

Christian Stangl

Smartec SOFO V - Untersuchungen zur Langzeitstabilität und zum Temperaturverhalten von Sensoren

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science



**Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme
an der Technischen Universität Graz**

Betreuer:

O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Fritz K. Brunner
Dipl.-Ing. Johannes Wöllner (Mitbetreuer)

Begutachter:

O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Fritz K. Brunner

Graz, November 2010

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTLICHE 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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Kurzfassung

Ziel dieser Masterarbeit war die Untersuchung des faseroptischen Messsystems *SOFO Static V* der Firma *Smartec SA* (Manno, Schweiz) hinsichtlich der Langzeitstabilität von in Bauwerken oder im Boden eingebetteten SOFO Sensoren. Es sollen Aussagen über die Messbarkeit ermöglicht werden, ob und wann ein Sensor unbrauchbar werden kann, bzw. ob sich das durch entsprechende Signaturen im Messsignal frühzeitig ankündigt.

Zu diesem Zweck wurden Langzeitmessungen seit 2002 von eingebetteten Sensoren an einer monolithischen Hangbrücke nahe Schladming (Österreich) analysiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass Intensitäten der LED des Messinstruments alleine keinen Aufschluss über den Zustand eines Sensors geben können. Bei einigen Sensoren konnte in den Signaturen im Messsignal ein Trend ermittelt werden, der auf einen Alterungsprozess schließen lässt. Eine genaue Ableitung der Lebensdauer war dadurch aber nicht möglich. Zusätzlich wurde eine kritische Signalstruktur definiert, bei der Sensorausfälle jederzeit vorkommen können.

Weiters wurden im Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der TU Graz Versuche zur künstlichen Signalabschwächung und zum Temperaturverhalten der *SOFO Static Reading Unit* durchgeführt. Die Abschwächung des Messsignals wurde durch Wicklungen des Verbindungskabels um ein Metallrohr realisiert. Es wurde gezeigt, dass bei starker Abschwächung eine kritische Signalstruktur erreicht wird. Auf die Messwerte selbst hat die Abschwächung nur bedingt Einfluss. Um Auswirkungen von Temperaturänderungen zu ermitteln, wurden mit der *SOFO Static Reading Unit* Versuche bei verschiedenen Temperaturen in der Klimabox durchgeführt. Diese Versuche zeigten eine Abhängigkeit der Messwerte von der Temperatur der Reading Unit von $-10 \text{ ppm/}^\circ\text{K}$. Ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit konnte sowohl bei den Intensitäten der LED des Messinstruments als auch der Signalstruktur selbst ermittelt werden.

Abstract

Aim of this master thesis was the investigation of the fiber optical measurement system *SOFO Static V* of the company *Smartec SA* (Manno, Switzerland) with respect to the long term reliability of embedded SOFO sensors. Conclusions should be found to make statements about the measurability of sensors and if sensor failures can be predicted because of special signatures in the measured signal.

To this end, long term measurements of embedded sensors since 2002 in a monolithic bridge nearby Schladming (Austria) have been analyzed. It was found that the intensity of the used LED of the measurement system can not be used to make statements about the condition of a sensor. In the signature of the measurement signal a trend could be determined which allows statements about the condition of certain embedded sensors. A detailed prediction of life time for embedded sensors could not be derived. Additionally a critical signal structure was defined where sensor failures can occur at any time.

Investigations with the SOFO System were also carried out in the laboratory of the Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems. The aim of these investigations was to obtain the temperature behavior of the SOFO Static reading unit and the influence of artificial signal attenuation. The artificial signal attenuation was realized by the use of optical couplers, mating adapters and various windings of a patch cord around a metal tube. It could be determined, that a critical signal structure occurs because of strong signal attenuation. To determine the temperature behavior of the reading unit, experiments in a climate chamber were carried out. It could be shown, that relative to the length difference of the fibers in a sensor the temperature dependence is about $-10 \text{ ppm}/^\circ\text{K}$. A temperature dependence of the intensity of the used LED and the signal structure itself could also be determined.

Danksagung

Mein besonderer Dank an dieser Stelle gilt meinen Eltern, die mich während meiner gesamten Studienzeit stets emotional und finanziell unterstützt haben. Ohne diese Unterstützung wäre es mir nicht möglich gewesen, das Studium erfolgreich zu beenden.

Besonders möchte ich mich auch bei meinem Betreuer Hrn. Dipl. Ing. Johannes Wöllner für die kontinuierliche und professionelle Unterstützung bei den Laborversuchen sowie beim Verfassen der Masterarbeit bedanken.

Für die tatkräftige Unterstützung beim Messeinsatz in Schladming bedanke ich mich bei Hrn. Ing. Rudolf Lummerstorfer. Ein weiterer Dank gilt Hrn. Dipl. Ing. (FH) Robert Presl, der mir bei den Laborversuchen und den Auswertungen stets mit Rat und Tat zur Seite stand und dabei oftmals für angeregte Diskussionen über Faseroptik sorgte.

Für das freundliche Arbeitsklima und die gute Betreuung während des Verfassens meiner Masterarbeit bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme unter der Leitung von Hrn. Prof. Fritz K. Brunner.

Besonderer Dank gilt auch meinen Studienkollegen. Deren Gemeinschaft und die gegenseitige Unterstützung haben die Studienzeit zu einem unvergesslichen Lebensabschnitt gemacht.

Graz, im November 2010

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	1
1.1	Motivation und Zielsetzung der Masterarbeit	1
1.2	Structural Health Monitoring	2
1.3	Übersicht über die Masterarbeit	3
2	<i>Grundlagen</i>	4
2.1	Faseroptische Sensoren	4
2.1.1	Überblick.....	4
2.1.2	Zuverlässigkeit von Faseroptischen Sensoren	6
2.2	Interferometrie	7
2.2.1	Kohärenz	7
2.2.2	Michelson Interferometer mit hochkohärenter Lichtquelle	8
2.2.3	Michelson Interferometer mit niederkohärenter Lichtquelle.....	11
3	<i>Messsystem SOFO Static</i>	16
3.1	Funktionsprinzip	17
3.2	SOFO Static Reading Unit	18
3.2.1	Aufbau der SOFO Static RU	18
3.2.2	Hauptkomponenten der SOFO Static RU.....	19
3.3	SOFO Sensoren	21
3.3.1	SOFO Standardsensor	21
3.4	Software SOFO SDB	24
4	<i>Analyse von Langzeitmessungen</i>	31
4.1	Monolithische Hangbrücke Schladming	31
4.1.1	Eingebaute Sensoren	32
4.2	Auswertung	34
4.2.1	„Ghost“ Messungen.....	37
4.2.2	Sensor 2808	41
4.2.3	Sensor 2811	47
4.2.4	Sensor 2813	53
4.3	Ergebnisse	55

5	<i>Experimente im Messlabor</i>	58
5.1	Optical Spectrum Analyzer	58
5.2	Versuchsordnung „Koppler“	60
5.3	Versuchsordnung „Wicklungen“	64
5.4	Versuchsordnung „Komparatorbank“	71
5.5	Versuchsordnung „Klimabox“	73
5.5.1	SOFO Standard Sensor 4277	74
5.5.2	Referenzsensor 125	76
5.6	Ergebnisse	78
6	<i>Zusammenfassung</i>	80
	<i>Literaturverzeichnis</i>	82
	<i>Anhang A: Auswertung der Langzeitmessungen</i>	84
A.1	Sensor 2807	84
A.2	Sensor 2809	86
A.3	Sensor 2810	89
A.4	Sensor 2812	91
	<i>Anhang B: Smartec Datenblätter</i>	93
B.1:	Datenblatt SOFO Static Reading Unit	93
B.2:	Datenblatt SOFO Standard Sensor	95
B.3	Datenblatt Fiber Optic Cable	97

Abkürzungsverzeichnis

C	Celsius
dB	Dezibel
DC	Direct Current (Gleichstrom)
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
FOS	Faseroptische Sensoren
IGMS	Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz
K	Kelvin
LED	Light Emitting Diode
MAD	Median Absolute Deviation
MSI	Michelson Interferometer
OSA	Optical Spectrum Analyzer
ppm	Parts Per Million
SA	Société Anonyme (Aktiengesellschaft)
SHM	Structural Health Monitoring
SOFO	Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques
STD	Standardabweichung
TU	Technische Universität
UV	Ultraviolett

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Masterarbeit

Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) an der Technischen Universität Graz (TU Graz) beschäftigt sich bereits seit einigen Jahren intensiv mit faseroptischer Messtechnik. Diese hat durch das Aufkommen des *Structural Health Monitoring* (SHM), auf welches in Abschnitt 1.2 näher eingegangen wird, zunehmend an Bedeutung gewonnen. Beim SHM werden neben den traditionellen geodätischen Methoden zur Erfassung von Deformationen, faseroptische Sensoren (FOS) eingesetzt. FOS haben sich aufgrund ihrer vielversprechenden Vorteile, wie Immunität gegen elektromagnetische Felder, ihrer Größe und Kosten im SHM durchgesetzt (Inaudi 1997: Kap. 2.2).

Ein faseroptisches Messsystem, welches am IGMS seit Jahren im Einsatz ist und im Rahmen dieser Masterarbeit näher untersucht wird, ist das System *SOFO Static* der Firma *Smartec SA* (Manno, Schweiz). *SOFO* ist ein Akronym und bedeutet Bauwerksüberwachung mit Faseroptik (*Surveillance d'Ouvrages par Fiber Optiques*). Besondere Eigenschaften dieses Messsystems sind die absolute Messmethode nach dem Prinzip der Interferometrie mit niederkohärentem Licht und eine angegebene Messgenauigkeit im Mikrometerbereich.

Weitgehend unbekannt sind allerdings die Gründe für das Versagen von faseroptischen Sensoren. In dieser Masterarbeit wird das Langzeitverhalten von eingebetteten FOS untersucht. Ziel ist es, aus dem Messsignal eine Vorhersage über den Zustand des Sensors und etwaige Sensorausfälle treffen zu können. Es werden bereits durchgeführte Messungen an eingebetteten Sensoren mit dem *SOFO Static* an einer Hangbrücke nahe Schladming analysiert. Weiters werden im geodätischen Messlabor des IGMS Versuche durchgeführt, welche Aufschlüsse über das Verhalten des Messsignals hinsichtlich einer Änderung des Zustands des Sensors geben sollen.

1.2 Structural Health Monitoring

Structural Health Monitoring hat in den letzten Jahren einen regelrechten Aufschwung erfahren. Sicherheit und die periodische Überwachung von Bauwerken treten immer mehr in den Vordergrund. SHM hat sich nicht nur in der „klassischen“ Bauwerksüberwachung etabliert, sondern reicht durch die Verwendung von FOS bis in die Strukturüberwachung in Schiff-, Luft- und Raumfahrt (Lienhart 2007: Kap. 2). Neben den klassischen Methoden der Bauwerksüberwachung, die Inaudi (1997: Kap. 1.3) anführt, liefert die Verwendung von FOS eine breite Palette an neuen Anwendungsmöglichkeiten. FOS können direkt in Bauwerke oder in zu überwachende Strukturen (z.B.: Flugzeuge, Pipelines, Brücken) eingebaut werden. Dadurch können im Unterschied zu herkömmlichen Messmethoden Belastungen und/oder Deformationen direkt in der Struktur mit höchster Genauigkeit gemessen werden. Hier hat sich der Begriff der intelligenten Struktur (*Smart Structure*) durchgesetzt. Eine solche ist mit einem internen Netz von FOS ausgestattet, welches mit dem Nervensystem des Menschen zu vergleichen ist. Eine zentrale Recheneinheit, bei der alle Sensoren zusammenlaufen, registriert dabei permanent relevante Parameter für die Sicherheit der Struktur. Einen guten Überblick über *Smart Structures* und die Prozesse des SHM geben Glišić & Inaudi (2007: Kap. 1).

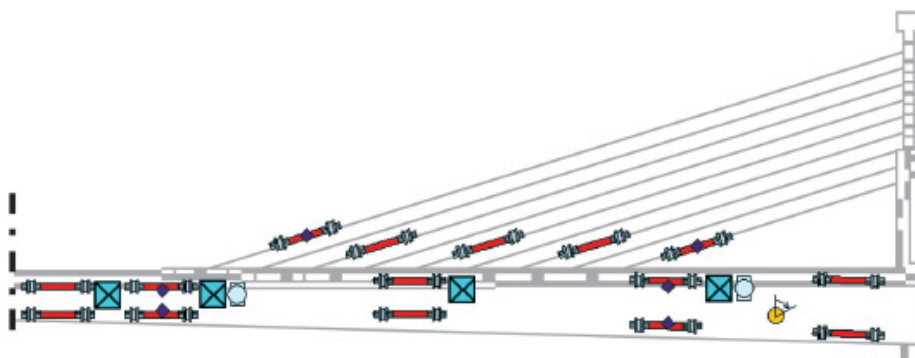


Abbildung 1.1: Beispiel für die Verteilung von FOS Sensoren in einer Hängebrücke (Quelle: ROCTEST, Bridge Instrumentation and Structural Health Monitoring¹)

¹ Quelle: ROCTEST Ltd
unter <http://www.roctest.com/index.php?module=CMS&id=116> (zuletzt besucht: 08/2010)

1.3 Übersicht über die Masterarbeit

Kapitel 2 liefert einen Überblick über die Grundlagen faseroptischer Sensorik und verschiedener faseroptischer Sensoren. Weiters werden die Prinzipien der Interferometrie mit hoch- und niederkohärenten Lichtquellen betrachtet. In Kapitel 3 wird das Messsystem SOFO Static näher erklärt, im Speziellen der Aufbau der Reading Unit, die verwendeten Sensoren und die Software SOFO SDB des Messsystems. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Analyse von Langzeitmessungen eingebetteter SOFO Sensoren in einer Hangbrücke nahe Schladming. Hier wird versucht, Ausfälle von Sensoren schon früher in der Signalstruktur zu erkennen. In Kapitel 5 werden einige Laborversuche vorgestellt. Hierbei wird versucht, eventuell vorhandene Trends in der Signalstruktur aufgrund von verschiedenen Einflüssen wie z.B. Temperatur zu detektieren. Kapitel 6 gibt eine Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen und Experimente dieser Masterarbeit. In Anhang A finden sich die detaillierten Analysen der in Kapitel 4 nicht genauer gezeigten Sensoren der Hangbrücke Schladming. Anhang B zeigt die Datenblätter der SOFO Reading Unit, des SOFO Standard Sensors und der SOFO Verbindungskabel.

2 Grundlagen

2.1 Faseroptische Sensoren

2.1.1 Überblick

Unter Faseroptischen Sensoren (FOS) versteht man Sensoren, die Glasfasern als Medium für die Weiterleitung von Lichtwellen verwenden. Durch die rasante Entwicklung der Telekommunikationsindustrie, vor allem der Weiterentwicklung im Bereich der Datenübertragung mittels Glasfaserkabeln, hat in den letzten Jahren auch der Bereich der faseroptischen Messtechnik profitiert. Der größte Vorteil von FOS liegt in der Faser selbst, da diese in beinahe allen Anwendungen aus Glas besteht. Glas besitzt hervorragende Eigenschaften in Bezug auf die Resistenz gegen fast alle Chemikalien und Temperatureinflüsse. Dadurch können FOS auch in extremen Umgebungen zuverlässig eingesetzt werden. Weitere große Vorteile sind die Immunität gegen elektromagnetische Felder und ihr kleines Volumen. FOS können dadurch direkt in Bauwerke eingebettet werden. All diese Eigenschaften erweitern im Vergleich zu herkömmlichen elektronischen Sensoren den Einsatzbereich von FOS enorm (Glišić & Inaudi 2007: Kap. 2.1).

Im Allgemeinen werden Glasfasertypen verwendet, die aus einem Kern und einem Mantel bestehen. Die optische Grundlage für die Ausbreitung einer Lichtwelle in einem Lichtwellenleiter ist die totale interne Reflexion (Bludau 1998: Kap. 3.2). Diese tritt an der Grenze zweier Medien unterschiedlicher Brechzahlen auf, wenn der Lichtstrahl vom optisch dichteren Medium auf das optisch dünnere Medium trifft. Abhängig vom Durchmesser des Kerns und den Wellenlängen der verwendeten Lichtquelle bezeichnet man die Fasern als *Einmodenfasern* (9 μm) oder *Vielmodenfasern* (62,5 μm) (Brunner 2009: Kap. 2). Ein Lichtwellenleiter kann mehrere unterschiedliche Wellenformen gleichzeitig übertragen. Diese werden als Moden des Lichtwellenleiters bezeichnet (Bludau 1998: Kap. 2.2.2). Eine schematische Darstellung einer Glasfaser mit Mantel und Kern wird in Abbildung 2.1 gezeigt.

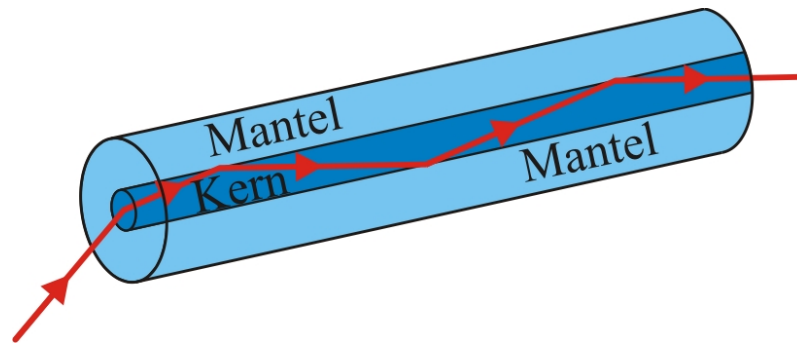


Abbildung 2.1: Lichtausbreitung in einer optischen Faser
(Brunner, VGI 3/2009: S. 336)

FOS werden nach Inaudi (1997: Kap 4) und Bludau (1998: Kap. 12.3) in *extrinsische* und *intrinsische* Sensoren eingeteilt. Bei extrinsischen FOS wird der Lichtwellenleiter (Glasfaser) nur zum Transport der Lichtwellen in einen Meßwertempfänger benutzt. In diesem tritt das Licht aus dem Lichtwellenleiter aus und die Messgröße wirkt außerhalb („extrinsisch“) auf das Licht ein. Danach wird die durch die Messgröße veränderte Lichtwelle wieder in einen Lichtwellenleiter eingespeist und zu einer Auswerteeinheit weitergeleitet. Eine Auswahl extrinsischer FOS gibt Bludau (1998: Kap. 13) an.

Bei intrinsischen FOS verlässt die Lichtwelle im Gegensatz zu extrinsischen FOS die Glasfaser nicht. Die Messgröße wirkt direkt auf die Glasfaser und kann die Lichtwelle innerhalb dieser hinsichtlich ihrer Intensität, Phasenlage, Polarisation oder Frequenz verändern. Beispiele für intrinsische FOS führt Bludau (1998: Kap. 12.3.2 bzw. Kap. 14) an.

In Glišić & Inaudi (2007: Kap. 2.2) werden die FOS in drei große Gruppen (Punktsensoren, langarmige Messsensoren und verteilte Sensoren) eingeteilt, wobei die SOFO Sensoren der Gruppe der langarmigen Messsensoren angehören (siehe Abbildung 2.2). FOS ermöglichen eine schnelle und effektive Erfassung von bauwerksrelevanten Parametern wie z.B.: Temperatur, Deformation, Druck, Feuchtigkeit und verschiedenen chemischen Parametern.

Details über die einzelnen FOS und Beispiele zu deren praktischer Anwendung sind in Glišić & Inaudi (2007: Kap. 2.2 bzw. Kap. 5) angeführt.

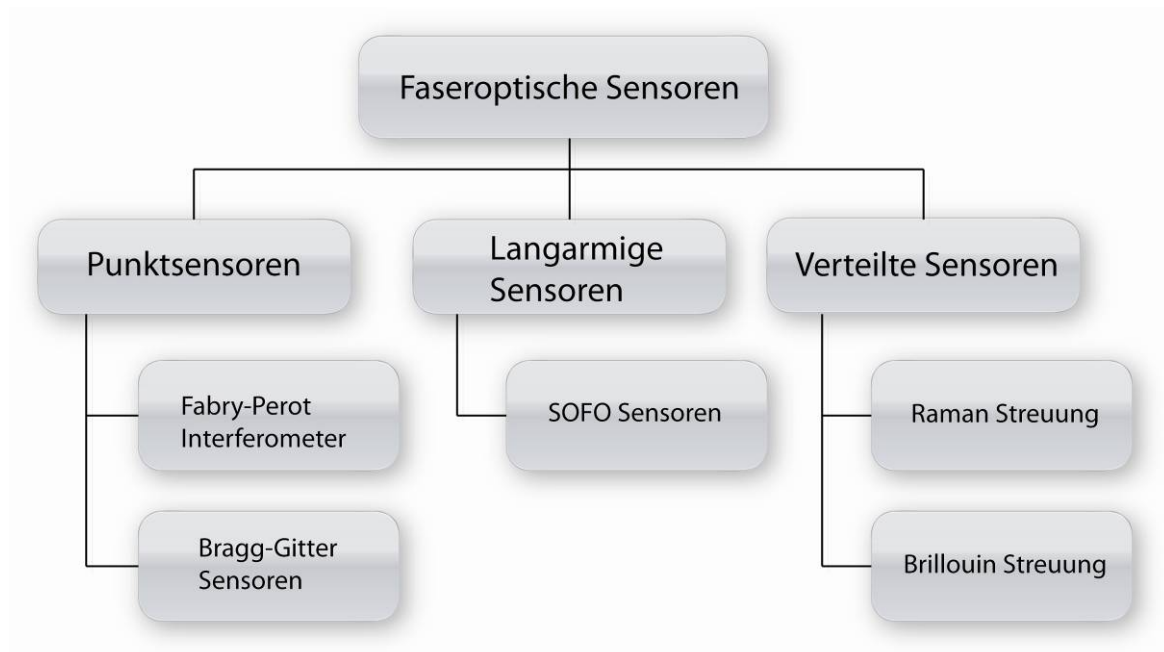


Abbildung 2.2: Einteilung der FOS nach Glišić & Inaudi (2007: Kap. 2.2)

2.1.2 Zuverlässigkeit von Faseroptischen Sensoren

Faseroptische Sensoren werden von Herstellern vor allem aufgrund ihrer Langzeitstabilität und der langen Lebensdauer angepriesen. In der Fachliteratur findet man nur wenige Informationen über die Gründe von Versagen von eingebetteten FOS. Inaudi (2005) gibt die Lebensdauer für SOFO-Sensoren mit 20 Jahren und einer Überlebensrate von 80% (das entspricht einer Fehlerrate von 1% pro Jahr) unter normalen äußeren Bedingungen an. Für diese Erkenntnis wurden über 100 SOFO-Sensoren in Betonbrücken und über 900 SOFO-Sensoren in Betonsäulen 6 Jahre lang überwacht. Korrosive Umgebung, hohe UV- und Gamma-Strahlung können die Lebensdauer jedoch reduzieren. Weiters verweist Inaudi (2005) auf beschleunigte Alterungstests, durchgeführt im

Schweizer Testlabor EMPA (*Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*, Duebendorf, Schweiz). Die Ergebnisse der beschleunigten Alterungstests zeigen eine theoretische (!) Lebensdauer für SOFO-Sensoren von durchschnittlich 10.000 Jahren unter statischer Belastung, und 100 Jahre unter zyklischer Belastung (Sennhauser & Nellen 2000).

Sennhauser & Nellen (2000) führen weiters an, dass die viel gerühmte Robustheit von FOS in rauen Umgebungen noch nicht vollständig bewiesen wurde. So stünden die oft angeführten Vorteile von FOS wie Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Felder, extreme Temperaturen und chemische Umgebungen im Widerspruch zu den Erfahrungen industrieller Benutzer.

2.2 Interferometrie

2.2.1 Kohärenz

Eine Grundvoraussetzung für das Auftreten von Interferenzerscheinungen zweier (Licht-) Wellenzüge ist nach Bludau (1998: Kap. 1.3.4) *Kohärenz* bzw. die *Kohärenzlänge* oder *Kohärenzzeit*. Man geht davon aus, dass die charakteristischen Wellenparameter einer ebenen harmonischen Welle, Frequenz ω , Phasengeschwindigkeit v und der Nullphasenwinkel φ innerhalb eines Beobachtungsraums und Beobachtungszeitraums konstant sind. Dies trifft allerdings nicht bei realen Lichtquellen zu, bei welchen der Emissionsvorgang nach einer gewissen Zeitspanne T_c endet und ein neuer beginnt. T_c wird als Kohärenzzeit der Lichtquelle bezeichnet. Die Kohärenzzeit der Lichtquelle ist über die Lichtgeschwindigkeit c mit der geometrischen Länge L_c , der Kohärenzlänge verbunden (Formel 2.1).

$$L_c = c \cdot T_c \tag{2.1}$$

2.2.2 Michelson Interferometer mit hochkohärenter Lichtquelle

Bei einem Michelson Interferometer (MSI) wird nach Measures (2001: Kap. 3.6) eine Lichtquelle, in diesem Fall hochkohärentes Laserlicht (Kohärenzlänge bis mehrere Kilometer), von einem optischen Strahlenteiler in zwei gleiche Teile aufgespaltet. Ein Teil breitet sich in Richtung eines fixen Spiegels aus, durch welchen eine Referenzlänge definiert wird (L_1). Der andere Teil breitet sich in Richtung eines beweglichen Spiegels aus (L_2). Die beiden reflektierten Lichtwellen werden im Strahlenteiler wieder zusammengeführt und um 90° in Richtung eines Photodetektors abgelenkt. Dieser misst die Intensität der rekombinierten Lichtwelle (siehe Abbildung 2.3).

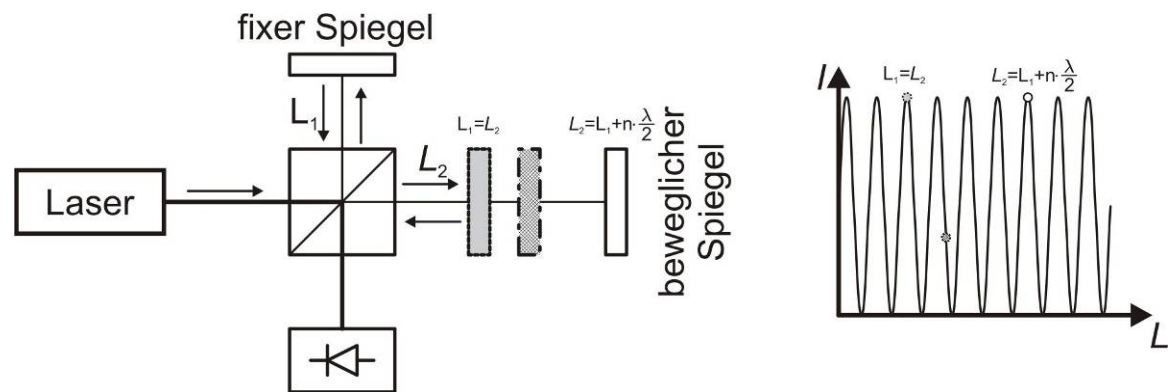


Abbildung 2.3: Prinzip eines Michelson Interferometers
(Presl, 2009, nach Measures 2001, S. 77)

Aufgrund einer Änderung der Weglänge L_2 durch den beweglichen Spiegel kommt es nach Wiedervereinigung der beiden Strahlen zu Interferenzen. Diese werden vom Photodetektor als Änderung der Intensität registriert und es entsteht bei Verschiebung des Spiegels mit konstanter Geschwindigkeit ein sinusförmiges Interferenzbild (Abbildung 2.3, rechts). Die Weglänge L_2 kann dadurch über L_1 und ein Vielfaches der halben Wellenlänge λ berechnet werden (Formel 2.2).

$$L_2 = L_1 + n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2.2)$$

Mit einem MSI mit hochkohärenter Lichtquelle sind nur relative Messungen möglich. Kommt es zu einer Unterbrechung der Lichtzufuhr, verliert man die Nullreferenz der momentanen Messung. Das heißt, es kann das Vielfache der halben Wellenlänge λ und somit der Weglängenunterschied zwischen L_1 und L_2 nicht mehr bestimmt werden. Ein MSI mit hochkohärenter Lichtquelle ist daher für Langzeitmonitoring Aufgaben ungeeignet, da es nicht möglich ist, über längeren Zeitraum einen unterbrechungsfreien Betrieb zu gewährleisten (z.B. Unterbrechung der Stromversorgung, Wechsel von Sensoren).

Faseroptisches Michelson Interferometer

Bei einem faseroptischen MSI verlaufen die Lichtwellen in optischen Fasern. Der Strahlteiler wird durch einen faseroptischen Koppler mit einem Leistungskoppelgrad $K = \frac{1}{2}$ (3-dB-Koppler) ersetzt (Bludau 1998: Kap. 18.2 bzw. Rogers 2001: Kap. 7.2). Ein solcher faseroptischer Koppler wird zum Aufteilen oder Zusammenführen von Lichtwellen verwendet (siehe Abbildung 2.4).

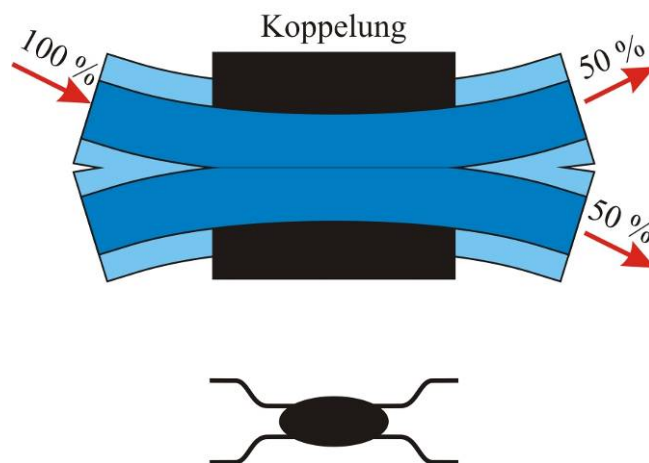


Abbildung 2.4: Faseroptischer Koppler mit entsprechendem Symbolbild (Brunner, VGI 3/2009: S. 336)

Die Spiegel werden nach Inaudi (1997: Kap. 6.6.7) entweder durch einen orthogonalen Cleave (Spaltung) alleine oder mit einer chemischen Silberlegierung am Ende der optischen Faser realisiert. Bei einem orthogonalen Cleave kommt es aufgrund der Unterschiede der Brechzahlen von Glas und Luft zu einer Reflexion von ca. 4%, welche laut Inaudi (1997: Kap. 6.6.7) für Messungen ausreichend ist. Eine weitaus höhere Reflexion wird durch die Verwendung der chemischen Silberlegierung erzielt.

Zusätzlich wird ein Isolator benötigt, damit das reflektierte rekombinierte Laserlicht nicht zur Lichtquelle zurückreflektiert wird und diese stört (Bludau 1998: Kap. 18.2). Der Vorteil dieser Konfiguration besteht darin, dass zwischen den einzelnen Komponenten des MSI keine direkte Sichtverbindung erforderlich ist und die Lichtwellen vor äußeren Einflüssen besser geschützt sind. Abbildung 2.5 zeigt eine Prinzipskizze eines faseroptischen MSI.

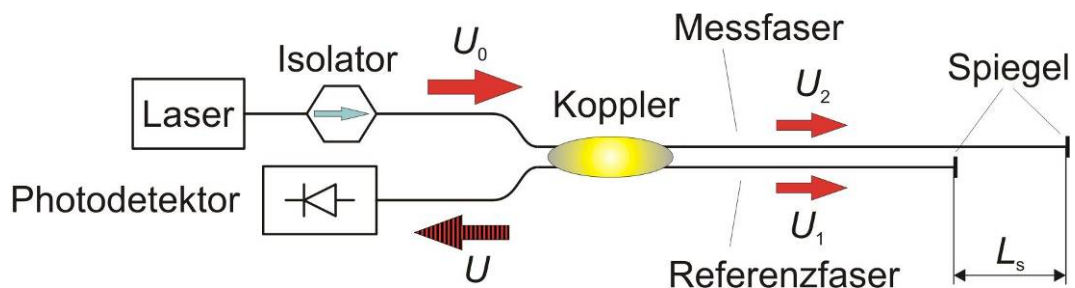


Abbildung 2.5: Prinzip eines faseroptischen MSI
(Presl, 2009, nach Güemes & Menendez, 2006, S. 234)

2.2.3 Michelson Interferometer mit niederkohärenter Lichtquelle

Eine niederkohärente Lichtquelle weist eine geringe Kohärenzzeit bzw. Kohärenzlänge auf (siehe Kapitel 2.2.1). Wird also bei einer Interferometerkonfiguration nach Michelson eine niederkohärente Lichtquelle (z.B. eine LED) verwendet, tritt Interferenz nur dann auf, wenn der Längenunterschied zwischen Referenzarm und Messarm $L = L_1 - L_2$ kleiner ist als die Kohärenzlänge L_c (Measures 2001: Kap. 3.8). Nach Bludau (1998: Kap. 1.3.4) besitzen LEDs im Allgemeinen eine Kohärenzlänge von einigen 10 bis einigen 100 Mikrometern. Das bedeutet, dass mit dieser Interferometerkonfiguration nur Weglängenänderungen in der Größenordnung der Kohärenzlänge der verwendeten LED gemessen werden können. Für die meisten Anwendungen der Interferometrie ist das jedoch nicht ausreichend.

Measures (2001: Kap. 10.2.2) beschreibt zur besseren Anschaulichkeit das Prinzip von Messungen eines faseroptischen MSI mit niederkohärenter Lichtquelle mit Hilfe von *kohärenten Wellenpaketen*. Abbildung 2.6 zeigt ein faseroptisches MSI mit einem Weglängenunterschied L zwischen Referenz- und Messarm, der größer ist als die Kohärenzlänge L_c des ausgesendeten Lichtwellenpakets (blaues Wellenpaket S_0). In diesem Fall kommt es nach Wiedervereinigung der beiden reflektierten Wellenpakete (rot: S_1 ; grün: S_2) im Koppler zu keinen Interferenzerscheinungen.

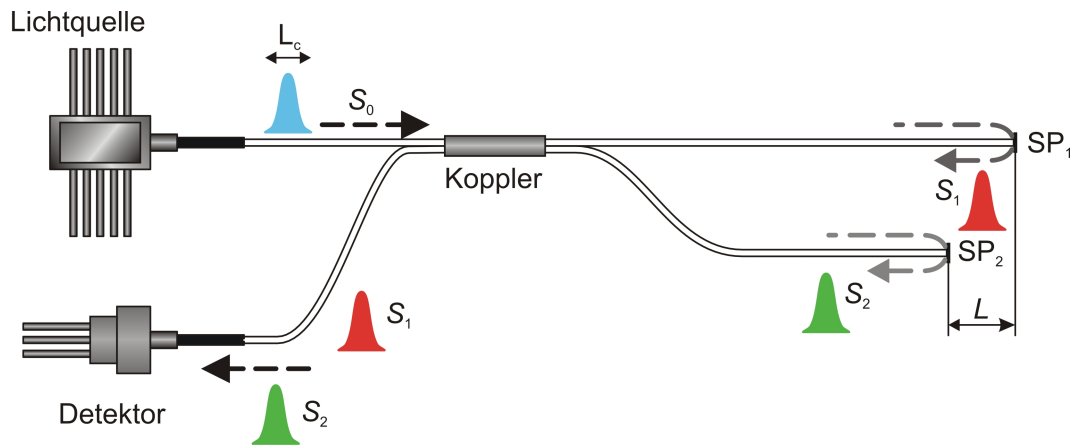


Abbildung 2.6: Faseroptisches MSI mit $2L > L_c$ (Presl, 2009, nach Measures, 2001, S. 482)

Verringert sich der Weglängenunterschied L auf die Hälfte der Kohärenzlänge oder weniger, treten nach Wiedervereinigung der Wellenpakete im Koppler wieder messbare Interferenzen auf (in Abbildung 2.7 gelb dargestellt).

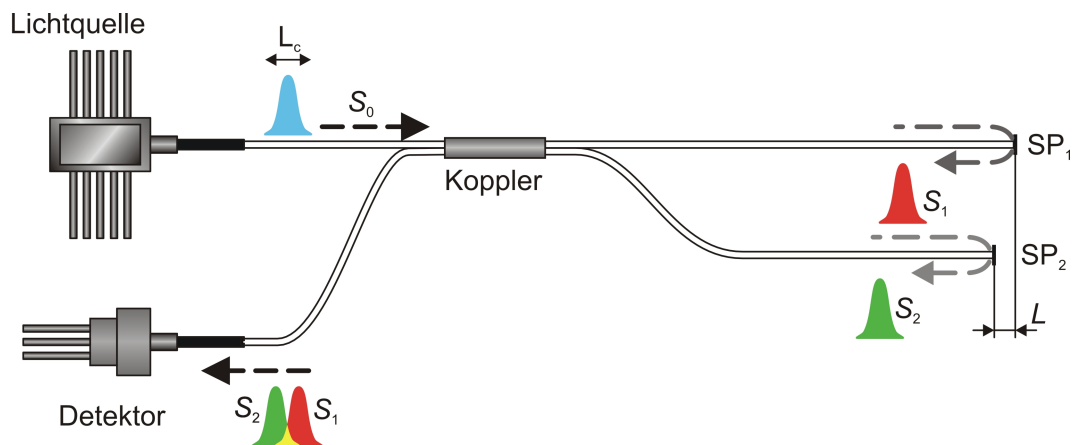


Abbildung 2.7: Faseroptisches MSI mit $2L < L_c$ (Presl, 2009, nach Measures, 2001, S. 482)

Wie bereits erwähnt, ist für die meisten kommerziellen Anwendungen ein Messbereich von einigen 10 bis 100 Mikrometer zu klein. Um dieses Problem zu umgehen beschreibt Measures (2001: Kap. 10.2.2) eine Tandemkonfiguration eines faseroptischen MSI. Dabei wirkt ein MSI als Sensorinterferometer, ein

zweites dient als Referenzinterferometer. Abbildung 2.8 zeigt eine schematische Darstellung dieser Tandemkonfiguration. Voraussetzung im Sensorinterferometer ist dabei, dass der Weglängenunterschied L_S zwischen Mess- und Referenzfaser größer ist als die Kohärenzlänge L_c der Lichtquelle. Dadurch kann nach Wiedervereinigung der beiden Wellenpakete A_1 und A_2 durch den Koppler in die gleiche Faser keine Interferenz auftreten. Die Wellenpakete A_1 und A_2 wandern jetzt in Richtung Referenzinterferometer, wo sie wiederum von einem Koppler auf Mess- und Referenzfaser aufgeteilt werden. Der Weglängenunterschied L_R im Referenzinterferometer ist durch einen beweglichen Spiegel variabel. Wird nun L_R dahingehend verändert, dass sich mindestens zwei der mittlerweile vier reflektierten Wellenpakete bis auf die Kohärenzlänge L_c nähern, treten messbare Interferenzerscheinungen auf (in Abbildung 2.8 gelb dargestellt).

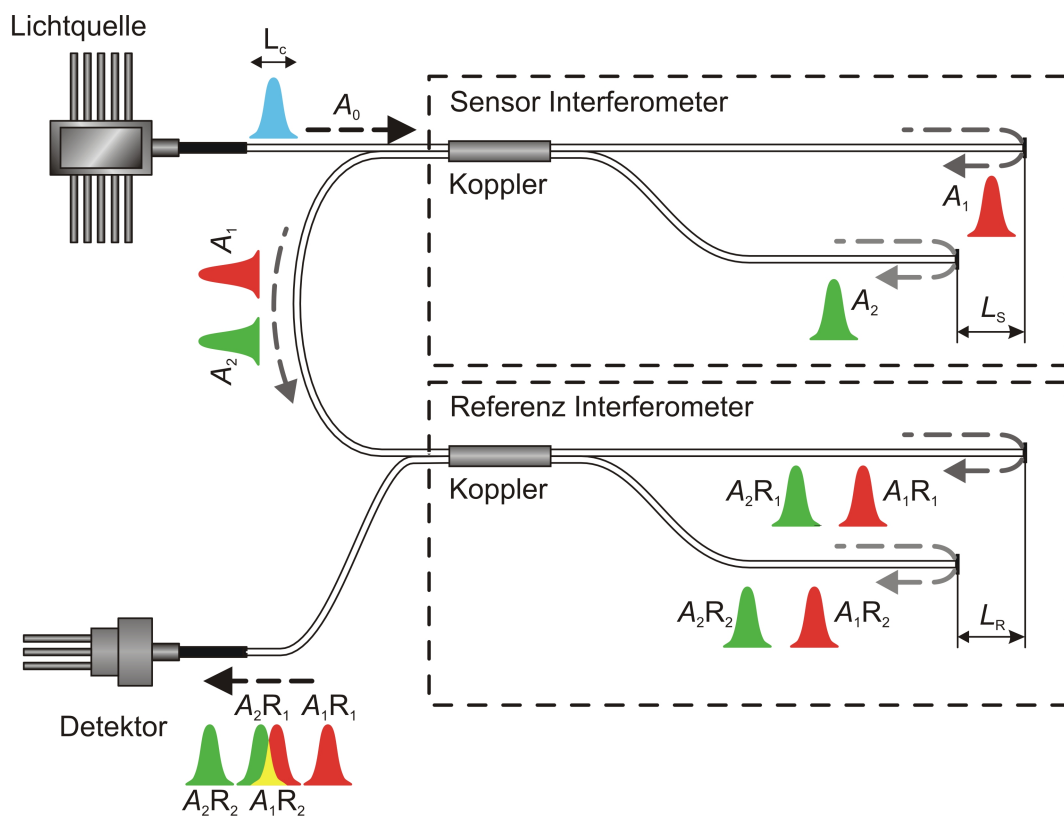


Abbildung 2.8: Doppeltes MSI mit niederkohärenter Lichtquelle (Presl, 2009, nach Measures, 2001, S. 483)

Die größte Intensität der Interferenz tritt auf, wenn der Weglängenunterschied L_R im Referenzinterferometer null ist ($L_R = 0$). In diesem Fall überlappen die Wellenpakete $A_2R_1 - A_2R_2$ und $A_1R_1 - A_1R_2$. Verändert man die Spiegelposition im Referenzinterferometer bis die Weglängenunterschiede L_R und L_S gleich sind, tritt wiederum ein Maximum an Interferenz auf. Dabei überlappen nur zwei der Wellenpakete ($A_1R_2 - A_2R_1$ oder $A_2R_2 - A_1R_1$). Welche zwei Wellenpakete überlappen, hängt von der Länge des Messarms im Referenzinterferometer ab. Ein typisches Intensitätsbild dieses Interferenzmusters wird in Abbildung 2.9 dargestellt.

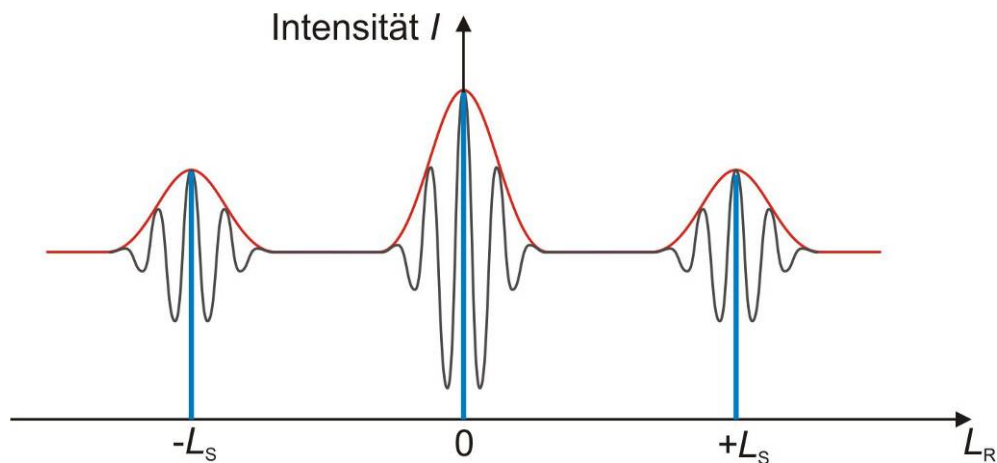


Abbildung 2.9: Interferenzmuster eines MSI in Tandemkonfiguration bei variiertem L_R (Presl, 2009, nach Lienhart, 2007)

Um den Weglängenunterschied im Sensorinterferometer bestimmen zu können, wird zunächst die umhüllende Kurve des Interferenzmusters berechnet. Über eine Schwerpunktberechnung der umhüllenden Kurve (in Abbildung 2.9 blau dargestellt) und der Information über die jeweilige Spiegelposition im Referenzinterferometer ist es möglich, den Weglängenunterschied L_S im Sensorinterferometer zu berechnen (Lienhart 2007: Kap. A3).

Ein großer Vorteil dieser Interferometerkonfiguration ist die Möglichkeit, absolute Messungen durchzuführen. Die Information über den Weglängenunterschied L_S im Sensorinterferometer wird über die Verschiebung des variablen Spiegels im Referenzinterferometer gewonnen.

3 Messsystem *SOFO Static*

Das Messsystem *SOFO Static* wurde an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) entwickelt und wird von der Firma *Smartec SA*, welche zur *Roctest* Gruppe gehört, seit 1996 kommerziell vertrieben (Glišić & Inaudi 2007: Kap. 2.2.1 bzw. Lienhart 2007: Kap. A1). Ein am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) vorhandenes und für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit verwendetes Messinstrument ist das *Smartec SOFO V* mit der Seriennummer 001FA9777.

Im Folgenden werden Funktionsweise und Komponenten dieses Messsystems nach Inaudi (1997: Kap. 6) näher erläutert. Eine schematische Darstellung des *SOFO Static* Systems wird in Abbildung 3.1 gezeigt.

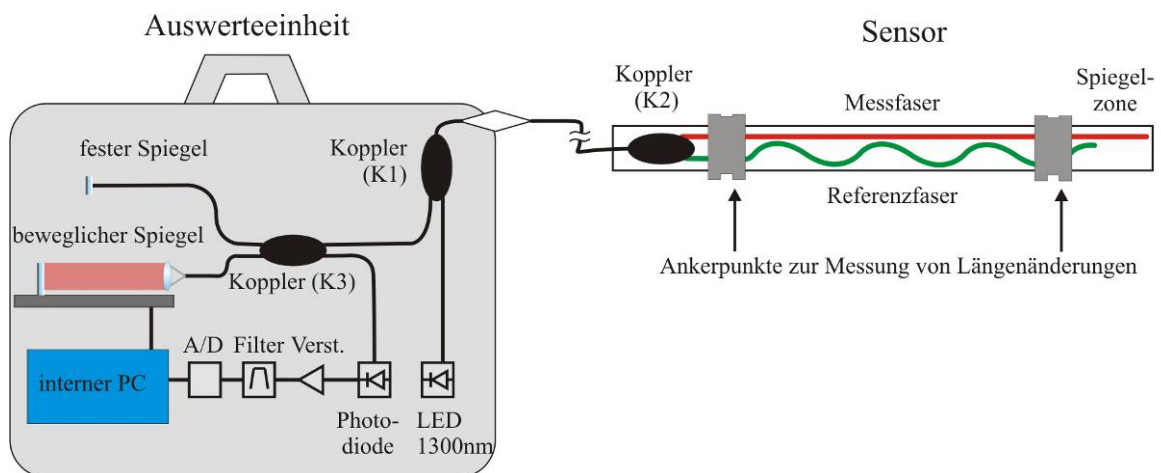


Abbildung 3.1: Systemkomponenten des *SOFO Static* von Smartec SA nach Inaudi & Vurpillot, 1999

3.1 Funktionsprinzip

Das *SOFO Static* System ist die kommerzielle Umsetzung eines doppelten faseroptischen Michelson Interferometers in Tandemkonfiguration. Dieses Messprinzip zur Bestimmung geringer Weglängenänderungen mittels niederkohärenter Lichtquelle wurde in Kapitel 2.2.3 behandelt.

Der in Abbildung 3.1 (rechts) dargestellte Sensor des *SOFO Static* Systems entspricht dem Sensorinterferometer in Abbildung 2.8, die Auswerteeinheit dem Referenzinterferometer. Im Zuge eines Messvorgangs wird der bewegliche Spiegel mittels eines mikroprozessorgesteuerten DC Motors und einer Stahlspindel entlang des Messbereichs von ± 50 mm bewegt. Mittels des am Photodetektor gemessenen Interferenzmusters und den Weginformationen des beweglichen Spiegels berechnet ein interner PC den Längenunterschied zwischen Messfaser und Referenzfaser im Sensor.

3.2 SOFO Static Reading Unit

Die Auswerteeinheit des *SOFO Static* wird von *Smartec SA* als *Reading Unit (RU)* bezeichnet.



Abbildung 3.2: *SOFO Static* Reading Unit (Anhang B.1)

3.2.1 Aufbau der *SOFO Static* RU

Die *SOFO Static* RU befindet sich in einem wasserdichten Hartschalenkoffer, um die sensible Elektronik vor rauen Bedingungen im Einsatz zu schützen. In der RU befinden sich neben einer optischen Lichtquelle ein verstellbarer Spiegel und ein Photodetektor. Über eine serielle Schnittstelle (RS232) kann die *SOFO Static* RU mit einem PC verbunden werden. Weiters vorhanden sind ein optischer Anschluss für einen SOFO Sensor (auf Wunsch auf 12 Anschlüsse erweiterbar) und ein spezieller SOFO BUS (RS485) Anschluss. Dieser bietet die Möglichkeit, einen Multiplexer anzuschließen. Über den Multiplexer können weitere Sensoren angeschlossen und ohne Abstecken angesteuert werden. Die Stromversorgung der RU erfolgt entweder über ein Netzgerät oder die interne Batterie. Laut

Hersteller ist mit der internen Batterie eine Stromversorgung für 5000 Messungen (bei 20°C) im Data Logger Modus möglich. Bei interaktiven Messungen wird mit der internen Batterie eine Messzeit von mindestens 8 Stunden gewährleistet. Der Data Logger besitzt eine Speicherkapazität von 8000 Messungen und ist auf Wunsch erweiterbar auf bis zu 80.000 Messungen. Die Betriebstemperatur wird im Bereich von -20°C bis +60°C angegeben. Weiters ist die SOFO Static RU resistent gegen eine Luftfeuchtigkeit von bis zu 90% (Anhang B.1).

3.2.2 Hauptkomponenten der SOFO Static RU

Lichtquelle

Als Lichtquelle in der RU wird eine LED mit einer Nennwellenlänge von 1300 nm und einer Kohärenzlänge von 40 µm verwendet. Die Nennwellenlänge befindet sich nach Inaudi (1997: Kap. 6.5) in der Nähe eines sogenannten Übertragungsfensters von optischen Fasern. In der Nähe eines Übertragungsfensters ist die Abschwächung der Lichtquelle innerhalb der Faser geringer. Die aufgrund dieser Übertragungsfenster am häufigsten verwendeten Nennwellenlängen sind 850 nm, 1300 nm und 1550 nm. Ein weiterer Vorteil der Nennwellenlänge von 1300 nm ist, dass in diesem Bereich (1250 nm – 1350 nm) die Geschwindigkeit von Lichtwellen in optischen Fasern relativ konstant ist (Rogers, 2001: Kap. 3.4.1 f). Zusätzlich zeichnen sich LEDs durch geringe Kosten und ihre geringe Größe aus.

Interner PC

Der interne PC berechnet den Längenunterschied zwischen Referenzfaser und Messfaser im Sensor und speichert die Ergebnisse im internen Speicher ab. Aufgrund des internen PCs und der Stromversorgung ist es möglich, autarke Messungen durchzuführen. Dabei wird keine Verbindung zu einem externen PC benötigt. Das Messprogramm kann direkt auf dem internen PC gespeichert

werden. Dadurch wird je nach Stromversorgung ein autarker Betrieb von bis zu mehreren Wochen möglich.

Photodetektor

Photodetektoren basieren in faseroptischen Anwendungen auf Halbleitertechnologie und wandeln Licht in elektrischen Strom um. Für die detaillierte Beschreibung der Funktionsweise eines Photodetektors wird auf Rogers (2001: Kap. 5.2) verwiesen. Bei der Wahl des Photodetektors entschied sich *Smartec SA* für ein gewerbliches Produkt der Firma *New Focus* (Modell 2011). Dieser Photodetektor kann mit verschiedenen Gain-Levels sowie internen Hoch- und Tiefpassfiltern arbeiten. Weitere technische Informationen über dieses Modell finden sich im Datenblatt des Photodetektors, welches auf der Homepage der Firma heruntergeladen werden kann².

Spezifikationen der SOFO Static RU

Tabelle 3.1: Herstellerspezifikationen SOFO Static RU (Anhang B.1)

Parameter	Werte
Messgenauigkeit	2 μm
Linearität / Genauigkeit	< 2 ‰
Messbereich	50 mm
Messzeit	< 10 s
Messdrift	unter Messauflösung
Kalibrierung	nicht notwendig

² http://www.newfocus.com/products/documents/manuals/20X1_Manual_RevB.pdf
(zuletzt besucht: 08/2010)

3.3 SOFO Sensoren

3.3.1 SOFO Standardsensor

SOFO Standard Sensoren werden je nach Bedarf in Längen von 0.25 Meter bis 10 Meter hergestellt. Der Sensor wird in *Spiegelzone*, *Aktive Zone* und *Passive Zone* unterteilt (Glišić 2000: Kap. 2.3 bzw. Anhang B.2). *Spiegelzone* und *Aktive Zone* werden durch ein spezielles Kunststoffrohr aus Polyimid geschützt. Die *Aktive Zone* wird durch zwei Anker begrenzt und schließt Mess- und Referenzfaser ein. Die speziellen Anker stellen die Verbindung zwischen Objekt und Sensor her, indem sie Deformationen aufnehmen und auf die Messfaser übertragen. Die Längenänderung zwischen Messfaser und Referenzfaser in der Aktiven Zone entspricht somit der Deformation des Objektes in Sensorrichtung. Die Messfaser ist zwischen den Ankerpunkten vorgespannt, um sowohl Streckungen als auch Stauchungen messen zu können. Die Referenzfaser ist länger und befindet sich ohne Vorspannung in der *Aktiven Zone* (mechanisch unabhängig). Dadurch wird eine Temperaturkompensation erreicht, da sich Temperaturänderungen auf beide Fasern gleich auswirken. Abbildung 3.3 zeigt eine schematische Darstellung eines SOFO Standard Sensors.

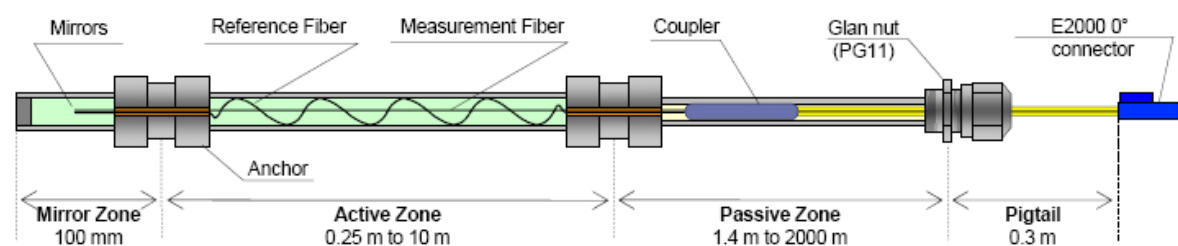


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines SOFO Standard Sensors (Anhang B.2)

In Abbildung 3.4 ist die *Spiegelzone* dargestellt, in der sich die Enden beider Fasern befinden. Diese losen Faserendstücke werden nach Inaudi (1997: Kap. 6.6.7) mit einer Silberlegierung versehen, um die Reflexion der Lichtwellen

zu erhöhen. Die *Passive Zone* wird standardmäßig durch einen Kunststoffmantel vor äußeren Einflüssen geschützt und enthält einen optischen Koppler und eine Einmodenfaser. Sie kann nach Bedarf bis zu 2000 Meter lang gefertigt werden und leitet die Lichtwellen der *Aktiven Zone* über eine Anschlussfaser und eine Steckverbindung zur SOFO Static Reading Unit weiter.

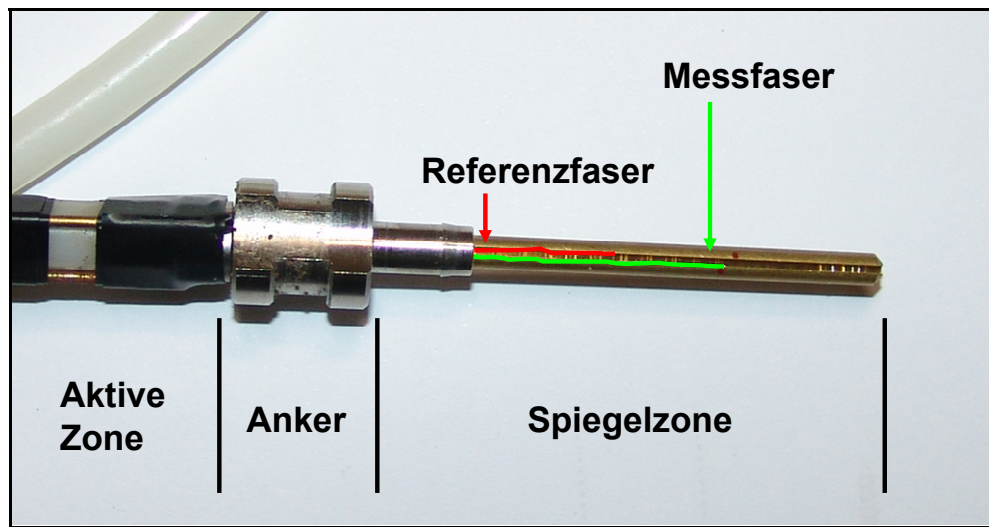


Abbildung 3.4: Spiegelzone eines SOFO Standard Sensors ohne Schutzrohr

SOFO Standard Sensoren können an der Oberfläche von beliebigen Stahlstrukturen, Objekten aus Holz und bestehenden Gebäuden aus Beton installiert werden. Es besteht auch die Möglichkeit, sie direkt in frischen Beton bzw. Mörtel (Glišić 2000) oder für geotechnische Anwendungen in Rutschhänge einzubetten (Brunner & Woschitz 2008). Tabelle 3.2 zeigt die wichtigsten Herstellerspezifikationen eines SOFO Standard Sensors.

Tabelle 3.2: Herstellerspezifikationen des SOFO Standard Sensors (Anhang B.2)

Parameter	Werte
Messbereich	1.5% der Länge der Aktiven Zone (1% Streckung, 0.5% Stauchung)
Temperaturbereich	-50 bis +120 °C (Aktive Zone) (auf Wunsch bis + 170 °C) -40 bis +80 °C (Passive Zone)
Wasserdicht	bis 5 bar (bis 15 bar mit extra Schutz an den Ankerpunkten)
Kalibrierung	nicht notwendig

Neben dem SOFO Standard Sensor werden in Inaudi et al. (1997: Kap. 3) zwei weitere Typen von Sensoren beschrieben, nämlich *Kurze* und *Lange* Sensoren. Kurze Sensoren weisen typischerweise eine Länge im Dezimeterbereich auf. Sie werden verwendet, um relativ zähflüssige Materialien wie Mörtel oder Klebstoff zu überwachen. Lange Sensoren können hingegen Längen bis zu 40 m erreichen. Diese werden oft als Alternative zu herkömmlichen Extensometern in Staudämmen oder ähnlichen geo-mechanischen Monitoring Aufgaben eingesetzt.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden ausschließlich SOFO Standard Sensoren verwendet, daher werden Kurze und Lange Sensoren in weiterer Folge nicht näher erläutert. Über weitere kommerziell erhältliche Sensoren der Firma *Smartec SA* für Spezialanwendungen kann man sich auf der Homepage der Firma informieren³.

³ <http://www.smartec.ch/SOFO.htm> (zuletzt besucht: 10/2010)

3.4 Software SOFO SDB

Im Folgenden wird die im Zuge der Messungen für diese Masterarbeit verwendete Software *SOFO SDB (Version 6.3.8)* des Messsystems *SOFO Static* näher erklärt. Eine aktuelle Version dieses Programmpakets sowie das entsprechende Handbuch können auf der Homepage der Firma *Smartec SA* heruntergeladen werden⁴. Für den Betrieb der SOFO RU ist die Software notwendig. Sie fungiert in gleichen Maßen als Datenverwaltungstool der Messergebnisse, Kommunikationstool mit der RU, und ermöglicht die Verwaltung der verwendeten Sensoren. Mit ihr werden Messabläufe (Agenden), Sensoren, Sessions und diverse Parameter definiert und an die RU gesendet.

Weiters ermöglicht die Software die grafische Darstellung der Messwerte, der Signalstruktur sowie weiterer relevanter Parameter, wie z.B. der Intensität der Messung oder der internen Temperatur der RU. Sämtliche Messungen der einzelnen Sensoren sowie deren Parameter werden in einer SOFO Datenbank gespeichert. Diese basiert auf der MicrosoftTM Jet Engine und kann daher von MicrosoftTM Programmen wie Excel, Access oder Visual Basic problemlos bearbeitet werden.

⁴ <http://www.smartec.ch/Support/Downloads.htm> (zuletzt besucht: 10/2010)

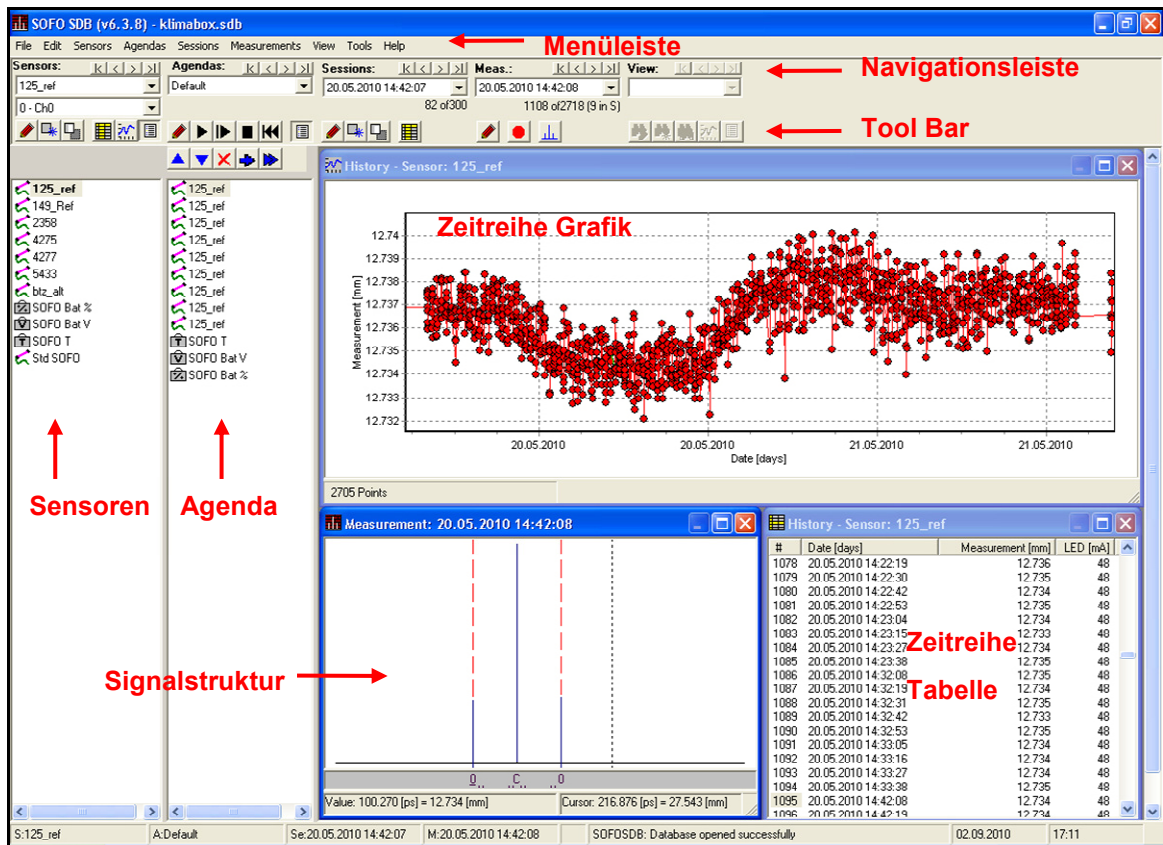


Abbildung 3.5: SOFO SDB (V. 6.3.8) Übersichtsfenster

Abbildung 3.5 zeigt einen Screenshot des Hauptfensters der Software nach Öffnen einer vorhandenen SOFO Datenbank.

Über die Menüleiste gelangt man zu den verschiedenen Funktionen der Software und deren Einstellungsmöglichkeiten. In der Navigationsleiste kann man Sensoren definieren und verwalten, Agenden erstellen, Sessions festlegen sowie Messungen steuern. Die *Toolbar* bietet dafür Shortcuts der am meisten benützten Funktionen der Menüleiste. Das Hauptfenster kann je nach Wunsch mehrere Unterfenster beherbergen. Die Grundfunktionen des Programms werden im Anschluss näher erklärt.

Sensors

In diesem Menüpunkt können Sensoren angelegt werden, die in den Messungen zum Einsatz kommen. Abbildung 3.6 zeigt die Auswahlmöglichkeit der Sensortypen, die in der Software angeboten werden.

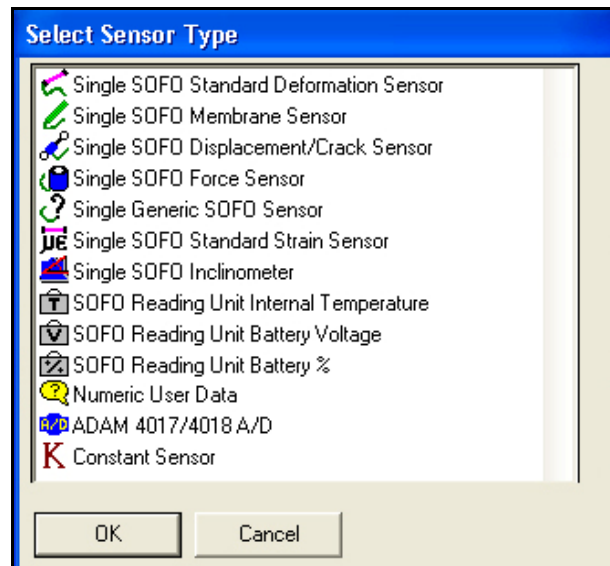


Abbildung 3.6: Auswahlmöglichkeiten neuer Sensoren (SOFO SDB)

Nach Auswahl des gewünschten Sensortyps ermöglicht das Programm die Verbindungsparameter und allgemeine Einstellungen zum Sensor (Name, Länge, Messbereich, Geometrie) festzulegen. Bei Verwendung eines Multiplexers zur Messung mehrerer Sensoren müssen in den Verbindungseinstellungen die richtigen Kanäle gewählt werden. Die auf diesem Weg erstellten Sensoren werden im Übersichtsfenster auf der linken Seite unter dem Menüpunkt *Sensors* aufgelistet (siehe Abbildung 3.5 links).

Agendas

Unter dem Menüpunkt *Agendas* ist es möglich, Messpläne zu erstellen. Der Agenda können die zuvor definierten Sensoren in beliebiger Reihenfolge hinzugefügt werden. Weiters können in den Einstellungen der Agenda Startpunkt

sowie Endpunkt oder Zeitintervalle der Messungen definiert werden. Dadurch kann eine Agenda entweder manuell oder automatisch ausgeführt werden. In Abbildung 3.5 (links) wird eine fertig erstellte Agenda angezeigt.

Sessions

Möchte man verschiedene Sensoren an einem bestimmten Tag oder einer bestimmten Bauphase eines zu überwachenden Gebäudes der Reihe nach messen, können diese der gleichen *Session* zugeordnet werden. Dies erleichtert die Analyse und Darstellung der oft über längere Zeiträume erhobenen Messdaten.

Measurements

Messungen sind der zentrale Punkt der Software. Wurden die Sensoren und die entsprechenden Verbindungseinstellungen korrekt definiert, kann eine Messung durchgeführt werden. Ein sogenannter *Scan* (Verschiebung des Referenzspiegels über den Messbereich von ± 50 mm) dauert circa 10 Sekunden und kann über den *Scan Sensor* Button in der Navigationsleiste gestartet werden. Konnte ein Messwert erfasst werden, hat man mehrere Möglichkeiten das Ergebnis zu visualisieren. Mit der Auswahl *Measurement* unter dem Menüpunkt *View* wird die Signalstruktur der aktuellen Messung dargestellt. Abbildung 3.7 zeigt die aufgrund des Zoom Levels stark generalisierte Signalstruktur einer Messung. Diese entspricht aber der in Abbildung 2.9 abgebildeten Umhüllenden des Interferenzmusters.

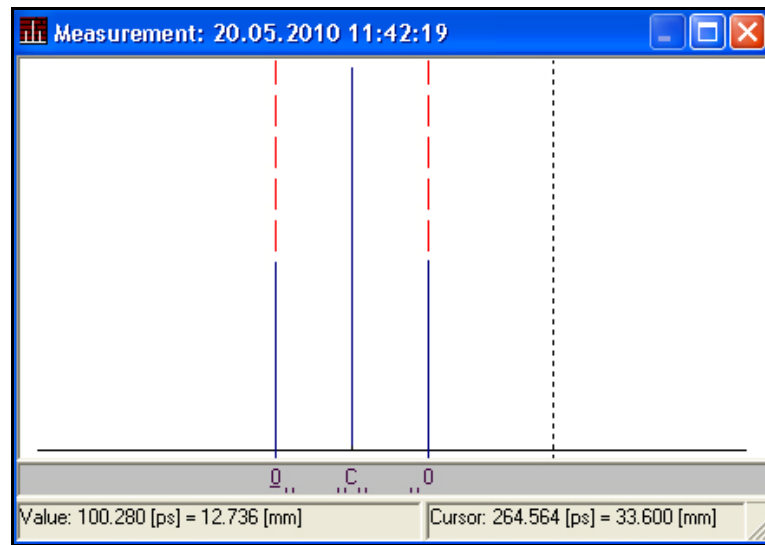


Abbildung 3.7: Signalstruktur einer SOFO Static Messung (SOFO SDB)

Die Titelleiste eines *Measurement* Fensters zeigt das Datum und die Uhrzeit der Messung. Die Entstehung der angezeigten Signalstruktur wurde bereits in Kapitel 2.2.3 erklärt. Neben dem Hauptpeak in der Mitte existieren im Optimalfall genau zwei gleich große Nebenpeaks. Die rot strichlierten Linien signalisieren die für die Messwertberechnung ausgewählten Nebenpeaks. Diese Auswahl ist notwendig, da in der Signalstruktur durch verschiedene Einflüsse auch mehr als zwei Nebenpeaks auftreten können. Die Einflüsse für das Auftreten mehrerer Nebenpeaks werden nachfolgend näher erklärt. Im linken Bereich der Statusleiste des *Measurement* Fensters in Abbildung 3.7 wird der berechnete Unterschied der beiden Fasern im Sensor in [ps] und [mm] angezeigt. Die Abkürzung *ps* steht für Pikosekunden, welche beim SOFO Messsystem die Grundeinheit zur Berechnung der Längenunterschiede der beiden Fasern im Sensor ist. Licht legt in Vakuum innerhalb einer Pikosekunde eine Wegstrecke von 0.3 mm zurück. Für die Berechnung des Längenunterschieds in [mm] wird von *Smartec SA* eine eigens für das SOFO Static entwickelte Umrechnungsvorschrift verwendet ($[mm]=0.127*[ps]$). Auf der rechten Seite der Statusleiste werden die Werte für die aktuelle Cursorposition angezeigt (schwarz strichlierte Linie).

Das Auffinden der „wahren“ Nebenpeaks, die den Längenunterschied der Fasern darstellen, wird bei Vorhandensein mehrerer Nebenpeaks über die Anzeige der Cursorposition erleichtert. Im Folgenden werden die „wahren“ Nebenpeaks als Nebenpeaks, und die „falschen“ Nebenpeaks als *Parasitepeaks* bezeichnet.

Parasitepeaks

Parasitepeaks entstehen hauptsächlich durch unbekannte geräteinterne Interferenzerscheinungen der SOFO Static RU. Die Positionen der Parasitepeaks können durch eine Messung ohne Sensor festgestellt und in der Software definiert werden. Peaks an der Stelle dieser definierten Parasitepeaks werden für die Messwertberechnung danach nicht herangezogen. Parasitepeaks können aber auch durch Interferenzen im Verbindungskabel oder im Sensor selbst (z.B. aufgrund von Beschädigung) auftreten. Abbildung 3.8 zeigt eine Signalstruktur mit auftretenden Parasitepeaks. Die Nebenpeaks die den Messwert enthalten, sind mit einem grünen Pfeil markiert. Im grauen Balken unter der Signalstruktur sind die definierten Positionen der Parasitepeaks als kleine blaue Striche signalisiert. Die Centerpeaks sind durch C und die Nebenpeaks durch 0 markiert.

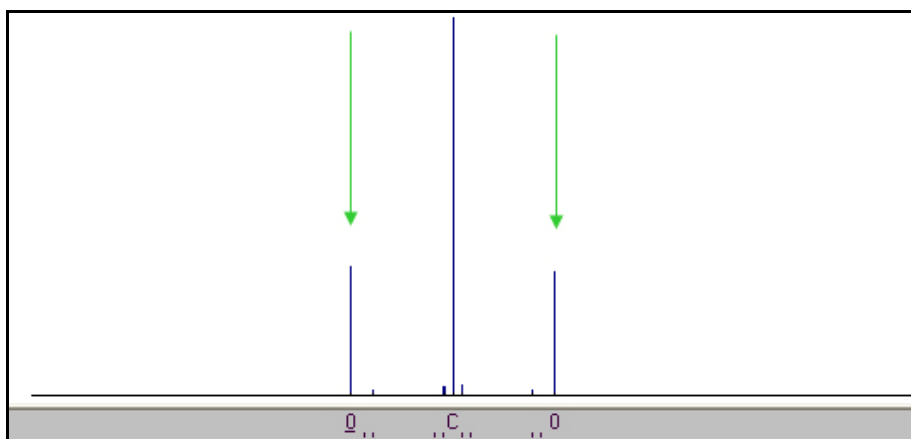


Abbildung 3.8: Signalstruktur mit Parasite Peaks

View

Die Software SOFO SDB ermöglicht über den Menüpunkt *View* die Darstellung der Messwerte in grafischer (*Value History Plot*) und in tabellarischer Form (*Value History Table*) (siehe Abbildung 3.5). Der *Value History Plot* zeigt alle Messwerte, die für den ausgewählten Sensor in der SOFO Datenbank gespeichert sind. Durch Doppelklick auf einen Datenpunkt in der Grafik wird die gewünschte Messung im *Measurement* Fenster angezeigt. In der Navigationsleiste können nun die Parameter der aktuellen Messung aufgerufen werden. Der *Value History Table* können neben dem eigentlichen Messwert mit Datum und Uhrzeit nach Wunsch unter dem Menüpunkt *View / Display Options* weitere Parameter, wie z.B. die Intensität der LED der Messung hinzugefügt werden.

Für den detaillierten Aufbau der SOFO Datenbank und diverser Funktionen wird auf das Handbuch SOFO SDB verwiesen.

4 Analyse von Langzeitmessungen

Um auf das Langzeitverhalten eingebetteter FOS schließen zu können, wurden im Zuge dieser Masterarbeit Messungen bereits länger eingebauter Sensoren untersucht. Im Rahmen der Dissertation von Werner Lienhart (2007) wurden im Jahr 2002 in eine Hangbrücke nahe Schladming SOFO Sensoren eingebettet. Die in den folgenden Jahren erhobenen Messdaten bilden die Grundlage für die Analysen von Langzeitmessungen in dieser Masterarbeit.

4.1 Monolithische Hangbrücke Schladming

Das Konzept einer monolithischen Hangbrücke wurde in Österreich erstmals im Jahr 2002 beim Ausbau der Landesstraße von Schladming nach Ramsau (Steiermark) angewendet. Das Brückendeck ist eine durchgehende ca. 150 m lange Betondecke, welche über 30 Stahlbetonpfählen im Hang verankert ist. Es liegt zu großen Teilen auf dem Untergrund auf und nur kleinere Bereiche des Brückendecks ragen frei heraus. Abbildung 4.1 zeigt den Grundriss der Hangbrücke. Die dunkelgrau dargestellten Bereiche kennzeichnen den am Hang aufliegenden Teil des Brückendecks, die hellgrauen Bereiche die frei herausragenden. Die Stahlbetonpfähle zur Stabilisierung des Brückendecks sind durch blaue Punkte dargestellt.

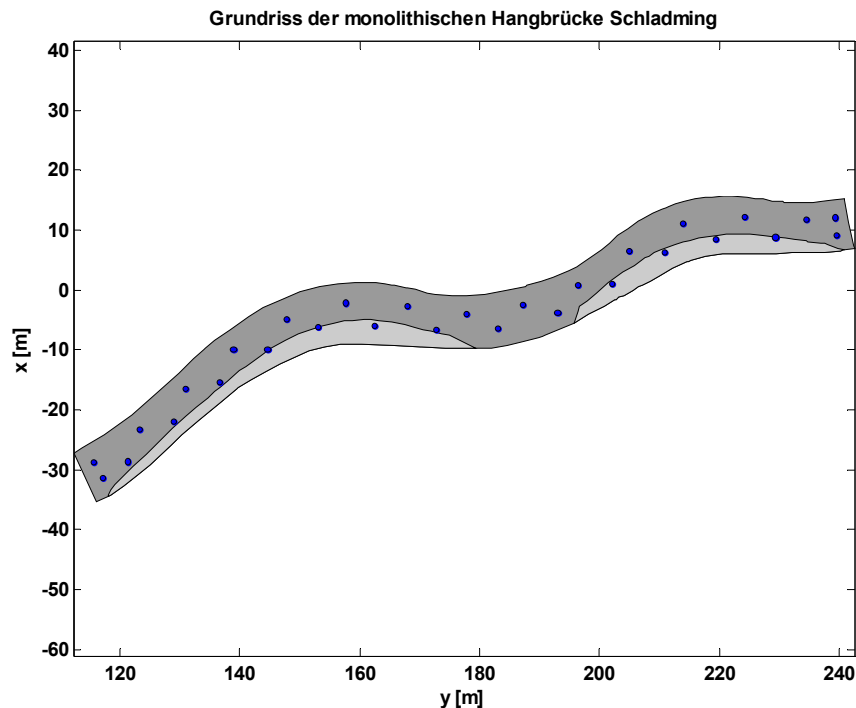


Abbildung 4.1: Grundriss der monolithischen Hangbrücke Schladming (Lienhart, 2007)

Vorteile einer solchen Brückenkonstruktion ohne Dehnungsfugen und Brückenlager sind geringere Bau- und Erhaltungskosten im Vergleich zu herkömmlich konstruierten Brücken. Eine Schwierigkeit dieser Brückenkonstruktion ist die Berechnung der Zwangsbeanspruchungen aufgrund von Temperaturänderungen. Daher wurde ein kontinuierliches Monitoringsystem entwickelt, um das Temperaturverhalten der Brücke erfassen zu können. Dabei kamen neben klassischen geodätischen Methoden der Bauwerksüberwachung auch Faseroptische Sensoren zum Einsatz (Lienhart 2007: Kap. 4.5).

4.1.1 Eingebaute Sensoren

Als FOS wurden von Werner Lienhart *SOFO Standard Sensoren* des Messsystems *SOFO Static* (Kapitel 3) der Firma *Smartec SA* ausgewählt. Diese verteilten sich auf 3 Messprofile im Brückendeck, welche quer zur Fahrtrichtung

angelegt wurden. Dabei kamen insgesamt 8 Sensoren mit jeweils einer Länge von 5 m zum Einsatz. Zusätzlich wurden von Werner Lienhart in zwei der Messprofile jeweils 6 Temperatursensoren des Typs *PT100* eingebaut, um die gemessenen Längenänderungen in Zusammenhang mit auftretenden Temperaturänderungen bringen zu können. Die Sensoren wurden mit Kabelbindern an Armierungseisen angebracht und direkt in das Brückendeck mit einbetoniert (Lienhart 2007: Kap. 4.5.3). Abbildung 4.2 zeigt die Aufteilung der drei Messprofile und der verwendeten SOFO Standard Sensoren. Die Temperatursensoren wurden in Messprofil 2 (MP2) und Messprofil 3 (MP3) eingebaut. Eine schematische Darstellung des Messprofils 3 mit den verwendeten Sensoren (SOFO Sensoren in rot, Temperatursensoren in blau) wird in Abbildung 4.3 gezeigt.

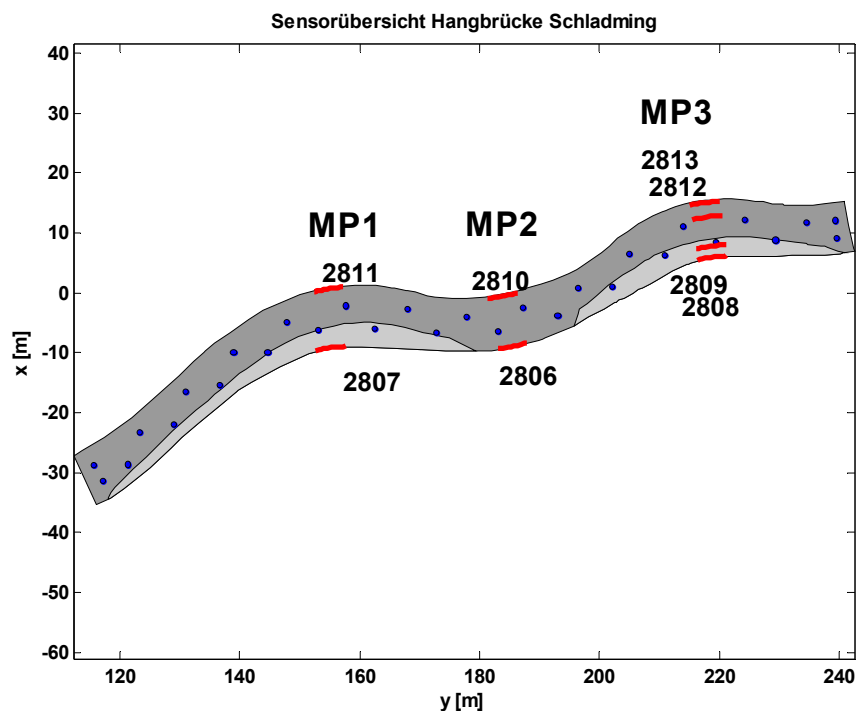


Abbildung 4.2: Übersicht der eingebetteten SOFO Standard Sensoren in den drei Messprofilen (Lienhart, 2007)

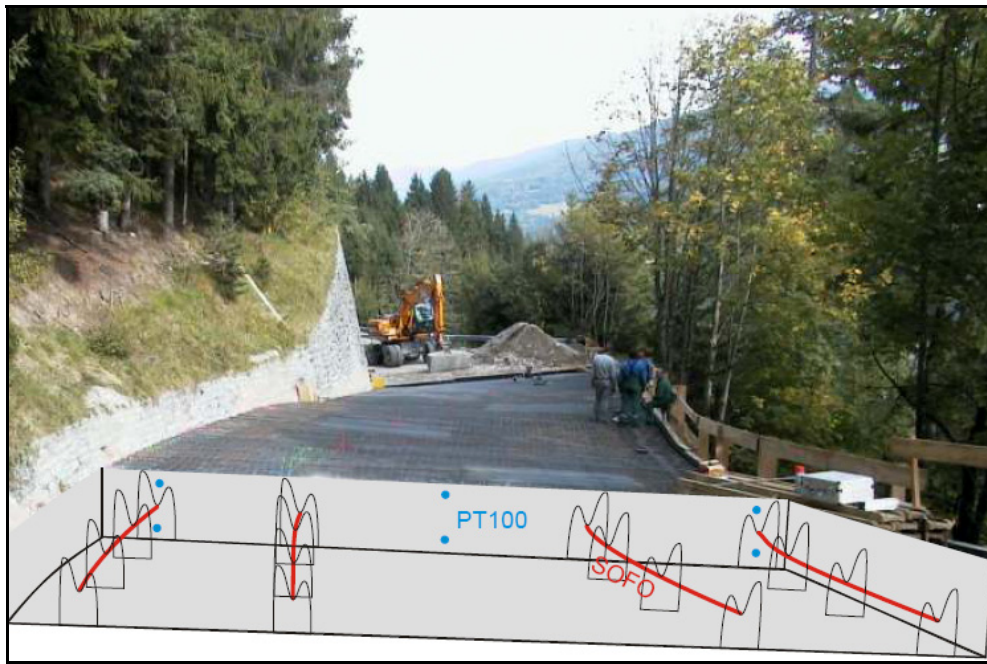


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des Messprofils 3 (MP3) mit den eingebetteten Sensoren (Lienhart, 2007)

4.2 Auswertung

Wie bereits erwähnt, wurden an der monolithischen Hangbrücke in Schladming seit der Errichtung im Jahr 2002, Messungen der eingebetteten FOS mit dem Messsystem *SOFO Static* durchgeführt. Ein Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine durch Alterungsprozesse der Sensoren hervorgerufene mögliche Veränderung im Messsignal festzustellen, und daraus auf deren Langzeitverhalten zu schließen. Zu diesem Zweck stehen sämtliche Messdaten seit Beginn der Messungen im Jahr 2002 bis zur letzten durchgeführten Messreihe im Jahr 2008 zur Verfügung. Diese Messungen wurden von Werner Lienhart im Zuge seiner Dissertation (Lienhart, 2007) und in weiterer Folge von Mitarbeitern des IGMS durchgeführt. Zur Ergänzung der Langzeitdaten wurden am 25. Mai 2010 mit tatkräftiger Unterstützung von Hrn. Ing. Lummerstorfer von mir weitere Messungen mit dem am Institut vorhandenen Messinstrument *Smartec SOFO V* durchgeführt.

Der eingebettete Sensor 2806 wurde bereits kurz nach erfolgreicher Installation 2002 im Brückendeck bei der darauffolgenden Montage von Leitschienen durch die Bauarbeiten beschädigt und somit unbrauchbar. Dieser wird in weiterer Folge nicht mehr behandelt, da keine Daten über den Sensor vorhanden sind. Für die restlichen Sensoren waren Messdaten vorhanden, wenn auch in unregelmäßigen zeitlichen Abständen und in unterschiedlicher Anzahl. Darauf wird bei der Analyse der einzelnen Sensoren genauer eingegangen.

Das SOFO System speichert die Messdaten in Form einer SOFO Datenbank ab. Diese kann mit dem zugehörigen Softwarepaket *SOFO SDB* (Kapitel 3.4) geöffnet und bearbeitet werden. Da die Software allerdings nicht genügend Analysemöglichkeiten hinsichtlich der Signalstruktur von Messungen zur Verfügung stellt, wurden die vorhandenen Datenbanken in eine ASCII und eine Binärdatei exportiert. Diese können nun unter anderem auch mit dem Programmpaket *Matlab*[®] eingelesen und bearbeitet werden. *Matlab*[®] (The Math Works, Inc., Massachusetts, USA) wird in verschiedenen Forschungsbereichen sowie der Industrie für die Lösung und Visualisierung mathematischer Problemstellungen eingesetzt.

Beim Exportieren der SOFO Datenbank entstehen für jeden in der Software *SOFO SDB* angelegten Sensor zwei Dateien, eine mit der Endung **.dat* und eine mit **bin.dat*. Wie in Abbildung 4.4 ersichtlich, ist die **.dat* Datei tabellarisch in 18 Spalten angeordnet. Jeder durchgeführten Messung ist eine Zeile zugeordnet. Die wichtigsten enthaltenen Parameter sind der Messzeitpunkt (*Time*), die Intensität der LED bei der Messung in Milliampere (*Int*), die Anzahl der Datenpunkte der Signalstruktur (*NumP*), die Position des Referenzspiegels für den Centerpeak (*CentralPeak[MS]*) und der berechnete Längenunterschied der beiden Fasern in Pikosekunden (*dL0[ps]*) und Millimeter (*dL[mm]*).

```

%File created: 22.01.2010 10:57:59
%Name of Database: H:\DA\Schladming_SOFO_messung_081126_v6_2.sdb
%Calibration parameters used to calculate dL are taken from
%this database!

%MeasID          Time          SessID  Sensor  Int   NumP  ScanMax
% 1              2:7              8       9      10   11    12
%=====
00003256  16 11 2002 05 42 17  000103  2811  37  0076  95573
00003255  16 11 2002 05 41 42  000103  2811  37  0075  95573
00008770  22 07 2004 11 30 53  000103  2811  41  0086  95573
00008769  22 07 2004 11 30 37  000103  2811  41  0088  95573

          MotorStep[mm]  CentralPeak[MS]  dL_raw[ps]  dL0[mm]  dL[mm]  val
          13              14              15          16          17          18
.....
          0  42190.1963671128  74.28374270707  09.43404  09.43404  1
          0  42190.1235297277  74.28248551868  09.43388  09.43388  1
          0  42177.2494715829  70.32605531167  08.93141  08.93141  1
          0  42177.7035661656  70.32050659509  08.93070  08.93070  1
          0  42196.9996663171  70.58023408961  08.96369  08.96369  1

```

Abbildung 4.4: Ausschnitt einer *.dat Datei nach dem Datenexport aus der Software SOFO SDB

Die Informationen über die Signalstruktur der Messungen (siehe Kapitel 2.2.3) sind in der **bin.dat* Datei im Hexadezimalsystem gespeichert. In ihr sind die Datenpunkte der in den Messungen enthaltenen Peaks der umhüllenden Kurve des Interferenzmusters gespeichert (siehe Abbildung 4.5).

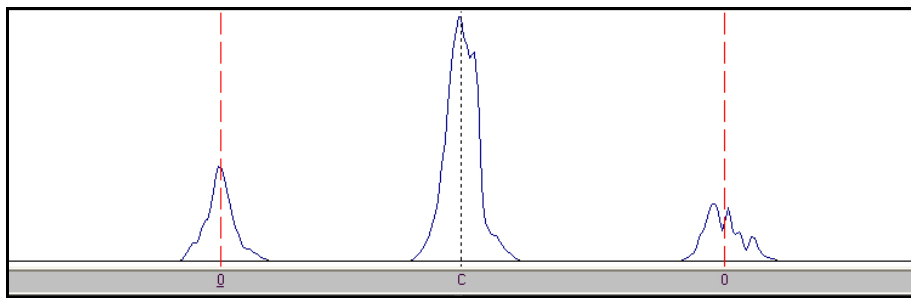


Abbildung 4.5: Datenpunkte einer umhüllenden Kurve eines Interferenzmusters (Zoom angepasst)

Zur Bearbeitung und Analyse dieser Peakinformationen wurde mit *Matlab*[®] eine Einleseroutine erstellt. Diese wandelt die vorhandenen Daten vom Hexadezimalsystem ins Dezimalsystem um, und speichert dieselben in einer für die Analysen und Berechnungen geeigneten Datenstruktur ab. Zusätzlich wird von der erstellten Einleseroutine die in Abbildung 4.4 gezeigte **.dat* Datei

eingelassen. Das Ergebnis des Importes dieser beiden Datenfiles ist eine Datenbank in *Matlab*[®] in Form eines Datenverbunds (*Struct*). Ein Datenverbund hat im Vergleich mit Vektoren oder Matrizen den großen Vorteil, dass darin verschiedene Datentypen gespeichert werden können. Er eignet sich daher vor allem für die Verwaltung größerer, inhomogener Datenmengen mit unterschiedlichen Datentypen. Für jede durchgeführte Messung eines Sensors wurde in diesem Datenverbund wiederum ein Datenverbund angelegt. In diesem sind alle vorhandenen Parameter der Messung gespeichert. Diese Einleseroutine war die Grundlage aller im Zuge dieser Masterarbeit durchgeführten Analysen und Berechnungen.

Im Folgenden werden Messparameter und Signalstruktur der in der Hangbrücke Schladming eingebetteten SOFO Standard Sensoren näher betrachtet. Sämtliche Auswertungen sowie Darstellungen von Ergebnissen wurden, wie die Implementierung der Einleseroutine, mit *Matlab (V.7.0.6 R2008a)* durchgeführt.

Im Zuge der Auswertung wurden bei längeren durchgehenden Messreihen zufällig auftretende Falschmessungen, sogenannte „Ghost“ Messungen festgestellt. Um die Messreihen korrekt analysieren zu können, wurden im Vorfeld der Berechnungen die wahren Messwerte von den Falschmessungen getrennt. Diese „Ghost“ Messungen werden im folgenden Kapitel näher erklärt.

4.2.1 „Ghost“ Messungen

Eindeutige Falschmessungen innerhalb einer Messreihe wurden als „Ghost“ Messungen definiert. Die Nebenpeaks, die den wahren Messwert enthalten, verschwinden dabei völlig aus dem Messsignal. Die SOFO Static RU verwendet dann zur Bestimmung der Längendifferenz zwei andere Nebenpeaks. Eine Systematik in der Auswahl dieser konnte nicht festgestellt werden. Diese Falschmessungen traten nur innerhalb von längeren Messreihen (über mehrere Stunden) unregelmäßig oft auf und konnten bei jedem der eingebetteten

Sensoren beobachtet werden. Auffällig dabei war, dass diese eindeutig falschen Messwerte konstant waren. Diese entsprachen auch nicht den definierten Parasitepeaks, die durch interne Interferenzerscheinungen der SOFO Static RU verursacht werden (Kapitel 3.4). Deshalb sind diese grob falschen Messwerte auf zusätzliche Interferenzerscheinungen zurückzuführen. Weshalb diese zusätzlichen Interferenzerscheinungen auftraten, konnte nicht geklärt werden. Durch Überprüfen der Messwerte aller verwendeten Sensoren konnten aber Ansteckfehler der Sensoren und damit eine falsche Zuordnung des Messwerts ausgeschlossen werden. Allerdings traten diese Falschmessungen nur bei Messreihen vor April 2007 auf. In diesem Monat wurde ein Systemupdate der SOFO Static RU von Version IV auf V durchgeführt. Bei der aktuellen Version der RU konnten diese Arten von Falschmessungen nicht mehr beobachtet werden.

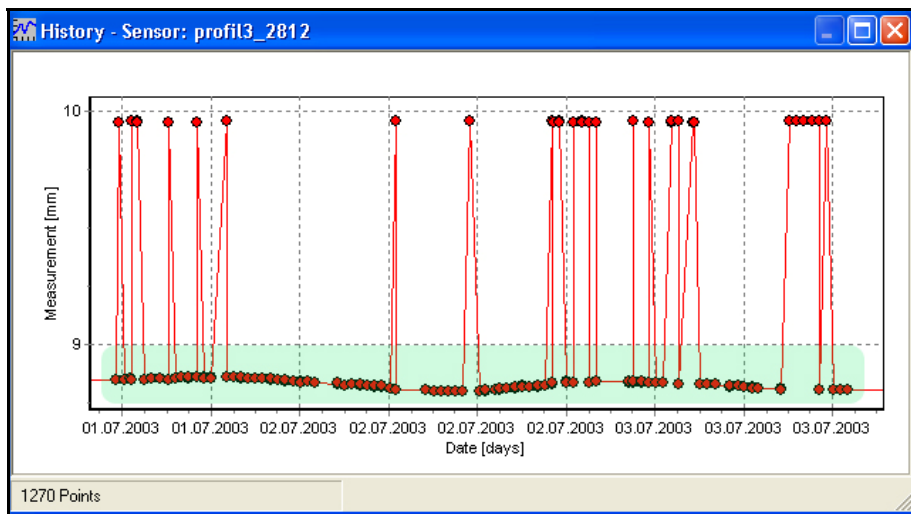


Abbildung 4.6: Sensor 2812 – Verlauf der Messwerte einer Messreihe über 2 Tage

Abbildung 4.6 zeigt den Verlauf der Messwerte von Sensor 2812, gemessen über einen Zeitraum von 2 Tagen im Juli 2003. Im grün hinterlegten Bereich der Abbildung befinden sich die wahren Messwerte der Längendifferenzen der Fasern im Sensor. Im Messwertbereich um 10 mm befinden sich die sogenannten „Ghost“ Messungen. Diese weisen in den Intensitäten und der Anzahl der Peaks keine Unterschiede zu den korrekten Messwerten auf. In Abbildung 4.7 sind die

Werte der „Ghost“ Messungen rot dargestellt, die Werte der Messungen mit korrekt bestimmten Längendifferenzen in blau.

Diese Falschmessungen traten hauptsächlich bei Messreihen mit relativ schwacher Signalstruktur auf. Die schwache Signalstruktur aller durchgeführten Messungen dieser Messreihe wird in Abbildung 4.8 deutlich. Die Amplituden der Nebenpeaks sind im Verhältnis zu den Amplituden der auftretenden Centerpeaks verschwindend klein (1:58). Die Parasitepeaks sind im Durchschnitt mit einem Verhältnis von 1:36 zu den Centerpeaks sogar größer als die Nebenpeaks. Bei Messungen mit einer guten Signalstruktur (Amplituden der Nebenpeaks deutlich größer als die der Parasitepeaks) konnten solche „Ghost“ Messungen nur sehr selten beobachtet werden. Im Folgenden wurden diese für die Analyse der Langzeitmessungen vernachlässigt.

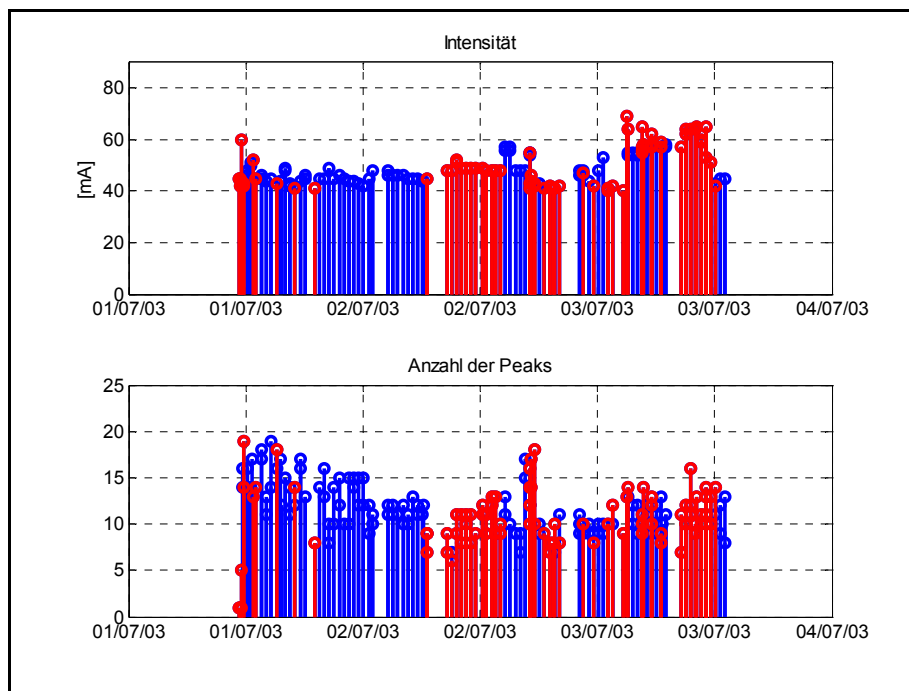


Abbildung 4.7: Sensor 2812 – Intensitäten und Anzahl der Peaks

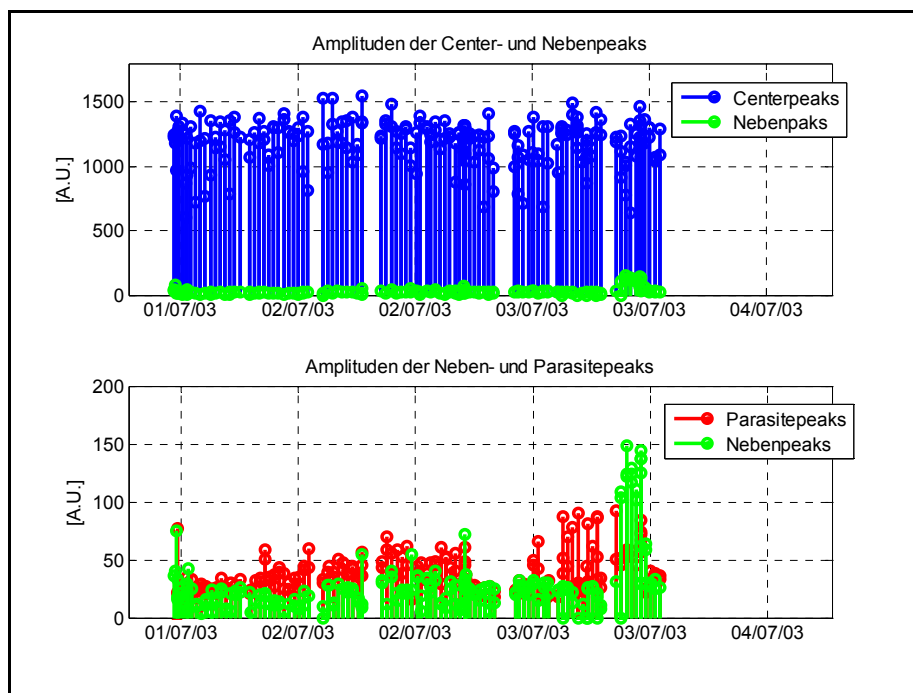


Abbildung 4.8: Sensor 2812 – Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks

4.2.2 Sensor 2808

Sensor 2808 befindet sich in einem frei herausragenden Teil am äußeren Rand des Brückendecks im südöstlichen Bereich der Hangbrücke (siehe Abbildung 4.9).

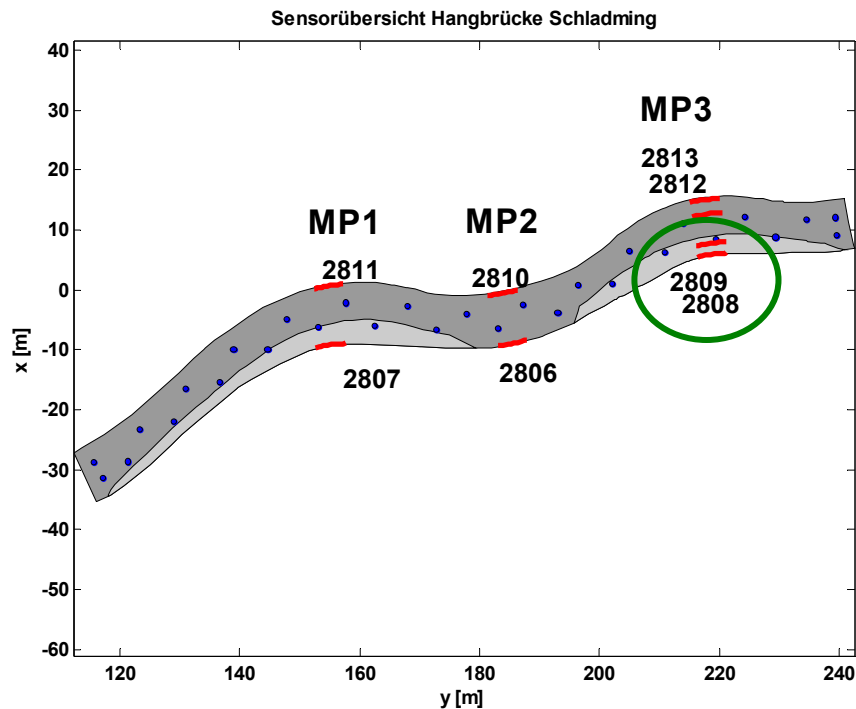


Abbildung 4.9: Übersicht der eingebetteten SOFO Standard Sensoren in den drei Messprofilen (Lienhart, 2007)

Über den gesamten Messzeitraum (2002 – 2010) lieferte der Sensor gültige Messwerte. Als gültige Messung wird eine Messung bezeichnet, bei der mindestens einer der zwei Nebenpeaks im Messsignal vorhanden ist. Dadurch kann der Längenunterschied der beiden Fasern im Sensor korrekt bestimmt werden. Abbildung 4.10 zeigt einen Überblick der mittleren Parameter (Mediane) für jede durchgeführte Messreihe. Der Median der Parameter wurde als Darstellungsweise gewählt, da dieser im Gegensatz zu einem arithmetischen Mittelwert von einzelnen Extremwerten in einer Messreihe unbeeinflusst ist.

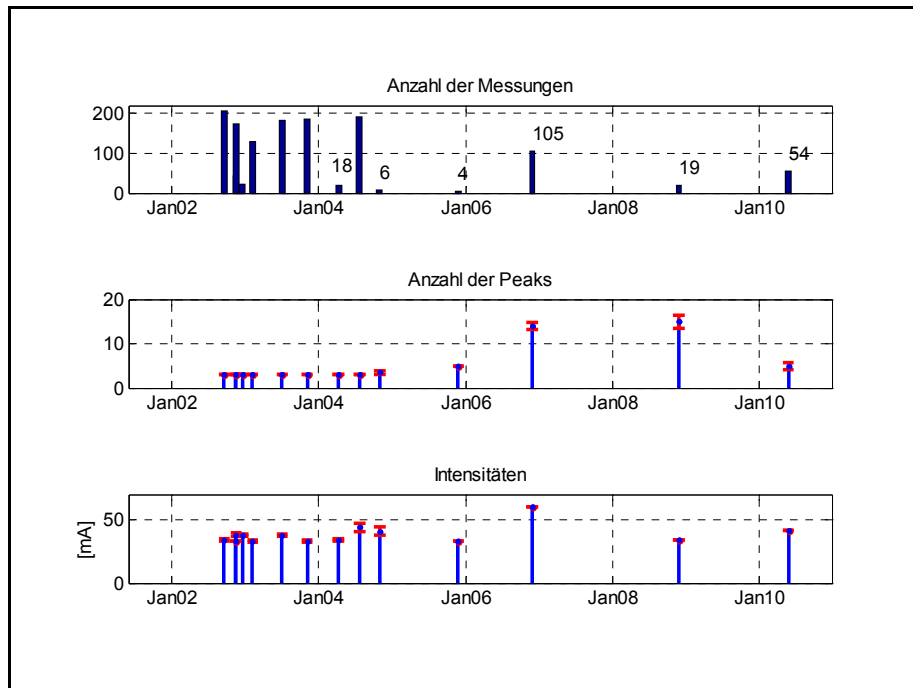


Abbildung 4.10: Sensor 2808 – Allgemeine Parameter

Eine Schwierigkeit für die Analyse der Parameter und der Signalstruktur der Messungen ergab sich durch die variierende Anzahl der getätigten Messungen pro Messepoche (Abbildung 4.10 oben). Es ist ersichtlich, dass von Beginn der Messungen im Jahr 2002 bis Anfang des Jahres 2004 Messreihen mit jeweils mehr Einzelmessungen durchgeführt wurden. Ab 2004 erfolgten zum Teil Messreihen mit nur 4 Messungen. Die Parameter dieser Messreihen mit wenigen Messungen haben folglich nicht die statistische Aussagekraft einer Messreihe mit vielen Messungen.

Die Mediane mit zugehörigem MAD (robustes Streuungsmaß) der Anzahl der im Messsignal auftretenden Peaks sind in Abbildung 4.10 (Mitte) dargestellt. Bis Ende des Jahres 2004 traten bei Einzelmessungen nur sehr selten mehr als drei Peaks (Centerpeak und 2 Nebenpeaks) auf. Deutlich zu erkennen ist ein Anstieg der Anzahl der Peaks zwischen den Messreihen im November 2005 und November 2006. Die Ursache für diesen Anstieg konnte nicht geklärt werden. Es

wird vermutet, dass bei dieser Messreihe ein verschmutzter Zwischenstecker oder ein beschädigtes Patch Cord der Grund für den Anstieg der Anzahl der auftretenden Peaks im Messsignal und der ebenfalls erhöhten Intensität sein könnten. Die Anzahl der Peaks sank bei der letzten Messreihe Ende Mai 2010 allerdings wieder auf das Niveau vom November 2005 (von 15 auf 5 Peaks pro Messung). Aus der Anzahl der Peaks kann aufgrund dieses Verhaltens keine Aussage über den Zustand oder einen Alterungsprozess des Sensors 2808 getroffen werden.

In Abbildung 4.10 (unten) werden die Mediane der Intensitäten der Messreihen mit dem zugehörigem MAD abgebildet. Dabei handelt es sich um die Intensität der LED der SOFO Static RU. Diese regelt die Intensität (Milliampere) je nach Stärke des reflektierten Messsignals. Ist ein zurückreflektiertes Signal schwach, wird die Intensität erhöht. Die Intensität der LED kann daher auch durch verschmutzte Steckverbindungen oder beschädigte Patch Cords (Verbindungskabel) beeinflusst werden. Es ist anhand der vorliegenden Daten und Aufzeichnungen nicht möglich gewesen, auf Zeitpunkte etwaiger Steckerreinigungen oder Wechsel der Verbindungskabel während der Messreihen in den vergangenen Jahren zu schließen. Sensor 2808 weist im Verlauf der Intensitäten der LED der Messreihen nur einen Anstieg auf 60 [mA] im November 2006 auf. Daher kann wie bei der Anzahl der Peaks über die Intensitäten der LED alleine keine Verbindung zur Güte des eingebetteten Sensors 2808 hergestellt werden. Aus diesem Grund wurden die in der Signalstruktur der einzelnen Messungen auftretenden Peaks näher analysiert.

Abbildung 4.11 zeigt die Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks. Nach Inaudi (1997: Kap. 5.4) ist die Amplitude des Centerpeaks einer Messung im Optimalfall (Laborbedingungen) doppelt so groß wie die Amplitude eines Nebenpeaks. Die zwei Nebenpeaks sollen die gleiche Amplitude aufweisen. Da aber im Messinstrument selbst, in den Steckverbindungen und im Sensor unvermeidbare Interferenzerscheinungen auftreten, wird dieses Verhältnis in der Praxis nur selten erreicht. Für Sensor 2808 lagen die Verhältnisse der Amplituden

von Centerpeaks zu Nebenpeaks über den gesamten Beobachtungszeitraum zwischen 1:3 und 1:8. Die Einheit der Größenordnung der Amplituden wird von *Smartec SA* nicht angegeben und daher in weiterer Folge als A.U. (Arbitrary Unit) bezeichnet.

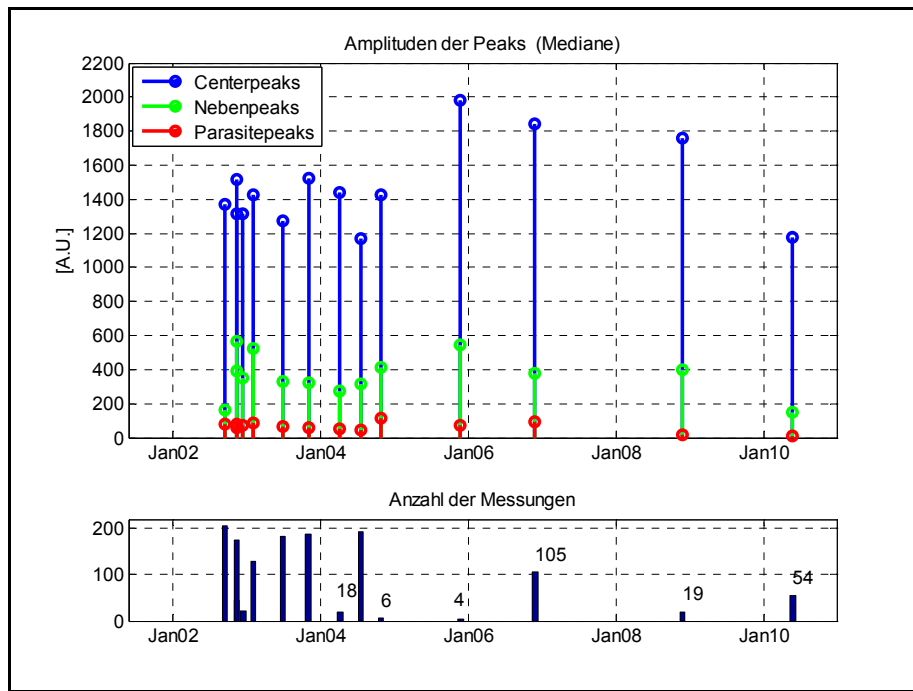


Abbildung 4.11: Sensor 2808 - Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks

Die Amplituden der Nebenpeaks sind in Abbildung 4.11 grün dargestellt, die der Parasitepeaks rot. Die Nebenpeaks sind über den gesamten Messzeitraum deutlich von den Parasitepeaks und den Centerpeaks zu unterscheiden. Aufgrund dieser Signalstruktur lieferte Sensor 2808 durchgehend gültige Messungen. Die Größenordnung der Amplituden von Centerpeaks zu Nebenpeaks war bei der letzten Messreihe im Mai 2010 in einem Verhältnis von 1:7. Im Vergleich zum optimalen Verhältnis von 1:2 mag dieser Wert gering sein, ist aber dennoch ausreichend um gültige Messungen zu erzielen. Zusätzlich wird in Abbildung 4.11 (unten) die Anzahl der jeweils durchgeführten Messungen dargestellt. Dies soll

einen Überblick über die Aussagekraft der dargestellten Parameter der Messreihen aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der Messungen vermitteln. Weiters wurde untersucht, ob sich in den Breiten der auftretenden Peaks ein Trend über einen Alterungsprozess des Sensors ableiten lässt. Die Einheit der Breite der Peaks wird in *motorsteps* (Motorschritte) angegeben. *Motorsteps* sind die Längeneinheit des Verfahrenswegs des Referenzspiegels in der SOFO Static RU. Da der Referenzspiegel mittels einer motorgesteuerten Stahlspindel bewegt wird, können die Motorschritte als Längeneinheit definiert werden. Aus dem Mittelwert der Differenzen in *motorsteps* zwischen den Schwerpunkten von Centerpeak und Nebenpeaks wird in einer internen Umrechnung der Längenunterschied der Fasern im Sensor ermittelt. In Abbildung 4.12 werden die Mediane der Breiten der Peaks und die Anzahl der jeweiligen Messungen dargestellt. Ein etwaiger Trend in der Breite der Peaks aufgrund eines Alterungsprozesses konnte bei Sensor 2808 nicht festgestellt werden.

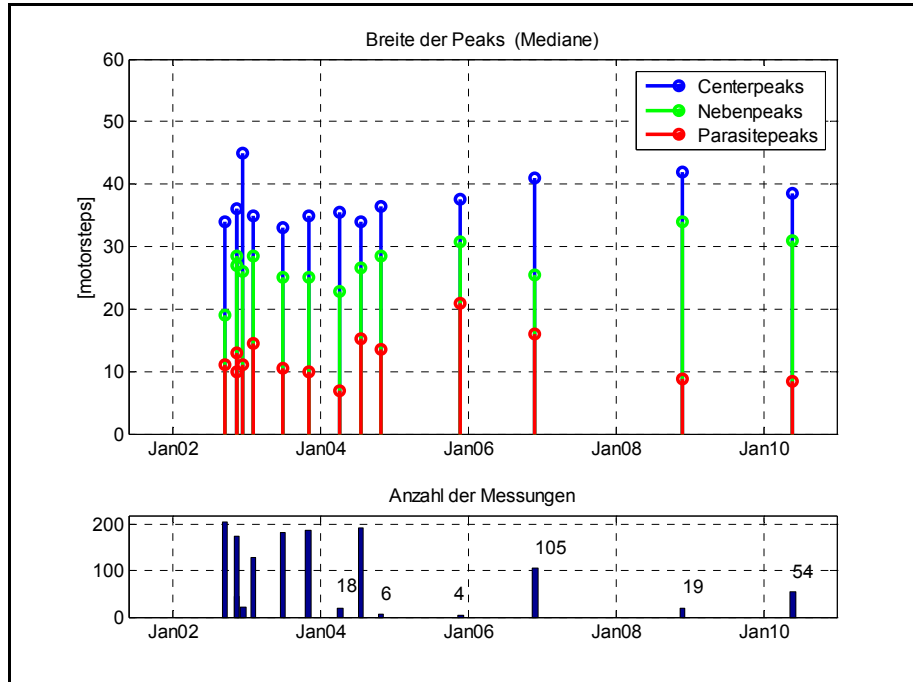


Abbildung 4.12: Sensor 2808 – Breiten der im Messsignal auftretenden Peaks

Abbildung 4.13 zeigt das Verhältnis von Amplitude zur Breite der Peaks. Die Centerpeaks heben sich deutlich von den Neben- und Parasitepeaks ab. Weiters sind die Parasitepeaks im Vergleich zu den Nebenpeaks durchgehend schmaler und weisen geringere Amplituden auf. Die Nebenpeaks sind eindeutig über den gesamten Messzeitraum aufgrund der Größenordnungen von Amplitude und Breite von den Parasitepeaks zu unterscheiden.

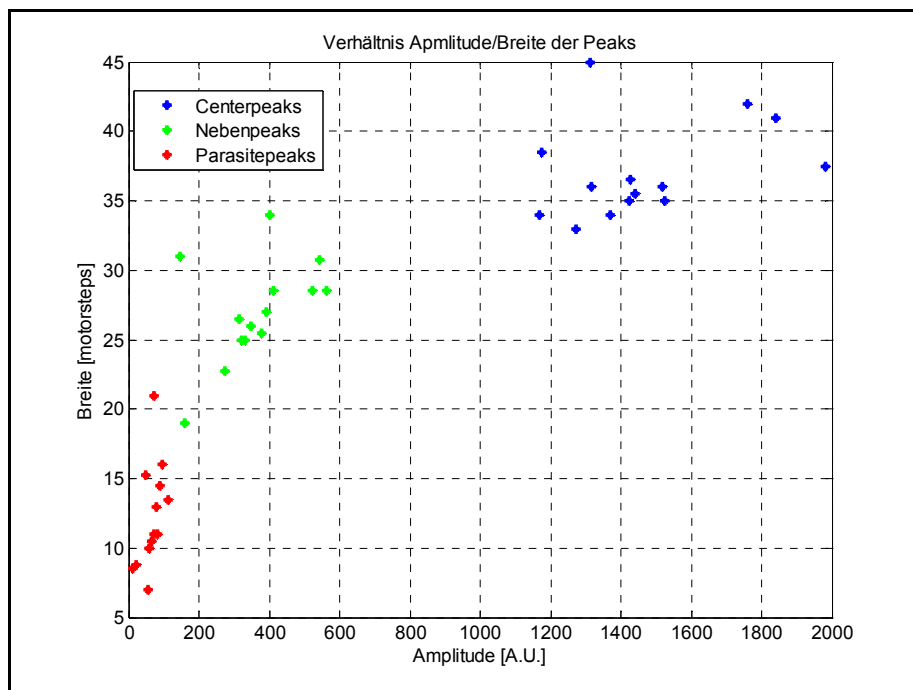


Abbildung 4.13: Sensor 2808 – Verhältnis Amplitude/Breite der Peaks

Sensor 2808 weist seit 2002 bis heute eine stabile Signalstruktur auf. In dieser lassen sich keine Anzeichen auf einen Alterungsprozess oder eine mögliche Beschädigung des Sensors feststellen.

4.2.3 Sensor 2811

Der 5 m lange SOFO Standard Sensor 2811 wurde in Messprofil 1 auf der Hangseite der Brücke in das Brückendeck eingebettet (siehe Abbildung 4.2). Im Zeitraum 2002 bis November 2008 war die Signalstruktur des Sensors dahingehend in Ordnung, dass die Längenunterschiede der Fasern im Sensor korrekt bestimmt werden konnten. Allerdings trat bei den Messungen im November 2008 trotz zufriedenstellender Messergebnisse eine relativ schwache Signalstruktur auf. Bei den Messungen im Mai 2010 konnten aufgrund der aktuellen Signalstruktur keine gültigen Messwerte mehr erfasst werden. Das bedeutet, Sensor 2811 wurde innerhalb des Zeitraums November 2008 bis Mai 2010 funktionslos. In Abbildung 4.14 werden die allgemeinen Parameter der Messepochen mit Sensor 2811 dargestellt.

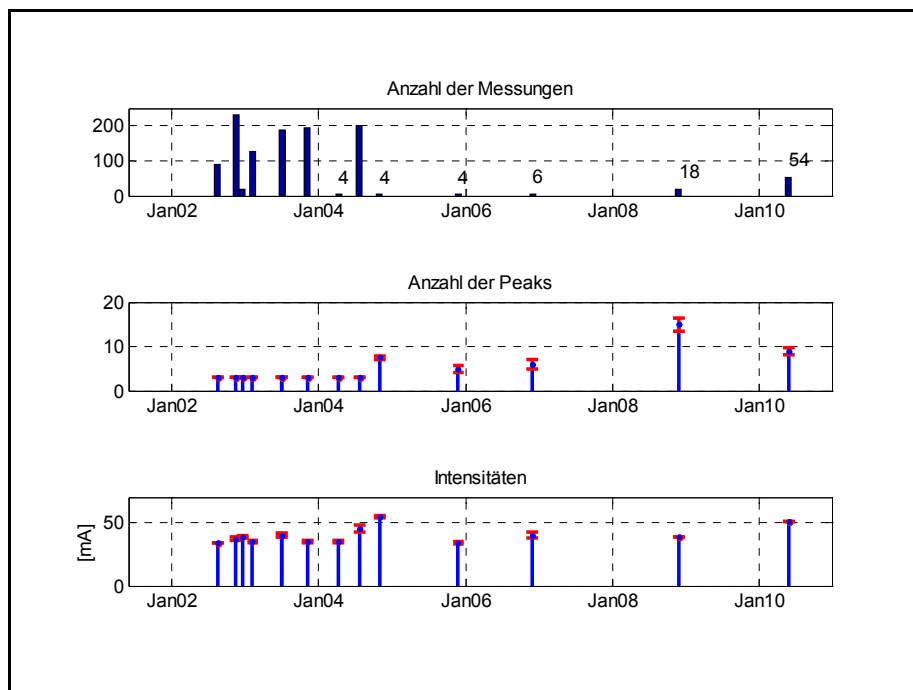


Abbildung 4.14: Sensor 2811 – Allgemeine Parameter

Wie zuvor bei Sensor 2808 sind in der Anzahl der durchgeführten Messungen erhebliche Schwankungen festzustellen. Ab Juli 2004 wurden mit diesem Sensor

pro Messepoche nur 4 bis 6 Messungen, im November 2008 18 Messungen und Ende Mai 2010 54 Messungen durchgeführt.

In Abbildung 4.14 (Mitte) werden die Mediane der Anzahl der auftretenden Peaks im Messsignal gezeigt. Bis Juli 2004 zeigt sich hier ein stabiler Verlauf von 3 Peaks pro Messung, welches dem Optimalfall einer Signalstruktur entspricht. Ab Oktober 2004 beginnt die Anzahl der Peaks zu steigen (5 – 7 Peaks pro Messung). Bei den letzten gültigen Messungen im November 2008 traten im Schnitt 15 Peaks pro Messung im Signal auf. Wenn man den Verlauf der Anzahl der Peaks im Messsignal betrachtet, kann dieser Anstieg von 6 auf 15 Peaks als Indiz für eine Verschlechterung des Sensorzustands gewertet werden. Wie bereits erwähnt, ist aber über die Anzahl der Peaks alleine keine diskrete Aussage über den Zustand des Sensors möglich.

Die Intensitäten der LED der Messungen werden in Abbildung 4.14 (unten) dargestellt. Diese weisen bis auf die Messreihe im Oktober 2004 (54 mA) und im Mai 2010 (51 mA) kein auffälliges Verhalten auf. Bei der Messreihe im Oktober 2004 wurden lediglich 4 Messungen durchgeführt. Es konnte nicht ermittelt werden, warum die Intensität bei diesen Messungen größer war als bei den Messreihen davor. Gründe dafür könnten verschmutzte Steckelemente oder ein beschädigtes Patch Cord sein. Die hohen Intensitäten der LED im Mai 2010 erklären sich dadurch, dass die SOFO Static RU die Intensität der LED erhöht, wenn kein gültiges Messsignal erfasst werden kann. Das war bei der Messreihe im Mai 2010 der Fall.

In weiterer Folge wird die Signalstruktur des Sensors 2811 näher betrachtet. Abbildung 4.15 zeigt den Verlauf der Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks und die Anzahl der pro Messreihe durchgeführten Messungen. Die Centerpeaks (blau dargestellt) heben sich in der Amplitude über den gesamten Messzeitraum deutlich von den Nebenpeaks (grün) und den Parasitepeaks (rot) ab.

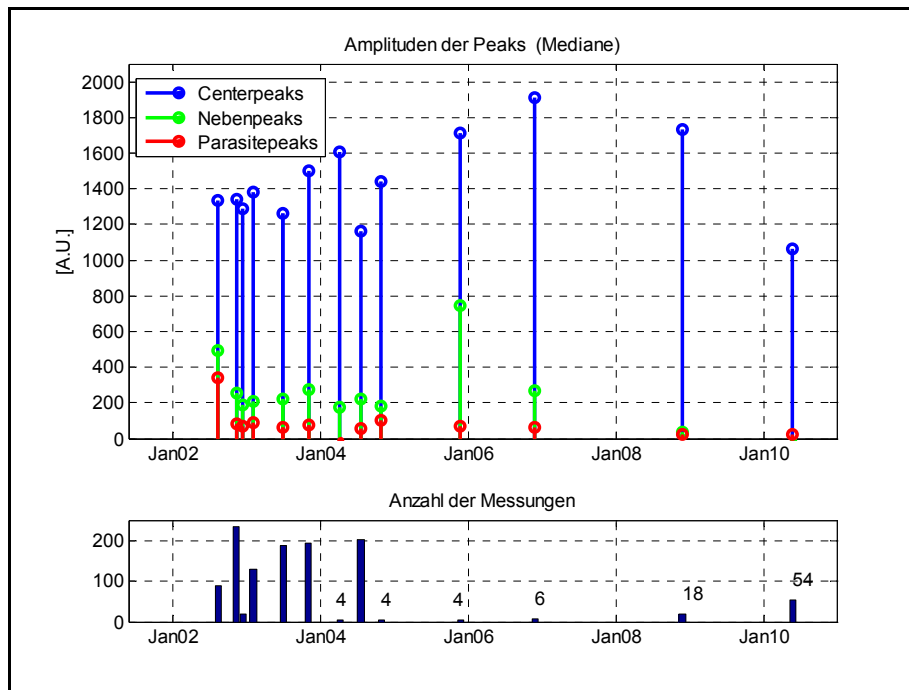


Abbildung 4.15: Sensor 2811 – Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks

Bedeutend für die Analyse hinsichtlich der Ableitung einer Prognose für etwaige Sensorausfälle ist bei diesem Sensor der Verlauf der Amplituden der Nebenpeaks. Die Nebenpeaks sind aufgrund ihrer Amplitude bis zur Messreihe im November 2006 eindeutig von den auftretenden Parasitepeaks zu unterscheiden. Bei der darauffolgenden Messreihe im November 2008 sind die Amplituden der Nebenpeaks auf die Größenordnung der Amplituden der Parasitepeaks gesunken. Das Verhältnis der Amplituden der Centerpeaks zu den Nebenpeaks betrug bis Ende 2006 zumindest 1:9, im November 2008 nur mehr 1:51. Dennoch konnte der Längenunterschied der beiden Fasern im Sensor noch korrekt ermittelt werden.

In Abbildung 4.16 wird die Signalstruktur einer Messung vom November 2008 gezeigt. Die grünen Pfeile markieren die Nebenpeaks, aus denen der Längenunterschied der Fasern berechnet wird.

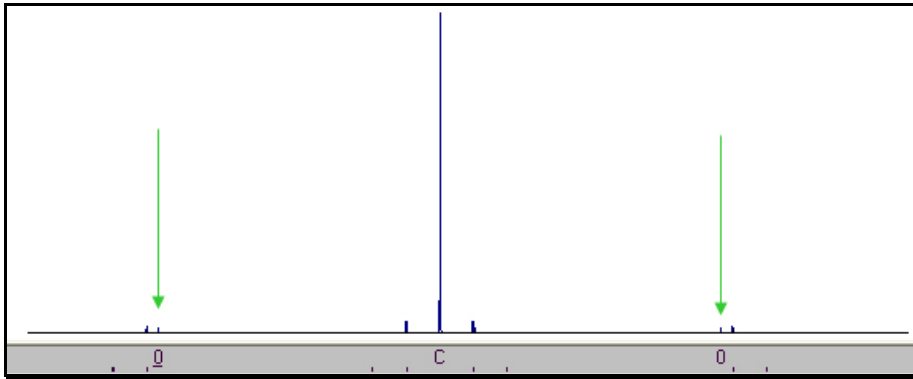


Abbildung 4.16: Sensor 2811 – Signalstruktur November 2008

Bei der Messreihe im Mai 2010 lieferte der Sensor 2811 keine gültigen Messwerte. Die Nebenpeaks für die Berechnung des Längenunterschieds der Fasern waren im Messsignal nicht mehr vorhanden. In Abbildung 4.17 signalisieren rote Pfeile die Positionen, an denen die Nebenpeaks zur Berechnung des Längenunterschieds erwartet worden wären. In dieser Signalstruktur sind nur mehr Parasitepeaks und der Centerpeak vorhanden.

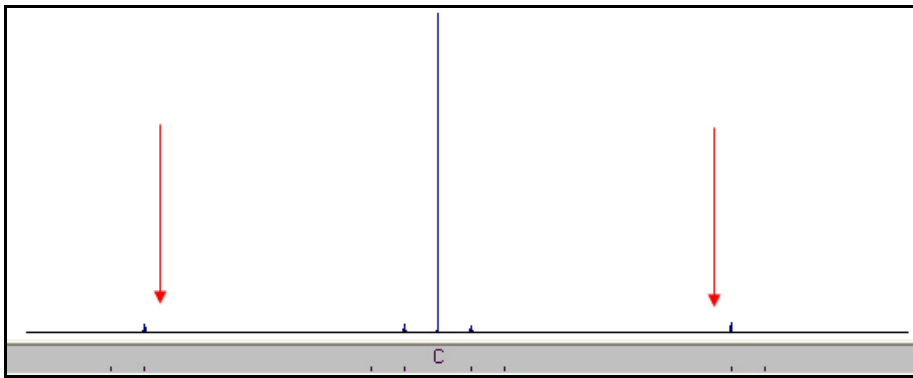


Abbildung 4.17: Sensor 2811 – Signalstruktur Mai 2010

Aufgrund dieses Verlaufs der Amplituden der Nebenpeaks lässt sich die Aussage treffen, dass sich der Zustand des Sensors neben allen anderen betrachteten Parametern aus dem Verhältnis der Amplituden von Nebenpeaks und Parasitepeaks ableiten lässt. Sind die Amplituden der Nebenpeaks in der

Größenordnung der Parasitepeaks, kann man davon ausgehen, dass sich der Sensor in einem schlechten Zustand befindet und jederzeit ein Ausfall erfolgen kann. Um diese Aussage treffen zu können, muss aber sicher gestellt sein, dass bei den Messungen alle Steckverbindungen in gutem und gereinigtem Zustand sowie eventuell verwendete Patch Cords unbeschädigt sind. Wann genau innerhalb der letzten zwei Messreihen der Sensor 2811 funktionsuntauglich wurde, lässt sich nicht ableiten.

Des Weiteren wurde der Verlauf der Breiten der im Messsignal auftretenden Peaks betrachtet. Abbildung 4.18 zeigt die Breiten der vorkommenden Peaks und die Anzahl der jeweils durchgeführten Messungen. Unter Berücksichtigung der Anzahl der Messungen kann aufgrund der Breiten der Peaks kein Trend hinsichtlich einer Verschlechterung des Sensors festgestellt werden. Warum bei der Messreihe im Oktober 2004 die Breiten der Parasitepeaks deutlich größer sind als die Breiten der Nebenpeaks, konnte anhand der vorliegenden Aufzeichnungen und Messungen nicht ermittelt werden. Die darauffolgenden Messreihen zeigen wieder ein normales Verhältnis.

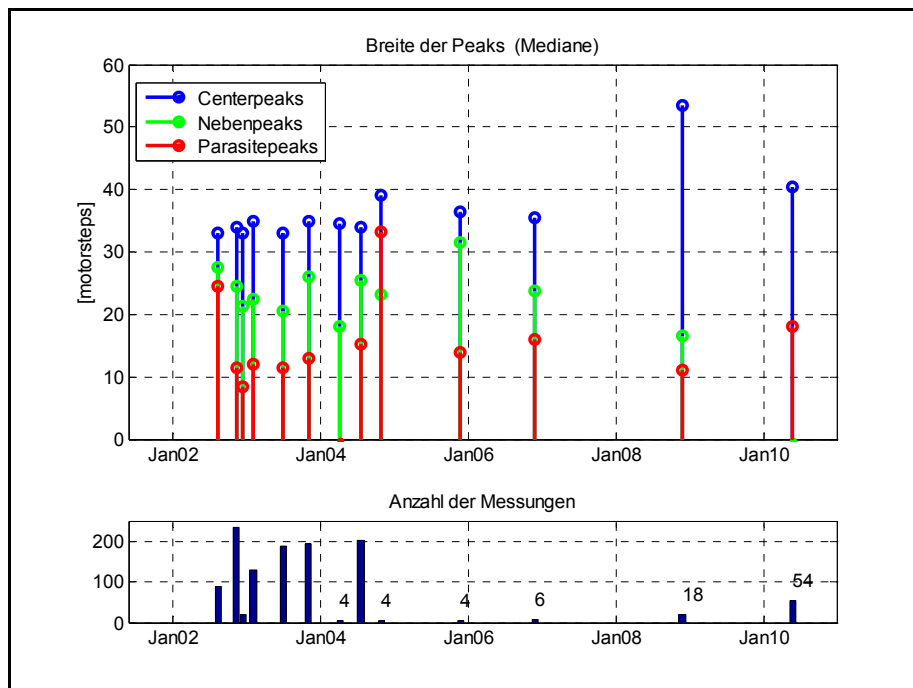


Abbildung 4.18: Sensor 2811 – Breiten der im Messsignal auftretenden Peaks

Abbildung 4.19 zeigt das Verhältnis von Amplitude zur Breite der auftretenden Peaks. Dieses verhält sich für alle betrachteten Sensoren ähnlich. Bei Sensor 2811 sind die Centerpeaks sind durchgehend von den Neben- und Parasitepeaks zu unterscheiden. Die Messreihe im Oktober 2004 weist wie bereits beschrieben einen Ausreißer der Parasitepeaks in der Breite auf. Aufgrund der größeren Amplitude der Nebenpeaks konnten diese jedoch eindeutig von den Parasitepeaks unterschieden werden. Deutlich ist in der Verhältnisdarstellung zu erkennen, dass sich die Nebenpeaks der Messreihe im November 2008 im Bereich der Parasitepeaks befinden und das Verhältnis der Amplituden der Centerpeaks zu den Nebenpeaks nur mehr 1:51 beträgt. Da Sensor 2811 bei der darauffolgenden Messreihe im Mai 2010 keine gültigen Messsignale mehr lieferte, ist dies als kritisches Verhältnis für den Zustand des Sensors zu werten.

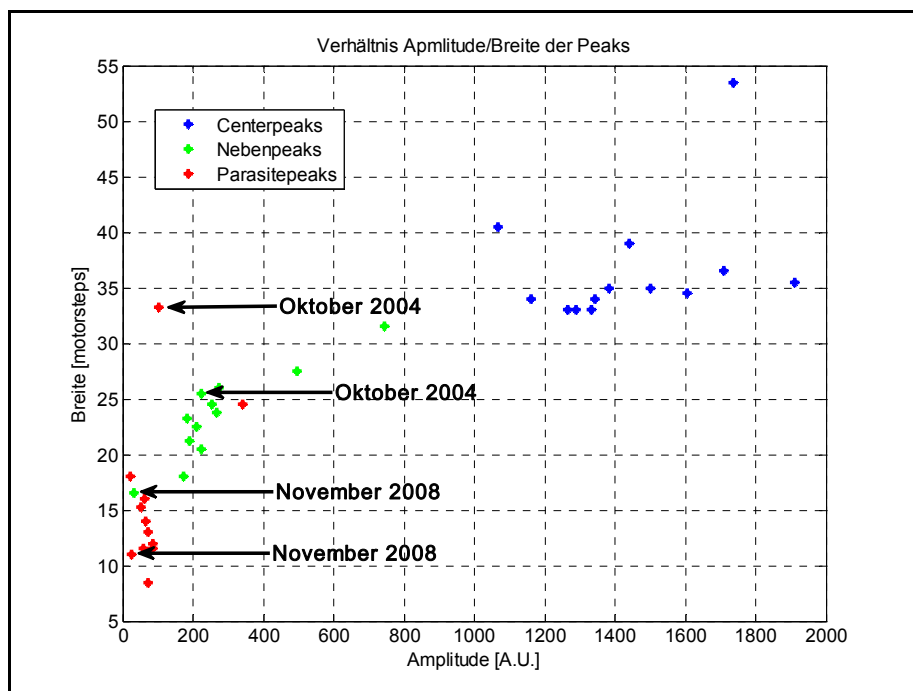


Abbildung 4.19: Sensor 2811 – Verhältnis Amplitude/Breite der Peaks

4.2.4 Sensor 2813

Sensor 2813 befindet sich in Messprofi 3 auf der Hangseite der Brücke (Abbildung 4.2). Die letzte Messreihe, bei der der Sensor gültige Messergebnisse lieferte, fand im November 2006 statt. Bei den darauffolgenden Messreihen konnte kein gültiges Messsignal mehr erfasst werden.

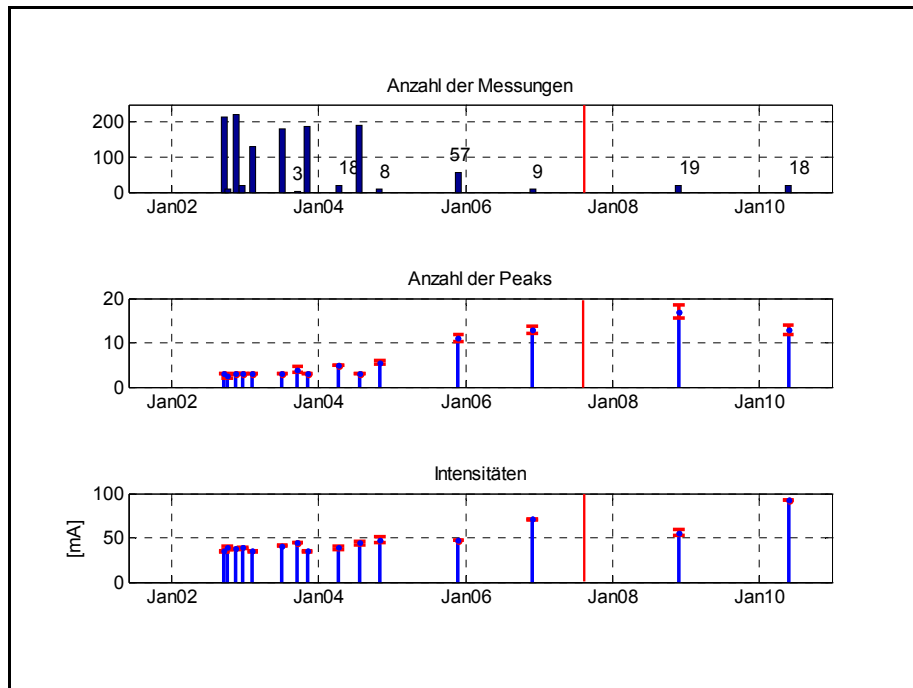


Abbildung 4.20: Sensor 2813 – Allgemeine Parameter

Abbildung 4.20 zeigt die allgemeinen Parameter des Sensors 2813. Die Anzahl der auftretenden Peaks im Messsignal pro Messreihe hat ab 2005 deutlich zugenommen. Der Intensitätsverlauf der LED zeigt vor allem bei der letzten durchgeführten Messreihe im Mai 2010 einen Extremwert. Da die SOFO Static RU keine gültigen Peaks im Messsignal detektieren konnte, lag die Intensität der LED bei diesen Messungen bei einem untypisch hohen Wert von 93 mA. Bei den letzten gültigen Messungen im November 2006 waren die Intensitäten der LED der Messungen deutlich höher als bei den Messreihen davor. Dies lässt bereits einen schlechten Allgemeinzustand des Sensors vermuten. Zusätzlich muss aber wiederum die Signalstruktur betrachtet werden.

In Abbildung 4.21 sind die Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks und die Anzahl der Messungen pro Messreihe dargestellt. Zu beachten ist hier, dass sich bei den letzten gültigen Messungen im November 2006 die Amplituden der Nebenpeaks in der Größenordnung der Amplituden der Parasitepeaks befunden haben. Weiters war bei dieser Messreihe das Verhältnis der Amplituden von Centerpeaks zu Nebenpeaks auf einen Wert von 1:11 gesunken. Sensor 2813 zeigt somit das gleiche Verhalten in der Signalstruktur wie Sensor 2811. Die Nebenpeaks der vorigen Messreihen hoben sich bis auf die letzte gültige Messreihe im November 2006 deutlich von den Parasitepeaks ab.

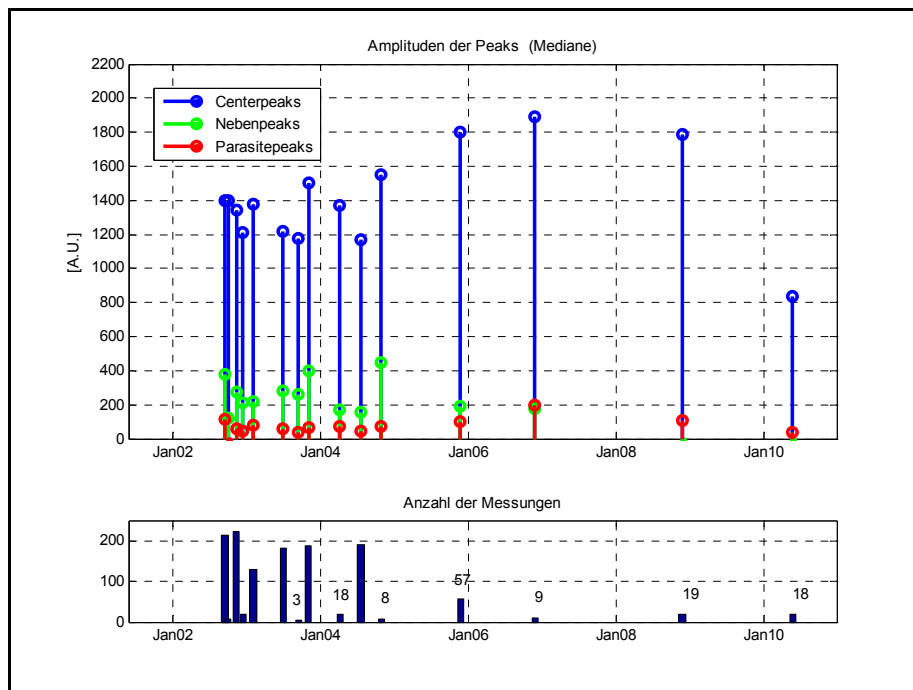


Abbildung 4.21: Sensor 2813 – Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks

Sensor 2807 und 2809 weisen ein sehr ähnliches Verhalten wie Sensor 2808 auf. Die Sensoren 2810 und 2812 zeigten bis zum Versagen der Messbarkeit ähnliches Verhalten in den Signalstrukturen wie Sensor 2811 und Sensor 2813. Die Ergebnisse sind vollständig in Anhang A aufgelistet und beschrieben.

4.3 Ergebnisse

Bei der monolithischen Hangbrücke nahe Schladming wurden im Zuge der Errichtung im Jahr 2002 insgesamt 8 SOFO Standard Sensoren in das Brückendeck eingebettet. Bei Bauarbeiten kurz nach der Errichtung der Brücke wurde Sensor 2806 dauerhaft beschädigt und somit funktionslos. Die restlichen Sensoren überstanden die Einbauphase unbeschädigt. Im Zeitraum April bis Juli 2004 versagten die Sensoren 2810 und 2812. Sensor 2810 zeigte bei den Messreihen bis April 2004 kein auffälliges Verhalten in der Signalstruktur, welches auf eine Änderung des Zustands des Sensors hätte schließen lassen (Anhang A.3). Sensor 2812 wies schon bei vor April 2004 durchgeführten Messreihen eine schwache Signalstruktur auf (Anhang A.4). Die letzten gültigen Messungen mit Sensor 2813 wurden im November 2006 durchgeführt, bei denen ebenfalls eine schwache Signalstruktur und eine erhöhte Intensität festgestellt wurden. Ein ähnliches Verhalten in der Signalstruktur konnte bei Sensor 2811 beobachtet werden, der bei der Messreihe im November 2008 seine letzten gültigen Messwerte lieferte. Die Sensoren 2807, 2808 und 2809 funktionierten bei den letzten durchgeführten Messungen im Rahmen dieser Masterarbeit Ende Mai 2010 ohne auffälliges Verhalten in der Signalstruktur. Abbildung 4.22 zeigt den zeitlichen Verlauf der Funktionalität der einzelnen eingebetteten SOFO Standard Sensoren. Verliert ein Sensor seine Funktionalität, ist dieser irreversibel beschädigt und kann nicht mehr für weitere Messungen verwendet werden. Abbildung 4.23 zeigt einen Überblick der in der Hangbrücke Schladming eingebetteten SOFO Standard Sensoren. Die bei der letzten Messkampagne Ende Mai 2010 funktionstüchtigen Sensoren werden grün dargestellt, die funktionslosen Sensoren rot.

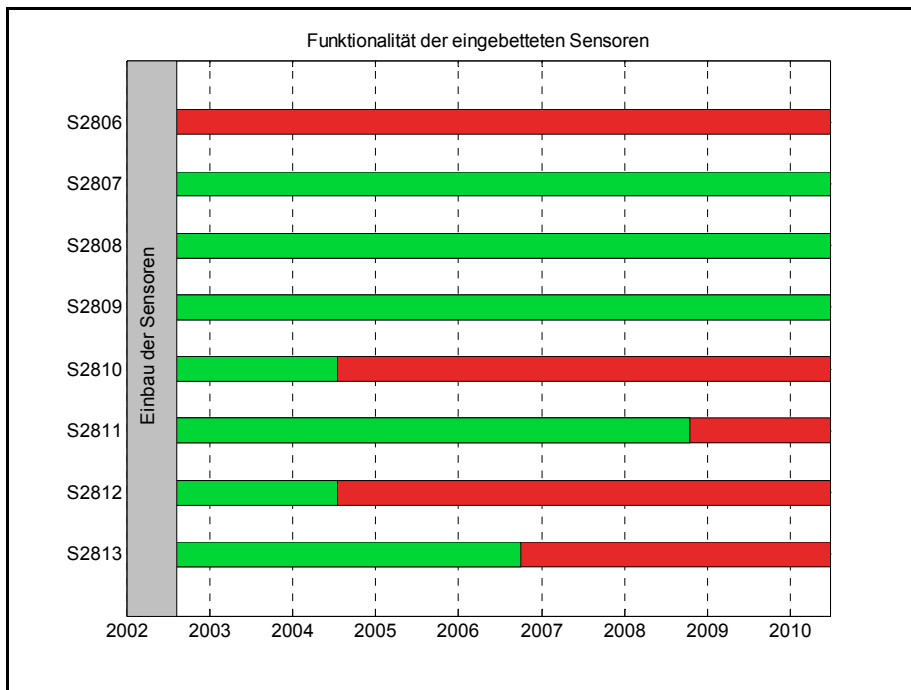


Abbildung 4.22: Verlauf der Funktionalität der eingebetteten SOFO Standard Sensoren

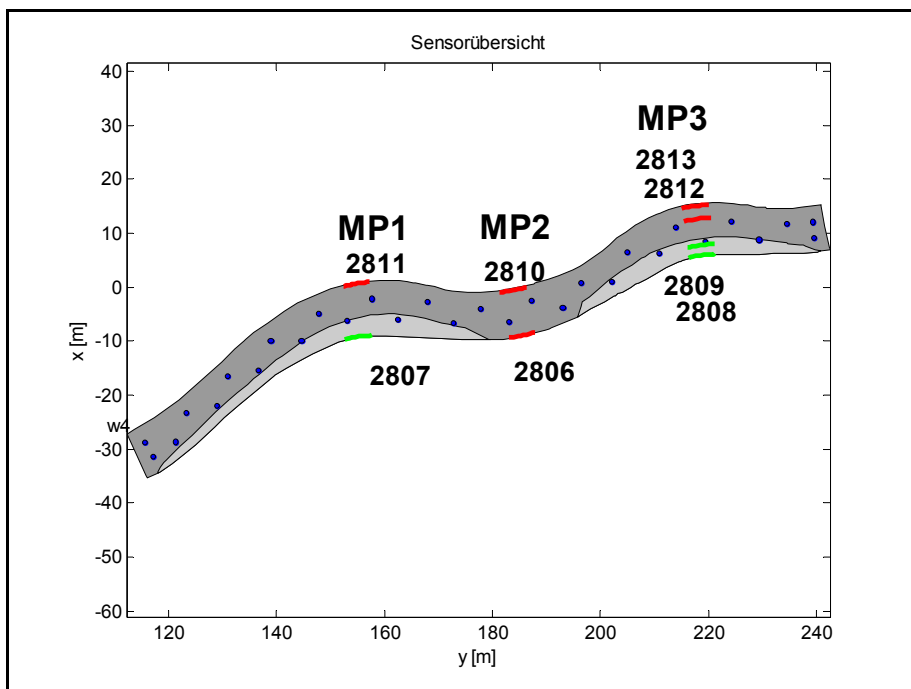


Abbildung 4.23: Funktionalität der SOFO Standard Sensoren in der Hangbrücke Schladming – Mai 2010

In den gezeigten Untersuchungen der über Jahre eingebetteten Sensoren wurde deutlich, dass eine Aussage über den Zustand eines SOFO Standard Sensors über die verfügbaren Parameter aus der Software SOFO SDB (Intensität der LED, Datenpunkte) nicht möglich ist. Es muss zusätzlich die Signalstruktur der Messungen hinsichtlich Anzahl der auftretenden Peaks und deren Amplituden betrachtet werden. Aufgrund der durchgeführten Analysen kann eine Signalstruktur als kritisch eingestuft werden, wenn die Amplituden der Nebenpeaks im Verhältnis zum Centerpeak sehr klein werden (unter 1:10) oder in der Größenordnung möglicher vorhandener Parasitepeaks sind. Die Amplituden auftretender Parasitepeaks erreichten bei keinem der analysierten Sensoren ein Verhältnis zu den Amplituden der Centerpeaks von über 1:10. Drei der eingebetteten Sensoren, die diese Verhältnismäßigkeiten in der Signalstruktur aufwiesen, waren bei den darauffolgenden Messreihen nicht mehr funktionstüchtig (2811, 2812, 2813). Wie lange ein Sensor, der diese Signalstruktur aufweist noch funktionstüchtig bleibt, lässt sich aber nicht genauer einschränken. Um zusätzliche Störeinflüsse auf die Signalstruktur zu vermeiden, sollten vor jeder Messung sämtliche Steckverbindungen sorgfältig gereinigt werden.

5 Experimente im Messlabor

Um die ermittelten Signalstrukturen der Langzeitmessungen (Kapitel 4) mit dem Messsystem SOFO Static besser verstehen zu können, wurden im Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Dabei sollte ermittelt werden, welchen Einfluss eine künstliche Dämpfung des ausgesandten Signals auf Signalstruktur und Messwert hat. Zusätzlich wurde bei diesen Versuchen mit einem optischen Spektrometer (OSA) die spektrale Emissionscharakteristik der LED bestimmt, um daraus auf die Kohärenzlänge (Kapitel 2.2.1) schließen zu können. Weiters untersucht wurde der Einfluss der Parasitepeaks in Bezug auf den Messwert selbst und die Temperaturabhängigkeit der SOFO Static RU.

5.1 Optical Spectrum Analyzer

Der am IGMS vorhandene *Optical Spectrum Analyzer MS9710C* (OSA) der Firma *Anritsu* deckt einen Wellenlängenbereich von 600 bis 1750 nm ab. Die im SOFO Static verwendete LED weist nach Inaudi (1997: Kap. 6.5) eine Wellenlänge von 1300 nm auf. Daher ist dieser OSA für Untersuchungen geeignet. Da die LED im SOFO Static aber nur während einer Messung aktiv ist (ca. 8 Sekunden), muss die Messzeit des OSA an diese kurze Zeit angepasst werden. Dieses bedingt aber ein höheres Messrauschen. Eine Bestimmung des vollständigen Emissionsspektrums der LED mit reduziertem Rauschen ist in diesem Fall nicht möglich. Abbildung 5.1 zeigt den Screenshot einer OSA Messung der SOFO Static LED. Die ermittelte Nennwellenlänge der LED des verwendeten Messinstruments SOFO Static V liegt bei 1274.37 nm.

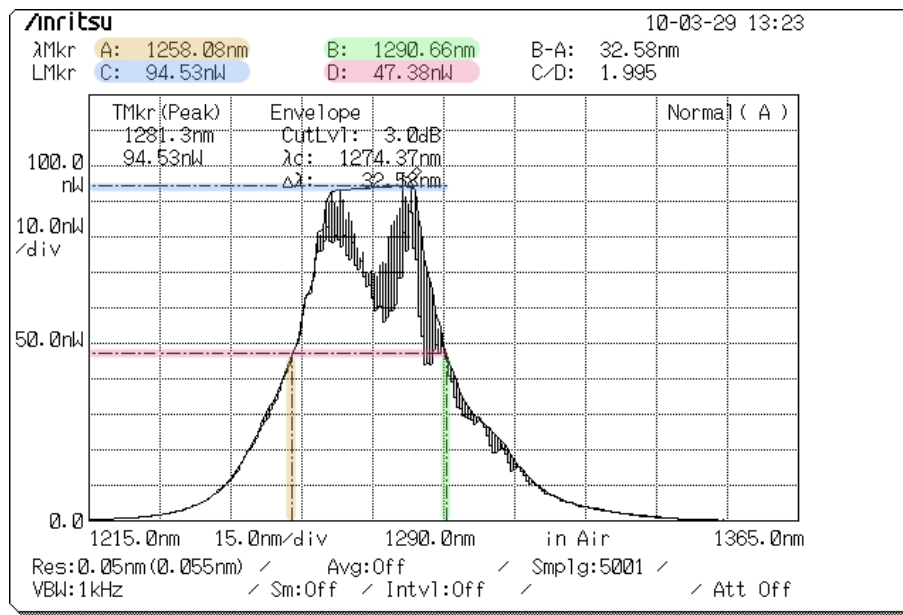


Abbildung 5.1: Screenshot OSA – Spektrum der SOFO LED

Da die verwendete LED nach Inaudi (1997: Kap. 6.5) eine annähernd gaußförmige Verteilung aufweist ist es möglich, aus dem Spektrum die Kohärenzlänge L_{coh} abzuleiten. Reale optische Wellen emittieren ein Frequenzband anstatt einer einzelnen Frequenz. Daraus lässt sich nach Bludau (1998: Kap. 1.3.4) Kohärenzzeit und Kohärenzlänge abschätzen (Formel 5.1). λ_{nenn} entspricht der Nennwellenlänge, T_{coh} der Kohärenzzeit, w_{λ} der rms-Linienbreite und c der Lichtgeschwindigkeit.

$$L_{\text{coh}} \approx \frac{\lambda_{\text{nenn}}^2}{w_{\lambda}} \quad \text{oder} \quad T_{\text{coh}} \approx \frac{1}{c} \frac{\lambda_{\text{nenn}}^2}{w_{\lambda}} \quad (5.1)$$

Die *Nennwellenlänge* λ_{nenn} wird direkt vom OSA bestimmt. Die spektrale Breite einer optischen Welle wird Linienbreite genannt. Bludau (1998: Kap. 1.3.4) verwendet in der Berechnung die *rms-Linienbreite* w_{λ} . Da diese vom OSA aber nicht direkt bestimmt werden kann, wird sie über die Halbwertsbreite w_{FWHM} (Full Width at Half Maximum) berechnet (Bludau 1998: Anhang A2). Die Halbwertsbreite ist die Breite des Spektrums bei der Hälfte der maximalen

Amplitude. Dies entspricht dem in Abbildung 5.1 dargestellten Cut-Off Level von 3 dB (CutLvl). Formel 5.2 zeigt die Umrechnung der mittels OSA bestimmten Halbwertsbreite w_{FWHM} ($\Delta\lambda$) in die rms-Linienbreite w_λ .

$$w_\lambda = \frac{w_{FWHM}}{\sqrt{8 * \ln(2)}} \quad (5.2)$$

5.2 Versuchsanordnung „Koppler“

Um die Einflüsse von künstlich herbeigeführten Abschwächungen des Signals der SOFO Static RU zu ermitteln, wurden zwischen Sensor und RU mehrere optische Koppler (50/50 Koppler) und Zwischenstecker (Mating Adapter) eingeschaltet. Optische Koppler dieser Bauart werden zum Aufteilen oder Zusammenführen von Strahlen im Verhältnis 50:50 verwendet (Leistungskoppelgrad $K = \frac{1}{2}$). Mating Adapter funktionieren als Steckverbindungen zwischen einzelnen Patch Cords. Das verwendete Instrumentarium im Messlabor wird in Abbildung 5.2 dargestellt.

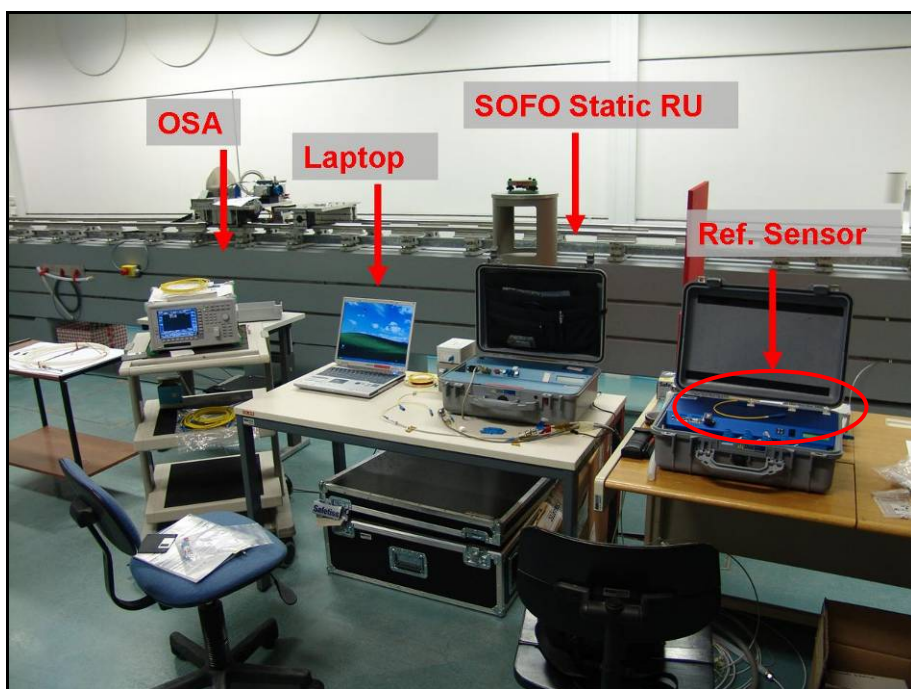


Abbildung 5.2: Instrumentarium im Messlabor des IGMS, TU Graz

Bei den Versuchen wurde der Referenzsensor 125 verwendet. Mit Hilfe mehrerer Patch Cords wurde die Verbindung zwischen den verwendeten Kopplern (K) und Mating Adaptern (MA) (Abbildung 5.3) hergestellt.

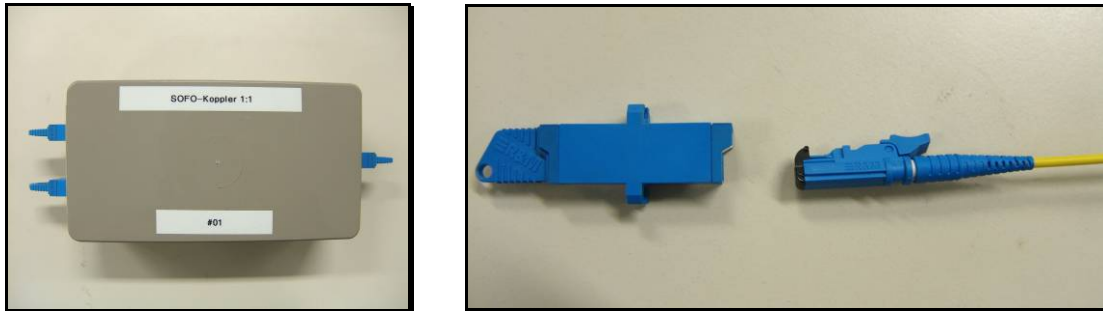


Abbildung 5.3: Optischer Koppler (links) und Mating Adapter mit Patch Cord Anschluss (rechts)

Die erste Messreihe erfolgte in der Grundkonfiguration ohne zusätzliche Zwischenelemente mit direkter Verbindung zum Sensor über ein Patch Cord. Danach wurden bis zu drei optische Koppler und Mating Adapter in verschiedenen Kombinationen zwischengeschaltet. Nach jedem Versuch wurde der Referenzsensor 125 durch eine Steckverbindung zum OSA ausgetauscht, um das Spektrum des beim Sensor ankommenden Signals der LED zu bestimmen. Daraus wurde mittels Formel 5.1 und 5.2 die Kohärenzlänge bestimmt. Bei den Messungen mit drei optischen Kopplern konnte aufgrund der großen Dämpfung des Signals (12.5 % der Ausgangsstärke kommen beim Sensor an) kein Messwert mehr erfasst werden. Die Signalstruktur wies bei dieser Konfiguration keine Nebenpeaks mehr zur Messwertberechnung auf. Abbildung 5.4 zeigt eine schematische Darstellung eines Versuchsaufbaus mit einem Koppler und einem Mating Adapter.

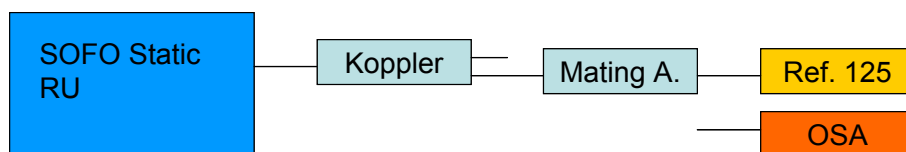


Abbildung 5.4: Schema eines Versuchsaufbaus mit einem Koppler und einem Mating Adapter

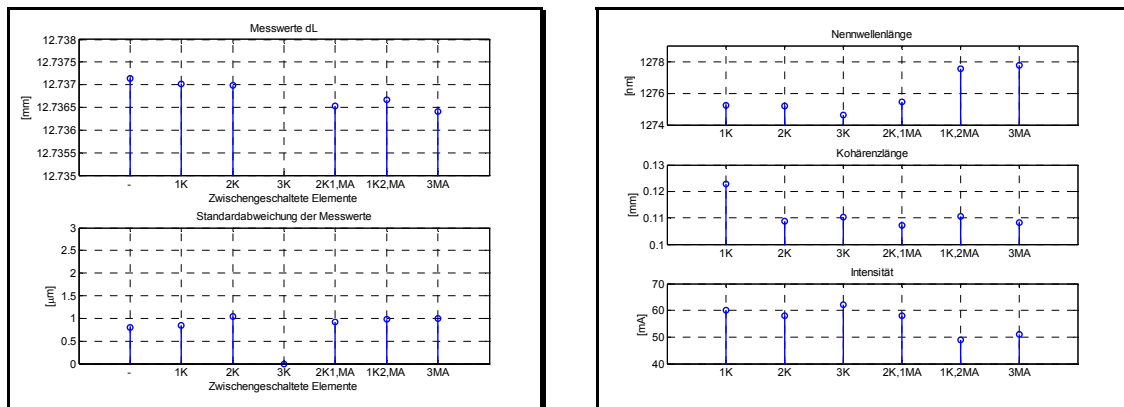


Abbildung 5.5: Versuchsreihe „Koppler“ - Messwerte und STD (links), Nennwellenlänge, Kohärenzlänge und Intensitäten der Messungen (rechts)

Abbildung 5.5 zeigt auf der linken Seite die Mittelwerte der Messreihen mit den jeweiligen Standardabweichungen. In Abbildung 5.5 rechts sind die ermittelten Nennwellenlängen, die Kohärenzlängen und die Intensitäten der LED dargestellt. Aufgrund der Dämpfung des Signals kommt es bei diesen Werten zu Veränderungen. Hinsichtlich der groben Abschwächungsstufen des Signals durch die Koppler lassen sich hier aber keine Trends ermitteln.

Vor den Messreihen wurden Messungen mit dem Referenzsensor 125 ohne künstlich herbeigeführte Signalabschwächung durchgeführt. Der Mittelwert dieser Messreihe wird als Referenzwert für einen statistischen Test verwendet, ob sich die Messwerte d_L [mm] aufgrund der herbeigeführten Abschwächungen signifikant ändern. Da es sich hierbei um einen Differenztest von Mittelwerten handelt, ist die Testgröße t -verteilt (Witte & Schmidt 2000: Kap. 2.6). Es konnte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% keine signifikante Änderung des Messwerts aufgrund der Signalabschwächung festgestellt werden (siehe Tabelle 5.1). Ebenfalls getestet wurde, ob sich die empirischen Varianzen der Messreihen signifikant verändern. Bei einem Test zweier Varianzen ist die Testgröße Fisher-verteilt (Witte & Schmidt 2000: Kap. 2.6). Hier ergab sich mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% keine signifikante Änderung.

Tabelle 5.1: Versuchsreihe „Koppler“ - Identitätstest der Mittelwerte

	Mittelwert [mm]	Testgröße t_f	H0 $t_{16,0.025} \leq t_f \leq t_{16,0.975}$ $-2.12 \leq t_f \leq 2.12$
Ref. 125	12.7371	Referenzmessung	
1K	12.7370	0.4332	●
2K	12.7370	0.4645	●
3K	-	-	-
2K,1MA	12.7365	1.5164	●
1K, 2MA	12.7367	1.1559	●
3MA	12.7364	1.7032	●

● ... H0 wird angenommen

● ... H0 wird verworfen

Tabelle 5.2: Versuchsreihe „Koppler“ - Test der Varianzen

	STD [μm]	Testgröße F	H0 $F \leq F_{9,9,0.95}$ $F \leq 3.18$
Ref. 125	0.79	Referenzmessung	
1K	0.84	1.3092	●
2K	1.00	1.1827	●
3K	-		-
2K,1MA	0.92	1.0779	●
1K, 2MA	0.98	1.0456	●
3MA	0.99	1.0638	●

● ... H0 wird angenommen

● ... H0 wird verworfen

In der Signalstruktur der Messungen kann ein Trend abgeleitet werden. Bei der Verwendung von 2 Kopplern oder 2 Kopplern und 1 Mating Adapter weisen die Messungen eine Signalstruktur auf, in der die Amplituden der Nebenpeaks auf die Größenordnung der Parasitepeaks gesunken sind. Dies wurde zuvor in Kapitel 4 als kritische Signalstruktur definiert (Abbildung 5.6).

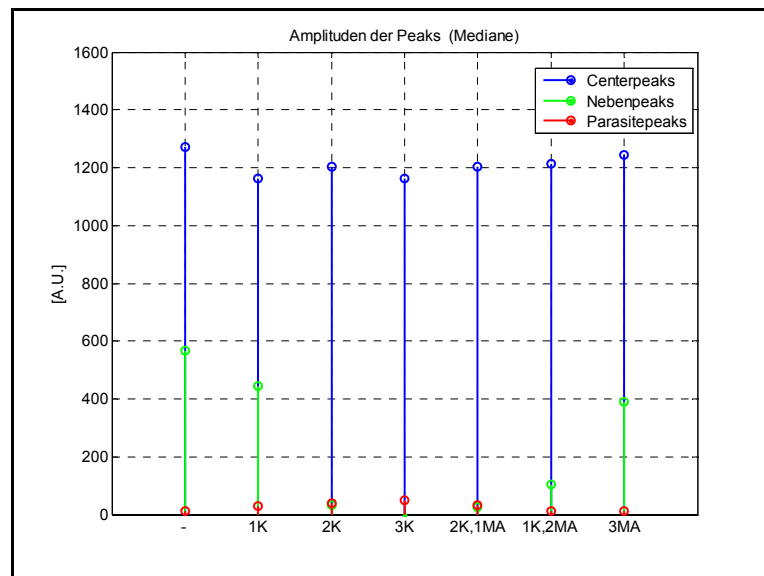


Abbildung 5.6: Ref. Sensor 125 – Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks

Wie zu Beginn der Versuchsanordnung erwartet, konnten aufgrund der künstlich erzeugten Dämpfung der Signalstärke Abhängigkeiten in der Signalstruktur nachgewiesen werden. Die Messwerte $dL[\text{mm}]$ sowie die zugehörigen Standardabweichungen wurden davon nicht signifikant beeinflusst. Um die Abschwächungen zu verfeinern, wurden in weiterer Folge Wicklungen eines Patch Cords zwischen Sensor und RU um Metallrohre verschiedener Durchmesser durchgeführt (Kapitel 5.3).

5.3 Versuchsanordnung „Wicklungen“

Um die in Kapitel 5.2 durchgeführten Untersuchungen der Messwerte und der Signalstruktur hinsichtlich einer künstlichen Abschwächung des Signals zu verfeinern, wurde bei dieser Versuchsreihe die Abschwächung durch Wicklungen des Patch Cords um Metallrohre mit verschiedenen Durchmessern herbeigeführt. *Smartec SA* gibt den minimalen Krümmungsradius für ein wie in den Versuchen verwendetes Patch Cord mit 30 mm (60 mm Durchmesser) an (Anhang B.3). Bei dieser Versuchsreihe wurden Rohre mit Durchmesser von 76 mm, 50 mm, 15 mm

und 12 mm verwendet. Die Herstellerangaben können als äußerst großzügig betrachtet werden, da erst bei einem Rohrdurchmesser von 12 mm (6 mm Radius) signifikante Veränderungen hinsichtlich Messwert und Signalstruktur festgestellt werden konnten. Diese Versuchsreihe wird nun näher betrachtet. Das verwendete Instrumentarium im Messlabor des IGMS war identisch mit dem Aufbau der Versuchsreihe „Koppler“ (siehe Abbildung 5.2). Abbildung 5.7 zeigt das Metallrohr vom Durchmesser 12 mm mit einer Wicklung des Patch Cords.

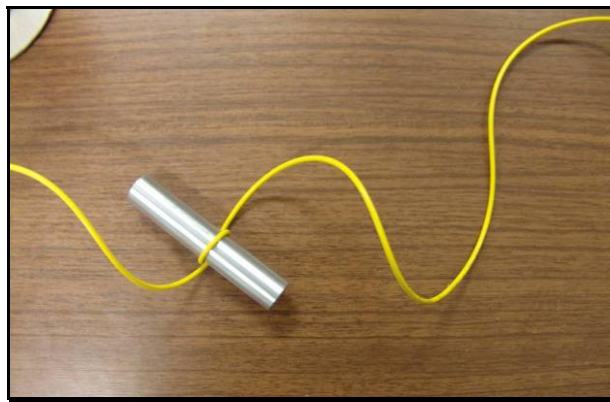


Abbildung 5.7: Metallrohr (12 mm Durchmesser) mit einer Wicklung des Patch Cords

Mit dem OSA wurde, wie im vorangegangenen Versuch, jeweils nach den Messungen des Referenzsensors 125 einer Versuchsreihe das Spektrum der SOFO LED bestimmt. Daraus wurde wiederum die Kohärenzlänge der Lichtquelle bestimmt (siehe Kapitel 5.1). Vor den Versuchen wurde eine Referenzmessreihe von 9 Einzelmessungen mit der Standardkonfiguration des SOFO Messsystems ohne künstliche Abschwächung des Signals durchgeführt. Bei allen Messungen wurde der Referenzsensor 125 verwendet. Zu Beginn der Versuchsreihe wurde das Patch Cord einmal um das Metallrohr gewunden, die Anzahl wurde im Lauf des Experiments auf 45 Wicklungen erhöht. Nach Bludau (1998: Kap. 4.1.5 u. Kap. 7.2.2) erfüllen Strahlen, die unter hohen Neigungswinkeln zur Lichtwellenleiterachse laufen, in gebogenen Lichtwellenleitern die Bedingung der Totalreflexion nicht mehr. Es kommt dadurch zu einem permanenten

Leistungsverlust entlang der gebogenen Bereiche des Lichtwellenleiters. Abbildung 5.8 (links) zeigt den Verlauf der Mittelwerte dL [mm] aus jeweils 9 Messungen der einzelnen Versuche mit unterschiedlich vielen Wicklungen und die entsprechenden Standardabweichungen. Auf der rechten Seite der Abbildung 5.8 sind die dazugehörigen Verläufe der Nennwellenlänge, der Kohärenzlänge und der Intensitäten der LED der Messreihen dargestellt.

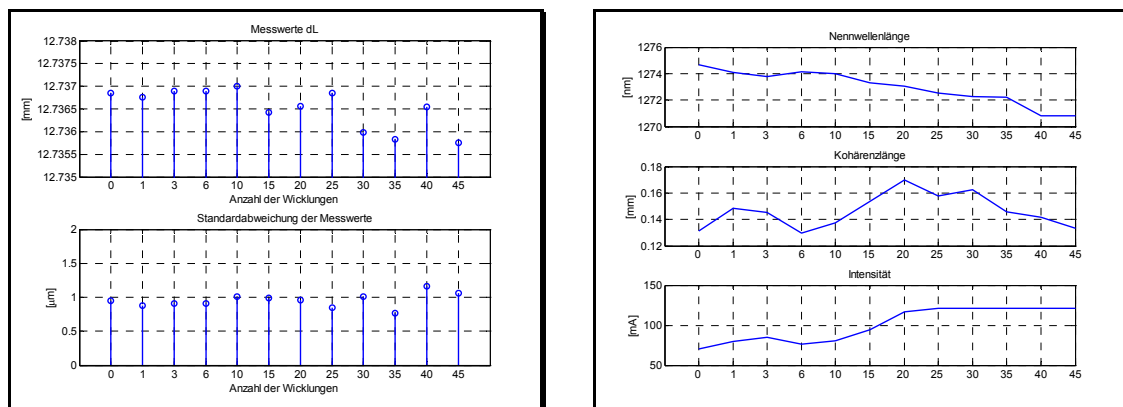


Abbildung 5.8: Versuchsreihe „Wicklungen“ - Messwerte und STD (links), Nennwellenlänge, Kohärenzlänge und Intensitäten der Messungen (rechts)

Die Nennwellenlänge der SOFO LED nimmt mit zunehmender Anzahl an Wicklungen um 4 nm ab. Die Kohärenzlänge ändert sich mit steigender Dämpfung des Signals in einem Bereich von 40 μm . Sie steigt bis 20 Wicklungen leicht an, nimmt danach aber wieder ab. Durch die zunehmende Dämpfung aufgrund der Wicklungen regelt die SOFO Static RU auch die Intensität der LED hoch. Die Intensität erreicht bei 20 Wicklungen ihren Maximalwert von 121 mA und bleibt bei den folgenden Versuchen auf diesem konstanten Wert. Die Kohärenzlängen der LED des verwendeten Messinstruments SOFO Static V (Seriennummer: 001FA9777) wurden nach Formel 5.1 und 5.2 berechnet.

Die Mittelwerte dL [mm] der Messreihen wurden gegen den Mittelwert der davor durchgeführten Referenzmessung getestet (Differenztest zweier Mittelwerte, Witte & Schmidt 2000: Kap. 2.6). Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% weichen

die Mittelwerte der Messreihen mit den Wicklungszahlen 30, 35 und 45 vom Mittelwert der Referenzmessung signifikant ab (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Versuchsreihe „Wicklungen“ – Identitätstest der Mittelwerte ($\alpha = 0.05$)

Wicklungen	Mittelwert [mm]	Prüfgröße t_f	H0 $T_{52,0.025} \leq t_f \leq t_{52,0.975}$ $-2.0 \leq t_f \leq 2.0$
0	12.7369	Referenzmessung Sensor 125	
1	12.7368	0.3414	●
3	12.7369	-0.1841	●
6	12.7369	-0.1841	●
10	12.7370	-0.5493	●
15	12.7364	1.6382	●
20	12.7366	1.0958	●
25	12.7369	-0.0045	●
30	12.7360	3.2699	●
35	12.7358	4.3217	●
40	12.7366	1.0313	●
45	12.7357	4.0221	●

● ... H0 wird angenommen ● ... H0 wird verworfen

Ebenfalls getestet wurde, ob die den Messreihen zugrunde liegenden empirischen Varianzen übereinstimmen. Auf einem Signifikanzniveau von 95% stimmen alle ermittelten Varianzen mit der Varianz der Referenzmessreihe überein (Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4: Versuchsreihe „Wicklungen“ – Test der Varianzen ($\alpha = 0.05$)

Wicklungen	STD [μm]	Prüfgröße F	H0 $F \leq F_{26,26,0.95}$ $F \leq 1.84$
0	0.95	Referenzmessung Sensor 125	
1	0.88	1.1691	●
3	0.91	1.0925	●
6	0.91	1.0925	●
10	1.01	1.1352	●
15	0.98	1.0780	●
20	0.96	1.0186	●
25	0.85	1.2523	●
30	1.00	1.1204	●
35	0.76	1.5490	●
40	1.16	1.5031	●
45	1.05	1.2350	●

● ... H0 wird angenommen ● ... H0 wird verworfen

Durch die Untersuchungen wurde gezeigt, dass sich der Messwert aufgrund zunehmender Dämpfung und den dadurch resultierenden Signalverlust durchaus signifikant verändern kann. Die Messreihen selbst sind aber hinsichtlich ihrer Standardabweichungen stabil geblieben.

Die Abschwächung des Signals in der Faser aufgrund von Krümmung ist ebenfalls in der Signalstruktur deutlich ersichtlich. Die Amplituden der Center- und Nebenpeaks sinken kontinuierlich ab 6 Wicklungen. Bereits bei 40 Wicklungen wird eine kritische Signalstruktur erreicht. Die Amplituden der Centerpeaks befinden sich von der Größenordnung in einem Verhältnis von 1:14 zu den Amplituden der Nebenpeaks. In Kapitel 4 wurde eine Signalstruktur ab einem Verhältnis von 1:10 als kritisch eingestuft. Bei 45 Wicklungen befinden sich die Amplituden der Nebenpeaks bereits in der Größenordnung der Parasitepeaks. Dieser Zustand wird ebenfalls als kritische Signalstruktur betrachtet. Die Amplituden der Parasitepeaks zeigen hingegen mit steigender Anzahl von

Wicklungen nur einen leichten Anstieg. Abbildung 5.9 zeigt den Verlauf der Amplituden der Peaks der Messreihen.

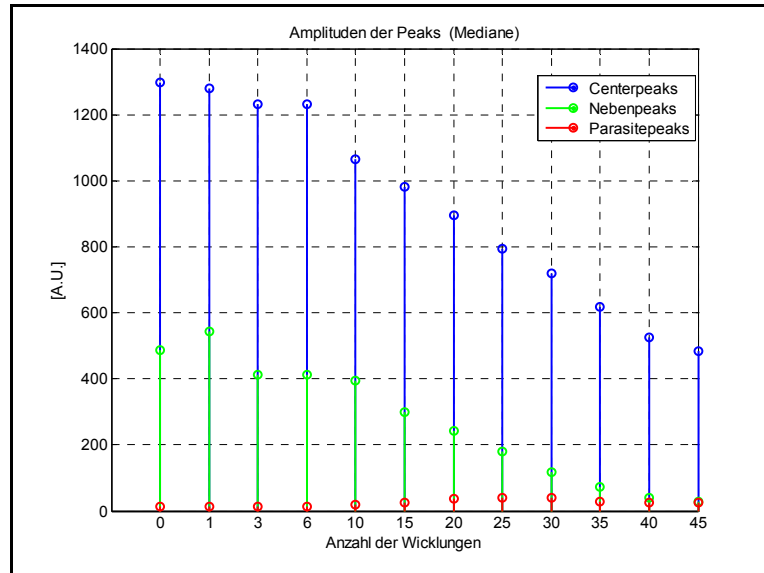


Abbildung 5.9: Versuchsreihe „Wicklungen“ – Amplituden der Peaks, Sensor 125

Die in Abbildung 5.10 dargestellten Verhältniszahlen von Amplituden der Centerpeaks zu Amplituden der Nebenpeaks zeigen deutlich, dass hier kein lineares Verhalten vorliegt. Mit steigender Dämpfung sinken die Amplituden der Nebenpeaks stärker als die Amplituden der Centerpeaks. Die rote Linie in der Abbildung stellt den kritischen Verhältnswert von 1:10 dar.

Ein ähnlicher Trend zeichnet sich in den Breiten der Peaks ab. Die Breite der Nebenpeaks nimmt deutlich ab, während die Breite der Parasitepeaks zunimmt. Bei 45 Wicklungen sind die Parasitepeaks bereits breiter als die Nebenpeaks (Abbildung 5.11).

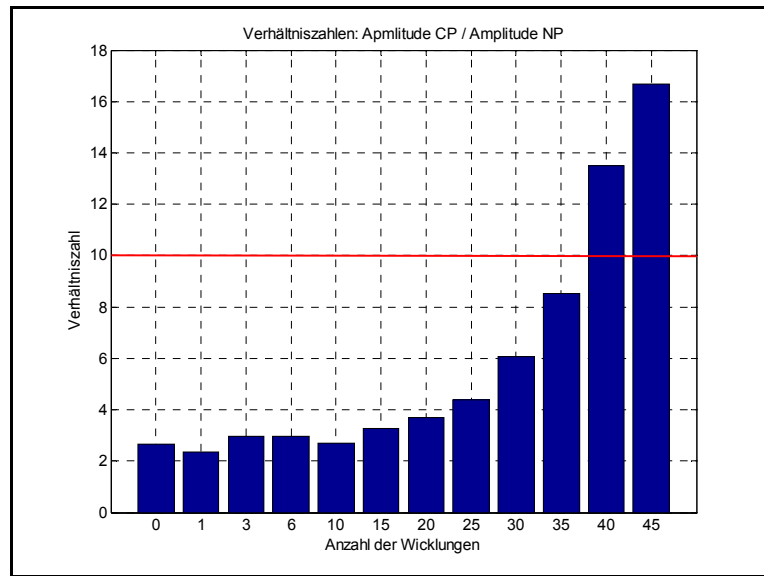


Abbildung 5.10: Verhältniszahlen Amplitude Centerpeaks : Amplitude Nebenpeaks

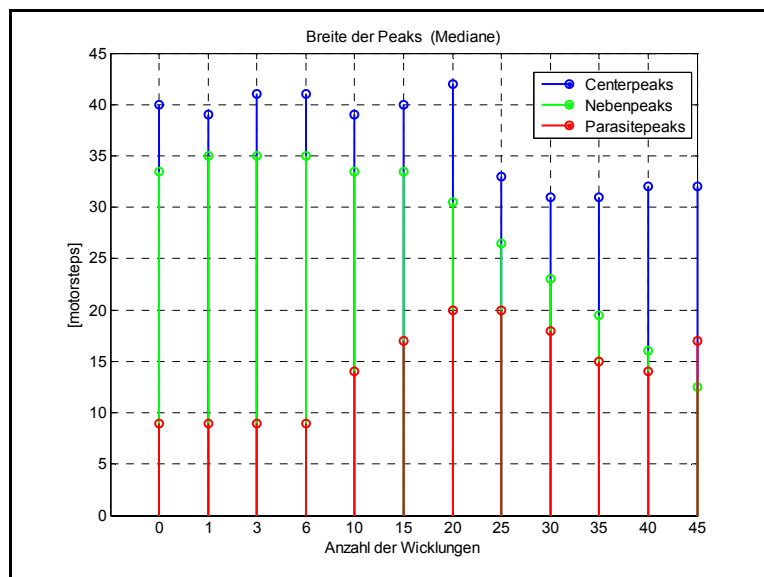


Abbildung 5.11: Versuchsreihe „Wicklungen – Breite der Peaks, Sensor 125

Um die oben gezeigten Einflüsse zu vermeiden, ist auf die Lagerung der Patch Cords besonders zu achten. *Smartec SA* gibt, wie zuvor erwähnt, den minimalen Krümmungsradius eines Patch Cords mit 30 mm an (Anhang B.3). Dadurch sollen Auswirkungen von Signalabschwächungen durch gekrümmte Verbindungskabel vermieden werden.

5.4 Versuchsanordnung „Komparatorbank“

In Kapitel 3.4 wurde bereits die Definition und Entstehung von Parasitepeaks abgehandelt. Sollte sich nun der eigentliche Messwert (Längenunterschied der Fasern im Sensor) zufälligerweise in der Nähe eines dieser vordefinierten Parasitepeaks der SOFO Static RU befinden, kann mitunter der wahre Messwert nicht detektiert werden. Um diesen Grenzbereich zu ermitteln, wurde ein 5 m langer SOFO Standard Sensor (Sensor 4275) auf der Komparatorbank im Messlabor des IGMS montiert. Dieser war zwischen einem fixen Anker und einer verstellbaren Mikrometerschraube eingespannt (Abbildung 5.12).

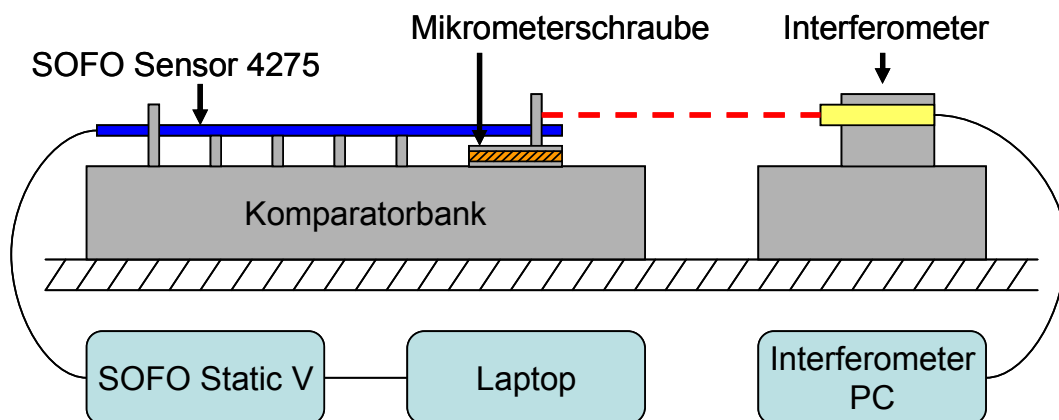


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung „Komparatorbank“

Nach Einspannung des Sensors wurde eine Messung mit dem SOFO Static durchgeführt. Der ermittelte Wert $dL[\text{mm}]$ von 44.3043 mm wurde danach als Parasitepeak in die dafür vorgesehene Datei eingetragen. Die SOFO Static RU verwendet nun Peaks im Messsignal nicht, welche diesen Längenunterschied der Fasern ergeben würden. Nun wurde mit der Mikrometerschraube der Sensor jeweils um $2\ \mu\text{m}$ gestreckt, später gestaucht. Überwacht wurden diese manuell herbeigeführten Längenänderungen mit dem im Messlabor vorhandenen Interferometer. Das verwendete Interferometerprinzip ist ein Michelson Interferometer mit hochkohärenter Lichtquelle, dessen Funktionsprinzip in

Kapitel 2.2.2 erläutert wurde. Die Streckungen und Stauchungen erfolgten jeweils so lange in eine Richtung, bis die SOFO Static RU die Nebenpeaks im Signal nicht mehr als Parasitepeaks erkannte. Das bedeutet, die RU erkennt den aktuellen Messwert an, und speichert ihn als Messergebnis in der Datenbank ab. Zuvor wird nur die Signalstruktur gespeichert, aber kein Messwert. Bei der Streckung des Sensors 4275 wurde nach 41 μm wieder ein Messwert erfasst, bei der Stauchung nach 38 μm . Die unterschiedlichen Werte zwischen Streckung und Stauchung werden Lienhart (2007: Kap. B5) zufolge aufgrund eines Hystereseeffekts, ausgelöst vom Schutzmantel oder den Ankerpunkten des Sensors selbst, verursacht.

Bei diesem Versuch wurde gezeigt, dass in einem Bereich von $\pm 40 \mu\text{m}$ um die vordefinierten Parasitepeaks kein Peak im Messsignal für die Berechnung des Längenunterschieds der Fasern im Sensor verwendet wird. Kritisch wird dieses Verhalten, wenn der wahre Längenunterschied beider Fasern in einem Sensor sich im Laufe der Zeit dahingehend verändert, dass er sich im Größenordnungsbereich eines vordefinierten Parasitepeaks der RU befindet. Dieses Phänomen kann verursachen, dass die RU, zumindest automatisch, keine Messwerte für den Sensor mehr liefert. Es gehen dabei keine Messungen verloren, da immer die gesamte Signalstruktur in der SOFO SDB abgespeichert wird. In diesem Fall muss händisch eine Auswahl der zu verwendenden Peaks getroffen werden.

5.5 Versuchsanordnung „Klimabox“

Ziel dieser Versuchsreihe war es, eventuell auftretende Veränderungen in der Signalstruktur und der Messwerte aufgrund von Temperaturänderungen der SOFO Static RU zu erfassen. Zu diesem Zweck wurde die RU in der im Messlabor des IGMS vorhandenen Klimabox positioniert (Abbildung 5.13). Insgesamt wurden 2 Versuchsreihen durchgeführt. Die erste Versuchsreihe deckte einen Temperaturbereich von $+10^{\circ}\text{C}$ bis $+40^{\circ}\text{C}$ ab. In der zweiten Versuchsreihe war der Temperaturbereich $+21^{\circ}\text{C}$ bis $+2^{\circ}\text{C}$.



Abbildung 5.13: SOFO Static RU in der Klimabox

Die interne Temperatur des Hartschalenkoffers wurde mit einem *Spider 8 A/D* Wandler und einem angeschlossenen PT100 Sensor gemessen. Die Funktionsweise eines PT100 Sensors basiert auf der temperaturabhängigen Widerstandsänderung von Platin. Der Sensor wurde bei den Versuchen in die

geschlossene RU gelegt. Zusätzlich wurde die Temperatur in der Klimabox außerhalb des Hartschalenkoffers mit einem weiteren PT100 Sensor kontrolliert. Bei den durchgeführten Versuchsreihen wurden jeweils zwei Sensoren an den Multiplexer angeschlossen, um zu überprüfen, ob sich Temperaturänderungen der RU auf verschiedene Sensoren unterschiedlich auswirken. Die Sensoren befanden sich außerhalb der Klimabox in einer konstanten Umgebungstemperatur von $+21^{\circ}\text{C}$. Vor Beginn der Messungen wurde eine Agenda auf die SOFO Static RU geladen, welche automatische Messungen zu vorher definierten Zeitpunkten ohne Benutzereingriff ermöglicht (siehe Kapitel 3.4). Dies war aufgrund der langen Akklimatisationszeit der RU von Vorteil. So wurden mit den angeschlossenen Sensoren ab Beginn der Versuchsreihe vollautomatisch alle 10 Minuten jeweils 9 Messungen durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Sensoren näher betrachtet.

5.5.1 SOFO Standard Sensor 4277

Für den Sensor 4277 konnte insgesamt ein Temperaturbereich der SOFO Static RU von $+2.4^{\circ}\text{C}$ bis $+39.9^{\circ}\text{C}$ ausgewertet werden. Der Sensor selbst befand sich während den Messungen im Messlabor außerhalb der Klimabox bei einer konstanten Umgebungstemperatur von $+21^{\circ}\text{C}$. Lienhart (2007: Kap. B4) beschreibt eine Temperaturabhängigkeit der Messwerte $dL[\text{mm}]$ von der SOFO Static RU von $-10 \text{ ppm}/^{\circ}\text{K}$ (parts per million / Kelvin). Dieser Wert kommt zustande, da der Referenzspiegel für die Berechnung des Längenunterschieds der Fasern im Sensor in der RU mit einer Stahlspindel bewegt wird. Stahl hat nach Czichos (1991: Kap. 9.3.2) einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von -10 bis $-13 \text{ ppm}/^{\circ}\text{K}$. Für den Sensor 4277 wurde bei den Messungen eine Temperaturabhängigkeit der Messwerte $dL[\text{mm}]$ von $-10.8 \text{ ppm}/^{\circ}\text{K}$ festgestellt. Nach Korrektur der Messungen um diesen Temperatureinfluss der RU, erhielt man für den Messwert $dL[\text{mm}]$ einen Mittelwert von 37.4579 mm mit einer Standardabweichung von $1.2 \mu\text{m}$.

Weiters konnte eine Abhängigkeit der Intensität der LED von der internen Gerätetemperatur nachgewiesen werden. Diese kann für den betrachteten Temperaturbereich durch ein Polynom vom Grad 2 ($34.0496 + 0.0789x + 0.0085x^2$) beschrieben werden. Da LEDs allgemein die Eigenschaft besitzen, bei höherer Temperatur weniger Licht abzustrahlen, korrigiert die SOFO Static RU diesen Effekt durch eine Erhöhung der Intensität (Lienhart 2007: Kap. B4). Die Temperaturabhängigkeit des Messwerts $dL[\text{mm}]$ und der Intensität der LED $[\text{mA}]$ der Messungen sind in Abbildung 5.14 dargestellt.

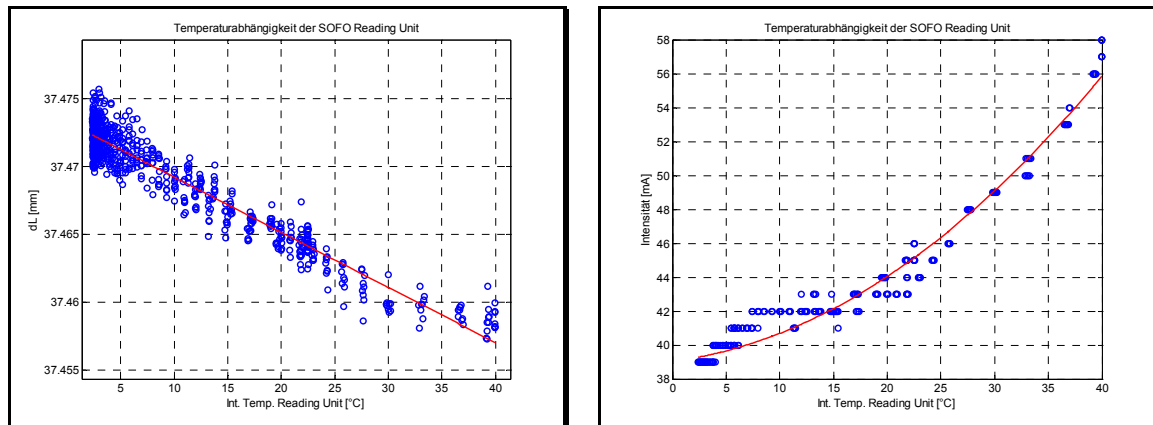


Abbildung 5.14: Sensor 4277 – Messwerte $dL[\text{mm}]$ und Intensität $[\text{mA}]$ in Abhängigkeit der Temperatur

Auch in der Anzahl der auftretenden Peaks in der Signalstruktur konnte eine Temperaturabhängigkeit nachgewiesen werden. Ab einer internen Temperatur von über $+24^\circ\text{C}$ traten deutlich weniger Peaks im Messsignal auf (Abbildung 5.15). Eine Veränderung ab dieser Temperatur konnte ebenfalls in den Amplituden der Centerpeaks und der Nebenpeaks festgestellt werden. Diese waren über $+24^\circ\text{C}$ deutlich kleiner als bei niedrigeren Temperaturen (Abbildung 5.16). Die Amplituden der Nebenpeaks befanden sich aber durchgehend in einer Größenordnung, in der sie eindeutig von den auftretenden Parasitepeaks unterschieden werden konnten. Das bedeutet, dass dieses Verhalten der Signalstruktur über $+24^\circ\text{C}$ auf die ermittelten Messwerte $dL[\text{mm}]$ keinen Einfluss hatte.

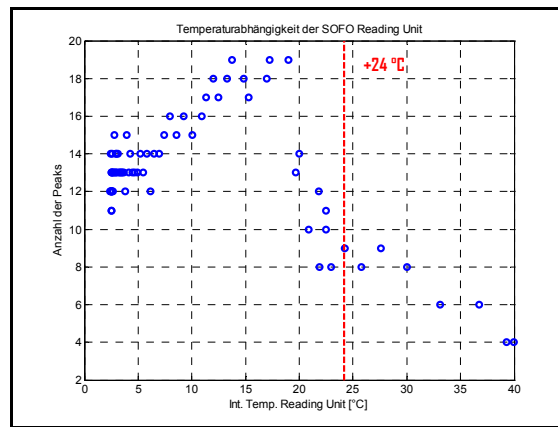


Abbildung 5.15: Sensor 4277 – Temperaturabhängigkeit der Anzahl der im Messsignal auftretenden Peaks

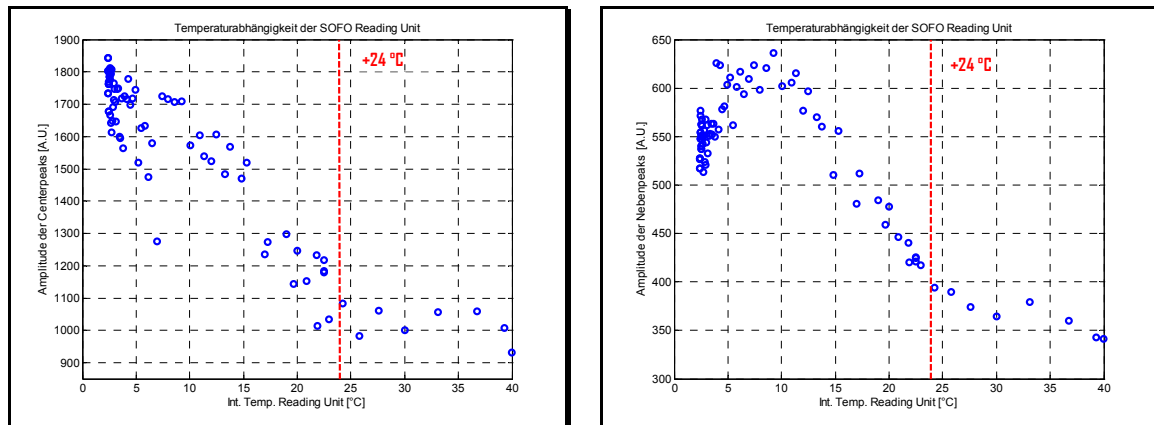


Abbildung 5.16: Sensor 4277 – Temperaturabhängigkeit der Signalstruktur

5.5.2 Referenzsensor 125

Für den Referenzsensor 125 lagen Messungen in einem Temperaturbereich von $+11.4^{\circ}\text{C}$ bis $+39.9^{\circ}\text{C}$ vor. Der Sensor selbst befand sich wie Sensor 4277 während der Messungen bei einer konstanten Raumtemperatur von $+21^{\circ}\text{C}$ außerhalb der Klimabox. Die erwartete Temperaturabhängigkeit der Messwerte $dL[\text{mm}]$ aufgrund der Stahlspindel in der SOFO Static RU wurde mit $-9.9 \text{ ppm}/^{\circ}\text{K}$ bestimmt. Nach Korrektur der Messwerte lag der Mittelwert bei 12.7337 mm , mit einer Standardabweichung von $0.9 \text{ }\mu\text{m}$. Die Abhängigkeit der Intensitäten der

LED von der internen Gerätetemperatur wurde ebenfalls, wie zuvor bei Sensor 4277, nachgewiesen. Diese kann wiederum für den verwendeten Temperaturbereich durch ein Polynom vom Grad 2 beschrieben werden ($38.0317 - 0.3440x + 0.0156x^2$). Abbildung 5.17 zeigt die Abhängigkeiten der Messwerte dL [mm] und der Intensitäten [mA] von der Temperatur der RU.

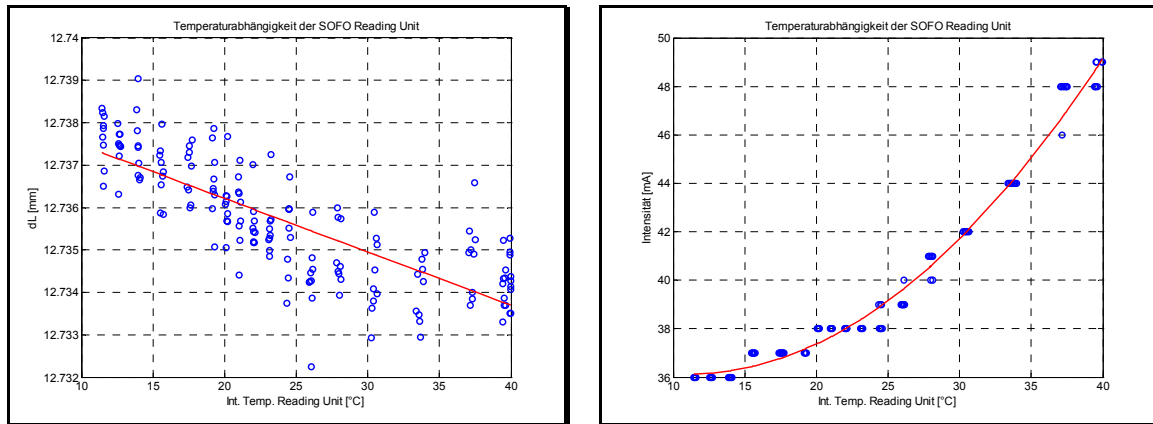


Abbildung 5.17: Ref. Sensor 125 - Messwerte dL [mm] und Intensität [mA] in Abhängigkeit der Temperatur

Ab einer internen Gerätetemperatur von über $+22^{\circ}\text{C}$ traten deutlich weniger Peaks im Messsignal auf (Abbildung 5.18). Teilweise verschwanden die Parasitepeaks komplett aus dem Messsignal und es waren nur mehr Centerpeak und die zwei Nebenpeaks im Signal vorhanden.

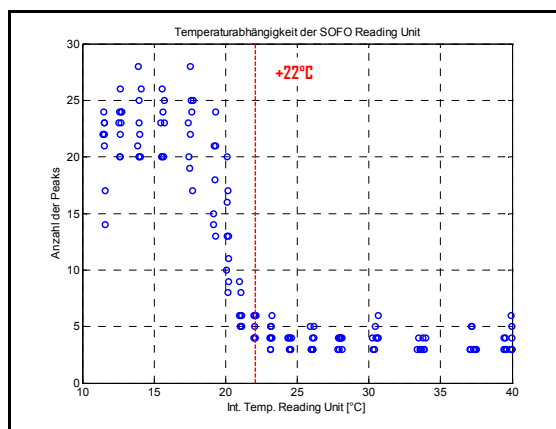


Abbildung 5.18: Ref. Sensor 125 - Temperaturabhängigkeit der Anzahl der im Messsignal auftretenden Peaks

Die Amplituden der Centerpeaks und Nebenpeaks zeigten keinen so starken Abfall aufgrund der internen Temperaturänderung der RU. Hier wurde ähnlich wie bei den Messwerten $dL[\text{mm}]$ ein linearer Trend festgestellt. Die Amplituden der Nebenpeaks waren von der Größenordnung deutlich über den Amplituden der auftretenden Parasitepeaks. Die Signalstruktur konnte zu keinem Zeitpunkt der Messungen als kritisch eingestuft werden. Daher wurden auch die Messwerte $dL[\text{mm}]$ von der RU immer korrekt bestimmt.

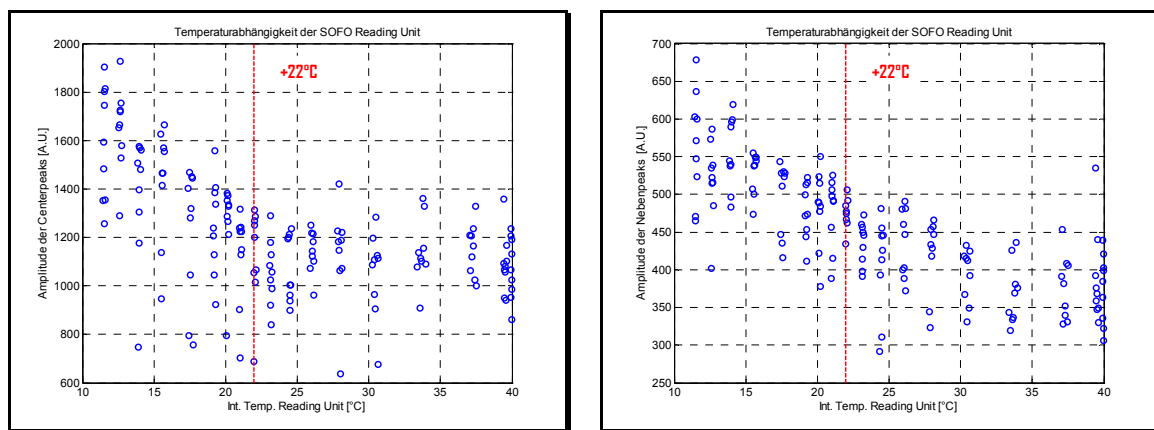


Abbildung 5.19: Ref. Sensor 125 - Temperaturabhängigkeit der Signalstruktur

Ein weiterer Sensor, der bei den Versuchsreihen mit der Klimabox zum Einsatz kam, war der Referenzsensor 149. Dieser lieferte ähnliche Ergebnisse wie die beiden beschriebenen Sensoren.

5.6 Ergebnisse

Die Auswertung der Klimaboxversuche lieferte für die verwendeten Sensoren annähernd die gleichen Korrekturwerte für den Messwert aufgrund der internen Temperatur der SOFO Static RU (Tabelle 5.5). Die Gründe für die Größenordnung dieser Werte sind wie bereits erwähnt die Verwendung einer Stahlspindel zur Bewegung des Referenzspiegels in der RU. Durch die

Klimaboxversuche können die Untersuchungen von Lienhart (2007: Kap. B4) bestätigt werden.

Tabelle 5.5: Korrekturwerte aufgrund der internen Temperatur der RU

Sensor	S. 4277	Ref.S. 125	Ref.S. 149
ppm/°K	-10.8	-9.9	-10.4

Weiters wurde eine Abhängigkeit der Intensität der LED von der internen Gerätetemperatur festgestellt. Die Intensität zeigt keinen linearen Trend im Verhältnis zur internen Temperatur, sondern das Verhalten kann für den betrachteten Temperaturbereich durch ein Polynom vom Grad 2 angenähert werden. Die Werte für dieses Polynom variieren von Sensor zu Sensor leicht. Dafür sind verschiedene interne Reflexionseigenschaften und der Allgemeinzustand der Sensoren verantwortlich, die bei keinem Sensor gleich sind. Daher regelt die SOFO Static RU die Intensität der Messungen bei jedem Sensor geringfügig anders.

Gezeigt wurde ebenfalls, dass die Signalstruktur durchaus eine Abhängigkeit von der internen Gerätetemperatur aufweist. Es konnte ab einer Temperatur zwischen +22°C und +24°C ein starker Rückgang in der Anzahl der im Messsignal auftretenden Peaks festgestellt werden. Bei allen verwendeten Sensoren wurden mit größerer Gerätetemperatur die Amplituden der Peaks kleiner. In dem getesteten Temperaturbereich (+2°C bis +40°C) traten aber keine Schwierigkeiten hinsichtlich schlechter Signalstruktur und Messwernerkenung auf.

6 Zusammenfassung

Um auf das Langzeitverhalten von SOFO Standard Sensoren schließen zu können, wurden 7 in eine Hangbrücke bei Schladming eingebettete Sensoren näher untersucht. Mittlerweile funktionieren noch 3 der seit 2002 eingebetteten Sensoren. Die restlichen 4 Sensoren versagten in den letzten Jahren aus verschiedenen Gründen. Bei den Untersuchungen wurde deutlich, dass die Intensitäten der im SOFO Static V verwendeten LED und die Anzahl der im Messsignal auftretenden Peaks nur bedingt für eine Aussage über den Zustand eines Sensors herangezogen werden können. Zusätzlich muss die Signalstruktur der Messungen betrachtet werden. Es wurde gezeigt, dass die Amplituden der Nebenpeaks ein entscheidender Parameter für den Zustand eines Sensors sind. Die Nebenpeaks beinhalten den eigentlichen Messwert, den Längenunterschied der beiden Fasern im Sensor. Befinden sich die Amplituden der Nebenpeaks in der Größenordnung auftretender Parasitepeaks, wird das als kritische Signalstruktur betrachtet. Weiters wurde die Signalstruktur ab einem Verhältnis der Amplituden von Centerpeaks zu Nebenpeaks von 1:10 als kritisch eingestuft. Tritt eine solche Signalstruktur auf, muss man davon ausgehen, dass sich der Sensor in einem schlechten Allgemeinzustand befindet. Die Nebenpeaks können jederzeit aus der Signalstruktur verschwinden. Die Ableitung einer exakten Dauer der Lebenszeit ist über die Signalstruktur aber nicht möglich.

In den Labormessungen wurden die Auswirkungen von künstlicher Signalabschwächung und Temperaturänderungen der SOFO Static Reading Unit untersucht. Um eine Abschwächung des Messsignals herbeizuführen, wurden mehrere optische Koppler, Mating Adapter und um Metallrohre gewickelte Patch Cords verwendet. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei großer Abschwächung des Signals, die Amplituden der Nebenpeaks die Größenordnung der Parasitepeaks erreichen können. Dies wurde zuvor als kritische Signalstruktur angeführt. Das bedeutet, eine kritische Signalstruktur kann durchaus auch durch beschädigte oder falsch gelagerte Verbindungskabel (Verwicklungen) entstehen.

Die Untersuchungen zu Temperaturänderungen der SOFO Static RU konnten die angegebenen Korrekturwerte des Messwerts von $-10\text{ppm}/^\circ\text{K}$ von Lienhart (2007: Kap. B4) bestätigen. Ebenfalls wurde eine Abhängigkeit der Intensitäten der LED von der internen Gerätetemperatur nachgewiesen, die für den betrachteten Temperaturbereich durch ein Polynom vom Grad 2 angenähert werden kann. Es wurde gezeigt, dass die Anzahl und die Amplituden der Peaks eine sensorspezifische Temperaturabhängigkeit der RU aufweisen. Sensoren werden über Jahre hinweg bei meist unterschiedlichen äußeren Einflüssen gemessen. Um die Signalstruktur eines in einem Bauwerk eingebetteten Sensors besser analysieren zu können, sollten vor Einbau eines Sensors entsprechende Temperaturversuche durchgeführt werden. Dadurch könnte man auftretende Veränderungen in der Signalstruktur eines Sensors besser von den Änderungen aufgrund von Temperatureinflüssen der RU trennen. Die Vergleiche der Signalstrukturen eines Sensors über längere Zeiträume würden dadurch um einiges vereinfacht und würden Prognosen über etwaige Sensorausfälle erleichtern.

Literaturverzeichnis

Bludau, W. (1998) *Lichtwellenleiter in Sensorik und optischer Nachrichtentechnik*. Springer Verlag, Berlin, Deutschland.

Brunner, F. K. (2009) *Faseroptische Sensorik: Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie?* in *Vermessung & Geoinformation (VGI)*. 97. Jahrgang, Heft 3/2009, S. 335 – 342

Czichos, H. (1991) *Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. 29. Ausgabe, Springer Verlag, Berlin, Deutschland.

Glišić, B. (2000) *Fibre Optic Sensors and Behaviour in Concrete at early Age*. PhD theses. EPFL Lausanne, Switzerland.

Glišić, B., Inaudi, D. (2007) *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd.

Güemes, A. & Menendez, J. M. (2006) *Fiber Optic Sensors*. Kapitel 3 in *Structural Health Monitoring*, S. 225 – S. 285, [Hrsg.] Balageas D., Fritzen C. P., Güemes A. ISTE Ltd., London, GB.

Inaudi, D., Casanova N., Kronenberg P., Marazzi S., Vurpillot S. (1997) *Embedded and surface mounted fiber optic sensors for civil structural monitoring*. SPIE Conference on Smart Structures and Materials, 5.-6. 03. 1997, San Diego, California, USA.

Inaudi, D. (1997) *Fibre Optic Sensor Network for the Monitoring of Civil Engineering Structures*. PhD theses. EPFL Lausanne, Switzerland.

Inaudi, D., Vurpillot, S. (1999) *Monitoring of concrete bridges with long-gage fiber optic sensors*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 10, S. 280-292

Inaudi, D. (2005) *Long-term reliability testing of packaged strain sensors*. Smart Structures Conference, San Diego, CA. 7.-10. 03/2005.

Lienhart, W. (2007) *Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data*. Shaker Verlag, Aachen, Deutschland.

Measures, R. M. (2001) *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. Academic Press, San Diego, USA.

Presl, R. (2009) *Entwicklung eines automatisierten Messsystems zur Charakterisierung faseroptischer Dehnungssensoren*. Diplomarbeit Fachhochschul-Diplomstudiengang Mechatronik/Wirtschaft, Wels, Österreich.

Rogers, A. (2001) *Understanding Optical Fiber Communications*. Artech House, Boston, Massachusetts, USA.

Sennhauser, U., Nellen, Ph. (2000) *Reliability of fiber optic sensors*. in Rastogi P., Inaudi, D. (2000) *Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection*. Elsevier Science B.V.

Witte, B., Schmidt, H. (2000) *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, Deutschland.

Anhang A: Auswertung der Langzeitmessungen

A.1 Sensor 2807

Der Sensor 2807 wurde in Messprofil 1 im herausragenden Teil des Brückendecks eingebettet (siehe Abbildung 4.2). Die allgemeinen Parameter der durchgeführten Messreihen sind in Abbildung A.1 dargestellt. Dieser Sensor lieferte bei sämtlichen Messungen im Messzeitraum gültige Messungen. Das bedeutet, dass die Nebenpeaks für die Bestimmung des Längenunterschieds der beiden Fasern im Sensor stets erfasst werden konnten. Dieser Sensor weist nur kleinere Schwankungen der Intensitäten der Messungen auf. Die Anzahl der im Messsignal auftretenden Peaks war bei den Messreihen im November 2006 (9 Peaks/Messung) und November 2008 (12 Peaks/Messung) im Vergleich zu den davor erfolgten Messungen nur geringfügig größer.

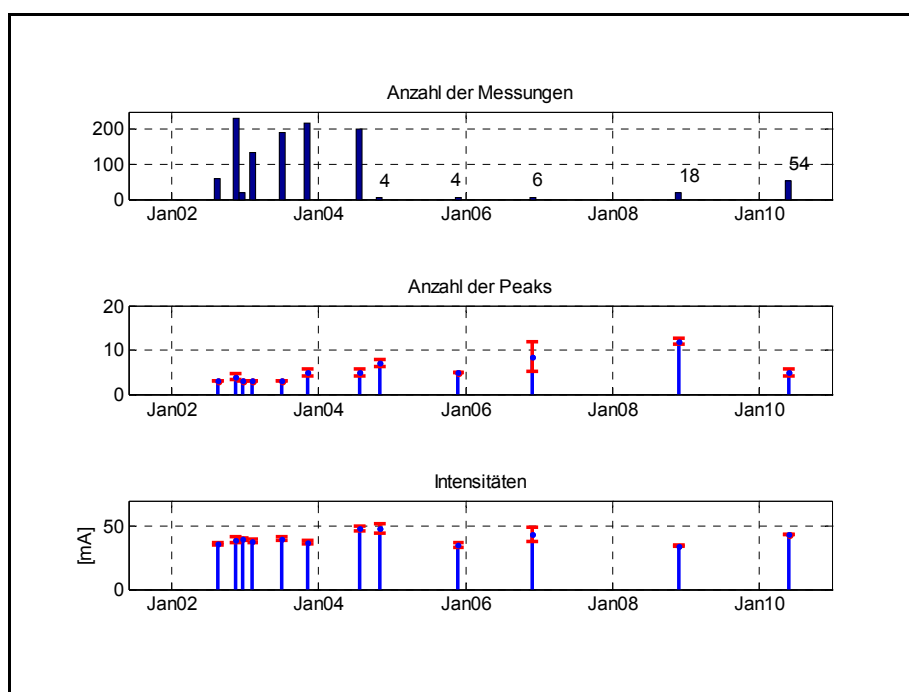


Abbildung A.1: Sensor 2807 – Allgemeine Parameter

Bei den Messungen Ende Mai 2010 wurden in der Signalstruktur wieder 5 Peaks pro Messung festgestellt. Daher ist die Anzahl der Peaks alleine nicht als Parameter für eine etwaige Verschlechterung des Sensors zu werten. Abbildung A.2 zeigt die Amplituden der Peaks, die im Messsignal vorkommen und die Anzahl der jeweils durchgeführten Messungen der Messreihe. Die den Messwert repräsentierenden Nebenpeaks (in grün dargestellt) sind bis auf 4 Messungen Ende 2004 über den gesamten Messzeitraum deutlich von den Parasitepeaks zu unterscheiden. Das Verhältnis der Amplituden von Centerpeaks zu Nebenpeaks war stets unter 1:9, bei der letzten Messreihe im Mai 2010 bei einem Wert von 1:6. Dies stellt eine gute Signalstruktur dar, da die Nebenpeaks eindeutig im Messsignal erfasst werden können.

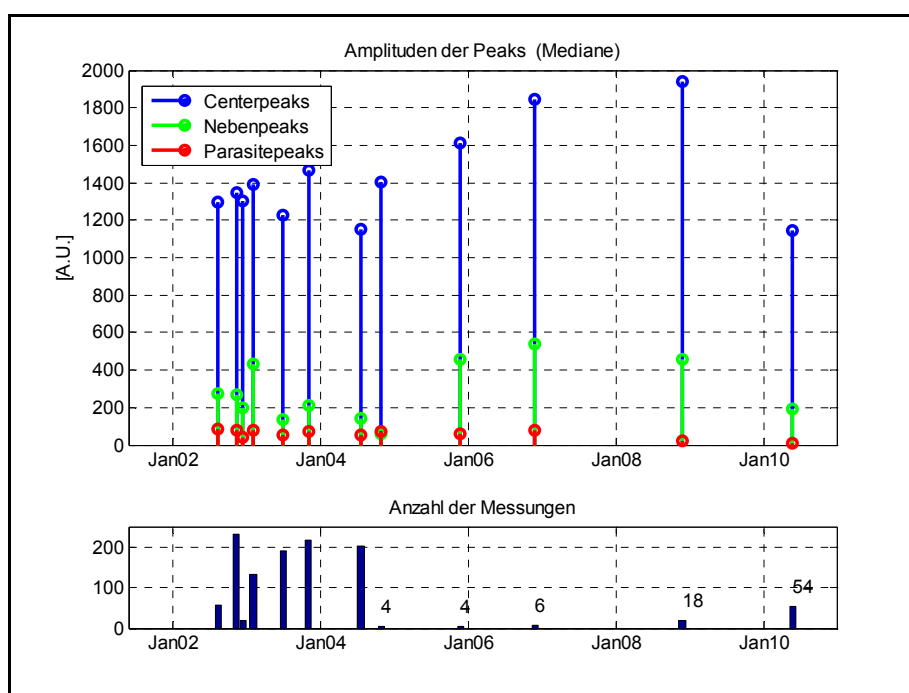


Abbildung A.2: Sensor 2807 – Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks

In Abbildung A.3 ist das Verhältnis von Amplitude zu Breite der auftretenden Peaks im Messsignal dargestellt. Alle drei Arten von Peaks sind eindeutig voneinander zu unterscheiden. Dies bedeutet, dass sich die Signalstruktur von Sensor 2807 im Zeitraum von 2004 bis zu den letzten Messungen im Mai 2010

nicht wesentlich verschlechtert hat. Sensor 2807 war bis zuletzt (Mai 2010) in einem guten Zustand.

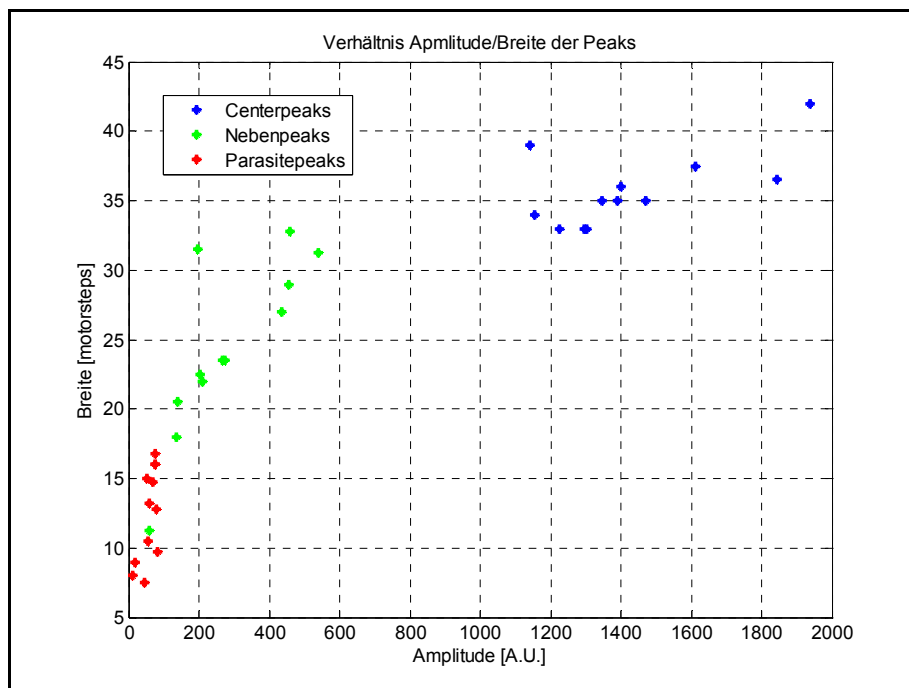


Abbildung A.3: Sensor 2807 – Verhältnis Amplitude/Breite der Peaks

A.2 Sensor 2809

Der SOFO Standard Sensor 2809 befindet sich in Messprofil 3 im herausragenden Teil des Brückendecks (siehe Abbildung 4.2). Abbildung A.4 zeigt die allgemeinen Parameter dieses Sensors. Sofort ersichtlich ist der Sprung von 3 auf 11 Peaks pro Messung in der Anzahl der auftretenden Peaks in der Signalstruktur zwischen Februar und Juli 2003. Eine markante Veränderung ist auch in den Amplituden der Peaks feststellbar (Abbildung A.5). In den Intensitäten der LED der Messungen spiegelt sich dieses Sprungverhalten nicht wider. Daraus wird abgeleitet, dass dieser Sensor oder das zugehörige Patch Cord in diesem Zeitraum (02/2003 bis 07/2003) beschädigt wurde. Die Messungen nach Juli 2007 weisen allesamt eine äußerst schwache Signalstruktur auf. Das bedeutet, die

Amplituden der Nebenpeaks treten in der Größenordnung der zahlreich vorhandenen Parasitepeaks auf. Trotzdem lieferte der Sensor 2809 bis zur letzten durchgeführten Messreihe gültige Messungen. Das heißt, die Nebenpeaks zur Berechnung des Längenunterschieds im Sensor konnten durchgehend detektiert werden. Bei den letzten zwei Messreihen im November 2008 und Mai 2010 hoben sich die Nebenpeaks in der Amplitude wieder von den Parasitepeaks ab. Die genaue Ursache für die rapide Verschlechterung dieses Sensors konnte nicht geklärt werden. Das Verhältnis der Amplituden von Centerpeaks zu Nebenpeaks lag bei der letzten Messreihe bei 1:9. Die Nebenpeaks hoben sich wieder deutlich von den Parasitepeaks ab. Daher kann man bei den letzten beiden Messreihen von einer akzeptablen Signalstruktur sprechen, die gültige Messergebnisse lieferte. In Abbildung A.6 ist ersichtlich, dass sich die Nebenpeaks mancher Messreihen von den Größenordnungen der Amplituden und der Breiten größtenteils im Bereich der Parasitepeaks befanden. Zuletzt wies Sensor 2809 aber eine stabile Signalstruktur auf.

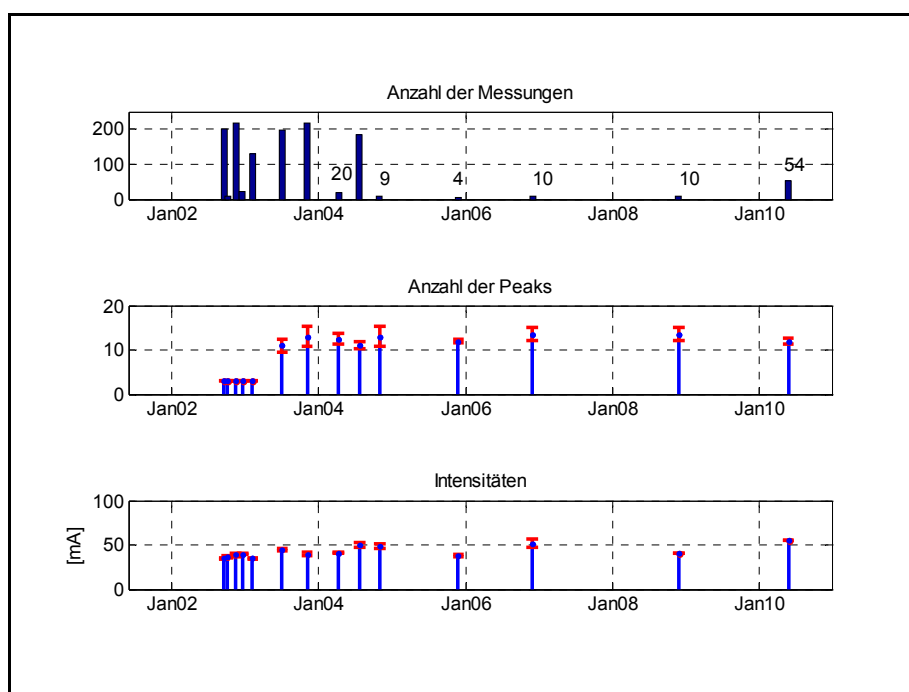


Abbildung A.4: Sensor 2809 – Allgemeine Parameter

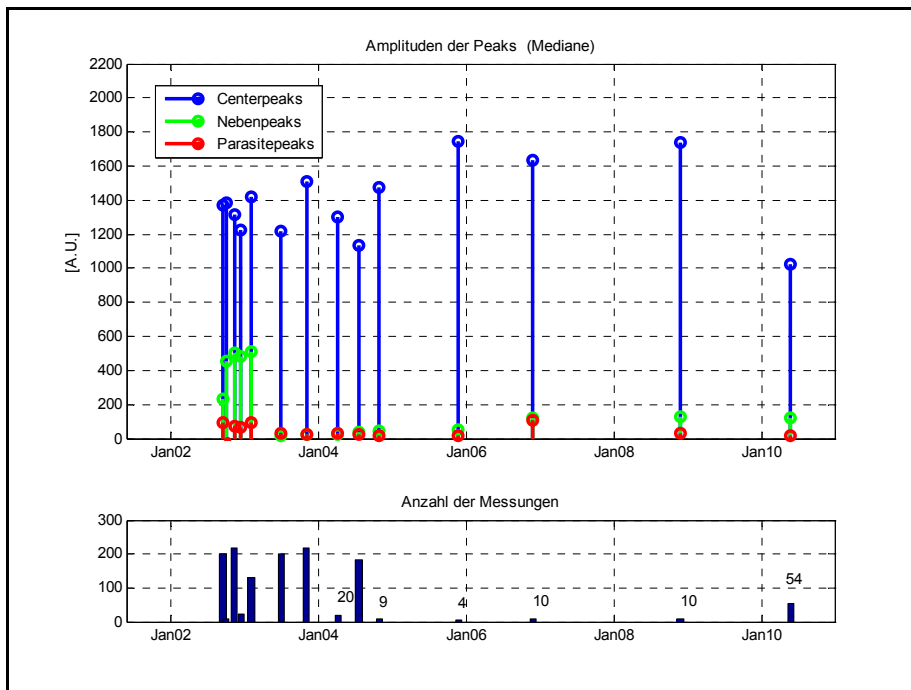


Abbildung A.5: Sensor 2809 – Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks

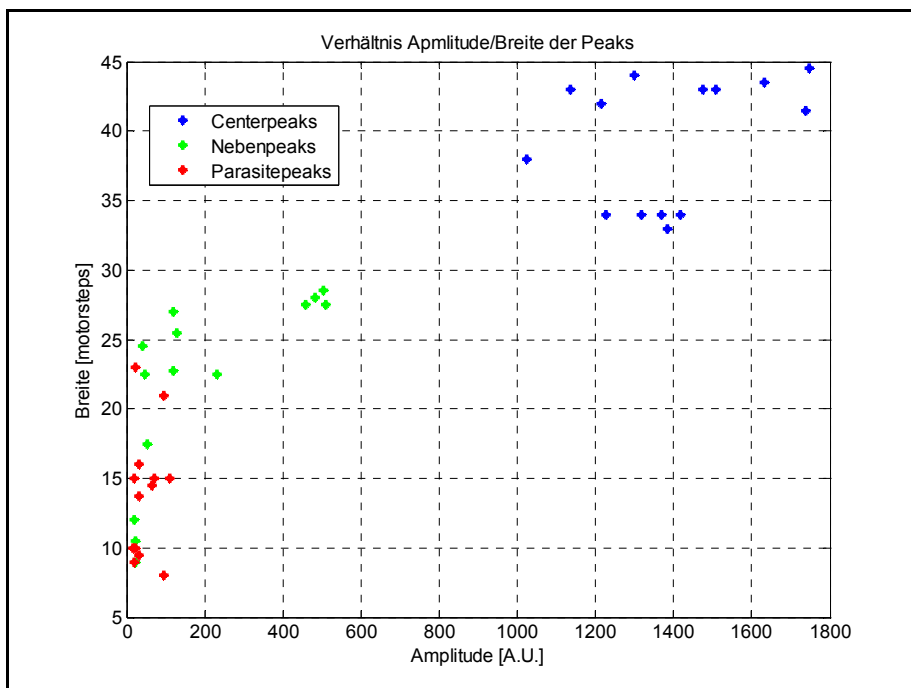


Abbildung A.6: Sensor 2809 – Verhältnis Amplitude/Breite der Peaks

A.3 Sensor 2810

Sensor 2810 wurde in Messprofil 2 auf der Hangseite der monolithischen Brücke in Schladming ins Brückendeck eingebettet (Abbildung 4.2). Die letzten gültigen Messungen wurden im April 2004 erfasst. Bei den Messreihen danach konnten die Nebenpeaks zur Bestimmung des Längenunterschieds der beiden Fasern im Sensor nicht mehr im Messsignal detektiert werden. Abbildung A.7 zeigt die allgemeinen Parameter des Sensors 2810. In den Abbildungen wird der Zeitpunkt des Versagens des Sensors als rote Linie dargestellt. Dieser lässt sich aufgrund der vorhandenen Messreihen auf den Zeitraum April 2004 bis Juli 2004 eingrenzen. Der Sensor zeigte bis zum Zeitpunkt des Versagens kein auffälliges Verhalten.

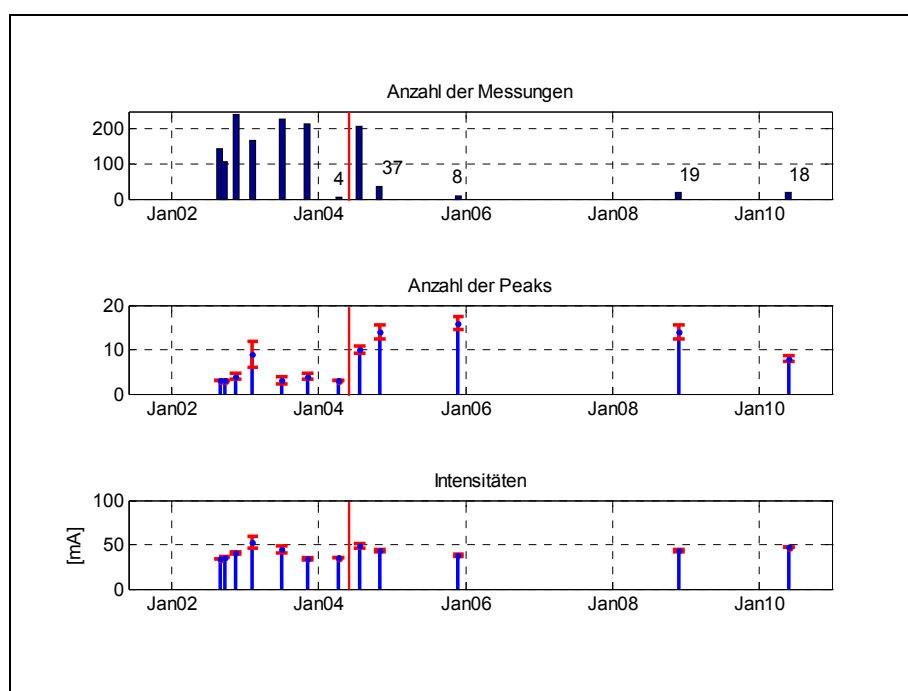


Abbildung A.7: Sensor 2810 – Allgemeine Parameter

In Abbildung A.8 sind die Amplituden der im Messsignal vorkommenden Peaks sowie die jeweilige Anzahl der Messungen der jeweiligen Messreihen dargestellt. Die Amplituden der Nebenpeaks deuten auf keine kontinuierliche Verschlechterung des Sensors hin. Lediglich bei den Messungen im Juli 2003

wurde eine schwache Signalstruktur festgestellt. Dieser Trend setzte sich aber bei den weiteren Messreihen nicht fort. Das ist auch in der Darstellung der Verhältnisse der Amplituden zur Breite der Peaks ersichtlich (Abbildung A.9).

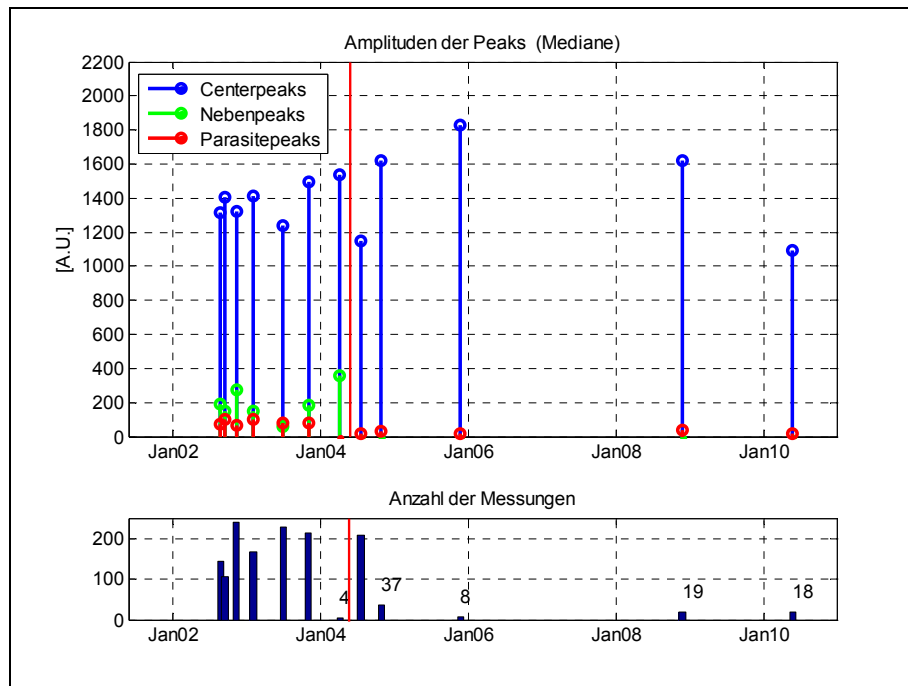


Abbildung A.8: Sensor 2810 – Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks

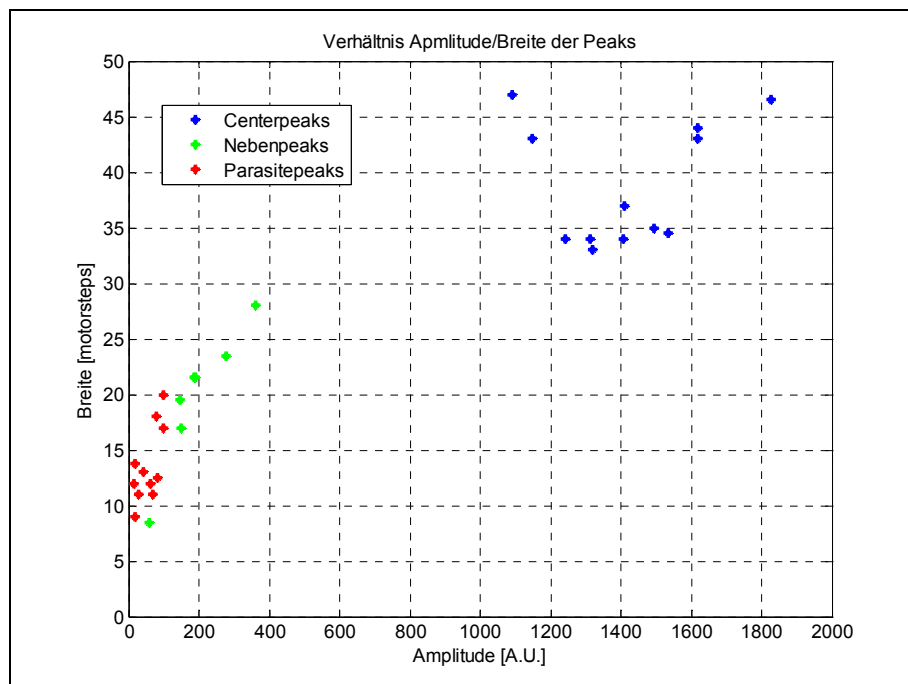


Abbildung A.9: Sensor 2810 – Verhältnis Amplitude/Breite der Peaks

A.4 Sensor 2812

Der SOFO Standard Sensor 2812 befindet sich in Messprofil 3 auf der Hangseite der Brücke. Dieser Sensor zeigt das gleiche Verhalten wie Sensor 2810. Die letzten gültigen Messungen wurden im April 2004 durchgeführt. Bei den folgenden Messreihen ab Juli 2004 konnten keine Nebenpeaks zur Bestimmung des Messwerts erfasst werden. Der Zeitpunkt des Sensorausfalls kann daher auf den Zeitraum April 2004 bis Juli 2004 eingegrenzt werden (in den Abbildungen als rote Linie dargestellt). Sensor 2812 lieferte bereits ab Februar 2003 eine erhöhte Anzahl der im Messsignal vorkommenden Peaks, der Intensitätsverlauf der LED zeigt ebenfalls eine leichte Erhöhung (Abbildung A.10).

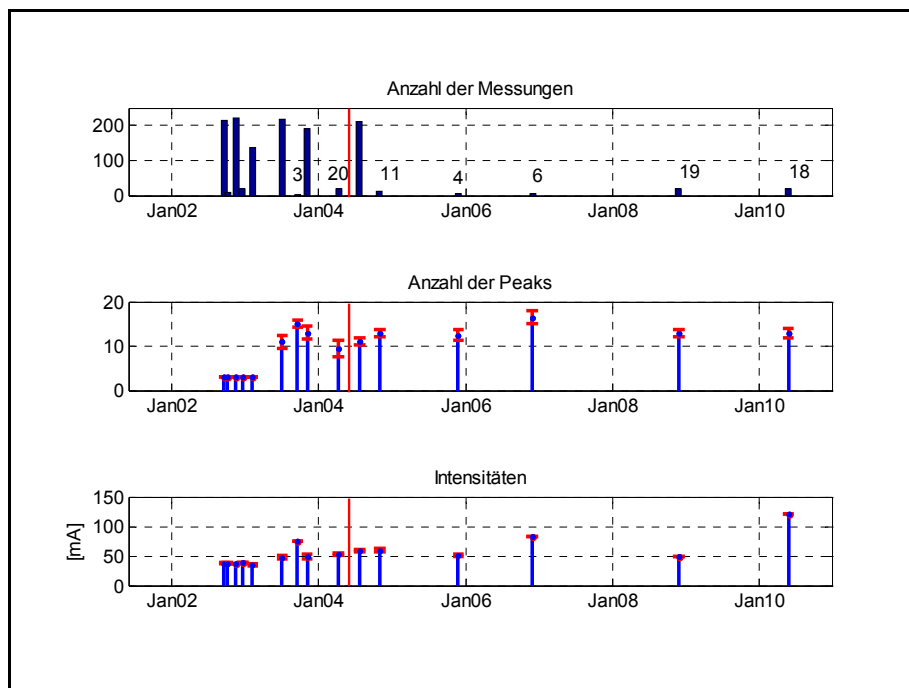


Abbildung A.10: Sensor 2812 – Allgemeine Parameter

Abbildung A.11 zeigt die deutlich schwächere Signalstruktur in den Amplituden der Peaks ab 2003 im Vergleich zu den davor erfolgten Messreihen. Zusätzlich zu der hohen Anzahl der Peaks im Messsignal befinden sich die Amplituden der Nebenpeaks in der Größenordnung der Parasitepeaks. Der Sensor weist bereits ein Jahr vor dem Ausfall eine schwache Signalstruktur auf. Dies ist auch in Abbildung A.12 ersichtlich.

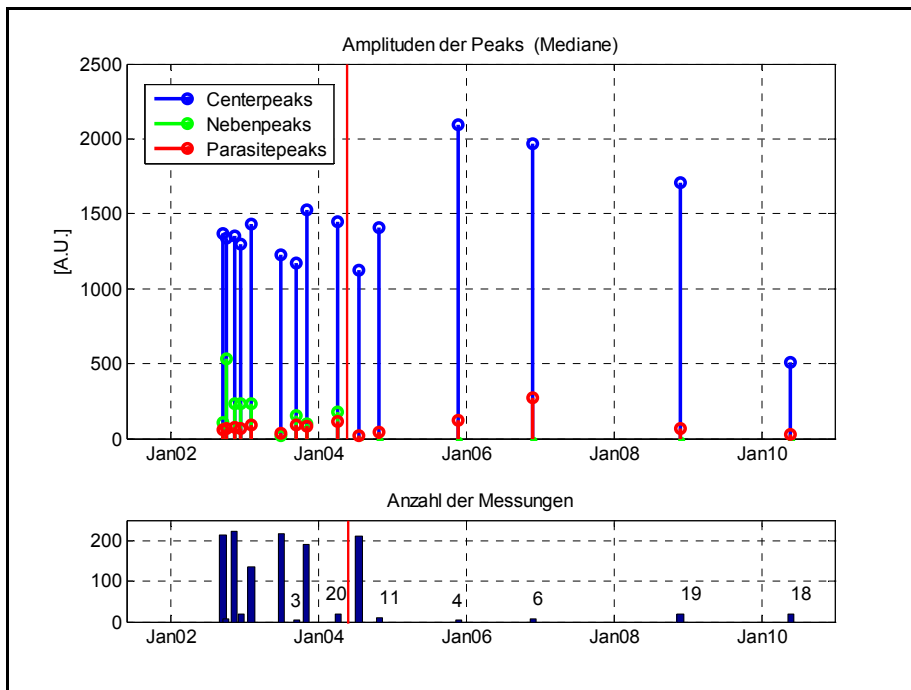


Abbildung A.11: Sensor 2812 – Amplituden der im Messsignal auftretenden Peaks

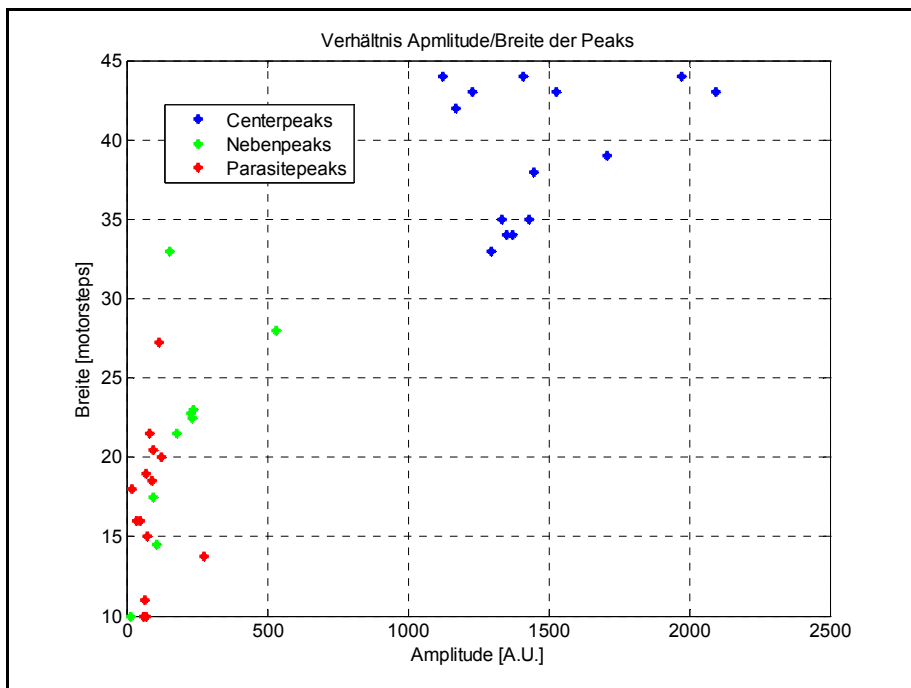


Abbildung A.12: Sensor 2812 – Verhältnis Amplitude/Breite der Peaks

Anhang B: Smartec Datenblätter

B.1: Datenblatt SOFO Static Reading Unit

10.2010 SOFO READING UNIT






GENERAL DESCRIPTION

The SOFO Reading Unit is a computerized equipment which measures all SOFO sensors.

It includes an optical source, a mobile mirror, a photo-detector and the related electronics. These components are contained within a case designed to withstand the harsh environment of a civil engineering construction site.

TECHNICAL DESCRIPTION

The SOFO Reading Unit is powered either by the internal battery or by an AC source.

An external portable PC is used to program or control the Reading Unit allowing initiating the measurements, storing the obtained results for further analysis or programming the unit for automatic and autonomous acquisitions in data logging mode. A single Reading Unit allows the measurements of virtually unlimited number of sensors.

Optical switching units are used to automatically multiplex different sensors. SOFO units are available in single channel or with integrated 12 channels switch. For larger sensor networks external switching units with up to 100 channels each can be added.

A standard serial link connects the SOFO reading unit with the control PC, while the SOFObus port is used to connect external switching units and external data acquisition devices to the SOFO.

The SOFO Reading Unit contains a data logged that can be programmed to automatically scan SOFO sensors and external data acquisition devices and store the measurements in the local memory. This can hold thousands of measurements that can be later downloaded into an SDB database.

Remote connection to the SOFO unit is guaranteed through wired (Ethernet, fiber optic, etc.) or wireless (analog, cellular, radio modem) connections.

The SOFO Reading Unit is available as a portable or as rack mountable unit. The portable unit is protected in a rugged case and is well suited for use on building sites. The rack-mounted version is designed for permanent monitoring installations or for laboratory use.

FEATURES

- Compatible with all SOFO Sensors
- Compatible with conventional electrical sensors using optional SOFO Bridge unit
- Measurement resolution 2µm
- Linearity and accuracy 2‰
- Dynamic range 50 mm
- No calibration required
- Automatic and remote control
- Suitable for building site conditions
- AC or battery power supply


Where instrumentation technologies meet

B.1 fortgesetzt

PERFORMANCES	
Measurement resolution	2 µm RMS
Linearity / Accuracy	< 2 ‰
Measurement range	Max. 50 mm
Measurement drift	Below measurement resolution
Calibration	None, not required
Measurement time	< 10 s
Available channel count	1 or 12 channels, up to 100 channels with separate switching unit. Can be cascaded for up to 1000 channels
TECHNICAL CHARACTERISTICS	
AC power supply	230 VAC 50 Hz / 110 VAC 60 Hz Auto detect
Internal battery	12 VDC, rechargeable
Autonomy on batteries	5'000 measurements (@ 20°C), 2'500 measurements (@ -10°C) in data logger mode > 8 hours in interactive mode
External connections	RS232 to PC or modem, 12+1 or 24+1 ⁽¹⁾ optical ports, power supply, ADAM modules connection port, modem power supply ⁽¹⁾
Data logger capacity	Typical 20'000 measurements, minimum 8'000 measurements (with standard 4MB flash memory) Up to 80'000 measurements with 16 MB flash memory ⁽¹⁾
Dimensions	470 mm x 350 mm x 170 mm
Weight	~12 kg
Operating temperature	1 Channel unit: -20 °C to +60 °C With integrated channel switch: 0 °C to +60 °C
Storage temperature	-30 °C to +70 °C
Humidity	90% non condensed
⁽¹⁾ optional	
ORDERING INFORMATION	
Smartec SA · Via Poblette 11, CH-6928 Manno, SWITZERLAND · Phone +41 91 610 1800 · Fax +41 91 610 1801 · smartec@smartec.ch · www.smartec.ch All information contained herein is believed to be accurate and is subject to change without notice. © Rctest Ltd.	
v. 2009/02	

B.2: Datenblatt SOFO Standard Sensor

10.1010 SOFO STANDARD DEFORMATION SENSOR







GENERAL DESCRIPTION

The SOFO deformation sensors are transducers that transform a distance variation into a change in the path unbalance between two optical fibers that can be measured with a Smartec's SOFO Reading Unit.

TECHNICAL DESCRIPTION

The sensor is composed of two main parts, an active and a passive one. The active part contains the reference and the measurement fibers and measures the deformations between its two ends.

The passive part is insensitive to deformations and is used to connect the sensor to the Reading Unit. The output is terminated with an E-2000 connector with a built in protective cover.

The sensors can be quickly and easily surface mounted or directly embedded in concrete and mortars.



FEATURES

- High resolution
- Embeddable or surface mountable
- Temperature insensitive
- Insensitive to corrosion and vibrations
- No calibration required
- Easy to install
- Long lifetime
- Waterproof
- Static and dynamic measurements


Where instrumentation technologies meet

B.2 fortgesetzt

SENSOR CONFIGURATION

The diagram illustrates the sensor configuration with the following zones and components:

- Mirror Zone:** 100 mm, containing Mirrors and an Anchor.
- Active Zone:** 0.25 m to 10 m, containing Reference Fiber and Measurement Fiber.
- Passive Zone:** 1.4 m to 2000 m, containing a Coupler.
- Pigtail:** 0.3 m, containing a Glan nut (PG11) and an E2000 0° connector.

Not to scale

TECHNICAL CHARACTERISTICS

Length of active zone (LA, measurement basis)	0.25 m to 10 m, standard length 10m-20m, customized lengths upon request
Length of passive zone (connecting cable)	1 m to 100 m Customized lengths up to 2000 m upon request
Measurement range	0.5% of LA in shortening, 1% of LA in elongation
Measurement precision	0.2% of the measured deformation or better
Measurement resolution	2 μm RMS
Connecting cable protection options (see specific datasheet for details)	Standard (recommended for embedding or surface mounting in normal conditions) Stainless steel protecting tube (recommended in harsh conditions) Simple cable without protecting tube (recommended for laboratory conditions).
Operating temperature	Standard active zone: -50 °C to +110 °C Special active zone (upon request): -50 °C to +170 °C Passive zone: -40 °C to +80 °C
Waterproof	5 bars (15 bars with extra protection on anchoring points)
Calibration	Not required

ORDERING INFORMATION

Smartec SA · Via Poblette 11, CH-6928 Manno, SWITZERLAND · Phone +41 91 610 1800 · Fax +41 91 610 1801 · smartec@smartec.ch · www.smartec.ch

All information contained herein is believed to be accurate and is subject to change without notice. © Roctest Ltd.

v. 2009/05

B.3 Datenblatt Fiber Optic Cable

40.1020 FIBER OPTIC CABLE

Single fiber









GENERAL DESCRIPTION

The aim of the connecting cable is to create an optical link between the reading unit and the fiber optic sensor. It is a part of sensors passive zone and it serves as a courier of information. Depending on the application, three types of connecting cables are available: (1) Simple unprotected patch cord (yellow color), (2) Standard cable with protection tube (gray color) and (3) Stainless steel armored cable (black color). Each type of cable features high flexibility, reliability and durability, insensitiveness to thermal variation, corrosion, humidity and electro-magnetic fields. The connecting end of the cable is a standard E-2000 connector with a built in protective cover.

TECHNICAL DESCRIPTION

Simple unprotected patch cord (yellow) consists of an optical fiber protected with secondary nylon coating, aramide fibers and outer plastic sheath. This cable is mainly designed for indoor use in safe on-site conditions. It has good mechanical resistance for safe handling, but should not be exposed to pulling, rodents, contact with sharp objects, accidental crush, and embedding in concrete. It must be protected from humidity, weather changes, sunlight or low temperatures in long-term. During the service the cable requires particular care and good protection from the external influences.

Standard cable with protective tube (gray) consists of a simple patch cord protected with additional plastic tube. This cable can be embedded in concrete or surface mounted in relatively moderate outdoor conditions. This cable features good tensile and mechanical strength which makes it robust and provides crush and weather resistance. However, this cable is not antirodent and has moderate chemical resistance, and in case of presence of these menaces while employed, it must be additionally protected. This cable is attached to connection box using a gland nut PG11.

Stainless steel armored cable (black) consists of an optical fiber protected with stainless steel metallic capillary, stainless steel reinforcing fibers and polyamide sheath. It features high mechanical and chemical resistance and is therefore particularly adapted for almost all outdoors conditions. This cable doesn't require any additional protection on-site. This cable is attached to connection box using a gland nut PG11.

FEATURES

- Option of cables for indoor or outdoor use
- High reliability and durability
- Can be embedded in concrete
- Not affected by thermal variations
- Insensitive to corrosion and vibrations
- Immune to electromagnetic fields
- Flexible application
- Application adaptable



Where instrumentation technologies meet

B.3 fortgesetzt

TECHNICAL CHARACTERISTICS

	Simple unprotected patch cord (yellow)	Standard cable (gray)	Stainless steel reinforced cable (black)
Cable outer diameter	2.3 to 2.8 mm	4.65 mm	3.4 mm
Maximal length ⁽¹⁾	2'000 m	2'000 m	2'000 m
Color	Yellow	Gray	Black
Gland nut for junction box	None	PG11	PG11
Maximum tensile (pulling) force	-	Short term: 800 N	Short term: 1000 N
Minimum bending radius	30 mm	50 mm	15 mm without tensile loading 20 mm with tensile loading
Cable weight	<6 g/m	18.9 kg/km	18 kg/km
Operating temperature	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	Short term: -65°C to +160°C Long term: -40°C to +80°C
Operating hydrostatic pressure	Atmospheric pressure	1.5 MPa (15 bars)	
Conditions of use	Indoors, laboratory	Normal outdoors conditions (should be mechanically protected)	Harsh condition (no need to be mechanically protected)

⁽¹⁾ Longer lengths may be possible upon request



Simple unprotected patch cord (Yellow)



Standard cable (Gray)



Stainless steel reinforced cable (Black)

ORDERING INFORMATION

Smartec SA · Via Poblette 11, CH-6929 Manno, SWITZERLAND · Phone +41 91 610 1800 · Fax +41 91 610 1801 · smartec@smartec.ch · www.smartec.ch

All information contained herein is believed to be accurate and is subject to change without notice. © Roctest Ltd.

v. 2009/02