion) die sensorspezifische Wellenlänge mit einer bestimmten Genauigkeit von ca. 3 pm bestimmt.

4.2 Bestimmung der Dehnung

Zur Berechnung von Faserdehnungen aus Wellenlängenmessungen war eine Kalibrierung jedes FBG notwendig. Diese wurden in einer speziellen Kalibriereinrichtung im Geodätischen Labor der Professur Geodäsie und Photogrammetrie durchgeführt, siehe Abb. 5. Es wurde ein autarker Versuchsablauf realisiert, bei dem eine hochgenaue Erfassung von Dehnung ($< 0,25 \mu\text{m}/\text{m}$), Temperatur ($< 0,05 \text{ K}$) und Wellenlänge ($< 3 \text{ pm}$) bei verschiedenen Dehnungs- ($\leq 6.000 \mu\text{m}/\text{m}$) und Temperaturstufen ($5 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $50 \text{ }^\circ\text{C}$) erfolgte.

Mit Hilfe einer für diese Anwendung speziellen Kalibrierfunktion sind die Dehnungsänderungen nur aus den Änderungen der Wellenlänge bzw. der Temperatur berechenbar und das mit einer Standardabweichung $< 5 \mu\text{m}/\text{m}$!

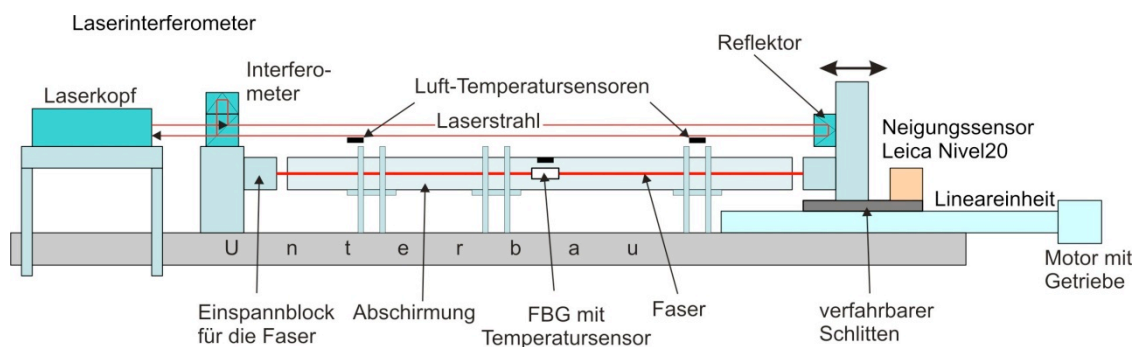


Abb. 5: Schemazeichnung des Kalibrierstandes (Längsschnitt)

4.3 Simulationsberechnung zum 3D-Verlauf der Bohrsonde

Um eine eventuelle Genauigkeitssteigerung durch die Verwendung von mehreren Fasern zu überprüfen, wurde eine Simulationsberechnung durchgeführt. Bei dieser modellbasierten Berechnung wurde davon ausgegangen, dass lediglich zufällige Messabweichungen auftreten. Systematische Messabweichungen, z. B. eine Verdrehung um die Längsachse (Torsion), wurden nicht berücksichtigt. In

Abb. 6 sind die Standardabweichungen s_x bzw. s_y der Lage-Koordinaten x bzw. y des Endpunktes in Abhängigkeit von der Anzahl der Fasern dargestellt.

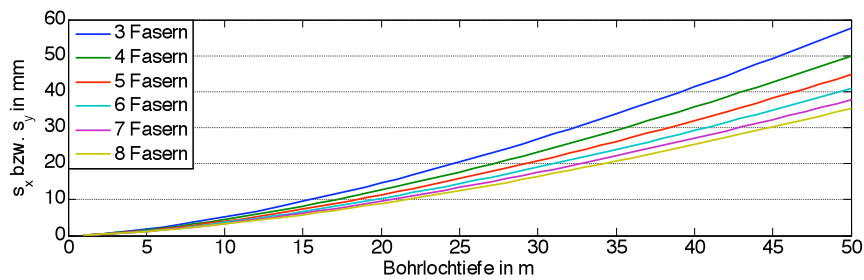


Abb. 6: Standardabweichung des Bohrlochendpunktes

Sogar bei der Minimalanzahl (3) der benötigten Fasern wird die angestrebte Genauigkeit in der Positionsbestimmung des Bohrlochendpunktes von maximal 1 % der Bohrtiefe erreicht. Die Verwendung von acht Fasern mit je einem FBG würde im Vergleich zur Verwendung von drei Fasern die Genauigkeit um knapp 40 % steigern. Allerdings sind mit der größeren Anzahl an FBG auch höhere Kosten verbunden, so dass die Anzahl der zu verwendenden FBG auf vier je Trägerelement beschränkt wurde. Somit ist eine Überbestimmung für die Berechnung des dreidimensionalen Bohrlochverlaufs gegeben, wodurch die Genauigkeit gesteigert und die Messwerte auf grobe Fehler überprüft werden können. Außerdem kann die Berechnung auch bei Zerstörung einer Faser notfalls durchgeführt werden.

4.4 Einfluss der Torsion der Bohrsonde

Es wurde festgestellt, dass es nicht ohne weiteres möglich ist, Deflektometer mit Längen von bis zu 50 m zu bauen, die sich im praktischen Einsatz nicht um ihre Längsachse verwinden. Um einen Überblick über die Auswirkung der Torsion zu bekommen, wurde in einer Simulationsberechnung der Einfluss dieser systematischen Messabweichung untersucht. Um den größtmöglichen Einfluss (Maximalfehler) zu erhalten, wurde von einer konstanten Torsion ausgegangen. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für ein Deflektometer mit einer Länge von 30 m sind in der *Tabelle 1* zusammengestellt. Die Abweichungen, die innerhalb der geforderten Genauigkeit von 1 % der Bohrlochtiefe liegen, sind grün, die, die sich an der Genauigkeitsgrenze befinden, sind gelb und die, die die geforderte Genauigkeit übersteigen, sind rot hinterlegt.

| Torsion | konstanter Knickwinkel der Bohrsonde | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0,5° | 1,0° | 1,5° | 2,0° | 2,5° | 3,0° |
| 0,1° | 66 mm | 130 mm | 180 mm | 200 mm | 220 mm | 370 mm |
| 0,5° | 360 mm | 690 mm | 970 mm | 1200 mm | 1370 mm | 1500 mm |
| 1,0° | 760 mm | 1470 mm | 2100 mm | 2630 mm | 3060 mm | 3380 mm |
| 1,5° | 1180 mm | 2300 mm | 3300 mm | * | * | * |
| 2,0° | 1630 mm | 3200 mm | * | * | * | * |
| * ... Abweichung nicht berechenbar | | | | | | |

Tabelle 1: Torsionsbedingte Abweichungen des Bohrlochendpunktes bei 30 m Tiefe

Der Einfluss der Torsion auf den Endpunkt ist enorm groß. Daher muss die Torsion benachbarter Elemente messtechnisch mit einer Genauigkeit von max. 0,1° bestimmt werden.

4.5 Bestimmung der Torsion

Der Grundgedanke zur Bestimmung der Torsion liegt darin, einige Fasern nicht parallel zur Achse der Elemente auszurichten, sondern schräg dazu unter einem Winkel. Überkreuzt man z. B. zwei benachbarte Fasern, tritt bei einer Torsion in der einen gekreuzten Faser eine negative und in der anderen eine positive Dehnungsänderung auf. Aus den Dehnungsänderungen der gekreuzten Fasern kann die Torsion ermittelt werden. Die Ergebnisse von Simulationsrechnungen sind aus der *Tabelle 2* zu ersehen. Mit einer Dehnungsmessgenauigkeit von derzeit < 5 µm/m kann der Torsionswinkel auf < 0,5° genau bestimmt werden, so dass die Torsionseffekte stark reduziert werden. Verkürzt man die Faserlänge, so kann die Torsion noch genauer ermittelt werden.

| Torsion | 0,1° | 0,5° | 1,0° | 1,5 ° | 2,0 ° |
|-------------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Dehnungsänderung bei 1 m Faserlänge | ±1,1 µm | ±5,5 µm | ±10,9 µm | ±16,4 µm | ±21,8 µm |

Tabelle 2: Dehnungsänderungen bei gekreuzten Fasern

4.6 Bestimmung von Richtungsänderungen

Mit Hilfe eines von der Fa. Glötzl gefertigten Labormusters und vier kalibrierten Fasern mit jeweils einem FBG wurden Versuche zur Bestimmung von Richtungsänderungen einer Scheibe durchgeführt. Das Labormuster besteht aus einer biegesteifen Stange, an deren Enden jeweils eine Vorrichtung zum Einspannen der Faser befestigt ist. An einem Ende können die Fasern zudem vorgespannt werden, um auch negative Dehnungen zu messen, siehe *Abb. 7*. Am anderen Ende sind die Fasern an einer Scheibe eingespannt, die mittels zweier Mikrometerschrauben in verschiedene Richtungen gekippt werden kann, siehe.

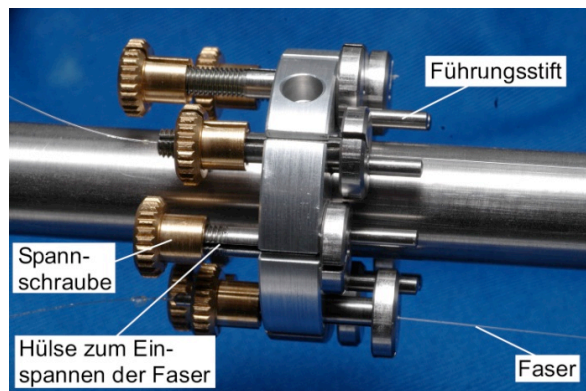


Abb. 7: Faserverspannvorrichtung mit Führungsstiften zur Vermeidung von Torsion

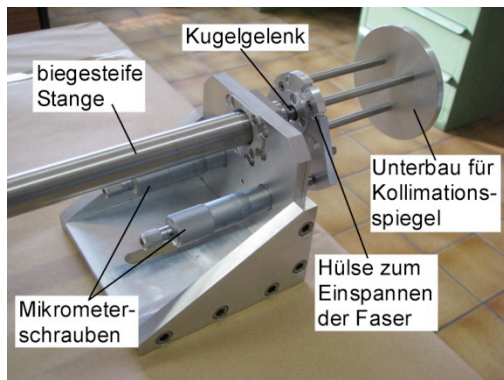


Abb. 8: kippbare Einspannvorrichtung mit Mikrometerschrauben

Die Richtungsänderungen der Scheibe im Horizontalen α_{Soll} und im Vertikalen β_{Soll} wurden mit einem Theodolit mit Autokollimationsfernrohr bestimmt. Die vier Fasern wurden symmetrisch an den Scheiben des Labormusters angeordnet. Die Änderungen der Wellenlänge und der Temperatur der FBG-Sensoren wurden erfasst und anschließend die Dehnungsänderungen der Fasern bestimmt. Mit Hilfe dieser Dehnungsänderungen konnten die Änderungen der Horizontal- und Vertikalwinkel α_{Ist} und β_{Ist} berechnet werden. In *Tabelle 3* sind die gemessenen (Soll) und die berechneten (Ist) Änderungen der Winkel gegenübergestellt.

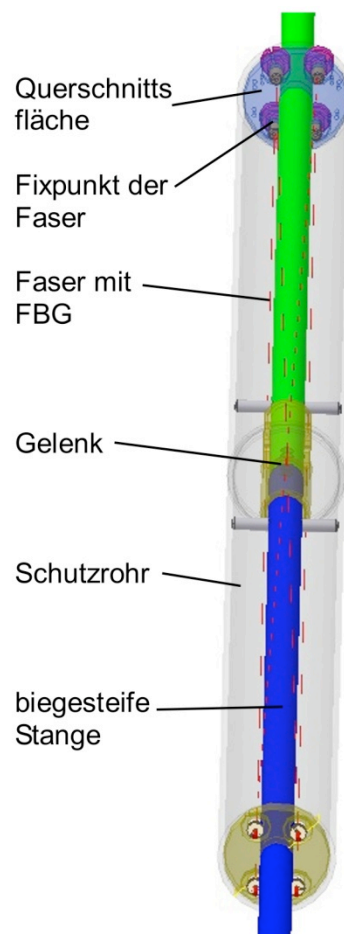
| Messung | α [°] | | β [°] | | Abweichung [°] | |
|---------|--------------|--------|-------------|--------|----------------|-----------|
| | Soll | Ist | Soll | Ist | f_α | f_β |
| 1 | 0,009 | 0,022 | -0,817 | -0,829 | 0,013 | -0,012 |
| 2 | 0,460 | 0,470 | 0,652 | 0,662 | 0,009 | 0,011 |
| 3 | -0,445 | -0,439 | -1,466 | -1,487 | 0,006 | -0,021 |
| 4 | -0,453 | -0,469 | -0,652 | -0,667 | -0,015 | -0,015 |
| 5 | 1,515 | 1,583 | -0,555 | -0,561 | 0,068 | -0,005 |
| 6 | 0,126 | 0,134 | -1,053 | -1,066 | 0,009 | -0,012 |

Tabelle 3: Vergleich der gemessenen und berechneten Richtungsänderungen

Die Bestimmungsgenauigkeit der Winkeländerungen beträgt im Mittel 0,012°. Dies bestätigt die Korrektheit des entwickelten Berechnungsalgorithmus.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In den durchgeführten Versuchen und Simulationsrechnungen wurde festgestellt, dass eine Dehnungsbestimmung von $< 5 \mu\text{m}/\text{m}$ mit faseroptischen Sensoren möglich ist und das der dreidimensionale Verlauf des zu vermessenden Bohrlochs mit ausreichender Genauigkeit ($< 1\%$ der Bohrlänge) bestimmt werden kann. Das faseroptische Deformationsmesssystem kann somit zur Beobachtung von geotechnischen Bauwerken, zur Qualitätssicherung bei der Herstellung von Bohrlöchern für Verankerungen, Pfahlgründungen und Injektionen und in explosionsgefährdeten Umgebungen eingesetzt werden.



CAD-Zeichnung Bohrsonde