



## Eine Glasfaser als Sensorelement: Entwicklung eines faseroptischen Zweiachs-Neigungssensors

Klaus Macheiner, Graz

### Kurzfassung

Glasfasern sind in der Telekommunikation weit verbreitet und ermöglichen hohe Datenraten und Übertragungsgeschwindigkeiten. Licht spielt dabei die zentrale Rolle des Übermittlers. Die Verwendung von optischen Fasern in der Sensorik und deren Anwendungen, insbesondere in der Ingenieurgeodäsie, gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Der Einsatz einer einfachen Glasfaser als Sensorelement für den Prototyp eines Neigungssensors ist ein Beispiel dafür, wie Licht und die mechanischen Eigenschaften der Faser für die Messung von Neigungen in zwei Achsen nutzbar gemacht werden können. Dabei wird das aus einer Glasfaser gefertigte Sensorelement einseitig eingespannt. Das freie Ende des Elements erfährt bei Neigung des Sensors Auslenkungen, die aufgrund der Biegung des Sensorelements entstehen. Wenn Licht in der Faser geführt wird, entsteht am freien Ende ein mit einem positionsempfindlichen Detektor messbarer Punkt. Aus den so bestimmten Faserauslenkungen können anschließend die Neigungswinkel berechnet werden, wofür die Faser als schlanker Balken modelliert wird.

Sensorentwicklung, Kalibrierung und Signalverarbeitung sind Themen dieses Beitrags, wobei auch der Einsatz bei statischen und kinematischen Anwendungen besonders behandelt wird. Die Arbeit steht an der Schnittstelle von Mechanik, Sensorik und Ingenieurgeodäsie und zeigt, wie geodätisches Wissen sowohl bei der Sensorentwicklung, als auch bei der Datenauswertung genutzt werden kann.

**Schlüsselwörter:** Neigungssensor, Faseroptik, Balkenbiegung, Kalibrierung, Signalverarbeitung, statische und kinematische Anwendungen

### Abstract

Optical fibers are widely used for telecommunication and allow high bandwidths and data transfer rates. In the transfer process light plays the central role of the transmission. In sensor technology and its applications, especially in engineering geodesy, the use of optical fibers gains constantly in importance.

The use of a simple optical fiber as a sensing element for the prototype of a fiber optic tiltmeter is an example of how light and the mechanical properties of the fiber can be used for biaxial tilt determination. The sensing element consists of an optical fiber which is clamped at one side. The free end of the emerging element experiences deflections as soon as the sensor is tilted. When light is guided within the fiber, the cantilever deflections can be measured using an optical detector. From the fiber deflections, the tilt angles can be calculated based on modelling the optical fiber as a cantilever using equations of structural mechanics.

Sensor development, prototype calibration and signal processing will be treated in this article. Also selected aspects of static and kinematic applicability will be addressed. The work can be viewed at the interface between mechanics, sensor technology and engineering geodesy and shows how geodetic knowledge can be applied for sensor development and data processing.

**Keywords:** tiltmeter, fiber optics, cantilever, signal processing, calibration, static and kinematic applications

### 1. Einleitung

Abgesehen von hochpräzisen Sensoren für geodätische Überwachungsmessungen (z. B. Leica Nivel 20 bzw. das Nachfolgeprodukt Nivel 200) reichen für die Genauigkeit der Neigungsmessung oftmals  $0.01^\circ$  aus, selbst für Anwendungen in der Ingenieurgeodäsie. Eine typische Aufgabe, die Absteckung von Pylonen im Brückenbau, wird in [1] beschrieben, wobei die Anforderungen an die Vertikalität der abzusteckenden Objekte bei  $0.07^\circ$  liegen. Auf eine ähnliche Genauigkeitsklasse wird in [2] bei der kontrollierten Absenkung von Senkkästen verwiesen. Beide (quasi-) statischen Anwendungen erfordern die

Bestimmung der Neigungswinkel in zwei Achsen, kommen jedoch üblicherweise mit einem kleinen Arbeitsbereich von weniger als  $5^\circ$  aus.

Für kinematische Anwendungen, z. B. Gleisvermessung [3] oder Baumaschinensteuerung [4], ist oft ein größerer Arbeitsbereich bei gleich bleibenden Genauigkeitsanforderungen erforderlich. Die Einhaltung dieser Genauigkeit im kinematischen Betrieb ist jedoch eine große Herausforderung, vor allem weil Horizontalbeschleunigungen als Störeinflüsse auf das dynamische System Neigungssensor wirken. Für geodätische Arbeiten in diesem Kontext siehe z. B. [5] und [6].

Zentrales Element der hier vorgestellten Sensorentwicklung mit einem Arbeitsbereich von  $\pm 30^\circ$  ist ein Sensorelement (SE) aus einer optischen Faser, dessen Eignung für die Neigungsmessung untersucht wird. Die dafür notwendigen Schritte werden in dieser Arbeit beschrieben. Auszüge experimenteller Ergebnisse im Hinblick auf statische und kinematische Anwendungen werden gezeigt. Untersuchungen kommerziell erhältlicher Neigungsmesser sind beispielsweise in [7] und [8] zu finden und ermöglichen es, die Leistungsfähigkeit der hier vorgestellten Entwicklung im Vergleich zu Produkten auf dem Sensormarkt zu beurteilen.

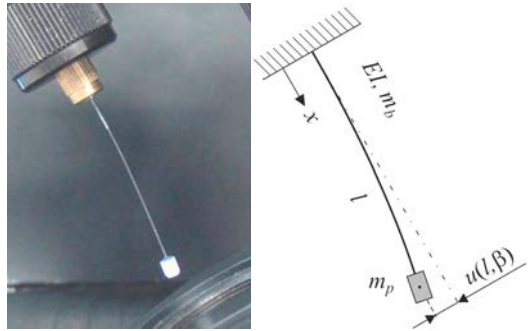


Abb. 1: links, Sensorelement Glasfaser; rechts, mechanisches Äquivalent Biegebalken

## 2. Sensorelement Glasfaser

### 2.1 Konzept und Prinzip

Die Verwendung einer Glasfaser als SE für einen faseroptischen Neigungsmesser (FO-TM, fiber optic tiltmeter) basiert auf einem einfachen Konzept: Eine Laserdiode (LD) erzeugt Licht, das in eine Faser (Masse  $m_b$ , Biegesteifigkeit EI) gekoppelt wird, die einseitig mit einer Länge  $l$  eingespannt ist und in Ausgangslage des Sensors vertikal nach unten hängt. Wird der Sensor um den Winkel  $\beta$  geneigt, erfährt das freie Faserende Auslenkungen  $u(l, \beta)$ , die im Falle des Auftretens zeitabhängiger Kräfte  $F(t)$  (z.B. Störbeschleunigungen) zusätzlich von der Zeit  $t$  abhängen. Die Position des am freien Faserende austretenden Lichts der LD kann mit einem optischen Detektor, z.B. einer positionsempfindlichen Diode (PSD), gemessen werden. Somit werden die Auslenkungen in Form von zweidimensionalen Positionen hochfrequent erfasst. Die Situation des ausgelenkten SEs ist in Abb. 1 beispielhaft dargestellt. Die Auslenkungen  $u$  als Funktion der Position  $x$  entlang der Faser beschreiben die Biegelinie  $u(x)$ , siehe z. B. [9]. Aus den Auslenkungen des Endpunktes werden in weiterer Folge Neigungswinkel berechnet. Wenn  $u(l)$  bei sinnvollen Längen  $l$  (mm bis cm) für eine ausreichende Positionauflösung zu klein ist, können die Faserauslenkungen durch eine Masse  $m_p$  am freien Ende vergrößert werden.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Pendelneigungsmessern, bei denen die Pendelaufhängung oftmals einen großen konstruktiven und mechanischen Aufwand erfordert, besitzt ein derartiges SE durch die feste Einspannung der Faser keine derartigen komplexen Elemente. Ein weiterer Vorteil besteht in der direkten und einfachen Erfassung der zweidimensionalen Auslenkungen.

### 2.2 Modellierung und Simulation

Für die Modellierung der Auslenkungen  $u$  des faseroptischen SEs wird dieses durch einen schlanken isotropen Balken mit punktförmiger Masse am freien Ende ersetzt. Die Auslenkungen als Funktion der Position  $x$  entlang des Balkens und der Zeit  $t$  werden durch eine partielle Differentialgleichung beschrieben, siehe z.B. [10]. Die Lösung dieser Differentialgleichung setzt sich aus  $k$  verschiedenen Eigenformen (Schwingungsmoden) zusammen, die zusätzlich jeweils zeitabhängig sind ( $k$  unterschiedliche Schwingungsfrequenzen  $f_k$ ). In [11] wird gezeigt, dass die Beiträge von höheren Schwingungsmoden ( $k > 1$ ) zur Gesamtauslenkung  $u$  bei Vorhandensein einer Punktmasse  $m_p$ , die wesentlich größer ist als die Balkenmasse  $m_b$ , vernachlässigt werden können. Maßgeblich sind lediglich die Beiträge der ersten Schwingungsmode (Grundschiwingung), die für den zweidimensionalen Fall ausreichend genau durch das Differentialgleichungssystem

$$M \begin{bmatrix} \ddot{u}(t) \\ \ddot{v}(t) \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \dot{u}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

beschrieben werden, siehe z. B. [12]. Die Größen  $u$  und  $v$  beschreiben darin die Auslenkungen entlang zweier orthogonaler Achsen des Sensorkoordinatensystems. Die Matrizen  $M$ ,  $D$  und  $C$  enthalten die schwingenden Massen, die Dämpfungskoeffizienten bzw. die Federkonstanten des mechanischen Systems. Die Kraftkomponenten  $F_1$  bzw.  $F_2$ , die auf das System wirken, werden im Falle einer reinen Neigung durch die entsprechenden Komponenten der Schwerkraft verursacht ( $m \cdot g \cdot \sin \beta$ ). Für diagonale Matrizen kann obiges System durch zwei unabhängige gewöhnliche Differentialgleichungen

$$\begin{aligned} m \ddot{u}(t) + d_1 \dot{u}(t) + c_1 u(t) &= F_1(t) \\ m \ddot{v}(t) + d_2 \dot{v}(t) + c_2 v(t) &= F_2(t) \end{aligned} \quad (2)$$

ausgedrückt werden, siehe [12]. Wenn die punktförmige Masse und die Faser selbst symmetrisch bezüglich ihrer Längsachse sind, können die Dämpfungskoeffizienten  $d_i$  und die Federkonstanten  $c_i$  durch idente Werte für  $d$  bzw.  $c$  ersetzt werden. Die Masse  $m$  setzt sich aus Punktmasse  $m_p$  und Balkenmasse  $m_b$  zusammen,

$$m = m_p + \kappa \cdot m_b, \quad (3)$$

wobei der Faktor  $\kappa = 33/140$  aus der Balkenmasse entsprechend ihres Beitrags zur kinetischen Energie eine äquivalente Punktmasse erzeugt, siehe [13]. Die Federkonstante  $c$  erhält man gemäß [14] aus der Biegesteifigkeit  $EI$  und der Faserlänge  $l$ ,

$$c = \frac{3EI}{l^3}. \quad (4)$$

Der Dämpfungskoeffizient  $d$  kann experimentell durch Untersuchung des Abklingverhaltens ermittelt werden. Die Kreisfrequenz  $\omega$  erhält man aus

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}. \quad (5)$$

Die Festlegung einer geeigneten Konfiguration (Masse  $m$ , Faserlänge  $l$ ) erfolgt durch numerische Simulationen unter Berücksichtigung des gewünschten Arbeitsbereiches von  $\pm 30^\circ$  und der verfügbaren Fläche des optischen Detektors. Der Glaskörper einer handelsüblichen Glasfaser hat einen Radius von  $r = 62.5 \mu\text{m}$  (notwendig für die Berechnung des Flächenträgheitsmoments  $I$ , siehe [9]), der Elastizitätsmodul von Glas beträgt  $E = 72 \text{ GPa}$  bei einer Dichte von  $\rho = 2.20 \text{ g/cm}^3$ ,

vgl. [15]. Die  $15 \mu\text{m}$  starke Schutzumhüllung (Coating) der ausgewählten Faser weist die Parameter  $E_c = 15 \text{ GPa}$  und  $\rho_c = 1.34 \text{ g/cm}^3$  auf, vgl. [16]. Eine Faser mit Polyimid-Coating wird gewählt, da die Eigenschaften und Abmessungen dieses Materials für eine deutliche Reduktion der mechanischen Spannungen innerhalb der Faser bei Biegung sorgen, siehe [17].

Simulationsrechnungen zeigen, dass bei einer Neigung des Sensors von  $30^\circ$  Auslenkungen  $u(l)$  von mehr als  $1 \text{ mm}$  erzielt werden, wenn z. B.  $l = 20 \text{ mm}$  und  $m = 100 \text{ mg}$  gewählt wird. Ab einer Länge von  $l = 35 \text{ mm}$  wird bei identer Masse  $m$  eine Auslenkung  $u(l) > 4 \text{ mm}$  erreicht. Der verfügbare Detektor (PSD) schränkt die messbare Auslenkung auf  $\pm 4 \text{ mm}$  ein, wobei Randbereiche vermieden werden sollten (Abschnitt 3.2). Um die genannten Randbedingungen zu erfüllen, wird das zu fertigende SE mit  $l = 30 \text{ mm}$  und  $m = 80 \text{ mg}$  dimensioniert. Dieses SE weist eine Eigenfrequenz von  $f = 6.4 \text{ Hz}$  auf.

Nach erfolgter Fertigung (Abschnitt 3.1) wurden Simulation und Realisierung einem Vergleich unterzogen. Dazu wurde mit der Einrichtung zur späteren Neigungskalibrierung (Abschnitt 3.2) eine schnelle Neigungsänderung von  $10^\circ$  durchgeführt und die Reaktion des SEs untersucht (Abb. 2). Der gesamte Datensatz umfasst einen Zeitraum von  $30 \text{ s}$ . Die Neigungsänderung beginnt nach  $12 \text{ s}$  und ist  $0.5 \text{ s}$  später beendet. Danach führt das SE zweidimensionale Schwingungen um die statische Ruhelage aus, die durch einen schwarzen Punkt gekennzeichnet ist. Die

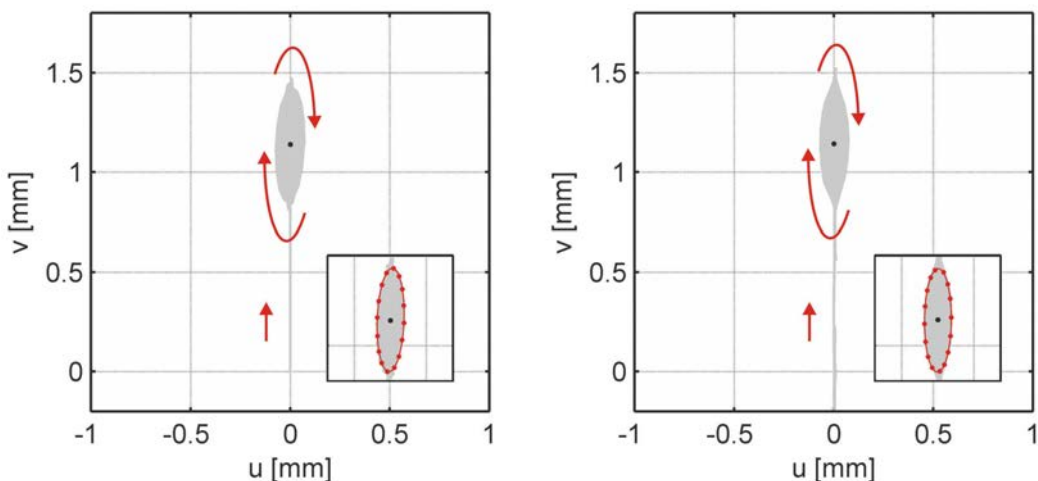


Abb. 2: Auslenkungen  $u$  und  $v$  des SEs bei einer Neigung des Versuchsmusters um  $\beta_1 = 10^\circ$  (Rotation um Achse  $u$ ); links, Simulation; rechts, Messung

ellipsenförmigen Kurven um die statische Ruhelage werden durch laterale Beschleunigungen ( $< 0.01 \cdot g$ ) hervorgerufen, die vermutlich von der Kalibriereinrichtung verursacht werden. Für die Simulation wurden drei aufeinander folgende impulsartige Beschleunigungen angenommen (ansonsten würde das Sensorelement lediglich Schwingungen in einer Ebene parallel zur  $v$ -Achse ausführen).

Für die Berechnung der Neigungswinkel ist die statische Ruhelage, also der Punkt im Zentrum der Grundrisskurven, maßgeblich. In  $v$ -Richtung beträgt der entsprechende Auslenkungsbeitrag 1.145 mm (simuliert) bzw. 1.147 mm (gemessen). Das Differentialgleichungssystem (1) ist also geeignet, das Schwingungsverhalten des SEs zufrieden stellend zu modellieren. Zur Extraktion der zeit- und neigungsabhängigen statischen Ruhelage im späteren Sensorbetrieb müssen geeignete Filtertechniken verwendet werden (Abschnitt 2.3), bevor in weiterer Folge die Neigungswinkel berechnet werden können.

### 2.3 Filterung und Berechnung der Neigungswinkel

Zur Bestimmung der (quasi-) statischen Ruhelage des SEs müssen dessen Vibrationen ( $f = 6.4$  Hz) durch Anwendung von digitalen Filtertechniken rechnerisch eliminiert werden. Unter der Voraussetzung, dass die Neigungsänderungen mit niedrigeren Frequenzen als der Eigenfrequenz des Sensors stattfinden, muss die Grenzfrequenz  $f_c$  des Filters kleiner als die Eigenfrequenz des SEs gewählt werden, z. B. [6]. Mit Hilfe der Transferfunktion des SEs wird für den Standardfall der Anwendungen eine Grenzfrequenz von  $f_c = 1.0$  Hz festgelegt. Bei dieser Frequenz tritt eine maximale Amplitudenvergrößerung von 2.5 % auf. Aus der Vielzahl an möglichen digitalen Filtern, siehe [18], wurde ein Chebyshev-II-Filter minimaler Ordnung ( $N = 5$ ) gewählt, der bei gegebenen Toleranzspezifikationen (Welligkeit im Durchlassbereich: 0.002 dB, Abschwächung im Sperrbereich: -60 dB, Bandbreite: 4 Hz) die geringste Ansprechzeit und die kleinste Überschwingungsamplitude erzielt. Mit diesem Filter werden die Auslenkungen gefiltert, bevor die weiteren Berechnungsschritte zur Bestimmung der Neigungskomponenten  $\beta_1$  und  $\beta_2$  durchgeführt werden.

Nach erfolgter Positionskalibrierung (Abschnitt 3.2) entsprechen die als zweidimensionale Positionen verfügbaren Auslenkungen  $x$  und  $y$  den aus der Simulation (Abschnitt 2.2) bekannten Auslenkungen  $u$  und  $v$ . Die Neigung  $\beta$  in

Richtung  $\alpha$  kann aus der Gesamtauslenkung  $d$  in dieser Richtung durch Kalibrierung ermittelt werden (Abschnitt 3.2). Die Neigung  $\beta$  in Richtung  $\alpha$  wird abschließend in zwei Komponenten  $\beta_1$  und  $\beta_2$  getrennt, die der Längs- und Querneigung in Bezug auf die Achsen des Sensorkoordinatensystems entsprechen.

## 3. Realisierung eines Versuchsmusters

### 3.1 Komponenten

Zur Untersuchung, ob eine optische Faser als SE zur Neigungsmessung geeignet ist, wurde ein FO-TM Versuchsmuster aus teils am Institut bzw. im Messlabor vorhandenen Komponenten realisiert. Aus der Nennung von Hardware-Komponenten dürfen keine Präferenzen abgeleitet werden.

Die Auslenkungen des SEs werden durch Licht aus einer Pigtail-LD (LFO-65-d,  $\lambda = 650$  nm) messbar gemacht. Als optischer Detektor wird eine PSD (Hamamatsu S5991-01) mit Signalverarbeitungseinheit (Hamamatsu C4758) verwendet, deren Ausgangssignal ( $\pm 10$  V) von einem A/D-Wandler (z. B. HBM Spider 8, 16 bit) aufgezeichnet wird. Das SE selbst besteht aus einer 30.15 mm langen Faser mit Polyimid-Coating, an deren Ende eine Keramik-Ferrule mit einer Masse von 80 mg achssymmetrisch angeklebt ist. Das eingespannte Ende des SEs ist in einer stabilen Halterung eingeklebt, die wiederum mit einem Aluminium-Gehäuse fest verbunden ist (Abb. 3).

Wenn man die PSD durch ein faseroptisches System ersetzt, also z.B. die Intensitätsverteilung über mehrere Fasern messen würde, vgl. [19], würde man einen Sensor erhalten, der sämtliche Vorteile faseroptischer Sensoren in sich vereinigt (auch keine Beeinflussung durch elektromagnetische Störungen). Für die grundlegende Untersuchung der Eignung einer Faser als SE ist allerdings die verwendete Hardware ausreichend. Aus ähnlichen Beweggründen wird vorerst der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Resultate nicht untersucht, da die sperrigen Abmessungen des Gehäuses den Hauptanteil dieser Effekte verursachen würden. Bei Miniaturisierung (zur Zeit limitiert durch die Abmessungen der C4758) würden diese möglichen Effekte deutlich reduziert werden.

### 3.2 Kalibrierung

Zur Umwandlung der mit dem A/D Wandler aufgezeichneten Auslenkungen von der Primäreinheit Volt in metrische Größen bei gleichzeitiger

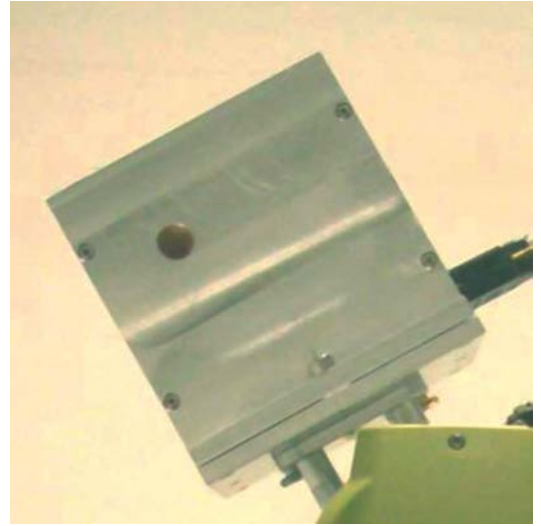
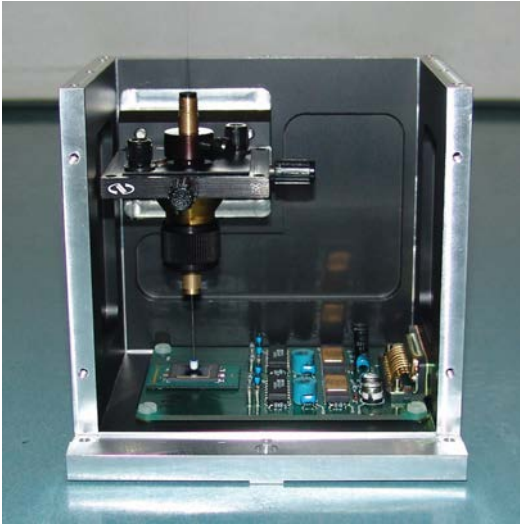


Abb. 3: links, Blick ins innere des FO-TM Versuchsmusters; rechts, FO-TM in geneigter Position

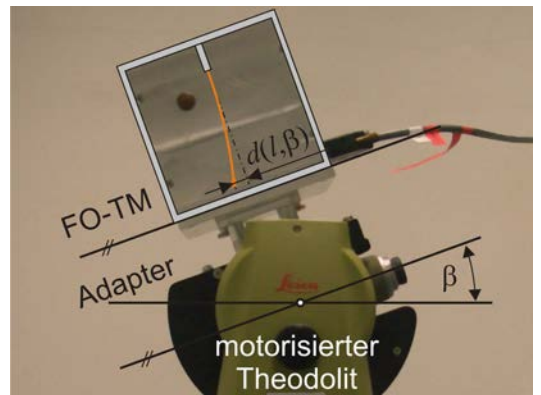
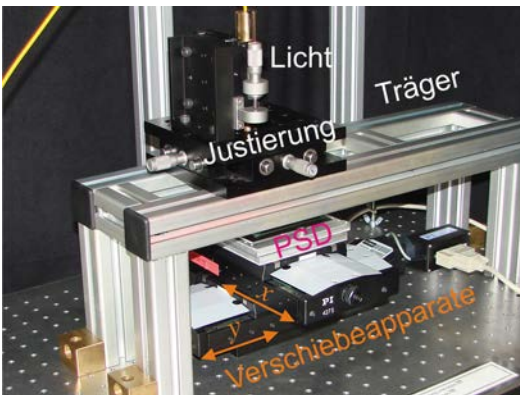


Abb. 4: links, Einrichtung zur Kalibrierung der PSD; rechts, Einrichtung zur Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Faserauslenkung  $d$  und Neigungswinkel  $\beta$

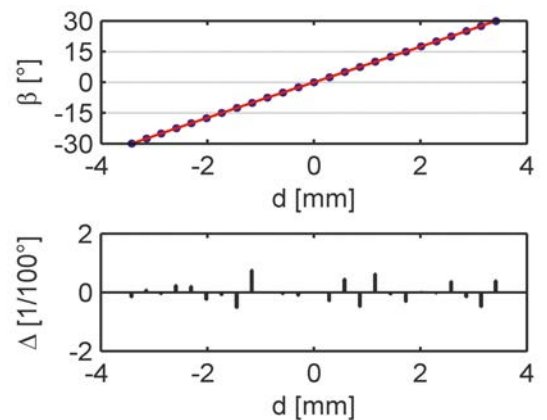
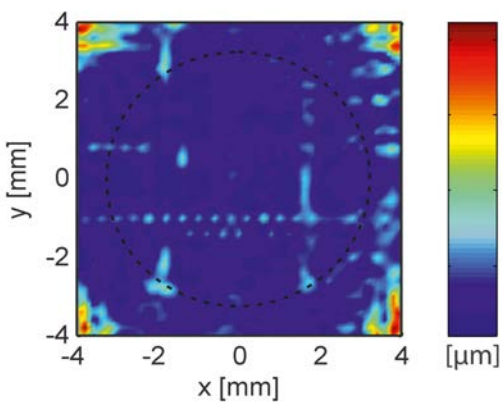


Abb. 5: links, Ergebnis der Positionskalibrierung; rechts, Beispiel einer Kalibrierfunktion Auslenkung  $d$  vs. Neigung  $\beta$

Kompensation der systematischen Effekte der PSD, siehe [20], wird eine Positionskalibrierung durchgeführt. Aus den kalibrierten Positionswerten wird durch eine Neigungskalibrierung der Zusammenhang zwischen Neigungswinkel und Faserauslenkung bestimmt. Die beiden dafür entwickelten Kalibriereinrichtungen sind in Abb. 4 dargestellt.

Eine Einrichtung aus zwei orthogonal angeordneten Verschiebeapparaten (Physik Instrumente M-410.DG) dient der simultanen Erfassung von PSD- und Referenzpositionen. Die systematische Verzeichnung der PSD kann somit erfasst und korrigiert werden. Die Residuen überbestimmter bikubischer Transformationen, siehe z. B. [21], von PSD-Positionen ins System der Referenzwerte zeigt Abb. 5 (links; Raster:  $0.2 \times 0.2$  mm, jeweils 25 Identpunkte). Der strichlierte Kreis kennzeichnet die im statischen Fall auftretenden Auslenkungen bei  $\pm 30^\circ$ .

Die Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Faserauslenkung und Neigungswinkel erfolgt mit Hilfe eines adaptierten motorisierten Theodolits (z. B. Leica TM1100, vgl. Abb. 4, rechts). Ein Adapter ermöglicht die Aufnahme des FO-TM, ein Steuerungs- und Messprogramm ermöglicht den Kreisabgriff des Theodolits, die Neigung des Fernrohrs mit aufgesetztem Sensor sowie die Erfassung der auftretenden Faserauslenkungen. Einer Richtungsabhängigkeit des Betrags der Auslenkungen  $d$ , z. B. verursacht durch Asymmetrien der Einspannung, wird durch Verdrehung des FO-TM relativ zum Adapter in einem Lochkreisabstand von  $15^\circ$  und der Bestimmung mehrerer richtungsabhängiger Kalibrierfunktionen Rechnung getragen. Ein Beispiel einer geschätzten Kalibrierfunktion wird in Abb. 5 (rechts) gezeigt, wobei die Residuen  $\Delta$  alle kleiner als  $0.01^\circ$  sind.

## 4. Leistungsfähigkeit des Versuchsmusters

### 4.1 Statische Kenngrößen

An statischen Kenngrößen wurden für den FO-TM in [11] Wiederholbarkeit, Genauigkeit, Einschaltverhalten und Drift sowie Stabilität des Nullpunktes untersucht. Exemplarisch werden hier das Einschalt- bzw. Driftverhalten sowie Wiederholbarkeit und Genauigkeit gezeigt.

Das Einschaltverhalten wurde für das nicht aufgewärmte Versuchsmuster bei statischer Aufstellung bestimmt (Abb. 6, links). Referenzmessungen mit einem Nivel 20 in unmittelbarer Nähe zeigen keine Neigungsänderungen an. Unmittelbar nach dem Einschalten finden scheinbare

Neigungsänderungen von bis zu  $0.03^\circ$  statt, die jedoch nach einer Zeit von  $t_0 = 1.2$  h abklingen. Der hier mit  $t_0$  idente Zeitpunkt  $t_1$  zeigt das Ende zusammenhängender Ausreißer in Bezug auf ein lineares Modell (Drift) an. Die Größenordnung der Driften für beide Neigungskomponenten liegt im Bereich jener von kommerziell erhältlichen Sensoren, vgl. [7].

Die Wiederholbarkeit wurde mit Hilfe der Einrichtung für die Neigungskalibrierung (Abschnitt 3.2) durch ein quasi-statisches Experiment bestimmt, indem verschiedene Neigungen über den gesamten Arbeitsbereich insgesamt sechs Mal aus unterschiedlichen Richtungen angefahren und anschließend eine Wartezeit von 60 s eingehalten wurde. Ein eigens entwickeltes Modell zur Hysteresekompensation wurde aktiviert, das Ergebnis zeigt Abb. 6 (rechts). Die Differenzen  $\Delta$  zwischen Soll- und Ist-Neigungen sind kleiner als  $0.04^\circ$  (0.13 % FSO, vgl. [22]). Die dem Quantil-Quantil-Plot entnommene Standardabweichung (Präzision) des FO-TM beträgt  $0.015^\circ$ .

### 4.2 Dynamische Kenngrößen

Das dynamische Sensorverhalten kann gemäß [23] mit Hilfe von Prüffunktionen, z. B. der Sprungfunktion, ermittelt werden. Das Überschwingverhalten bei schnell durchgeführten Neigungen und die damit verbundenen Abklingzeiten, d. h., jene Zeitspanne, nach der sich das Ausgangssignal auf den Wert nach dem Sprung einstellt, sind von besonderer Bedeutung im kinematischen Betrieb. Verschiedene auf den Einheitssprung normierte Neigungsänderungen sind in Abb. 7 (links) dargestellt. Je nach Betrag und damit zeitlicher Dauer der Neigungsänderung (realisiert mit der Einrichtung zur Neigungskalibrierung) sind unterschiedliche Überschwingungsamplituden festzustellen. Das Symbol  $\tau$  kennzeichnet die zeitliche Verzögerung des Ausgangssignals aufgrund der Filterverzögerung (Gruppenlaufzeit). Die normierten Überschwingungsamplituden weisen eine exponentielle Abhängigkeit von der Dauer der Neigungsänderung  $\Delta t$  auf (Abb. 7, rechts). Nachteilig auf das Sensorsignal wirken sich Neigungsänderungen aus, die innerhalb kurzer Zeit ausgeführt werden. Wird diese Änderung langsam ausgeführt, treten deutlich geringere Überschwingungen auf, selbst wenn die Neigungsänderung große Beträge annimmt.

Nach einer plötzlichen Neigungsänderung ist die Kenntnis über jenen Zeitraum bedeutend, nach dem das Sensorsignal wieder den korrekten Neigungswert anzeigt, also das Überschwingen

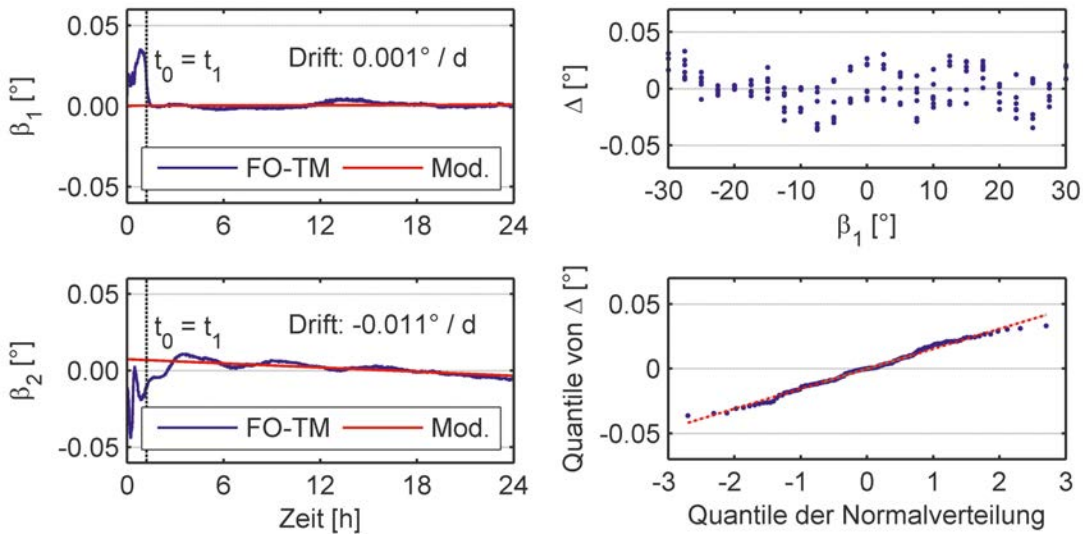


Abb. 6: links, Einschaltverhalten und Drift; rechts, Wiederholbarkeit und Präzision des Neigungswinkels (Komponente  $\beta_1$ )

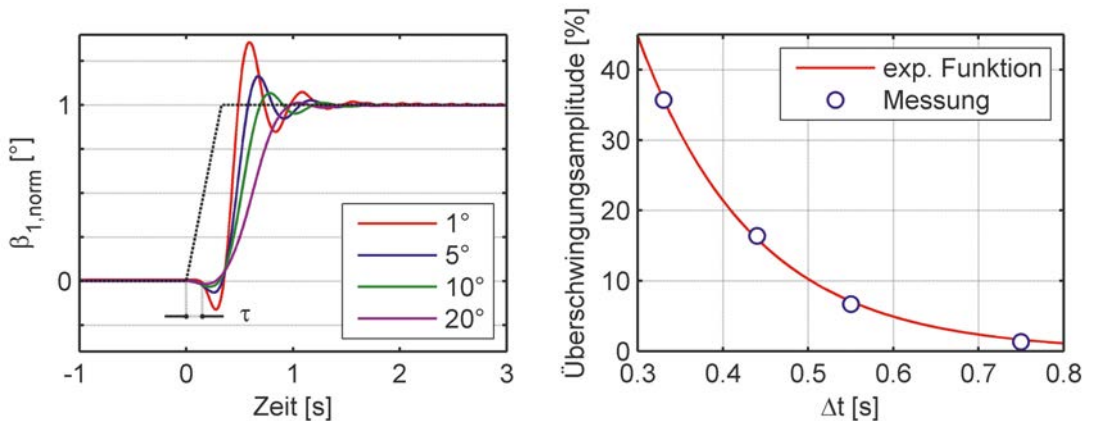


Abb. 7: links, normiertes Sensorsignal aus verschiedenen Neigungsänderungen (Legende); rechts, Abhängigkeit der Überschwingungsamplitude von der Dauer  $\Delta t$  der Neigungsänderung

abgeklungen ist. Diese Abklingzeiten betragen für den FO-TM ca. 1 s, wenn als zulässige Abweichung vom Sollwert 5 % der Sprunghöhe toleriert werden bzw. ca. 1.5 s für Abweichungen von max. 1 %. Details dazu sind in [11] dokumentiert.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Eignung eines faseroptischen SEs für die biaxiale Neigungsmessung gezeigt. Dafür wurde zunächst das Verhalten eines derartigen SEs modelliert, um die auftretenden Auslenkungen in Abhängigkeit von der Schwerkraft (statisch) und im Schwingungsfall (dynamisch) abschätzen zu können. Rahmenbedingungen für die Modellierung – abgeleitet aus

verschiedenen praktischen ingenieurgeodätischen Anwendungen – waren ein Arbeitsbereich von  $\pm 30^\circ$  und eine gewünschte Präzision von  $0.01^\circ$ . Für die Kalibrierung eines anschließend gebauten Versuchsmusters wurden zwei Einrichtungen entwickelt. Eine Präzision von  $0.015^\circ$  konnte über den gesamten Arbeitsbereich für (quasi-) statische Anwendungen mit der Einrichtung zur Neigungskalibrierung nachgewiesen werden.

Bei kinematischen Anwendungen verhindert die für die Elimination der Faserschwingungen erforderliche Filterung eine realistische Echtzeit-Schätzung des Neigungswinkels. Weiters können sich zusätzliche Störeinflüsse negativ auf die

Bestimmung der Neigungen auswirken. Um den Einfluss dieser limitierenden Faktoren zu reduzieren, wird eine Erweiterung des vorgestellten Sensorkonzepts angeregt. Diese Erweiterung könnte in der Hinzunahme eines zweiten anders abgestimmten SEs bestehen, dessen schnellere Reaktionsfähigkeit die Schätzung der Neigungswinkel im Rahmen einer gemeinsamen Auswertung verbessern könnte. An diesem erweiterten Konzept wird derzeit intensiv gearbeitet, Resultate werden in Kürze veröffentlicht werden.

### Danksagung

Der Vorstand des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der TU Graz, **O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Fritz K. Brunner**, auf dessen Ideen der faseroptische Neigungssensor zurückgeht, hat sämtliche Schritte der Entwicklung begleitet und damit maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen. Versuchsmuster und Kalibriereinrichtungen wurden von **Ing. Robert Presl** nach den von ihm erstellten Konstruktionszeichnungen in der institutseigenen Werkstätte gefertigt. Darüber hinaus beeinflussten seine Vorschläge und Diskussionsbeiträge die Arbeit mehrfach in eine positive Richtung. Die Abteilung Prototypenfertigung der **Fa. Anton Paar GmbH**, Graz, war beim Ablängen von Keramik-Ferrulen für die Massen der Sensorelemente behilflich.

### Referenzen

- [1] *E. Grillmayer, A. Wieser & F. K. Brunner (2000)*: Einrichtung der Stahlpylone der Donaubrücke bei Pöchlarn. In: K. Schnädelbach & M. Schilcher (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2000*. Tagungsband des 13. Internationalen Ingenieurvermessungskurses. München, 13.-17. März 2000, S. 63-74
- [2] *C. Punz (2002)*: Entwicklung eines Messsystems zur Überwachung von Senkkästen während des Absenkvorganges. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz
- [3] *R. Glas, N. Lauener, U. Müller & M. Baumeler (2004)*: Der Gleismesswagen swiss trolley: Leistungsmerkmale und Anwendungen. In: H. Ingensand (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2004*. Tagungsband des 14. Internationalen Ingenieurvermessungskurses, Zürich, 15.-19. März 2004, S. 27-37
- [4] *W. Stempfhuber (2006)*: 1D and 3D Systems in Machine Automation. In: Tagungsband (CD) des 3. IAG bzw. 12. FIG Symposiums, Baden, 22.-24. Mai 2006
- [5] *W. Möhlenbrink (1984)*: Zur Entwicklung eines Meßverfahrens für die Bestimmung von Bauwerksverformungen aus Neigungs- und Beschleunigungsmessungen. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Nr. 307, München
- [6] *H. Ingensand (1985)*: Ein Beitrag zur Entwicklung und Untersuchung hochgenauer elektronischer Neigungsmesssysteme für kontinuierliche Messungen. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Nr. 308, München
- [7] *H. Woschitz (2009)*: Test statischer Eigenschaften ausgewählter Neigungssensoren. In: *Technisches Messen*, Vol. 76, No. 10, S. 465-473

- [8] *K. Macheiner, H. Woschitz & F. K. Brunner (2009)*: Test dynamischer Eigenschaften ausgewählter Neigungssensoren. In: *Technisches Messen*, Vol. 76, No. 11, S. 509-516
- [9] *D. Gross, W. Hauger, W. Schnell & J. Schröder (2005)*: *Technische Mechanik 2. Elastostatik*. 8. Auflage. Springer, Berlin
- [10] *L. Meirovitch (2000)*: *Principles and Techniques of Vibrations*. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ)
- [11] *K. Macheiner (2010)*: Development of a fiber optic tiltmeter for static and kinematic applications. Dissertation, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz
- [12] *H. Wenzel & D. Pichler (2005)*: *Ambient Vibration Monitoring*. John Wiley & Sons, Chichester
- [13] *W. Beitz & K.-H. Küttner (Hrsg.) (1981)*: *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. 14. Auflage. Springer, Berlin
- [14] *D. Gross, W. Hauger, W. Schnell & J. Schröder (2004)*: *Technische Mechanik 3. Kinetik*. 8. Auflage. Springer, Berlin
- [15] *J. Hecht (2002)*: *Understanding Fiber Optics*. 4. Auflage. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ)
- [16] *J. Dolbow & M. Gosz (1996)*: Effect of out-plane properties of a polyimide film on the stress fields in micro-electronic structures. In: *Mechanics of Materials* 23 (1996), S. 311-321
- [17] *M. Hadjiprocopiou, G. T. Reed, L. Hollaway & A. M. Thorne (1996)*: Optimization of fibre coating properties for fibre optic smart structures. In: *Smart Materials and Structures* 5 (1996), S. 441-448
- [18] *A. V. Oppenheim & R. W. Schaffer (1999)*: *Discrete-Time Signal Processing*. 2. Auflage. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ)
- [19] *M. Morante, A. Cobo, J. M. López-Higuera & M. López-Amo (1996)*: New approach using a bare fiber optic cantilever beam as a low-frequency acceleration measuring element. In: *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 6, S. 1700-1706
- [20] *H. Woschitz, H. Hartinger & F. K. Brunner (2001)*: Entwicklung eines optischen Messsystems für die Bestimmung von hochfrequenten zweidimensionalen Positionsänderungen. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 10/2001, S. 334-340
- [21] *K. Kraus (1993)*: *Photogrammetry*. Volume 1: Fundamentals and Standard Processes. 4. Auflage. Dümmler, Bonn
- [22] *W. Göpel, J. Hesse & J. N. Zemel (Hrsg.) (1989)*: *Sensors. A Comprehensive Survey*. Vol. 1: Fundamentals and General Aspects. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim
- [23] *P. Profos & T. Pfeifer (Hrsg.) (1994)*: *Handbuch der industriellen Meßtechnik*. 6. Auflage. Oldenbourg, München

### Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Klaus Macheiner, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, 8010 Graz  
E-Mail: klaus.macheiner@tugraz.at