

Faseroptik Sensorsystem zur Überwachung von Rotationsereignissen und -phänomenen

Fiber optic sensor system for monitoring rotational events and phenomena.

Oliver Lange⁽¹⁾, Werner R. Lange⁽²⁾, Karen von Huenerbein⁽³⁾, Simon Taschke⁽⁴⁾, Lange-Electronic GmbH, Gernlinden, Deutschland, 1) ol@lange-electronic.com, 2) wl@lange-electronic.com, 3) kvh@lange-electronic.com, 4) st@lange-electronic.com.

Kurzfassung

Die Beobachtung von außergewöhnlichen Rotationsverformungen von Architekturstrukturen, die nach einem Erdbeben auftreten, sind zur Hauptmotivation für die Konstruktion des ELPROMA FOSREM Systems auf der Grundlage eines Sagnac-Interferometers geworden. FOSREM bedeutet Fibre Optic System for Rotational Events and Phenomena Monitoring.

Gemessen werden Rotationsphänomene mit einer Auflösung von $10E^{-8}$ rad/s. Das System besteht aus einer Lichtwellenleiter-Komponente und einer Autonomous Signal Processing Unit (ASPU), die die Signallaufzeiten in Relation setzt und Auffälligkeiten protokolliert.

FOSREM meldet die erkannten Ereignisse über eine GSM oder LAN-Verbindung. Das mobile System dient der Überwachung von Rotationsschwingungen, die in Objekten wie Windkraftwerken, hohen Gebäuden und Brücken oder erdbebengefährdetem Gelände auftreten. Zukünftige Entwicklungen zielen auf einen Einsatz in autonomen Fahrzeugen ab. In diesem Vortrag stellen wir die Funktionsweise des FOSREM Messsystems auf Basis des Sagnac-Effektes vor und beschreiben einen Feldtest, durchgeführt auf dem Grundstück der Erdbebenwarte des Münchner Erdobservatoriums in Fürstenfeldbruck im Jahr 2019.

Abstract

Observation of extraordinary rotational deformations of architectural structures occurring after an earthquake have become the main motivation for the construction of the ELPROMA FOSREM (Fibre Optic System for Rotational Events and Phenomena Monitoring) system based on a Sagnac interferometer.

Rotational phenomena are measured with a resolution of $10E^{-8}$ rad/s. The system consists of an optical fiber component and an Autonomous Signal Processing Unit (ASPU), which relates signal propagation times and logs anomalies.

FOSREM reports the detected events via a GSM or LAN connection. The mobile system is used to monitor rotational vibrations that occur in objects such as wind turbines, tall buildings and bridges, or earthquake-prone terrain. Future developments aim at a use in autonomous vehicles.

In this talk, we present the functionality of the FOSREM measurement system based on the Sagnac effect and describe a field test conducted on the property of the Munich Earth Observatory in Fürstenfeldbruck in 2019.

1 Absolute Rotationsmessung

Die spezielle Relativitätstheorie (SRT) [1] besagt, dass translatorische Geschwindigkeiten nur relativ zu einem anderen Bezugssystem gemessen werden können. Auf Drehbewegungen trifft dies nicht zu. Rotationen gegenüber einem Inertialsystem können absolut gemessen werden. Frühere Methoden zur absolute Rotationsmessung sind beispielsweise das Foucaultsche Pendel oder Kreiselkompass [2].

Hier stellen wir ein neues System vor, vom Typ Fiber Optisches Gyroskop, dessen Funktion auf dem Sagnac Effekt beruht.

1.1 Der Sagnac Effekt

Georges Sagnac (1869-1926) beobachtete 1913, dass zwischen kohärentem Licht, das im Uhrzeigersinn und im Gegenurzeigersinn über Spiegel auf derselben Strecke im Kreis geschickt wird, eine Phasenverschiebung auftritt, wenn der gesamte Versuchsaufbau gedreht wird.

Sagnacs ursprüngliches Experiment verwendete einen Ringaufbau von etwa einem Quadratmeter. Er entdeckte Streifen im Licht, wenn sich der Aufbau ein paar Mal pro Sekunde drehte.

Der optische Weg für die beiden Lichtstrahlen ist nicht mehr gleich lang, da sich der Versuchsaufbau in der Zeit, die das Licht benötigt, um am Beobachtungsschirm anzu- kommen, bereits weitergedreht beziehungsweise entge- gengerichtet hat. So entsteht ein wahrnehmbares Interfe-

renzmuster. [3]

Fiberoptische Gyroskope sind sehr gut geeignet zur Messung von Rotationsschwingungen, weil sie einen weiten Messbereich abdecken und komplett unempfindlich für lineare Bewegungen sind. Darüber hinaus weisen sie eine hohe Empfindlichkeit für die zu messenden Schwingungen auf. [6].

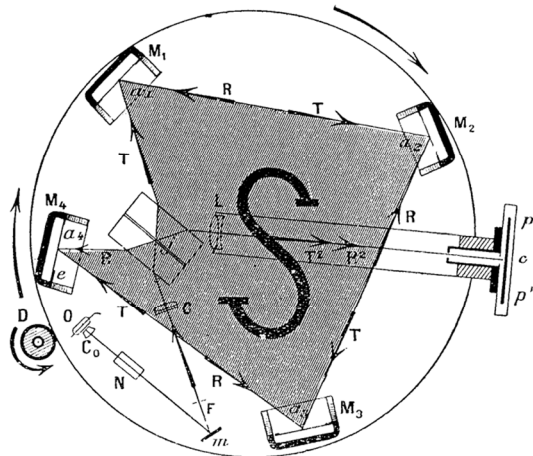


Bild 1 Originalskizze von Georges Sagnac

2 Auftreten von Rotationseffekten bei Erdbeben

Die Beobachtungen seltsamer Rotationsverformungen von Architekturstrukturen, die nach Erdbeben auftreten, waren die Hauptmotivation für die Konstruktion des auf dem Sagnac-Effekt basierenden Faseroptik Sensorsystem zur Überwachung von Rotationsereignissen und -phänomenen (FOSREM).

In den folgenden Abbildungen zeigen wir zwei Beispiele für solche atypischen Verformungen. [4]



Bild 2 zeigt die Drehung des Denkmals von George Inglis (errichtet 1850 in Chatak, Indien), wie sie von Oldham

(1899) nach dem großen Erdbeben von Shillong 1897 beobachtet wurde

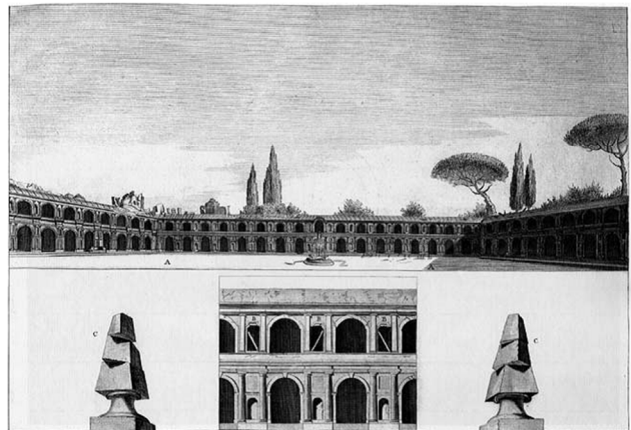


Bild 3 Rotationsverformung der beiden Zierobelisken der Kartause von Serra San Bruno in Kalabrien, Italien, nach dem kalabrischen Erdbeben von 1783

3 Entstehung des Sensorsystems

Im August 2011 begann die Arbeit am FOSREM-Projekt, als die Militärische Universität für Technologie in Polen und m-Soft Sp. z o. o. einen Konsortialvertrag unterzeichneten. Das Ziel des Konsortiums war die Entwicklung eines hochempfindlichen Rotationsbewegungssensors.

Ein Team um Prof. Leszek R. Jaroszewicz (PhD Eng DSc) skizzierte die Entwicklung und den Einsatz des Autonomen Faseroptischen Rotationsseismografen (A-FORS), der den Sagnac-Effekt für eine direkte Messung der seismisch bedingten Rotationen des Bodens nutzt, in Feldversuchen. Der Hauptvorteil von AFORS ist seine Unempfindlichkeit gegenüber linearen Bewegungen sowie die direkte Messung von Rotationskomponenten, die bei seismischen Ereignissen entstehen. [5]

Das heutige tragbare System ist die Version FOS5. Eine stationäre Variante, FOS5LL (long loop), kommt mit einem Durchmesser von 1,5 m und einem geschlossenen Faseroptik-Loop von 15 km auf eine um den Faktor 10 erhöhte Empfindlichkeit. Diese breitbandigen Sensoren detektieren Signale mit Amplituden von mehreren Dutzend nrad/s bis zu einigen rad/s und mit Frequenzen von 0,01 Hz bis 100 Hz. [9]

4 Aufbau des FOSREM Systems

Die Konstruktion besteht aus zwei voneinander abhängigen Teilen: einer optischen und einer elektronischen Komponente. Der optische Teil, der so genannte optische Kopf, erzeugt die Phasenverschiebung proportional zur erfassten Drehrate, die senkrecht zur Ebene der Sensor-

schleife verläuft und durch die folgende Formel beschrieben wird:

$$\Omega = S_o \cdot \Delta\varphi = \frac{\lambda c}{4\pi RL} \cdot \Delta\varphi$$

wobei S_o die optische Konstante des Interferometers ist, die von der verwendeten Wellenlänge, der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c , der Länge der Faser in der Sensorschleife L und dem Radius R der Sensorspule abhängt.

4.1 Optischer Teil

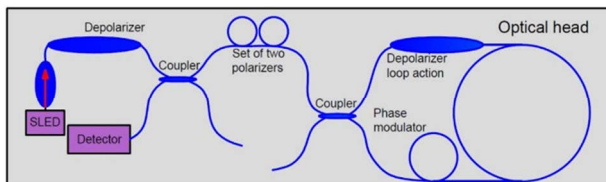


Bild 4 Blockdiagramm des optischen Kopfes des Sensors

Der optische Teil besteht aus: einer breitbandigen, kohärenzarmen Superlumineszenzdiode SLED, einem Depolarisator, zwei X-Kopplern, einem Detektor, einem faseroptischen Isolator, einem Satz von zwei faseroptischen Polarisatoren, die in Reihe montiert sind, und der Sensorschleife. Diese Konfiguration garantiert, dass der einzige nicht-reziproke Effekt im System der Sagnac-Effekt ist. Das von der SLED-Diode emittierte Licht wird durch den Depolarisator depolarisiert und dann durch den Koppler in zwei Strahlen aufgeteilt. Anschließend wird einer der Strahlen durch einen Satz von zwei Polarisatoren polarisiert und danach durch den zweiten Koppler getrennt. Die beiden Strahlen breiten sich in der Sensorschleife in entgegengesetzter Richtung aus. Das Interferenzmuster, das sich aus der Interferenzerscheinung im ersten Koppler aufgrund der gemessenen Drehrate ergibt, wird vom Detektor erfasst.

4.2 Autonomous Signal Processing Unit (ASPU)

Der zweite Teil des Systems, der elektronische Teil, realisiert die synchrone Erkennung. Dieser Teil verwendet ein System namens Autonome Signalverarbeitungseinheit (ASPU). Die richtige Auswahl und Verarbeitung der ersten und zweiten Amplitude des erkannten harmonischen Ausgangssignals ermöglicht die Ermittlung der Winkeldrehung. Darüber hinaus ist die ASPU mit einem eingebauten Webserver ausgestattet, der es ermöglicht, den Betrieb des Systems über einen speziellen FOSREM Telemetrieserver fernzusteuern. Die Steuerung erfolgt in Echtzeit über ein VPN-FOSREM-Netzwerk.

4.3 FOSREM Netzwerk

Das Netzwerk, das für Sensoren, die nach der FOSREM-Technologie konstruiert wurden, entstehen soll, verwenden

eine VPN-Verbindung, um alle Sensoren in ein System zu integrieren. Jeder Sensor verfügt über einen eingebauten Webserver, der über VPN mit dem FOSREM Telemetrieserver verbunden ist. Dieser Server speichert die Daten der einzelnen Geräte und ermöglicht die Änderung aller Betriebsparameter für den gewählten Sensor. Die Fernsteuerung erfolgt in Echtzeit über ein VPN-FOSREM-Netzwerk. Jeder Benutzer hat Zugang zu seinem Sensor, um Informationen auf seinem eigenen Computer zu speichern.

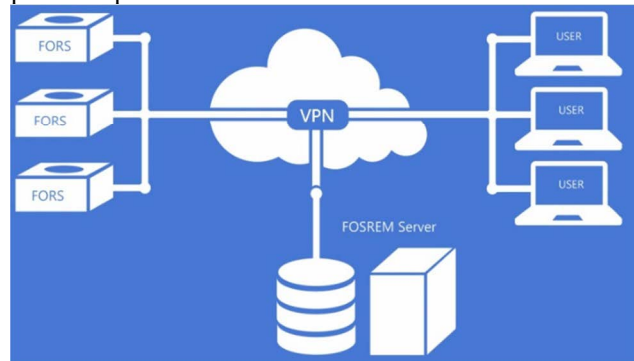


Bild 5 Diagramm des FOSREM Netzwerkes

5 Versuchsreihen

5.1 Sensor Vergleichstest 2019

Der erste Sensor-Vergleichstest, mit Beteiligung von FOSREM Sensoren, fand am 19. bis 22. Oktober 2019 im Geophysikalischen Observatorium der Ludwig-Maximilians-Universität München in Fürstenfeldbruck, nahe München, statt. Das wichtigste Merkmal des Experiments "Rotation and Strain in Seismology: A Comparative Sensor Test"-Experiment [6] war die Anzahl der verschiedenen Rotationssensoren, die von verschiedenen Forschungszentren geliefert wurden. Mehr als 40 Sensoren wurden zusammen in einem Bunker und im Feld platziert (siehe Bild 6), um künstliche Schwingungen aufzuzeichnen. Man kann die folgenden Sensoren unterscheiden: zwei blueSeis-3A, ROMY (großer 4-Komponenten-Ringlaserkreis) und drei permanente Breitbandstationen (von der Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland), 80-Kanal-Geophonsystem (von der ETH, Schweiz), drei blueSeis-3A (von der Universität Potsdam, Deutschland), blueSeis-3A (von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland), blueSeis-3A (von ISAE SUPAERO, Toulouse), vier Rotaphone (von der Karls-Universität, Tschechische Republik), zwei Gladiator und drei Horizon (von der Opole Univ. of Technology, Polen), vier Quadrans, ein Octans und mehrere Beschleunigungsmesser (von CEA, Frankreich), giant FOG, blueSeis-3A (iXblue, Frankreich), giant FOG FARO Sensing cable (DAS Distributed Acoustic Sensing Cable), ETH Zürich, Schweiz), sowie optischer Faserkreislauf FARO (Streckeisen GmbH, Deutschland), Distributed Acoustic FOSREMs - zwei FOS3 und zwei FOS5 (von Military Univ. of Technology, Polen).

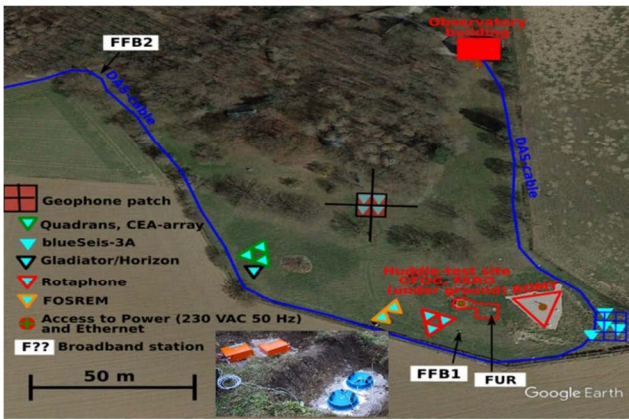


Bild 6 Das Versuchsfeld. Unten die FOSREM Sensoren vor dem Einbau [6]



Bild 7 Experiment “Rotation and strain in Seismology: Acomparative Sensor Test“, Geophysical Observatory Fürstenfeldbruck, Germany: rotational sensors mounted in the bunker [6]

Die wichtigste Eigenschaft des FOSREM ist seine theoretische Empfindlichkeit von $2 \cdot 10^{-8} \text{ rad/s}/\sqrt{\text{Hz}}$. In dem hier besprochenen Experiment wurden zwei FOSREM Typen verwendet. Beide haben den gleichen optischen Teil, der aus handelsüblichen faseroptischen Elementen auf der Grundlage einer Standard-Singlemode-Telekommunikationsfaser (SMF) mit einer Sensorschleife von 0,25 m Durchmesser und einer SMF-Länge von etwa 5 km besteht. Der elektronische Teil ist der Hauptunterschied zwischen den beiden FOSREM-Typen, wobei das erste System - FOS3 - eine Konfiguration mit offenem Regelkreis und das zweite - FOS5 - eine Konfiguration mit geschlossenem Regelkreis verwendet. Beide wurden so konzipiert, dass sie alle technischen Anforderungen für die Rotationsseismologie erfüllen. [8]

Das Experiment bestand aus zwei Teilen. Der erste Gruppentest ("Huddle-Test") - diente dazu, das Eigenrauschen und das Signal-Rausch-Verhältnis der im Bunker nahe beieinander platzierten Instrumente aufzuzeichnen (siehe Bild 6) sowie zwei künstliche Explosionen zwischen 0,5 kg und 1 kg Sprengstoff zu registrieren. Während des zweiten Teils - "aktives Experiment" - wurden alle Sensoren im Feld verteilt (siehe Bild 7) und sie zeichneten Vibrationen auf, die von einem speziellen VibroSeis-Stapler (Spitzenkraft: 275 kN) erzeugt wurden, der von der TU Bergakademie Freiberg zur Verfügung gestellt

wurde, sowie kleine Explosionen (1,0 kg bis 1,5 kg) im Abstand von 10 m bis 2 km, die vom Bayrischen Landesamt für Umwelt, Deutschland, durchgeführt wurden. [6]. Es wurden je zwei Paare von FOS3s und FOS5s verwendet, die jeweils eine einzelne Rotationskomponente, nämlich die vertikale, aufzeichneten.

Bei einem Vergleich der beiden im Versuch eingesetzten Paare FOS3 und FOS5 stellte sich heraus, dass beide alle technischen Anforderungen für die Rotationsseismologie erfüllen, was durch die Allan-Varianz-Untersuchung (siehe Bild 8) und die Daten der Tabelle in Bild 9 bestätigt wurde. Allerdings sind die FOS5 umweltstabiler, was vor allem auf die hermetische Ummantelung zurückzuführen ist.

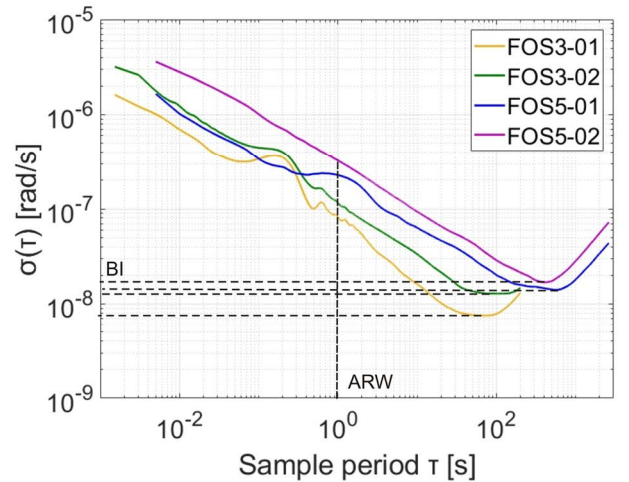


Bild 8 Allan variance investigation [6]

FOSREMs field view	FOSREM	ARW [rad/√s]	BI [rad/s]
	FOS3-01	$8.70 \cdot 10^{-8}$	$1.13 \cdot 10^{-8}$
	FOS3-02	$1.30 \cdot 10^{-7}$	$1.96 \cdot 10^{-8}$
	FOS5-01	$2.16 \cdot 10^{-7}$	$2.28 \cdot 10^{-8}$
	FOS5-02	$3.24 \cdot 10^{-7}$	$2.55 \cdot 10^{-8}$

Bild 9 die Parameter von FOS3 und FOS5 wurden auf Basis der Allan Varianz Analyse berechnet. ARW: Angle Random Walk, BI: Bias Instability [6]

Während des ersten Teils des Experiments fanden zwei Explosionen statt, die erste um 10:26 UTC und die zweite um 15:16 UTC am 19. November 2019, wobei die zweite Explosion doppelt so stark war und etwa in der halben Entfernung zu den Sensoren stattfand. Die Bilder 10 bis 12 zeigen die Seismogramme dieser Ereignisse, die mit der kommerziellen Software SeisGram2Kv7.0 erstellt wurden. Die in Bild 10 dargestellten Daten zeigen die insgesamt korrekte Zeit für die Registrierung der Explosionen durch die FOSREMs sowie die vorhandene Rotati-

onsbewegung in der vertikalen Achse (Erfassungsrichtung der FOSREMs).

Der genauere Vergleich der Daten für ein bestimmtes Ereignis zeigt jedoch eine gewisse Uneinheitlichkeit [6].

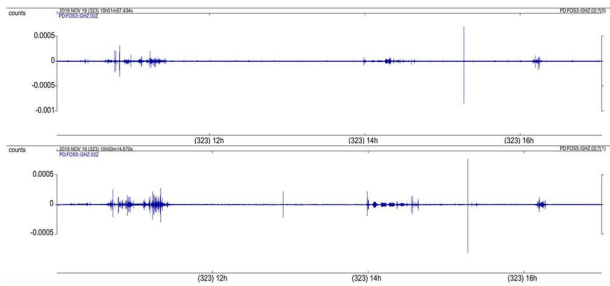


Bild 10 Seismogramm für FOS3-02 (oben) und FOS5-02 (unten) mit den Explosionen um 10:26 und 15:16 [6]

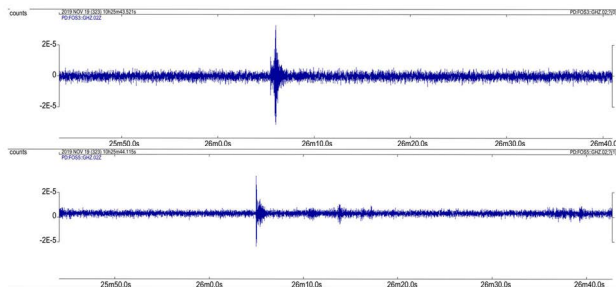


Bild 11 Seismogramm mit einer präziseren Darstellung für die Explosion um 10:26 [6]

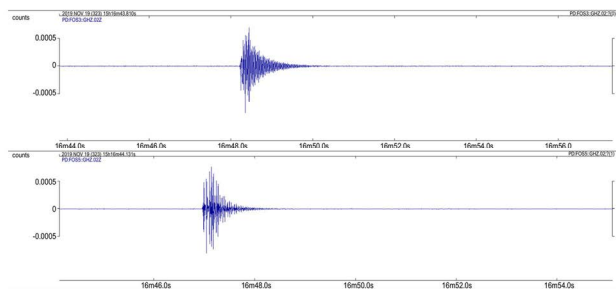


Bild 12 Seismogramm mit einer präziseren Darstellung für die Explosion um 15:16 [6]

Die ersten Ergebnisse dieses Feldversuchs aus dem Jahr 2019 ergaben die Schlussfolgerung, dass die analysierten Rotationsseismometer in Bezug auf Amplitude, Abtastrate und genaue Zeitbestimmung noch weiter kalibriert werden müssen. [6]

5.2 Studie 2021 mit Bergbausprenungen

2021 wurde eine weitere Studie veröffentlicht über die von mehreren Bergbausprenungen verursachten Rotationsbewegungen, die von verschiedenen Arten von Rotationsseismometern aufgezeichnet wurden. Das Graben von zwei vertikalen Schächten mit der Technik der Mehrfachsprennung bot die Möglichkeit, die induzierten Winkelbewegungen in einer horizontalen Ebene mit genau definierten Positionen der Quellen zu messen. Drei Arten von Drehratensensoren, die sich einen unterirdischen Standort teilen, wurden verwendet.

In der Studie erläutern die Autoren die Unterschiede, die bei den Messungen festgestellt wurden und deren mögliche Ursachen. [7]. Eine Ursache wurde dem Unterschied

in der Funktionsweise der Sensoren zugeschrieben und den unterschiedlichen verwendeten Messraten bei verschiedenen Sensoren. Als zweite Ursache wurde der komplexe und räumlich variable Charakter der untersuchten Wellenfelder identifiziert.[7]

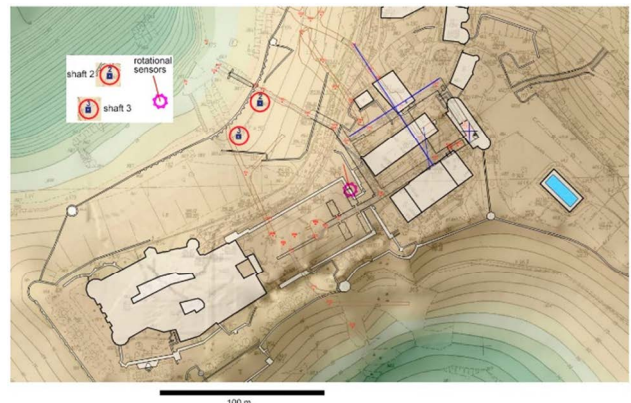


Bild 6 Plan der Burg Książ mit ihrer Umgebung und Kennzeichnung der Schächte und der Standorte der Rotationssensoren.[7]

Eine weitere Veröffentlichung stellt Messergebnisse für FOSREM Sensoren mehrerer Varianten des FS05 Typs vor, gemessen auf der Burg Książ und in der Mine Ignacy in Rybnik, Polen [9].

6 Zukunftsausblick

Das Projekt FOSREM befindet sich in einer fortgeschrittenen Phase, in der kommerziell verwendbare Systeme erarbeitet wurden. Dabei handelt es sich um ein mobiles faseroptisches System, basierend auf dem Sagnac Interferometer, zum Erkennen von Rotationsereignissen und deren Langzeitüberwachung (Monitoring). Das FOSREM System besteht aus den 3 Teilen: FOSREM-BB Sensor, einer Stromversorgung und einem PC mit Spezialsoftware und ist für die Erkennung starker Ereignisse geeignet. Mit Modifikationen ist es auch für die Erkennung schwacher Ereignisse einsetzbar [9].

Anwendungen sind: Strukturelles Monitoring großer Bauwerke, Erdbeben Monitoring, Vulkanologie und geophysikalische Exploration.

Gleichzeitig finden weitere Entwicklungen und Kalibrierungen des bestehenden Systems statt.

6.1 Weiterentwicklung zum 3-achsigen Gyroskop

Ein entsprechendes Projekt vorausgesetzt, sollen die FOSREM Seismografen zum 3-achsigen Gyroskop ausgebaut werden.

Ein 3-achsiges System eignet sich zur Verwendung in autonom fahrenden Fahrzeugen und Schiffen, um dort die Navigation zu unterstützen.

7 Quellen und Literatur

- [1] Albert Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: Annalen der Physik und Chemie. 17, 1905, S. 891–921
- [2] Jobst Broelmann: Die Entstehung des Kreiselkompasses als Navigationshilfe für militärische und zivile Nutzung in: Roland G. Foerster, et al.: Militär und Technik - Wechselbeziehungen zu Staat, Gesellschaft und Industrie im 19. und 20. Jahrhundert. Mittler, Herford 1992, ISBN 3-8132-0368-9, S.221
- [3] Georges Sagnac: L'ether lumineux demontre par l'effet du vent relatif d'ether dans un interferometre en rotation uniforme, in: Comptes Rendus 157 (1913), S. 708-710
- [4] Ferrari G (2006). Note on the historical rotation seismographs. In: Teisseyre R, Takeo M, Majewski E (eds) Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects. Springer, Berlin, 367?376,
William H. K. Lee, Heiner Igel, and Mihailo D. Trifunac (2009). Recent Advances in Rotational Seismology, Seismological Research Letters, Volume 80, Number 3
- [5] <https://fosrem.eu>, offizielle Website des FOSREM Projektes, dokumentiert Team, Versuche und Veröffentlichungen zum Thema
- [6] A. T. Kurzych, L.R. Jaroszewicz, M. Dudek, B. Sakowicz, J.K.Kowalski; Towards uniformity of rotational events recording - initial data from common test engaging more than 40 sensors including a wide number of fiber-optic rotational seismometers,? *Opto-Electron. Rev.*, **29**(1), (2021), 39-44,
- [7] K. P. Teisseyre, M. Dudek, L.R. Jaroszewicz, A.T. Kurzych, L. Stempowski' Study of Rotational Motions Caused by Multiple Mining Blasts Recorded by Different Types of Rotational Seismometers, *Sensors*, **21**, (2021)
- [8] Jaroszewicz, L. R. et al. Review of the usefulness of various rotational seismometers with laboratory results of fibre-optic ones tested for engineering applications. *Sensors* 16, 2161 (2016). <https://doi.org/10.3390/s16122161>
- [9] Jaroszewicz, L. R. et al. A test performance of optical fibre sensors for real-time investigations of rotational seismic events: a case study in laboratory and field conditions. *Opto-Electronics Review* 29 (2021) <https://doi.org/10.24425/opelre.2021.140102>