



Niko Zuzek, BSc

**Beurteilung der Eignung von Faser Bragg
Gittern zur dynamischen Überwachung von
großen mechanischen Strukturen anhand
der Analyse der Messdaten eines Fährschiffs**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

Technische Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Graz, Februar 2019

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Faser Bragg Gitter (FBG) ermöglichen die hochfrequente, quasi-verteilte Erfassung von Dehnungen. Dabei handelt es sich um eine nur wenige Millimeter lange Mikrostruktur, welche bereits während der Produktion der Glasfaser am Ziehturm mit Hilfe einer Phasenmaske in den Faserkern eingeschrieben wird. Diese erzeugt eine periodische Änderung des Brechungsindex des Glasfaserkerns in diesem Bereich. Durch Beleuchten des FBG mit einer breitbandigen Lichtquelle wird eine spezifische Wellenlänge reflektiert. Somit bietet dieses Messverfahren die Möglichkeit mehrere FBG Sensoren entlang einer einzelnen Faser anzuordnen und zu unterscheiden. Einwirkungen, wie Temperaturänderung und Deformation, am FBG führen zu Wellenlängenänderungen, welche im Interrogator aufgezeichnet werden. Diese können in weiterer Folge in Dehnungen umgerechnet werden. Aus den erfassten Dehnungen können sowohl Frequenzen von Strukturen abgeleitet als auch Reaktionen auf externe Einflüsse bestimmt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden diese Eigenschaften der FBG Sensoren dahingehend genutzt die auftretenden Frequenzen eines Fährschiffs bei einer Überfahrt zu detektieren. Das Fährschiff Smyril, welches die Strecke zwischen den Häfen Tórshavn und Tvøroyri auf den Färöer Inseln befährt, ist dabei mit 16 FBG Sensoren im Maschinenraum und zwei FBG Sensoren im Bug ausgestattet. Die in dieser Arbeit benutzten Daten (Messfrequenz 1000 Hz) stammen von einer dreitägigen Messkampagne (12.2.2018 – 14.2.2018). Zusätzlich wurden für den Zeitraum der Messkampagne GPS Daten (Messfrequenz 1 Hz) von drei geodätischen GPS Antennen, welche am Schiff montiert waren, zur Verfügung gestellt. Ziel der Arbeit ist einerseits die Bestimmung von signifikanten Frequenzen und andererseits eine Verschneidung der Sensordaten (FBG & GPS). Auch ein Zusammenhang der detektierten Frequenzen mit dem Geschehen am Schiff (Anlegemanöver, Beladung, Überfahrt etc.) soll analysiert werden.

Die Frequenzanalyse der FBG Sensordaten wurde in Form einer blockweisen Fast Fourier Transformation (FFT) durchgeführt. Deutlich ließen sich darin Vorgänge, wie das Starten und Abschalten der Motoren, das Losfahren und Anlegen, sowie das Verlassen und Einfahren in einen Hafen, detektieren, welche sehr gut mit den Aufzeichnungen des Geschehens am Schiff übereinstimmten. Die detektierten, meist konstanten, Frequenzen lagen in einem Bereich zwischen 0 – 100 Hz. Für die Verschneidung der FBG mit den GPS Daten konnte, aufgrund der geringen Messfrequenz von GPS (1 Hz), nur der Wellengang analysiert werden. Dabei konnten starke Korrelationen zwischen den beiden Sensortypen, welche auf unterschiedlichen Messprinzipien beruhen, bestimmt werden. Anhand der Amplitudenspektren der beiden Sensortypen zeigte sich deutlich, dass sich die Grundfrequenz des Wellengangs mit beiden übereinstimmend detektieren ließ. Schlussfolgernd lässt sich somit sagen, dass die Eignung der FBG für die dynamische Überwachung dieser großen mechanischen Struktur definitiv gegeben ist.

Abstract

Fiber Bragg Gratings (FBG) are capable of detecting high frequency, quasi-distributed strains. The FBG is a microstructure, only a few millimetres long, which is written in the glass fibre with a phase mask during the production on the draw tower. The phase mask creates periodic changes of the refractive index of the fibre core in this area. When the FBG is illuminated using a broadband light source, a specific wavelength will be reflected from the FBG. Consequently this measuring system is capable of measuring many FBG sensors placed along a single fibre. Various factors including temperature and deformation, when in close proximity to the FBG, may cause a shift in the wavelength which is measured with the interrogator. Those can be converted into strains. The strains may be used both to derive the frequencies of certain structures but also to detect the external factors that may influence the reaction.

This thesis will discuss the use of FGBs when detecting the frequencies of a ferry during crossing. “Smyril”, the ferry that ran the route between Tórshavn and Tvøroyri on the Faroe Islands was equipped with 16 FBG in the engine compartment and 2 FBG in the bow for the purpose of this study. Data (measuring frequency 1000 Hz) was collected over a three day period from 12/2/2018 to 14/2/2018. Additionally, GPS data (measuring frequency 1 Hz) was also collected using three GPS antennae, placed on the ferry, for the duration of the study. The aim of this thesis is thus to detect significant frequencies and to blend the data obtained from various sensors, both FBG and GPS. Furthermore, the coherence between the detected frequencies and the events on the ferry (docking manoeuvre, loading, crossing etc.) shall be analysed.

The frequency analysis of the FBG sensor data occurred using block wise fast fourier transformation (FFT). Events, such as turning the engine on and off, the journey made out to sea and back and entering and exiting the harbour were detected and noted. The results obtained through data collection and analysis were perfectly consistent with the notes taken from the ferry itself. The detected frequencies, ranging from 0 – 100 Hz were predominantly constant. Due to the low measuring frequency of GPS (1 Hz), only the swell could be analysed in case of sensor blending. Thus strong correlations between both types of sensors, which are based on different measuring principle, were detected. Due to the amplitude spectrums of both sensor types, the fundamental frequency of the swell could be concordantly detected. In conclusion, results indicate that the FBG were indeed apt and suitable for successfully and dynamically monitoring this immense mechanical structure.

Danksagung

Vorab möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern Andrea und Richard bedanken, ohne deren finanzieller und mentaler Unterstützung ich dieses Studium nie in Angriff nehmen hätte können. Sie waren es, die mir stets den Rücken gestärkt und immer an mich geglaubt haben. Daher möchte ich ihnen diese Arbeit widmen.

Ein ganz besonderes Dankeschön gilt meiner Freundin Carina, die mich während des Studiums immer wieder aufs Neue motivieren konnte und somit auch ihren Teil an dieser Arbeit beigetragen hat.

Besonders herzlichst bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart, der immer ein offenes Ohr für Fragen hatte und sich stets die Zeit nahm diese ausführlich und anschaulich zu erklären.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung.....	2
2	Faseroptische Sensoren	3
2.1	Einteilung der faseroptischen Sensoren	3
2.2	Quasi-verteilte Sensoren – FBG	5
2.2.1	Herstellung FBG.....	5
2.2.1.1	Holographic Technik.....	5
2.2.1.2	Phase-mask Technik.....	5
2.2.1.3	Draw Tower Gratings	6
2.2.2	Eigenschaften und Messprinzip FBG	8
2.2.3	Multiplexverfahren	11
3	Überwachte Struktur	13
4	Verwendete Sensoren	14
4.1	Faseroptische Sensoren	14
4.1.1	FBG Kette OptiMet-PKF	14
4.1.2	Optische Strain Rosette	15
4.1.3	DTG-LBL-1550 frei gespannt	16
4.2	GPS	17
5	Messgerät	19
5.1	Optical Sensing Interrogator sm 130-700.....	19
6	Messaufbau	21
6.1	FBG Sensoren	21
6.2	GPS Antennen.....	25
7	Datenerfassung und Vorprozessierung	26
7.1	FBG	26
7.1.1	Temperaturkompensation und Strainberechnung	26
7.2	GPS	28
7.2.1	Basislinienberechnung	31
7.2.2	Qualitätsanalyse	31
7.2.3	Trajektorie des Fährschiffs	37
8	Einzelauswertung der Sensoren	38

8.1	FBG	38
8.1.1	Fast Fourier Transformation	42
8.1.2	Abtastung und Aliasing	44
8.1.3	Leakage Effekt	46
8.1.4	Gewichtung mit Hann-Fenster	48
8.1.5	Amplitudenspektrum FBG Sensoren	50
8.1.6	Blockweise FFT	56
8.1.7	Berechnung der Strain Ellipse der FBG Rosette	64
8.2	GPS	65
8.2.1	Präzision der GPS Messungen	66
8.2.2	Roll- und Nickwinkel des Fährschiffs	66
8.2.3	Strainberechnung zwischen den GPS Antennen	69
8.2.4	Blockweise FFT	71
9	Auswertung mehrerer Sensoren	72
9.1	Statistische Grundlagen	72
9.1.1	Regressionsgerade	72
9.1.2	Kreuzkorrelation	74
9.2	Analyse FBG vs. FBG	76
9.3	Analyse GPS vs. GPS	79
9.4	Analyse GPS vs. FBG	80
9.4.1	Downsampling mit gleitendem Mittelwert	80
9.4.2	Vergleich der Amplitudenspektren	81
9.4.3	Vergleich der Strainwerte	87
9.4.4	Schiffsanimation und Deformationen im Maschinenraum	88
9.5	Analyse Störfrequenz	91
9.5.1	Hochpassfilterung und Rekonstruktion des Störsignals	91
9.5.2	Amplitudenspektrum	91
10	Resümee und Zusammenfassung	95
	Literaturverzeichnis	96

1 Einleitung

1.1 Motivation

Aufgrund der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und der rasanten Weiterentwicklung im Telekommunikationsbereich sind faseroptische Sensoren ein unerlässlicher Bestandteil, wenn es darum geht, sowohl hochgenaue als auch hochfrequente Messungen durchzuführen. Ihre enorme Vielseitigkeit führt dazu, dass faseroptische Sensoren neben den klassischen Aufgaben des Bauwerksmonitorings und der Geotechnik, auch in Spezialbereichen, wie z.B. der Flugzeug- und Automobilindustrie und der Medizin, anzutreffen sind. Die Glasfaser dient in faseroptischen Messsystemen als sensitives Element. Dadurch entstehen sowohl Vorteile als auch Nachteile in der Gegenüberstellung mit konventionellen Sensoren.

Durch die Verwendung eines optischen Signals, welches im Messgerät erzeugt wird, benötigen die Sensoren entlang der Glasfaser keine separate Stromversorgung. Anders als traditionelle Sensoren werden faseroptische Sensoren von elektromagnetischen Störungen nicht beeinflusst. Diese Immunität spiegelt sich auch in der Glasfaser (dielektrisches Element) wider. Die geringe Dämpfung des Faserkerns gewährleistet weite Weglängen des optischen Signals. Dadurch können mehrere Sensoren entlang einer einzelnen Glasfaser angeordnet werden. Dabei kann sich das Messgerät mehrere 100 m vom eigentlichen Messort entfernt befinden. Im Anwendungsbereich der verteilten Messsysteme bietet die Glasfaser selbst die Möglichkeit als Sensor eingesetzt zu werden. Die aufgebrauchte Beschichtung schützt die Glasfaser gegen Verunreinigung und mechanische Einflüsse, jedoch begrenzt das gewählte Beschichtungsmaterial (z.B. Kunststoff) den Temperaturbereich der Glasfaser im Einsatz. Mit speziell gewählten Beschichtungen können aber auch Messungen in extremen Temperaturbereichen durchgeführt werden. Weitere Vorteile zeigen sich beim Einsatz von faseroptischen Sensoren im Bereich der Überwachung von Messobjekten. Das Messobjekt wird aufgrund des geringen Gewichts und der kleinen Abmessungen der Sensoren nur minimal beeinflusst. Durch die enorme Flexibilität der Glasfaser können die Sensoren bestmöglich an das Messobjekt angepasst werden. Des Weiteren können die Sensoren direkt in das Messobjekt integriert werden, um das interne Verhalten zu überwachen. Auch in der Sensitivität und dem Messbereich zeigen sich klare Vorteile der faseroptischen Sensoren gegenüber konventionellen Messverfahren (vgl. López-Higuera 2002, S. 9f.).

Als nachteilig sind hingegen die hohen Kosten der faseroptischen Messsysteme im Vergleich zu den traditionellen Messverfahren zu sehen. Diese Kosten sind auf die Komplexität der Messgeräte, den kleinen Markt und die geringe Produktionszahl zurückzuführen. Im Bereich der Sensitivität zeigt sich ein weiterer Nachteil der faseroptischen Messsysteme. Da die Sensoren meist von mehreren Größen (z.B. Dehnung, Temperatur) beeinflusst werden, muss für die Bestimmung der reinen Dehnung eine Kompensation der anderen Einflussgrößen durchgeführt werden, um zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten (vgl. López-Higuera 2002, S. 10).

Aufgrund des Überwiegens der Vorteile von faseroptischen Messsystemen wurden diese für die Überwachung des Fährschiffs Smyril herangezogen. Die Messdaten des faseroptischen Messsystems wurden im Rahmen dieser Masterarbeit analysiert.

1.2 Zielsetzung

In dieser Masterarbeit werden die Daten des Fährschiffs Smyril analysiert. Dabei wurden FBG an der Innenhülle des Schiffs angebracht und Messungen während mehrerer Überfahrten zwischen den Häfen Tórshavn und Tvøroyri aufgezeichnet. FBG ermöglichen die hochfrequente Erfassung von Dehnungen, aus welchen die signifikanten Frequenzen der Struktur abgeleitet und auch die Reaktionen auf externen Einflüsse bestimmt werden können. Des Weiteren wurden drei GPS Antennen am Schiff angebracht, welche die absolute Bewegung des Schiffs während der Überfahrten aufzeichneten. Ziel dieser Masterarbeit ist einerseits die Verschneidung der FBG mit externen Daten (Geschehen am Schiff, GPS) und andererseits eine Evaluierung hinsichtlich eventueller systematischer Effekte des Messsystems. Dazu wurden reale Messdaten analysiert und Untersuchungen im Messlabor durchgeführt.

2 Faseroptische Sensoren

Dieses Kapitel beschreibt, neben der Einteilung faseroptischer Sensoren, die Grundlagen von faseroptischen Messungen mit Bragg Gittern. Falls diese dem Leser, der Leserin bereits bekannt sind kann dieses Kapitel ausgelassen werden und direkt zu Kapitel 3 übergegangen werden.

Die enorme Vielseitigkeit und Einsatzfähigkeit von faseroptischen Sensoren in zahlreichen technischen und medizinischen Bereichen führte zur Entwicklung einer großen Anzahl unterschiedlicher faseroptischer Sensoren. Diese lassen sich aufgrund der unterschiedlichen Messprinzipien und Sensoren in drei Kategorien unterteilen (Abbildung 2.1).

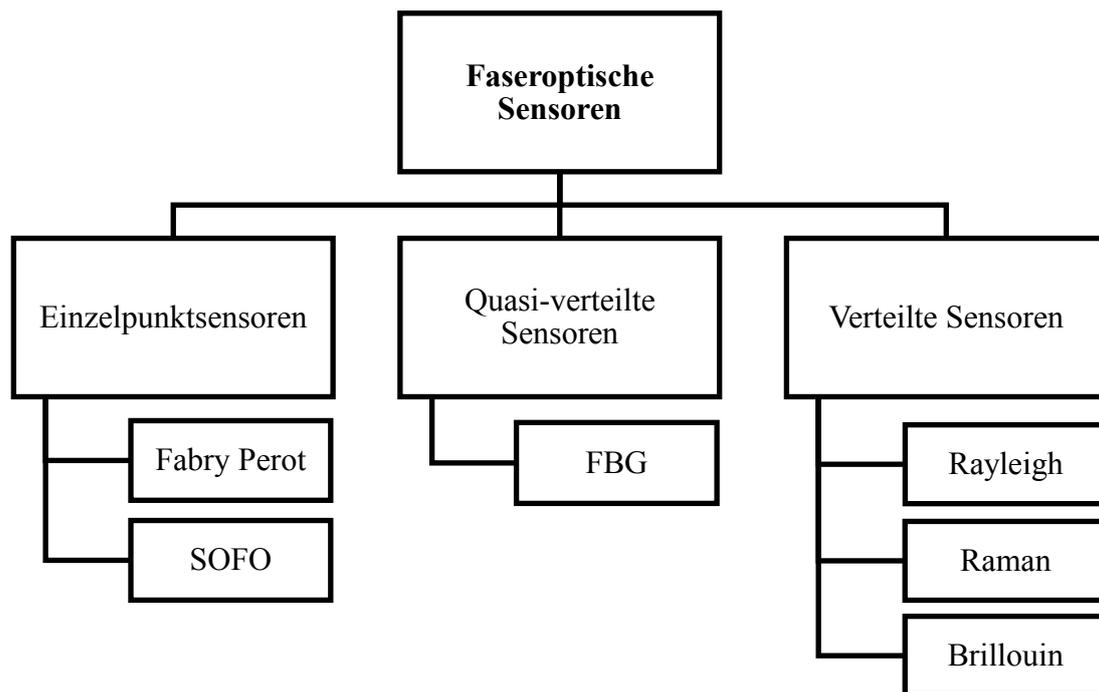


Abb. 2.1: Klassifizierung der faseroptischen Sensoren

Im nachfolgenden Kapitel 2.1 werden die drei Kategorien näher erläutert.

2.1 Einteilung der faseroptischen Sensoren

Einzelpunktsensoren

Die erste Kategorie beinhaltet die Einzelpunktsensoren, zu denen neben den Fabry Perot auch die SOFO Sensoren zählen. Sie bieten die Möglichkeit, Messungen an einem spezifischen Punkt entlang der Faser durchzuführen. Hierbei wird der Faserkern punktuell durch den Einsatz von Spiegeln manipuliert. Sie werden z.B. zur Überwachung von Blockfugen an Staudämmen oder zum Rissmonitoring herangezogen.

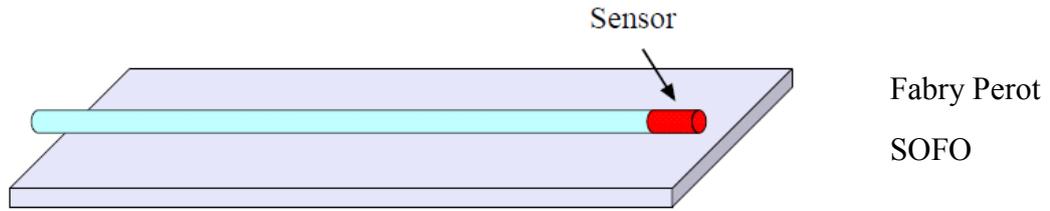


Abb. 2.2: Schema Einzelpunktsensoren (vgl. Wang, Lynch, Sohn 2014, S. 122)

Quasi-verteilte Sensoren

Zu den quasi-verteilten Sensoren zählen die FBG. Durch das Einbringen der Bragg Gitter entlang der Faser ist es möglich, an spezifischen Punkten Messungen durchzuführen. Die Bragg Gitter reflektieren hierbei nur einen bestimmten Wellenlängenbereich des einstrahlenden Lichts der Breitbandlichtquelle und bieten somit die Möglichkeit, mehrere Sensoren entlang einer Faser anzuordnen.

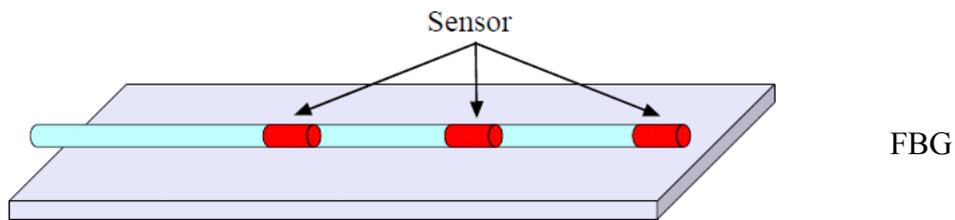


Abb. 2.3: Schema quasi-verteilte Sensoren (vgl. Wang, Lynch, Sohn 2014, S. 122)

Verteilte Sensoren

Die letzte Kategorie bilden die verteilten Sensoren, mit denen entlang der gesamten Faser gemessen werden kann. Hierbei werden die natürlichen Verunreinigungen der Glasfaser genutzt und mit der natürlichen Rückstreuung gearbeitet. Man unterscheidet zwischen Rayleigh, Raman und Brillouin. Diese Systeme werden zur Überwachung von großen Strukturen, wie z.B. Dämmen, Deichen, Pipelines usw., verwendet. Da mit ihnen keine dynamischen Messungen mit hoher räumlicher Auflösung durchgeführt werden können, konnte diese Sensorklasse nicht für die dynamische Überwachung des Fährschiffs herangezogen werden.

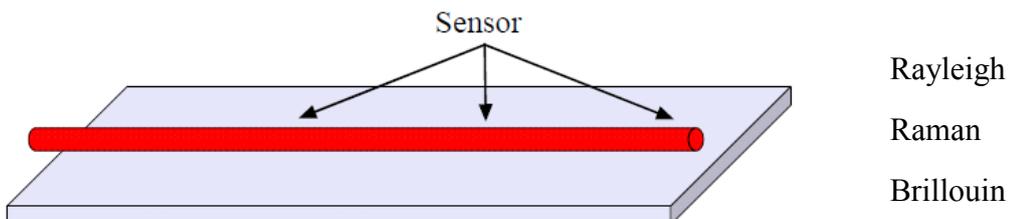


Abb. 2.4: Schema verteilte Sensoren (vgl. Wang, Lynch, Sohn 2014, S. 122)

2.2 Quasi-verteilte Sensoren – FBG

Alle drei Sensorklassen können für verschiedenste Anwendungen genutzt werden. Für die Messungen am Fährschiff wurden FBG verwendet, um an mehreren ausgewählten Punkten des Schiffs dynamische Messungen durchführen zu können. Daher wird in den nächsten Unterkapiteln auf diese näher eingegangen und neben den Herstellungsmethoden und den Eigenschaften auch das Messprinzip anschaulich erklärt.

2.2.1 Herstellung FBG

Grundsätzlich lassen sich bei der Herstellung von Faser Bragg Gittern zwei Techniken unterscheiden. Neben der holographic Technik bietet auch die phase-mask Technik die Möglichkeit des Einbrennens des FBG in den Faserkern.

2.2.1.1 Holographic Technik

Bei der holographic Technik werden zwei Laserstrahlen gekreuzt, welche im UV Bereich arbeiten. Diese erzeugen ein Interferenzmuster im Faserkern (Abbildung 2.5).

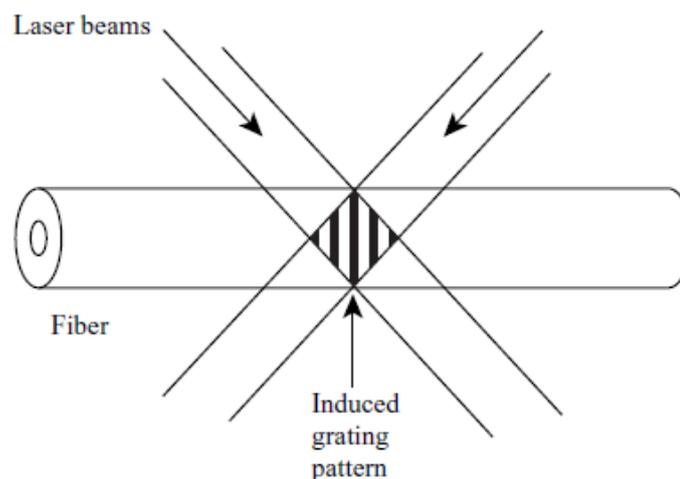


Abb. 2.5: Holographic Technik (Udd, Spillman 2011, S. 401)

In den dunklen Bereichen des induzierten Musters erhöht sich der Brechungsindex des Faserkerns, wohingegen er in den weißen Bereichen konstant bleibt. Dies führt zu einer periodischen Änderung des Brechungsindex entlang des Faserkerns, was als FBG bezeichnet wird (vgl. Udd, Spillman 2011, S. 400).

2.2.1.2 Phase-mask Technik

Im Vergleich zur holographic Technik wird bei der phase-mask Technik nur ein Laserstrahl verwendet. Dieser wird durch eine Quarzmaske geleitet, die eine Variation in ihrer Stärke aufweist und in Relation zur halben Wellenlänge des Lasers steht (Abbildung 2.6). Dadurch entsteht wiederum ein Interferenzmuster im Faserkern (vgl. Udd, Spillman 2011, S. 400 – 401).

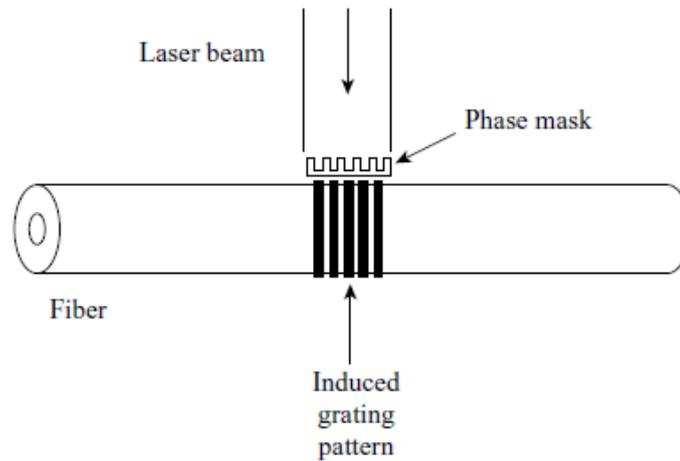


Abb. 2.6: Phase-mask Technik (Udd, Spillman 2011, S. 401)

2.2.1.3 Draw Tower Gratings

In der industriellen Fertigung kommen sowohl die holographic als auch die phase-mask Technik bei der Herstellung von Draw Tower Gratings (DTGs) zum Einsatz. Bei DTGs wird das FBG direkt während der Produktion der Faser am Ziehturm in den Kern eingeschrieben. Hierbei wird das Glas in der Preform soweit erhitzt, bis es die nötige Konsistenz aufweist, um es ziehen zu können (vgl. FBGS 2018).

Der Brechungsindex zwischen Faserkern und Fasermantel unterscheidet sich hierbei minimal, da im Kern neben Glas (SiO_2) auch geringe Teile an Germanium (Ge) enthalten sind, welche der Mantel nicht aufweist. Dieser Unterschied notwendig, damit sich das Licht später entlang des Kerns und nicht entlang des Mantels ausbreitet. Der Durchmesser des Kerns beträgt bei Single Mode (SM) Fasern normalerweise $9\ \mu\text{m}$. Der Mantel hingegen weist einen Durchmesser von $125\ \mu\text{m}$ auf (vgl. Kreuzer, S. 3).

Im nächsten Schritt wird mit Hilfe der holographic Technik (Abbildung 2.7) oder der phase-mask Technik das FBG an der vorgesehenen Stelle in die Glasfaser eingebrannt. Anschließend wird die Beschichtung der Glasfaser aufgebracht, welche sie gegen mechanische Belastungen, Feuchtigkeit und Verunreinigung schützt. Die Verbindungen zwischen Kern, Mantel und Beschichtung müssen hierbei so ausgeführt werden, dass eine verlustfreie Übertragung der Dehnung gewährleistet ist (vgl. FBGS 2018a).

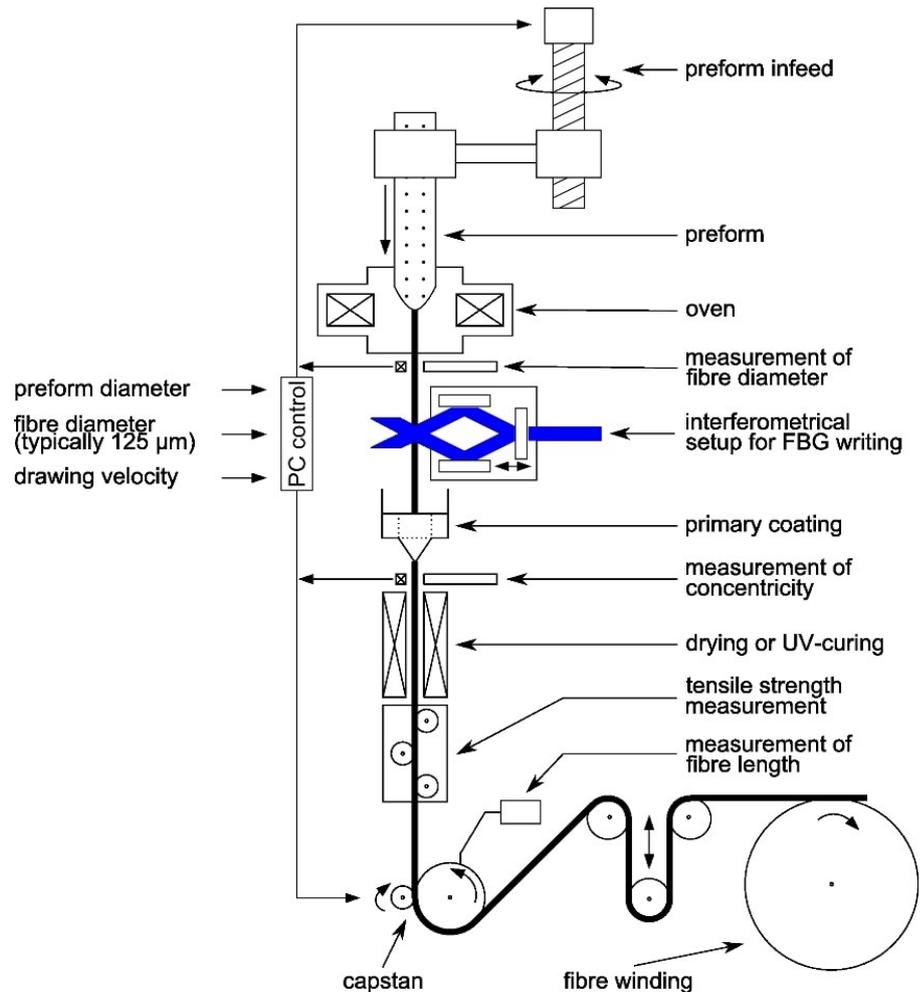


Abb. 2.7: DTGs mit holographic Technik (FBGS 2018a)

Durch den Einsatz des UV Lasers kommt es in der Faser zu einer Verlagerung im Germanium-Siliziumdioxidverbund. Dies führt zu einer Erhöhung des Brechungsindex im bestrahlten Bereich des Faserkerns. Eine längere Belichtungszeit resultiert in einer größeren Änderung des Brechungsindex und somit einer höheren Reflektivität des FBG (vgl. Udd, Spillman 2011, S. 400 – 401).

2.2.2 Eigenschaften und Messprinzip FBG

Wie erläutert, gehören die FBG zu den quasi-verteilten Sensoren. Hierbei werden mehrere Sensoren an spezifischen Punkten entlang einer Faser angeordnet. Das FBG funktioniert wie ein kleiner wellenlängenabhängiger Reflektor, wenn es von der Breitbandlichtquelle beleuchtet wird. Durch das Beleuchten des FBG mit dem Breitbandlichtsignal wird ein schmaler spektraler Peak reflektiert (Abbildung 2.8).

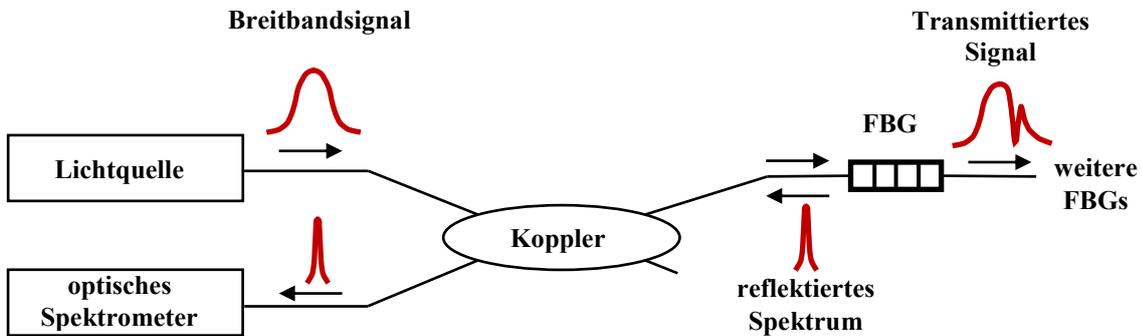


Abb. 2.8: Messprinzip FBG (vgl. Measures 2001, S. 388)

Die Wellenlänge des reflektierten Peaks λ_B wird mit einem optischen Spektrometer gemessen und hängt neben dem Gitterabstand Λ des FBG, auch vom effektiven Brechungsindex n_{eff} des Faserkerns, ab. Der Zusammenhang zwischen den Größen kann Formel 2.1 entnommen werden (vgl. Othonos, Kalli 1999, S. 96).

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (2.1)$$

Wird der Gitterabstand Λ erhöht, resultiert daraus eine Erhöhung der zentralen Wellenlänge des reflektierten Peaks, welche auch als Bragg-Wellenlänge bezeichnet wird. Im Gegensatz dazu führt eine Verringerung des Abstands zwischen den periodischen Gittern zu einer Verringerung der Bragg-Wellenlänge des reflektierten Peaks (Abbildung 2.9).

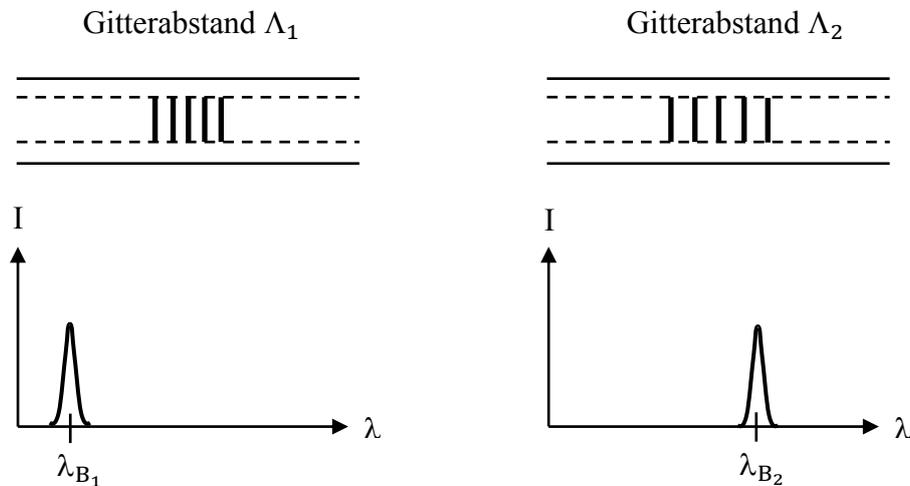


Abb. 2.9: Abhängigkeit der reflektierten Wellenlänge λ_B vom Gitterabstand Λ des FBG (vgl. Udd, Spillman 2011, S. 405)

Der restliche Teil des eingeleiteten Breitbandsignals wird transmittiert und breitet sich entlang des Faserkerns aus. Dies bildet die Grundlage für die Verwendung mehrerer Sensoren entlang einer Faser. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass die eingebauten FBG sich nicht gegenseitig stören bzw. abdecken. Als Beispiel können zwei identische FBG genannt werden, deren Gitterperiode Λ und effektiver Brechungsindex n_{eff} ident sind. Hierbei würde nur der erste Sensor detektiert werden, da der Wellenlängenbereich im transmittierten Signal für das zweite FBG fehlen würde. Daher muss bei der Konfiguration eines solchen quasi-verteilten Systems spezielles Augenmerk auf die Spezifikationen der verwendeten FBG und das zu erwartende Deformationsverhalten an den Positionen der einzelnen FBG gelegt werden.

Einflüsse im Bereich des FBG, die Dehnungsänderungen $\Delta\varepsilon$ bzw. Änderungen in der Temperatur ΔT hervorrufen, führen neben Änderungen des effektiven Brechungsindex n_{eff} des Faserkerns auch zu Abweichungen des Gitterabstand Λ des FBG. Dies hat eine Änderung der Bragg-Wellenlänge $\Delta\lambda_B$ zur Folge, welche mit Hilfe des Messgeräts detektiert werden kann. Um eine Aussage darüber treffen zu können, welche Wellenlängenänderung aufgrund einer Dehnungs- bzw. Temperaturänderung hervorgerufen werden, werden die Sensitivitäten dieser beiden Einflüsse nachfolgend separat voneinander betrachtet. Die Sensitivitäten eines FBG mit einer Bragg-Wellenlänge λ_B von 1550 nm einer SiO₂ basierten Glasfaser mit einem effektiven Brechungsindex von $n_{\text{eff}} = 1.482$ werden dabei bestimmt (vgl. Othonos, Kalli 1999, S. 98 – 99).

Dehnungssensitivität FBG

Hier soll gezeigt werden, welche Wellenlängenänderung $\Delta\lambda_B$ durch eine Dehnungsänderung $\Delta\varepsilon$ von $1 \mu\varepsilon$ ($= 1 \mu\text{m}/\text{m} = 1 \text{ ppm}$) hervorgerufen wird.

Die Änderung der Wellenlänge $\Delta\lambda_B$, die rein aus einer Dehnungsänderung $\Delta\varepsilon$ (in axialer Richtung der Faser) resultiert, kann aus dem Zusammenhang, welcher in Formel 2.2 beschrieben wird, entnommen werden.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot (1 - p_e) \cdot \Delta\varepsilon = k_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon \quad \dots \text{mit } (1 - p_e) = k \quad (2.2)$$

Der Parameter p_e bezeichnet hierbei die photoelastische Konstante, deren Berechnung in Formel 2.3 angegeben ist.

$$p_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \cdot [p_{12} - \nu \cdot (p_{11} + p_{12})] \quad (2.3)$$

Bei den Parametern p_{11} und p_{12} handelt es sich um die Komponenten des photoelastischen Tensors. Der Parameter ν beschreibt die Poissonzahl. Othonos und Kalli (1999, S. 99) definieren in ihrem Buch die Parameter mit $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.16$. Alle von Othonos und Kalli definierten Größen sind dimensionslos. Setzt man die Parameter in die Formel 2.3 ein erhält man die photoelastische Konstante $p_e = 0.213$. Diese wird in weiterer Folge zur Berechnung des k -Werts herangezogen, welcher sich aus dem Zusammenhang $(1 - p_e)$ in Formel 2.2 berechnen lässt. Er weist somit einen Wert von $k = 0.787$ auf. Zum Vergleich liegen die k -Werte der im Schiff verbauten FBG Sensoren in einem Bereich von

0.78 – 0.79 (Tabelle 1 bis 3 Kapitel 4.1.1). Der k-Wert wird vom Hersteller des FBG durch Kalibrierung bestimmt und in den Spezifikationen des FBG angegeben. Er stellt die Verbindung zwischen den Wellenlängenänderungen $\Delta\lambda_B$ und den Dehnungsänderungen $\Delta\varepsilon$ her. Dadurch kann durch Einsetzen der Parameter in die Formel 2.2 die hervorgerufene Wellenlängenänderung $\Delta\lambda_B$ aufgrund einer Dehnungsänderung $\Delta\varepsilon$ von $1 \mu\varepsilon$ berechnet werden. Somit ergibt sich bei einer Bragg-Wellenlänge λ_B von 1550 nm eine Dehnungssensitivität $k_\varepsilon = 1.2 \rho\text{m}/\mu\varepsilon$.

Temperatursensitivität FBG

Bezogen auf die Temperatursensitivität k_T soll gezeigt werden, welche Wellenlängenänderung $\Delta\lambda_B$ aufgrund einer Temperaturänderung von $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ hervorgerufen wird.

Der Effekt der Temperaturänderung ΔT hat neben der Änderung des Gitterabstands Λ auch eine Änderung der effektiven Refraktionsindizes n_{eff} , aufgrund der thermisch bedingten Ausdehnung der Glasfaser, zur Folge. Die Formel 2.4 stellt den Zusammenhang zwischen der thermal bedingten Wellenlängenänderung und der Temperaturänderung her.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \cdot \Delta T = k_T \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Der Parameter α_Λ beschreibt den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Glasfaser, welcher einen Wert von $0.55 \cdot 10^{-6}$ aufweist. Für eine Glasfaser mit einem Germanium-Siliziumkern wird der thermooptische Koeffizient α_n nach Othonos und Kalli (1999, S. 99) mit $8.6 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ angegeben. Hierbei ist klar ersichtlich, dass die thermische Änderung des Brechungsindex den Großteil der Wellenlängenänderung hervorruft. Setzt man die Parameter und die Bragg-Wellenlänge λ_B von 1550 nm in Formel 2.4 ein erhält man eine Temperatursensitivität des FBG von $k_T = 13.7 \rho\text{m}/^\circ\text{C}$ (vgl. Othonos, Kalli 1999, S. 99).

Vom Hersteller des FBG (HBM) wird jedoch nicht der thermische Ausdehnungskoeffizient α_Λ und der thermooptische Koeffizient α_n im Datenblatt des FBG übermittelt, sondern die Thermal Cross Sensitivity (TCS). Es wird dabei davon ausgegangen, dass das FBG an einer starren, dehnungsfreien Konstruktion befestigt ist. Daher kann die Temperatur lediglich den Brechungsindex der Faser verändern, nicht jedoch die thermische Ausdehnung der Faser, da diese durch die Konstruktion fixiert ist. Dies führt dazu, dass der thermische Ausdehnungskoeffizient α_Λ gleich 0 wird. Dadurch vereinfacht sich die Formel 2.4 folgendermaßen:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot \alpha_n \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Die TCS gibt den thermischen Beitrag des Sensors zum Dehnungssignal an und wird mittels Kalibrierung bestimmt. Die TCS liegt für die im Schiff verwendeten Sensoren in einem Bereich von $7 - 7.1 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$. Mit Hilfe des k-Werts kann der Zusammenhang zwischen TCS und dem thermooptischen Koeffizienten α_n hergestellt werden.

$$\alpha_n = \text{TCS} \cdot k \quad (2.6)$$

Durch Einsetzen von Formel 2.6 in Formel 2.5 erhält man die Formel zur Berechnung der Temperatursensitivität.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot TCS \cdot k \cdot \Delta T \quad (2.7)$$

Bei einer TCS von $7.1 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$, einem k-Wert von 0.79 (Tabelle 1 Kapitel 4.1.1) und einer Bragg-Wellenlänge von 1550 nm ergibt sich somit bei einer Temperaturänderung von 1°C eine Temperatursensitivität des FBG von $k_T = 8.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (vgl. HBM 2018a).

In den meisten Anwendungen ist nicht die Temperatur sondern der wirkende Strain von Bedeutung. Da man im Anwendungsgebiet mit Sicherheit keine Laborbedingungen auffinden wird, in welchen eine konstante Temperatur herrscht, muss die Temperaturänderung gesondert detektiert werden. Seit es durch die Multiplexing Technologie möglich geworden ist mehrere FBG Sensoren durch Techniken, wie z.B. Wavelength-Division Multiplexing (WDM), welche die Sensoren aufgrund ihrer individuellen reflektieren Wellenlängen unterscheidet, ergibt sich die Möglichkeit der simultanen Messung mehrerer Sensoren. Neben Strain und Temperatur kann somit auch eine separate Temperaturmessung zur Temperaurkompensation erfolgen. Diese Temperaturkompensation erfolgt meist durch ein lose, in einem Gehäuse, verlegtes FBG entlang der Messkette. Das Gehäuse muss hierbei so ausgeführt werden, dass kein Strain auf das lose verlegte FBG wirken kann. Dies hat zur Folge, dass der reine Effekt der Temperaturänderung detektiert wird. Dieser wird zur Kompensation aller anderen Sensoren herangezogen (vgl. Udd, Spillman 2011, S. 405).

Sowohl die Umsetzung der Temperaturkompensation als auch der Strainberechnung kann Kapitel 7.1.1 entnommen werden.

Für die Detektion der Wellenlängenänderung gibt es mehrere Multiplexverfahren, welche im nachfolgenden Kapitel 2.2.3 vorgestellt werden.

2.2.3 Multiplexverfahren

Multiplexverfahren dienen der simultanen bzw. sequentiellen Übertragung von mehreren Signalen entlang eines Übertragungsweges. Da sich somit mehrere Übertragungskanäle über einen Übertragungsweg übermitteln lassen, können vorhandene Übertragungswege effizient genutzt werden (vgl. ITWissen.Info 2018).

In der Faseroptik dient die Glasfaser als Übertragungsweg. Befindet sich entlang der Glasfaser nur ein FBG wird nur ein Peak reflektiert, welcher im Interrogator mit Hilfe eines Fotodetektors mit Wellenlängenartefakten verglichen wird, um die Position der zentralen Wellenlänge des FBG zu detektieren. Befinden sich entlang der Faser jedoch mehrere FBG werden mehrere Peaks mit unterschiedlichen zentralen Wellenlängen reflektiert. Um diese voneinander unterscheiden zu können verwendet der Interrogator eines der zwei folgenden Multiplexverfahren (vgl. Micron Optics 2018a).

Time Division Multiplexing (TDM)

Aufgrund der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts entlang des Faserkerns können Time Division Multiplexing Systeme das reflektierte Signal dem zugehörigen FBG zuordnen. Theoretisch könnten so über 100 FBG Sensoren, welche dieselbe Bragg-Wellenlänge aufweisen, entlang einer einzelnen Faser detektiert werden (vgl. Micron Optics 2018a).

Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Das wohl meist verbreitete Schema zur Detektion mehrerer FBG ist die Technik des Wavelength Division Multiplexing. Hierbei weisen alle FBG entlang der Glasfaser eine unterschiedliche Bragg-Wellenlänge auf, welche sich deutlich von den anderen unterscheidet. Der Interrogator verwendet diese einzigartigen FBG Wellenlängen, um die Sensoren zu verfolgen und untereinander zu unterscheiden. Die Anzahl der möglichen Sensoren ist abhängig vom Messbereich der einzelnen Sensoren und der Breite des Spektrums des verwendeten Instruments (vgl. Micron Optics 2018a).

3 Überwachte Struktur

Bei der überwachten Struktur handelt es sich um das Fährschiff Smyril, welches die Strecke zwischen Tórshavn – Tvøroyri auf den Färöer Inseln befährt. Das Schiff wurde 2005 in Spanien gebaut, ist 135 m lang und 22.7 m breit. Es hat eine maximale Kapazität von 975 Personen, 200 Autos und 30 Lastwägen. Mit einer Spitzengeschwindigkeit von 21 Knoten bewältigt die Smyril die Überfahrt von Tórshavn nach Tvøroyri in ca. 2 h 30 min (vgl. Strandfaraskip Landsins, 2018).

Da es die einzige Verbindungsmöglichkeit für Fahrzeuge zwischen den Inseln darstellt, wäre ein Ausfall dieses Schiffes mit großen Problemen für die Inselbewohner verbunden. Aufgrund der rauen See vor den Färöer Inseln und den daraus resultierenden hohen Belastungen ist das Schiff sehr wartungsintensiv. Immer wieder werden bei Wartungen des Fährschiffes Risse entdeckt.

Risse in der Schiffshülle können mit Hilfe von Structural Health Monitoring (SHM) Systemen detektiert werden. SHM Systeme können mit Hilfe von faseroptischen Messsystemen realisiert werden und somit helfen die Wartungskosten zu reduzieren und die Verfügbarkeit einer Struktur zu erhöhen (vgl. López-Higuera 2002, S. 488).

Die Unverzichtbarkeit der Verbindung und die enorm hohen einwirkenden Kräfte waren die ausschlaggebenden Punkte für die temporäre Überwachung dieser Struktur.



Abb. 3.1: Fährschiff Smyril (Strandfaraskip Landsins 2018)

4 Verwendete Sensoren

Für die Überwachung des Fährschiffs wurden neben unterschiedlichen faseroptischen Sensoren auch GPS Sensoren eingesetzt.

4.1 Faseroptische Sensoren

Bei den verwendeten faseroptischen Sensoren handelt es sich um FBG, welche sich in der Art des Einbaus, der Ausrichtung und der Anzahl unterscheiden. Alle unterliegen jedoch demselben Messprinzip (Kapitel 2.2.2).

4.1.1 FBG Kette OptiMet-PKF

Die FBG Kette OptiMet-PKF vom Hersteller HBM besteht aus 13 FBG Sensoren. Die Singlemodefaser ist durch eine Ormocer Beschichtung mit einer zusätzlichen Polyetheretherketon (PEEK) Schicht geschützt. Diese ermöglicht eine optimale Dehnungsübertragung. Der minimale Biegungsradius wird vom Hersteller mit 10 mm angegeben. Die gewählte FBG Kette besteht aus 12 FBG Dehnungssensoren und einem FBG Sensor zur Temperaturkompensation (Abbildung 4.1). Beim Temperatursensor handelt es sich um den PKF-OTC Sensor (vgl. HBM 2018b).

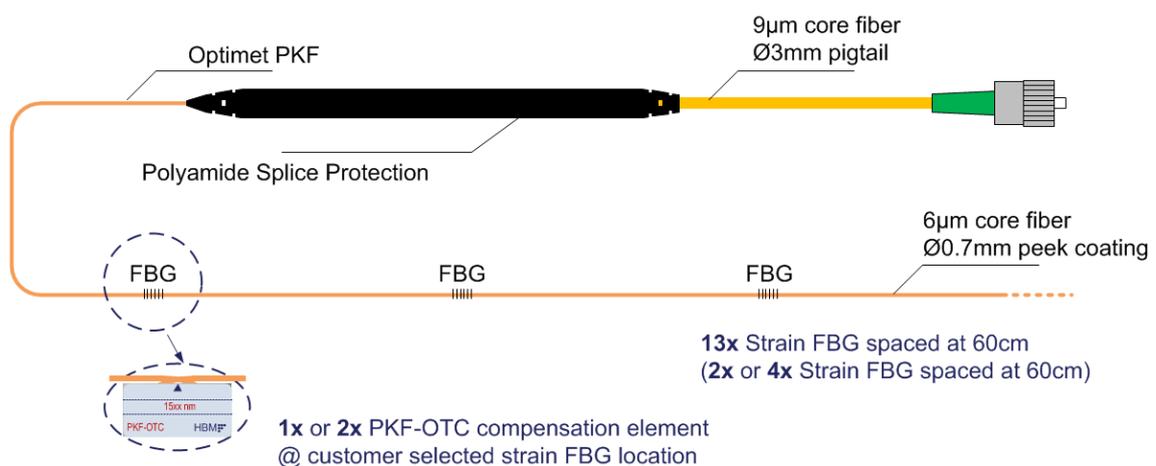


Abb. 4.1: FBG Kette OptiMet-PKF (HBM 2018b)

Dieser wird dehnungsfrei in einem Gehäuse verlegt und zeichnet lediglich die Änderungen aufgrund der Temperatur auf. Dies wird in weiterer Folge zur Temperaturkompensation der anderen Dehnungssensoren herangezogen, worauf in Kapitel 7.1.1 näher eingegangen wird. Die wichtigsten Herstellerangaben der OptiMet-PKF Sensorkette sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tab.1: Technische Daten OptiMet-PKF (HBM 2018c)

Verfügbare Bragg-Wellenlängen	nm	1520 – 1580
Toleranz Bragg-Wellenlänge	nm	± 1
k-Faktor		0.79
k-Faktor-Toleranz	%	± 2
Temperaturgang (TCS)	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	7.1
Toleranz des Temperaturgangs	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	± 1
Referenztemperatur	$^\circ\text{C}$	23
Gebrauchstemperatur	$^\circ\text{C}$	-40...+140
Maximale Dehnbarkeit (positiv und negativ)	$\mu\text{m}/\text{m}$	7000 (0.7 %)

4.1.2 Optische Strain Rosette

Die optische Rosette (OR) vom Hersteller HBM besteht aus drei um 60° zueinander verdrehten FBG Sensoren, deren technische Daten Tabelle 2 entnommen werden können. Somit können Messungen in drei Richtungen durchgeführt werden. Die Bragg-Wellenlängen der FBG unterscheiden sich hierbei jeweils um 5 nm. Je nach Messaufbau können Rosetten zwischen 1520 – 1530 nm bis 1565 – 1575 nm gewählt werden. Die Gebrauchstemperatur liegt in einem Bereich zwischen -10°C und $+80^\circ\text{C}$. Auch an gekrümmten Flächen kann dieser Sensor ohne Probleme eingesetzt werden. Des Weiteren bietet er die Möglichkeit der Berechnung von Strainellipsen, mit welchen die Verformung des anliegenden Materials veranschaulicht werden kann (vgl. HBM 2018d).

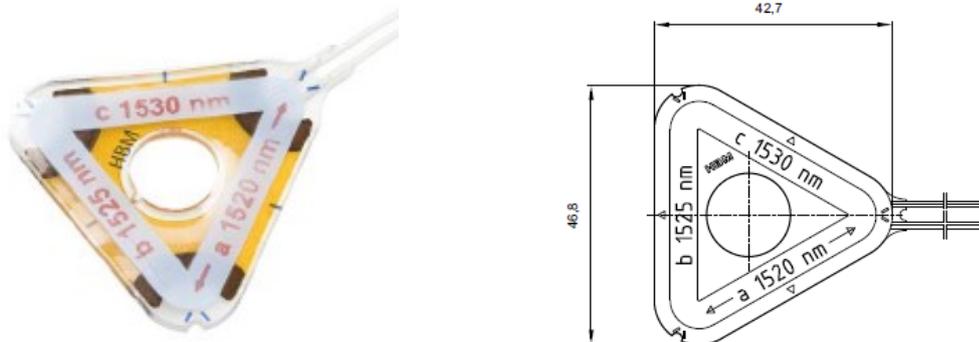


Abb. 4.2: Optische Strain Rosette (HBM 2018d)

Tab.2: Technische Daten OR (HBM 2018d)

Verfügbare Bragg-Wellenlängen	nm	1520 – 1575
Toleranz Bragg-Wellenlänge	nm	±1
k-Faktor		ca. 0.78 (auf jeder Packung angegeben)
k-Faktor-Toleranz	%	±2
Temperaturngang (TCS)	µm/m/°C	7.0
Toleranz des Temperaturngangs	µm/m/°C	±1
Referenztemperatur	°C	23
Gebrauchstemperatur	°C	-10...+80
Maximale Dehnbarkeit (positiv und negativ)	µm/m	10000 (1 %)

4.1.3 DTG-LBL-1550 frei gespannt

Um die Variation der Öffnung des Schiffsbugs zu detektieren, wurden zwei frei gespannte FBG im Schiff eingebaut. Dabei wurden zwei DTG-LBL-1550 Sensoren vom Hersteller FBGS verwendet. Es handelt sich dabei um Draw Tower Gratings (DTG), welche in eine Low Bend Loss (LBL) Faser eingeschrieben wurden. Die Sensoren wurden jeweils zwischen zwei Magnethaltern temporär fixiert. Die Länge der frei gespannten Strecke wurde mit jeweils 1 m angenommen. Im Gegensatz zu den anderen Sensoren wurden die zwei verwendeten DTGs im Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie der Technischen Universität Graz kalibriert und ihre Dehnungs- (quadratisch) und Temperatursensitivitäten bestimmt (vgl. Lienhart et.al 2013). Die wichtigsten Parameter der Sensoren können Tabelle 3 entnommen werden.

Tab.3: Technische Daten DTG-LBL-1550 (Lienhart et.al 2013, S. 7, FBGS 2018b)

		Sensor 1	Sensor 2
Verfügbare Bragg-Wellenlängen	nm	1510 – 1590	
Dehnungssensitivität k_ϵ	pm/µε	1.33	1.25
Dehnungssensitivität (quadratisch) q_ϵ	pm/µε ²	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Temperatursensitivität k_T	pm/°C	11.21	11.30
Gebrauchstemperatur	°C	-180...+200	
Maximale Dehnbarkeit (positiv und negativ)	µm/m	50000 (5 %)	

4.2 GPS

Um die Position und die Bewegung des Schiffs bestimmen zu können, wurden drei GPS Antennen (Rover) am Schiffsdeck und an der Schiffsbrücke platziert. In Kapitel 6.2 wird die Anordnung der Antennen genauer erläutert. Bei den Antennen handelt es sich um Trimble GPS micro geodetic L1/L2 Antennen, die in Verbindung mit einem Trimble 4700 Empfänger verwendet wurden (Abbildung 4.4).



Abb. 4.4: GPS Rover am Schiff (Foto: Ferdinand Klug)

Bei der Referenzstation handelt es sich um eine Permanentstation, welche sich an einem Gebäude in Tórshavn befindet. Sowohl die Positionierung der Antenne als auch deren Schutz gegen Witterungseinflüsse ist in Abbildung 4.5 ersichtlich.



Abb. 4.5: Permanentstation an Gebäude in Tórshavn (EUREF Permanet GNSS Network, 2018)

Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich um eine Trimble Zephyr 3 geodetic Antenne in Verbindung mit einem Trimble Net 9 Empfänger (Abbildung 4.6). Damit werden neben GPS auch GLONASS Satelliten von der Station getrackt. Die Permanentstation ist Teil des International Terrestrial Reference Frame (ITRF) und liefert stündliche bzw. tägliche Positionsdaten. Sie unterstützt jedoch, im Vergleich zu anderen Stationen, keine Real-Time Kinematik (RTK) Lösung (vgl. EUREF Permanet GNSS Network 2018). Auch die große Basislinienlänge b , von bis zu 52 km, welche den räumlichen Abstand zwischen Referenzstation und Rover bezeichnet, würde ein Problem für RTK (b max. 20 km) darstellen. Daher wurde die Auswertung im post-processing an der Universität Nottingham und am Institut für Ingenieurgeodäsie der Universität Graz durchgeführt (Kapitel 7.2).



Abb. 4.6: Trimble Zephyr 3 geodetic Antenne (Trimble 2018a) und Trimble Net 9 Empfänger (Trimble 2018b) der Referenzstation

Die wichtigsten technischen Daten der GPS Rover und Referenzstation können Tabelle 4 entnommen werden.

Tab.4: Technische Daten Rover Trimble 4700 (Unavco 2018), Referenzstation Trimble Net 9 (Trimble 2018c)

	Trimble 4700	Trimble Net 9
GNSS Systeme	GPS	GPS, GLONASS
Anzahl Kanäle	9	440
Messfrequenz	1 oder 5 Hz (Messmodus abhängig)	20 Hz
Messpräzision (Postprocessing)	Horizontal: $\pm 1\text{cm} + 2\text{ppm} \cdot \text{Basislinie} (\leq 10 \text{ km})$ $\pm 2\text{cm} + 1\text{ppm} \cdot \text{Basislinie} (> 10 \text{ km})$ Vertikal: $\pm 2\text{cm} + 1\text{ppm} \cdot \text{Basislinie}$	

Funktionsweise sm 130-700 Interrogator

Der sm 130-700 verwendet einen Halbleiterlaser mit einem durchstimmbaren Filter (Fabry-Perot Filter). Die somit resultierende schmalbandige Lichtquelle ist leistungsstark und weist ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis auf. Dadurch können mehrere Kanäle an diese hochenergetische Lichtquelle angeschlossen werden. Durch den Einsatz des Fabry-Perot-Filters, der auf dem Prinzip des Fabry-Perot-Interferometers basiert, in welches zusätzlich eine Faser eingesetzt wurde, können Linsen und Kollimatoren vermieden werden. Die durchstimmbare Wellenlänge des Filters wird durch Piezoelemente erzeugt, welche eine Änderung des Spiegelabstands hervorrufen.

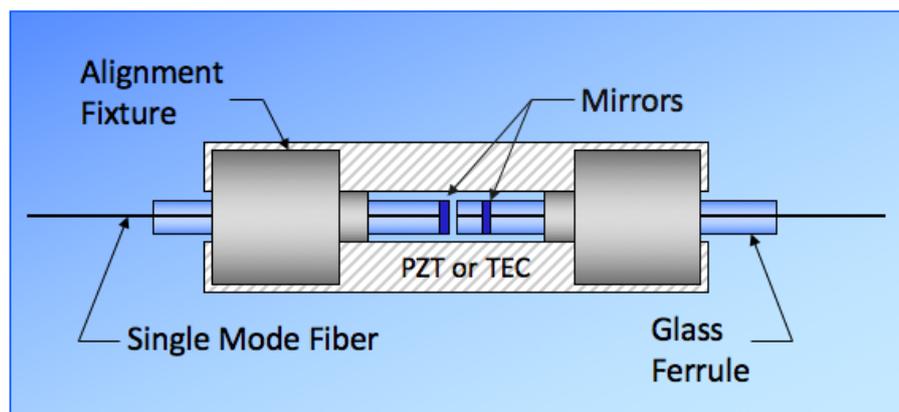


Abb. 5.2: Skizze des Fiber Fabry-Perot (FFP) tunable filter (Micron Optics 2018b)

Beim Einsatz dieses Verfahrens wird ein sehr schmales Lichtband erzeugt, welches über einen bestimmten Wellenbereich läuft. Synchron dazu misst ein Fotodetektor die Reflexionen der FBG. Sobald die Wellenlänge des durchstimmbaren Lasers mit der Bragg-Wellenlänge des FBG übereinstimmt kommt es zu einer Reflexion der entsprechenden Wellenlänge, welche vom Fotodetektor erfasst wird. Durch Verwendung des durchstimmbaren Lasers und der damit sehr hohen Leistung der Lichtquelle können Messungen über lange Faserstrecken (>10 km) erfolgen (vgl. Landmann, Jamal 2011, S. 45).

6 Messaufbau

Für eine gezielte Aufzeichnung der Bewegungen und der hochfrequenten Dehnungen, die auf das Fährschiff während der Überfahrt wirkten, wurden an geeigneten Stellen Sensoren angebracht, um das Verhalten zu detektieren. Die folgenden Unterkapitel geben einen Überblick der Anordnung der verwendeten Sensoren am Schiff.

6.1 FBG Sensoren

Zur Bestimmung von Frequenzen aus detektierten hochfrequenten Dehnungen wurden FBG im Motorraum und im Bug des Fährschiffs verbaut. Abbildung 6.1 zeigt eine Übersicht der Lage der FBG Sensoren.



Abb. 6.1: Lage der FBG Sensoren (Foto: Ferdinand Klug)

Maschinenraum

Im Motorraum wurde neben der Sensorkette FBG OptiMet-PKF (Kapitel 4.1.1) auch eine FBG Strain Rosette (Kapitel 4.1.2) an der Innenwand des Schiffs verklebt. Die Installation dieser Sensoren fand am 01.08.2017, zu Beginn der ersten Messkampagne, statt. Die Position der FBG Sensoren im Maschinenraum ist Abbildung 6.2 zu entnehmen.

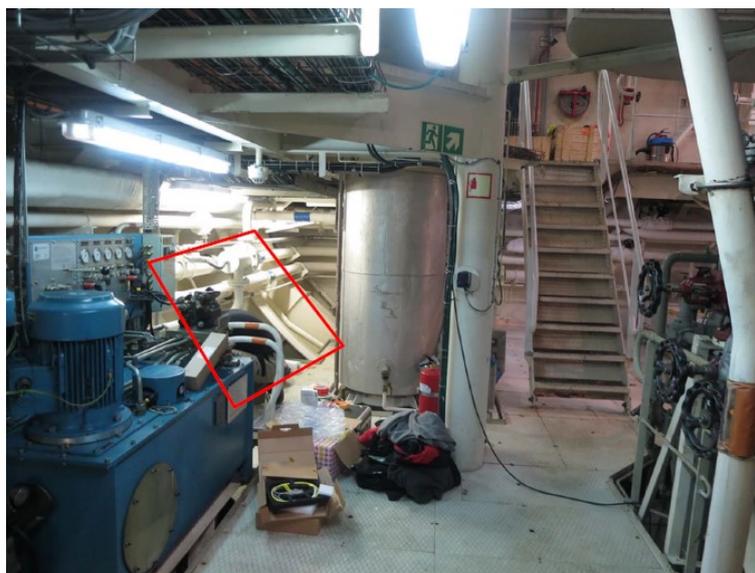


Abb. 6.2: Position der FBG Sensoren im Maschinenraum (Foto: Ferdinand Klug)

Von den 13 Sensoren der FBG Kette wurden elf Sensoren in vertikaler Richtung und zwei Sensoren in horizontaler Richtung an der Schiffshülle fixiert. Die vertikalen Sensoren wurden hierbei in zwei horizontale Abschnitte zu jeweils fünf Sensoren aufgeteilt. Der vertikale Sensor auf der rechten Seite in Abbildung 6.3 zeigt den Temperatursensor. Dieser wurde lose in einer Hülle verlegt, um die Dehnungen rein aus der Temperaturänderung zu bestimmen und diesen Einfluss zu kompensieren. Da die Sensoren nur in axialer Richtung sensitiv sind, wurden die Sensoren in unterschiedlichen Ausrichtungen (vertikal, horizontal) angebracht. Jedes der angebrachten FBG weist eine Länge von ca. 10 mm auf. Die grünen Abdeckbänder, welche in Abbildung 6.3 ersichtlich sind, dienen lediglich als Schutz der FBG Sensoren. Der Verbund der Sensoren mit dem metallischen Rumpf des Schiffs erfolgte mittels eines X120 Klebstoffs, welcher vom Hersteller empfohlen wurde. Des Weiteren zeigt Abbildung 6.3 die gewählte Nomenklatur für die FBG Sensoren der OptiMet-PKF Sensorenkette im Maschinenraum.

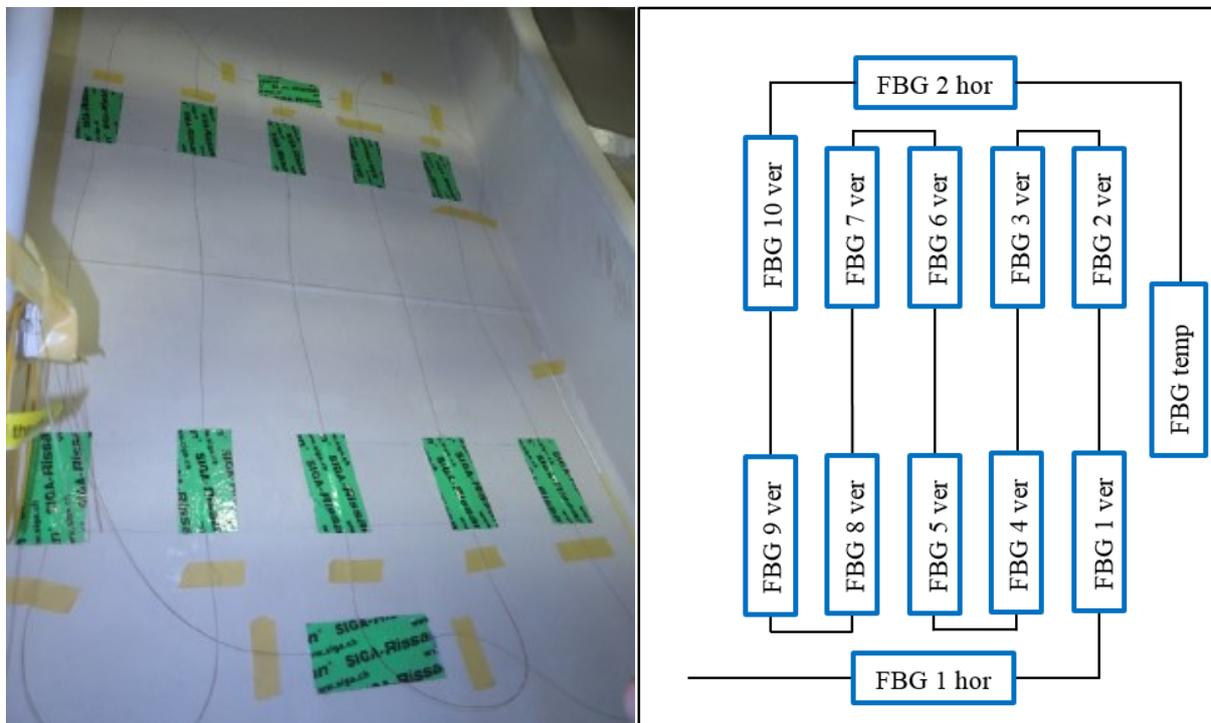


Abb. 6.3: Anordnung FBG Kette Maschinenraum (Foto: Ferdinand Klug), schematische Darstellung und Nomenklatur der FBG Sensoren

Um die Verformung der Schiffshülle zu detektieren, wurde des Weiteren eine FBG Strain Rosette an der Schiffshülle mit einem geeigneten Klebstoff (Z70) fixiert. Die Ausrichtung wurde hierbei so gewählt, dass ein FBG der Strain Rosette horizontal und die anderen beiden FBG um 60° bzw. 120° verdreht zu diesem angeordnet wurden (Abbildung 6.4).

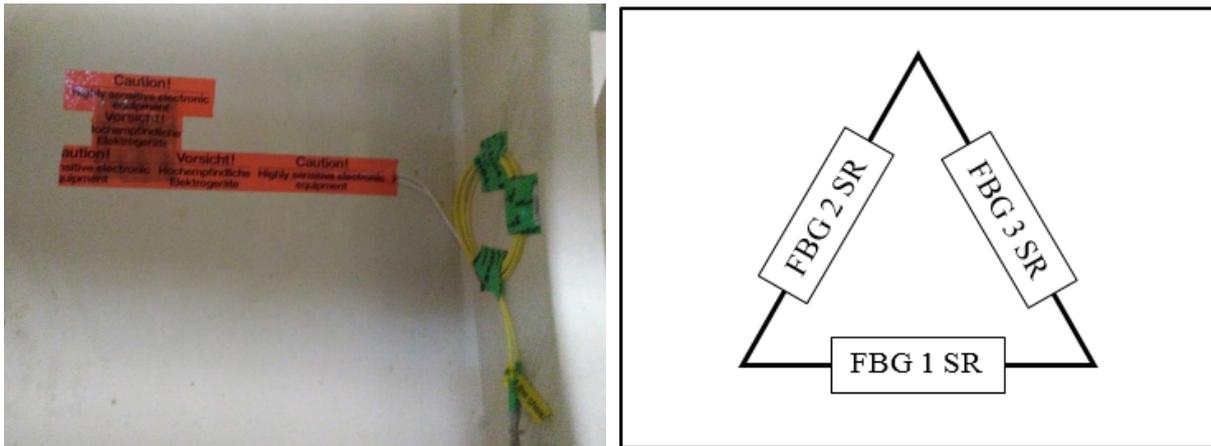


Abb. 6.4: Anordnung Strain Rosette Maschinenraum (Foto: Ferdinand Klug), schematische Darstellung und Nomenklatur der Strain Rosetten Sensoren

Die Strain Rosette weist eine Größe von circa 5 x 5 cm auf und befindet sich unter dem roten Abdeckband, welches aus Schutzzwecken angebracht wurde.

Die Messung dieser Sensoren erfolgte simultan auf zwei Kanälen. Kanal eins zeichnete die Wellenlängen der FBG Kette, Kanal zwei die der Strain Rosette auf. Abbildung 6.5 zeigt die Übersicht der Anordnung der Sensoren.

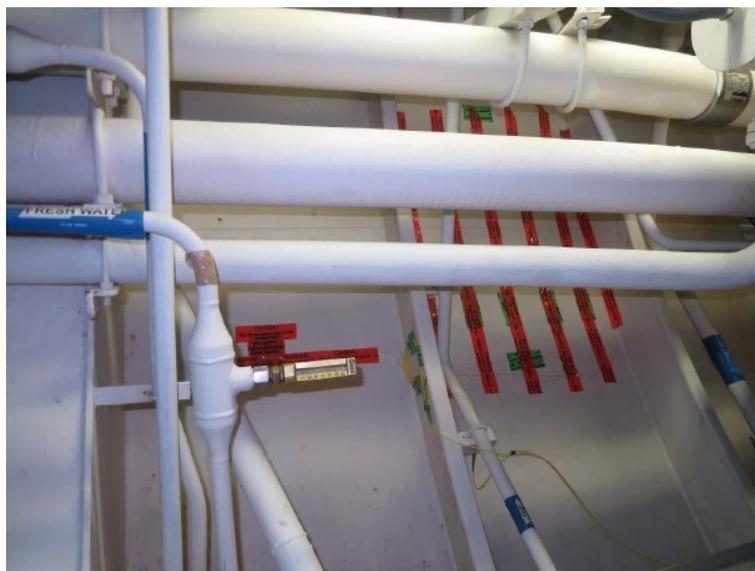


Abb. 6.5: Übersicht Sensoren Maschinenraum (Foto: Ferdinand Klug)

Bug

Im Bug wurden zwei frei gespannte FBG zur Überwachung der Öffnung des Buges temporär montiert (Abbildung 6.6). FBG 1 B befindet sich auf der linken Seite in Fahrtrichtung und FBG 2 B auf der Rechten. Die sensitive Achse der FBG Sensoren liegt aufgrund des Messaufbaus nicht in Längs- oder Querrichtung zum Schiff sondern diagonal dazu.

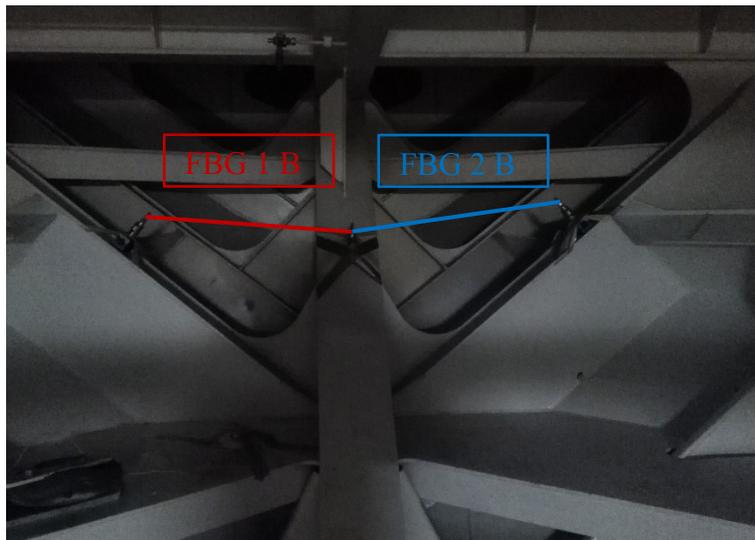


Abb. 6.6: FBG Sensoren Bug (Foto: Ferdinand Klug), mit Nomenklatur der Sensoren

Hierbei wurden die Sensoren zwischen Magnethaltern (Abbildung 6.7), welche mit der Schiffshülle verbunden waren, angebracht. Die frei gespannte Länge der Sensoren wurde mit 1.0 m angenommen.

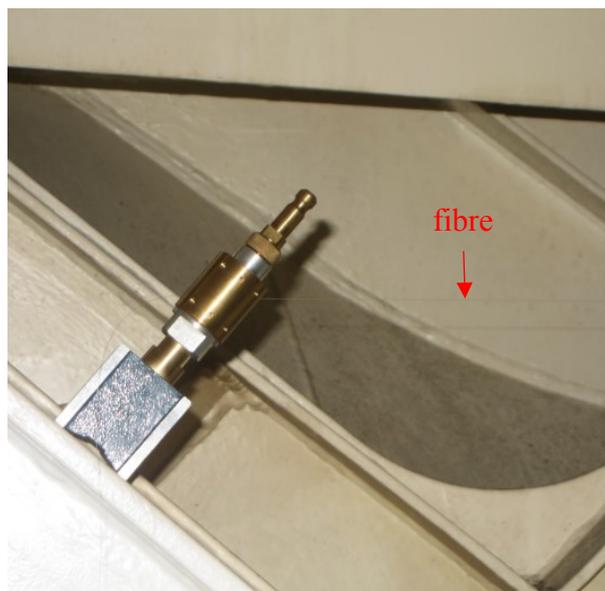


Abb. 6.7: Magnethalter zur temporären Fixierung des FBG Sensors (Foto: Ferdinand Klug)

6.2 GPS Antennen

Sowohl für die Bestimmung der Position als auch der Bewegung des Fährschiffs wurden drei GPS Antennen temporär am Schiff platziert. Zwei der Antennen wurden hierbei quer zur Fahrtrichtung des Schiffs entlang der Brücke montiert. Die dritte Antenne wurde (in Fahrtrichtung) auf der rechten Heckseite des Schiffs angebracht (Abbildung 6.8).

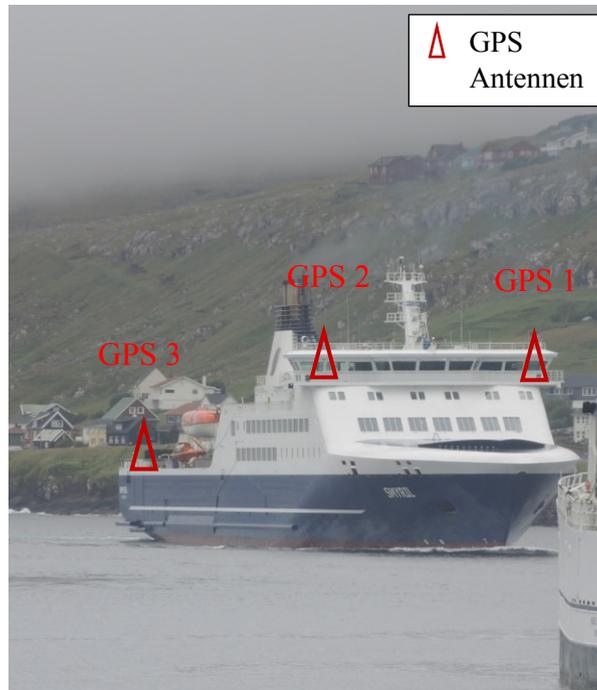


Abb. 6.8: Anordnung der GPS Antennen (Foto: Ferdinand Klug)

7 Datenerfassung und Vorprozessierung

Die Erfassung der Messdaten erfolgte bei rauem Seegang vom 12.02.2018 bis zum 14.02.2018 zwischen den Häfen von Tórshavn und Tvøroyri auf den Färöer Inseln. Einerseits wurden faseroptische Daten mit einer Frequenz von 1000 Hz und andererseits GPS Daten mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Die Messungen erfolgten zum Großteil simultan, um eine Verschneidung der Daten zu ermöglichen. Es ist jedoch anzumerken, dass die Messungen der faseroptischen Sensoren in Bug und Maschinenraum separat durchgeführt wurden. Der Messablauf ist Tabelle 6 zu entnehmen.

Tab.6: Messablauf der Messkampagne

Datum	Beginn	Ende	von	nach	FOS	GPS
12.2.2018	15:18:00	19:00:00	Tórshavn	Tvøroyri	Maschinenraum	Ja
	19:00:00	24:00:00	Dauermessung Hafen		Maschinenraum	Nein
13.2.2018	00:00:00	06:30:00	Dauermessung Hafen		Maschinenraum	Nein
	06:30:00	09:34:00	Tvøroyri	Tórshavn	Maschinenraum	Ja
	12:50:00	15:22:00	Tórshavn	Tvøroyri	Bug	Ja
	15:22:00	17:40:00	Tvøroyri	Tórshavn	Bug	Ja
14.2.2018	15:19:00	19:15:00	Tórshavn	Tvøroyri	Maschinenraum	Ja
	19:15:00	22:04:00	Tvøroyri	Tórshavn	Maschinenraum	Nein

7.1 FBG

Die Vorprozessierung der FBG Sensoren hatte die Bestimmung des Strains, der rein aus der Deformation der Schiffshülle resultiert, zum Ziel. Da die Wellenlängenänderungen jedoch durch Dehnungs- und Temperaturänderungen hervorgerufen werden, ist der Einfluss der Temperatur zu kompensieren. Die Vorgehensweise wird im nachfolgenden Kapitel 7.1.1 genauer erläutert.

7.1.1 Temperaturkompensation und Strainberechnung

Durch das Vorhandensein eines FBG Temperatursensors in unmittelbarer Nähe zu den FBG Dehnungssensoren des Maschinenraums, welche neben Dehnungs- auch Temperatureinflüssen unterworfen sind, kann durch Subtraktion der Wellenlängenänderung des Temperatursensors $\Delta\lambda_T$ von den Wellenlängenänderungen der Dehnungssensoren $\Delta\lambda_{m+T}$ eine Temperaturkompensation erzielt werden (vgl. Landmann, Jamal 2011, S. 45).

$$\Delta\lambda_m = \Delta\lambda_{m+T} - \Delta\lambda_T \quad (7.1)$$

Dadurch kann die Wellenlängenänderung $\Delta\lambda_m$, die rein durch die Dehnung hervorgerufen wird, bestimmt werden. Die Temperaturkompensation des horizontalen FBG 1 Sensors ist in Abbildung 7.1 dargestellt. In den Daten des FBG temp ist dabei eine näherungsweise lineare Zunahme der Wellenlänge von 20 pm über einen Zeitraum von ca. 4 h erkennbar.

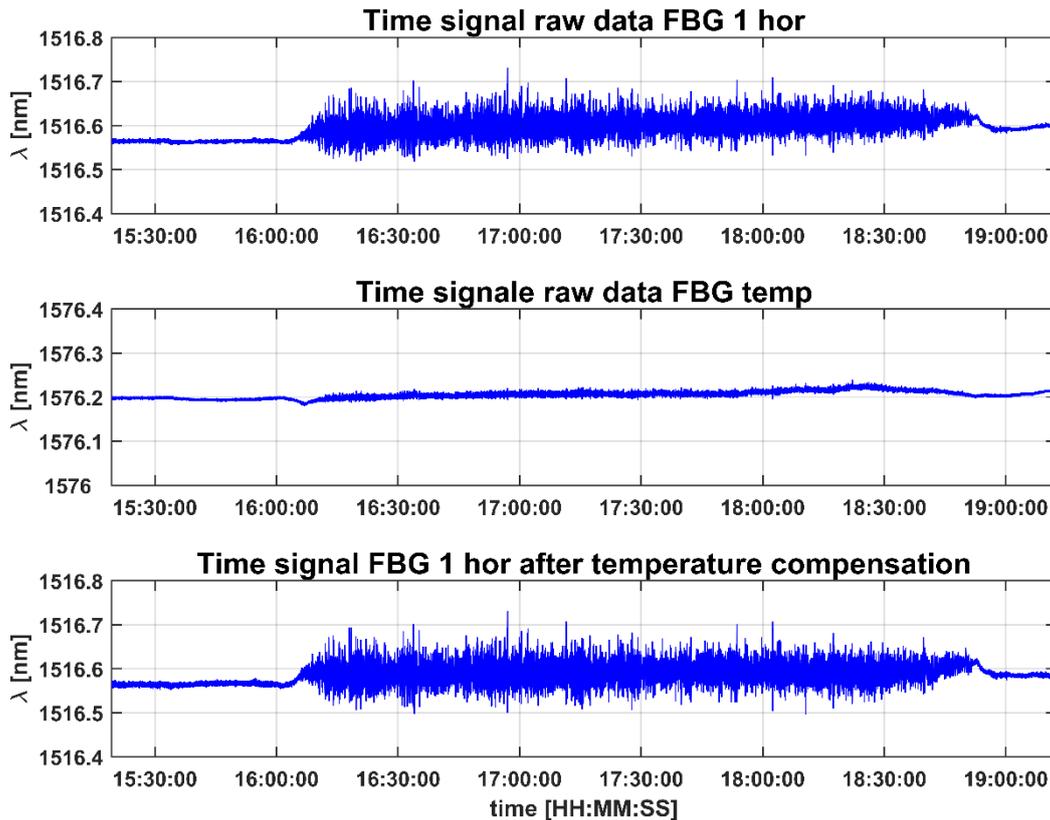


Abb. 7.1: Temperaturkompensation des FBG 1 hor im Maschinenraum, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Im Bug war eine Temperaturkompensation nicht möglich, da kein Temperatursensor zur Verfügung stand.

Aufgrund der Unterschiede in den gegebenen Parametern zwischen den FBG Sensoren des Maschinenraums und jenen des Bugs wird die Berechnung des Strains separat gezeigt.

Strainberechnung Sensoren Maschinenraum

Bereits in Kapitel 2.2 wurde der Zusammenhang zwischen Dehnungsänderung $\Delta\varepsilon$ und Wellenlängenänderung $\Delta\lambda_B$ erläutert. Der formale Zusammenhang ist Formel 2.2 zu entnehmen. Diese Formel kann durch Umformung auch folgendermaßen dargestellt werden (Formel 7.2).

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \cdot k} \quad (7.2)$$

Naheliegender wäre es die temperaturbereinigten Wellenlängenvariationen $\Delta\lambda_m$ und die zugehörige Bragg-Wellenlänge $\Delta\lambda_{0m}$ in die Formel einzusetzen. Dies wäre jedoch nur dann zulässig, wenn beide Sensoren (Dehnungs- und Temperatursensor), die zur Berechnung der temperaturbereinigten Wellenlängenvariationen $\Delta\lambda_m$ herangezogen wurden, dieselbe Bragg-Wellenlänge ($\lambda_{0m+T} = \lambda_{0T}$) aufweisen. Da dies jedoch aufgrund der Anordnung der Sensoren entlang derselben Faser nicht möglich ist (vgl. Kapitel 2.2.2), wird zu Formel 7.3 übergegangen (vgl. Kreuzer S. 15).

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_{m+T}}{\lambda_{0m+T}} - \frac{\Delta\lambda_T}{\lambda_{0T}} \right) \quad (7.3)$$

Als Bragg-Wellenlänge wird dabei jeweils die Wellenlänge der ersten Epoche des entsprechenden Sensors gewählt (Abbildung 7.1).

Strainberechnung Sensoren Bug

Da für die Sensoren des Bugs nicht der k-Wert sondern die Dehnungssensitivitäten k_ε und q_ε (vgl. Tabelle 3, Kapitel 4.1.3) angegeben und keine Temperaturdaten aufgezeichnet wurden, erfolgt die Berechnung des Strains anhand des formalen Zusammenhangs aus Formel 7.4 (vgl. Lienhart et. al. 2013, S. 7).

$$\Delta\lambda = (k_\varepsilon + q_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon) \cdot \Delta\varepsilon \quad (7.4)$$

Durch Umformung erhält man die Strainänderung $\Delta\varepsilon$ aufgrund der Wellenlängenänderung $\Delta\lambda$. Diese ist Formel 7.5 zu entnehmen.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\pm\sqrt{k_\varepsilon^2 + 4 \cdot \Delta\lambda \cdot q_\varepsilon} - k_\varepsilon}{2 \cdot q_\varepsilon} \quad (7.5)$$

Da die Dehnungssensitivität quadratisch bestimmt wurde, erhält man aus Formel 7.5 zwei Lösungen für die Dehnungsänderung, wobei nur eine der beiden den richtigen Wert liefert.

7.2 GPS

Die Auswertung der GPS Daten wurde einerseits an der University of Nottingham und andererseits am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der Technischen Universität Graz durchgeführt. Aufgrund der Partnerarbeit der Universitäten wurde beschlossen, die erzielten Ergebnisse in englischer Sprache wiederzugeben. Die Auswertung erfolgte jeweils im post-processing. Für die Auswertung der GPS Daten wurde neben dem open source Programm RTKlib (University of Nottingham) auch das Vermessungsprogramm Leica Infinity (TU Graz) verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Programme wurden unterschiedliche Parameter zur Verfügung gestellt. Die Vorprozessierung hatte die Schaffung einheitlicher Parameter zum Ziel.

RTKlib

Die Auswertung der GPS Daten mit RTKlib erfolgte ausschließlich für den 14.2.2018. Als Daten wurden 3D Basislinienabstände, in einem verebneten System (North, East, Up), zwischen der Antennen und der Referenzstation zur Verfügung gestellt. Hierbei war die Position der Referenzstation in astronomischen Koordinaten (Φ, Λ) und globalen WGS 84 Koordinaten (X,Y,Z) bekannt. Des Weiteren wurden Qualitätsparameter der Positionslösung jedes einzelnen Punktes übermittelt.

Ziel war die Bestimmung der Position der Antennen am Schiff. Es wurde in einem ersten Schritt eine Transformation der Referenzstation ins lokale Horizontsystem durchgeführt, um die Basislinienabstände anbringen zu können. Der Zusammenhang zwischen dem globalen

Koordinatensystem (X,Y,Z) und dem lokalen Horizontsystem (n,e,u) kann Abbildung 7.2 entnommen werden.

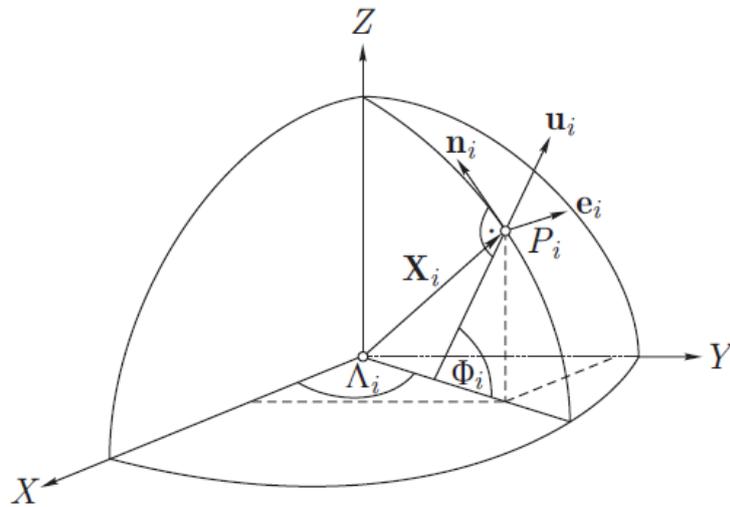


Abb. 7.2: Zusammenhang zwischen globalen und lokalen Koordinaten (Hoffman-Wellenhof, Moritz 2005, S. 208)

Die Transformation ist in den nachfolgenden Formeln aufgelistet (vgl. Hoffman-Wellenhof, Moritz 2005, S. 209 – 210).

$$R = \begin{bmatrix} -\sin \Phi \cos \Lambda & -\sin \Lambda & \cos \Phi \cos \Lambda \\ -\sin \Phi \sin \Lambda & \cos \Lambda & \cos \Phi \sin \Lambda \\ \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

$$X_{n,e,u} = R^T X \quad (7.7)$$

Die Rotationsmatrix R , welche neben der astronomischen Breite Φ auch die astronomische Länge Λ als Drehwinkel verwendet, wird zur Transformation des WGS 84 Koordinatenvektors X der Referenzstation ins lokale Horizontsystem $X_{n,e,u}$ herangezogen (vgl. Hoffman-Wellenhof, Moritz 2005, S. 209).

Durch Addition der übermittelten Basislinienabstände $b_{n_{ij},e_{ij},u_{ij}}$ und den Koordinaten der Referenzstation im lokalen Horizontsystem $X_{n,e,u}$ wurden die Positionen der Antennen $X_{n_{ij},e_{ij},u_{ij}}$ in eben diesem System bestimmt (Formel 7.8).

$$X_{n_{ij},e_{ij},u_{ij}} = X_{n,e,u} + b_{n_{ij},e_{ij},u_{ij}} \quad (7.8)$$

Durch Rücktransformation über die Rotationsmatrix R konnten die Positionen der Antennen im globalen WGS 84 System X_{ij} bestimmt werden (Formel 7.9).

$$X_{ij} = R X_{n_{ij},e_{ij},u_{ij}}^T \quad (7.9)$$

Des Weiteren wurde eine Transformation der globalen Koordinaten in ellipsoidische Koordinaten (φ, λ, h) durchgeführt (Formel 7.10 – 7.17) (vgl. Hoffman-Wellenhof, Moritz 2005, S. 193 – 197). Abbildung 7.4 zeigt den Zusammenhang zwischen den beiden Koordinatensystemen.

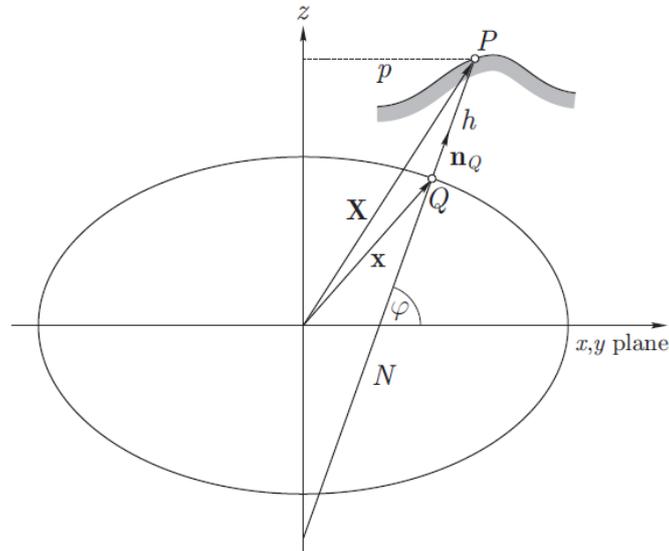


Abb. 7.3: Zusammenhang zwischen globalen und ellipsoidischen Koordinaten (Hoffman-Wellenhof, Moritz 2005, S. 194)

$$\varphi = \arctan \frac{Z + e'^2 b \sin^3 \theta}{p - e^2 a \cos^3 \theta} \quad (7.10)$$

$$\lambda = \arctan \frac{Y}{X} \quad (7.11)$$

$$h = \frac{p}{\cos \varphi} - N \quad (7.12)$$

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \quad (7.13)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (7.14)$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad (7.15)$$

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (7.16)$$

$$\theta = \arctan \frac{Z a}{p b} \quad (7.17)$$

$$a = 6378137 \text{ [m]} \text{ und } b = 6356752.31425 \text{ [m]}$$

Für die Transformation zwischen den globalen WGS 84 Koordinaten und den ellipsoidischen Koordinaten wurden die Parameter a, b des Rotationsellipsoids benötigt. Dabei handelt es sich um die große (a) und kleine Halbachse (b) des Rotationsellipsoids.

Des Weiteren wurden die ellipsoidischen Höhen h in orthometrische Höhen H umgerechnet (Formel 7.18). Dabei wurden die von der Vermessungssoftware Leica Infinity bereitgestellten Geoidundulationen N für die Umrechnung herangezogen.

$$H = h - N \quad (7.18)$$

Leica Infinity

An der Technischen Universität Graz erfolgte die Berechnung mit der Vermessungssoftware Leica Infinity. Es wurden alle oben genannten Parameter zur Verfügung gestellt, wodurch eine Vorprozessierung der Daten nicht von Nöten war. Die Auswertung wurde für alle Tage (12.2.2018 - 14.2.2018) der Messkampagne durchgeführt.

Um die Daten untereinander zu vergleichen, wurde eine Qualitätsanalyse der GPS Daten durchgeführt (Kapitel 7.2.2). Einerseits sollte dabei die Qualität und die Verfügbarkeit von phasenfixierten Lösungen und andererseits ein eventueller Zusammenhang der Qualität der Daten mit zunehmender Basislinienlänge analysiert werden. Dafür musste die Basislinienlänge vorab berechnet werden (Kapitel 7.2.1).

7.2.1 Basislinienberechnung

Die Bestimmung der Basislinie wurde durchgeführt, um Aussagen über das Verhalten und die Verfügbarkeit der GPS Sensoren bei unterschiedlichen Abständen von der Referenzstation treffen zu können. Die Berechnung der geometrischen Abstände b_i , zwischen den Koordinaten der Referenzstation X_j und jenen der GPS Antennen X_i , ist Formel 7.19 zu entnehmen.

$$b_i = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \quad (7.19)$$

Die somit bestimmten Basislinienlängen variieren hierbei zwischen 1 km und 52 km.

7.2.2 Qualitätsanalyse

Die Qualitätsanalyse beschäftigt sich neben der Qualität der Positionslösungen mit der Verfügbarkeit von phasenfixierten Positionslösungen und deren Verknüpfung mit unterschiedlichen Basislinienlängen. Die Qualität der Positionslösung wird dabei in drei Qualitätsklassen unterteilt. Die erste Qualitätsklasse beinhaltet die phasenfixierten (fixed) Lösungen. Die nicht phasenfixierten (unfixed) Lösungen, wie z.B. Float- oder Codelösungen bilden die zweite Qualitätsklasse. Auch vorhandene Datenlücken (no data) werden miteinbezogen. Diese bilden die dritte Qualitätsklasse. Um die Verfügbarkeit von phasenfixierten Positionslösungen der einzelnen GPS Antennen darstellen zu können, wurden die Prozentanteile der phasenfixierten und nicht phasenfixierten Lösungen und der Datenlücken der einzelnen Antennen für die Messfahrten an den drei Tagen der Messkampagne in Tabelle 7 angegeben.

Tab.7: Prozentanteile der phasenfixierten Lösung und nicht phasenfixierten Lösung und der Datenlücken der drei Antennen für die durchgeführten Messfahrten.

Datum	von	nach	GPS	Verfügbarkeit [%]			FOS	Prog.		
				fixed	unfixed	no data				
12.2.2018	Tórshavn	Tvøroyri		fixed	unfixed	no data	Maschinenraum	Leica Inf.		
			I	99.98	0.02	0.00				
			II	12.77	87.23	0.00				
		III	64.19	35.81	0.00					
13.2.2018	Tvøroyri	Tórshavn		fixed	unfixed	no data	Maschinenraum	Leica Inf.		
			I	53.21	45.56	1.23				
			II	83.79	14.95	1.26				
		III	91.77	6.98	1.25					
13.2.2018	Tórshavn Tvøroyri	Tvøroyri Tórshavn		fixed	unfixed	no data	Bug	Leica Inf.		
			I	30.56	69.42	0.02				
			II	34.10	65.86	0.04				
		III	55.18	44.82	0.00					
14.2.2018	Tórshavn	Tvøroyri		fixed	unfixed	no data	Maschinenraum	Leica Inf.		
			I	66.23	33.77	0.00				
			II	57.44	42.56	0.00				
					III	64.86	35.14	0.00		
						fixed	unfixed	no data	Maschinenraum	RTK lib
			I	80.72	19.28	0.00				
II	82.27	17.73	0.00							
		III	81.40	18.60	0.00					

Es zeigen sich eindeutige Unterschiede in der Verfügbarkeit von phasenfixierten Positionslösungen der einzelnen GPS Antennen. Des Weiteren können, im Hinblick auf die einzelnen Messfahrten, markante Unterschiede in der Verfügbarkeit festgemacht werden. Hinsichtlich der unterschiedlichen Auswertungsprogramme zeigen die Verfügbarkeiten der Überfahrt vom 14.2.2018 deutliche Abweichungen. Es zeigt sich, dass RTKlib um ca. 20% mehr phasenfixierte Lösungen generiert, als dies bei Leica Infinity der Fall ist. Auf mögliche Ursachen wird in diesem Kapitel näher eingegangen.

Als Beispiel der gemessenen Daten werden in Abbildung 7.4 die Höhenvariationen der GPS Sensoren des 14.2.2018, welche mittels RTKlib berechnet wurden, dargestellt. Diese Variationen in der Höhe sind auf die Wellen, die das Schiff während der Überfahrt in Bewegung versetzten, zurückzuführen.

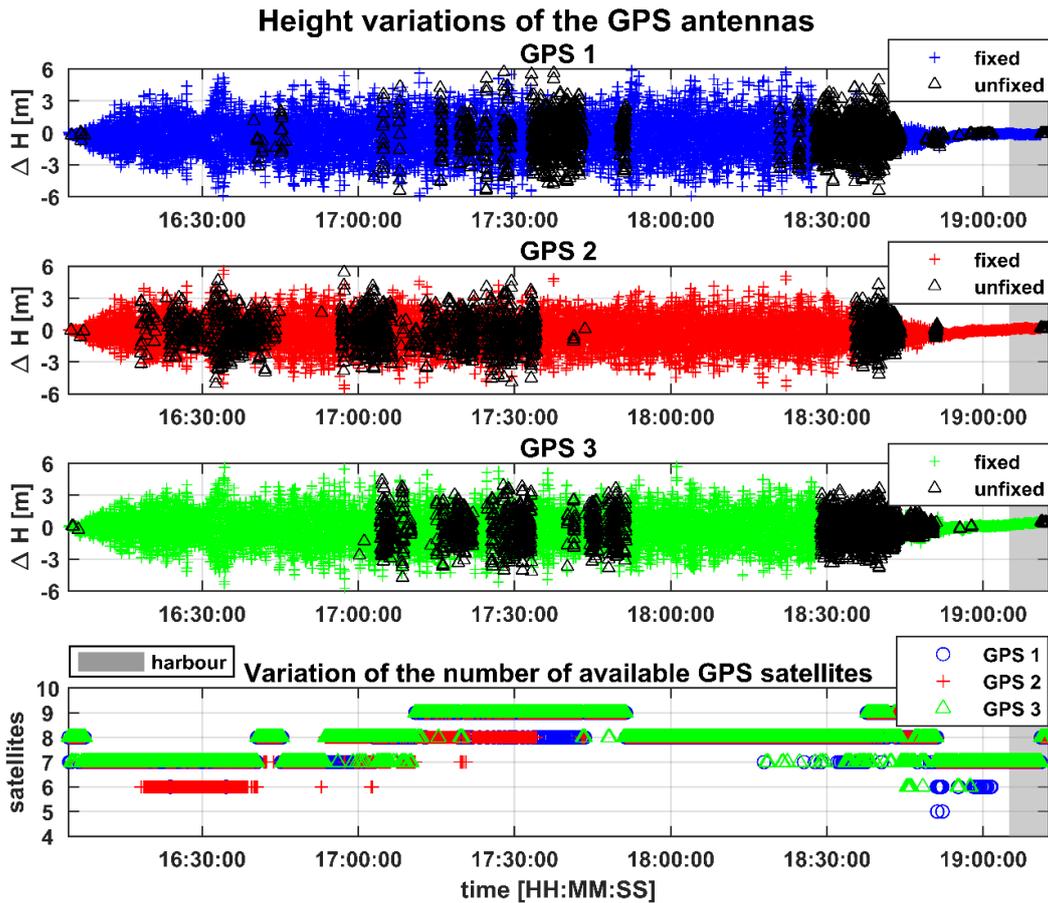


Abb. 7.4: Höhenvariationen der GPS Antennen, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri, Ergebnisse Berechnung mit RTKlib (University of Nottingham)

Neben den zeitlichen Verläufen der Höhenvariationen mit zugehöriger Lösung zeigt Abbildung 7.4 auch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Satelliten. Phasenfixierte Lösungen weisen im Normalfall eine Messpräzision im cm-Bereich auf, abhängig von der Länge der Basislinie (vgl. Tabelle 4, Kap. 4.2). Die Messpräzision nimmt hingegen bei nicht fixierter Lösung drastisch ab. Dies ist meist auf eine schlechte Satellitenkonstellation oder ein schlechtes Signal-Rauschverhältnis zurückzuführen. Daher wurde beschlossen, weitere Auswertungen nur in den Bereichen durchzuführen, in denen phasenfixierte Lösungen zur Verfügung stehen. Aber auch hierbei mussten die berechneten Positionslösungen zuvor genau analysiert werden, weil durch das Auftreten von Cycle Slips, welche einen Sprung in den phasenfixierten Positionslösungen verursachen, große Abweichungen in den Höhenwerten auftreten und diese daher nicht für weiterführende Analysen herangezogen werden können (Abbildung 7.5).

Height variations of the GPS antennas

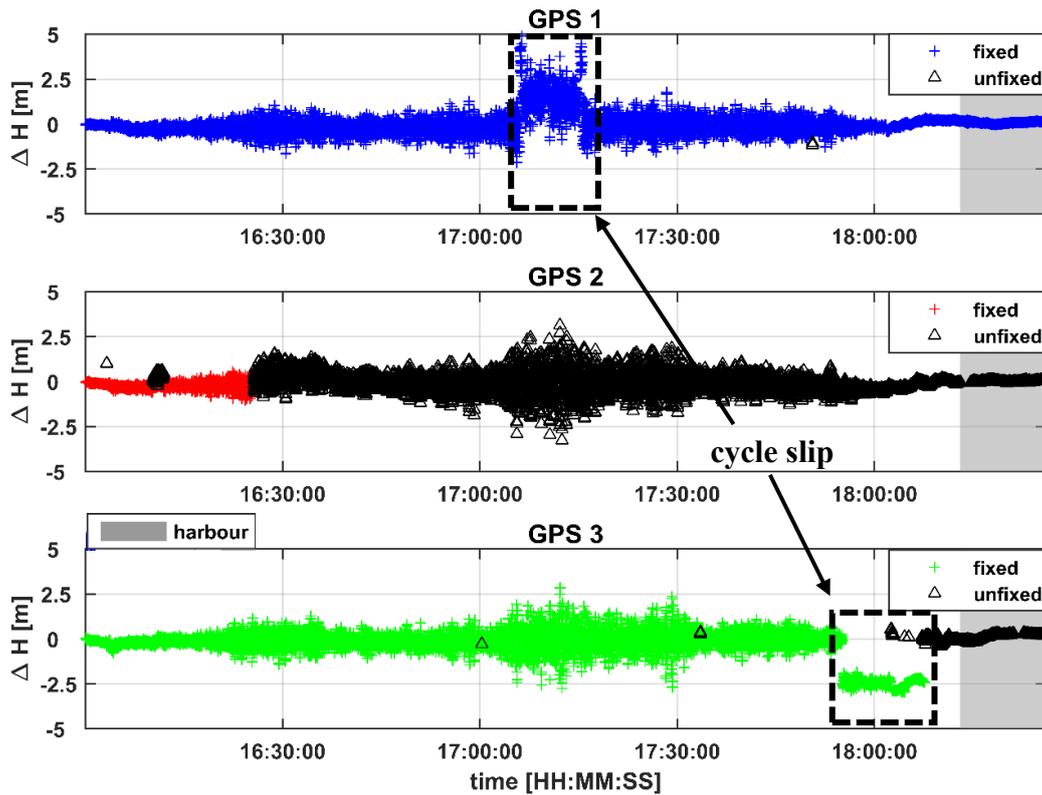


Abb. 7.5: Höhenvariationen der GPS Antennen, 12.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri, Berechnung mit Leica Infinity (TU Graz), mit cycle slip

Abbildung 7.5 zeigt die mit Leica Infinity ausgewerteten Höhenvariationen vom 12.2.2018 für die Überfahrt von Tórshavn – Tvøroyri. Deutlich sind hier die cycle slips in den Zeitreihen von GPS 1 und GPS 3 festzustellen. Bezogen auf GPS 2 zeigt sich, dass die phasenfixierte Lösung schon zu Beginn der Zeitreihe verloren und nicht wiedergefunden wurde.

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss von langen Basislinien b_i auf die Qualität der Positionslösung analysiert. Hierzu wurden die räumlichen Distanzen d_i , analog zu Formel 7.19, zwischen den GPS Antennen am Schiff berechnet. Auftretende Variationen in den Distanzen Δd_i deuten auf einen Verlust von fixierten Positionslösungen oder auf einen Einfluss der langen Basislinie hin (Abbildung 7.6).

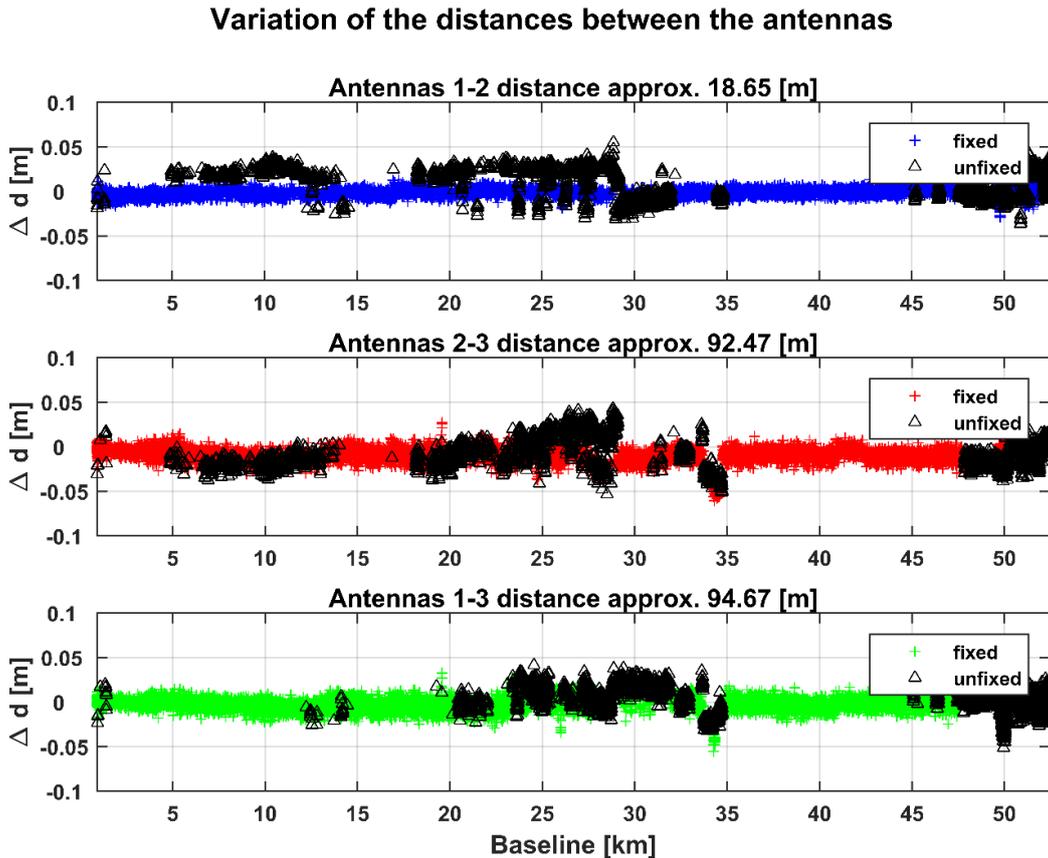


Abb. 7.6: Variation in der Distanz zwischen den Antennen vs. Qualität und Basislinienlänge, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri, Ergebnisse Berechnung mit RTKlib (University of Nottingham)

Abbildung 7.6 zeigt keine massiven Distanzvariationen. Dies ist auf das Auswertungsprogramm RTKlib zurückzuführen. Bei phasenfixierten Lösungen sind die ganzzahligen Wellenlängen zwischen den Satelliten und dem Empfänger, welche auch als Ambiguitäten bezeichnet werden, bekannt. Können die Ambiguitäten jedoch nicht gelöst werden, berechnet RTKlib eine Float-Lösung, welche eine dezimale Wellenlängenanzahl zulässt, solange die Ambiguitäten nicht eindeutig bestimmt werden können. Im Vergleich zu den Lösungen von Leica Infinity, welche in den nichtfixierten Bereichen auf reine Codelösungen (Abbildung 7.7) zurückgreift, zeigen sich deutliche Performanceunterschiede zwischen den beiden Auswertungsprogrammen. Betrachtet man die Distanzvariationen mit zunehmender Basislinienlänge, ist eine deutliche Abhängigkeit ab einer Basislinie von ca. 15 km in den Positionslösungen, welche mit Leica Infinity berechnet wurden, ersichtlich (Abbildung 7.7). Dieser Einfluss ist in den Positionslösungen, die mit RTKlib berechnet wurden, nicht zu detektieren (Abbildung 7.6). Dies ist auf eine Änderung der Prozessierungsstrategie bei Leica Infinity ab einer Basislinienlänge von 15 km zurückzuführen.

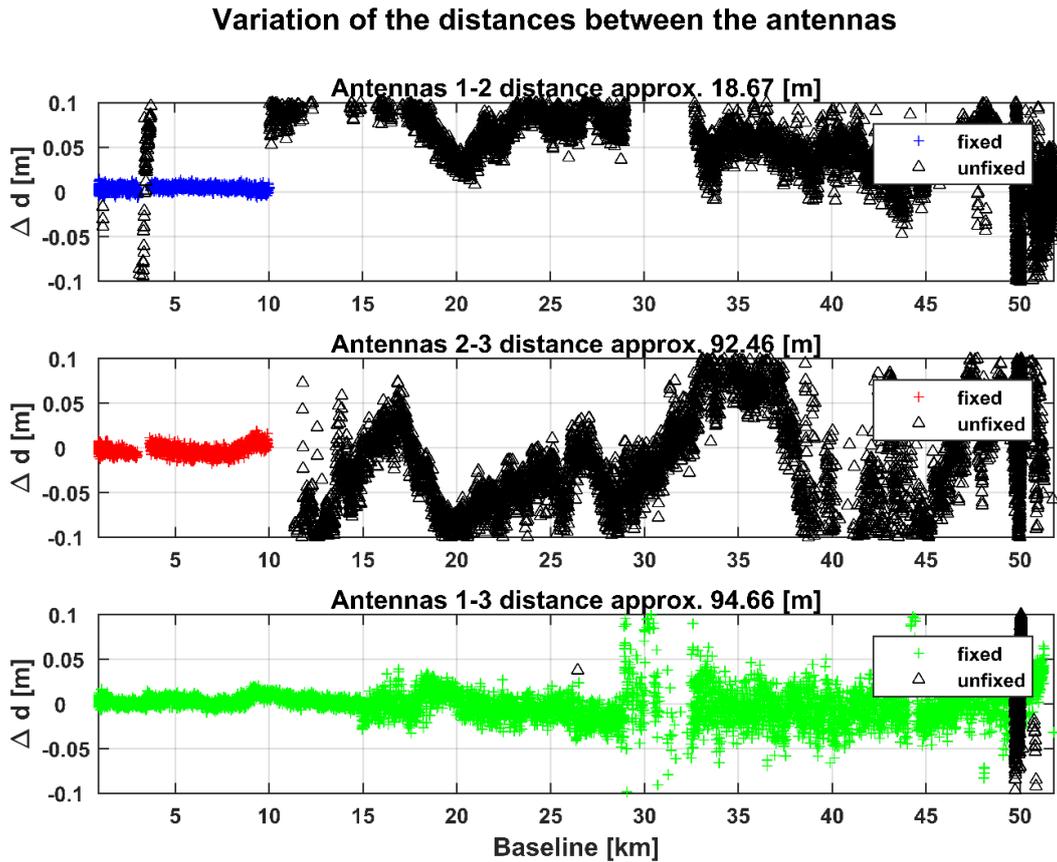


Abb. 7.7: Variation in der Distanz zwischen den Antennen vs. Qualität und Basislinienlänge, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri, Berechnung mit Leica Infinity (TU Graz)

Resümee der Qualitätsanalyse von GPS

Wegen der höheren Verfügbarkeit von phasenfixierten GPS Lösungen und der Verwendung von Float-Lösungen im Fall, dass keine fixierten Lösungen möglich sind, werden für die Verschneidung der GPS Daten mit den FBG Daten des Maschinenraums ausschließlich die mit RTKlib berechneten Positionslösungen herangezogen. Das heißt, dass für weiterführende Analysen die mit Leica Infinity berechneten Positionslösungen, mit Ausnahme der Messung der FBG Sensoren im Bug, vernachlässigt werden.

7.2.3 Trajektorie des Fährschiffs

Aus den Koordinaten der GPS Antennen, die während der Überfahrt aufgezeichnet wurden, konnte die Trajektorie des Fährschiffs bestimmt werden (Abbildung 7.8).

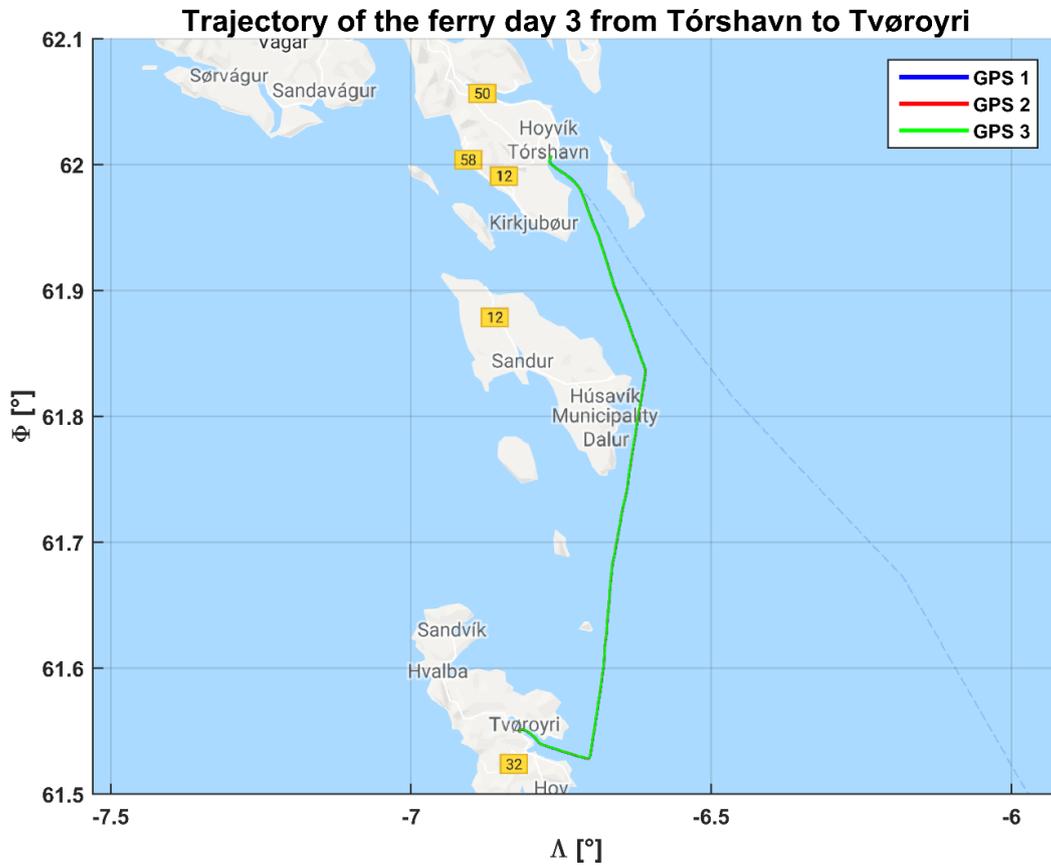


Abb. 7.8: Trajektorie des Fährschiffs mit Google Maps Hintergrund

8 Einzelauswertung der Sensoren

In diesem Kapitel werden die Sensoren (FBG und GPS) einzeln ausgewertet. Ziel ist die Bestimmung von signifikant auftretenden Frequenzen beider Sensorsysteme.

8.1 FBG

Am Beginn der Einzelauswertung der FBG Sensoren wurden die Zeitreihen der FBG Sensoren analysiert. Hierbei wurden, wie in Kapitel 7.1.1 erläutert, aus den gemessenen Wellenlängenvariationen $\Delta\lambda$ die Strainvariationen $\Delta\varepsilon$ der einzelnen FBG Sensoren berechnet. Temperaturkompensierte Strainvariationen konnten jedoch nur für die Sensoren des Maschinenraums bestimmt werden, da im Bug kein Temperatursensor zur Verfügung stand.

Zeitreihen FBG Sensoren Maschinenraum

Wie bereits erwähnt ist im Maschinenraum aufgrund des zusätzlichen Temperatur FBG eine Temperaturkompensation möglich. Alle weiteren Analysen der Strain FBG des Maschinenraums wurden mit bereits temperaturkompensierten Daten durchgeführt. Die aufgezeichneten Zeitreihen im Maschinenraum wurden in horizontale (Abbildung 8.1), vertikale (Abbildung 8.2) und Strain Rosetten Sensoren (Abbildung 8.3) unterteilt. Als Konsequenz der Qualitätsanalyse der GPS Daten wurden für die Auswertung der FBG Sensoren im Maschinenraum ausschließlich die Messdaten des 14.2.2018 analysiert.

Time signal FBG horizontal engine compartment

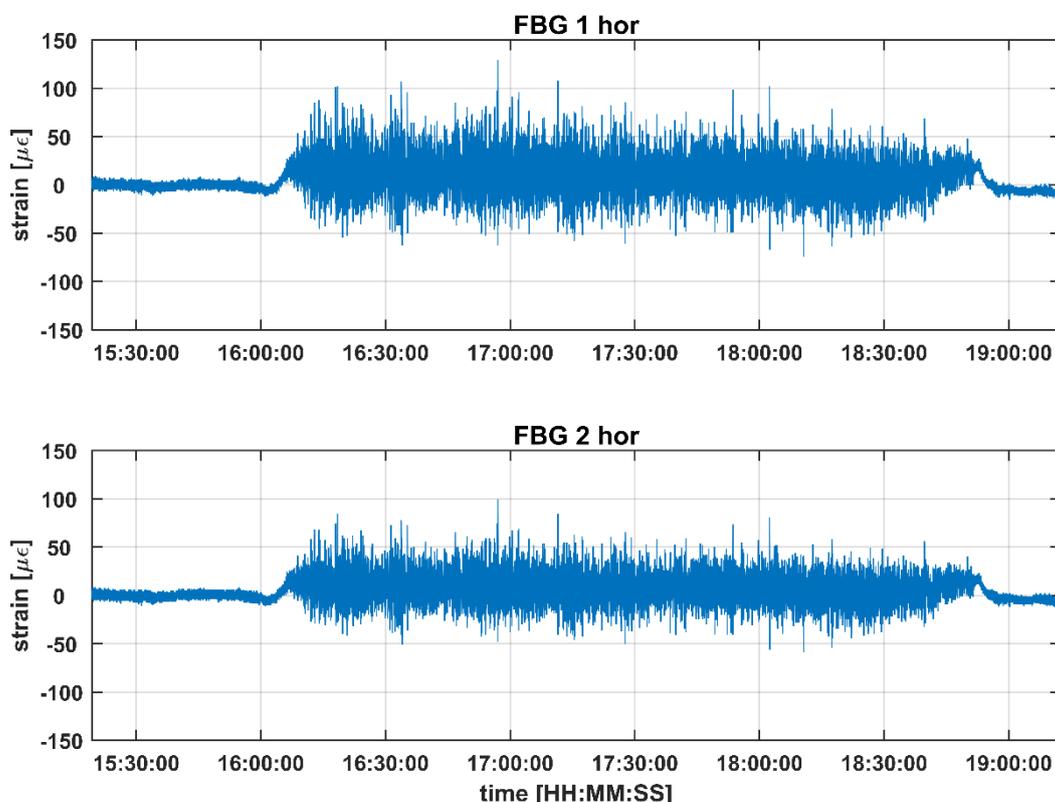


Abb. 8.1: Zeitreihe der horizontalen FBG Sensoren im Maschinenraum, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Aus Abbildung 8.1 sind die Zeitreihen der beiden horizontal im Maschinenraum des Fährschiffs eingebauten FBG Sensoren zu entnehmen. Der zeitliche Verlauf der beiden FBG Sensoren zeigt ein annähernd identenes Verhalten, wobei größere Dehnungsvariationen bei FBG 1 hor detektiert werden konnten. Auch der Vergleich mit dem FBG 1 SR Sensor zeigte eine deutliche Übereinstimmung der Zeitreihen, weil dieser auch horizontal angebracht wurde (Abbildung 8.2).

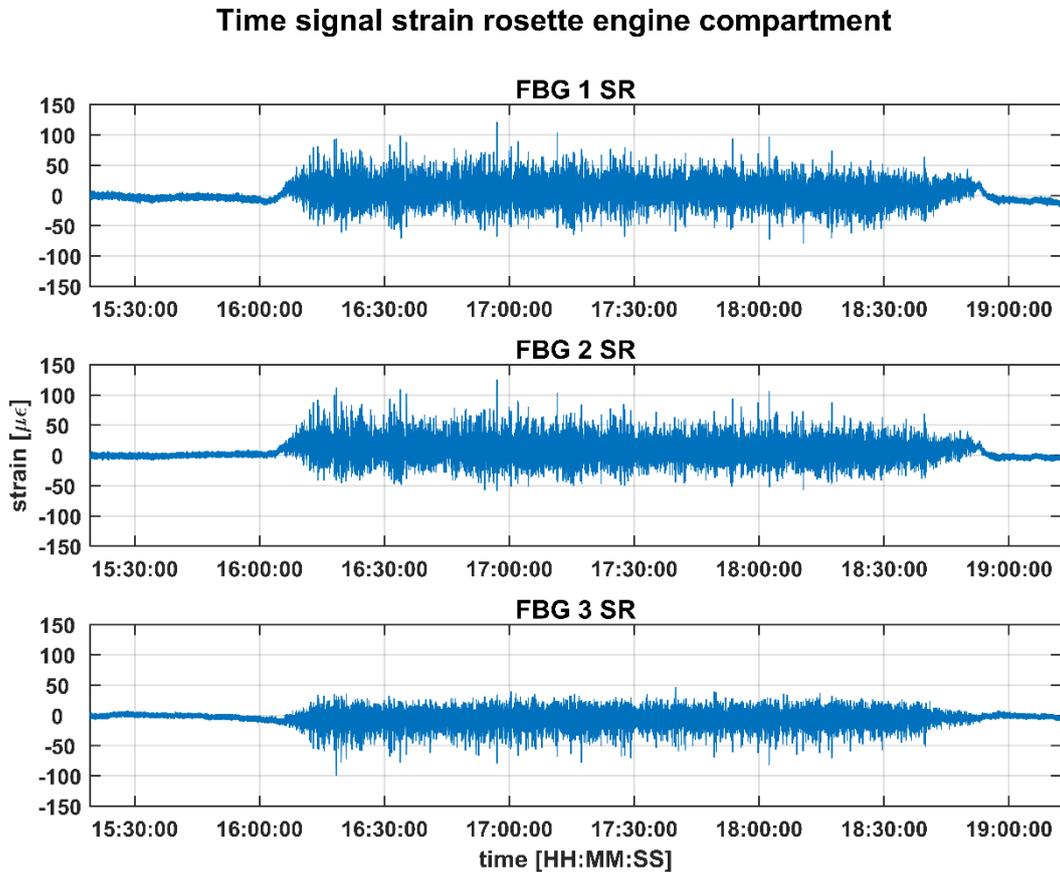


Abb. 8.2: Zeitreihe der FBG Sensoren der Strain Rosette im Maschinenraum, 14.2.2018
Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Bezogen auf Abbildung 8.2 würde man ein ähnliches Verhalten der zwei diagonal um 60° bzw. 120° verdreht angeordneten Sensoren FBG 2 SR und FBG 3 SR erwarten. Dies lässt sich anhand der Zeitreihe der beiden Sensoren jedoch nicht bestätigen. Vergleicht man die beiden Zeitreihen miteinander, wird das umgedrehte Vorzeichen der Dehnungsänderungen deutlich ersichtlich. Des Weiteren weist der Sensor FBG 3 SR kleinere Dehnungsänderungen als FBG 2 SR auf.

Abbildung 8.3 zeigt den zeitlichen Verlauf der vertikalen FBG Sensoren. Aufgrund der besseren Darstellung wurden hierbei nur die Zeitreihen der ersten sechs von zehn vorhandenen Sensoren dargestellt.

Time signal FBG 1 - 6 vertical engine compartment

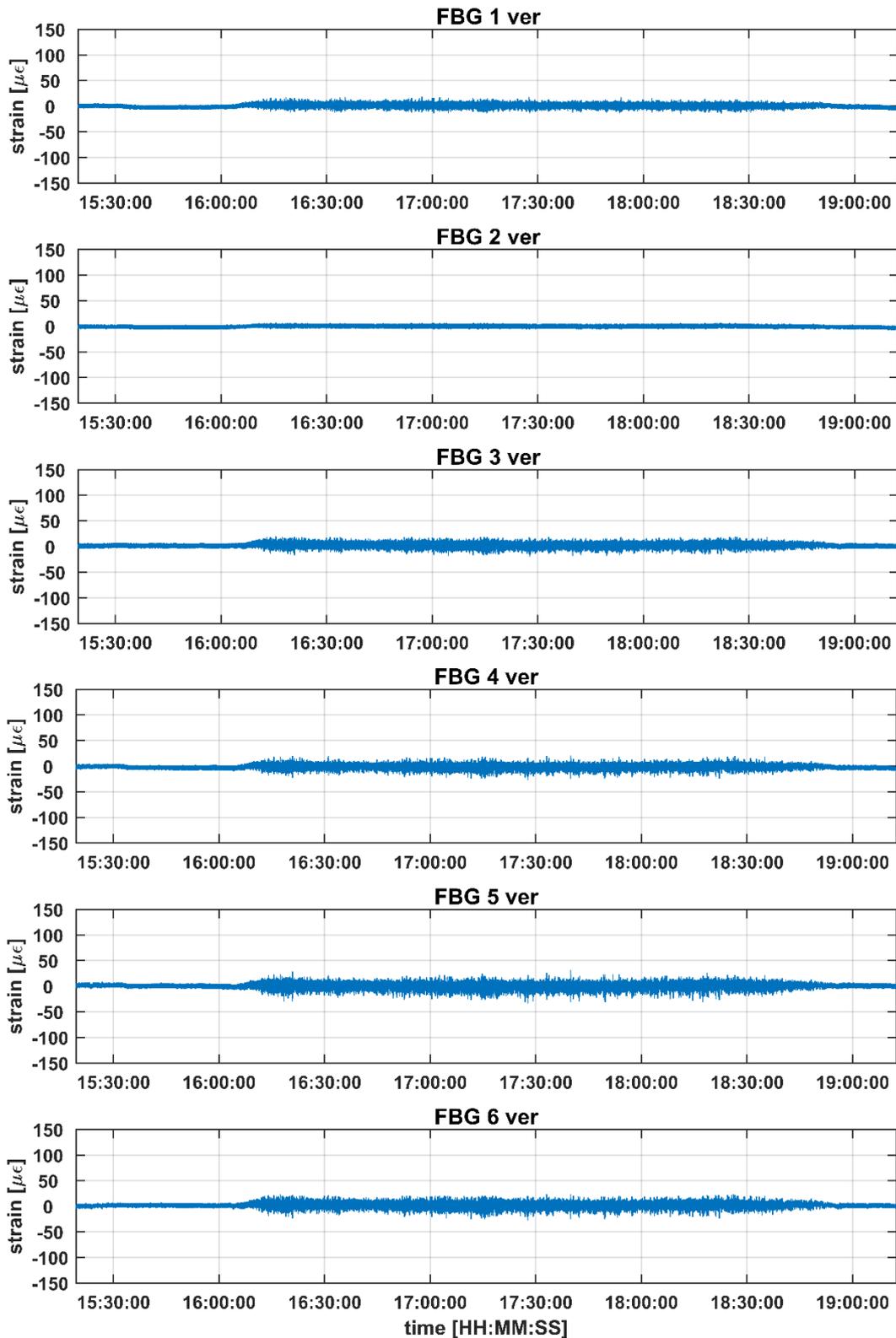


Abb. 8.3: Zeitreihe der vertikalen FBG Sensoren 1 - 6 im Maschinenraum, 14.2.2018
Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Aufgrund der Anordnung der vertikalen Sensoren quer entlang des gewählten Schiffshüllsegments (Abbildung 6.3), welches sich zwischen zwei Stahlträgern des Schiffskeletts befindet, sind Unterschiede in den Zeitreihen der vertikalen Sensoren ersichtlich. Hierbei zeigen sich erhöhte Variationen bei jenen Sensoren, welche sich in der Mitte des Schiffshüllsegments befinden. Dies ist auf die höhere Deformation in diesem Bereich zurückzuführen (Überprüfung Kap. 8.1.6). An den Rändern des Segments nehmen die Variationen deutlich ab.

Vergleicht man die Zeitreihen der horizontalen mit jenen der vertikalen Sensoren, ist eine deutlich höhere Strainvariation in den Zeitreihen der horizontalen Sensoren ersichtlich.

Zeitreihen FBG Sensoren Bug

Die Messung der FBG Sensoren im Bug wurde am 13.02.2018 durchgeführt. Dabei wurden sowohl FBG als auch GPS Daten für die Fahrt von Tórshavn nach Tvøroyri und retour aufgezeichnet. Aufgrund der schlechten GPS Daten auf der Rückfahrt wurde nur die Hinfahrt analysiert. Die Zeitreihen der zwei frei gespannten FBG Sensoren im Bug des Fährschiffs für die Überfahrt von Tórshavn nach Tvøroyri sind Abbildung 8.4 zu entnehmen.

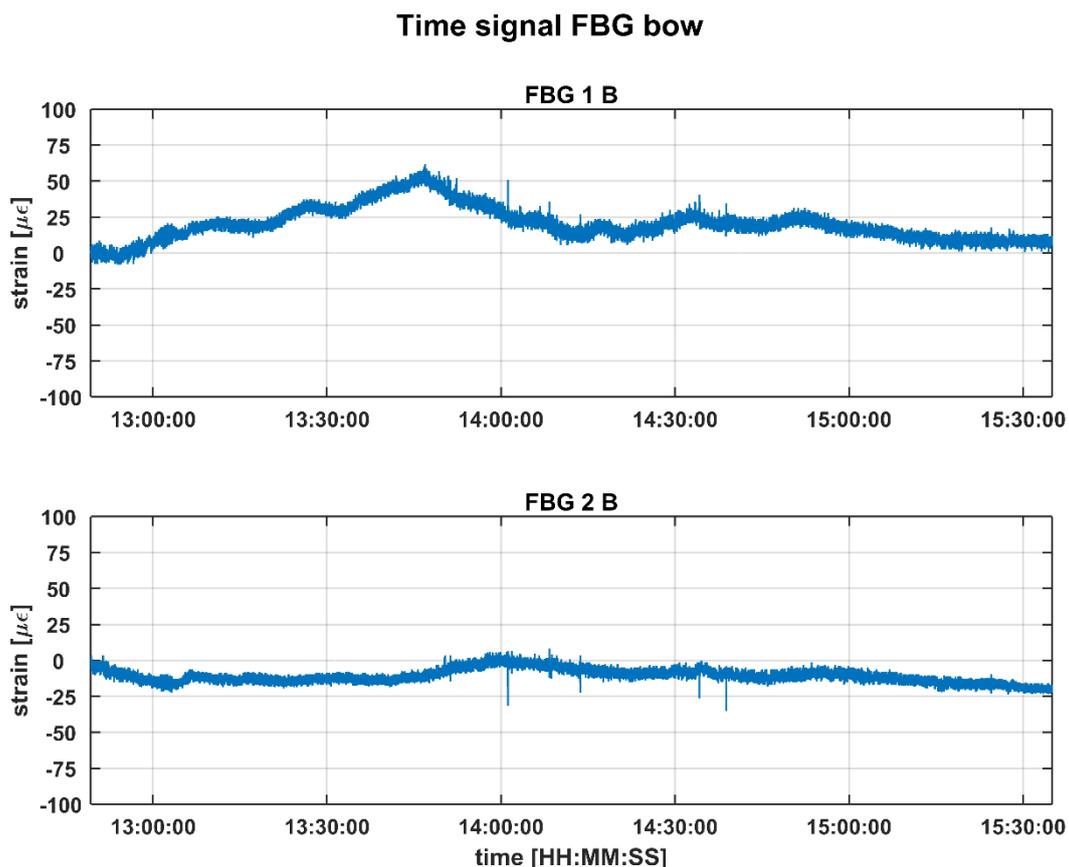


Abb. 8.4: Zeitreihe der FBG Sensoren 1 und 2 im Bug, 13.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Bezogen auf Abbildung 8.4 lässt sich kein ähnliches Verhalten der beiden Zeitreihen erkennen. Lediglich die Peaks treten bei beiden Sensoren zu denselben Zeitpunkten, jedoch mit

umgekehrten Vorzeichen, auf. Da für die Sensoren des Bugs keine Temperaturkompensation durchgeführt werden konnte, ist der grundlegende Verlauf der Zeitreihe wohl auf Temperatureinflüsse zurückzuführen. Im Vergleich zu den Sensoren des Maschinenraums konnte bei den Sensoren im Bug keine Zu- oder Abnahme der Dehnungsvariation festgestellt werden.

Die Bestimmung der Eigenfrequenzen und der Amplituden der FBG Sensoren erfolgte mittels Frequenzanalyse, welche anhand der Fast Fourier Transformation durchgeführt wurde und im nachfolgenden Kapitel vorgestellt wird.

8.1.1 Fast Fourier Transformation

Das wohl bedeutendste Werkzeug der Signalverarbeitung ist die Fast Fourier Transformation (FFT). Sie beruht auf dem Grundprinzip von Joseph Fourier und besagt, dass sich jede periodische Funktion als eine Summe von harmonischen Funktionen darstellen lässt (Fourieranalyse). Umgekehrt (Fouriersynthese) lässt sich durch Überlagerung von harmonischen Schwingungen mit geeigneten Amplituden und Phasen jede gewünschte periodische Funktion eindeutig generieren (vgl. Maier, S. 2). Basierend darauf können durch Anwendung der FFT zeitdiskrete endliche Signale (z.B. gemessene Zeitreihen) in periodischer Abfolge vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert werden. Bei der FFT handelt es sich um eine Sonderform der Diskreten Fourier Transformation DFT (vgl. Maier, S. 7). Durch die Transformation wird das Signal des Zeitbereichs im Frequenzbereich in seine Spektralanteile zerlegt (vgl. Werner 2012, S. 30-31).

- Übergang von Zeitbereich in Frequenzbereich:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot w_N^{k \cdot n} \quad \text{mit } k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (8.1)$$

und

$$w_N = e^{-i \frac{2\pi}{N}} \quad \text{twiddle factor} \quad (8.2)$$

$X[k]$ bezeichnet hierbei die DFT Koeffizientenfolge der diskreten Fourier Transformation (DFT) einer Folge $x[n]$ mit der Länge N . Der Parameter i bezeichnet die imaginäre Einheit. Er ist definiert durch $i = \sqrt{-1}$.

Die bestimmten Fourierkoeffizienten $X[k]$ bestehen aus Real- und Imaginärteilen. Der Realteil beschreibt die Amplitude des Kosinusanteils und der Imaginärteil jene des Sinusanteils. Aus Real- und Imaginärteil lassen sich unter Zuhilfenahme der Formeln (8.3 – 8.4) die Amplitude $A[k]$ und Phase $\varphi[k]$ berechnen (vgl. Fischer 2009, S. 96 - 98).

$$A[k] = \sqrt{\text{Re}[k]^2 + \text{Im}[k]^2} \quad (8.3)$$

$$\varphi[k] = \arctan\left(\frac{\text{Im}[k]}{\text{Re}[k]}\right) \quad (8.4)$$

Dadurch wird es möglich, die Amplituden und Phasen den zugehörigen Frequenzen zuzuweisen. Somit können, z.B. im Amplitudenspektrum, die maßgeblichen Frequenzen und Amplituden detektiert werden, welche am Signal des Zeitbereichs beteiligt sind (Abbildung 8.5). Beim Übergang vom Zeit- in den Frequenzbereich geht dabei keine Information verloren. Des Weiteren ist es möglich, eine Transformation vom Frequenzbereich zurück in den Zeitbereich durchzuführen, wie die Formeln 8.5 – 8.6 (vgl. Werner 2012, S. 31) zeigen.

- Übergang vom Frequenzbereich in den Zeitbereich:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot w_N^{-k \cdot n} \quad (8.5)$$

Formel 8.3 zeigt die inverse DFT (IDFT), welche wieder die ursprüngliche Folge erzeugt. Meist wird diese als eine Überlagerung gewichteter Sinus- und Kosinusfolgen angegeben (Formel 8.4).

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot k \cdot n\right) + i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot k \cdot n\right) \right] \quad (8.6)$$

Auch bei der IDFT kommt es zu keinem Informationsverlust. Die FFT stellt hierbei eine effiziente Implementierung der DFT dar. Der Algorithmus der FFT zielt auf eine Vermeidung von redundanten Zwischenrechnungen ab, welche aufgrund der Periodizität der Winkelfunktionen entstehen. Dadurch können gegenüber der DFT eine große Anzahl an Rechenoperationen eingespart werden, was sich in einer deutlich geringeren Rechenzeit widerspiegelt (Mayer 1998, S. 153). Jedoch ist jede Form der Fourier Transformation einigen Bedingungen unterworfen, auf welche bei der Anwendung spezielles Augenmerk gelegt werden muss, um adäquate Ergebnisse zu erzielen. Um die Einflüsse dieser Bedingungen anschaulich zeigen zu können, wurde für die Kapitel 8.1.1 – 8.1.4 ein eigens generiertes Signal erzeugt. Abbildung 8.5 zeigt die Anwendung der FFT auf ein kombiniertes Signal aus drei Sinuswellen, welche jeweils eine unterschiedliche Amplitude und Frequenz aufweisen. Hierbei weist die Messfrequenz f_m sowie die Abtastfrequenz f_s denselben Wert auf. Die Abtastfrequenz beträgt hierbei ein Vielfaches der maximalen Frequenz des Signals f_{max} .

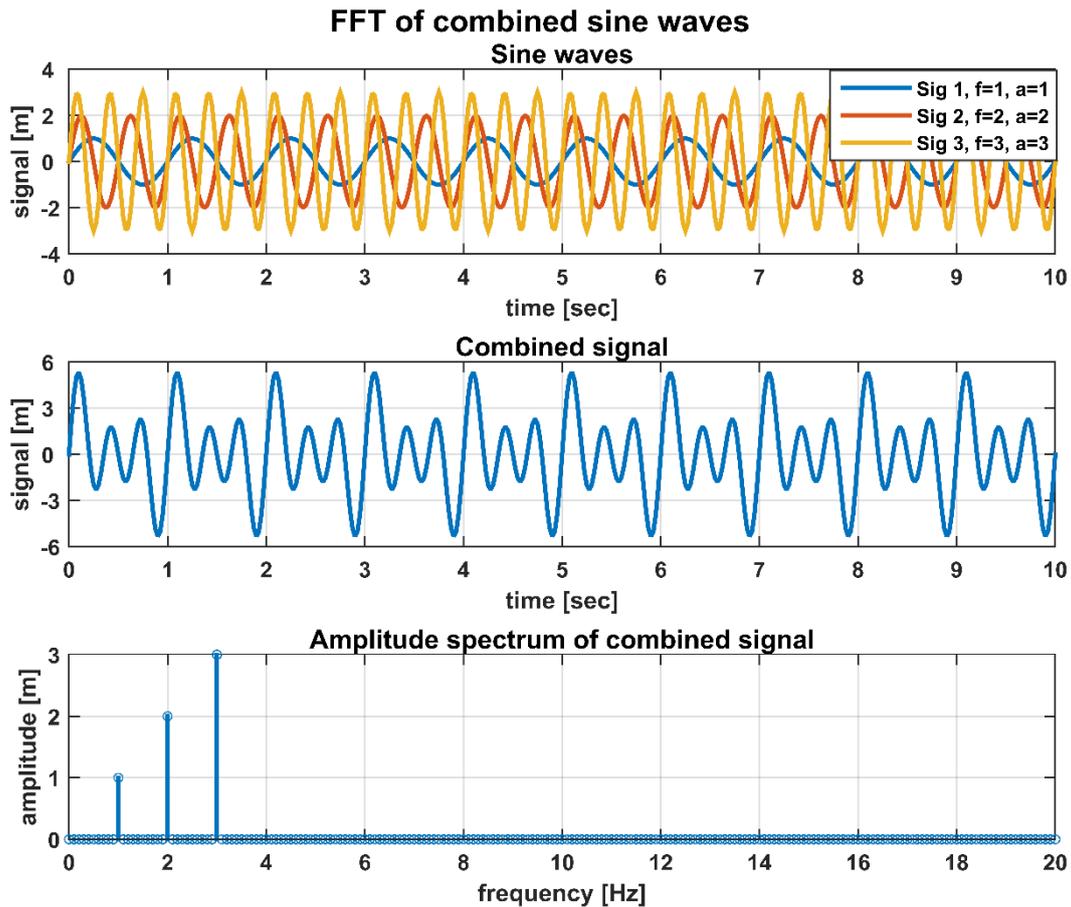


Abb. 8.5: FFT des kombinierten Sinuswellensignals

Das Frequenzspektrum zeigt eine eindeutige Reproduktion der im Signal enthaltenen Frequenzen. Auch die Amplitudenwerte des Frequenzspektrums weisen dieselben Werte auf, die zur Erstellung des kombinierten Signals gewählt wurden.

8.1.2 Abtastung und Aliasing

Durch äquidistante Abtastung eines Signalverlaufs, kann dieser in einer Zeitreihe mit Hilfe von Computern analysiert werden. Dabei ist der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten von der Messfrequenz des Sensors abhängig. Dieser muss dabei so gewählt werden, dass es möglich ist, die höchste im Signal vorkommende Frequenzkomponente analysieren zu können. Den Zusammenhang zwischen der Abtastfrequenz f_s und der Maximalfrequenz des Signals f_{\max} wird durch das Shannon-Nyquist Theorem geregelt.

$$f_s > 2 f_{\max} \quad (8.7)$$

Es definiert, dass die Abtastfrequenz mehr als die doppelte Maximalfrequenz des Signals aufweisen muss, damit in den Abtastwerten des Signals die ursprüngliche Information erhalten bleibt und diese vollständig rekonstruiert werden kann (vgl. Hesselmann 1987, S. 59).

Durch Abtastung des kombinierten Signals mit einer Frequenz f_s , die größer als doppelt so hoch ist als die höchste Frequenz f_{\max} des kombinierten Signals, wird das Shannon-Nyquist Theorem erfüllt. Kommt es jedoch zu einer Verletzung des Theorems durch Unterabtastung des Signals,

tritt der sogenannte Aliasingeffekt auf (vgl. Hesselmann 1987, S. 60). Hierbei kann das zu analysierende Signal nicht adäquat abgetastet werden und es wird ein falsches Signal in der FFT analysiert, was im Amplitudenspektrum zu falschen Amplituden und Frequenzen führt (Abbildung 8.6).

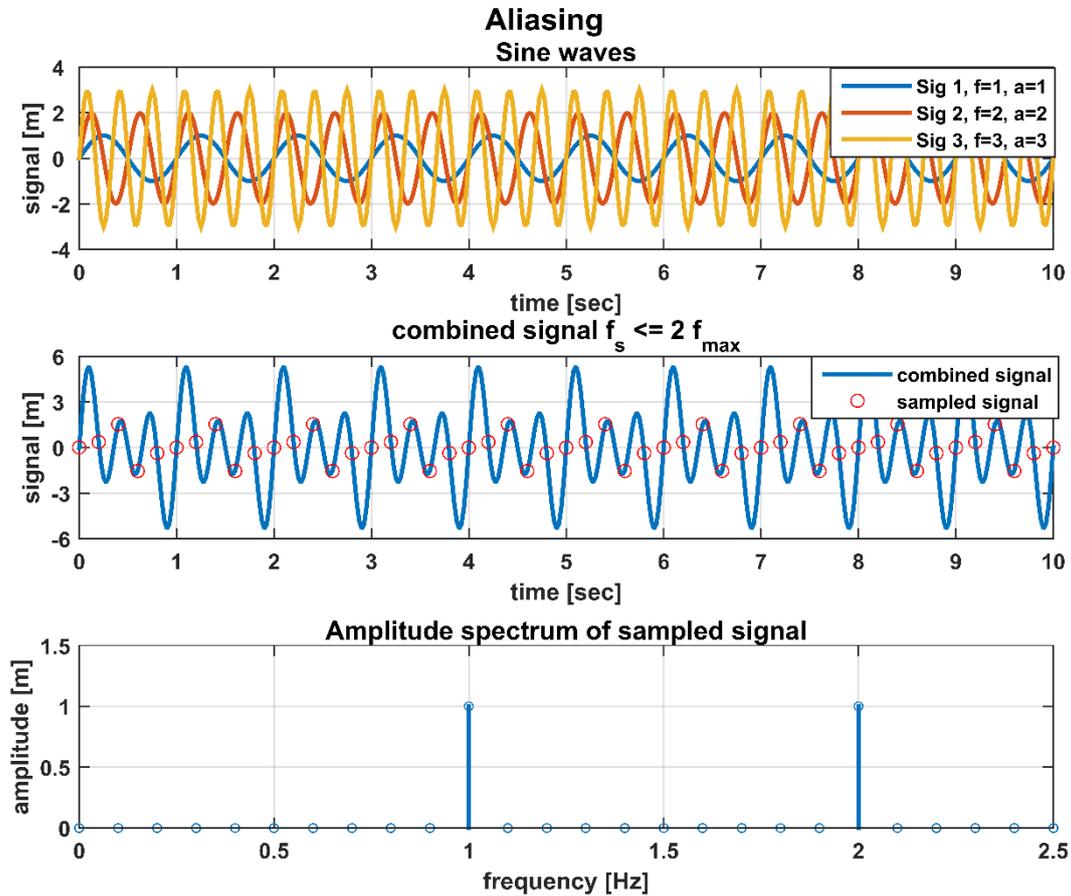


Abb. 8.6: Aliasingeffekt

In Abbildung 8.6 entsteht aufgrund der zu geringen Abtastfrequenz von 5 Hz der Aliasingeffekt, da die höchste Frequenz des kombinierten Signals 3 Hz beträgt. Auf Grundlage des Shannon-Nyquist Theorems müsste die Abtastfrequenz jedoch eine Frequenz von mindestens 7 Hz aufweisen. Die Ergebnisse der Erhöhung der Abtastfrequenz auf 7 Hz sind Abbildung 8.7 zu entnehmen.

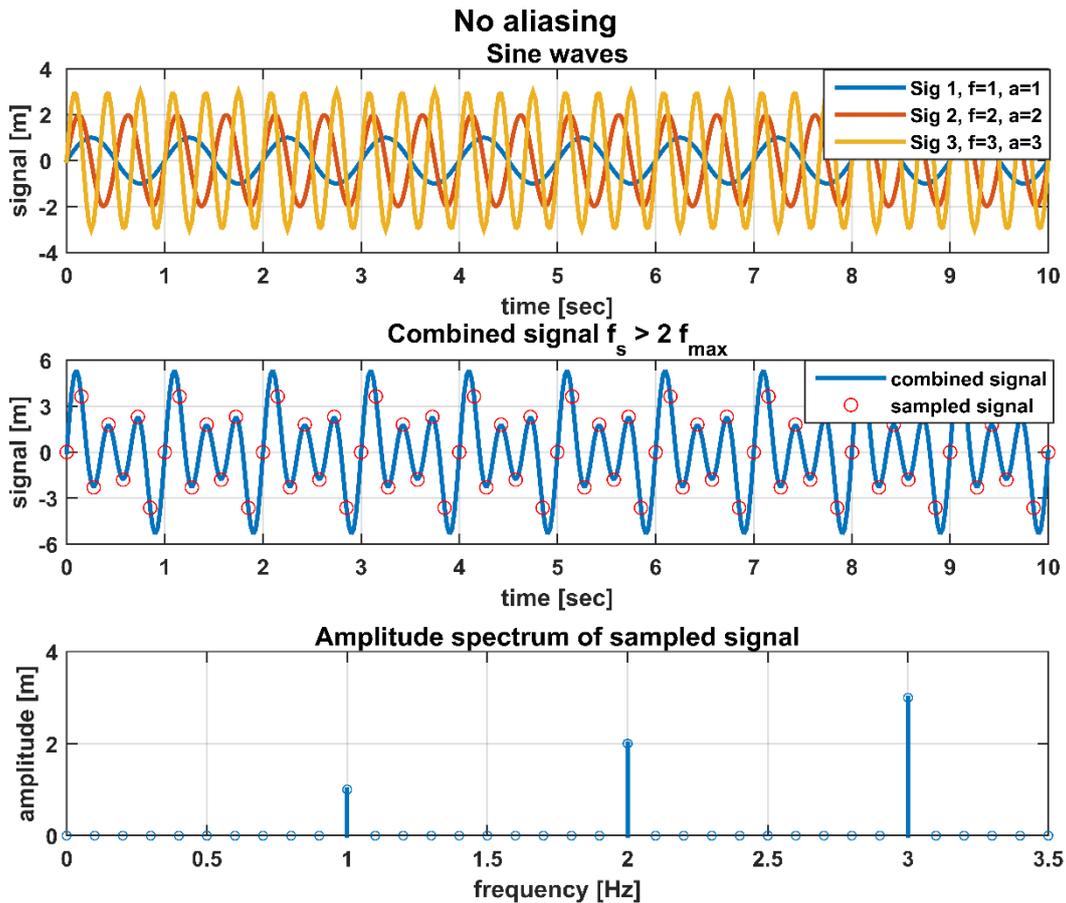


Abb. 8.7: Kein Aliasing aufgrund von $f_s > 2 f_{\max}$

Abbildung 8.7 zeigt anschaulich, dass sich die Amplituden und Frequenzen eindeutig bestimmen lassen und kein Aliasing mehr auftritt.

8.1.3 Leakage Effekt

Die Fast Fourier Transformation setzt eine unendlich lange Zeitreihe voraus, um aus dieser die Spektralanteile des Signals bestimmen zu können. Da es mit Sensoren nicht möglich ist unendlich lang Signale aufzuzeichnen, nimmt die FFT an, dass sich die gemessene endliche Zeitreihe periodisch fortsetzt (vgl. Meyer 1998, S. 163). Abbildung 8.8 zeigt die periodische Fortsetzung eines sinusförmigen Signals.

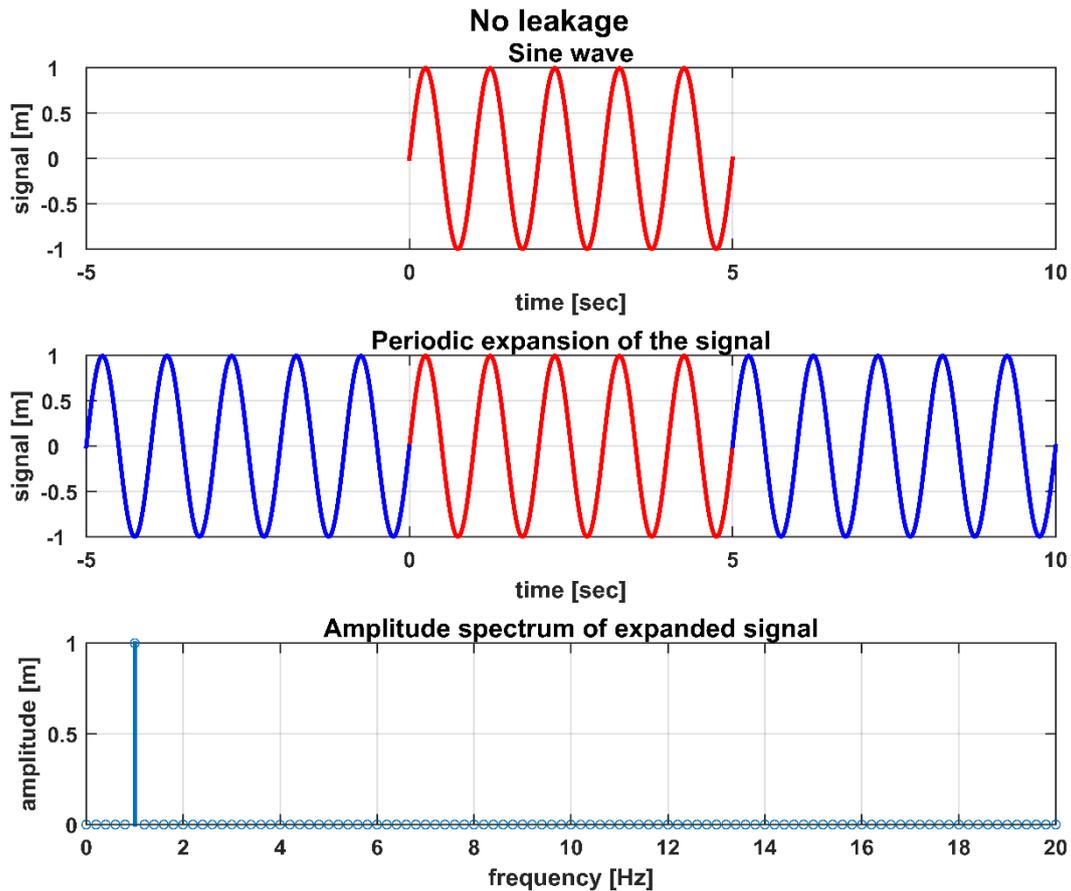


Abb. 8.8: Kein Leakageeffekt

Da Anfangs- und Endpunkt der Sinuswelle genau an einem Nulldurchgang liegen, kommt es bei der periodischen Aneinanderreihung des Signals zu sprunghaften Übergängen. Dies hat eine exakte Bestimmung im Frequenzbereich zur Folge. Kommt es jedoch aufgrund eines Trends oder einer ungünstig gewählten Beobachtungsdauer (nicht ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer) zu Sprungstellen an den Anschlussstellen des Signals, führt dies zu einer Aufspreizung des Frequenzbandes im Frequenzbereich. Dieser Effekt wird als Leakageeffekt bezeichnet und ist in Abbildung 8.9 für ein Signal mit ungünstig gewählter Beobachtungsdauer ersichtlich (vgl. Maier, S. 6).

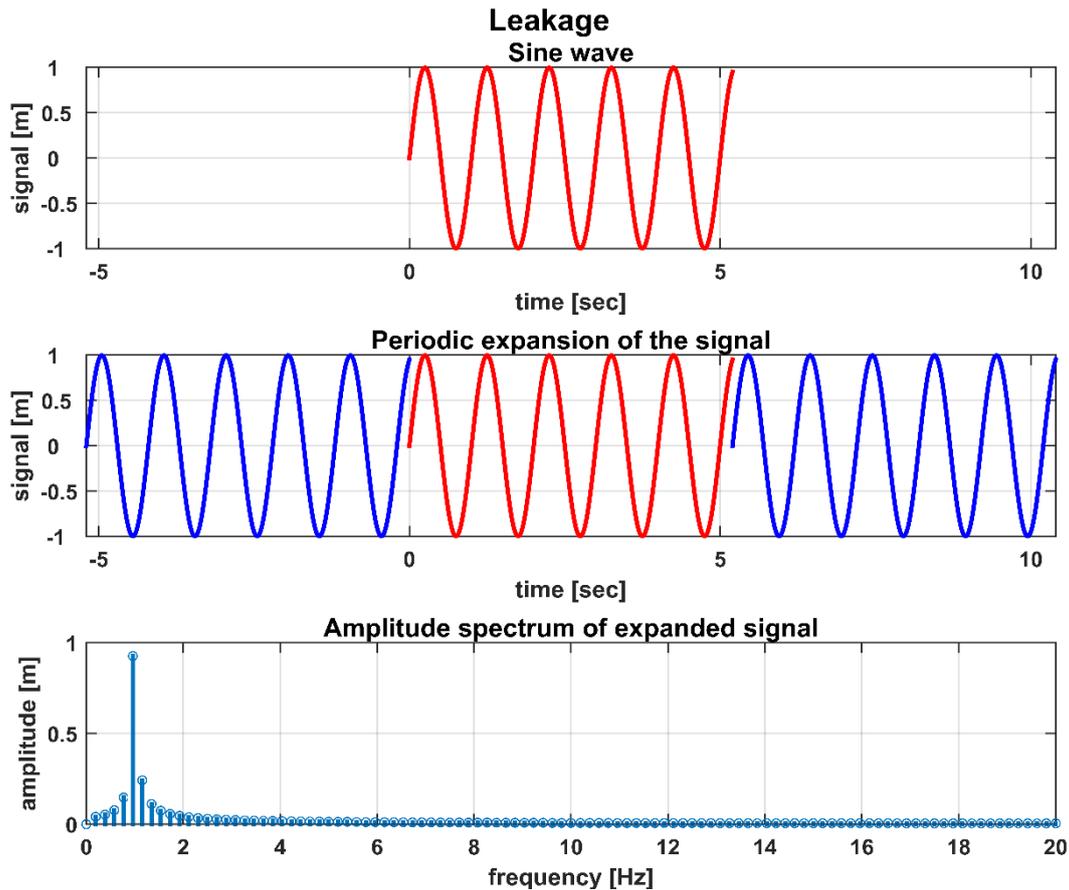


Abb. 8.9: Leakageeffekt aufgrund von ungünstig gewählter Beobachtungsdauer

8.1.4 Gewichtung mit Hann-Fenster

Um den Leakageeffekt zu vermindern, muss eine Möglichkeit gefunden werden, um die Unstetigkeitsstellen zu bereinigen. Dies erfolgt durch Gewichtung des Signals mit einer Fensterfunktion. Dadurch wird das Signal am Anfang und Ende auf 0 gesetzt, wodurch eine unendliche Anordnung ohne Sprungstellen möglich wird. Die Gewichtung ist jedoch nur für Signale, deren Beobachtungsdauer falsch gewählt wurde, effizient (vgl. Meyer 1998, S. 163 – 165). Die resultierenden Unstetigkeitsstellen, aufgrund eines enthaltenen Trends in den Daten, können zwar mit Hilfe der Fensterfunktion eliminiert werden, jedoch führt dies zu einer Verzerrung des Signals. Daher ist eine Trendelimination vor der Gewichtung unerlässlich. Durch die Gewichtung kommt es jedoch zu einer Abschwächung des Signals, was eine Abschwächung der detektierten Amplituden zur Folge hat. Die Abschwächung der Amplitude hängt hierbei vom gewählten Fenster ab. Der Effekt der Gewichtung eines unzureichend zugeschnittenen Signals mit dem Hann-Fenster ist in Abbildung 8.10 dargestellt.

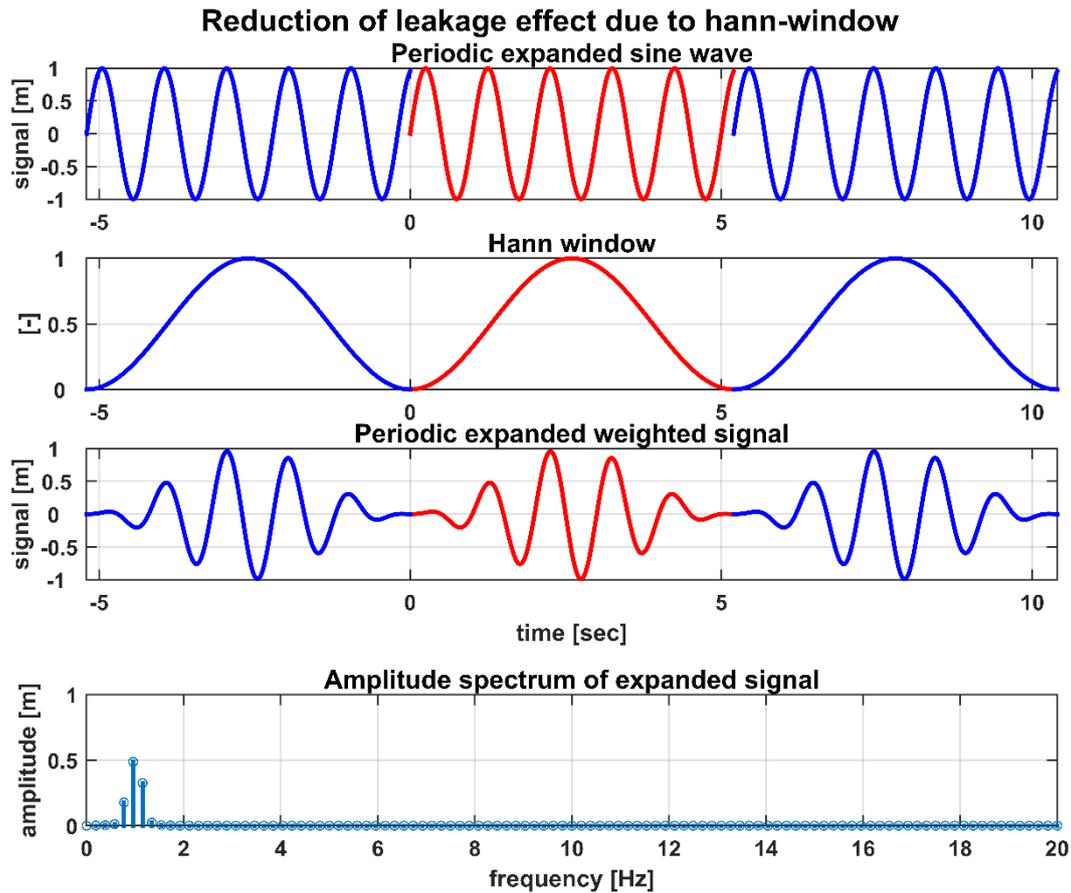


Abb. 8.10: Reduktion des Leakageeffekts aufgrund der Gewichtung des Signals mit dem Hann Fenster

Im Vergleich zu Abbildung 8.9 führt die Gewichtung des Signals in Abbildung 8.10 zu einer deutlichen Abnahme der Aufspreizung des Frequenzbandes (Leakage) im Frequenzbereich. Die Abschwächung der Amplitude im Frequenzspektrum muss hierbei in Kauf genommen werden (vgl. Meyer 1998, S. 165).

8.1.5 Amplitudenspektrum FBG Sensoren

Alle in Kapitel 8.1.2 bis 8.1.4 genannten Effekte wurden bei der Auswertung der FBG Sensoren berücksichtigt. Da die Auswertung der Sensoren jeweils für einen bestimmten Zeitbereich durchgeführt wurde, musste in einem ersten Schritt eine Trendelimination durchgeführt werden, um einen eventuell vorhandenen Trend zu bereinigen. Dadurch kann einem daraus resultierenden Leakageeffekt vorgebeugt werden. Die Abtastung des Signals erfolgte, gleich wie die Aufzeichnung des Signals, mit 1000 Hz. Die mit Hilfe der FFT bestimmbare Maximalfrequenz liegt aufgrund des Shannon-Nyquist Theorems bei 500 Hz. Aufgrund des nicht periodischen Verhaltens der FBG Sensordaten und der Auswertung für einen bestimmten Zeitbereich war eine Gewichtung der Messdaten mit Hilfe einer Fensterfunktion zwingend notwendig. Hierbei wurde das Hann-Fenster zur Gewichtung der Daten herangezogen.

Abbildung 8.11 zeigt das Amplitudenspektrum des horizontalen FBG 1 Sensors im Maschinenraum für eine Beobachtungsdauer von 90 Sekunden. Im gewählten Zeitbereich befindet sich das Fährschiff im Hafen und die Motoren sind abgeschaltet. Das Amplitudenspektrum zeigt geringe niederfrequente Anteile, welche auf den bestehenden Wellengang im Hafen zurückzuführen sind.

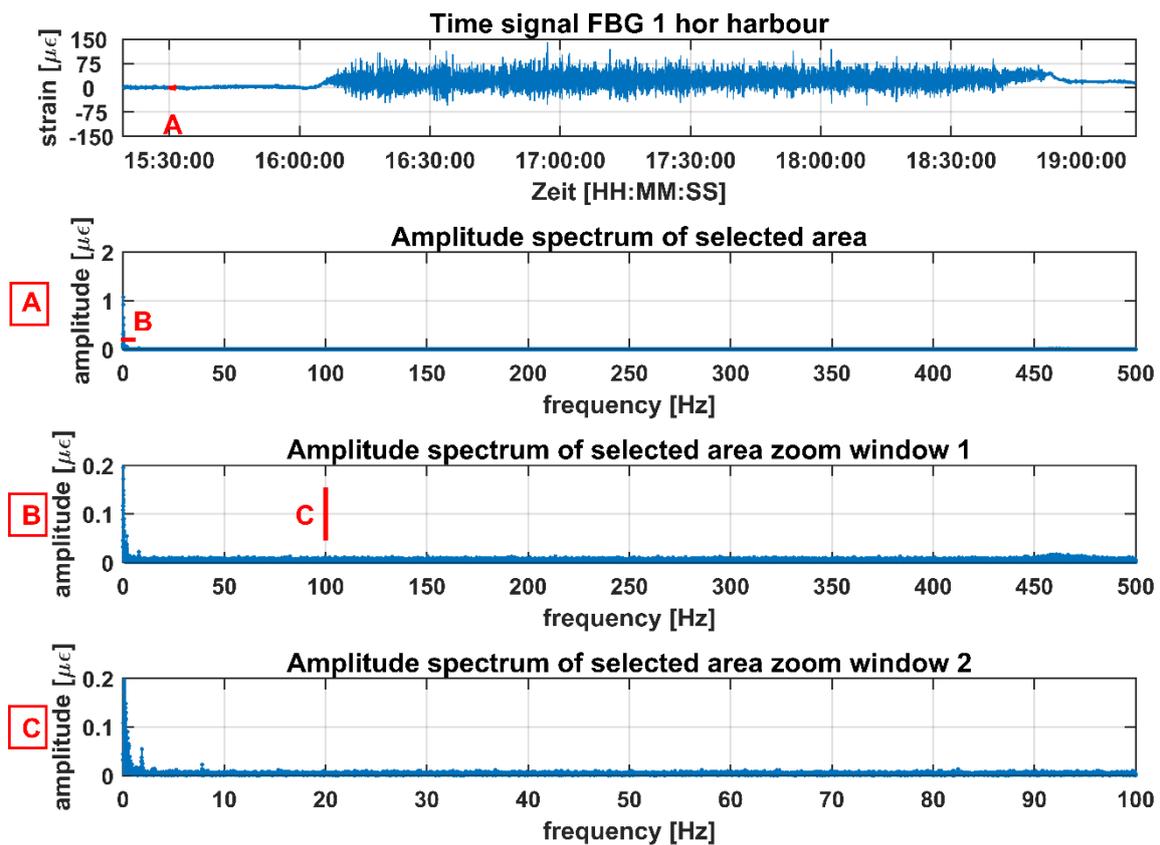


Abb. 8.11: Amplitudenspektrum des horizontalen FBG 1 Sensors (Maschinenraum) im Hafen [Beobachtungsdauer 90 sec], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Für die Abbildungen 8.11, 8.12 und 8.13 wurden aufgrund der besseren Darstellung drei Details [A, B, C] festgelegt. Dabei zeigt Detail A das Amplitudenspektrum, des gewählten Bereichs, des Zeitsignals. In Detail B wird der Anzeigebereich der Amplitude auf 0 – 0.2 $\mu\epsilon$ (Abbildung

8.11 und 8.12) bzw. $0 - 0.4 \mu\epsilon$ (Abbildung 8.13) gesetzt. Dadurch wird es möglich schwächere Amplituden sichtbar zu machen. Detail C zeigt das Amplitudenspektrum für denselben Amplitudenbereich wie Detail B. Jedoch wird der Frequenzbereich in Detail C von $0 - 500$ Hz auf $0 - 100$ Hz verringert, da in diesem Bereich die von den Motoren verursachten Amplituden liegen.

Abbildung 8.12 das Amplitudenspektrum des horizontalen FBG 1 Sensors mit laufenden Motoren. Das Schiff befindet sich zu diesem Zeitpunkt jedoch noch immer im Hafen und hat seine Fahrt noch nicht begonnen. Deutlich sind hier die Frequenzen, welche durch die Motoren und Pumpen an Bord des Fährschiffs verursacht werden, ersichtlich. Diese liegen in einem Frequenzbereich von $10 - 100$ Hz.

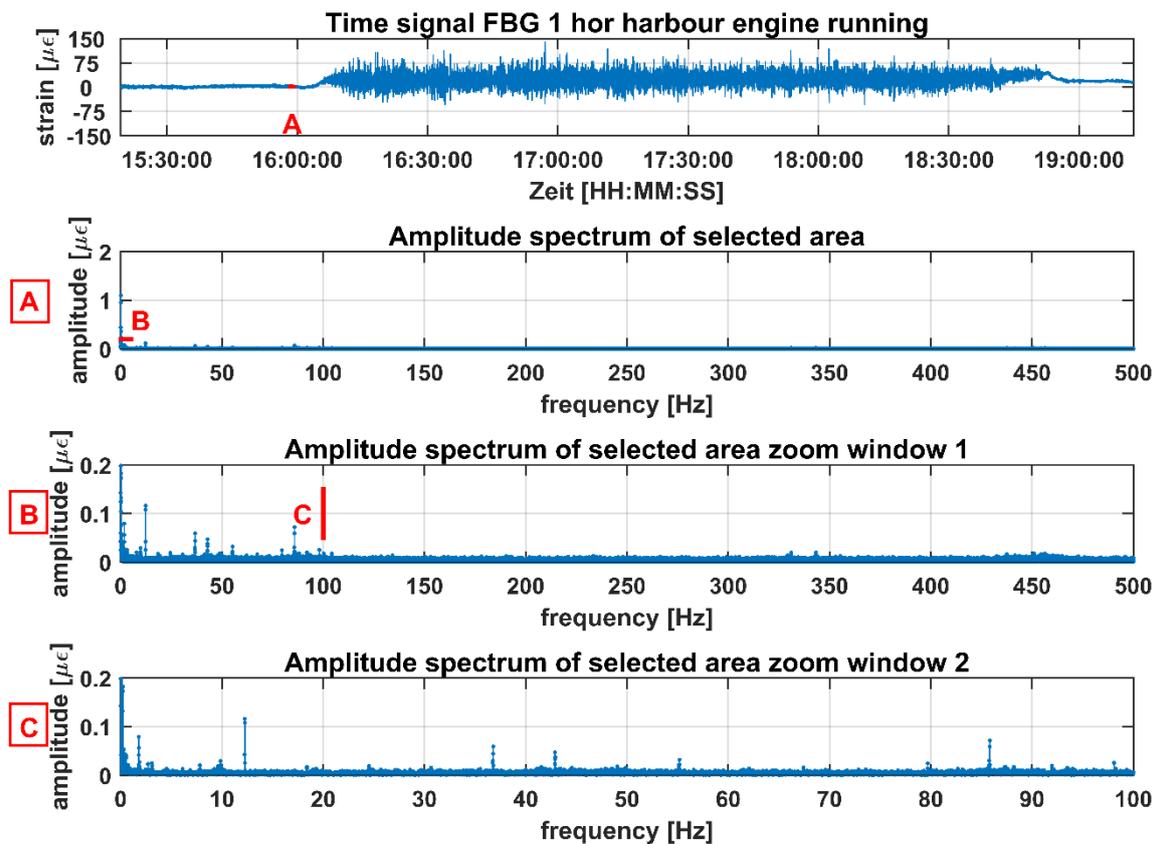


Abb. 8.12: Amplitudenspektrum des horizontalen FBG 1 Sensors (Maschinenraum) im Hafen mit laufenden Motoren und Pumpen [Beobachtungsdauer 90 sec], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Das Amplitudenspektrum des horizontalen FBG 1 Sensors während der Überfahrt auf hoher See ist Abbildung 8.13 zu entnehmen. Eindeutig sind verstärkte niederfrequente Anteile erkennbar, welche durch den höheren Wellengang auf dem offenen Meer bedingt sind. Vergleicht man die durch den laufenden Motor hervorgerufenen Amplituden im Hafen (Abbildung 8.12) mit jenen während der Überfahrt (Abbildung 8.13), zeigen sich mit Ausnahme der Frequenz bei ca. 12 Hz deutlich geringe Amplitudenwerte.

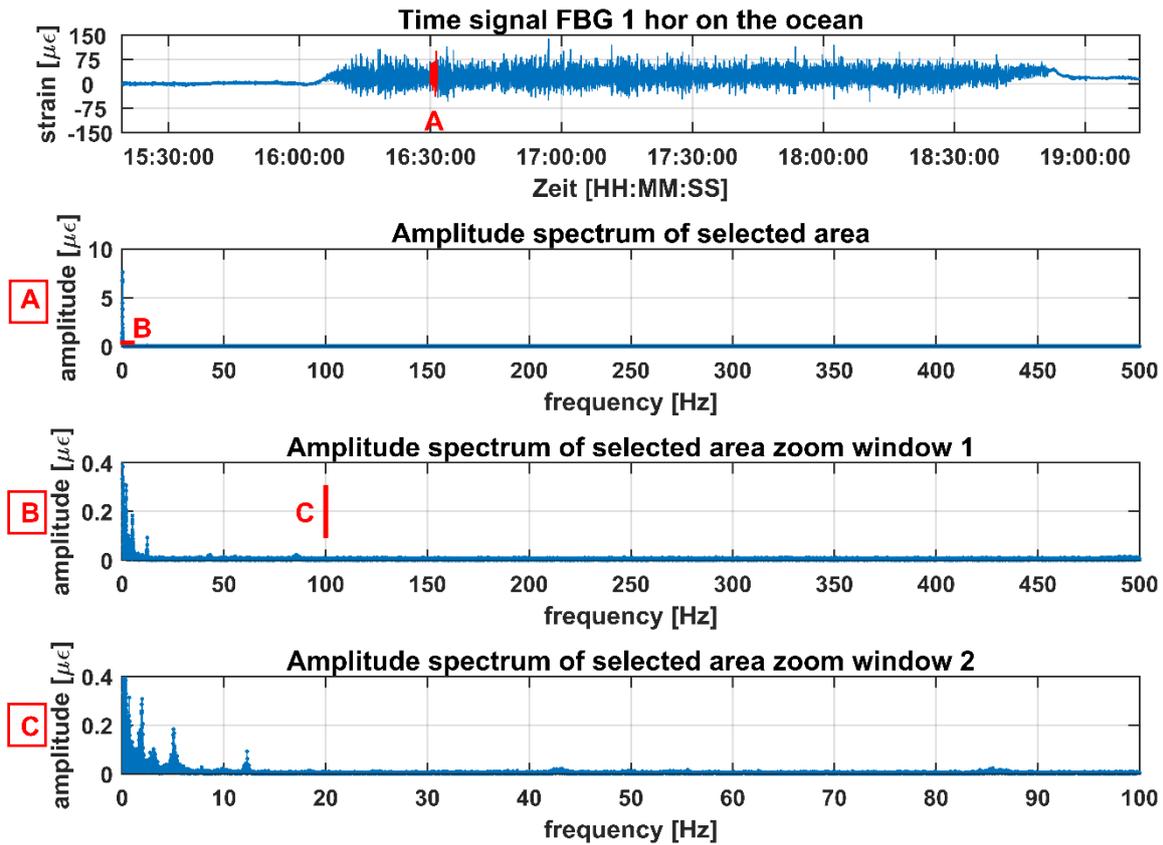


Abb. 8.13: Amplitudenspektrum des horizontalen FBG 1 Sensors (Maschinenraum) auf hoher See [Beobachtungsdauer 90 sec], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Abbildung 8.14 zeigt den Vergleich der Amplitudenspektren der bereits in den Abbildungen 8.11 – 8.13 untersuchten Zeitbereiche. Deutlich sind darin die starken niederfrequenten Anteile des Wellengangs im Amplitudenspektrum der Überfahrt ersichtlich. Vergleicht man die durch die laufenden Motoren und Pumpen hervorgerufenen Amplituden, zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Hafen und Überfahrt. Deutlich sind Abnahmen und Aufspreizungen der Amplituden während der Überfahrt in diesen Bereichen ersichtlich (Detail A und B, Abbildung 8.14).

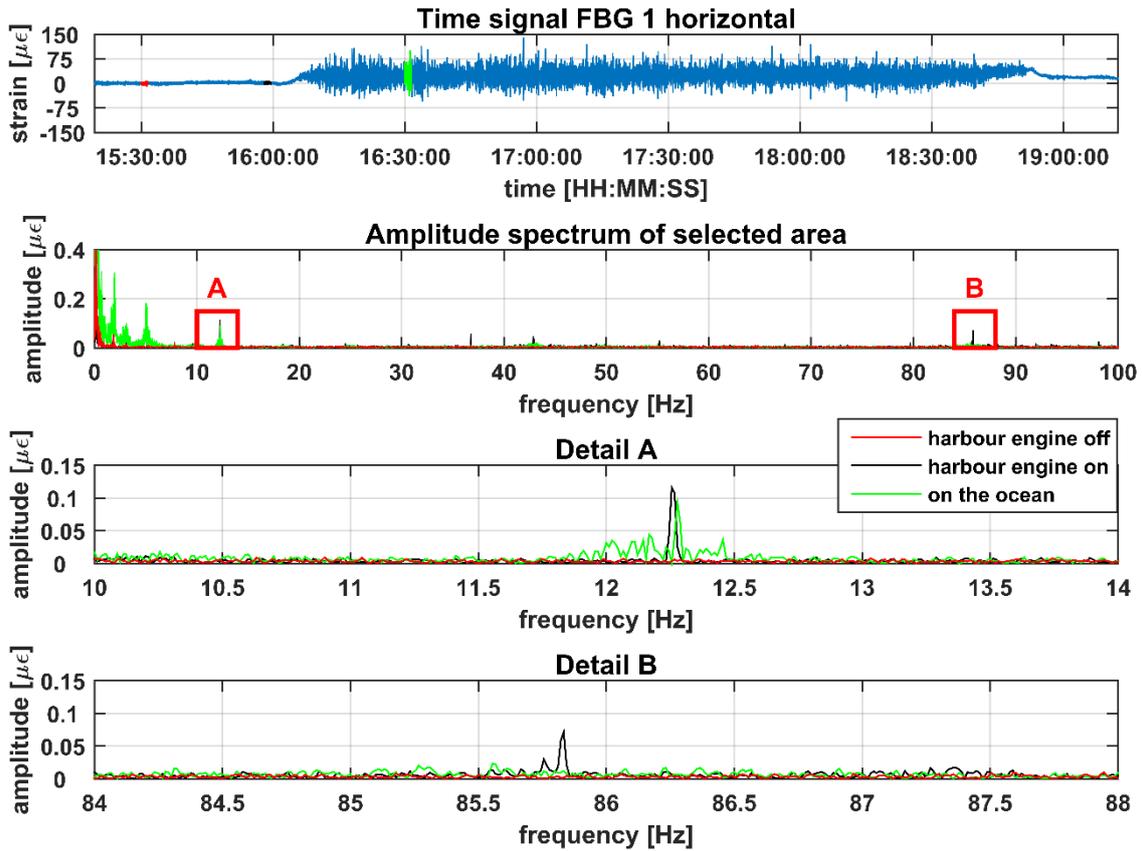


Abb. 8.14: Amplitudenspektrum [0 – 100 Hz] des horizontalen FBG 1 Sensors (Maschinenraum) zu verschiedenen Zeitpunkten [Beobachtungsdauer 90 sec], 14.2.2018
Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

In Tabelle 8 werden die Amplitudenwerte an den durch die laufenden Motoren hervorgerufenen Frequenzen miteinander verglichen. Dazu wurden die Frequenzen der Amplitudenpeaks aus dem Amplitudenspektrum, bei dem sich das Schiff mit laufenden Motoren im Hafen befindet, entnommen (Frequenzbereich 10 – 100 Hz). In weiterer Folge wurden die Amplitudenwerte im Bereich um die besagten Frequenzen aus den drei Amplitudenspektren entnommen und in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Vergleich der maximalen Amplitudenwerte im Bereich der durch die Motoren hervorgerufenen Frequenzen.

Frequenzbereich [Hz]	maximal Amplituden [$\mu\epsilon$]		
	Im Hafen - Motor aus	Im Hafen - Motor ein	Überfahrt
11 – 13	0.0089	0.1162	0.0925
36 – 38	0.0112	0.0591	0.0128
42 – 44	0.0103	0.0470	0.0218
54 – 56	0.0097	0.0320	0.0166
66 – 68	0.0089	0.0161	0.0097
78 – 80	0.0101	0.0242	0.0095
85 – 87	0.0080	0.0715	0.0233
97 – 99	0.0086	0.0255	0.0094

Tabelle 8 zeigt, dass die maximalen Amplitudenwerte während der Überfahrt von jenen der laufenden Motoren im Hafen abweichen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Amplituden während der Überfahrt auf benachbarte Frequenzen verteilen und es dabei zu einer Abschwächung der maximalen Amplitude kommt. Daher kommt es in einigen Frequenzbereichen in denen bereits im Hafen (Motoren ein) nur geringe Amplituden ($< 0.03 \mu\epsilon$) vorhanden sind, zu einer weiteren Verringerung der Amplituden während der Überfahrt. Dies führt dazu, dass die Amplituden der Überfahrt in einigen Frequenzbereichen annähernd mit jenen der Amplituden im Hafen (Motor aus) übereinstimmen (z.B. Amplituden im Frequenzbereich 78 - 80 Hz). Daher verlieren die Amplituden während der Überfahrt in diesen Frequenzbereichen ihre Aussagekraft, da sie nur gering von den Amplituden im Hafen (Motor aus) abweichen. Somit kann nicht gesagt werden, ob der Motor / die Pumpe, welche/r im Hafen (Motoren ein) die Amplitude erzeugt hat, während der Überfahrt noch in Betrieb war oder abgestellt wurde.

Bis dato wurde jeweils der FBG 1 hor Sensor für die Analysen herangezogen. Deshalb wurden in Abbildung 8.15 die Amplitudenspektren aller 12 Sensoren der FBG Kette des Maschinenraums miteinander verglichen. Der Beobachtungszeitraum beträgt wiederum 90 sec wobei sich das Schiff auf der Überfahrt befindet. Dabei wurde der Frequenzbereich von 0 – 25 Hz analysiert.

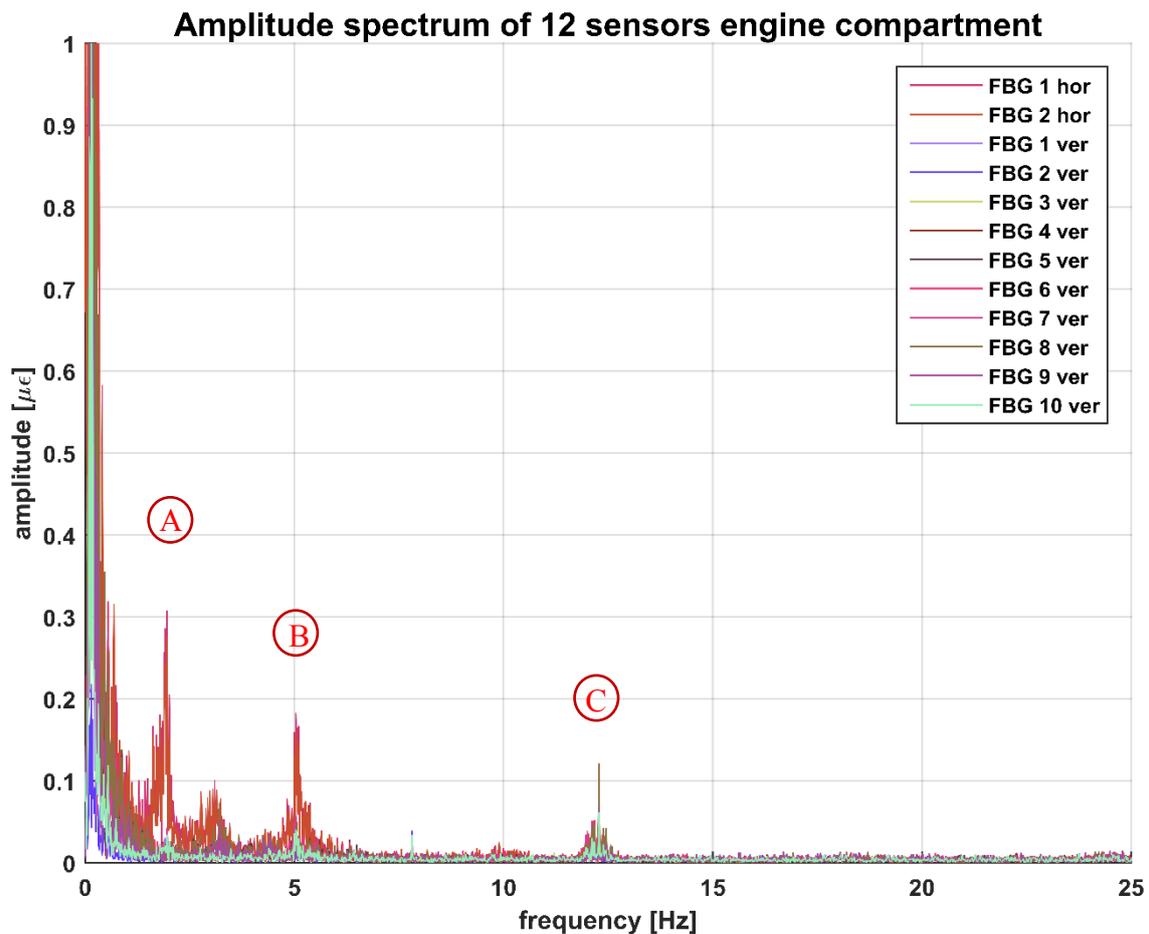


Abb. 8.15: Amplitudenspektrum aller 12 FBG Sensoren der Sensorenkette (Maschinenraum) auf hoher See [16:30:00 – 16:31:30], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Deutlich können Abweichungen in den Amplitudenwerten zwischen den horizontalen und den vertikalen FBG Sensoren bei einer Frequenz von ca. 1.9 Hz festgemacht werden. Dabei ist eine deutliche Ausprägung der Amplitude der horizontalen Sensoren in diesem Bereich ersichtlich (Detail A, Abbildung 8.16). Auch für den Peak bei ca. 5 Hz weisen die horizontalen FBG Sensoren eine deutlich höhere Amplitude auf (Detail B, Abbildung 8.16). Die höheren Amplituden der horizontalen FBG Sensoren sind durch die höheren Deformationen in Längsrichtung des Schiffs, welche durch den Wellengang hervorgerufen werden, bedingt.

Betrachtet man hingegen den Peak bei ca. 12.3 Hz, so zeigt sich, dass hier alle Sensoren ein ähnliches Verhalten aufweisen (Detail C, Abbildung 8.16). Die Amplituden in diesem Bereich werden, wie bereits erwähnt, durch die laufenden Motoren verursacht. Die Unterschiede in den Amplitudenwerten sind dabei auf die Anordnung der Sensoren zurückzuführen.

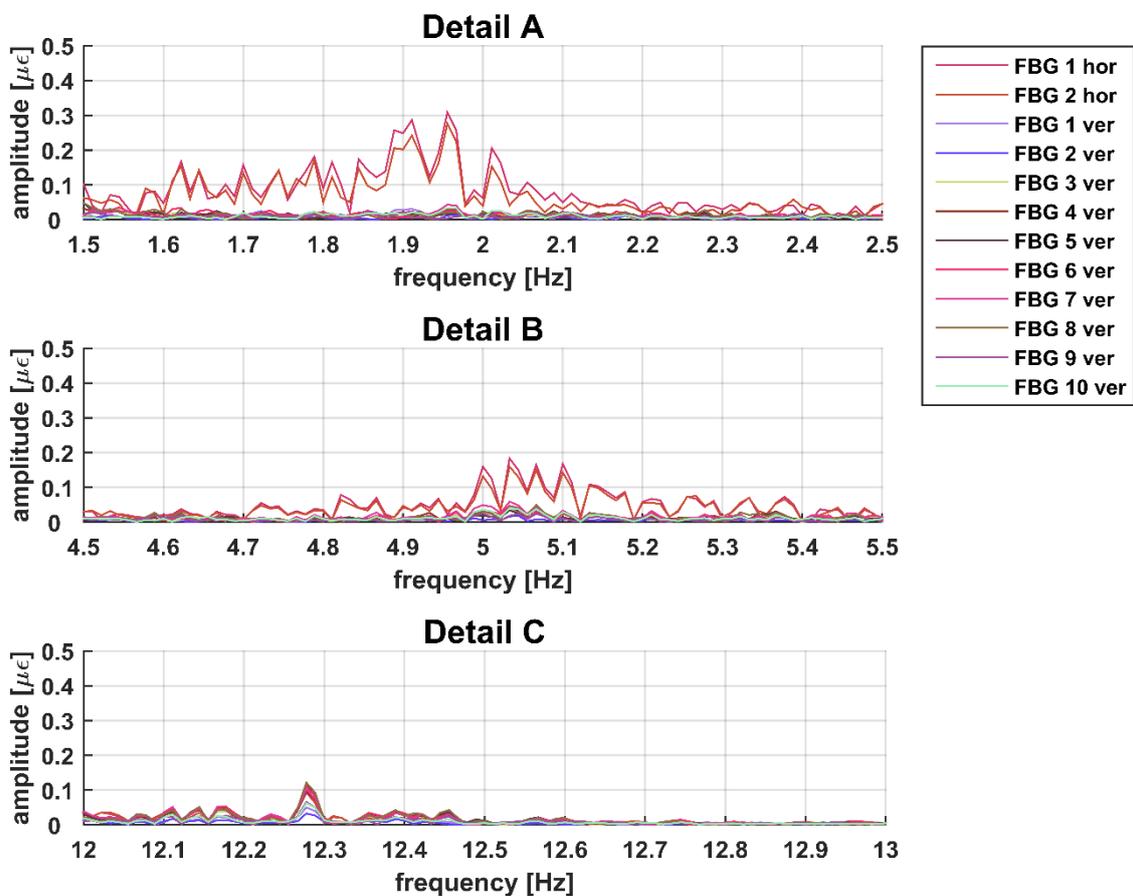


Abb. 8.16: Details [A – C] Amplitudenspektrum aller 12 FBG Sensoren der Sensorenkette (Maschinenraum) auf hoher See [16:30:00 – 16:31:30], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Die FFT bietet somit die Möglichkeit der punktuellen Analyse der Zeitreihe. Um die Zeitreihe jedoch besser zu verstehen wird im nächsten Kapitel die blockweise FFT vorgestellt.

8.1.6 Blockweise FFT

Um die auftretenden Frequenzen während der Überfahrt anschaulich darstellen zu können, wurde die Fast Fourier Transformation blockweise durchgeführt. Sie bietet gegenüber der herkömmlichen FFT den Vorteil einer kontinuierlichen Aneinanderreihung von Amplitudenspektren mit speziell gewählter Blocklänge. Die Blocklänge musste hierbei so gewählt werden, dass auch niederfrequente Einflüsse, wie z.B. der Wellengang, detektiert werden können. Die blockweise FFT lässt sich in diesem Fall wie eine Zeitreihe von auftretenden Frequenzen mit zugehörigen Amplituden über die Zeit darstellen. Die Ergebnisse der blockweisen FFT wurden sowohl für die Sensoren des Maschinenraums als auch für die Sensoren des Bugs berechnet. Die Ergebnisse wurden insofern getrennt betrachtet, weil diese nicht am selben Tag aufgezeichnet wurden.

Blockweise FFT Maschinenraum 14.02.2018 Tórshavn – Tvøroyri

Die blockweise FFT, mit einer Blocklänge von 90 Sekunden, des horizontalen FBG 1 Sensors des Maschinenraums ist in Abbildung 8.17 ersichtlich.

Block wise FFT [90 sec] amplitude spectrum FBG 1 hor engine compartment

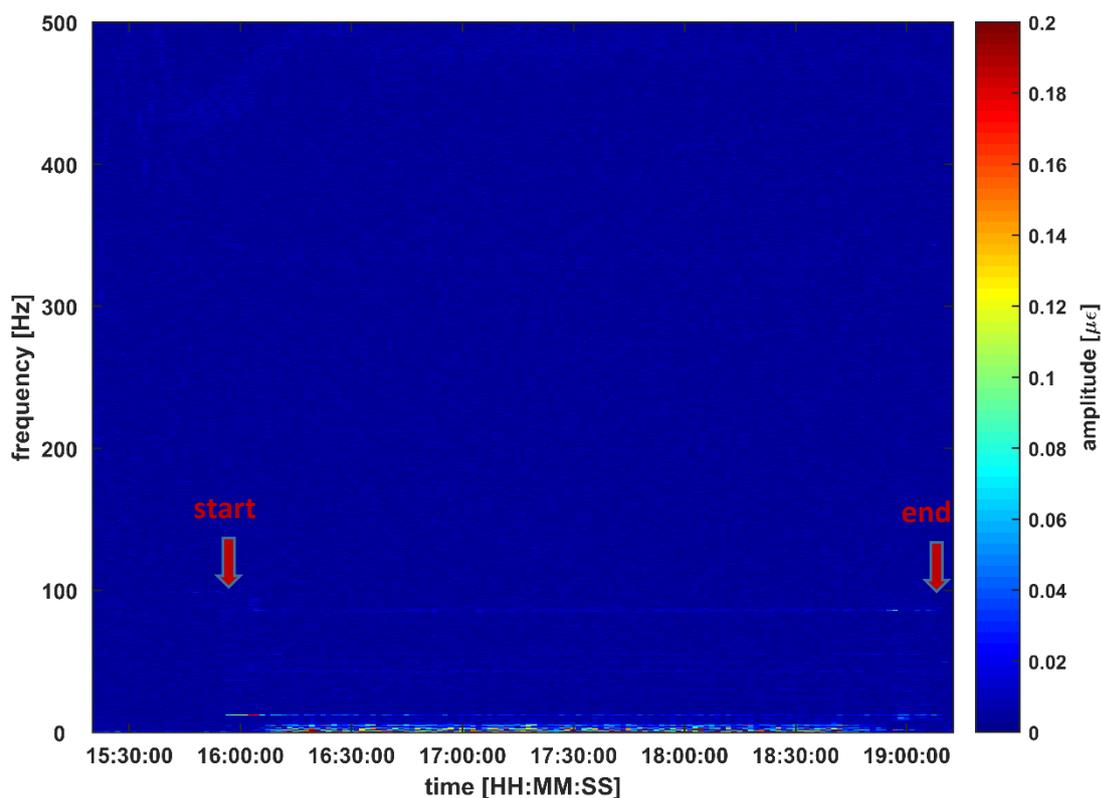


Abb. 8.17: Amplitudenspektrum des horizontalen FBG 1 Sensors (Maschinenraum), 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Es lassen sich das Starten (ca. 15:55:00) und das Abstellen der Motoren (ca. 19:08:00) erkennen. Bei laufenden Motoren können einige konstante Frequenzen detektiert werden. Die Frequenzen liegen dabei in einem Bereich bis ca. 90 Hz. Deutlicher wird dieser Bereich in Abbildung 8.18 dargestellt, wo eine genauere Analyse des Bereichs bis 100 Hz durchgeführt wurde. Im hochfrequenten Bereich, ab ca. 400 Hz, zeichnet sich ein signifikantes Störsignal ab, welches in Kapitel 9.5 genauer behandelt wird.

Block wise FFT [90 sec] amplitude spectrum FBG 1 hor engine compartment

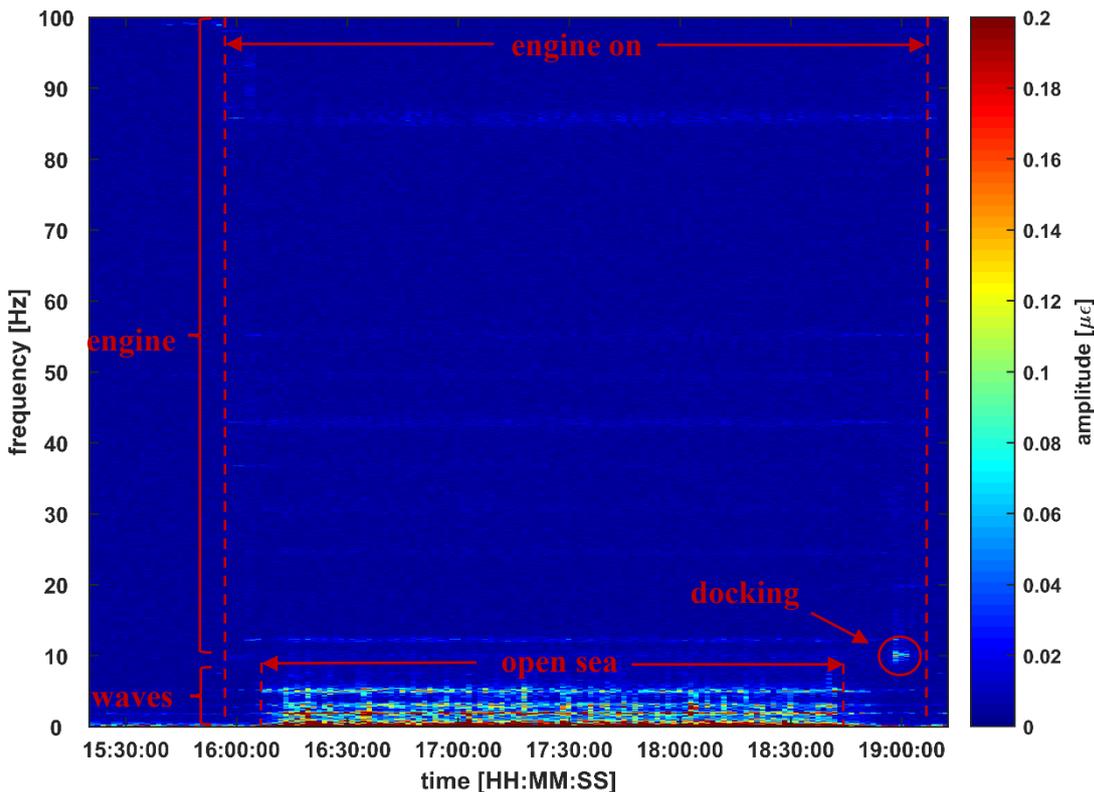


Abb. 8.18: Amplitudenspektrum [0 – 100 Hz] des horizontalen FBG 1 Sensors (Maschinenraum), 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Abbildung 8.18 zeigt den Bereich der blockweisen FFT des horizontalen FBG 1 Sensors bis zu einer Frequenz von 100 Hz. Dadurch wird eine Analyse der niederfrequenten Anteile erleichtert. Markant zeichnen sich hierbei die Frequenzen der laufenden Motoren und der an Bord vorhandenen Pumpen ab. Die dadurch herrührenden konstanten Frequenzen liegen in einem Bereich zwischen 10 bis 90 Hz. Alle darunterliegenden Frequenzen sind auf den Wellengang und dessen Einfluss auf das Schiff zurückzuführen. Dies zeichnet sich speziell durch die Zunahme der Amplituden im niederfrequenten Bereich während der Überfahrt ab (ca. 16:10:00). Die Zunahme der Amplitude ist direkt mit der Zunahme der Wellenhöhe, die das Schiff auf dem offenen Ozean in Bewegung versetzt, verknüpft. Des Weiteren ist das Anlegen des Schiffs am Kai in Abbildung 8.18 ersichtliche.

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit bietet eine 3D Darstellung der blockweisen FFT, welche in Abbildung 8.19 ersichtlich ist. Deutlich können darin das Starten der Motoren und die dadurch verursachten Frequenzen detektiert werden. Es zeigen sich zu Beginn und Ende der Überfahrt stärkere Amplituden. Dabei befindet sich das Schiff jeweils mit laufenden Motoren im Hafen. Während der Überfahrt nehmen diese Amplituden ab, bzw. verteilen sich auf umliegende Frequenzen, wie in Kapitel 8.1.5, S. 53 - 54 erläutert wurde. Des Weiteren kann der Verlust der Aussagekraft einiger Amplituden, welche im Hafen (Motoren ein) noch detektiert werden konnten, während der Überfahrt gezeigt werden (z.B. bei einer Frequenz von ca. 67 Hz und ca. 79 Hz).

3D block wise FFT [90 sec] amplitude spectrum FBG 1 hor engine compartment

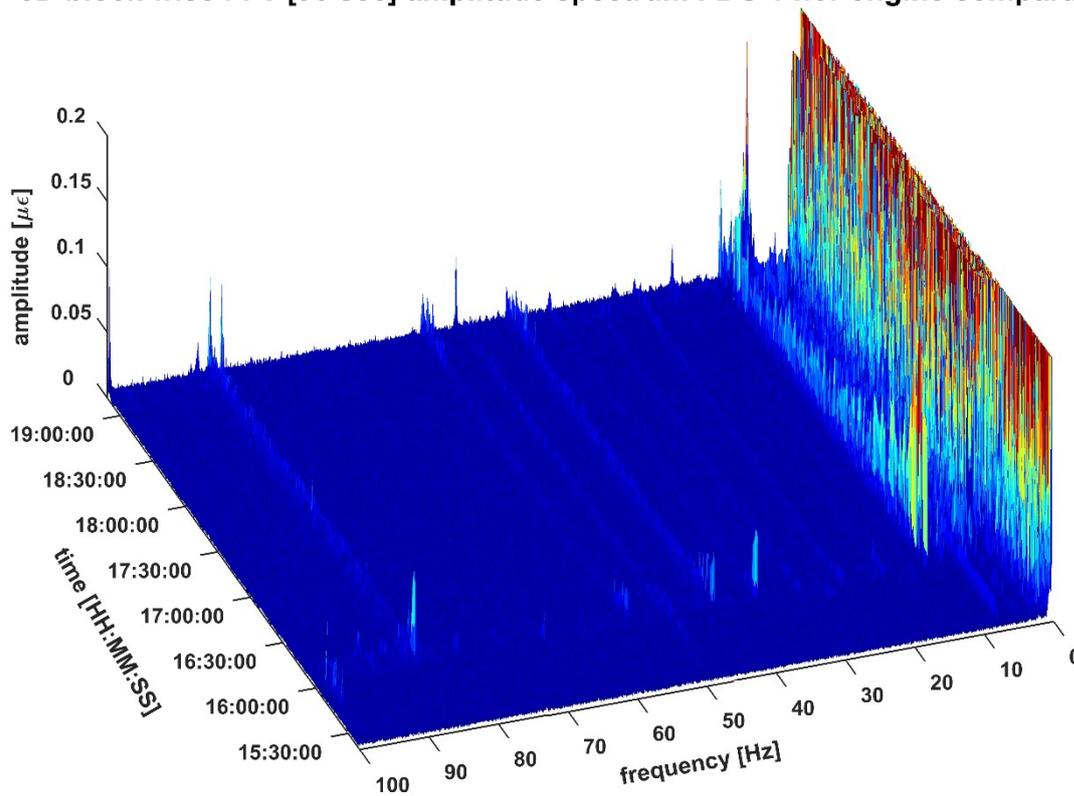


Abb. 8.19: 3D Darstellung Amplitudenspektrum [0 – 100 Hz] des horizontalen FBG 1 Sensors (Maschinenraum), 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Um den Unterschied der Ergebnisse der blockweisen FFT, aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung der Sensoren des Maschinenraums zu zeigen, wird in Abbildung 8.20 die blockweise FFT des vertikalen FBG 5 Sensors dargestellt.

Block wise FFT [90 sec] amplitude spectrum FBG 5 ver engine compartment

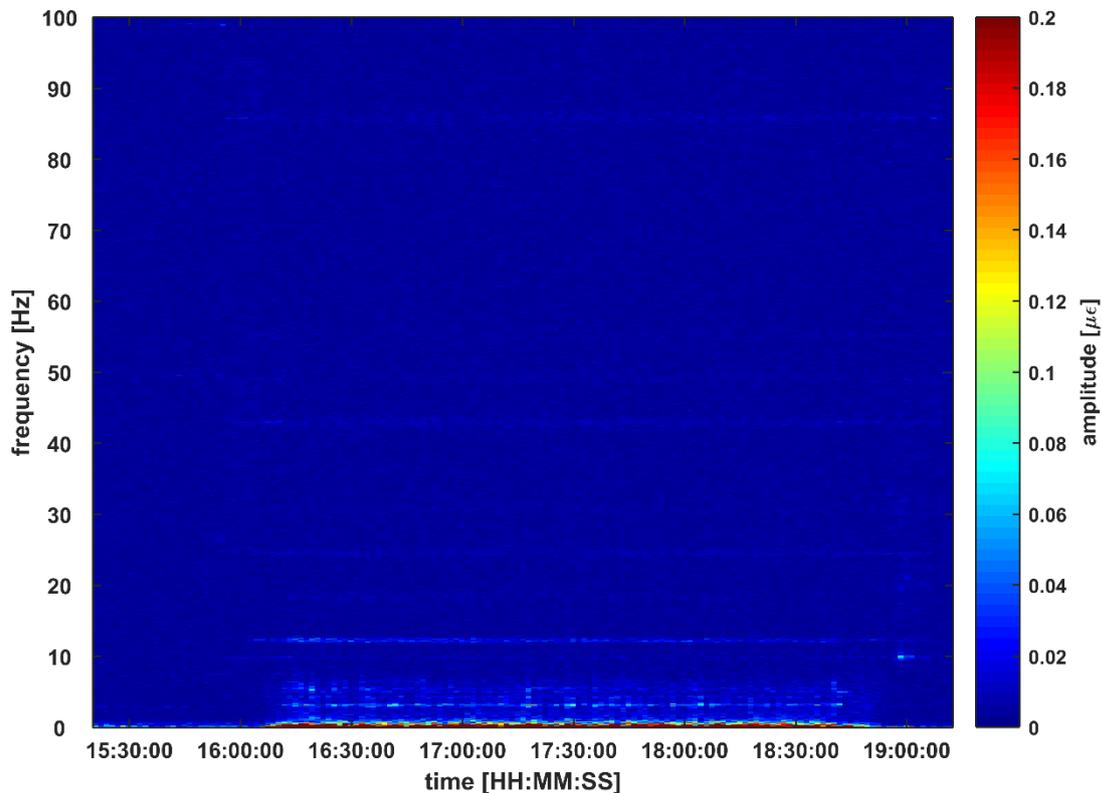


Abb. 8.20: Amplitudenspektrum [0 – 100 Hz] des vertikalen FBG 5 Sensors (Maschinenraum), 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Analog zum horizontalen FBG 1 Sensor können auch bei der blockweisen FFT des vertikalen FBG 5 Sensors deutlich das Starten und das Abschalten der Motoren detektiert werden. Jedoch sind die Amplituden der konstanten Frequenzen um einiges schwächer, als dies beim horizontalen Sensor der Fall ist. Auch die Zu- und Abnahme des Wellengangs im niederfrequenten Bereich (0 – 10 Hz) ist deutlich zu detektieren, jedoch in einem geringeren Ausmaß als dies beim horizontalen Sensor der Fall ist. Der vertikale FBG 5 Sensor befindet sich in der Mitte des überwachten Schiffshüllelements (Abbildung 6.3).

Um einen eventuell auftretenden Unterschied aufgrund der Anordnung der vertikalen FBG Sensoren zeigen zu können, wird zu Vergleichszwecken die blockweise FFT des vertikalen FBG 10 Sensors in Abbildung 8.21 dargestellt. Dieser befindet sich im Gegensatz zum FBG 5 Sensor nicht in der Mitte, sondern an der Seite des Schiffshüllelements.

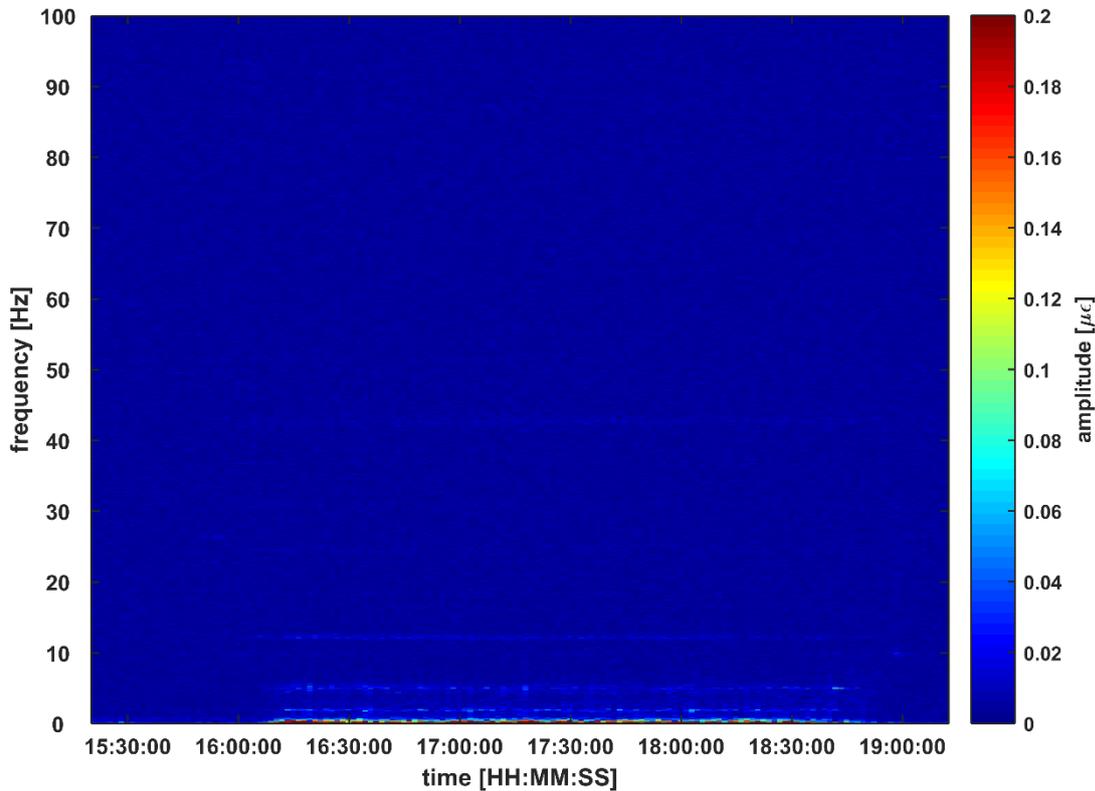
Block wise FFT [90 sec] amplitude spectrum FBG 10 ver engine compartment

Abb. 8.21: Amplitudenspektrum [0 – 100 Hz] des vertikalen FBG 10 Sensors (Maschinenraum), 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Im Vergleich zum vertikalen FBG 5 Sensor (Abbildung 8.20) zeigt die blockweise FFT des vertikalen FBG 10 Sensors deutlich abgeschwächte Amplitudenwerte. Einige konstante Frequenzen der Motoren können im Vergleich nicht mehr detektiert werden. Jedoch zeigen sich im niederfrequenten Bereich immer noch deutliche Amplituden, welche den Wellengang repräsentieren.

Es wird daher von einem positions- und ausrichtungsabhängigen Unterschied hinsichtlich der Amplitudenstärken im Frequenzbereich der Wellen und der laufenden Motoren ausgegangen. Dies wird in Abbildung 8.22 für alle FBG Sensoren der FBG Kette untersucht und analysiert.

Abbildung 8.22 zeigt den positionsabhängigen Unterschied in der Stärke der detektierten Maximalamplituden der horizontalen und vertikalen FBG Sensoren zweier Frequenz- und Zeitbereiche. Der erste Frequenzbereich erstreckt sich dabei von 11 – 13 Hz und beinhaltet Amplituden, die durch den laufenden Motor des Schiffs hervorgerufen werden. Im Gegensatz dazu liegen im zweiten Frequenzbereich (0.05 – 0.15 Hz) die Amplituden, die durch den Wellengang verursacht werden. Die Zeitbereiche erstrecken sich jeweils über eine Dauer von 90 Sekunden. Dabei befindet sich das Schiff einerseits mit laufenden Motoren im Hafen und andererseits auf der Überfahrt.

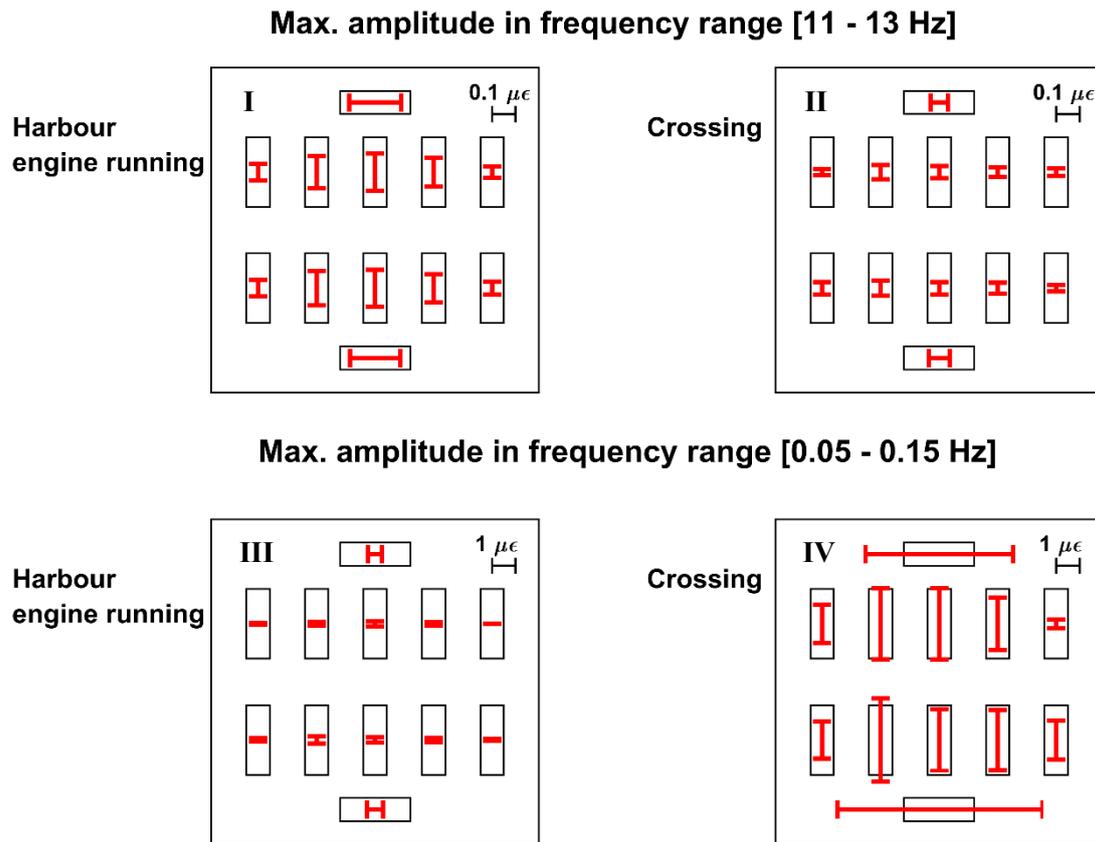


Abb. 8.22: Maximale Amplituden der FBG Kette des Maschinenraums aus FFT in den festgelegten Frequenzbereichen

In allen Darstellungen ist eine Abnahme der Maximalamplitude der vertikalen Sensoren zu den Seiten des Schiffshüllelements hin ersichtlich. Im untersuchten Frequenzbereich der laufenden Motoren (11 – 13 Hz) zeigt sich eine deutliche Abnahme der Amplituden während der Überfahrt (II), im Vergleich zum Hafen (I). Die Amplituden der horizontalen FBG Sensoren sind dabei minimal größer als die der vertikalen FBG Sensoren, die sich in der Mitte des Schiffshüllelements befinden. Bezogen auf den Frequenzbereich des Wellengangs zeigt sich ein genau umgekehrtes Bild. Es kommt zu einer enormen Zunahme der Amplituden aller FBG Sensoren während der Überfahrt (IV). Im Gegensatz dazu sind die Amplituden im Hafen (III) sehr gering. Dies ist auf den geringen Wellengang im Hafen zurückzuführen. Die Amplituden der horizontalen FBG Sensoren sind während der Überfahrt (IV) um einiges größer als die Amplituden der vertikalen Sensoren.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass mit den Sensoren, die in der Mitte des Schiffshüllelements angebracht wurden, die Frequenzen, welche durch die Motoren hervorgerufen werden, besser detektiert werden können. Bei den Sensoren, die an den Seiten des Elements platziert wurden, ist dies nicht zur Gänze möglich. Angenommen wird, dass dies auf die versteifende Wirkung der Stahlträger an den Seiten des Elements zurückzuführen ist. Jedoch lassen sich mit allen Sensoren die starken Einflüsse des Wellengangs detektieren. Es zeigt sich zudem auch hier ein Unterschied in der Stärke der Amplitude, abhängig von der Position und Ausrichtung der Sensoren.

Blockweise FFT Bug 13.02.2018 Tórshavn – Tvøroyri

Analog zu den Sensoren des Maschinenraums wurde auch eine blockweise FFT der freigespannten FBG Sensoren im Bug des Schiffes durchgeführt. Auch hier wurde eine Blocklänge von 90 Sekunden für die Auswertung der blockweisen FFT gewählt. Die Ergebnisse für den FBG 1 B Sensor, der sich auf der linken Seite in Fahrtrichtung des Schiffes befindet, kann Abbildung 8.23 entnommen werden.

Block wise FFT [90 sec] amplitude spectrum Sensor 1 FBG bow

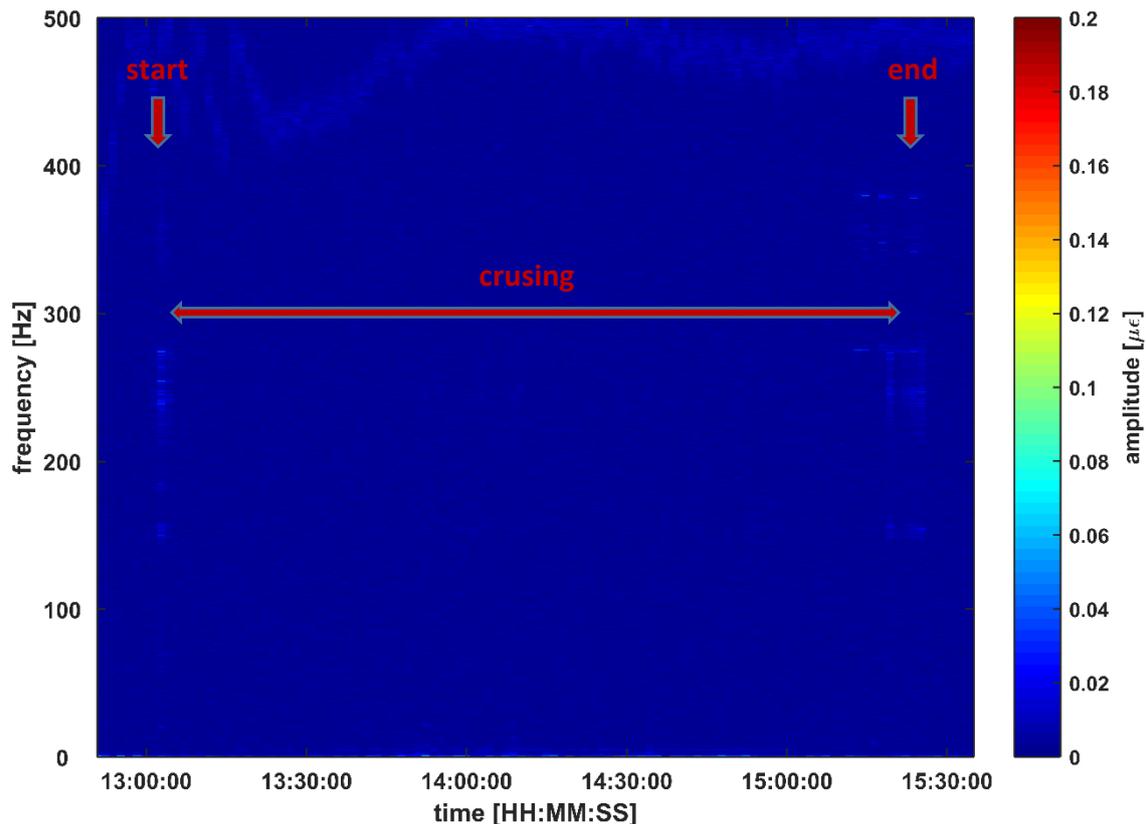


Abb. 8.23: Amplitudenspektrum des FBG 1 B Sensors (Bug), 13.2.2018
Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Auch hier kann ein Störsignal in einem Bereich von 400 – 500 Hz detektiert werden. Markant zeichnen sich die Ab- und Anlegemanöver in den Häfen ab. Dabei entstehen durch die Drehstrahlruder, welche für das An- und Ablegen verwendet werden, Frequenzen in einem Bereich von 150 – 400 Hz. Auch das Anstoßen an den Pollern im Hafen zeigt ein ähnliches Bild. Dadurch kann sowohl der Beginn, als auch das Ende der Überfahrt deutlich bestimmt werden. Hinsichtlich des Starts bzw. des Abschaltens der Motoren kann anhand dieser Sensoren keine Aussage getroffen werden, da sich keine konstanten Frequenzen in einem Bereich zwischen 10 – 90 Hz abzeichnen. Eine genauere Analyse des niederfrequenten Bereichs bis 100 Hz ist in Abbildung 8.24 ersichtlich.

Block wise FFT [90 sec] amplitude spectrum Sensor 1 FBG bow

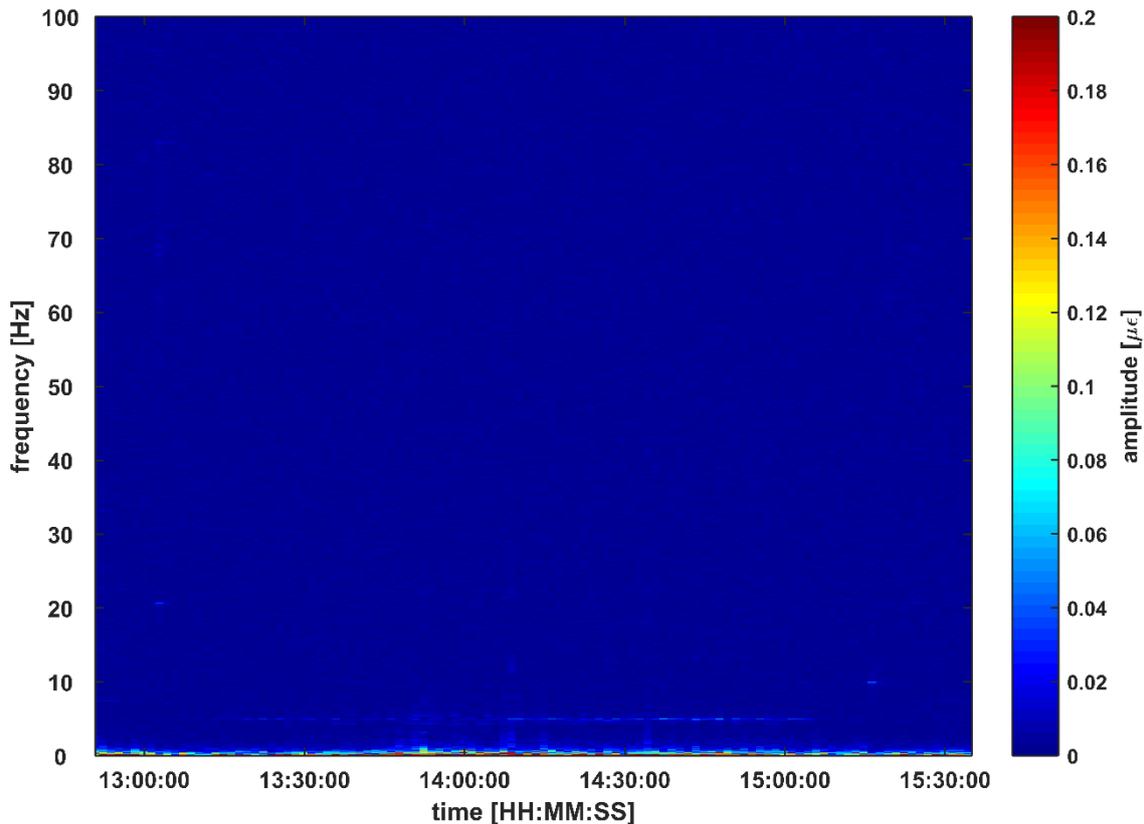


Abb. 8.24: Amplitudenspektrum [0 - 100 Hz] des FBG 1 B Sensors (Bug), 13.2.2018
Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Deutlich lassen sich starke Amplituden in einem Bereich von 0 – 1 Hz ausmachen. Diese treten jedoch schon vor dem Beginn der Überfahrt auf und werden durch den im Hafen bestehenden Wellengang verursacht. Während der Überfahrt zeichnet sich eine konstante Frequenz in einem Bereich von ca. 5 Hz ab. Diese Frequenz ist ein Ergebnis der Wellenbewegungen, weil ihre Amplitude mit zunehmender Entfernung vom Hafen immer mehr zunimmt. Gegen Ende der Überfahrt zeigt sich ein genau gegenteiliges Bild. Auch eine Zunahme der Amplituden im Bereich von 0 – 1 Hz ist ersichtlich. Die einzelnen Amplitudenspitzen (Bereich von 13:45 – 14:45) sind auf die Peaks der Zeitreihe (Abbildung 8.4) zurückzuführen.

Da die FBG Sensoren im Bug über eine Länge von $l = 1$ m frei gespannt wurden, sollten diese hinsichtlich ihrer Eigenfrequenz überprüft werden. Dazu wurde eine Abschätzung der Eigenfrequenz der Glasfaser in den Formeln 8.8 – 8.11 durchgeführt. Diese beruht auf dem Prinzip der Schwingfaser (vgl. Hütte 1991, S. H30 – 31). Die Glasfaser wurde dabei gespannt zwischen zwei Magnethaltern fixiert. Es wurde dabei eine Dehnung der Glasfaser von $\varepsilon = 1\%$ angenommen. Der E-Modul von Glas wird in der Literatur mit $E = 0.4 - 0.9$ [N/mm²] angegeben. Auch die Dichte des Saitenmaterials war für die Berechnung von Bedeutung und weist für Glas einen Wert von $\rho = 2200$ kg/m³ auf.

In einem ersten Schritt wurde die Vorspannung σ bestimmt. Der formale Zusammenhang ist Formel 8.8 zu entnehmen (vgl. Hütte 1991, S. B191).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (8.8)$$

Die Vorspannung σ kann jedoch auch anhand des Durchmessers d der Glasfaser (Saite) und der Spannkraft F ausgedrückt werden (Formel 8.9).

$$\sigma = \frac{F}{\left(\frac{1}{4} \cdot d^2 \cdot \pi\right)} \quad (8.9)$$

Durch Umformung erhält man die Spannkraft F (Formel 8.10).

$$F = \sigma \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \quad (8.10)$$

Somit kann in Formel 8.11 die Grundfrequenz f der Glasfaser bestimmt werden (vgl. Hütte 1991, S. H30 – 31).

$$f = \frac{1}{ld} \cdot \sqrt{\frac{F}{\pi\rho}} \quad (8.11)$$

Für eine vorgespannte Glasfaser (1 %), welche über eine Länge von 1 m frei gespannt ist, ergibt sich bei einem Durchmesser von $d = 125 \mu\text{m}$ und einem E-Modul von $E = 0.6 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ eine Grundfrequenz von ca. 213 Hz. In diesem Bereich der blockweisen FFT können jedoch keine Auffälligkeiten in den Amplitudenwerten (Abbildung 8.23) festgestellt werden. Dies lässt den Schluss zu, dass die Einflüsse der Eigenschwingung der Glasfaser vernachlässigbar sind.

8.1.7 Berechnung der Strain Ellipse der FBG Rosette

Aus den berechneten Strainwerten der drei Sensoren der Strainrosette kann die Verformung der Schiffshülle durch Berechnung der Strainellipse gezeigt werden. Hierbei wurde neben der großen ε_1 und der kleinen Halbachse ε_2 auch die Ausrichtung φ der Strainellipse bestimmt. Die Berechnungen sind den Formeln 8.12 – 8.13 zu entnehmen (vgl. Wöllner, Woschitz, Brunner 2011, S. 4).

$$\tan 2\varphi = \frac{-\sqrt{3}(\varepsilon_{SR_3} - \varepsilon_{SR_2})}{2\varepsilon_{SR_1} - \varepsilon_{SR_2} - \varepsilon_{SR_3}} \quad (8.12)$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{SR_1} + \varepsilon_{SR_2} + \varepsilon_{SR_3}}{3} \pm \sqrt{\frac{(2\varepsilon_{SR_1} - \varepsilon_{SR_3} - \varepsilon_{SR_2})^2}{9} + \frac{(\varepsilon_{SR_3} - \varepsilon_{SR_2})^2}{3}} \quad (8.13)$$

Die Parameter ε_{SR_1} , ε_{SR_2} und ε_{SR_3} repräsentieren hierbei die berechneten Strainwerte (Kap. 7.1.1) aus den Messwerten der jeweiligen Sensoren der Strainrosette. Die Orientierung φ bezieht sich auf den horizontal angebrachten Sensor SR 1 und die Zählrichtung verläuft gegen den Uhrzeigersinn. Die Darstellung der Variation der Strainellipse erfolgt in einer Animation,

in der neben der Schiffsbewegung auch die Deformation der anderen FBG Sensoren im Maschinenraum gezeigt wird. Einzelergebnisse dieser Animation sind in Kapitel 9.4.4 ersichtlich.

8.2 GPS

Auch für die drei GPS Sensoren wurde eine Einzelauswertung durchgeführt. Die Bestimmung der signifikant auftretenden Frequenzen wurde auch hier als Ziel gesetzt. Es ist anzumerken, dass hierbei großteils die Ergebnisse der Berechnung mit RTKlib des 14.2.2018 analysiert bzw. dargestellt werden, da diese, wie bereits in der Qualitätsanalyse beschrieben, einen deutlich höheren Prozentanteil an phasenfixierten Lösungen aufweisen.

Zeitreihen der GPS Sensoren

Die aufgezeichneten Daten der drei GPS Sensoren können Abbildung 8.25 entnommen werden. Dabei handelt es sich um die Daten der Überfahrt von Tórshavn – Tvøroyri vom 14.2.2018. Deutlich sind die markanten Höhenvariationen (± 6 m) ersichtlich, bedingt durch den sehr starken Seegang am Tag der Messkampagne. Des Weiteren kann die Ausfahrt aus dem Hafen, verbunden mit einer Zunahme der Amplitude der Höhenvariation am Beginn der Zeitreihe, detektiert werden. Konträr dazu zeichnet sich eine Amplitudenabnahme bei der Hafeneinfahrt von Tvøroyri ab.

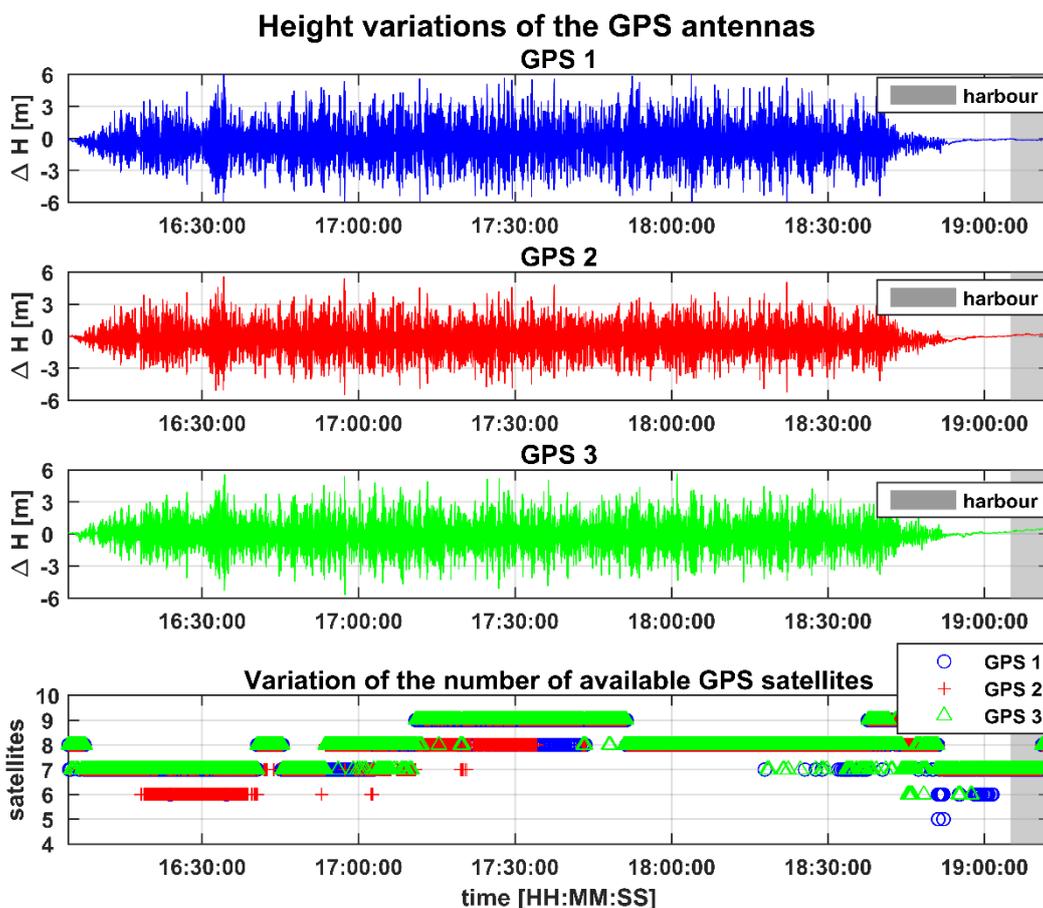


Abb. 8.25: Höhenvariation der GPS Sensoren, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

8.2.1 Präzision der GPS Messungen

Die Präzision der GPS Messungen wird in diesem Unterkapitel noch einmal kurz aufgegriffen. Die horizontalen (σ_x, σ_y) und vertikalen (σ_h) Standardabweichungen des GPS Rovers wurden bereits in Kapitel 4.2 aufgezeigt und sind Tabelle 4 zu entnehmen. Dabei ist ersichtlich, dass die Standardabweichungen von der Länge der Basislinie abhängig sind. Während der Überfahrt variiert die Länge der Basislinie zwischen 1 und 52 km. Dadurch ergeben sich positionsabhängig unterschiedliche Standardabweichungen der GPS Messungen. Aufgrund der unterschiedlichen Länge der Basislinie werden nachfolgend die Minimal- und Maximalwerte der horizontalen und vertikalen Standardabweichungen angegeben.

$$\sigma_{x,y} = \pm 1.2 \text{ cm} - \pm 7.2 \text{ cm}$$

$$\sigma_h = \pm 2.1 \text{ cm} - \pm 7.2 \text{ cm}$$

Die Standardabweichungen der GPS Messungen werden in weiterer Folge zur Berechnung der Standardabweichung des Roll- und Nickwinkels (Kap. 8.2.2) und der Standardabweichung des Strains, zwischen den GPS Antennen (Kap. 8.2.3), benötigt. Die Bestimmung der Standardabweichungen erfolgt dabei mittels Varianzfortpflanzung.

8.2.2 Roll- und Nickwinkel des Fährschiffs

Da die gemessenen Höhenvariationen der GPS Antennen nur bedingt Auskunft über das Verhalten des Schiffs auf hoher See geben, wurden die Roll- und Nickwinkel zwischen den GPS Antennen berechnet. Die Berechnung erfolgte einerseits längs des Schiffes, in Fahrtrichtung zwischen den GPS Antennen 2 und 3, und andererseits quer dazu zwischen den Antennen 1 und 2. Somit kann die Neigung des Schiffs in Längs- (pitch) und Querrichtung (roll) dargestellt werden, was für die späteren Analysen im Zusammenhang mit dem Verhalten der faseroptischen Sensoren (Kap. 9.4.4) von Bedeutung ist. Für die Bestimmung der Winkel zwischen zwei Antennen wird neben der räumlichen Distanz ρ auch die Höhendifferenz ΔH benötigt. Die Berechnung der räumlichen Distanz wurde analog zu Formel 7.19 durchgeführt, wobei die Länge der Basislinie b durch die räumliche Distanz ρ ersetzt wird. Durch Differenzbildung zwischen den gemessenen Höhen der GPS Antennen wird die Höhendifferenz ΔH bestimmt. Formel 8.14 zeigt die Berechnung des Rollwinkels r .

$$r = \text{asin} \frac{\Delta H}{\rho} \quad (8.14)$$

Die Berechnung des Nickwinkels p erfolgt analog zu Formel 8.14. Wie bereits in Kap. 8.2.1 beschrieben wurde, ist die Standardabweichung der GPS Höhenmessungen σ_h von der Länge der Basislinie abhängig. Da sich die Basislinie während der Überfahrt ändert, führt dies zu einer Änderung der Standardabweichung der Höhenmessungen σ_h . Diese wird zur Bestimmung der Standardabweichungen des Roll- und Nickwinkels (σ_r und σ_p) mittels Varianzfortpflanzung benötigt. Daher ändert sich auch der Roll- und Nickwinkel bei einer Änderung der Länge der Basislinie. Tabelle 9 zeigt die Minimal- und Maximalwerte der Standardabweichungen des Roll- und Nickwinkels.

Tabelle 9: Minimal- und Maximalwerte der Standardabweichungen σ_r und σ_p

Standardabweichungen der Roll- und Nickwinkel		
	min. [°]	max. [°]
σ_r	± 0.091	± 0.316
σ_p	± 0.019	± 0.064

Die minimale und maximale Standardabweichung des Nickwinkels σ_p ist dabei um ca. 1/5 kleiner als jene des Rollwinkels σ_r . Dies ist auf den größeren Abstand ρ von ca. 92 m zwischen den Antennen, mit denen der Nickwinkel berechnet wurde, zurückzuführen. Der Abstand zwischen den Antennen, die zur Berechnung des Rollwinkels herangezogen wurden, ist deutlich geringer und beträgt ca. 19 m. Die Zeitreihen der Roll- und Nickwinkel und deren Standardabweichungen sind Abbildung 8.26 zu entnehmen.

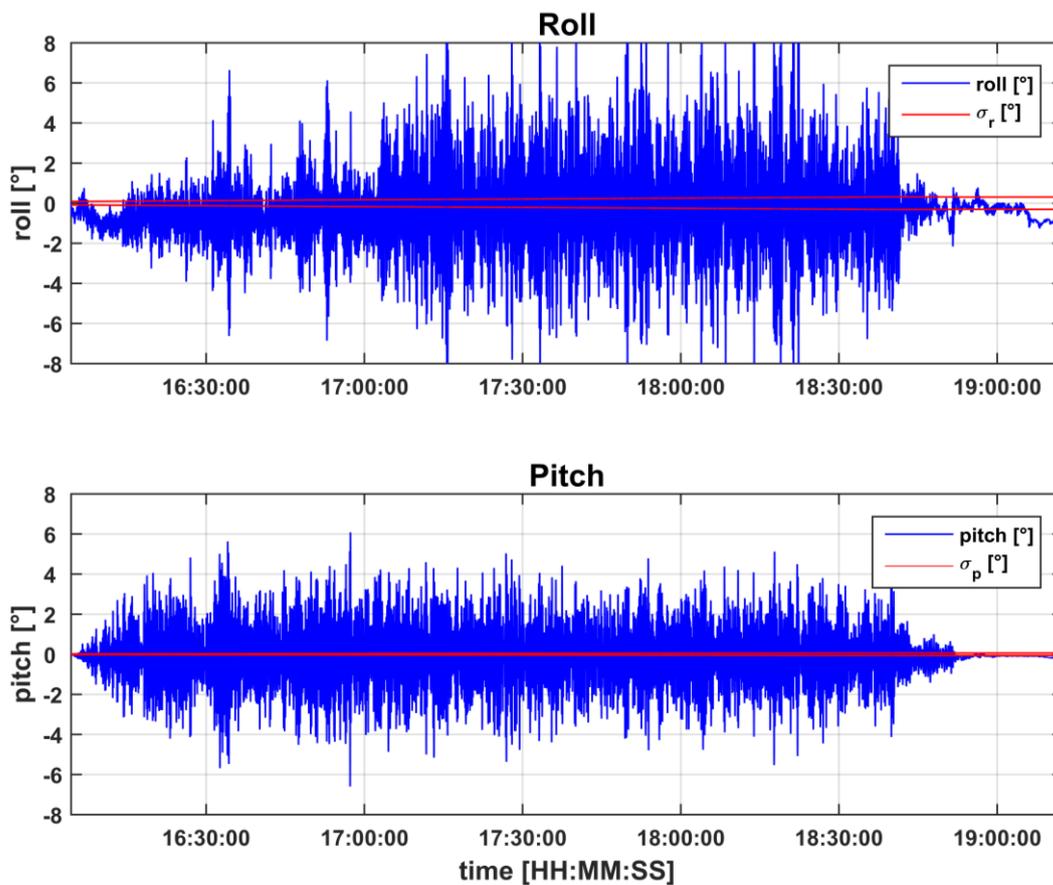


Abb. 8.26: Roll- und Nickwinkel des Fährschiffs mit zugehörigen Standardabweichungen, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Bezogen auf Abbildung 8.26 zeigen sich starke Variationen in Längs- und Querrichtung. Aufgrund des schlechten Wetters an diesem Tag der Messkampagne herrschte ein starker Wellengang, welcher sich deutlich in den Daten widerspiegelt. Eine genauere Analyse des Wellengangs und der daraus resultierenden Roll- und Nickbewegungen des Schiffs ermöglicht eine eigens dafür angefertigte Schiffsanimation. Ein Ausschnitt dieser Animation wird in Abbildung 8.27 präsentiert.

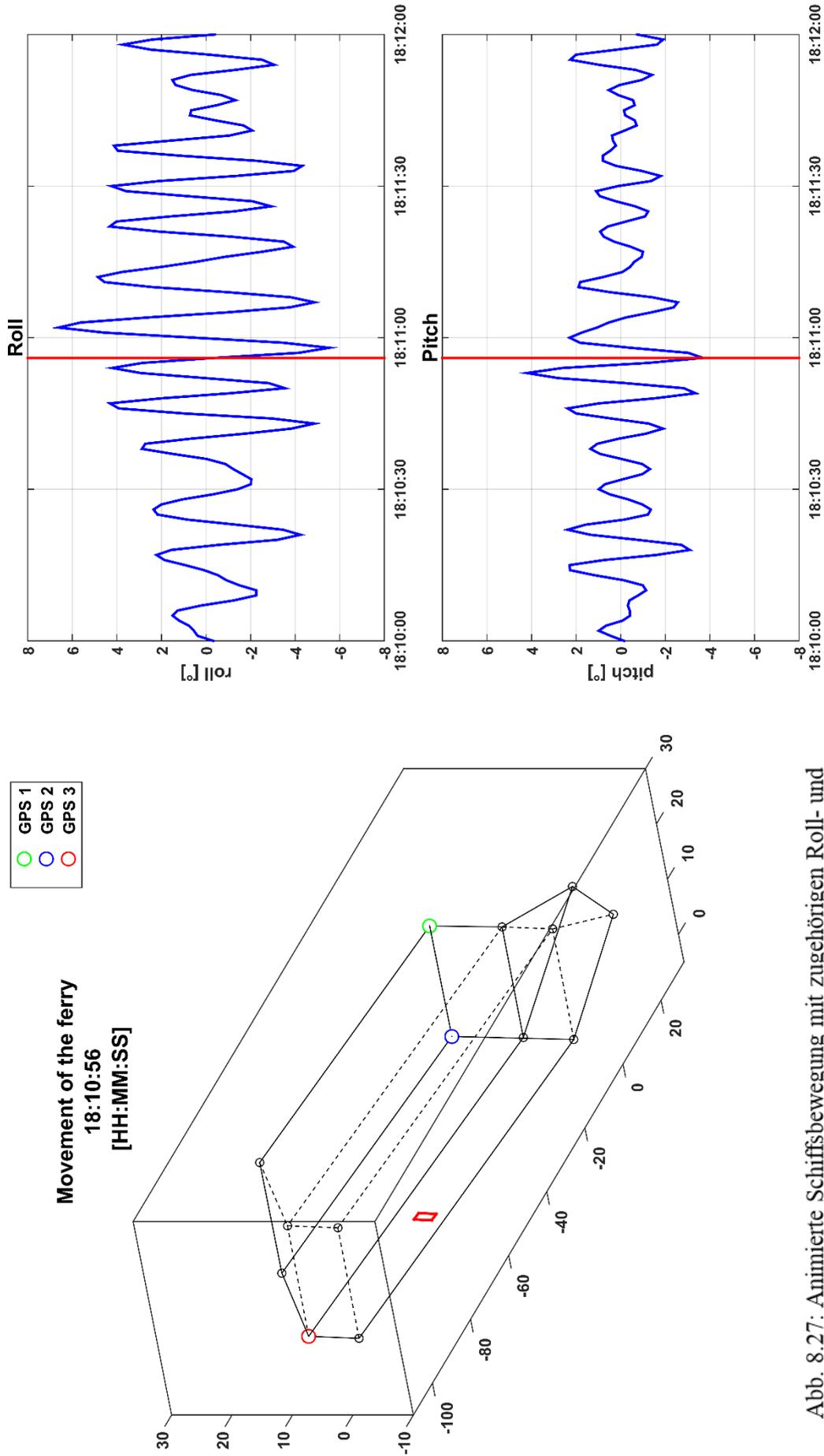


Abb. 8.27: Animierte Schiffsbewegung mit zugehörigen Roll- und Nickwinkeln, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

8.2.3 Strainberechnung zwischen den GPS Antennen

Wie schon für die faseroptischen Sensoren, wird auch für die GPS Sensoren eine Strainberechnung durchgeführt. Für die Berechnung wurde wiederum die räumliche Distanz ρ (vgl. Formel 7.19) zwischen den Antennen benötigt. Durch Subtrahieren der räumlichen Distanz der ersten Epoche ρ_0 von den räumlichen Distanzen aller vorhandenen Epochen ρ_i , erhält man die Längenänderungen $\Delta\rho_i$ zur ersten Epoche. Die Strainvariationen $\Delta\varepsilon_i$ zwischen den GPS Sensoren werden mittels Formel 8.15 berechnet.

$$\Delta\varepsilon_i = \frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} \quad (8.15)$$

Um die Aussagekraft der Strainvariationen zu überprüfen, wurde mittels Varianzfortpflanzung die Standardabweichungen der Strainvariationen $\sigma_{\Delta\varepsilon}$ bestimmt. Dies wurde jeweils in Quer- und Längsrichtung durchgeführt. Wiederum kommt es aufgrund der Variation der Länge der Basislinie zu Änderungen in den Standardabweichungen der GPS Messungen ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_h$). Da diese in die Varianzfortpflanzung zur Berechnung der Standardabweichungen der Strainvariationen $\sigma_{\Delta\varepsilon}$ einfließen, ändert sich auch $\sigma_{\Delta\varepsilon}$ abhängig von der Länge der Basislinie. In Tabelle 10 werden die Minimal- und Maximalwerte der Standardabweichung der Strainvariationen in Quer- und Längsrichtung angegeben.

Tabelle 10: Minimal- und Maximalwerte von $\sigma_{\Delta\varepsilon}$ in Quer- und Längsrichtung

Standardabweichungen der Strainvariationen		
Ausrichtung	min. $\sigma_{\Delta\varepsilon}$ [$\mu\varepsilon$]	max. $\sigma_{\Delta\varepsilon}$ [$\mu\varepsilon$]
quer	± 1328	± 5580
längs	± 288	± 1129

Abbildung 8.28 zeigt die Strainvariationen in Quer-/Längsrichtung zur Fahrtrichtung des Fährschiffs. Deutlich ist hier eine erhöhte Variation quer zur Fahrtrichtung zwischen GPS 1 und GPS 2 ersichtlich. Dies ist auf den deutlich kürzeren Abstand zwischen den Antennen zurückzuführen. Auf Abbildung 7.7 zeigt sich referenzierend, dass der Abstand zwischen GPS 1 und GPS 2 mit 18.65 m deutlich geringer ist als jener in Längsrichtung zwischen GPS 2 und GPS 3 (92.47m). Da beide GPS Paare (im fixed-Bereich) eine Längenabweichung von einigen Zentimetern aufweisen, resultiert die erhöhte Variation eindeutig aus dem geringeren Abstand zwischen den Antennen. Eindeutig ist dies im Zeitraum zwischen 17:50:00 - 18:20:00 zu erkennen, in dem ausschließlich fixed Lösungen zur Verfügung stehen.

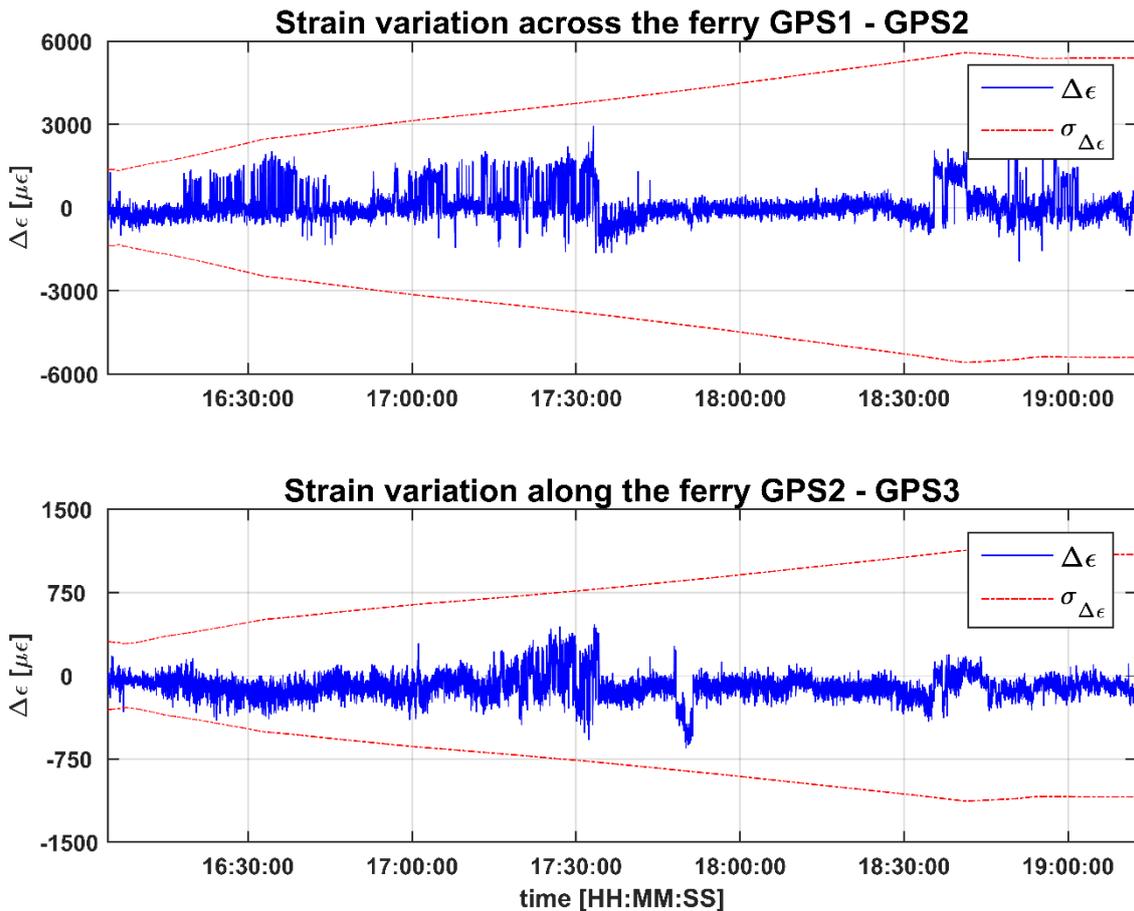


Abb. 8.28: Strainvariation zwischen GPS Antennen in Quer/-Längsrichtung zur Fahrtrichtung, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Es kann deutlich gezeigt werden, dass die Strainvariationen zwischen den GPS Antennen nicht aussagekräftig sind, da die Standardabweichungen viel größer sind als das Signal der Strainvariationen. Dadurch handelt es sich beim Signal der Strainvariationen lediglich um Messrauschen. In Abbildung 8.28 ist des Weiteren die Zunahme der Standardabweichung mit fortschreitender Dauer der Überfahrt zu entnehmen. Dies ist auf die Zunahme der Länge der Basislinie b , während der Überfahrt von Tórshavn ($b \approx 1 \text{ km}$) nach Tvøroyri ($b \approx 52 \text{ km}$), zurückzuführen.

8.2.4 Blockweise FFT

Wie bereits in Kapitel 8.1.6 für die Daten der faseroptischen Sensoren, werden auch für die GPS Daten die FFT blockweise bestimmt. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass die Messfrequenz mit 1 Hz deutlich geringer ist, als dies bei den faseroptischen Daten der Fall ist (1000 Hz). Daher können im Fall der GPS Daten, aufgrund des Shannon-Nyquist Theorems, nur Frequenzen bis 0.5 Hz analysiert werden. Dies erweist sich jedoch nicht als Nachteil, da mit den GPS Daten die durch den Wellengang hervorgerufenen Bewegungen des Schiffs analysiert werden soll. Da ein kompletter Wellendurchgang deutlich länger als 2 Sekunden dauert, erweist sich die Messfrequenz der GPS Daten als durchaus passend. Die Ergebnisse der blockweise durchgeführten FFT für die Höhendaten der GPS Sensoren mit eine Blocklänge von 90 Sekunden werden in Abbildung 8.29 gezeigt.

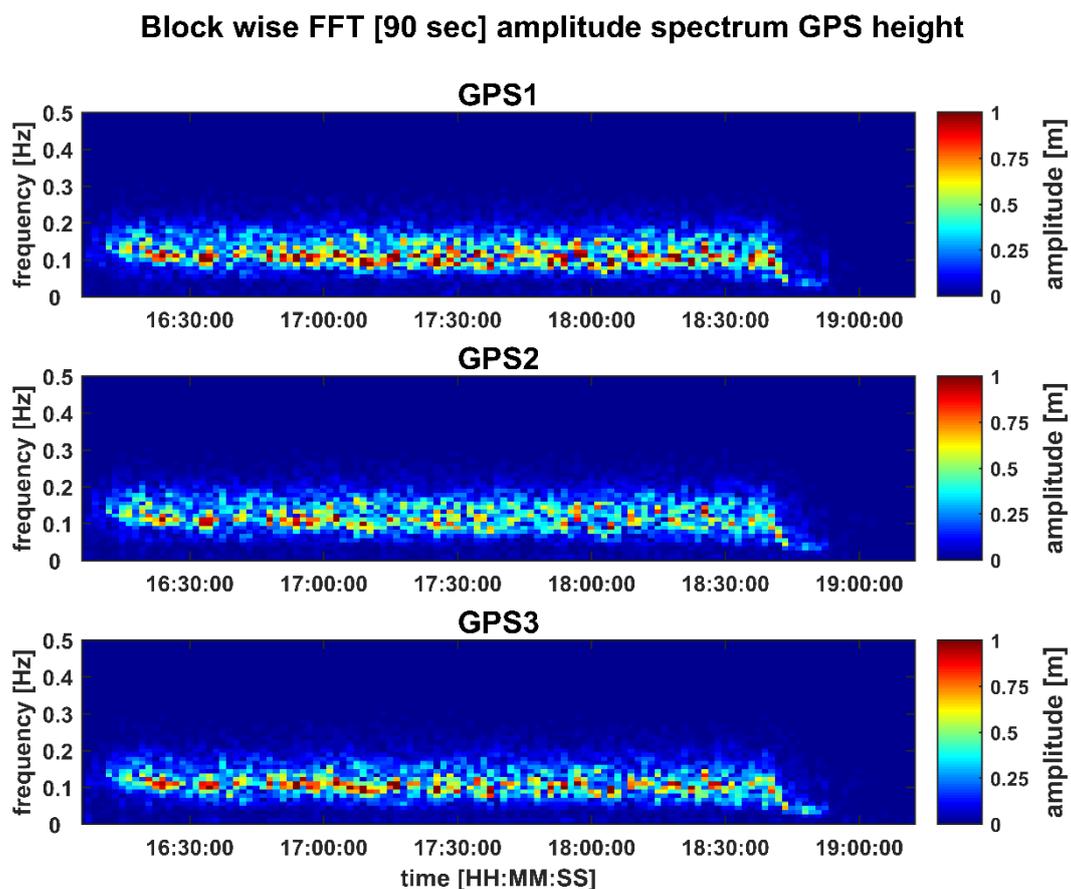


Abb. 8.29: Blockweise FFT [90 sek] der Höhe der GPS Sensoren, 14.2.2018 Überfahrt:
Tórshavn – Tvøroyri

Deutlich kann in allen Darstellungen das Ende der Überfahrt um ca. 18:50:00 festgemacht werden. Die Zu/-Abnahme der Amplitude am Anfang und Ende der Zeitreihe zeigt eindeutig das Verlassen bzw. die Ankunft im geschützten Hafen. Die markantesten Amplituden treten in einem Bereich zwischen 0.1 - 0.13 Herz auf, was einer Periodendauer zwischen 7,5 - 10 Sekunden entsprechen würde.

9 Auswertung mehrerer Sensoren

Kapitel 9 gliedert sich in 5 Unterkapitel. Im ersten Unterkapitel 9.1 werden die statistischen Grundlagen vorgestellt, welche für die Analyse von mehreren Sensoren herangezogen wurden. Dabei wird neben der Regressionsgeraden auch die Kreuzkorrelation näher beleuchtet.

Unterkapitel 9.2 beschäftigt sich mit der Analyse der FBG Sensoren untereinander. Hierbei soll unter anderem eine Analyse dahingehend stattfinden, ob FBG Sensoren, welche dieselbe Ausrichtung haben, auch dieselben Daten aufzeichnen und somit für weiterführende Anwendungen nur einer der Sensoren analysiert werden muss. Des Weiteren werden auch die Korrelationen zwischen Sensoren unterschiedlicher Ausrichtung bestimmt, um einen eventuellen Zusammenhang zwischen horizontalen und vertikalen Einflüssen zu detektieren.

In Unterkapitel 9.3 werden die Korrelationen zwischen jeweils zwei GPS Antennen und deren zeitlicher Versatz bestimmt.

Zum Vergleich der unterschiedlichen Sensorsysteme kommt es in Unterkapitel 9.4. Dabei wird ein Vergleich der Amplitudenspektren zwischen jeweils einem Sensor der zwei Sensortypen durchgeführt. Durch Bestimmung der Korrelation zwischen den beiden Amplitudenspektren kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie gut die Ergebnisse der beiden Sensoren übereinstimmen und welche signifikanten Frequenzen detektiert werden konnten.

Kapitel 9.5 beschäftigt sich mit der Analyse der Störfrequenzen der FBG Sensoren, welche anhand der Einzelauswertung der FBG Sensoren festgestellt wurden.

9.1 Statistische Grundlagen

Die statistischen Grundlagen bilden die Voraussetzung für die weiterführenden Analysen, welche in den Unterkapiteln 9.2 - 9.4 erfolgen.

9.1.1 Regressionsgerade

Das lineare Regressionsmodell wird verwendet, um die Werte einer Variablen (unabhängig) zur Erklärung einer anderen Variablen (abhängig) heranzuziehen. Die lineare Funktion (Gerade) bildet hierbei den Zusammenhang des linearen Regressionsmodells. Die Gerade wird in diesem Kontext auch oft als Regressionsgerade (Formel 9.1) bezeichnet. Ihre Lage lässt sich anhand der Beobachtungen $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ bestimmen.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x \quad (9.1)$$

Da die Regressionsgerade unbekannt ist, müssen die sie beschreibenden Regressionskoeffizienten β_0 und β_1 aus den vorhandenen Beobachtungen geschätzt werden. Dabei wird auf die Methode der kleinsten Quadrate zurückgegriffen. Hierbei wird die Quadratsumme der Residuen minimal gehalten, was der bestmöglichen Anpassung der Geraden an die Daten entspricht. Daraus ergeben sich Formeln (9.2 – 9.3) zur Berechnung der Regressionskoeffizienten.

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9.2)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \cdot \bar{x} \quad (9.3)$$

Bei \bar{x} und \bar{y} handelt es sich jeweils um den Mittelwert des entsprechenden Datensatzes (vgl. Mittag 2016, S. 245 – 251).

Als Maß für den linearen Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen X und Y wird der Korrelationskoeffizient r berechnet.

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9.4)$$

Dabei handelt es sich bei s_{xy} um die Kovarianz und bei s_x bzw. s_y um die Standardabweichung des jeweiligen Merkmals (vgl. Mittag 2016, S. 127 – 128).

Der Korrelationskoeffizient r gibt Auskunft über die Stärke der Korrelation zwischen X und Y. Er kann Werte zwischen $-1 \leq r \leq 1$ annehmen. Dabei wird der obere Grenzfall von $r = 1$ dann erreicht, wenn alle Datenpunkte entlang einer steigenden Geraden liegen. Dabei wird von vollständiger Korrelation gesprochen, was linearer Abhängigkeit entspricht. Im Gegensatz dazu liegen die Datenpunkte bei $r = -1$ entlang einer fallenden Geraden. Der Korrelationskoeffizient r liefert somit ein Maß für den linearen Zusammenhang zwischen den Merkmalen (vgl. Mittag 2016, S. 128 – 130).

Die Anwendung des einfachen Regressionsmodells an die gemessenen Sensordaten wurde wie folgt durchgeführt: In einem ersten Schritt wurden die Daten der beiden zu analysierenden Sensoren entlang der x und y Achse aufgetragen. Dadurch entsteht eine Punktwolke der Daten (Abbildung 9.1). Durch Bestimmung der Regressionskoeffizienten β_0 und β_1 aus den Daten der Sensoren erhält man neben der Steigung der Regressionsgerade β_1 auch den Wert des Ordinatendurchgangs β_0 der Regressionsgeraden. Die Steigung ist hierbei ein Wert, der die Ähnlichkeit der beiden Signale widerspiegelt. Beträgt die Steigung $\beta_1 = 1$, so messen beide Sensoren exakt dasselbe. Daher kann diese Variante herangezogen werden, um festzustellen, ob einer der beiden Sensoren für weitere Analysen vernachlässigt werden kann. Des Weiteren wurde der Korrelationskoeffizient r aus den Daten berechnet, um ein Maß für den linearen Zusammenhang zwischen den Daten zu erhalten. Als Beispiel wird die Regressionsgerade zwischen den Daten der beiden horizontalen FBG Sensoren des Maschinenraums berechnet und in Abbildung 9.1 dargestellt.

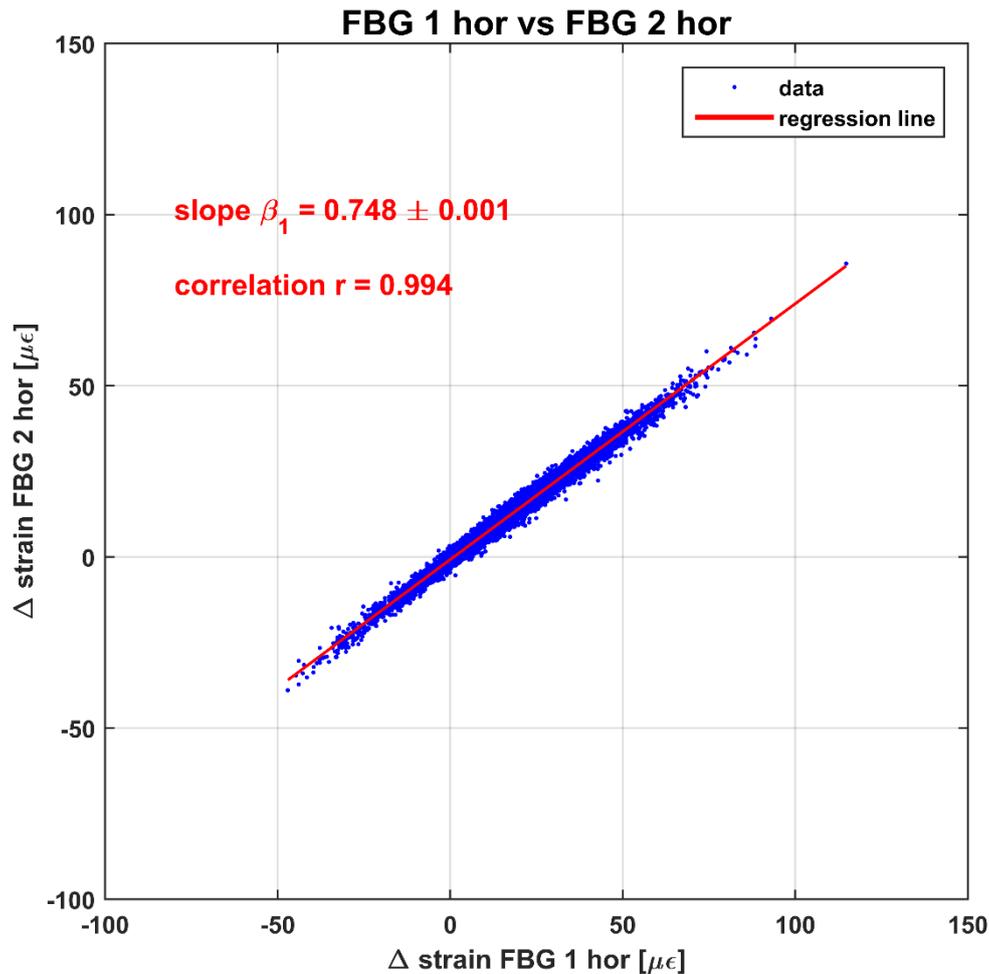


Abb. 9.1: Regressionsgerade zwischen horizontalen FBG Sensoren, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Es zeigt sich das die Datenpunkte entlang der steigenden Geraden angeordnet sind. Dies spiegelt sich auch im Korrelationskoeffizienten wider, welcher mit einem Wert von $r = 0.994$ einer annähernd vollständigen Korrelation entspricht.

9.1.2 Kreuzkorrelation

Oft steht man in der Praxis vor dem Problem, die Ähnlichkeit zwischen zwei Zeitreihen bzw. die zeitliche Verschiebung zwischen den beiden Zeitreihen (an der Stelle der maximalen Ähnlichkeit) zu bestimmen. In diesem Zusammenhang werden einem mit Sicherheit die Begriffe Kreuzkovarianz und Kreuzkorrelation unterkommen. Dabei handelt es sich bei der Kreuzkorrelation um die durch die Varianz normierte Kreuzkovarianz. Für diskrete Zeitreihen x_i , y_i nimmt die Kreuzkovarianz $R_{xy}(\tau)$ folgende Form an (Formel 9.5).

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N + 1} \sum_{i=-N}^{i=+N} x_{i+\tau} \cdot y_i \quad (9.5)$$

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Mittelwert mit Null angenommen wird. Dies wird durch Subtraktion des Mittelwerts von den Daten erreicht. Der Parameter τ bezeichnet die zeitliche Verschiebung zwischen den beiden Zeitreihen. Diese wird auch oft als „lag“ bezeichnet. Da mit

Sensoren nur endlich lange Zeitreihen gemessen werden können (x_i, y_i , mit $i = 0, \dots, N - 1$), geht Formel 9.5 in Formel 9.6 über.

$$R_{xy}(-\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1-\tau} x_i \cdot y_{i+\tau} \quad (\tau = N - 1, \dots, 1)$$

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1-\tau} x_{i+\tau} \cdot y_i \quad (\tau = 0, \dots, N - 1) \quad (9.6)$$

Die Berechnung erfolgt folgendermaßen: Man stellt die beiden Zeitreihen untereinander dar. Die Zeitreihe x bleibt an Ort und Stelle, wohingegen Zeitreihe y schrittweise um τ nach links ($\tau < 0$) bzw. nach rechts ($\tau > 0$) verschoben wird. Dabei werden jeweils die Werte von x und y miteinander multipliziert und die Summe gebildet. Die Lage des Maximums der Kreuzkovarianzfunktion weist auf den zeitlichen Versatz der beiden Zeitreihen hin.

Somit lässt sich durch Normierung der Kreuzkovarianzfunktion $R_{xy}(\tau)$ anhand der Varianz die normierte Kreuzkorrelation bestimmen, welche auch als Kreuzkorrelationskoeffizient $C_{xy}(\tau)$ bezeichnet wird (Formel 9.7).

$$C_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}} \quad (9.7)$$

Wobei es sich bei den Parametern σ_x^2 und σ_y^2 jeweils um die Varianz (Formel 9.8) der entsprechenden Zeitreihe handelt.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 \quad (9.8)$$

Das Maximum des Kreuzkorrelationskoeffizienten $C_{xy}(\tau)$ gibt Auskunft über die Ähnlichkeit zweier Zeitreihen. Haben die beiden Zeitreihen nichts gemeinsam, so sind sie unkorreliert und man erhält einen Kreuzkorrelationskoeffizienten von $C_{xy} = 0$. Sind die beiden Zeitreihen ident, jedoch nur zeitlich verschoben, erhält man $C_{xx} = 1$. Dabei handelt es sich jedoch um die Autokorrelation. Das heißt, je näher der Kreuzkorrelationskoeffizient C_{xy} sich an den Wert 1 annähert, desto höher ist die Korrelation zwischen den beiden Zeitreihen (vgl. Deichmann 2012, S. 47 – 50).

9.2 Analyse FBG vs. FBG

Bei der Analyse der FBG Sensoren wurden jeweils zwei speziell gewählte FBG Sensoren miteinander verglichen. Es wurden sowohl zwei horizontale FBG Sensoren als auch zwei vertikale FBG Sensoren miteinander verglichen. Auch ein möglicher Zusammenhang zwischen vertikalen und horizontalen Sensoren wurde untersucht. Hierbei wurde jeweils die Regressionsgerade zwischen den Daten der gewählten FBG Sensoren berechnet. Sie gibt Auskunft über den linearen Zusammenhang zwischen den gewählten Sensoren.

Regressionsgerade

In Abbildung 9.2 werden die Regressionsgeraden zwischen jeweils zwei gewählten FBG Sensoren dargestellt. Dabei werden die Dehnungsvariationen $\Delta\varepsilon$ [$\mu\varepsilon$] der jeweiligen Sensoren entlang der x bzw. y Achse aufgetragen und eine Punktwolke der Daten entsteht. Aus den Daten kann mit Hilfe der in Kapitel 9.1.1 definierten Formeln die Steigung β_1 der Regressionsgeraden bestimmt werden.

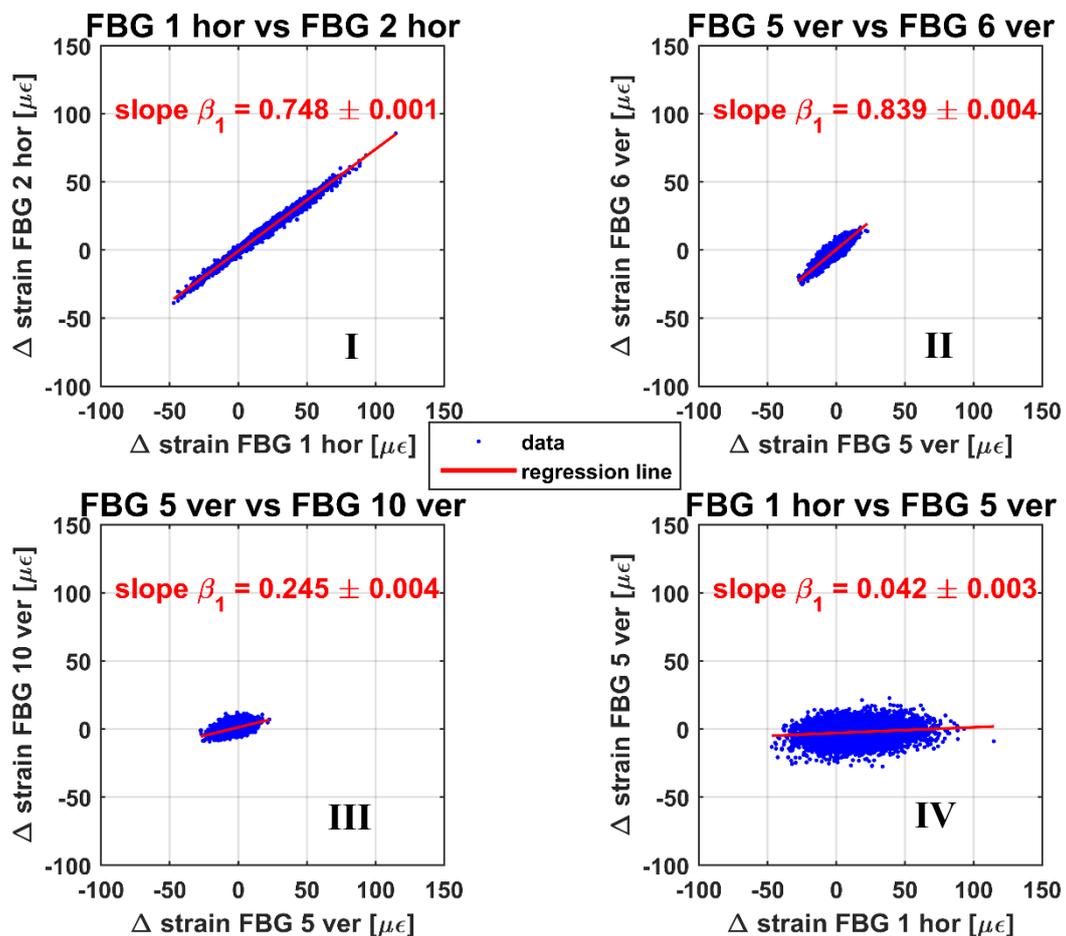


Abb. 9.2 Regressionsgerade zwischen jeweils zwei FBG Sensoren gleicher (I, II, III) oder unterschiedlicher Ausrichtung (IV) und Position, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Bezogen auf Abbildung 9.2 lassen sich folgende Aussagen treffen: Die Steigung der Regressionsgeraden der Sensoren, welche dieselbe Ausrichtung aufweisen, ist nicht gleich 1. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Sensoren an unterschiedlichen Positionen angebracht

wurden und daher unterschiedlichen starken Deformationen unterworfen sind. Betrachtet man die Dehnungsänderungen von FBG 1 hor und FBG 2 hor, sieht man anhand der Darstellung der Regressionsgeraden, dass die Variationen von FBG 1 hor um einiges größer sind als jene von FBG 2 hor, was auch in Abbildung 8.1 ersichtlich ist. Dies führt zum Schluss, dass FBG 1 hor größeren Deformationen unterworfen ist als FBG 2 hor. Selbiges kann auch für den Vergleich der vertikalen Sensoren festgestellt werden. Dabei weist FBG 5 ver eine größere Dehnungsvariation als FBG 6 auf. Damit kann gezeigt werden, dass die Deformationen im unteren Bereich des überwachten Schiffshüllsegments höher sind als jene im oberen Bereich, da sich sowohl FBG 1 hor als auch FBG 5 ver im unteren Bereich befinden. Auch eine Abnahme der Dehnungsvariationen an den Seiten des Schiffshüllsegments wurde untersucht. Dabei wurde die Regressionsgerade zwischen dem FBG 5 ver Sensor und dem FBG 10 ver Sensor berechnet. Anhand der Steigung von $\beta_1 = 0.245$ zeigt sich eine Abnahme der Dehnungsvariation von ca. 75 % des am Rand des Schiffhüllelements angebrachten FBG 10 ver Sensors im Vergleich zum FBG 5 ver Sensor, der in der Mitte angebracht wurde. Beim Vergleich von horizontalen und vertikalen Sensoren zeigt sich eine Steigung von $\beta_1 = 0.04$. Da die horizontalen Dehnungsänderungen (Abbildung 8.1) erheblich größer sind als die vertikalen (Abbildung 8.3) war dieses Ergebnis auch zu erwarten.

Anhand eines Hypothesentest soll die Signifikanz der Steigung belegt werden. Dazu wurde als Nullhypothese $H_0: \beta = 0$ angenommen. Die Alternativhypothese wurde mit $H_a: \beta \neq 0$ festgelegt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde mit $\alpha=0.05$ definiert. Die Testgröße \hat{t} ist Formel 9.9 zu entnehmen.

$$\hat{t} = \frac{\beta_1 - \beta}{s_{\beta_1}} \quad (9.9)$$

Für die Berechnung der Testgröße wird neben der Steigung β_1 auch deren Standardabweichung s_{β_1} benötigt (Formel 9.11). Für die Berechnung der Standardabweichung der Steigung s_{β_1} wird in Formel 9.10 die Varianz der Residuen $\hat{\sigma}^2$ bestimmt.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-2} \cdot \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9.10)$$

$$s_{\beta_1} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (9.11)$$

Bei n handelt es sich um die Anzahl der Messpunkte. Liegt die Testgröße \hat{t} nun außerhalb der kritischen Grenze (Formel 9.12), wird die Nullhypothese H_0 auf dem 5% Signifikanzniveau verworfen.

$$P\{ |\hat{t}| > t_{f,1-\alpha/2} \} = 1 - \alpha \quad (9.12)$$

Es zeigt sich, dass die Nullhypothese in allen vier Fällen (I, II, III, IV) verworfen wird. Daher kann die Steigung in allen vier Fällen signifikant bestimmt werden (vgl. Müller 2006, S. 14 – 15).

Um eine Aussage hinsichtlich der Korrelation zwischen den einzelnen Sensoren treffen zu können wurden die Korrelationskoeffizienten r berechnet. Diese sind in Tabelle 11 ersichtlich.

Tabelle 11: Korrelationskoeffizienten der linearen Regression

Korrelationskoeffizient r der linearen Regression		
Plot	FBG vs. FBG	r
I	hor 1 – hor 2	0.994
II	ver 5 – ver 6	0.909
III	ver 5 – ver 10	0.515
IV	hor 1 – ver 5	0.130

Deutlich zeigen sich die starken Korrelationen zwischen den beiden horizontalen FBG Sensoren (I). Auch zwischen den vertikalen FBG Sensoren (II), die sich in der Mitte befinden, kann eine sehr starke Korrelation festgestellt werden. Jedoch zeigt sich eine deutliche Abnahme im Korrelationskoeffizienten im Fall, dass sich einer der beiden vertikalen Sensoren am Rand des Schiffshüllelements befindet (III). Der bestimmte Korrelationskoeffizient zwischen dem horizontalen und dem vertikalen FBG Sensor (IV) weist einen Wert von $r = 0.13$ auf. Dieser Korrelationskoeffizient zeigt deutlich, dass die Daten der horizontalen und vertikalen FBG Sensoren unkorreliert sind.

Schlussfolgernd kann daher gesagt werden, dass aufgrund der hohen Korrelation zwischen den beiden horizontalen FBG Sensoren, in Bezug auf die weiterführenden Analysen, einer der beiden Sensoren vernachlässigt werden kann.

9.3 Analyse GPS vs. GPS

Hinsichtlich der Analyse der GPS Sensoren wurde neben dem Kreuzkorrelationskoeffizienten auch der zeitliche Versatz zwischen den Signalen der GPS Sensoren bestimmt.

Kreuzkorrelation zwischen GPS Sensoren

Als weiterführende Analyse wurde die Korrelation zwischen den Zeitreihen von GPS 2 und GPS 3 bestimmt. Hierbei wurde mit Hilfe der Kreuzkorrelation der Korrelationskoeffizient $C_{xy}(\tau)$ und der zeitliche Versatz τ zwischen den Signalen bestimmt.

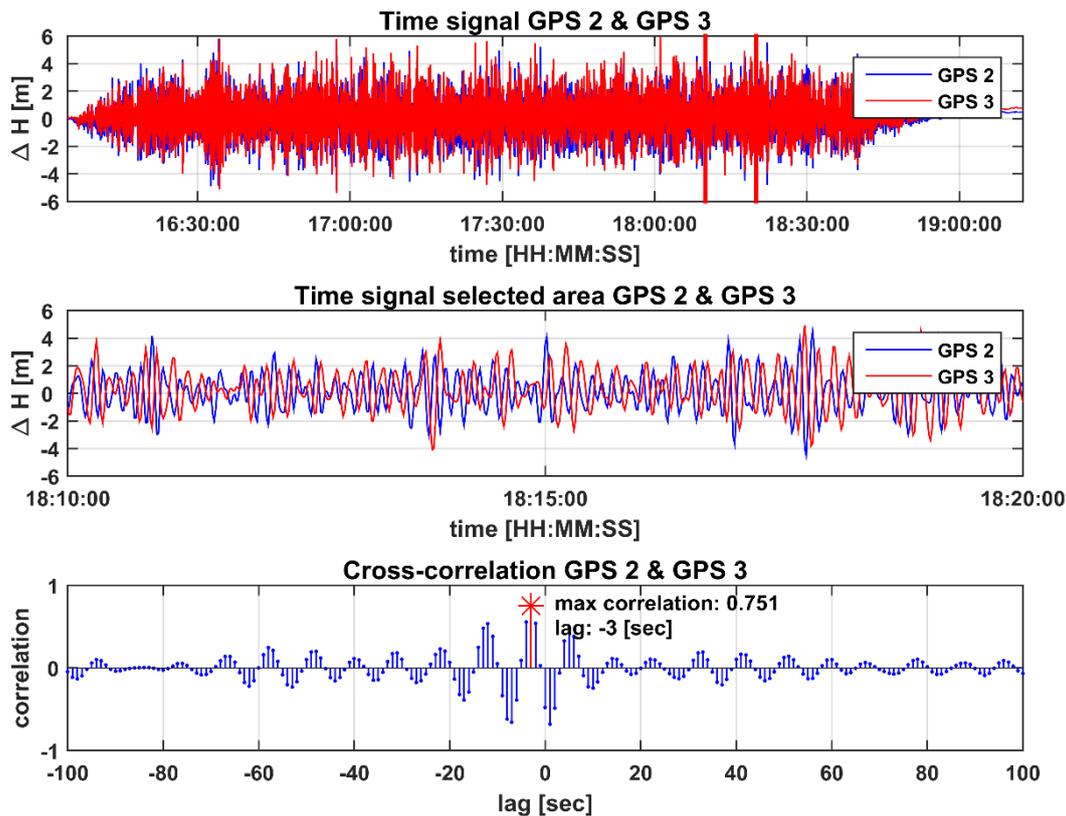


Abb. 9.3: Kreuzkorrelation GPS 2 & GPS 3, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Bei der Auswertung der Kreuzkorrelation wurde darauf geachtet, dass im auszuwertenden Bereich der beiden GPS Sensoren nur phasenfixierte GPS Lösungen vorliegen (Abbildung 7.5). Daher wurde ein Zeitfenster von 18:10 bis 18:20 ausgewählt, welches für die Berechnung herangezogen wurde. Die Berechnung erfolgte nach den in Kapitel 9.1.2 beschriebenen Formeln. Der maximale Korrelationskoeffizient von $C_{xy}(\tau) = 0.751$, bei einem zeitlichen Versatz von $\tau = -3$ sec, weist auf eine hohe Korrelation zwischen den beiden GPS Daten hin. Dies ist nicht verwunderlich, da die GPS Sensoren jeweils ähnliche Höhenvariationen, hervorgerufen durch den Wellengang, aufweisen. Der zeitliche Versatz τ zeigt hierbei, dass eine Wellenspitze von GPS 2 um 3 Sekunden früher als bei GPS 3 auftritt.

Da die Messfrequenz von GPS bei 1 Hz liegt, kann somit der zeitliche Versatz nur in ganzen Sekunden bestimmt werden. Um eine höhere zeitliche Auflösung zu generieren wurden die Höhenänderungen einer Interpolation unterzogen und die Datenrate somit um ein hundertfaches

erhöht. Dadurch kann der zeitliche Versatz in Hundertstelsekunden angegeben werden. Der dadurch bestimmte zeitliche Versatz weist nun einen Wert von $\tau = -3.01$ Sekunden auf. Auch der maximale Korrelationskoeffizient ändert sich minimal zu $C_{xy}(\tau) = 0.752$ (Abbildung 9.4).

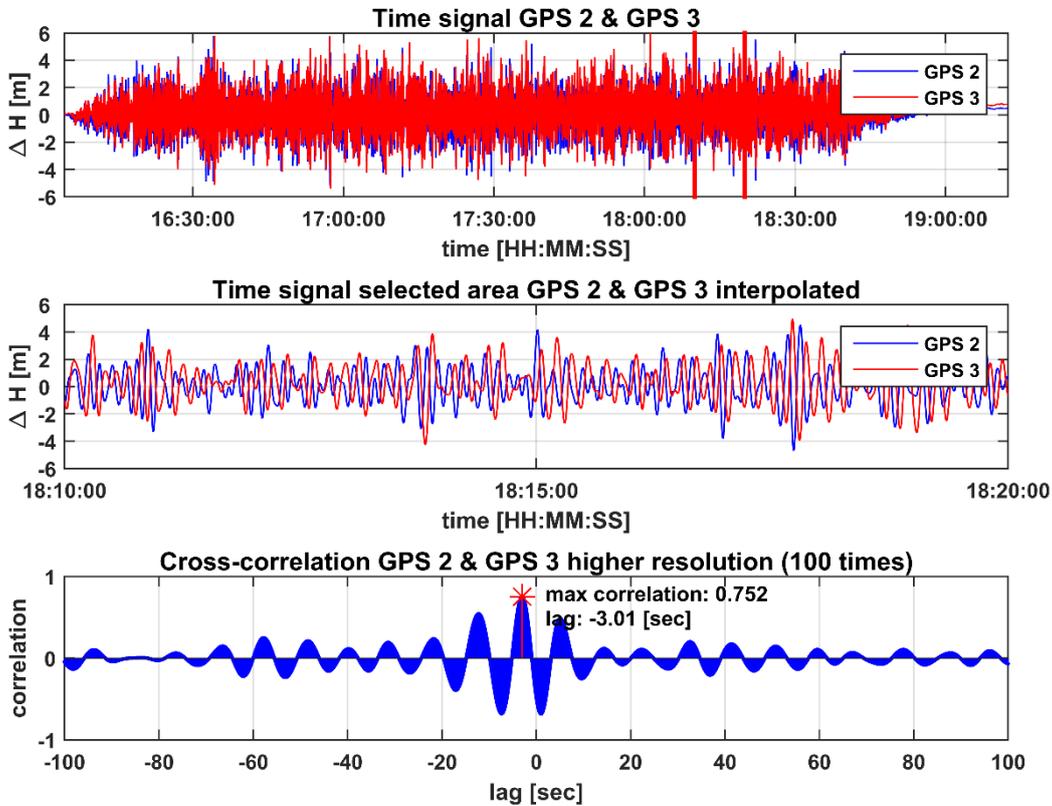


Abb. 9.4: Kreuzkorrelation GPS 2 & GPS 3 mit hundertfach höherer zeitlicher Auflösung durch Interpolation, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

9.4 Analyse GPS vs. FBG

In diesem Kapitel werden die Daten der GPS und der FBG Sensoren miteinander verschnitten. Um ein Verschneiden der Daten zu ermöglichen, mussten die Daten der FBG Sensoren vorab einem Downsampling unterzogen werden, da die Messfrequenz von 1000 Hz deutlich über der Messfrequenz der GPS Daten liegt (1 Hz).

9.4.1 Downsampling mit gleitendem Mittelwert

Für die Datenreduktion wurde ein gleitender Mittelwert verwendet. Dieser bildet für jede Sekunde der Zeitreihe das Mittel aus 1000 Messwerten und ermöglicht somit eine Reduktion der Datenrate auf 1 Hz. Dabei wird eine Glättung der Messdaten erzielt. Das Downsampling wurde durchgeführt, um die Amplitudenspektren der beiden Sensortypen besser miteinander vergleichen zu können, da sie sich nun im selben Frequenzbereich befinden.

9.4.2 Vergleich der Amplitudenspektren

Der Vergleich der Amplitudenspektren soll Auskunft darüber geben, ob die beiden Sensortypen, welche auf vollkommen unterschiedlichen Messprinzipien basieren, ein ähnliches Amplitudenspektrum aufweisen. Hierzu werden die Höhenvariationen eines GPS Empfängers sowohl mit den Daten eines horizontalen als auch vertikalen FBG Sensors verglichen.

Analyse H GPS 1 und FBG 1 horizontal

Durch Frequenzanalyse mittels FFT für einen gewählten Zeitbereich in dem ausschließlich phasenfixierte Lösungen zur Verfügung stehen, konnten die beiden Amplitudenspektren generiert werden (Abbildung 9.5).

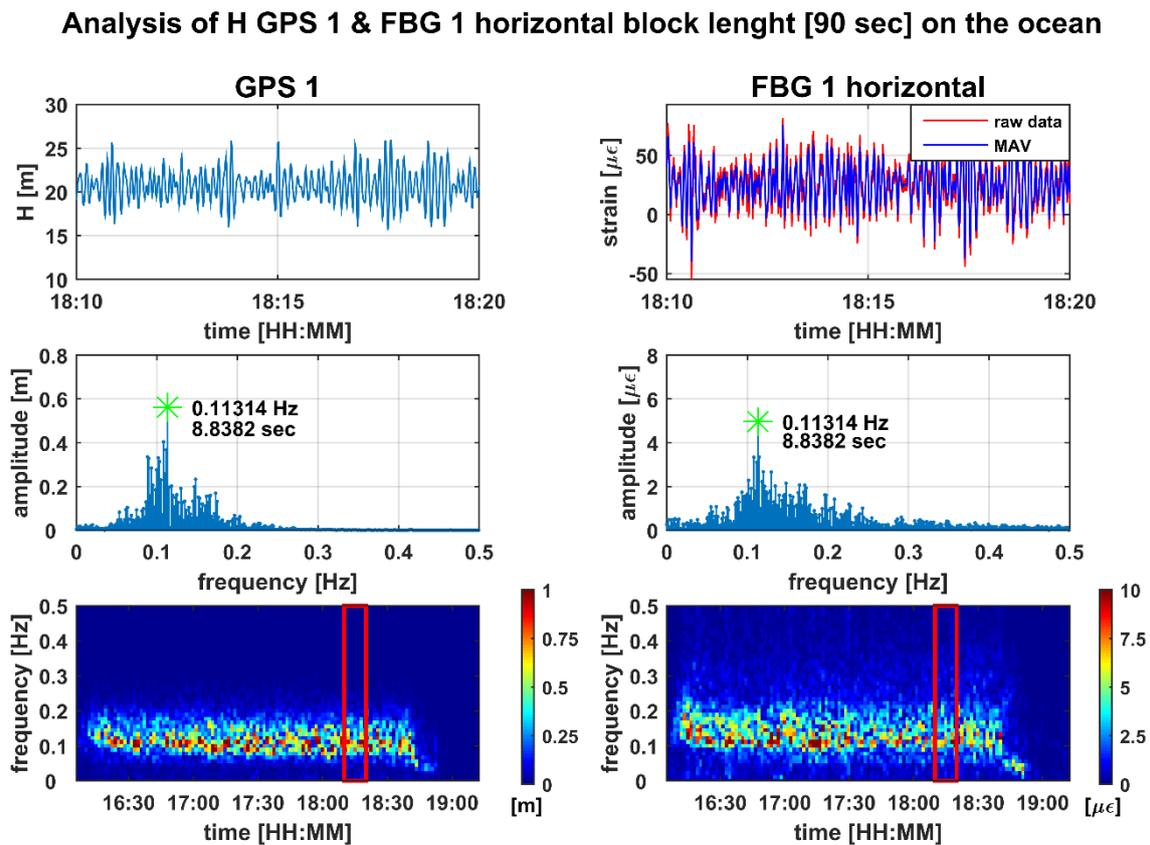


Abb. 9.5: Vergleich der Amplitudenspektren H GPS 1 & FBG 1 hor [18:10:00 – 18:20:00], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Im Zeitraum der Auswertung befindet sich das Fährschiff auf dem rauen Ozean. Eindeutig zeigt sich hier eine sehr gute Übereinstimmung der Amplitudenspektren der beiden Sensorensysteme. Zur Auswertung wurden hierbei neben dem horizontalen FBG 1 Sensor auch die Höhenvariationen des GPS 1 Sensors herangezogen. Der Hauptpeak der Amplitude kann für beide Sensoren bei einer Frequenz von ca. 0.113 Hz festgemacht werden. Dies entspricht einer Periodendauer von ca. 8.8 Sekunden entspricht.

Für eine nähere Analyse der Amplitudenspektren der beiden Sensortypen wurden die Spektren in drei Bereiche unterteilt und in jedem dieser Bereiche die Frequenz der maximalen Amplitude bestimmt. Dies ist Abbildung 9.6 zu entnehmen.

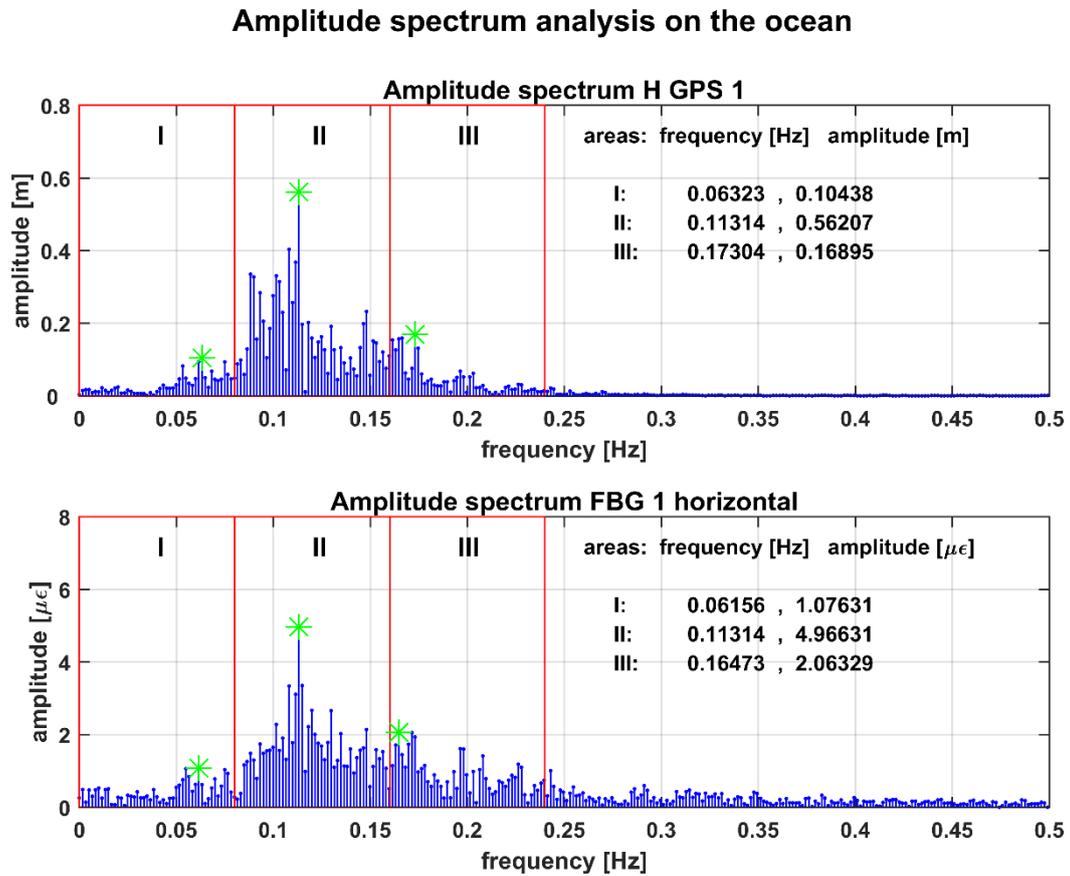


Abb. 9.6: Analyse der Amplitudenspektren von H GPS 1 & FBG 1 hor [18:10:00 – 18:20:00], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Da die bestimmten Amplituden in völlig unterschiedlichen Größenordnungen vorliegen, wurden die Amplitudenspektren so skaliert, dass sie einen Vergleich der beiden ermöglichen. Der Vergleich des ersten Bereiches, der von 0 – 0.08 Hz reicht, zeigt, dass sich die Amplitudenspektren ab einer Frequenz von 0.04 Hz sehr ähnlich sind. Davor sind die Amplituden des FBG Sensors etwas ausgeprägter. Die Frequenz der Maximalamplitude in Bereich I weist nur einen geringen Unterschied auf. Bereich II beinhaltet die Maximalamplitude des Spektrums. Die Frequenz kann für beide Sensoren mit 0.113 Hz festgelegt werden. Im Bereich von 0.08 – 0.1 Hz zeigt der GPS Sensor größere Amplituden als der FBG Sensor. Betrachtet man den Bereich [0.12 – 0.16 Hz] nach der Frequenz der Maximalamplitude, liegt hier der umgekehrte Fall vor. Auch Bereich III weist größere Amplitudenwerte des FBG Sensors auf. Die Frequenzen der Maximalamplituden liegen in Bereich III deutlicher weiter voneinander entfernt als in Bereich I.

Zwar kann anhand des Vergleichs der Amplitudenspektren gezeigt werden, dass sich die Spektren durchaus ähnlich sind, jedoch kann keine Maßzahl dafür angegeben werden. Daher wurde die Kreuzkorrelation zwischen den Amplitudenspektren bestimmt, um einen Wert für die Stärke der Korrelation zwischen den beiden Sensorsystemen angeben zu können. Abbildung 9.7 zeigt neben der Überlagerung der Amplitudenspektren die Kreuzkorrelationsfunktion.

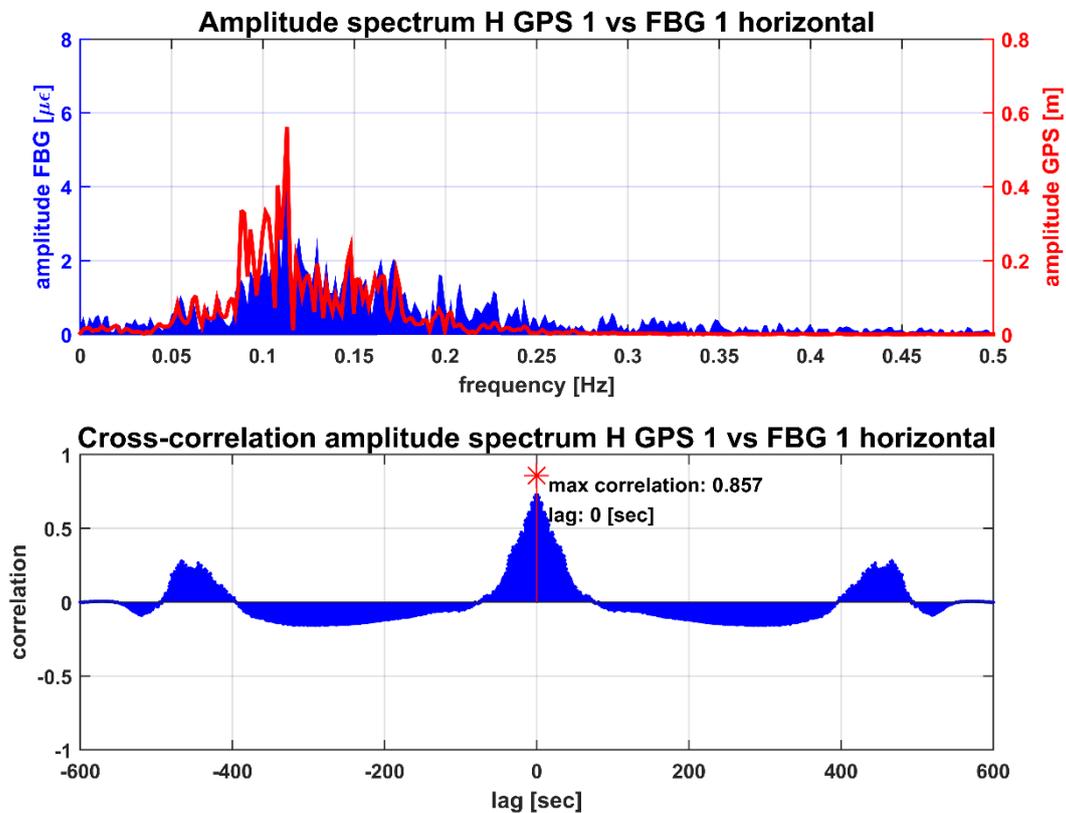


Abb. 9.7: Kreuzkorrelation zwischen den Amplitudenspektren von H GPS 1 & FBG 1 hor [18:10:00 – 18:20:00], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Abbildung 9.7 kann somit ein Korrelationskoeffizient von 0.857 entnommen werden, welcher eine starke Korrelation zwischen den beiden Sensorsystemen zeigt.

Analyse H GPS 2 und FBG 5 vertikal

Analog zum horizontalen Sensor soll die Bestimmung der Korrelation auch für einen vertikalen FBG Sensor durchgeführt werden. Gewählt wurde hierbei der vertikale FBG 5 Sensor, welcher sich in der Mitte des Schiffshüllelements befindet. Um zu zeigen, dass auch die unterschiedlichen GPS Sensoren ein ähnliches Verhalten aufweisen, wurde anstelle des GPS 1 Sensors der GPS 2 Sensor analysiert. Die Gegenüberstellung der Zeitreihen, der Amplitudenspektren und der blockweisen FFTs der beiden Sensoren ist Abbildung 9.8 zu entnehmen. Die Analyse wurde für denselben Zeitbereich, wie bereits für den Vergleich des horizontalen FBG 1 Sensors mit der Höhenvariation von GPS 1, durchgeführt.

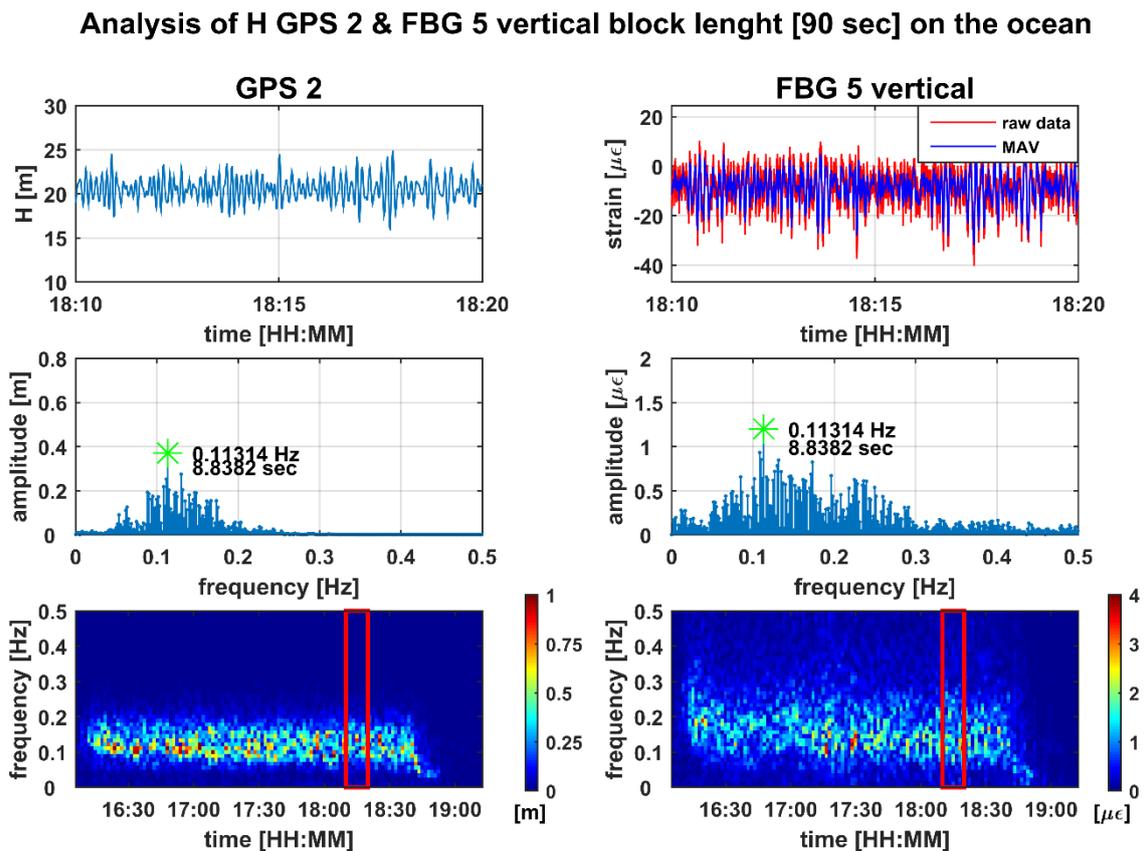


Abb. 9.8: Vergleich der Amplitudenspektren H GPS 2 & FBG 5 ver [18:10:00 – 18:20:00], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Auch in Abbildung 9.8 können die Hauptpeaks der Amplituden bei einer Frequenz von 0.113 Hz detektiert werden. Jedoch zeigen sich geringere Ähnlichkeiten in den Verläufen der Amplitudenspektren, als dies beim Vergleich des horizontalen FBG 1 Sensors mit den Höhenvariationen des GPS 1 Sensors der Fall ist.

Auf einen Vergleich der Amplitudenspektren, wie in Abbildung 9.6, wurde an dieser Stelle verzichtet und die Amplitudenspektren wurden direkt übereinandergelegt (Abbildung 9.9).

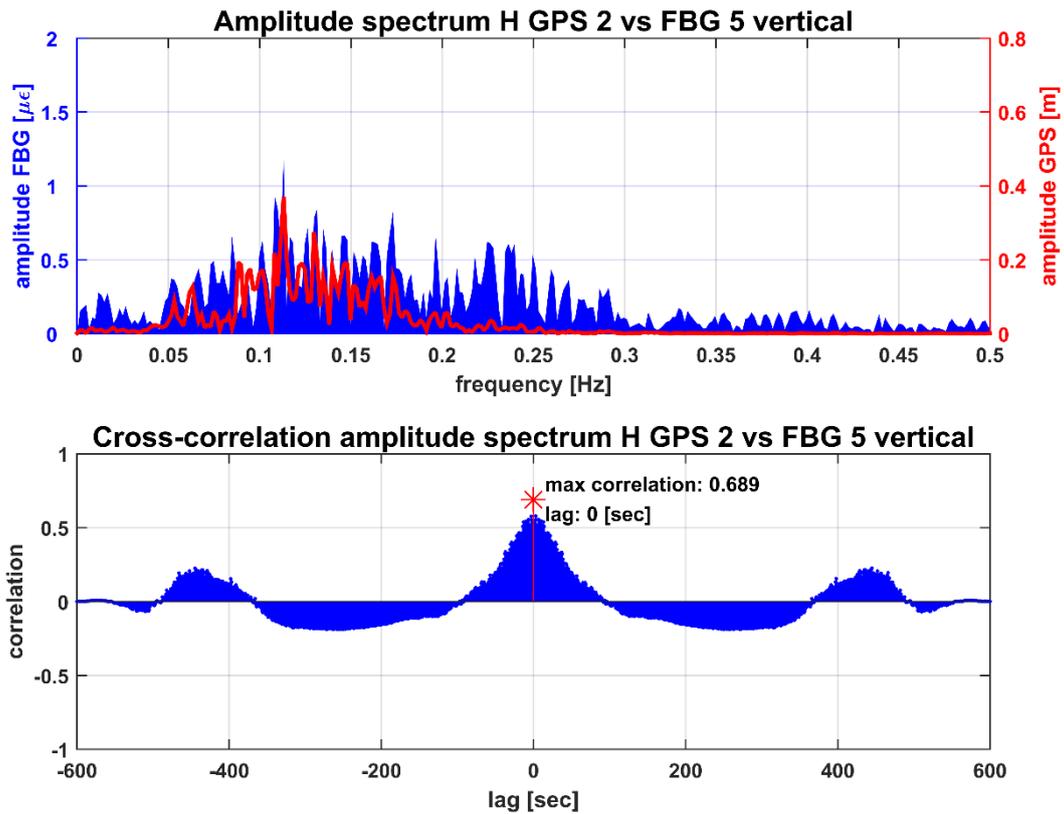


Abb. 9.9: Kreuzkorrelation zwischen den Amplitudenspektren von H GPS 2 & FBG 6 ver [18:10:00 – 18:20:00], 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Im Vergleich zu Abbildung 9.7 treten hierbei größere Abweichungen zwischen den Amplitudenspektren auf. Dies spiegelt sich auch im Kreuzkorrelationskoeffizienten wider. Der Wert liegt bei 0.68 und ist somit deutlich kleiner als jener zwischen dem horizontalen FBG 1 und dem GPS 1 Sensor (0.857). Jedoch zeigt der Wert immer noch eine recht starke Korrelation zwischen dem vertikalen FBG 6 Sensor und den Höhenvariationen von GPS 2.

Lag zwischen GPS und FBG Sensoren aus Kreuzkorrelation

Bereits in Kapitel 9.3 wurde der zeitliche Versatz τ zwischen den Höhenunterschieden zweier GPS Sensoren berechnet. Für den betrachteten Zeitbereich von 18:10:00 bis 18:20:00 ergab sich dabei ein zeitlicher Versatz der Signale von $\tau = -3$ sec. Da in diesem Kapitel beide Sensortypen verglichen werden, soll eine Kreuzkorrelation zwischen jeweils einem GPS und FBG Sensor durchgeführt werden, um sowohl den zeitlichen Lag τ als auch die Stärke der Korrelation zu bestimmen. Dabei wird die Analyse einerseits für einen GPS Sensor mit einem horizontal angebrachten und andererseits mit einem vertikal angebrachten FBG Sensor durchgeführt.

Die Kreuzkorrelation zwischen dem GPS 2 und dem horizontalen FBG 1 Sensor zeigt einen Kreuzkorrelationskoeffizient von $C_{xy}(\tau) = 0.654$ (Abbildung 9.10). Der zeitliche Versatz zwischen den Signalen beträgt $\tau = 12$ sec.

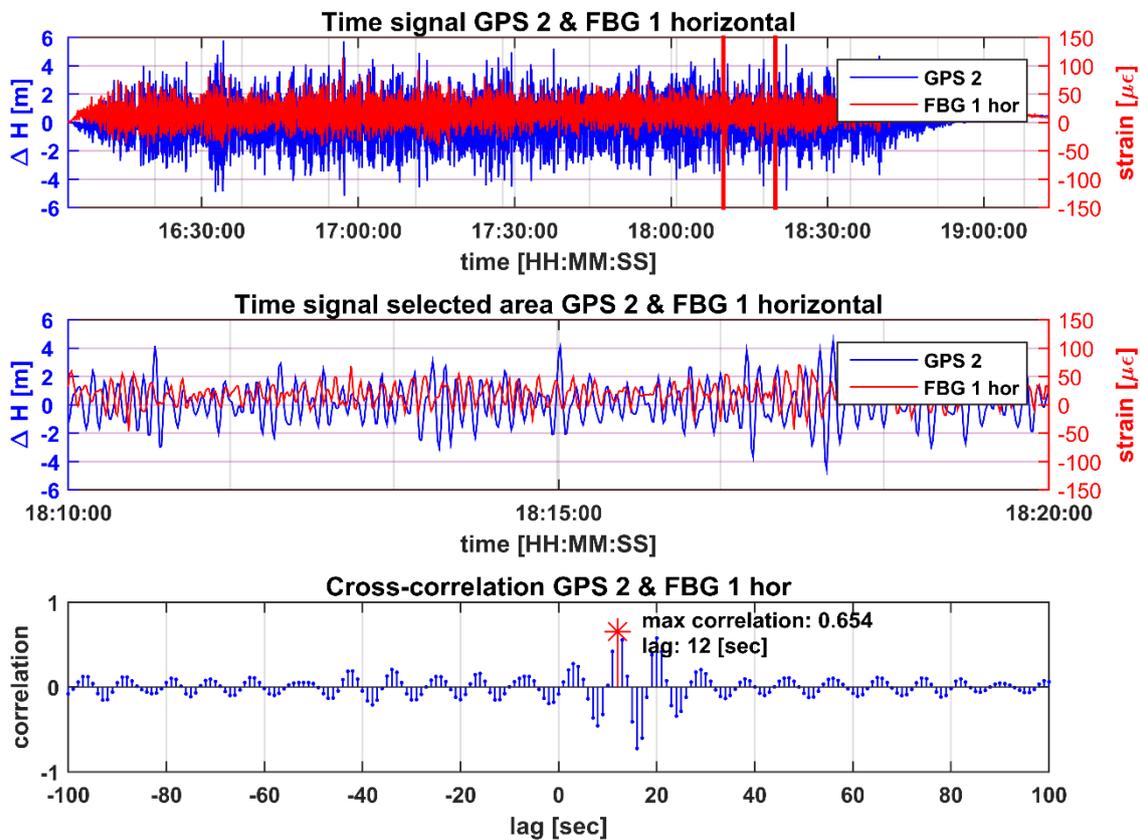


Abb. 9.10: Kreuzkorrelation zwischen H GPS 2 & FBG 1 hor [18:10:00 – 18:20:00],
14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

In Bezug auf die Kreuzkorrelation zwischen dem GPS 2 und dem vertikalen FBG 5 Sensor konnte ein Korrelationskoeffizient von $C_{xy}(\tau) = 0.487$ (Abbildung 9.11) bestimmt werden. Die Korrelation ist deutlich geringer als jene zwischen dem horizontalen FBG 1 und dem GPS 2 Sensor. Der zeitliche Versatz zwischen dem vertikalen FBG 5 und dem GPS 2 Sensor weist einen Wert von $\tau = 11$ sec auf.

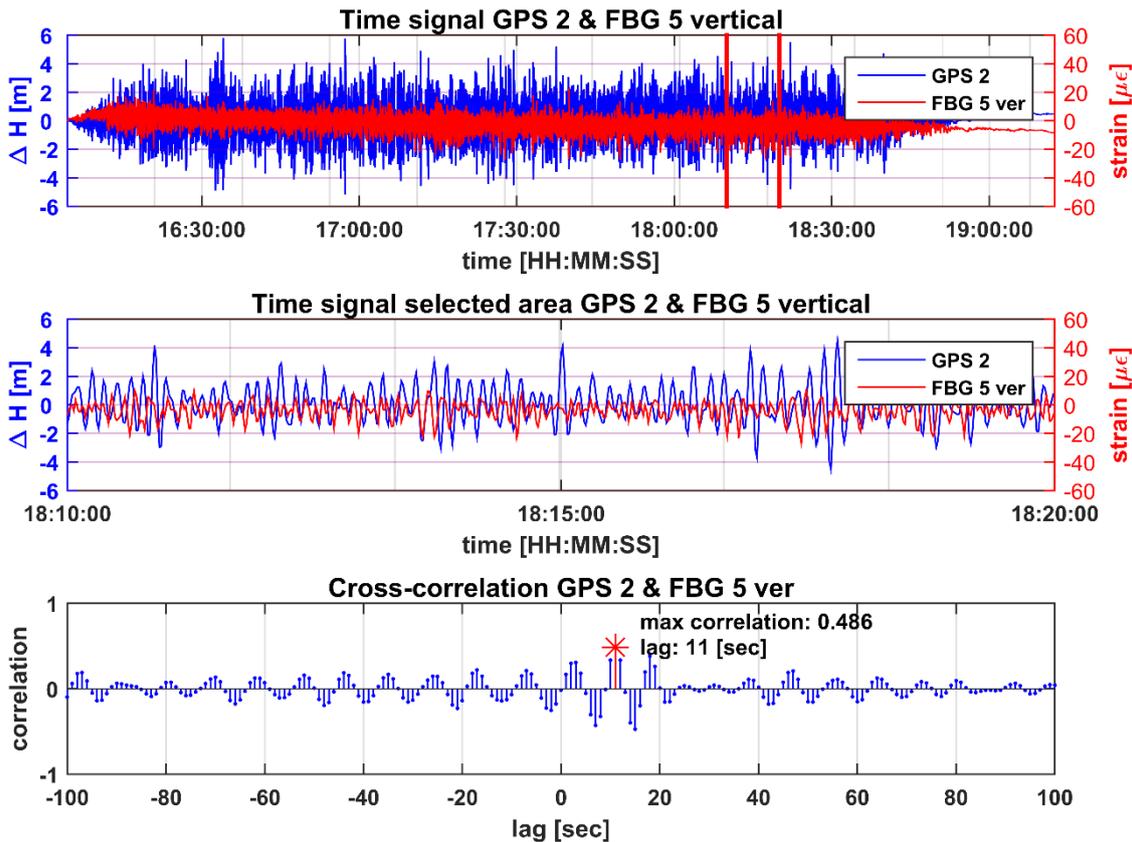


Abb. 9.11: Kreuzkorrelation zwischen H GPS 2 & FBG 5 ver [18:10:00 – 18:20:00],
14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

9.4.3 Vergleich der Strainwerte

Da für beide Sensortypen der zeitliche Verlauf der Dehnungen berechnet wurde, kommt es nun zum Vergleich der Dehnungswerte der beiden Sensortypen. Dabei werden die Dehnungen des horizontalen FBG 1 Sensors mit den berechneten Dehnungen zwischen den GPS Antennen 2 und 3 verglichen. Da die sensitive Achse des horizontalen FBG 1 Sensors in Längsrichtung zum Schiff verläuft und dies auch für die berechneten Dehnungen zwischen den GPS Sensoren der Fall ist, sollte somit ein ähnliches Verhalten in den Dehnungen detektiert werden können (Abbildung 9.12).

Jedoch kann anhand Abbildung 9.12 ein deutlicher Unterschied in den bestimmten Dehnungswerten festgemacht werden. Die Dehnung zwischen den GPS Antennen zeigt sehr deutliche Variationen, welche weit von jenen des horizontalen FBG Sensors entfernt liegen. Dieses Verhalten ist auf die unterschiedlichen Messgenauigkeiten der beiden Messsysteme zurückzuführen. Des Weiteren sind die Standardabweichungen der Dehnungsvariationen (GPS), deutlich größer als das Signal der Dehnungsvariationen zwischen den GPS Antennen selbst. Das bedeutet, dass das Signal lediglich aus Messrauschen besteht. Dadurch kann keine Aussage hinsichtlich der Übereinstimmung der beiden Dehnungsvariationen getroffen werden.

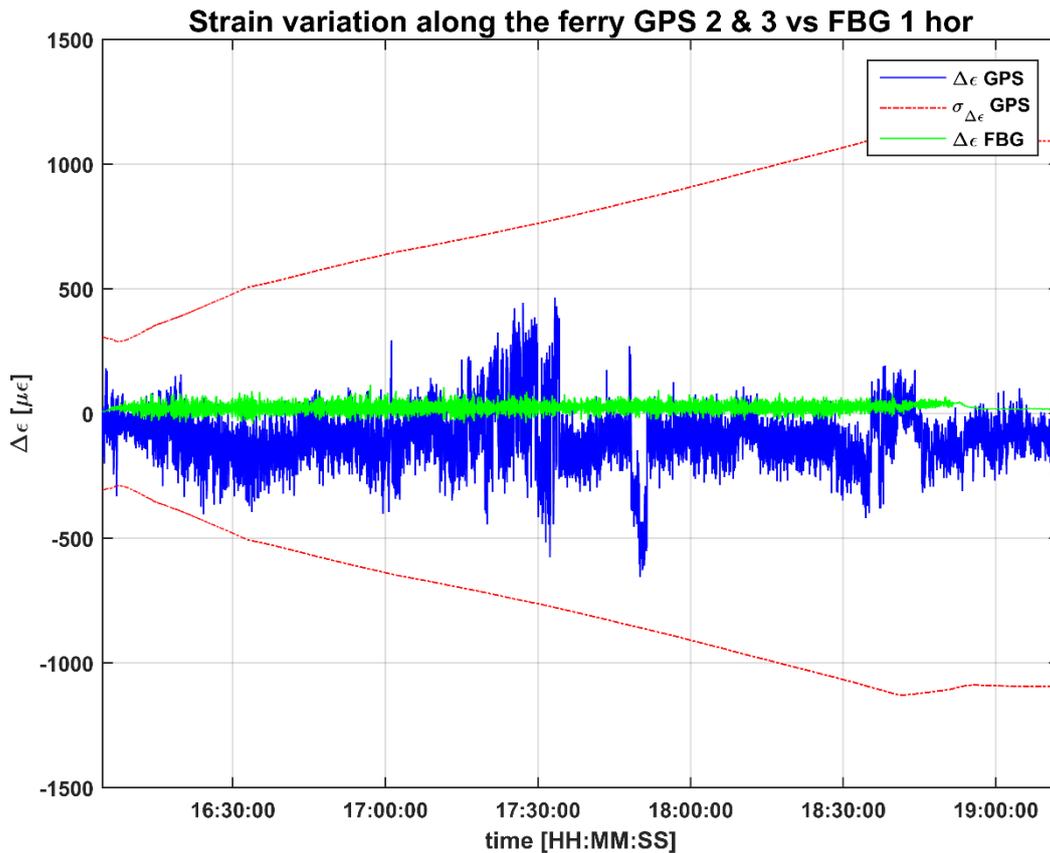


Abb. 9.12: Vergleich der Dehnungsvariationen zwischen GPS 2-3 und FBG 1 hor in Längsrichtung zum Schiffs, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

9.4.4 Schiffsanimation und Deformationen im Maschinenraum

Die Visualisierung der Deformationen im Maschinenraum wurde anhand einer Animation durchgeführt. Dabei wurden die Dehnungen aller FBG Sensoren im Maschinenraum berechnet. Aus diesen konnte einerseits die Größe und Ausrichtung der Strainellipse berechnet werden (Kap. 8.1.7) und andererseits die Deformation der Schiffswand anhand der Dehnungen der vertikal angebrachten FBG Sensoren gezeigt werden. Auch die aktuelle Ausrichtung des Schiffs kann der Animation entnommen werden. Einzelergebnisse dieser Animation sind in den Abbildungen 9.13 und 9.14 ersichtlich. Diese spiegeln die Maxima und Minima des Nickwinkels p des Schiffs für den Zeitbereich der Animation [18:10:00 - 18:12:00] wider. Deutlich zeigen sich bei maximalem Nickwinkel negative Deformationen, wohingegen bei negativem Nickwinkel positive Deformationen festzumachen sind. Auch die Ausrichtung der Strainellipse ändert sich in beiden Extremfällen.

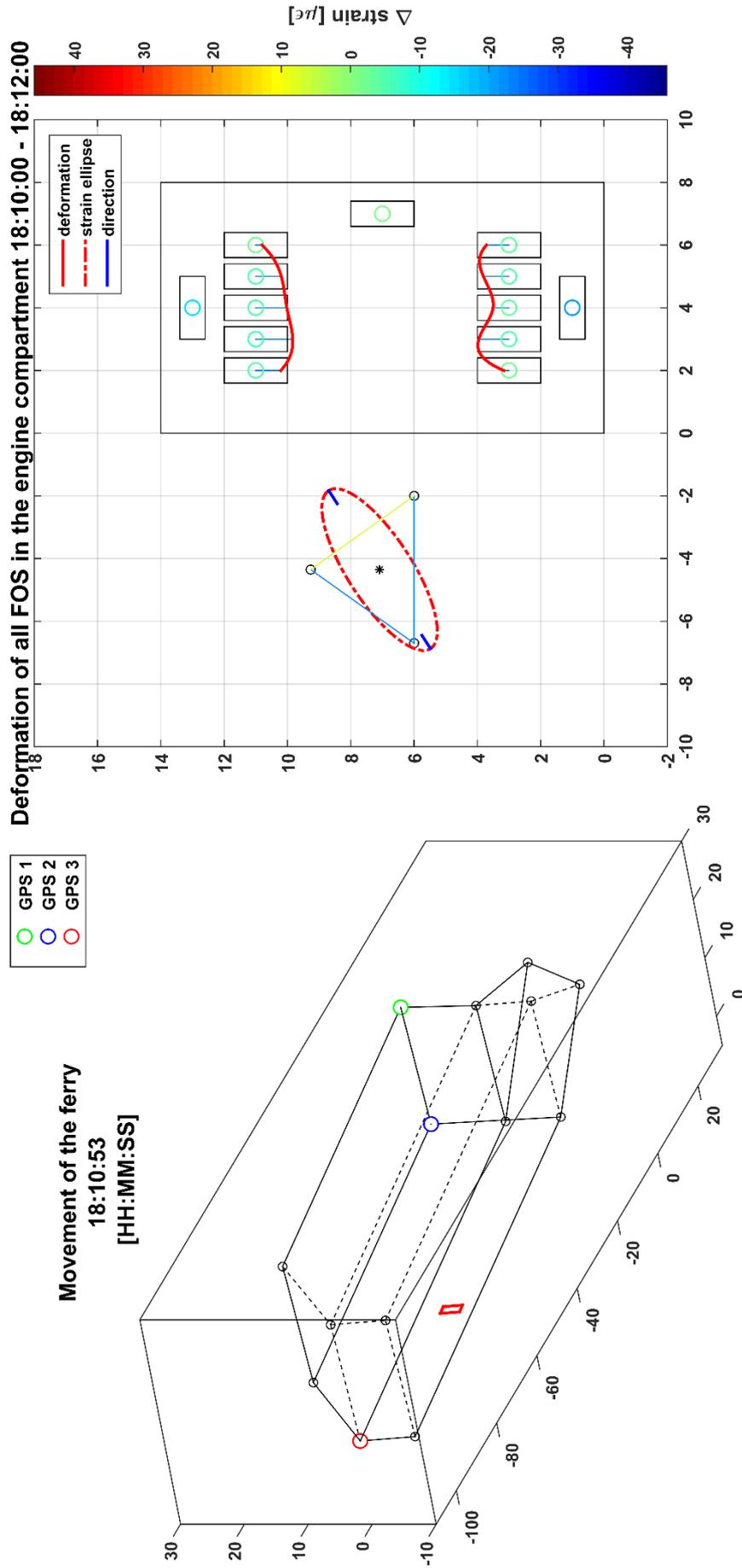


Abb. 9.13: Animierte Schiffsbewegung mit Deformationen des Maschinenraums (maximaler Nickwinkel), 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

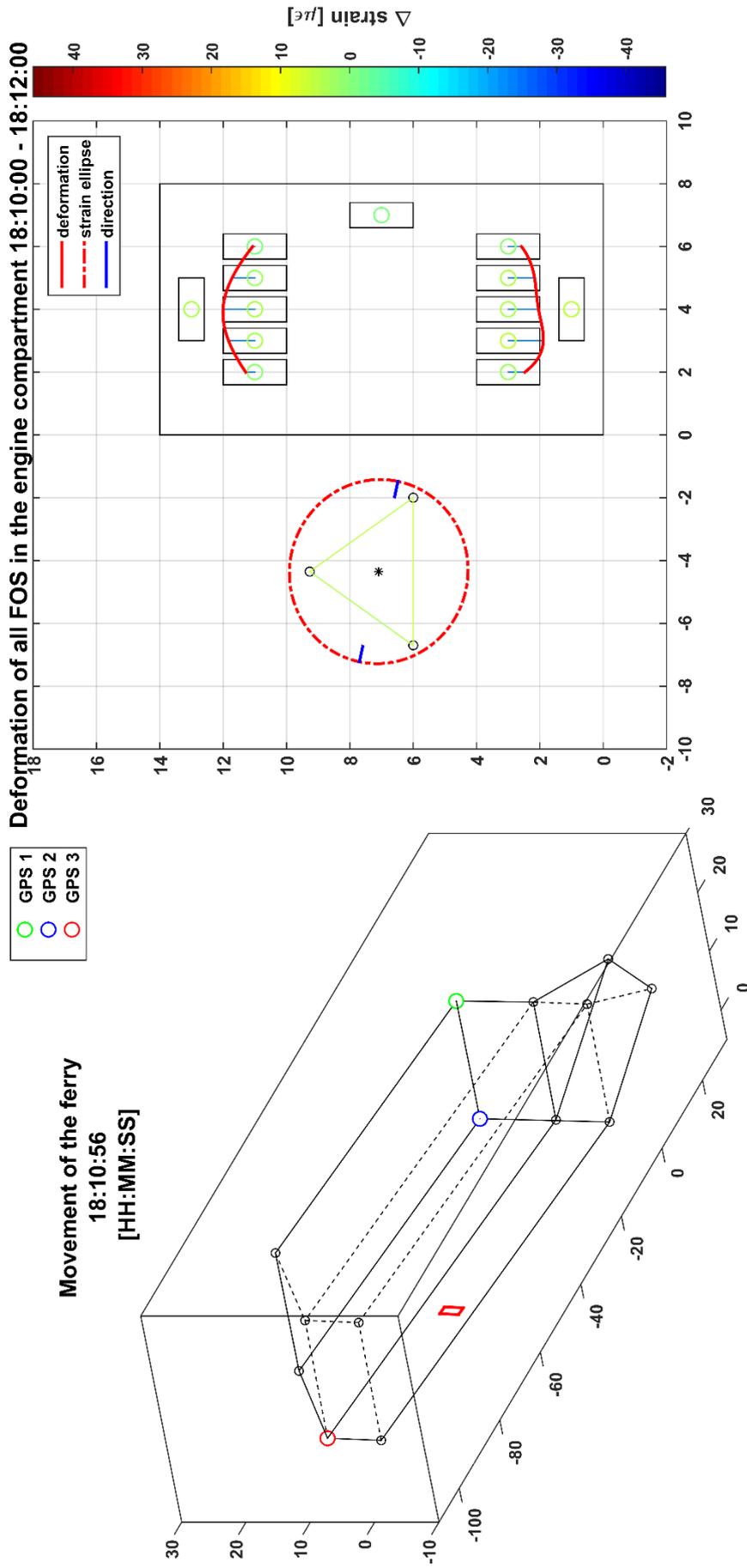


Abb. 9.14: Animierte Schiffsbewegung mit Deformationen des Maschinenraums (minimaler Nickwinkel), 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

9.5 Analyse Störfrequenz

Bereits in Kapitel 8.1.6 wurden im hochfrequenten Bereich des blockweisen Amplitudenspektrums der FBG Sensoren des Maschinenraums Störfrequenzen detektiert. Diese werden in diesem Kapitel hinsichtlich ihres Verhaltens untersucht. Dazu mussten die hochfrequenten Anteile des Signals von den niederfrequenten getrennt werden. Dies erfolgte durch eine Hochpassfilterung.

9.5.1 Hochpassfilterung und Rekonstruktion des Störsignals

Bei der Hochpassfilterung wird nur jener Bereich an Frequenzen eines Signals durch einen Filter gelassen, welcher über der sogenannten Sperrfrequenz liegen. Alle darunterliegenden Frequenzen werden aus dem Signal entfernt. Dadurch wird es möglich das Störsignal aus der blockweisen FFT zu rekonstruieren. Dabei werden die Frequenzen der maximalen Amplituden für jeden einzelnen Block der blockweisen FFT bestimmt. Durch die Aneinanderreihung der Frequenzen der Amplitudenmaxima über die Zeit erhält man die rekonstruierte Zeitreihe des Störsignals. Zur Bestimmung der Stärke des Störsignals wurde zusätzlich der Median der Maximalamplituden gebildet, um einen Vergleich der Intensität der Störfrequenz zwischen den einzelnen FBG Sensoren zu gewährleisten. Des Weiteren wurden die Minimal- und die Maximalfrequenz bestimmt.

9.5.2 Amplitudenspektrum

Auch für das generierte Störsignal wurde eine Frequenzanalyse mittels Fast Fourier Transformation durchgeführt, um die dominanten Frequenzen des Signals bestimmen zu können. Die Beobachtungsdauer wurde dabei auf 10 Sekunden festgelegt, da es sich hierbei, im Vergleich zu den Analysen des Wellengangs [90 sec], um hochfrequente Variationen handelt. Dabei musste jedoch darauf geachtet werden, dass aufgrund der Blocklänge von 10 Sekunden die Datenrate des Störsignals bei 0.1 Hz liegt. Die somit bestimmbare Maximalfrequenz des Amplitudenspektrums liegt daher bei 0.05 Hz. Als Beobachtungsdauer wurde die gesamte Zeitreihe herangezogen. Da der Verlauf des generierten Störsignals den Frequenzverlauf zeigt, kommt es durch die FFT im Amplitudenspektrum zu einer Gegenüberstellung von Frequenz und Frequenz (Abbildung 9.15).

Analysiert wurden dabei einerseits die Störsignale des horizontalen FBG 1 Sensors und andererseits die Störsignale des vertikalen FBG 5 Sensors für den ersten und dritten Tag der Messkampagne.

Analyse des Störsignals (12.2.2018)

Das Störsignal des horizontalen FBG 1 Sensors für den ersten Tag der Messkampagne ist in Abbildung 9.15 ersichtlich. Aufgrund der geringen Intensität des Störsignals kommt es bei der Rekonstruktion zu einigen Störungen im Verlauf. Im Vergleich dazu kann das Störsignal beim vertikalen FBG 5 Sensor (Abbildung 9.16) eindeutig rekonstruiert werden. Dies ist auf die höhere Intensität des Störsignals des vertikalen Sensors zurückzuführen. Das Störsignal zeigt einen annähernd periodischen Verlauf. Die Grundfrequenz kann anhand beider Sensoren mit einer Frequenz von 7.5067 min bestimmt werden.

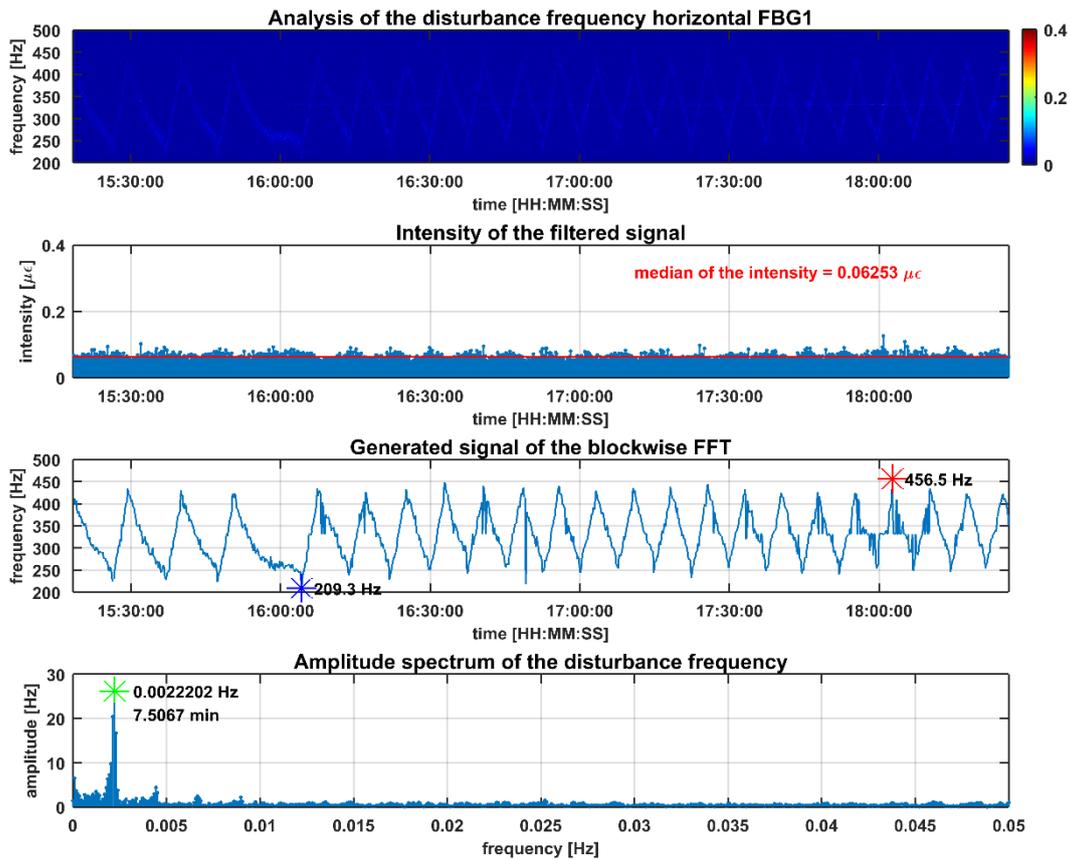


Abb. 9.15: Analyse Störsignal FBG 1 hor, 12.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

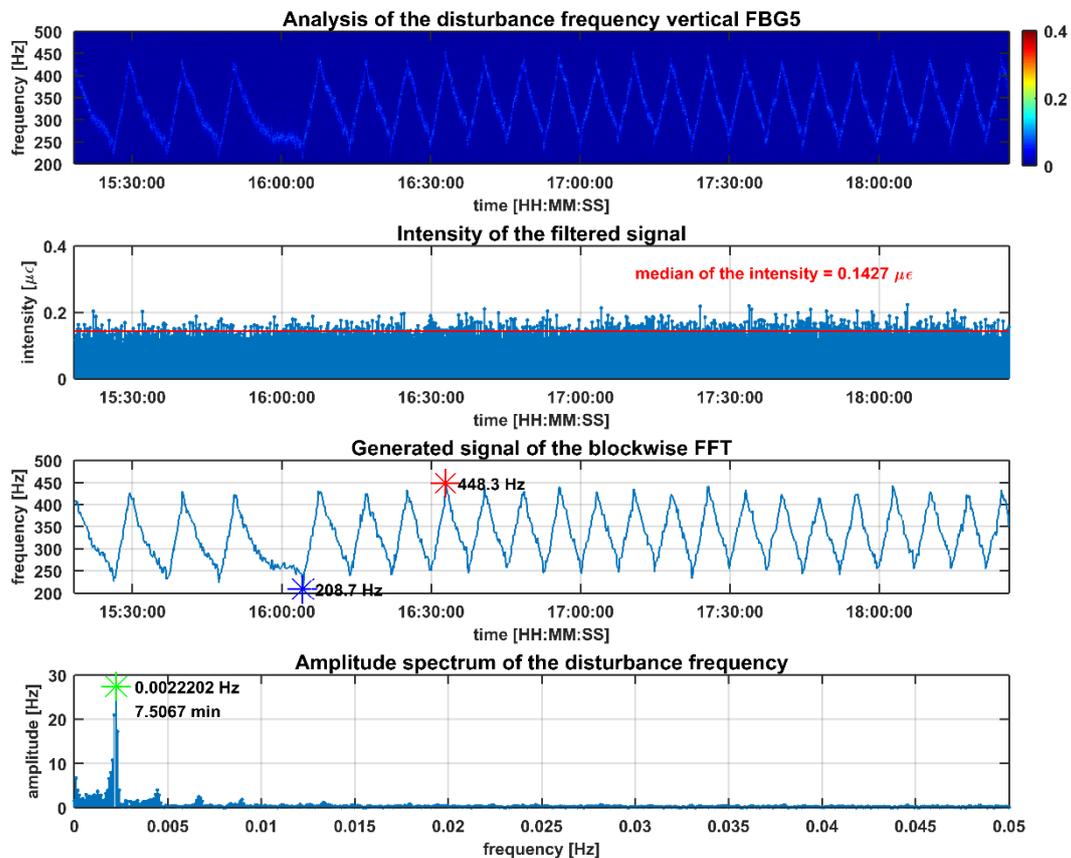


Abb. 9.16: Analyse Störsignal FBG 5 ver, 12.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Analyse des Störsignals (14.2.2018)

Das Störsignal des horizontalen FBG 1 Sensors des dritten Tags der Messkampagne kann Abbildung 9.17 entnommen werden. Hierbei konnte das Störsignal aufgrund seiner geringen Intensität nicht einwandfrei rekonstruiert werden. Wiederum konnte das Störsignal beim vertikalen FBG 5 Sensor (Abbildung 9.18) eindeutig rekonstruiert werden. Trotzdem kann anhand der beiden rekonstruierten Signale dieselbe Grundfrequenz bestimmt werden, welche lediglich die Beobachtungsdauer widerspiegelt. Auch hier kann deutlich gezeigt werden, dass die Intensität des Störsignals bei den vertikalen FBG Sensoren deutlich höher ist, als dies bei den horizontalen der Fall ist.

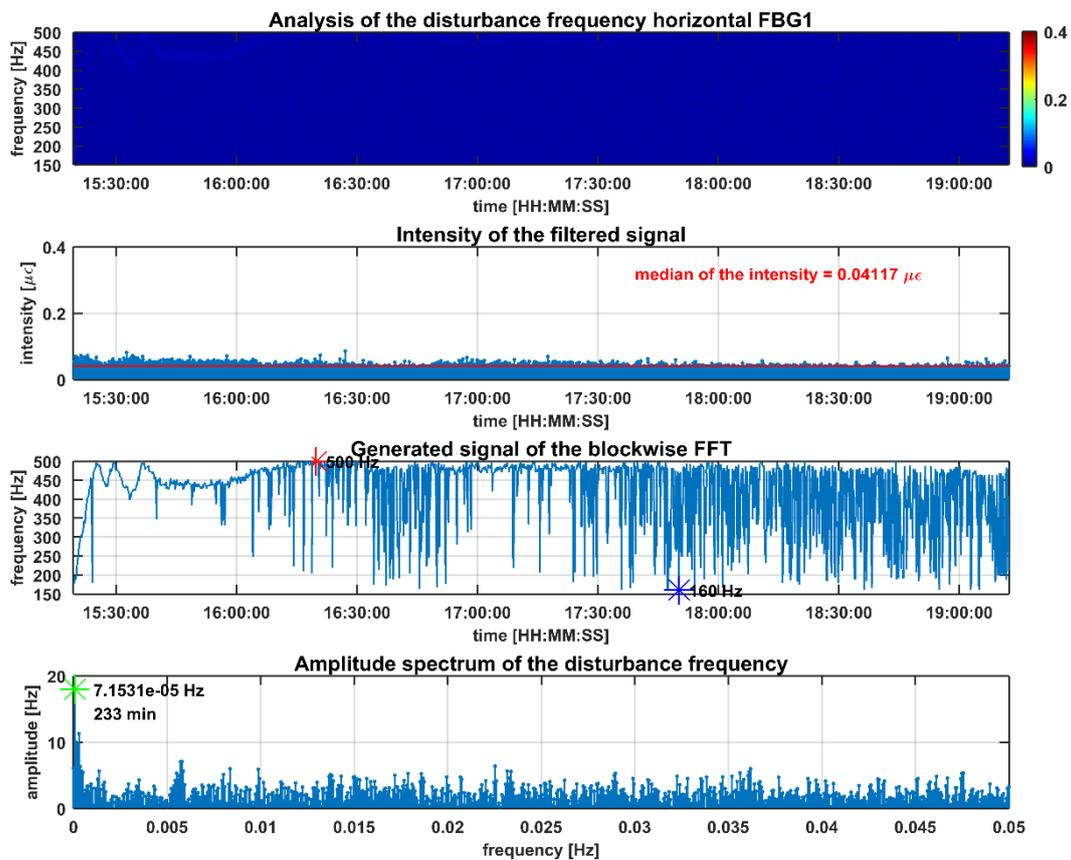


Abb. 9.17: Analyse der Störfrequenz des horizontalen FBG 1 Sensors, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

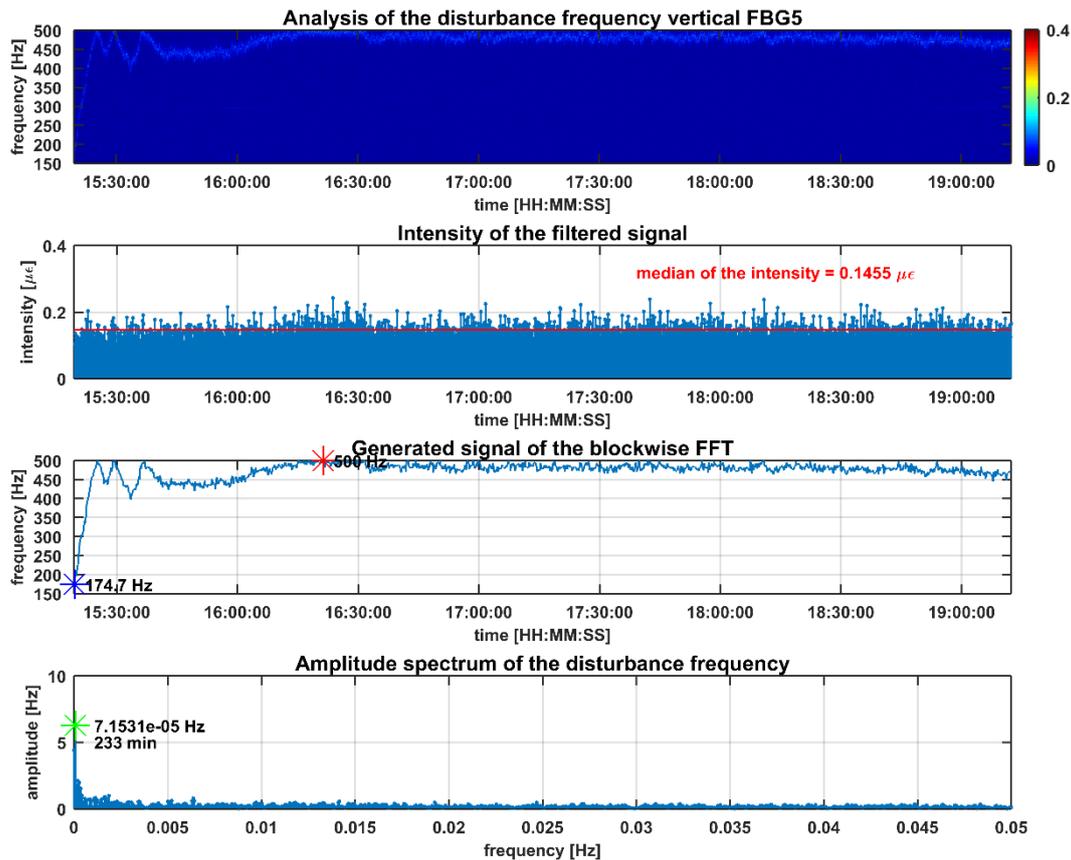


Abb. 9.18: Analyse der Störfrequenz des vertikalen FBG 5 Sensors, 14.2.2018 Überfahrt: Tórshavn – Tvøroyri

Es zeigt sich ein markanter Unterschied im Verlauf des Störsignals zwischen den beiden Messtagen. Die Periodizität des Störsignals des ersten Messtages kann im Störsignal des dritten Messtages nicht detektiert werden. Des Weiteren kann anhand der Ergebnisse gezeigt werden, dass die Ausrichtung der Sensoren einen Einfluss auf die Intensität des Störsignals hat. So zeichnet sich das Störsignal bei den vertikalen Sensoren stärker ab, als dies bei den horizontalen Sensoren der Fall ist. Die Ursache des Störsignals wurde anhand einiger Test untersucht. Dabei wurde das Messgerät hinsichtlich seiner Messeinstellungen untersucht. Dabei wurden „threshold“ und „gain“ Werte bei der Datenaufzeichnung verändert. Auch ein Test hinsichtlich der Schiffsbewegung und dessen Einfluss auf die Daten wurde durchgeführt. Dazu wurde das Messgerät, ähnlich wie am Schiff, händisch auf und ab bewegt. Des Weiteren wurde der Einfluss von Erschütterungen auf das Messgerät analysiert. Dabei konnten jedoch in keinem Fall Störfrequenzen detektiert werden. Ein weiterer möglicher Verursachungspunkt könnte die vom Schiff zur Verfügung gestellt Stromversorgung sein, da das Messgerät an diese während der Messungen angeschlossen wurde. Dies könnte im Zuge einer weiteren Messkampagne überprüft werden, indem das Messgerät an eine externe Energieversorgung angeschlossen wird.

10 Resümee und Zusammenfassung

Das enorme Potential faseroptischer Sensoren kann anhand dieser Masterarbeit gezeigt werden. Mit den eingesetzten Faser Bragg Gittern, welche zur Kategorie der quasi-verteilten Sensoren zählen, konnten sowohl nieder- als auch hochfrequente Einflüsse detektiert werden. Hinsichtlich der hochfrequenten Anteile konnten zum einen das Ein- und Abschalten der Motoren und zum anderen Manöver wie das Ab- und Anlegen und schlussendlich auch das Einfahren und Verlassen des Hafens bestimmt werden. Die detektierten Ereignisse konnten anhand der Aufzeichnungen des Geschehens am Schiff bestätigt werden.

Bezogen auf das überwachte Schiffshüllelement konnten positionsabhängige Variationen in der Stärke der Deformation festgestellt werden. So konnten die stärksten Deformationen in der unteren Mitte des Schiffshüllelements bestimmt werden. Aufgrund der versteifenden Wirkung der Stahlträger, mit denen das Schiffshüllelement verbunden ist, nehmen die Deformationen zu den Seiten hin deutlich ab. Aufgrund der sehr starken Korrelation zwischen den beiden horizontalen FBG Sensoren kann für weiterführende Auswertungen einer der horizontalen FBG Sensoren vernachlässigt werden.

Des Weiteren konnte eine hochfrequente Störfrequenz bestimmt, ihre Ursache, trotz einiger durchgeführter Tests, jedoch nicht eruiert werden. Daher sollte die Ursache der Störfrequenz im Zuge einer weiteren Messkampagne vor Ort analysiert werden. Als mögliche Ursache könnte z.B. die durch das Schiff zur Verfügung gestellte Stromversorgung genannt werden. Eine Überprüfung wäre durch Anschließen des Messgeräts an eine externe Stromversorgung möglich.

Mit den niederfrequenten Anteilen wurde eine Verschneidung der FBG mit den GPS Daten durchgeführt. Der dabei analysierte Frequenzbereich beinhaltet jene Frequenzen, die durch den Wellengang hervorgerufen wurden. Die Grundfrequenz des Wellengangs konnte anhand beider Sensortypen übereinstimmend bestimmt werden.

Im Falle einer weiteren Messkampagne könnten GNSS Empfänger mit höherer Messfrequenz eingesetzt werden (20 Hz). Dadurch könnte bei der Verschneidung der Sensordaten ein größerer Frequenzbereich analysiert werden. Auch die Anzahl der Satelliten und die damit einhergehende steigende Verfügbarkeit von phasenfixierten Positionslösungen könnte durch den Einsatz von GNSS Empfängern erhöht werden. Zudem wäre eine Verschneidung mit den Daten eines im Schiff angebrachten hochfrequenten Akzelerometers denkbar.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass die Eignung der FBG Sensoren zur dynamischen Überwachung der in dieser Arbeit untersuchten großen mechanischen Struktur definitiv gegeben ist.

Literaturverzeichnis

Deichmann N (2012): Einführung in die Zeitreihenanalyse, ETH Zürich, <http://n.ethz.ch/~deichman/skript1.pdf>. (abgerufen am 24.10.2018).

EUREF Permanet GNSS Network (2018).
http://www.epncb.oma.be/_networkdata/siteinfo4onestation.php?station=ARGI00FRO.
(abgerufen am: 21.11.2018).

FBGS (2018a). <https://www.fbgs.com/technology/dtg-technology/>. (abgerufen am: 27.08.2018).

FBGS (2018b). <https://www.fbgs.com/products/draw-tower-gratings/dtg-lbl-830-1550/>.
(abgerufen am: 28.11.2018).

Fischer W (2009): Digitale Fernseh- und Hörfunktechnik in Theorie und Praxis. 2. Auflage, Springer Verlag. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-540-88195-7.pdf>.

HBM (2018a). <https://www.hbm.com/de/1629/faser-bragg-gitter-faq/>. (abgerufen am: 27.11.2018).

HBM (2018b). <https://www.hbm.com/de/2452/optimet-system-fuer-faseroptische-sensorik/>.
(abgerufen am: 09.11.2018).

HBM (2018c). <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B03654.pdf>.
(abgerufen am: 20.11.2018).

HBM (2018d). <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B03103.pdf>.
(abgerufen am: 09.11.2018).

Hesselmann N (1987): Digitale Signalverarbeitung. 2. Auflage, Vogel Buchverlag Würzburg.

Hofmann-Wellenhof B, Moritz H (2005): Physical Geodesy. 2nd Edition, Springer Verlag.

Hütte (1991): Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. 29., völlig neubearbeitete Auflage, Springer Verlag.

ITWissen.Info (2018). <https://www.itwissen.info/Multiplexverfahren-multiplexing.html>.
(abgerufen am: 01.09.2018).

Kreuzer M: Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors. HBM, <http://www.ae.metu.edu.tr/seminar/strain-gage/FBG.pdf>. (abgerufen am 29.11.2018).

Landmann C, Jamal R (2011): Optic & Photonic. Volume 6, Issue 1. Fasersensoren in der klassischen Messtechnik: Erfassung von Temperatur und Dehnung mit optischen Sensoren. Wiley CHV. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/opph.201190156>.

Lienhart W, Moser F, Supp G, Marte R (2013): Verification of the slope stability of flood prevention dams with fiber optic sensors, 9th Int. Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, 2013, 10 p.

López-Higuera JM (2002): Handbook of Optic Fibre Sensing Technology. John Wiley & Sons Ltd.w.

Maier: Instrumentelle Analytik, Anhang 4: Fouriertransformation. http://dodo.fb06.fh-muenchen.de/maier/analytik/Blaetter/A04_Spektrum_Fouriertransformation_a_BA.pdf.

Measures RM (2001): Structural Monitoring with fiber optic technology. Academic Press.

Meyer M (1998): Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter. Vieweg Verlag.

Mircon Optics (2009). <http://www.grupoalava.com/repositorio/7308/pdf/1134/2/sistemas-adquisicion-dinamico-fibra-optica-interrogador-dinamicos-sm130.pdf?d=1>. (abgerufen am: 09.11.2018).

Micron Optics (2018a). <http://www.micronoptics.com/how-do-fbg-sensor-interrogators-work/>. (abgerufen am: 27.08.2018).

Micron Optics (2018b). <http://www.micronoptics.com/technology/filters-lasers-technology/>. (abgerufen am: 19.12.2018).

Mittag HJ (2016): Statistik: Einführung mit interaktiven Elementen. 4. Auflage, Springer Verlag. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-54387-6.pdf>.

Müller M (2006): Angewandte statistische Regression. ETH Zürich. https://stat.ethz.ch/education/semesters/WS_2006_07/asr/Stat.pdf. (abgerufen am: 26.01.2019).

Othonos A, Kalli K (1999): Fiber Bragg Gratings. Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Artech House Publishers.

Strandfaraskip Landsins (2018). <https://www.ssl.fo/fo/um-ssl/alment/ferjur/mf-smyril/>. (abgerufen am: 09.11.2018).

Trimble (2018a). <https://www.trimble.com/Infrastructure/Trimble-Zephyr-Geodetic-Antenna.aspx>. (abgerufen am: 09.11.2018).

Trimble (2018b). <https://www.trimble.com/Infrastructure/Trimble-NetR9.aspx>. (abgerufen am: 09.11.2018).

Trimble (2018c). http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-689228/022506-128J_NetR9_DS_USL_0517_LR.pdf. (abgerufen am: 09.11.2018).

Udd E, Spillman WB (2011): Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.

Unavco (2018). <https://kb.unavco.org/kb/assets/482/4700specs.pdf>. (abgerufen am: 21.11.2018).

Wang ML, Lynch JP, Sohn H (2014): Sensor Technologies for Civil Infrastructures. Volume 1, Sensing Hardware and Data Collection Methods for Performance Assessment. Woodhead Publishing.

Werner M (2012): Digitale Signalverarbeitung mit Matlab. 5. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-8348-9243-0.pdf>.

Wöllner J, Woschitz H, Brunner FK (2011): Testing a large fiber optic strain-rosette embedded in a landslide area. 8th Int. Symp. Field Measurements in GeoMechanics, Berlin, 2011, 18 p. https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IGMS/projects/gradenbach/2011_FMG_M_Woellner_Woschitz_Brunner.pdf.