

# **Untersuchung des faseroptischen Messsystems „SOFO Dynamic“**

## **MASTERARBEIT**

vorgelegt zur Erlangung  
des akademischen Grades Diplom-Ingenieur  
der Studienrichtung Geomatics Science

**Martin HEIM**

**Betreuer:**

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Woschitz

**Begutachter:**

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

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



Graz, im Februar 2010

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....  
.....  
(Unterschrift)

## 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 der Präzision und Genauigkeit des faseroptischen Messsystems *SOFO Dynamic* (Hersteller *Smartec SA*, Schweiz, Teil der *Roctest Gruppe*) im Rahmen diverser Prototypentests. Dabei wurden insbesondere Experimente im Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der TU Graz durchgeführt, um Informationen für den Feldeinsatz abzuleiten.

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Ermittlung der Präzision unter Verwendung mehrerer Sensoren auf Basis verschiedener Experimente. Diese Versuche zeichnen sich durch Variation jener Parameter aus, die Indikatoren für die Lichtintensität der Sensoren sind, sowie auch durch unterschiedliche Beobachtungszeiten. Durch Frequenzanalyse der Daten und Beobachtungen des Verkehrs an der parallel zum Labor anliegenden Straße wurde festgestellt, dass die Messdaten durch die vorbeifahrenden Fahrzeuge beeinflusst werden, obwohl das Messlabor vom Gebäude entkoppelt ist. Für die Berechnung der Präzision der Messungen wird zur Eliminierung der niedrigen Frequenzen ein Hochpass-Filter und zur Unterdrückung der Fahrzeugfrequenzen ein Bandstop-Filter verwendet. Die Standardabweichungen liegen in Abhängigkeit des verwendeten Sensors und der Abtastrate zwischen 0.01 nm bei 1 Hz und 2.6 nm bei 20 kHz.

Weiters wird das Driftverhalten des Messgeräts untersucht, welches unter anderem abhängig von der Betriebstemperatur ist. Um das Aufheizverhalten des *SOFO Dynamic* Messgeräts zu analysieren wurden die Messungen im Kaltzustand des Instruments gestartet. Dabei ist ein Kurzzeit-Driften von unter 2.7  $\mu\text{m}/\text{h}$  festgestellt worden. Bei analysierten Langzeitmessungen von einer Woche wurden Driften von maximal 2.2  $\mu\text{m}$  berechnet, die sich im Vergleich zu absoluten Messungen mit dem *SOFO Static* Messgerät ergeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass die vom Hersteller *Smartec SA* angegebenen Systemeigenschaften des Geräts unter Laborbedingungen erreicht werden können und teilweise sogar besser sind. Somit kann aufgrund dieser Genauigkeitsuntersuchungen das Messsystem für den Feldeinsatz empfohlen werden, wobei noch weitere Versuche, zum Beispiel mit der Klimakammer, durchgeführt werden sollten.

## Abstract

The aim of this master thesis was to study the precision and the drift performance of the fiber optic measurement system *SOFO Dynamic* from the Swiss company *Smartec SA* (part of Roctest Group) using several prototype tests. Therefore, especially experiments in the measurement laboratory of the Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems at Graz University of Technology had to be performed to determine the qualification for field applications.

An essential part of this thesis deals with the determination of the precisions of different sensors by means of several experiments. These tests are characterized by variation of parameters which are indicators of the light intensity of the sensors and also by different measurement periods. By applying frequency analysis of the data and observing the traffic at the street closely, which is situated parallel to the laboratory, it was detected that the measurements are influenced by vehicles passing the institute building, even though the laboratory is decoupled from the structure. For the calculation of the measurement precision a highpass filter was used to eliminate low-frequencies and to prevent the frequencies of the vehicles a bandstop filter was applied. The standard deviations are in the range of 0.01 nm at 1 Hz und 2.6 nm at 20 kHz depending on the used sensor and the sampling rate.

Furthermore the drift performance of the measurement system was studied which among other effects depends on the operating temperature. To analyze the warm-up effect of the *SOFO Dynamic* instrument the measurements were started in cold condition. In this process short time-drifts of smaller than 2.7  $\mu\text{m}/\text{h}$  were observed. By analyzing the long-time measurements deviations of maximal 2.2  $\mu\text{m}$  were determined by comparing the data with absolute measurements gathered with the *SOFO Static* system.

The results show that the specifications given by the manufacturer of the *SOFO Dynamic* instrument can be achieved with laboratory conditions and are partly better. To conclude, the experiments have shown that the instrument is practical for field applications whereas more experiments for example with the climatic chamber are recommended.

## Danksagung

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich auf meinem gesamten Weg der Ausbildung emotional und finanziell unterstützt haben. Auf diesem Wege möchte ich auch meinen Geschwistern für Ihre Unterstützung jeglicher Art danken.

Weiters möchte ich mich bei meinem Betreuer Dr. Helmut Woschitz für die professionelle Unterstützung im Zuge der gesamten Masterarbeit bedanken. Durch seine wertvollen Ratschläge und die aufschlussreichen Diskussionen hat er einen großen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Hiermit soll auch allen Mitarbeitern des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme unter der Leitung von Prof. Brunner für die stets freundliche Atmosphäre und für deren Hilfsbereitschaft in allen Belangen recht herzlich gedankt werden. Besonders möchte ich Ing. Robert Presl und Ing. Rudolf Lummerstorfer danken, die mich bei meinen Versuchen im Labor des Instituts und bei sonstigen diversen Anliegen immer professionell und sehr hilfsbereit unterstützt haben.

Unter anderem möchte ich mich beim Technischen Leiter von ALDIS, Dr. Wolfgang Schulz, für die Übermittlung der kostenlosen Blitzdaten bedanken. Außerdem gilt mein Dank Dr. Inaudi von Smartec und Allen Cekorich von Optiphase für die Beantwortung meiner Fragen.

Meinen Studienkollegen Helmut Goiginger und Daniel Rieser möchte ich vielmals dafür danken, dass sie für die Arbeit als Lektoren tätig waren.

Weiterer Dank gebührt meiner Freundin Susanne, die mir sehr viel Kraft gegeben und mich immer von neuem motiviert hat.

Besonderer Dank gilt auch meinen Studienkollegen für eine tolle gemeinsame Studienzeit und die vielen unvergesslichen Erlebnisse, die wir miteinander erfahren haben.

Graz, im Februar 2010

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit .....	1
1.2	Einsatzgebiete des SOFO Dynamic Systems.....	1
1.3	Structural Health Monitoring .....	2
1.4	Überblick über die Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Einige Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
2.1	Faseroptische Sensoren.....	4
2.2	Interferometer .....	5
2.2.1	Mach-Zehnder Interferometer.....	5
2.2.2	Michelson Interferometer.....	6
<b>3</b>	<b>Beschreibung des SOFO Dynamic Systems</b> .....	<b>8</b>
3.1	SOFO Dynamic Reading Unit.....	8
3.1.1	Funktionsprinzip der SOFO Dynamic Reading Unit.....	9
3.1.2	Beschreibung der Hauptelemente der SOFO Dynamic RU.....	10
3.2	Verwendete Software des SOFO Dynamic Systems.....	11
3.2.1	Startfenster der Software.....	11
3.2.2	System Setup .....	13
3.2.3	Informationen zu den einzelnen Kanälen .....	14
3.2.4	Digital Data und Diagnostic .....	15
3.3	Hardware .....	17
3.4	SOFO Standard Deformation Sensor.....	18
<b>4</b>	<b>Am IGMS vorhandenes SOFO Dynamic System und Sensoren</b> .....	<b>20</b>
4.1	SOFO Dynamic Reading Unit - IGMS .....	20
4.2	Aufbau des Systems im Labor.....	21
4.3	Verwendete Sensoren - IGMS.....	23
4.3.1	Referenzsensor 149 .....	23
4.3.2	Sensor 5433 .....	24
4.3.3	Sensor 4277 .....	24
4.3.4	Sensor 2358 .....	25
4.3.5	Sensor 4275 .....	25

<b>5</b>	<b>Auswertung und Analyse.....</b>	<b>26</b>
5.1	Vorprozessierung der Daten.....	26
5.1.1	Einlesen der Daten .....	26
5.1.2	Konvertierung der Daten und Datenformat.....	27
5.2	Filterung.....	28
5.2.1	Hochpass-Filterung.....	28
5.2.2	Bandstop-Filterung .....	29
5.2.3	Datenreduktion .....	32
5.3	Ausreißerdetektion mit robustem Schätzer.....	32
5.4	Phasensprungbereinigung.....	33
<b>6</b>	<b>Planung und Überblick der Experimente .....</b>	<b>35</b>
6.1	Planung eines Experiments.....	35
6.2	Durchführung und Überblick.....	36
<b>7</b>	<b>Untersuchungen zur Präzision.....</b>	<b>39</b>
7.1	Unterschiedliche Abtastraten <i>fs</i> .....	39
7.2	Referenzsensor 149 auf allen 4 Kanälen .....	42
7.3	Tausch der Sensoren .....	44
7.3.1	Tausch aller 4 Sensoren.....	44
7.3.2	Tausch der Sensoren mit Referenzsensor auf Kanal 1 .....	46
7.4	Signalstärke.....	48
7.5	Langzeitmessungen .....	50
7.5.1	Langzeitmessung mit SOFO Dynamic und Wyler Neigungssensor.....	50
7.5.2	Detektion des Verkehrs durch SOFO Dynamic Messung.....	53
<b>8</b>	<b>Driftverhalten .....</b>	<b>57</b>
8.1	Aufheizverhalten des SOFO Dynamic .....	57
8.2	Langzeitdrift .....	59
8.3	SOFO Static vs. Dynamic .....	61
8.3.1	Vergleich der Langzeitmessung mit SOFO Static.....	61
8.3.2	Absolute Bewegung der Komparatorbank von Mai – November 2009 ...	64
8.4	Sinusähnliche Schwingungen.....	65
<b>9</b>	<b>Untersuchung der Messzeitlänge .....</b>	<b>66</b>
9.1	Watchdog-Zeiten .....	66
9.2	Untersuchung der Messfrequenz.....	67

<b>10 Weitere Untersuchungen .....</b>	<b>69</b>
10.1 Sprung des Levels auf Null.....	69
10.2 Phasensprünge .....	71
10.2.1 Problemerkklärung .....	71
10.2.2 Phasensprunguntersuchung.....	72
<b>11 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>76</b>
11.1 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	76
11.2 Weitere Untersuchungen und Ausblick .....	77
<b>Referenzen .....</b>	<b>78</b>
<b>Anhang A: Ausschreibung der Masterarbeit.....</b>	<b>80</b>
<b>Anhang B: Verwendetes Zusatzinstrumentarium.....</b>	<b>81</b>
<b>Anhang C: Untersuchungen zur Präzision.....</b>	<b>86</b>
<b>Anhang D: Langzeitmessung .....</b>	<b>88</b>
<b>Anhang E: Smartec Datenblätter.....</b>	<b>90</b>



---

## Abkürzungsverzeichnis

ALDIS	Austrian Lightning Detection and Information System
BTZ	Bautechnikzentrum, TU Graz
CSV	Comma Separated Values
DL	Deformationslänge eines SOFO Sensors
DSP	Digital Signal Processor
FOS	Faseroptischer Sensor
IGMS	Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz
IIR	Infinite Impulse Response
LA	Länge der aktiven Zone des SOFO Sensors
LED	Leuchtdiode
LP	Länge der passiven Zone des SOFO Sensors
MAD	Median Absolute Deviation
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
OPD	Optical Phase Demodulator
RMS	Root Mean Square
RU	Reading Unit
SHM	Structural Health Monitoring
SOFO	Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques
STD	Standardabweichung
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit

Neben der traditionellen Erfassung von Deformationen mittels geodätischer Messmethoden hat das *Structural Health Monitoring* (SHM), das in Abschnitt 1.3 genauer erläutert wird, zunehmend an Bedeutung gewonnen. Beim SHM werden unter anderem faseroptische Sensoren wegen ihrer exzellenten Langzeitstabilität und Immunität gegen elektromagnetische Störungen verwendet. Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) beschäftigt sich seit einigen Jahren intensiv mit faseroptischer Messtechnik. Ein am IGMS vorhandenes Instrument, das derzeit im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes im Geo-Monitoringbereich (Brunner et. al., 2007) verwendet wird, ist das *SOFO Dynamic* System der Firma *Smartec SA* (Manno, Schweiz), mit dem Deformationsmessungen mit faseroptischen Sensoren durchgeführt werden können.

In dieser Masterarbeit wird das faseroptische Messsystem im Rahmen diverser Prototypentests untersucht. Ziel ist es Systemeigenschaften abzuleiten (siehe auch Anhang A). Hierfür werden Experimente im Messlabor des IGMS durchgeführt, um die Tauglichkeit für den Feldeinsatz zu überprüfen, da das Instrument ursprünglich für den Einsatz zum Beispiel in Gebäuden entwickelt wurde (siehe Abschnitt 1.2). Besondere Merkmale sind die hohe Messauflösung des Instruments im Nanometerbereich und die hohe Abtastfrequenz von bis zu 20 kHz. Die Prototypentests umfassen beispielsweise Untersuchungen zur Linearität, Hysterese, dem Driftverhalten, der Präzision und Genauigkeit. Neben Tests zum statischen Verhalten sollten aber auch Tests zum dynamischen Verhalten durchgeführt werden.

## 1.2 Einsatzgebiete des SOFO Dynamic Systems

Seit der Einführung des *SOFO Dynamic* Systems im Jahre 2004 stiegen auch die Einsatzgebiete jährlich an. Im Folgenden soll ein kleiner Einblick in verschiedenste Gebiete gegeben werden. Mit dem *SOFO Dynamic* können Messungen von dynamischen Deformationen gemacht werden. Hierzu zählen vor allem Anwendungen im Bauingenieurwesen, wo Deformationen von Gebäuden oder Brücken gemessen werden, die unter dynamischer Belastung stehen (Del Grosso et al., 2005). Als Beispiele dazu sind der Verkehr, der Wind oder die Seismik zu nennen. Weitere Anwendungen können im Anhang E.1 nachgesehen werden.

### 1.3 Structural Health Monitoring

Unter SHM wird die Überwachung der Struktur eines Bauwerks verstanden, wobei unter dem Begriff „Bauwerk“ zum Beispiel auch Fahr-, Flugzeuge oder unterschiedlichste Maschinen gemeint sind. Wenn ein SHM System in Analogie zum Menschen erklärt wird, dann entspricht das Gehirn der zentralen Recheinheit des Systems (Glišić & Inaudi, 2007, Kapitel 1). Dort führen alle Daten von den eingebauten Sensoren zusammen, wobei die Sensoren wiederum mit dem Nervensystem eines Menschen vergleichbar sind. Aufgabe des SHM ist es, den Zustand einer Konstruktion oder deren Materialien, die es bilden, möglichst kontinuierlich zu diagnostizieren. Es kann bei Verletzungen an ein „Gehirn“ melden, welches die erhaltenen Daten nicht nur speichert, sondern auch interpretiert und darauf reagiert. Abbildung 1.1 stellt diesen Vergleich mit dem Menschen dar. Dort wird zum Beispiel ein Flugzeug als „Struktur“ gezeigt. Zwei große Anwendungsgebiete sind im Bauingenieurwesen und der Flugzeugindustrie vorzufinden.



Abbildung 1.1: SHM verglichen mit dem menschlichen Körper<sup>1</sup>

Measures (2001, Kapitel 2) gibt einen guten Überblick, wo auf die Herausforderungen und Probleme in verschiedensten Disziplinen, wie zum Beispiel im Bauingenieurwesen oder der Luftfahrtindustrie, in Bezug auf SHM eingegangen wird. Weiters schreibt er über die Gründe, warum SHM in verschiedensten Bereichen von Vorteil ist.

---

<sup>1</sup> Quelle: EADS N.V.  
unter <http://www.eads.net/1024/de/madebyeads/endurance/shm.html> (03/2009)

## 1.4 Überblick über die Arbeit

In Kapitel 2 wird auf die Grundlagen der faseroptischen Sensoren und auf den theoretischen Hintergrund des beim *SOFO Dynamic* verwendeten Messprinzips, der Interferometrie, eingegangen. In Kapitel 3 wird das Mess- und Funktionsprinzip des *SOFO Dynamic* Messgeräts erklärt. Weiters wird die verwendete Soft- und Hardware beziehungsweise ein *SOFO Standard Sensor* näher erläutert.

Kapitel 4 gibt einen Überblick über den Aufbau des Systems im Messlabor des IGMS und eine detailliertere Beschreibung der verwendeten Sensoren. Wie die Auswertung und die Analyse der Messdaten gehandhabt werden, ist in Kapitel 5 ausführlich nachzulesen.

In Kapitel 6 wird ein Überblick über die verschiedenen Untersuchungen und Versuche gegeben, die durchgeführt worden sind. Diese werden in den Hauptteilen in Kapitel 7 und Kapitel 8 beschrieben, wo die ermittelte Präzision des Geräts und das Driftverhalten untersucht wurden.

Untersuchungen zur Messzeitlänge des *SOFO Dynamic* Messgeräts werden in Kapitel 9 erläutert. In Kapitel 10 werden weitere Untersuchungen wie zum Beispiel zu den Phasensprüngen beschrieben. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick gibt Kapitel 11. Im Anhang A können die offizielle Ausschreibung der Masterarbeit beziehungsweise in Anhang B Beschreibungen zu den verwendeten Zusatzinstrumenten gefunden werden. Anhang C – Anhang D enthält weitere Informationen zu den Versuchen. Die Datenblätter von den Smartec *SOFO* Messgeräten können in Anhang E gelesen werden.

## 2 Einige Grundlagen

### 2.1 Faseroptische Sensoren

In der Faseroptik wird die Glasfaser als Fortpflanzungsmedium und Lichtwellen als Trägerwelle verwendet. Nach Thyagarajan & Ghatak (2007, Kapitel 4) konnte mit einer haardünnen optischen Faser erstmals im Jahr 2001 ein Terabit pro Sekunde gesendet werden, was mit 15 Millionen gleichzeitig stattfindenden Telefongesprächen verglichen werden kann. Dieses Beispiel zeigt, wie extrem wichtig diese technologische Errungenschaft des 20. Jahrhunderts ist.

Es gibt mehrere gute Argumente, warum die optischen Fasern aus Glas gemacht werden. Im Folgenden werden aus Thyagarajan & Ghatak (2007) die wichtigsten Gründe für die Wahl von Glas erläutert:

- Im Gegensatz zu Materialien wie Wasser oder Metalle, die flüssig sind bis sie auf eine Erstarrungstemperatur abgekühlt und dann plötzlich fest werden, wird Glas nicht bei einer diskreten Temperatur fest, sondern es wird langsam härter und härter. In der Übergangsregion kann Glas leicht in eine dünne Faser gezogen werden.
- Reinstes Quarz hat die Eigenschaft, dass es extrem wenig Verlust beispielsweise bei der Datenübertragung aufweist. Zum Beispiel werden von den am höchsten kommerzialisiertesten und erhältlichen Quarzglasfasern 96% der Leistung immer noch weitergeleitet, wenn schon 1 km in der optischen Faser durchlaufen wurde.

Nach Balageas et al. (2006, Kapitel 3) startete die faseroptische Technologie in den 1970er Jahren im Bereich der Langdistanz-Telekommunikation und hat seitdem ein unglaubliches Wachstum vorzuweisen. Sensoranwendungen sind ein kleiner *Spin-off* dieser Technologie und profitieren von den Entwicklungen in den optoelektronischen Komponenten und Konzepten. Die Verwendung von optischen Fasern bietet dieselben Vorteile wie in der Kommunikation, und zwar niedrigere Kosten, kleinere Größen, Robustheit, höhere Genauigkeit, größere Flexibilität mit multifunktionalen Einsatzmöglichkeiten, ein großer Bereich der Sensormesslängen und höhere Zuverlässigkeit. Thyagarajan & Ghatak (2007, Kapitel 14) schreibt, dass verglichen mit konventionellen Sensoren, faseroptische Sensoren (FOS) immun gegen externe elektromagnetische Störungen sind und daher auch in gefährlichen und explosiven Umgebungen installiert werden können. Glišić & Inaudi (2007, Seite 21 ff) teilen die FOS in drei große Gruppen ein, nämlich in Punktsensoren, Langarmigen-Messsensoren und in verteilte Sensoren. Die Gruppe der SOFO Sensoren gehören dabei den Langarmigen-Messsensoren an. Die Verwendung von FOS macht es

möglich externe Parameter wie zum Beispiel Dehnungen, Druck, Temperatur, Beschleunigung, chemische und biologische Parameter mit größerer Präzision und Schnelligkeit zu messen.

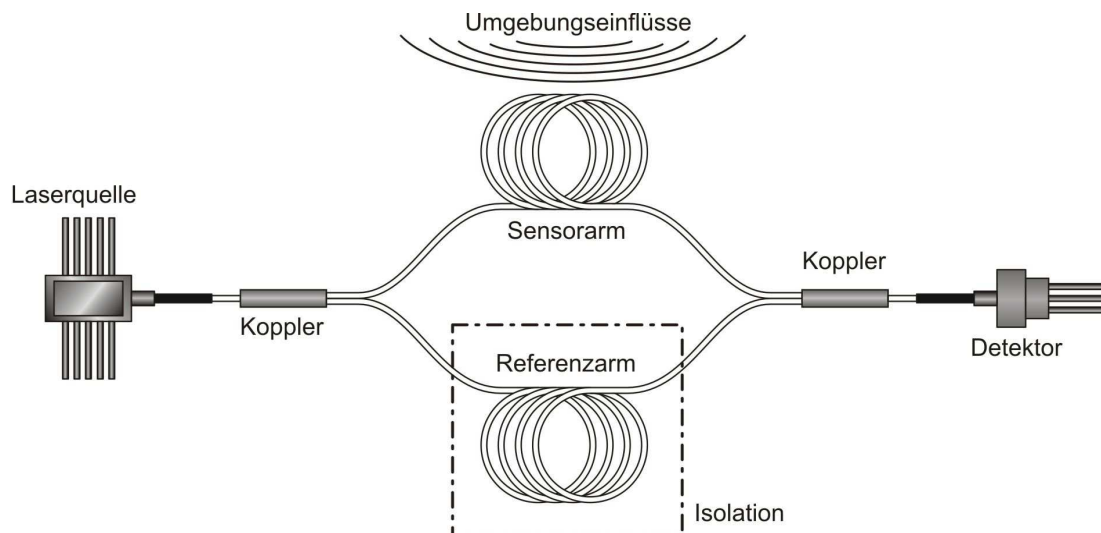
Diese Vorteile führen zu einer gesteigerten Integration von solchen faseroptischen Sensoren in zivilen Bauwerken wie Brücken oder Tunnel, in der Prozessindustrie, bei medizinischen Instrumenten, Flugzeugen, Raketen oder Flugkörpern und sogar in Autos. Glišić & Inaudi (2007, Kapitel 5) gibt mehrere Beispiele zu praktischen Anwendungen.

## 2.2 Interferometer

Die Interferometrie ist eine der genauesten Labortechniken für präzise Distanzmessungen (Balageas et al., 2006, Seite 232). In den folgenden zwei Abschnitten wird das Prinzip von Mach-Zehnder und Michelson-Interferometer näher erläutert, die das Kernstück der faseroptischen Längenmessung in dem später untersuchten *SOFO Dynamic* Gerät bilden. Für den interessierten Leser wird Rogers (2001, Kapitel 3.3) empfohlen, der die Grundlagen der Interferometrie behandelt, beziehungsweise Measures (2001, Kapitel 3.4 ff), der die Funktionsweisen verschiedener Interferometer beschreibt.

### 2.2.1 Mach-Zehnder Interferometer

Eine der höchst sensiblen Anwendungen für FOS ist der Mach-Zehnder Interferometer (MZI) Sensor. Das schematische Prinzip ist in Abbildung 2.1 dargestellt und im Folgenden nach Thyagarajan & Ghatak (2007, Seite 229 ff) erklärt. Ein kontinuierliches monochromatisches Licht kommt von einem Laser und wird durch einen faseroptischen Koppler in zwei Faserarme aufgeteilt. Einer der Arme ist der Referenzarm, welcher isoliert von externen Einflüssen gehalten wird. Der andere Arm ist der Messarm. Hier ist der Sensor direkt mit den äußeren Einflüssen in Berührung, die gemessen werden sollen. Nach dem Gang durch die zwei Arme werden die Lichtstrahlen wieder im zweiten Koppler vereint, wo das Licht interferiert. Danach wird das Signal durch einen Detektor erfasst. Das Ausgangslicht, das auf den Detektor fällt, ist abhängig von der Phasendifferenz, die zwischen den zwei Faserarmen durch die Laufzeitdifferenz entsteht.



**Abbildung 2.1: Schematisches Prinzip eines Mach-Zehnder Interferometers (Presl, 2009, nach Thyagarajan & Ghatak, 2007, Seite 230)**

Jeder externe Parameter, wie Temperatur oder Druck, beeinflusst die Messfaser, wodurch zum Beispiel der Brechungsindex oder die Länge des Arms verändert wird. Die im Interferometer entstehende Phasendifferenz wird somit ausschließlich durch den Einfluss auf den Sensorarm bestimmt. Das MZI ist extrem empfindlich auf äußere Einflüsse. Unter anderem werden solche MZI Sensoren als Hydrophone für Unterwasser-Klangdetektionen in Marine-Anwendungen verwendet, um gegenwärtige U-Boote zu detektieren. Weitere Details werden in Peng & Chu (2002, Kapitel 9) gegeben. Nach Thyagarajan & Ghatak (2007) können MZI Sensoren für die Detektion verschiedenster physikalischer Parameter eingesetzt werden, wie zum Beispiel Temperatur, Deformation oder das Magnetfeld, die Veränderungen in der Phase vom ausbreitenden Lichtstrahl verursachen können.

## 2.2.2 Michelson Interferometer

Das Prinzip eines Michelson Interferometers ist dem des MZI ähnlich. Auch hier wird Licht (z.B. hochkohärentes Laserlicht) durch einen faseroptischen Koppler gesendet, das auf eine Mess- und Referenzfaser aufgeteilt wird. Im Gegensatz zum MZI wird das Licht am Ende der beiden Fasern zurückreflektiert, im Koppler wiedervereint und zur Auswertung zu einem Photodetektor gesendet. Das schematische Prinzip eines Michelson Interferometers wird zur Veranschaulichung in Abbildung 2.2 dargestellt. Das Michelson Interferometer wird nach diesem Schema beim SOFO System als Sensor Interferometer verwendet. Dies wird in Abschnitt 3.1.1 näher erläutert, wo das Funktionsprinzip des SOFO Dynamic Messgeräts beschrieben wird.

Die „spektrale Reinheit“ einer Lichtquelle ist mit ihrer „Kohärenzlänge“ in Beziehung, oder anders ausgedrückt, die maximale Differenz in der Weglänge zwischen den zwei Armen des Interferometers, die immer noch sichtbare Interferenz produziert. Die Kohärenzlänge beträgt mehrere Meter für eine Laserquelle, aber nur circa 50  $\mu\text{m}$

für eine typische LED mit einer zentralen Wellenlänge von 1550 nm und einer Spektralweite von 40 nm (Balageas et al., 2006, Seite 233). Die Kohärenz beziehungsweise deren Länge ist also ausschlaggebend für das Auftreten von Interferenzen zwischen zwei Lichtstrahlen. In Measures (2001, Seite 480 ff) wird erklärt, wie Interferenzerscheinungen nach dem Prinzip der Michelson-Interferometrie mit niederkohärentem Licht zustande kommen. Durch Verwendung von niederkohärentem Licht besteht der Vorteil, dass Absolutmessungen durchgeführt werden können (Inaudi et al., 1994). Der Nachteil ist, dass der Messbereich, indem Interferenzerscheinungen auftreten, sehr klein ist. Dies kann aber durch eine Tandemkonfiguration, wie sie beim *SOFO Static System* angewendet wird, umgangen werden (Measures, 2001, Seiten 482-483).

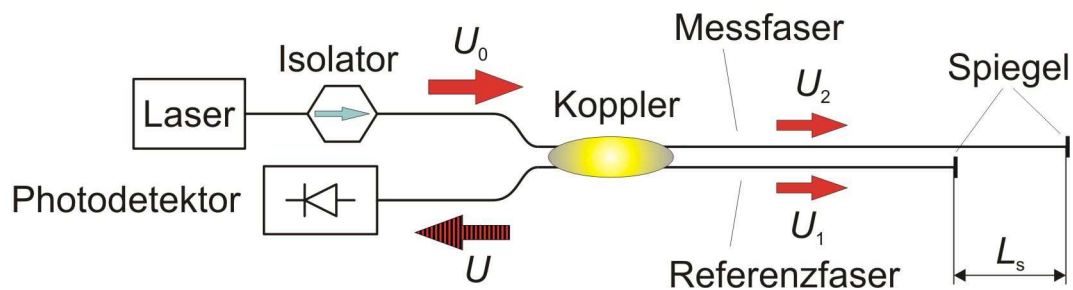


Abbildung 2.2: Schematisches Prinzip eines Michelson-Interferometers (Presl, 2009, nach Balageas et al., 2006, Seite 234)



### 3 Beschreibung des SOFO Dynamic Systems

Die Typbezeichnung des zu untersuchenden Messgeräts ist *SOFO Dynamic*, wobei *SOFO* ein Akronym ist. Die Abkürzung kommt aus dem französischen und steht für „surveillance d' ouvrages par fibres optiques“. Nach Glišić & Inaudi (2007, Kapitel 2) heißt das übersetzt so viel wie „Bauwerksüberwachung mit Faser-Optik“. Der Anfang wurde mit dem *SOFO Static System* (siehe Anhang B.1) gemacht, das im Rahmen der Dissertation von Inaudi (1997) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) entwickelt und durch die Firma *Smartec SA* (Manno, Schweiz) kommerzialisiert wurde, welche Teil der *Roctest Gruppe* (Kanada) ist. Um auch hochfrequente dynamische Messungen durchführen zu können wurde das *SOFO Dynamic* Messgerät, welches in Inaudi & Glišić (2004) beschrieben wird, wiederum von der Firma *Smartec SA* entwickelt. In den folgenden Abschnitten wird das Funktionsprinzip und die Hard- bzw. Software dieses *SOFO Dynamic Systems* im Detail beschrieben.

#### 3.1 SOFO Dynamic Reading Unit

Das Messgerät selbst wird vom Hersteller *Smartec SA* als *SOFO Dynamic Reading Unit* (RU) bezeichnet und ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Für dieses Messinstrument wird vom Hersteller eine Standardabtastrate von 1 kHz angegeben und es kann bis zu einer Abtastrate von 10 kHz gemessen werden. Bei den Versuchen wurde bis zu 20 kHz gemessen. Der Grund dafür ist erstens, dass es auch mit dieser Abtastfrequenz möglich ist zu messen und zweitens um die Eigenschaften zu untersuchen (siehe Abschnitt 7.1). Eine *SOFO Dynamic RU* hat acht Kanaleingänge, somit können bis zu acht Sensoren gleichzeitig angeschlossen werden.



Abbildung 3.1: SOFO Dynamic Reading Unit (siehe Anhang E.1)

### 3.1.1 Funktionsprinzip der SOFO Dynamic Reading Unit

Das *SOFO Dynamic* System basiert auf einer interferometrischen Demodulation. In Abbildung 3.2 wird das Schema des *SOFO Dynamic* Systems dargestellt. Durch eine kohärenzkollabierte Laserdiode, die mit 1550 nm (siehe Anhang E.1) operiert und eine Kohärenzlänge von 10 mm (Inaudi & Glišić, 2004) hat, wird Licht in den passiven Teil des Sensors (siehe Abschnitt 3.4) über einen Koppler gesendet.

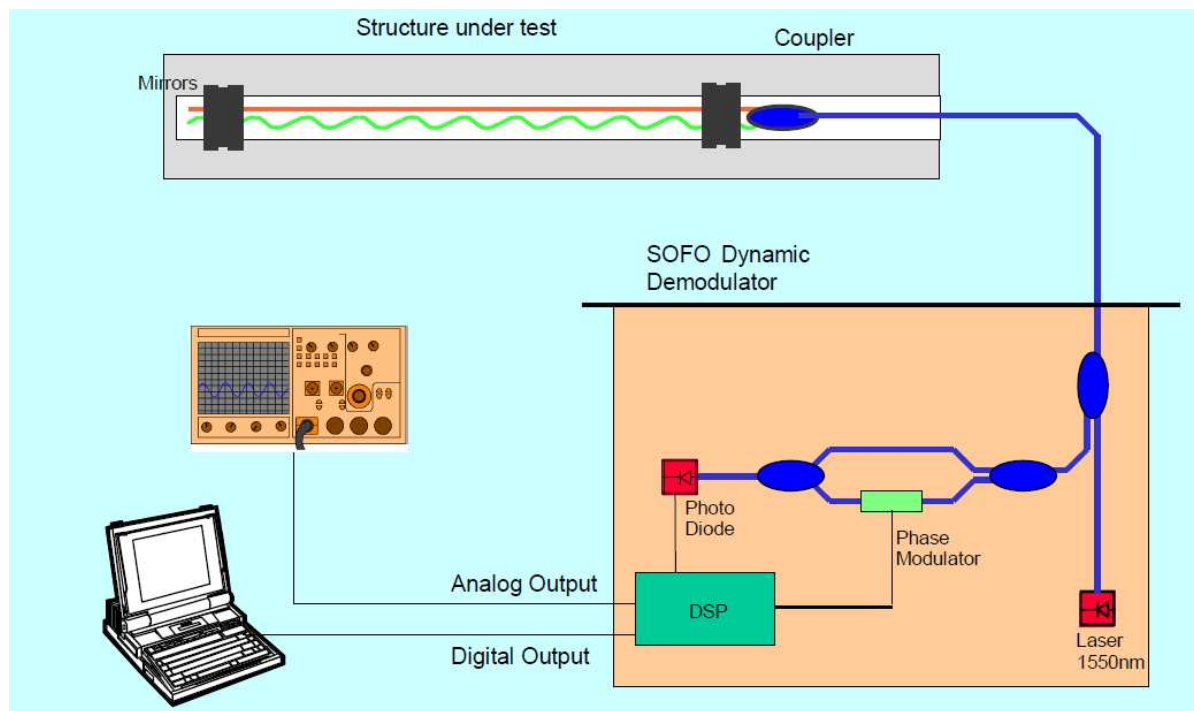


Abbildung 3.2: Schema des SOFO Dynamic Systems (siehe Anhang E.1)

Als nächstes wird das Licht zum SOFO Sensor weitergeleitet und dort nach dem Prinzip eines faseroptischen Michelson-Interferometers (siehe Abschnitt 2.2.2) in zwei Fasern, nämlich der Referenzfaser und der Messfaser (siehe Abschnitt 3.4) aufgeteilt. Das in den Sensorarmen gespiegelte Signal wird reflektiert, im Koppler wiedervereint und in den *SOFO Dynamic Demodulator* gesendet (Inaudi & Glišić, 2004). Dort wird es durch ein MZI (siehe Abschnitt 2.2.1), das als Demodulationsinterferometer verwendet wird, mit einem aktiven Phasenmodulator demoduliert. Der *Phase Modulator* (die Hauptelemente werden in Abschnitt 3.1.2 erläutert) wird mit einer Frequenz von circa 50 kHz betrieben, wodurch im Sensorarm des MZI eine Phasenänderung erzeugt wird. Schlussendlich wird das erzeugte Interferenzmuster durch Wiedervereinigung des optischen Signals von Sensor- und Referenzarm des MZI in einer Photodiode aufgenommen und digitalisiert.

Für die Analyse der resultierenden Interferenzmuster wird ein *DSP (Digital Signal Processing) board* – OPD-4000 der Firma *Optiphase* (Kalifornien, USA) verwendet, wo die Phasenmodulation in eine Längenänderung konvertiert wird. Die resultierende Deformation kann entweder über den analogen Ausgang oder dem digitalen USB-

Ausgang ausgelesen werden, wo die Daten direkt an einem PC abgespeichert und zur weiteren Datenanalyse verwendet werden.

Im Unterschied zum *SOFO Static System* (siehe Anhang B.1) sind die Messungen relativ, was so viel heißt, dass der Nullpunkt verloren geht, falls zum Beispiel das Gerät zwischenzeitlich ausgeschaltet wird. In Tabelle 3-1 werden die technischen Spezifikationen der *SOFO Dynamic RU* aufgelistet (siehe Anhang E.1).

**Tabelle 3-1: Technische Charakteristiken der SOFO Dynamic RU (siehe Anhang E.1)**

<b>Bandbreite:</b>	0 bis 10 kHz
<b>Messbereich:</b>	± 5 mm (maximale Deformation)
<b>Dehnungsrate:</b>	± 10'000 µm/s (maximale Deformationsgeschwindigkeit)
<b>Sensor Path Unbalance:</b>	38 mm ± 5 mm ("DL" Wert)
<b>Auflösung:</b>	0.01 µm
<b>Drift:</b>	< 0.003 µm / s (nach 1 h Aufwärmzeit) < 0.5 µm / Tag mit Verwendung der Driftkompensation (reduziert die Anzahl der Kanäle auf 7)
<b>Anzahl der Kanäle:</b>	8 pro Modul, simultane Akquisition
<b>Digitales Auslesen:</b>	USB 2.0, bis zu 10 kHz Aktualisierungsrate, 32 bits
<b>Analoger Ausgang:</b>	8 Kanäle, 10 kHz Aktualisierungsrate, 20 bits

### 3.1.2 Beschreibung der Hauptelemente der SOFO Dynamic RU

#### Laserdiode

Nach Thyagarajan & Ghatak (2007, Seite 102) verwenden die Laserdioden Halbleiter als laserendes Medium und sind durch spezielle Vorteile wie zum Beispiel die kleine Größe, niedrige Kosten und die gute Kompatibilität mit optischen Fasern charakterisiert. Bei der *SOFO Dynamic RU* operiert die Laserdiode mit 1550 nm und einer Kohärenzlänge von 10 mm.

#### Koppler

Ein Koppler ist nach Thyagarajan & Ghatak (2007, Seite 189 ff) nötig um das Signal in zwei Teile aufzuteilen, sodass das gleiche Signal zwei Ziele erreichen kann. Dieser Koppler ist im Wesentlichen nichts anderes als ein faseroptischer Lichtteiler und einer der wichtigsten faseroptischen Komponenten. Meist werden, wie auch bei der *SOFO Dynamic RU*, 3 dB Koppler verwendet, da diese das Licht in die Hälfte, also in zweimal 50% der Lichtintensität teilen.

#### Photodetektor

Der primäre Zweck eines Photodetektors ist die Umwandlung von faseroptischem Signal in ein elektrisches Signal für die Weiterverwendung. So wie Laserdioden basieren auch Photodetektoren in der Faseroptik auf Halbleitertechnologie. Detektoren für die optische Kommunikation basieren auf die Halbleiterverbindung Indium Gallium Arsenide (InGaAs) und arbeiten mit Wellenlängen von 1310 nm bis 1550 nm.

Deswegen wird auch ein Laser mit 1550 nm verwendet, weil der InGaAs Photodetektor bei dieser Wellenlänge die größte *responsivity* hat, was übersetzt so viel wie Ansprechempfindlichkeit bedeutet. Weitere Details können in Thyagarajan & Ghatak (2007, Seite 112 ff) nachgelesen werden.

### Digital Signal Processor (DSP) und Phasenmodulator

Ein DSP ist im Prinzip ein Mikrocontroller, der auf Grund seiner Hardwarearchitektur für die schnelle Prozessierung digitaler Signale beziehungsweise Signalfolgen optimiert ist. Der *Phase Modulator* im *SOFO Dynamic Demodulator* (siehe Abbildung 3.2) dient zur Demodulation der Interferenzmuster. Das Prinzip kann folgendermaßen erklärt werden. Wird statt dem Sensorarm, der als passiver Aufnehmer agiert, ein Körper verwendet, dessen Durchmesser sich aktiv steuern lässt, dann können gezielt Interferenzen erzeugt werden. Zum Beispiel könnte dieser Körper ein Zylinder aus piezoelektrischem Material sein, der sich solange dehnt bis das Licht dieselbe Zeit benötigt wie das im Referenzarm (Presl, 2009). Für weitere Informationen wird auf den Hersteller *Optiphase*<sup>1</sup> (Kalifornien, USA) verwiesen.

## 3.2 Verwendete Software des SOFO Dynamic Systems

Im Folgenden wird die verwendete Software der Firma *Optiphase* (Kalifornien, USA) näher erläutert und im Besonderen auf die wichtigsten Teile eingegangen, die bei den Messungen verwendet wurden. Für eine detailliertere Beschreibung von bestimmten Funktionen und Einstellungen in der Software wird das Handbuch (*Optiphase, User Manual, 2007*) empfohlen, das kostenlos heruntergeladen werden kann. Weiters muss noch erwähnt werden, dass sich das Softwareprogramm nach dem Start der Messung nur über den *Windows Taskmanager* beenden lässt, falls ein Abbruch erwünscht ist.

### 3.2.1 Startfenster der Software

Der gezeigte *Screenshot* in Abbildung 3.3 wird nach dem Start des Programms als erstes angezeigt. Dort wird ein Überblick über den Status des Systems gegeben. Wenn das Programm startet, wird die Hardware (siehe Abschnitt 3.3) des *SOFO Dynamic Systems* automatisch gescannt, um die richtige Anzahl der Demodulationskarten im System zu installieren. Dies entspricht auch der Kanalanzahl, die am Bildschirm angezeigt wird. Wenn die Anzahl der demodulierten Karten geändert wird, sollte das *Demodulation System* heruntergefahren und die Software nochmals gestartet werden. Die Werte der Statusanzeige werden in einem regelmäßigen Intervall von circa 1 Sekunde während der Ausführung des Programms automatisch aktualisiert.

---

<sup>1</sup> [http://www.optiphase.com/data\\_sheets/opd-4000datasheetrevd.pdf](http://www.optiphase.com/data_sheets/opd-4000datasheetrevd.pdf) (01/2010)

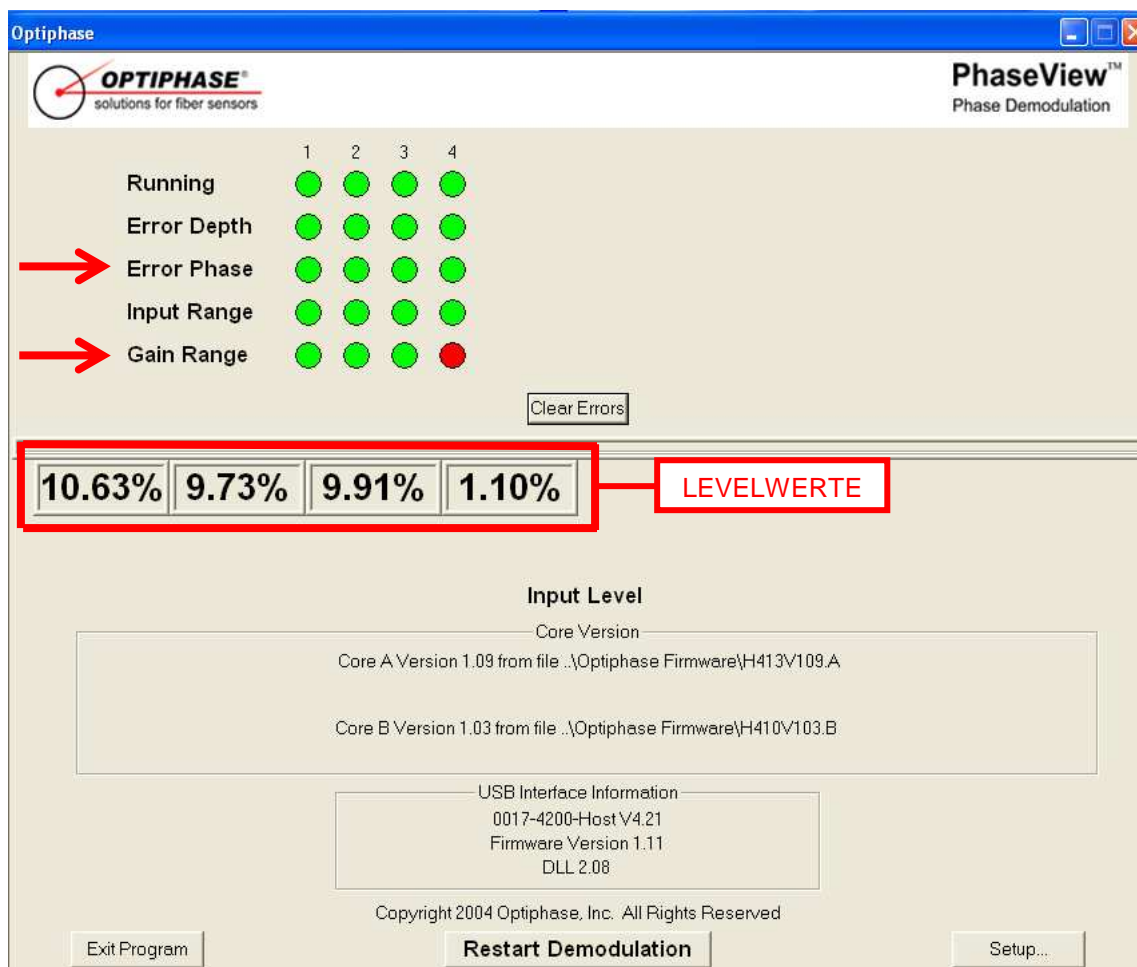


Abbildung 3.3: Screenshot der verwendeten Software - Startseite

Im Vorhinein soll behandelt werden, was der *Level*, der für jeden Kanal in Abbildung 3.3 angezeigt wird, und der *Gainwert* (siehe Abschnitt 3.2.3) bedeuten. Allerdings sind diese zwei Qualitätsparameter nicht dokumentiert, weshalb das folgende eine gewisse Unsicherheit mit sich bringt.

Je abgeschwächer das Signal zum Photodetektor zurückkommt, desto mehr muss es verstärkt werden. Somit steigt der Gain. Dieser Wert liegt zwischen 15% und 100%, wobei sich der Gain für gute Signale üblicherweise zwischen 20% und 40% befindet. Wird die Faser zum Beispiel gekrümmt oder es wird ein schlechter Sensor verwendet, dann muss der Photodetektor noch mehr nachgeregelt werden und der Gain steigt bis zu seinem Maximalwert von 100%. Ab diesen 100% kann nicht mehr nachgeregelt werden, somit folgt, dass der *Level* von seinem Normalwert 10% bis zum Minimum von nahe 0% sinkt, wenn das Signal immer schlechter wird.

Die Anzeige im oberen Bereich des *Screenshots* visualisiert, ob Fehler aufgetreten sind, oder ob der *Gain* im Gültigkeitsbereich ist. Das heißt, falls in der Zeile des *Gain Range* ein roter Punkt aufscheint, hat der *Gain* den Wert von 100 % erreicht. Dasselbe gilt für den *Error Phase*. Falls rot angezeigt wird gibt es einen Phasenfehler (siehe Abschnitt 5.4 und 10.2). Die Fehleranzeigen können zu Messbeginn aber

durch den Button *Clear Errors* beziehungsweise durch *Restart Demodulation* wieder in den grünen Bereich gebracht werden.

Auf dem *Screenshot* in Abbildung 3.3 wird auch der Bereich *Input Level* gezeigt. Dort wird angegeben welche Softwareversion in Verwendung ist. Weiters sind noch Informationen zum USB-Interface vorhanden, die uns hier aber nicht weiter beschäftigen sollen. Geht der Anwender jetzt zum Button *Setup*, öffnet sich ein Fenster, das in Abbildung 3.4 zu sehen ist.

### 3.2.2 System Setup

In der Registerkarte *System Setup* in Abbildung 3.4 ist für die Versuche vor allem von Wichtigkeit, mit welcher Frequenz die Messung ausgeführt werden soll. Dabei wurde die Einstellung unter *Frequency* immer auf den *Defaultwert* von 20 kHz belassen und die gewünschte Hertzanzahl über den *Digital Average* eingestellt.

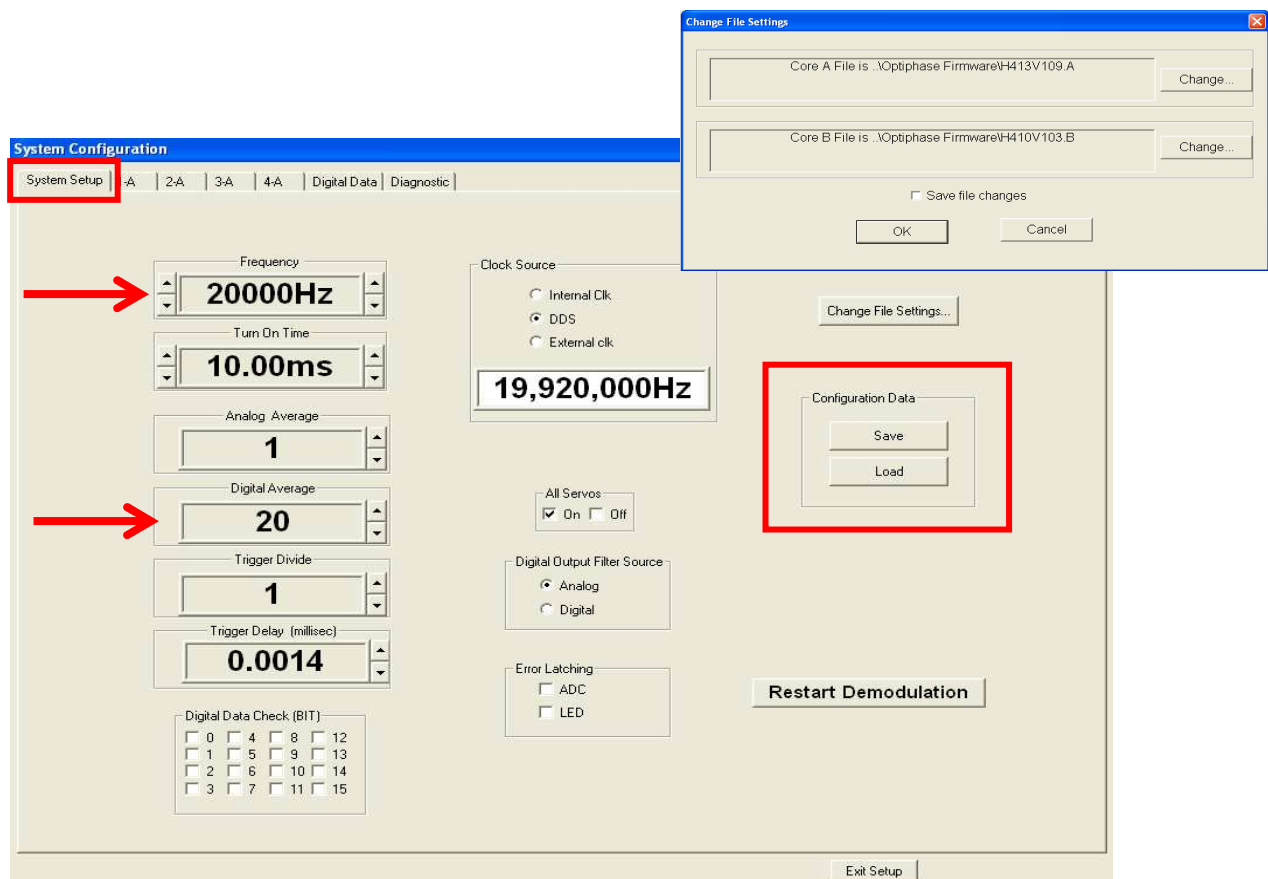


Abbildung 3.4: Screenshot der verwendeten Software – System Setup

Unter dem Feld *Configuration Data* kann eine bestimmte Einstellung gespeichert oder eine schon vorhandene geladen werden.

Die *Demodulation boards* (OPD-4000) brauchen zwei *onboard Digital Signal Processors* (DSP), einen für die Signalextraktion und den anderen für Kommunikationsaufgaben. Die zwei DSP's werden als Core A und Core B bezeichnet. Dabei

muss jedes DSP sein Softwareprogramm vom externen *Interface Bus* laden, bevor die Operation begonnen werden kann.

### 3.2.3 Informationen zu den einzelnen Kanälen

Beim Klick auf die nächsten vier Registerkarten, die mit 1-A bis 4-A bezeichnet sind (Abbildung 3.5, links oben), werden Informationen zu den Parametern der Messung visualisiert. Als Beispiel wird der *Screenshot* von Kanal 1 angeführt, der in Abbildung 3.5 dargestellt wird. Dabei sind der *Gain* und *Level* im Bereich des *Input Level* am wichtigsten (siehe Erklärung in Abschnitt 3.2.1).

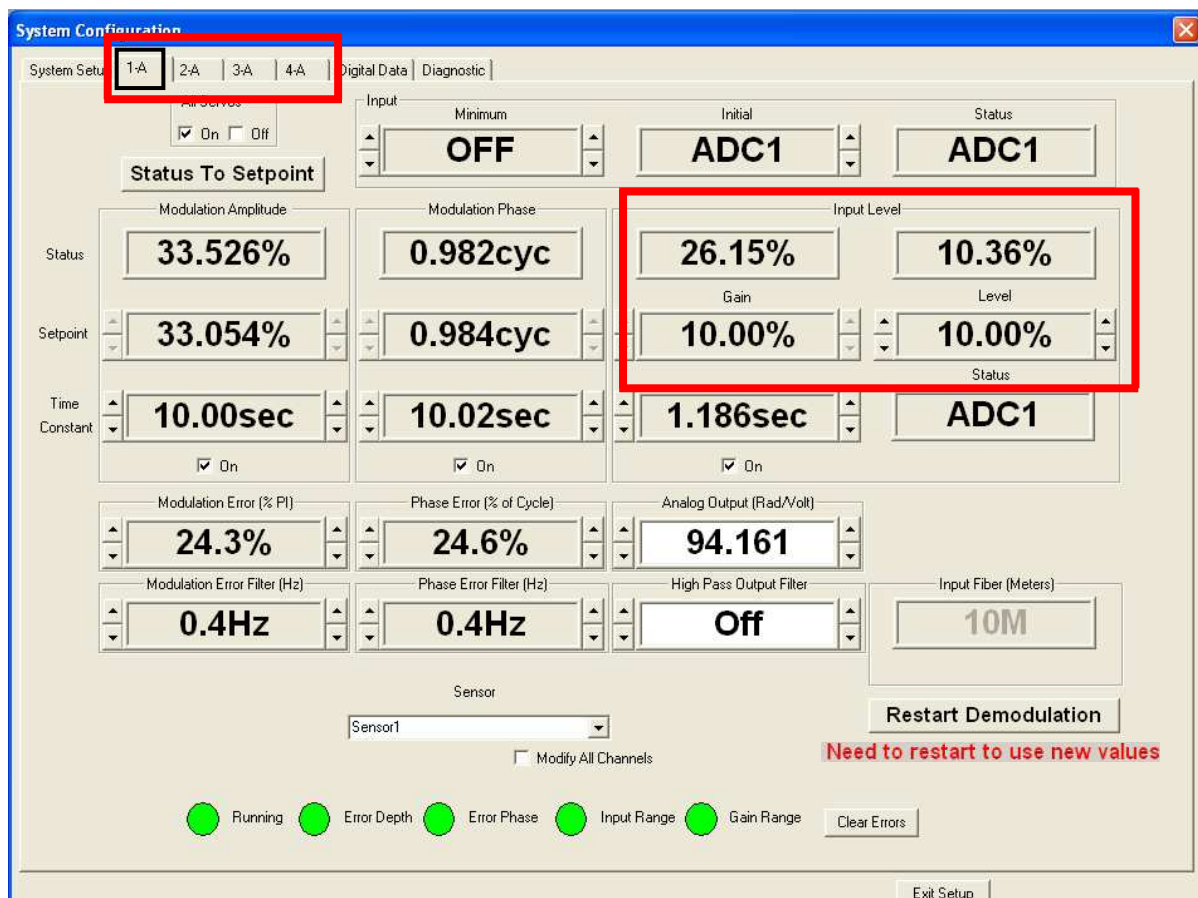


Abbildung 3.5: Screenshot der verwendeten Software – Informationen zu den einzelnen Kanälen

Im *Screenshot* des Kanals 1, sowie auch in den meisten anderen Fenstern der Software, ist der Button *Restart Demodulation* zu finden. Beim Drücken dieser Schaltfläche werden alle Demodulationsprozesse auf allen Kanälen neu gesetzt und neu gestartet. Wenn zum Beispiel die Frequenzanzahl über den *Digital Average* geändert wird, dann leuchtet zusätzlich eine Nachricht auf mit dem Inhalt „*Need to restart to use new values*“, um so erinnert zu werden den Button zu drücken.

Der Ausschnitt aus der Software in Abbildung 3.6 stellt als Beispiel Kanal 4 dar. Dabei ist zum Unterschied zu Kanal 1 die Information zur *Modulation Amplitude* und *Modulation Phase* nicht vorhanden. Diese Angaben sind nur für den ersten Kanal

notwendig. Desweiteren ist wieder die Anzeige (Abbildung 3.6, unten Mitte) der *Errors* zu sehen. Dabei wird jetzt als Beispiel der *Gain Range* rot angezeigt, da der *Gain* die 100% (im *Input Level* angezeigt) erreicht hat.

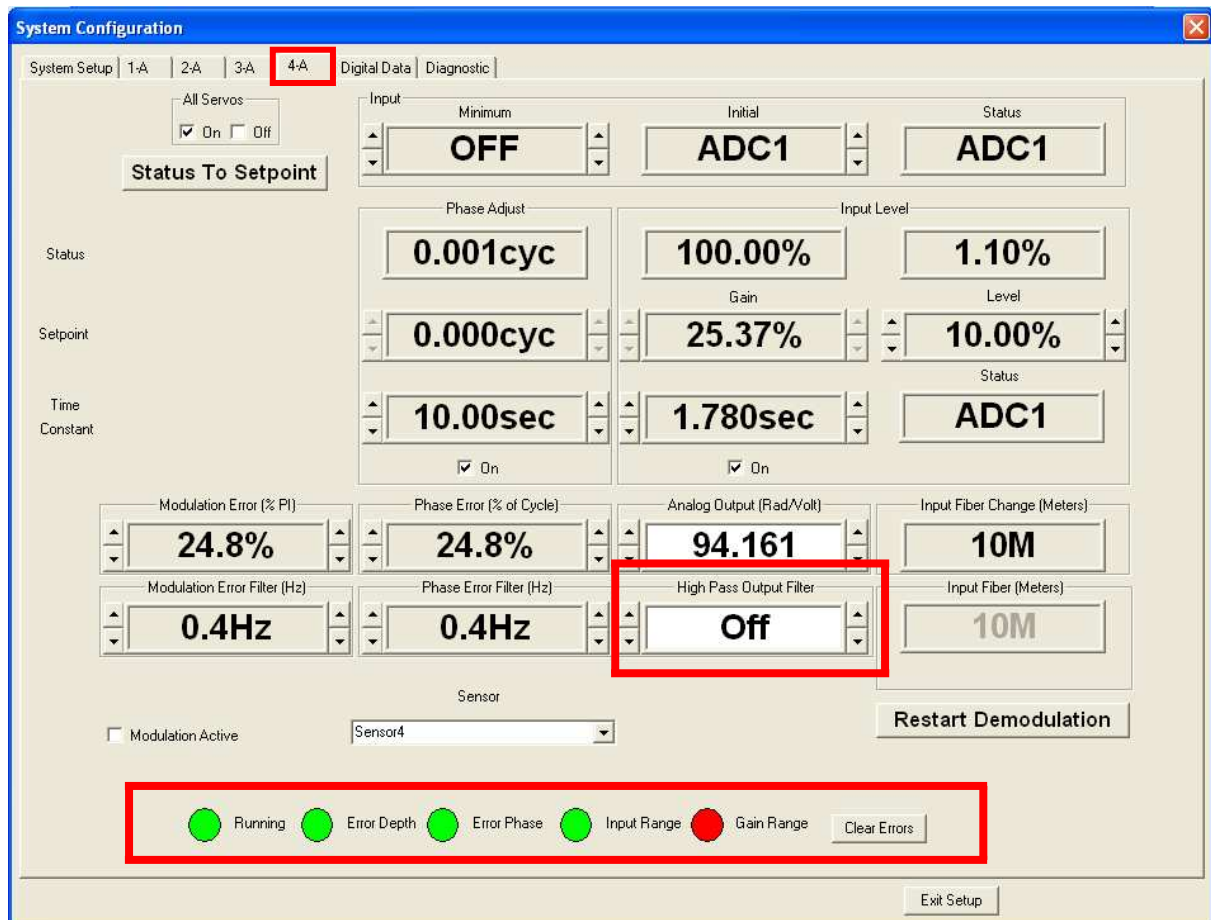


Abbildung 3.6: Screenshot der verwendeten Software – Kanal 4

Weiters gibt es noch die Möglichkeit einen digitalen Hochpassfilter bei der Messung zu verwenden. Dies wurde aber nicht durchgeführt, da es dafür nur einen analogen Ausgang gibt. In Abschnitt 5.2.1 wird die Hochpassfilterung der gemessenen Daten ausführlich erklärt.

### 3.2.4 Digital Data und Diagnostic

In Abbildung 3.7 ist der *Digital Data Screen* zu sehen. Dort wird das Verzeichnis ausgewählt, wo das File gespeichert werden soll, beziehungsweise muss ein Dateiname erstellt werden. Weiters kann gewählt werden, ob das File als *Binary* oder als *CSV* abgespeichert werden soll. Meine Messungen wurden immer als *CSV*-Files abgespeichert, obwohl durch das binäre Format und deren Verschlüsselung weniger Speicher notwendig gewesen wäre. Der Grund dafür ist, dass das Daten-Format einfach gehalten werden soll.



Im Feld von *Number of Frames to save* wird eingetragen, wie viele Frames gemessen werden sollen. Das heißt pro Kanal und Messpunkt wird ein Frame verwendet, der dann einer Datenzeile entspricht.

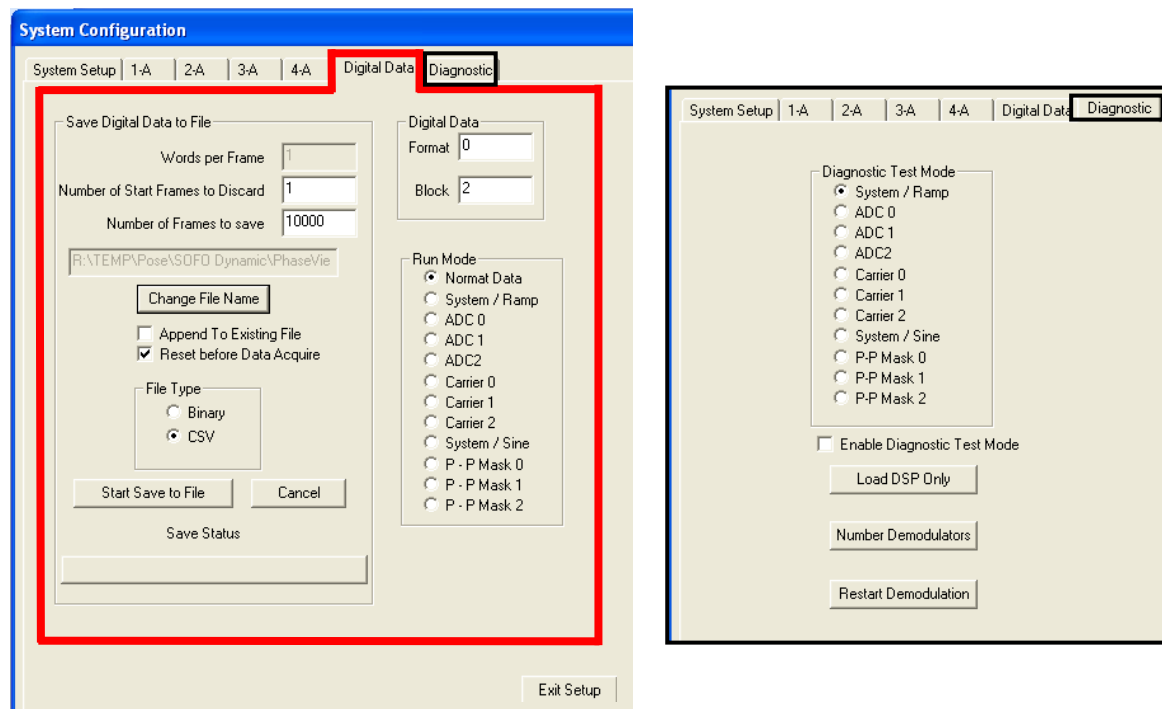


Abbildung 3.7: Screenshot der verwendeten Software – (links) Digital Data Screen, (rechts) Diagnostic

Im Bereich *Digital Data* kann das Format ausgewählt werden. Der *Default*-Wert ist „Format 0“. Dort werden die digitalen Daten für jeden Kanal abgespeichert. Falls „Format 1“ eingestellt wird kann über das Feld *Block* eine Statuszeile eingeführt werden, die den aktuellen *Gain/Level* – Wert in Prozent herausschreibt. Leider ist dieses Format nur möglich wenn mit 20 kHz gemessen wird (siehe weitere Informationen in Abschnitt 5.4).

Der Screen *Diagnostic* wird auch in Abbildung 3.7 gezeigt. Dort wurden die Einstellungen so belassen und während der Untersuchung nicht verändert, da diese verschiedenen Fälle aufgrund von anderen Prioritäten nicht genauer untersucht wurden.

### 3.3 Hardware

In Abbildung 3.8 wird die *SOFO Dynamic RU* mit all ihren peripheren Hardwarekomponenten schematisch dargestellt. Weiters wird gezeigt, wie diese mit den Geräten verbunden gehören. Die *Analogic Outputs* wurden bei den Messungen für die verschiedenen Versuchsreihen und Experimente nie gebraucht. Somit wurde auch, wie im Bild dargestellt, kein *Data Acquisition System* benötigt.

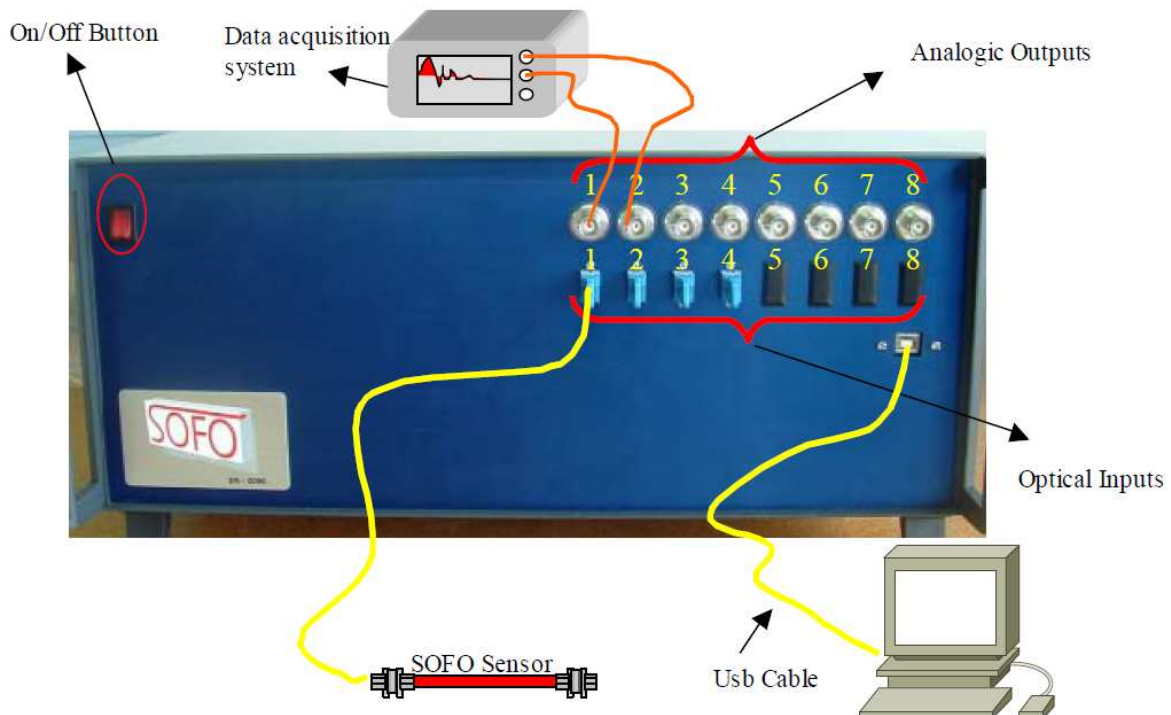


Abbildung 3.8: Elemente der Hardware (Smartec–User Manual, 2006, Seite 5)

Weiters sind acht *Optical Inputs* zu sehen wobei, wie auch beim angekauften *SOFO Dynamic* Gerät des IGMS, vier verfügbare Eingänge vorhanden sind. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass Kanal 1, wie auch vom Hersteller empfohlen, immer verwendet werden soll. Das heißt, wenn zwei Sensoren im Einsatz sind, dann sollte Kanal 1 und noch ein weiterer belegt werden. Wenn nur ein Sensor in Verwendung ist, muss immer der erste Kanal belegt werden. Mit dem USB-Kabel ist die Kommunikation zwischen dem *SOFO Dynamic* und dem PC nur möglich, wenn der USB-Port des Computers vom Typ 2.0 ist.

### 3.4 SOFO Standard Deformation Sensor

In Abbildung 3.9 wird ein SOFO Standard Deformation Sensor gezeigt. Solche Sensoren wurden auch für die Experimente verwendet. Der Sensor setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen, nämlich der aktiven und der passiven Zone.



Abbildung 3.9: Beispiel eines SOFO Standard Deformation Sensors

Der aktive Teil beinhaltet die Referenz- und Messfaser und misst die Deformationen zwischen den beiden Ankern. Wie in Abbildung 3.10 zu sehen, ist die Referenzfaser lose und die Messfaser gespannt. Das heißt auch, dass diese zwei unterschiedliche Längen haben. Dies wird durch die *Sensor Path Unbalance* gesteuert, die vom Hersteller vorgegeben wird (siehe Tabelle 3-1 und Abschnitt 4.3).

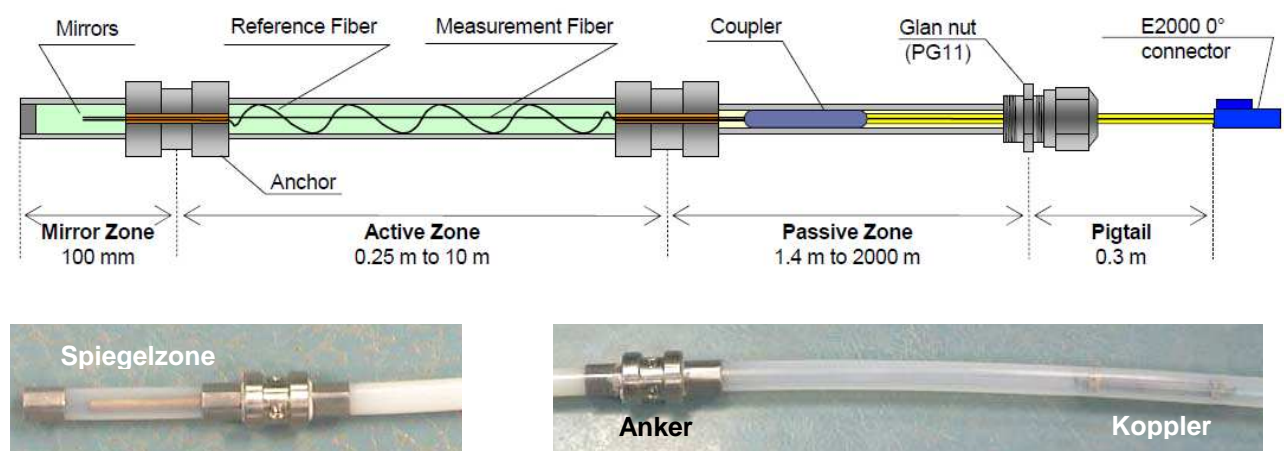


Abbildung 3.10: (oben) Schematischer Aufbau des Sensors (siehe Anhang E.3), (unten links) Sensorende mit Anker und Spiegelzone, (unten rechts) Anker mit Kopplerzone

Der passive Teil ist in Bezug auf Deformationen unempfindlich und wird als Verbindung zur *SOFO Dynamic RU* verwendet. Die passive Zone geht in eine Anschlussfaser über und endet mit einem Anschlussstück (*Connector*) an den Kanal.

In Tabelle 3-2 werden die technischen Daten der SOFO Standard Deformationssensoren aufgelistet.

Tabelle 3-2: Technische Charakteristiken der SOFO Standard Deformation Sensoren (siehe Anhang E.3)

<b>Länge der aktiven Zone (LA) (Messbasis)</b>	0.25 m bis 10 m, Standardlänge 10m - 20m, kundenspezifische Längen auf Anfrage
<b>Länge der passive Zone (LP) (Verbindungskabel)</b>	1 m bis 100 m kundenspezifische Längen bis zu 2000 m auf Anfrage
<b>Messbereich</b>	0.5% der LA bei Stauchung 1% der LA bei Streckung
<b>Messpräzision</b>	0.2% der gemessenen Deformation oder besser
<b>Messauflösung</b>	2 µm RMS
<b>Optionen für den Schutz der Verbindungskabel (für Details siehe spezifische Datenblätter)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Standard (empfohlen für eingebettete oder an der Oberfläche montierte Sensoren bei normalen Verhältnissen)</li> <li>- rostfreies Stahlschutzrohr (empfohlen bei Messungen im Feld)</li> <li>- einfaches Kabel ohne Schutzrohr (empfohlen für Laborverhältnisse)</li> </ul>
<b>Temperatur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Standard aktive Zone: -50 °C bis +110 °C</li> <li>- Spezielle aktive Zone (auf Anfrage): -50 °C bis +170 °C</li> <li>- Passive Zone: -40 °C bis +80 °C</li> </ul>
<b>Wasserdicht</b>	bis 5 bar (15 bar mit extra Schutz an den Ankerpunkten)
<b>Kalibrierung</b>	nicht nötig

## 4 Am IGMS vorhandenes SOFO Dynamic System und Sensoren

In diesem Kapitel wird auf die *SOFO Dynamic RU*, den Aufbau des Systems und auf die verwendeten Sensoren des IGMS näher eingegangen, die für die Versuche im Messlabor gebraucht wurden.

### 4.1 SOFO Dynamic Reading Unit - IGMS

Im Jahre 2006 wurde vom IGMS eine *SOFO Dynamic RU* von der Firma *Smartec SA* angekauft. Der Grund dafür lag einerseits darin, dass zusätzlich zum *SOFO Static* Messgerät (siehe Anhang B.1), das eine Messzeit von 6 Sekunden hat, ein faseropisches Messgerät gewünscht wurde, um auch höhere Abtastraten zu realisieren. Weiters sind die Sensoren mit beiden Systemen kompatibel. Auch im Zuge des Forschungsprojekts zum Thema Geo-Monitoring der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) am Gradenbach, im Kärntner Mölltal gelegen, sollen neue Erkenntnisse gewonnen werden. Beispielsweise wird mit hochfrequenter Messung der Einfluss von Mikro-Erdbeben bei Hangrutschungen untersucht. Für weitere Details siehe zum Beispiel Brunner & Woschitz (2008).

In Abbildung 4.1 wird das Messgerät gezeigt, das für alle Messungen im Labor verwendet wurde. Die *SOFO Dynamic RU* des IGMS mit der Seriennummer 96 hat nur 4 Kanäle zur Verfügung, im Gegensatz zu anderen Geräten, an die bis zu 8 Sensoren angeschlossen werden können.



Abbildung 4.1: *SOFO Dynamic RU* (Seriennr. 96) - IGMS

## 4.2 Aufbau des Systems im Labor

Abbildung 4.2 zeigt die Messstation im Messlabor am IGMS. Die wichtigsten Komponenten davon sind die *SOFO Dynamic RU*, die faseroptischen Sensoren und die PC-Station für die Verwendung der Software und die Speicherung der Daten. Für die Messungen wurden die verwendeten Sensoren seitlich von der Komparatorbank in Halfenschienen eingelegt und befestigt (siehe Abbildung 4.2 und Abbildung 4.4).

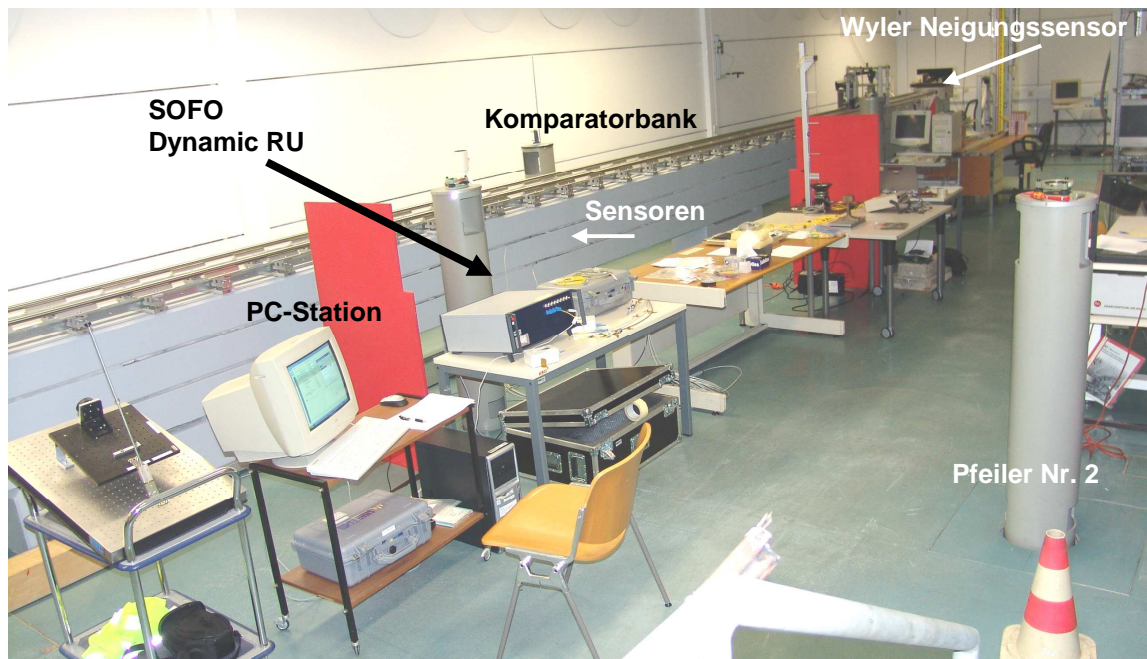


Abbildung 4.2: Aufbau des Systems bei den Versuchen im Messlabor des IGMS, TU Graz

Eine genauere Übersicht über die gesamte Anordnung und alle Komponenten der bei den Versuchen verwendeten Sensoren und der Messeinheit gibt die in Abbildung 4.3 dargestellte schematische Skizze. In dieser werden die Komparatorbank in der Seitenansicht und die Messstation mit der *SOFO Dynamic RU* beziehungsweise der Computerstation in der Draufsicht dargestellt. Die Komparatorbank besteht aus Beton und ist Teil des Horizontalkomparators für die EDM Kalibrierung. Die Gesamtlänge dieser beträgt 30 Meter bei einer Laborlänge von 33 Metern. Insgesamt wurden vier Sensoren verwendet, die an der Komparatorbank installiert waren. Zusätzlich wurde der Referenzsensor bei jeder Messung verwendet.

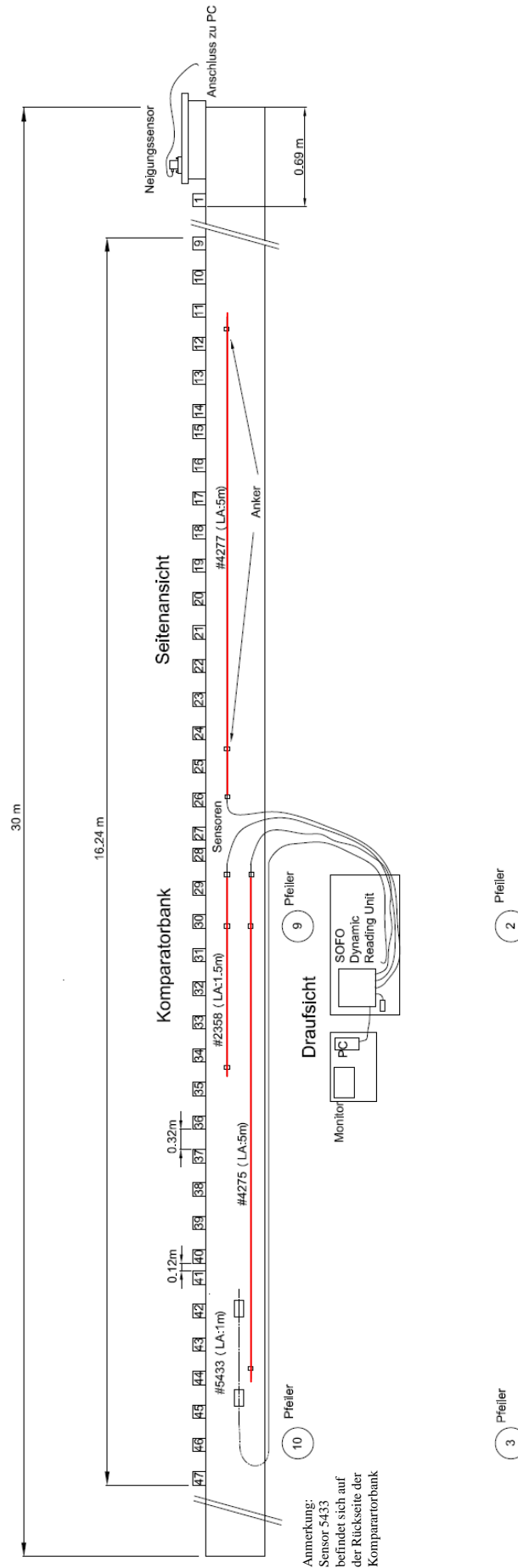


Abbildung 4.3: Schematische Skizze über den Aufbau der Sensoren und der Messstation im Labor

In Abbildung 4.4 wird veranschaulicht, wie die Sensoren 4277, 4275 und 2358 jeweils an den zwei Ankerstellen (siehe Abschnitt 3.4) durch Halfenschienen direkt mit der Komparatorbank verbunden wurden. Sensor 5433 ist auf der Rückseite der Komparatorbank montiert (siehe Abbildung 4.6).

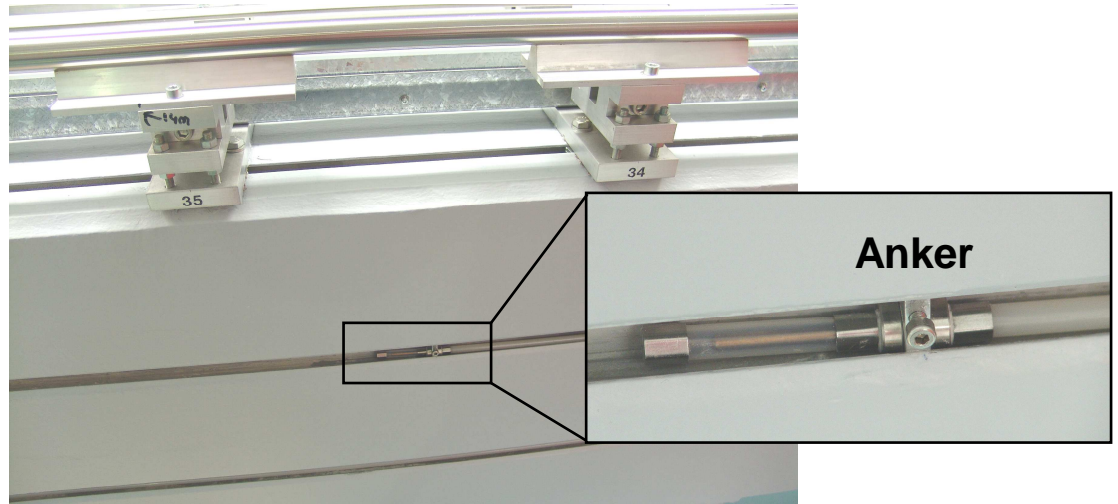


Abbildung 4.4: Befestigung der Sensoren an den Ankerpunkten

### 4.3 Verwendete Sensoren - IGMS

Für die Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, sind insgesamt fünf Sensoren zum Einsatz gekommen, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Beim Einbau der Sensoren wurde darauf geachtet, dass die Deformationslänge (DL) auf  $\sim 38$  mm vorgespannt wird, um die *Sensor Path Unbalance* für das *SOFO Dynamic* von  $38 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  einzuhalten. Dies wurde auch für die Sensoren 5433C, 4277 und 4275 umgesetzt (siehe Abbildung 8.8). Bei Sensor 2358 ist absichtlich ein Kompensator zwischenschalten worden, um diese Länge zu erreichen (siehe Abschnitt 4.3.4). Die Überprüfung, ob die Vorspannung im Bereich von  $\sim 38$  mm liegt, wurde mit dem *SOFO Static* durchgeführt, mit dem absolute Messungen gemacht werden können.

#### 4.3.1 Referenzsensor 149

Der Referenzsensor dient zur Driftreduktion (siehe Kapitel 8). Es wird simultan mit den anderen Sensoren gemessen. Der Sensor hat eine konstante Länge, somit kann das Signal von all den anderen Sensoren, die bei der Messung angeschlossen sind, abgezogen werden. Wie in Abbildung 4.5 zu erkennen ist, handelt es sich um eine DL von 38.05 mm. Die angegebene Länge der aktiven Zone (LA) beziehungsweise passiven Zone (LP) beträgt 1 m.



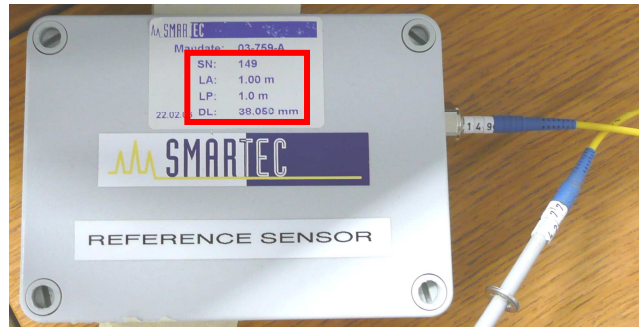


Abbildung 4.5: Verwendeter Referenzsensor mit der Seriennummer 149

#### 4.3.2 Sensor 5433

Ein weiterer Sensor mit der Seriennummer 5433 wurde bei den Versuchsreihen verwendet. Dieser hat eine LA von 1.5 m und eine DL von 38.7 mm. Die Deformationslänge des am SOFO Prüfstand montierten Sensors wurde mit dem SOFO Static gemessen. Laut Hersteller hat der Sensor eine DL von 36.736 mm. Die Länge der passiven Zone LP beträgt 10 m.

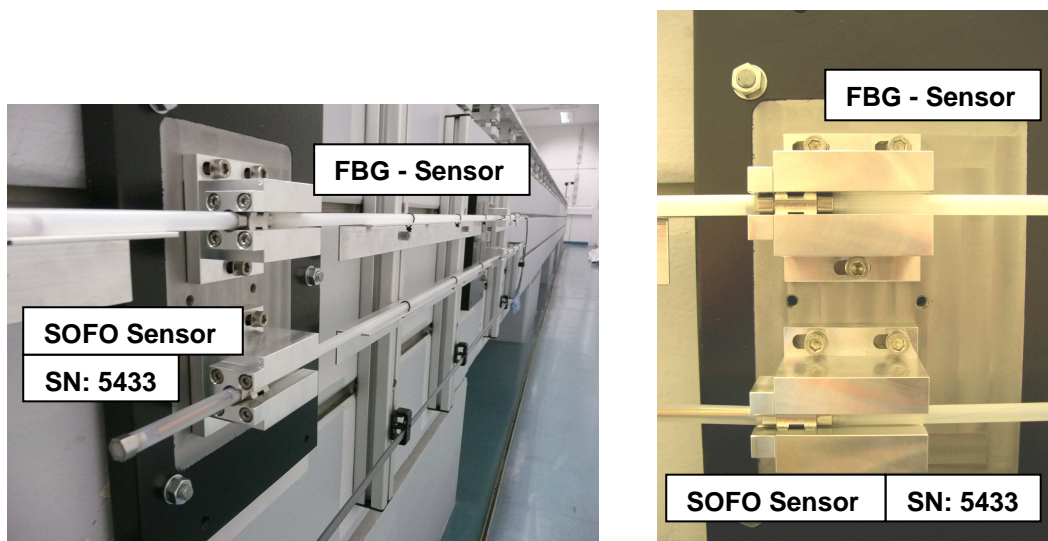


Abbildung 4.6: Anordnung und Verankerung des Sensors SN 5433 auf der Rückseite der Komparatorbank

#### 4.3.3 Sensor 4277

Dieser dritte Sensor wurde bereits vom IGMS verwendet und war unter anderem für Untersuchungen in Form der *Strainrosette* am Bautechnikzentrum (BTZ) an der TU Graz im Einsatz (Brunner et al., 2007). Die Anordnung des Sensors wird in Abbildung 4.3 gezeigt. Die Länge der aktiven Zone beträgt bei diesem SOFO Sensor fünf Meter. Auf dem Sensor selbst wird eine LP von 10 m angegeben. Die angegebene DL von 37.895 mm wurde mit dem SOFO Static überprüft. Dabei sind 37.6 mm festgestellt worden.

#### 4.3.4 Sensor 2358

Dieser Sensor wurde bei den ersten Experimenten verwendet und die Länge der aktiven Zone beträgt 1.5 m. Hier ist die passive Länge laut Angabe 5 m. Aufgrund der zu geringen Deformationslänge von 12.114 mm des Sensors 2358 wurde ein Adapter, der von der Herstellerfirma *Smartec SA Compensator* genannt wird, dazwischen geschaltet. Die Bezeichnung für den Kompensator ist C151. Dies musste deshalb gemacht werden, da für die *SOFO Dynamic RU* eine *Sensor Path Unbalance* von  $38 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  gebraucht wird.



Abbildung 4.7: Kompensator C151 für die Sensor Path Unbalance

Das heißt, dass die DL des Sensors mit Hilfe von der DL des Kompensators mit 23.16 mm (mit *SOFO Static* wurden 23.6 mm gemessen) in den Toleranzbereich der *Sensor Path Unbalance* gebracht wird.

#### 4.3.5 Sensor 4275

Der SOFO Sensor 4275 ist neuwertig, wurde aber aufgrund der beschränkten Anzahl an Kanalanschlüssen anfangs nicht verwendet. Erst bei Wiederholungen von Messungen einiger Versuchsreihen wurde dieser mit einbezogen. Dieser Sensor hat eine LA und LP von 5 m.

## 5 Auswertung und Analyse

Die für die Auswertung der Daten notwendigen Routinen wurden in *Matlab R2007b* realisiert. Je nach Art der Untersuchungen sind unterschiedliche Schritte bei der Analyse notwendig. In Abbildung 5.1 wird ein Beispieldatensatz im Rohzustand gezeigt. Die Grafik veranschaulicht deutlich mit den Drifts und plötzlichen Peaks, dass für die Analyse der Daten eine weitere Bearbeitung notwendig ist. In den nächsten Abschnitten wird näher erläutert, wie die Auswertung der Daten erfolgt. Dabei wird auf die Vorprozessierung der Daten, deren Filterung und auf die Berechnung der Standardabweichung eingegangen.

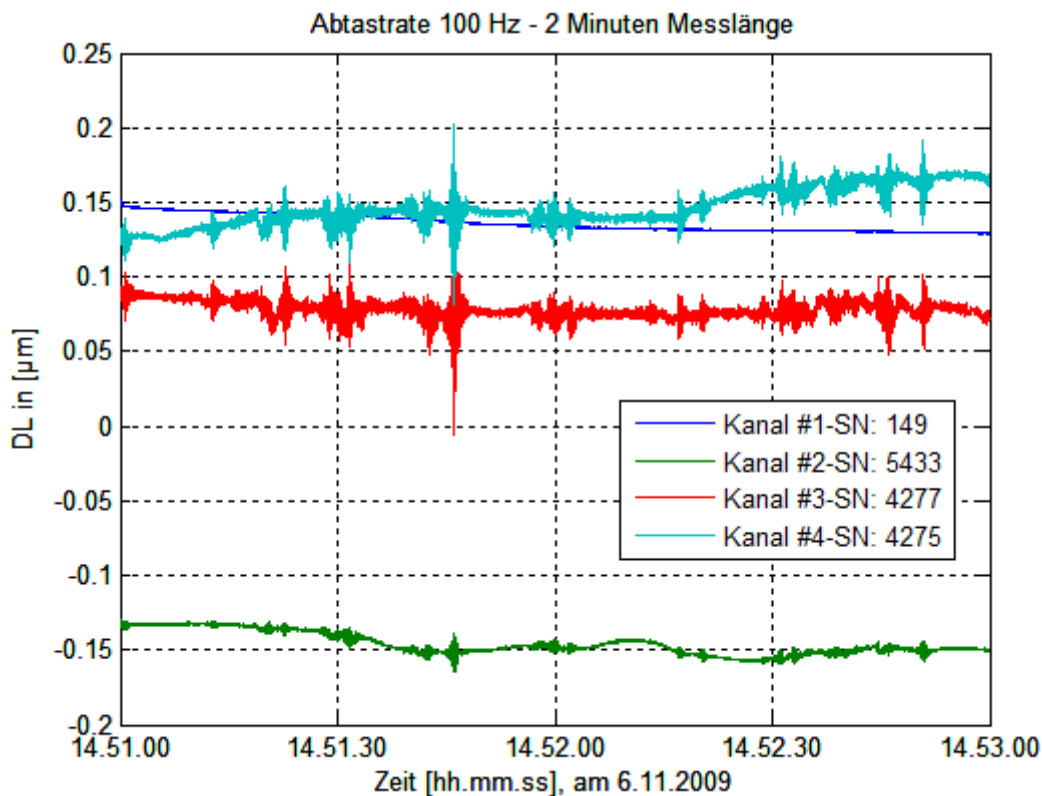


Abbildung 5.1: Testdatensatz der Rohdaten

### 5.1 Vorprozessierung der Daten

#### 5.1.1 Einlesen der Daten

Beim Einlesen der Daten wird für alle Messungen gleich vorgegangen. Über das Datum des Messtages, mit dem jedes File als erstes bezeichnet ist, wird im Ordner gesucht. Als nächstes werden die Messdaten über eine *Matlab*-Routine zeilenweise eingelesen und in einem *struct* abgespeichert. Somit kann es für die weitere Verarbeitung verwendet werden. Dies ist vor allem für die Kurzzeitmessungen nötig, um gleich mehrere Files einlesen zu können. Für die Langzeitmessungen gilt dasselbe Prinzip, obwohl hier immer nur ein Messfile eingelesen wird, da aufgrund der Daten-

menge nicht mehr möglich ist beziehungsweise *Matlab* mit Files ab 150 MB ausgelastet ist.

### 5.1.2 Konvertierung der Daten und Datenformat

Die Rohdaten sind im angegebenen Verzeichnis als Comma Separated Values (CSV) - Datei im ASCII-Format abgespeichert. Die Anzahl der Zeilen der Datei ist von der Länge der Messdauer und der eingestellten Abtastrate abhängig. Die Zeilenanzahl entspricht der Anzahl der Frames. Die Ausgabe im CSV-Format ist vorerst in der Einheit Radiant angegeben. Um die Werte auf die Einheit Mikrometer [ $\mu\text{m}$ ] umzurechnen, wurde vom Hersteller *Smartec* eine Formel<sup>1</sup> (5-1) angegeben. Dazu muss erklärt werden, dass 9.6 rad einer Längenänderung von 0.001 mm beziehungsweise einem Mikrometer entsprechen.

$$DL = \frac{CSV * 2 * \pi}{2^{20} * 9.6} \quad (5-1)$$

Dabei ist *DL* die Längenänderung in Mikrometer und *CSV* steht für den Wert im File. Als  $\pi$  wurde das in Matlab verwendete ‚*pi*‘ benützt. In Tabelle 5-1 werden als Beispiel Werte im CSV-Format mit den Daten nach der Umrechnung mit Gleichung (5-1) in Mikrometer gegenüber gestellt.

**Tabelle 5-1: Numerische Werte: (links) Rohdaten im CSV-Format, (rechts) Rohdaten in Mikrometer**

Frame	Rohdaten aus CSV-File [ ]				Rohdaten in Mikrometer [ $\mu\text{m}$ ]			
	Sensor 149	Sensor 5433	Sensor 4277	Sensor 4275	Sensor 149	Sensor 5433	Sensor 4277	Sensor 4275
1	115101	85156	187933	-502339	0.0718	0.0532	0.1173	-0.3136
2	107980	83820	187330	-517712	0.0674	0.0523	0.1169	-0.3231
3	114050	83833	186779	-535124	0.0712	0.0523	0.1166	-0.3340
4	108145	82840	186624	-493548	0.0675	0.0517	0.1165	-0.3081
5	111881	83991	186841	-515767	0.0698	0.0524	0.1166	-0.3219
6	111202	83444	186392	-504462	0.0694	0.0521	0.1163	-0.3149
7	109959	84358	186412	-515927	0.0686	0.0527	0.1164	-0.3220
8	108399	83068	185685	-517271	0.0677	0.0518	0.1159	-0.3229
9	111238	83077	185505	-531167	0.0694	0.0519	0.1158	-0.3315
10	109646	82509	186291	-500321	0.0684	0.0515	0.1163	-0.3123

<sup>1</sup> siehe SOFO Dynamic User Manual, Seite 21 (2006)

## 5.2 Filterung

Im Kapitel 7 wird die Präzision des *SOFO Dynamic* Messgeräts untersucht. Um die Standardabweichung berechnen zu können, werden die Daten einer Hochpass-Filterung (Abschnitt 5.2.1) und einer Bandstop-Filterung (Abschnitt 5.2.2) unterzogen und die robuste Standardabweichung (Abschnitt 5.3) berechnet.

Im Gegensatz zur Analyse der Präzision wird bei der Untersuchung des Driftverhaltens (Kapitel 8) eine Datenreduktion durchgeführt, die die Wirkung eines Tiefpassfilters (Abschnitt 5.2.3) hat. Dies ist besonders bei der Auswertung der Langzeitmessungen notwendig, um mit den großen Datenmengen arbeiten zu können. Eine weitere Behandlung der Daten ist nicht mehr nötig.

### 5.2.1 Hochpass-Filterung

Um die Messdaten (siehe z.B. Abbildung 5.1) von Trends und vor allem von niederfrequenten Anteilen (Driften) zu trennen wird ein Hochpassfilter verwendet. Es wurde nach Tests von Beispieldatensätzen mit mehreren bekannten IIR-Filter das *Butterworth*-Filter ausgewählt und mittels dafür vorgesehene *Matlab*-Funktionen realisiert. Dieses Filter zeichnet sich durch die geringe Welligkeit im Sperr- und Durchlassbereich aus, wodurch eine größere Verzerrung des Signals vermieden wird (Werner, 2006). Für die Berechnungen wurde eine Grenzfrequenz von 1 Hz ( $F_c$ ) verwendet, da mit dieser Abtastrate alle niederfrequenten Teile wie das Driften und die durch den Einfluss des Verkehrs (siehe Abschnitt 7.5.2) auftretenden und durch den Bandstop-Filter (Abschnitt 5.2.2) nicht unterdrückten Frequenzen eliminiert werden können. Für die Abtastrate von 1 Hz bei der Messung wurde die Grenzfrequenz auf 0.25 Hz vermindert, da sonst die normierte Grenzfrequenz  $Wn$ , welche als Inputparameter für die Berechnung des Filters verwendet wird, größer 1 aufgrund von *Nyquist* ( $F_s/2$ ) wird, diese aber einen Bereich zwischen 0 und 1 haben muss. In Abbildung 5.2 wird das Filterdesign dargestellt, das mit dem *fdatool* von *Matlab* realisiert wurde. Mit dieser Berechnungsmethode muss nur die Grenzfrequenz  $F_c$ , nicht aber die Stopp- und Passbandfrequenz angegeben werden.

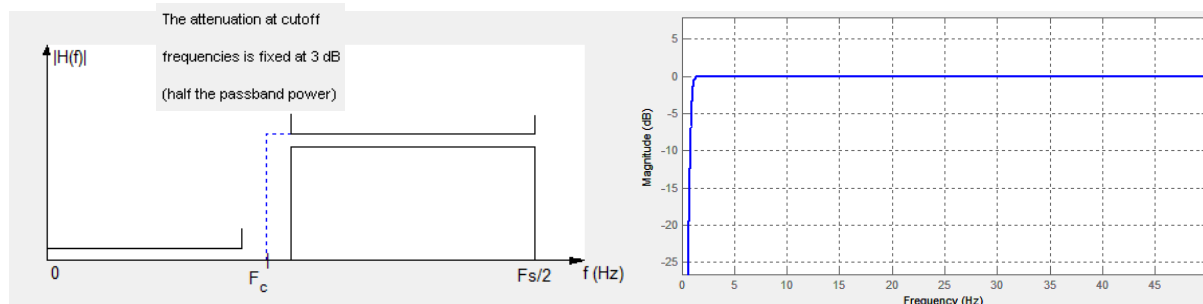


Abbildung 5.2: Darstellung des Hochpass-Filterdesigns, (links) schematische Darstellung des Hochpassfilters, (rechts) berechnetes Hochpassfilter

In Abbildung 5.3 wird ein Beispieldatensatz gezeigt, der die Messdaten, umgerechnet in Mikrometer, vor und nach der Hochpass-Filterung zeigt.

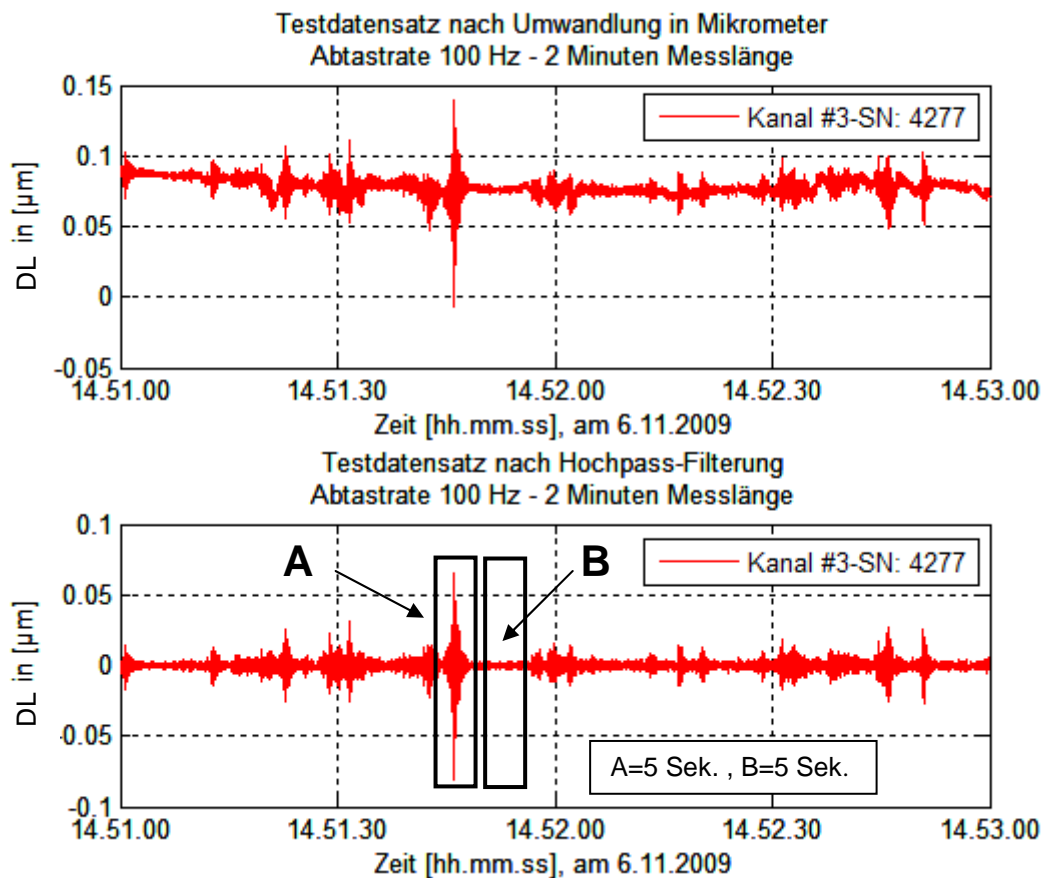


Abbildung 5.3: Vergleich der Daten (oben) vor und (unten) nach der Hochpass-Filterung

## 5.2.2 Bandstop-Filterung

Aufgrund einer Frequenzanalyse der Messdaten und Beobachtungen des Verkehrs (in Abschnitt 7.5.2 gezeigt) wurde festgestellt, dass die vielen Ausreißer in den Messdaten der einzelnen Sensoren hauptsächlich durch die vorbeifahrenden Fahrzeuge in der Steyrergasse entstehen. In Abbildung 5.4 wird eine Frequenzanalyse von Ausschnitt A (mit Ausreißer) und Ausschnitt B (ohne Ausreißer) gezeigt, die beide eine Länge von 5 Sekunden haben (siehe Abbildung 5.3). Die Frequenzen, die im Bereich von 12 bis 25 Hz vorkommen, werden durch den Verkehr verursacht.

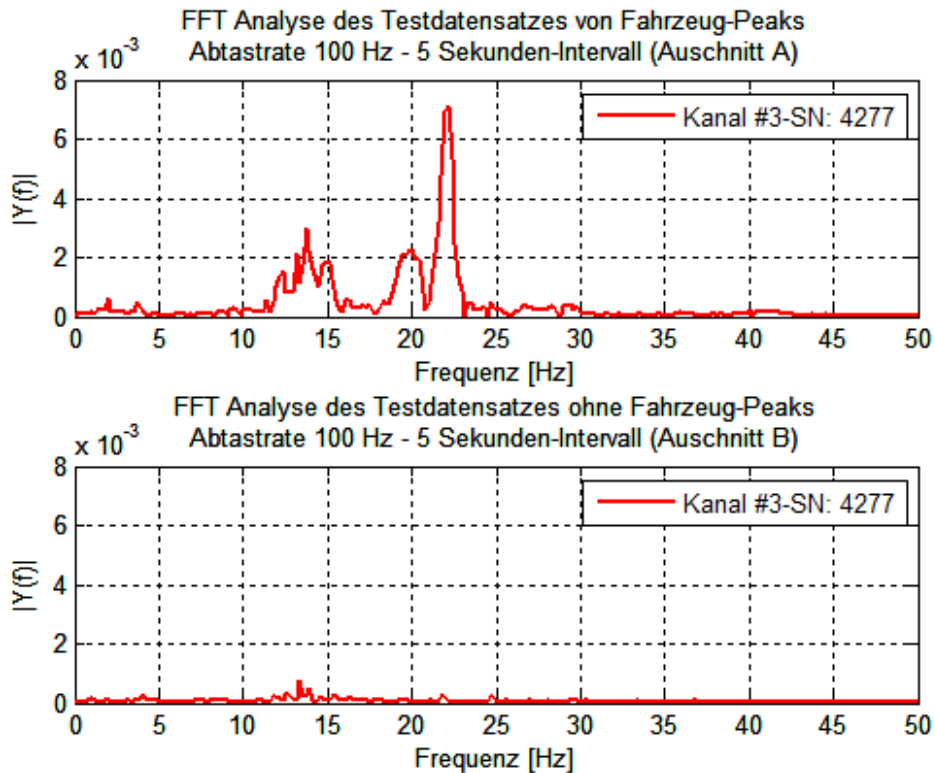


Abbildung 5.4: Frequenzanalyse (oben) eines Fahrzeug-Peaks, (unten) ohne Fahrzeug-Peaks

Nun wurden die Frequenzen (12-25 Hz) durch Anwendung einer Bandstop-Filterung unterdrückt. Dies wird durch das elliptische Filter (Cauer) realisiert. Nach Werner (2006) hat das Filter zwar ein Equiripple-Verhalten im Durchlassbereich, dafür aber eine hohe Sperrdämpfung bei einem schmalen Übergangsbereich. In Abbildung 5.5 werden die Parameter eines Bandstop-Filters dargestellt. Als untere Grenzfrequenz wird 9 Hz ( $F_{\text{pass1}}$ ) und als obere Grenzfrequenz wird 30 Hz ( $F_{\text{pass2}}$ ) angewendet, da die Peaks, die die Fahrzeuge verursachen, im Bereich von einigen Hertz variieren und ein Übergangsbereich beim Filter von  $\sim 3$  Hz angenommen wird. Weiters wird für die Welligkeit im Durchlassbereich 1 dB ( $A_{\text{pass}}$ ), was 90% entspricht, und für die Welligkeit im Sperrbereich 80 dB ( $A_{\text{stop}}$ ) als Inputparameter angegeben.

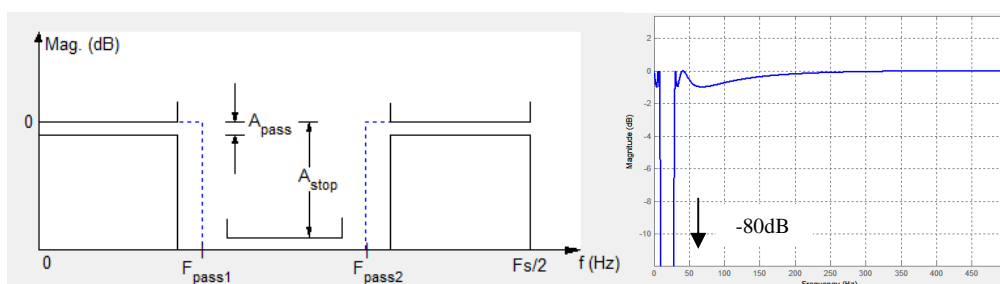


Abbildung 5.5: Darstellung des Bandstop-Filterdesigns, (links) schematische Darstellung eines Bandstopfilter, (rechts) berechnetes Bandstopfilter

Abbildung 5.6 zeigt wiederum eine Frequenzanalyse. Es wird das Frequenzspektrum vor und nach der Bandstop-Filterung gezeigt. Dabei ist gut sichtbar, dass die Frequenzen zwischen 9 Hz und 30 Hz unterdrückt werden.

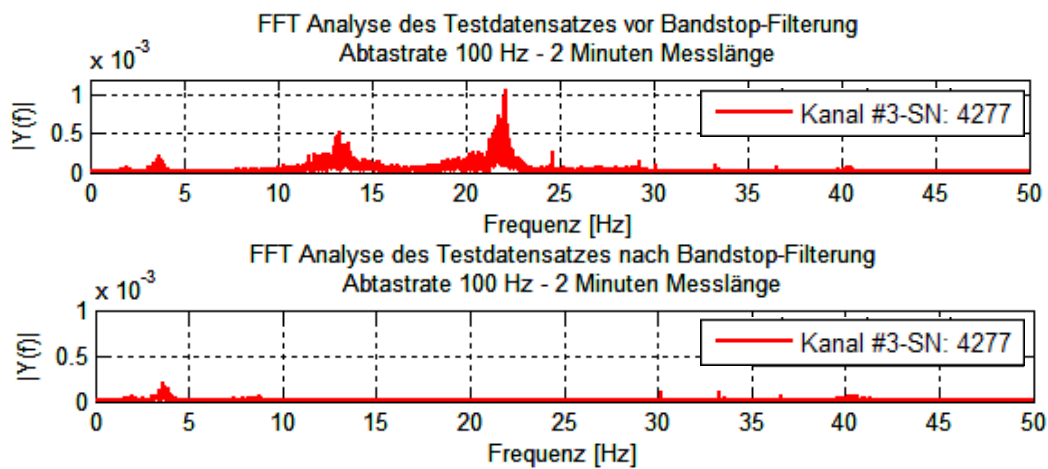


Abbildung 5.6: Frequenzanalyse der gemessenen Daten (oben) vor und (unten) nach der Bandstop-Filterung

In Abbildung 5.7 wird die Messdatenzeitreihe zwischen Hochpass-Filterung und zusätzlicher Bandstop-Filterung verglichen. Dabei ist gut erkennbar, dass die Ausreißer fast zur Gänze unterdrückt werden, aber auch der Rauschanteil.

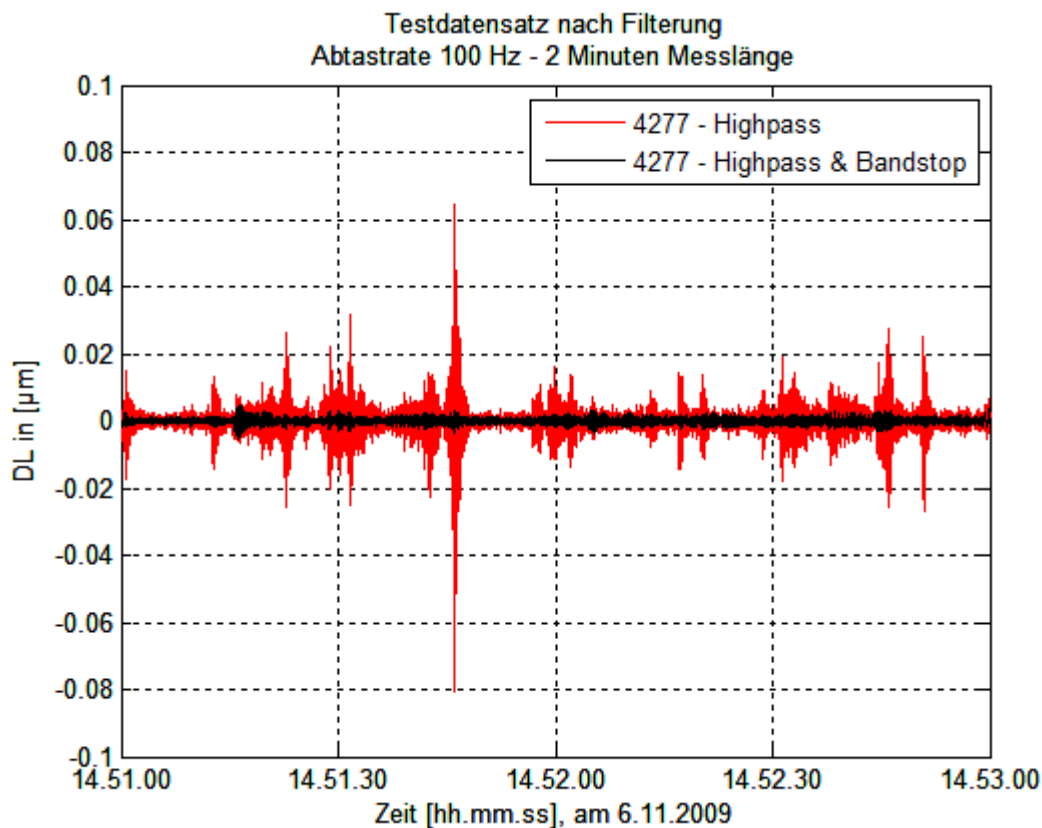


Abbildung 5.7: Testdatensatz nach Highpass und Bandstop-Filterung



Somit muss die zunächst vorgesehene Ausreißerdetektion (Abschnitt 5.3) nicht mehr durchgeführt werden und es kann im Weiteren die robuste Standardabweichung der Daten mit Gleichung (5-2) und (5-3) berechnet werden.

### 5.2.3 Datenreduktion

Bei der Datenreduktion werden die hochfrequenten Messungen auf 1-Sekunden oder 1-Minuten-Intervalle herunter gemittelt um lange Datenreihen einfacher weiterverarbeiten zu können. Das heißt, die Messdaten werden in einem ersten Schritt in gleich große Intervalle aufgeteilt. Zum Beispiel sind 100 Hz Daten, wenn diese auf 1-Sekunde gemittelt werden, in Intervalle von der Zeilenlänge 100 eingeteilt. Als zweiten Schritt werden diese gleich großen Blöcke arithmetisch gemittelt.

## 5.3 Ausreißerdetektion mit robustem Schätzer

Die Ausreißerdetektion wurde zur Berechnung der Standardabweichung verwendet, bevor gezeigt werden konnte, dass die „Ausreißer“ vom Verkehr kommen und eigentlich gar keine sind. Durch die Bandstop-Filterung wird die Ausreißerdetektion somit nicht mehr gebraucht. Diese findet nur noch Anwendung für die Auswertung der Langzeitmessungen im Abschnitt 7.5. Dort wurde bewusst keine Bandstop-Filterung angewandt, um den Einfluss der Fahrzeuge am Tag gut veranschaulichen zu können. Im Folgenden werden die Schritte für die robuste Ausreißerdetektion beschrieben.

Für die Detektion von Ausreißern wird zuerst der *MAD* (*Median Absolute Deviation*) nach Hartung (1998) in Gleichung (5-2) berechnet. Wobei  $x$  für die Messwerte der Rohdaten in  $\mu\text{m}$  steht und  $\tilde{y}$  für den Median.

$$MAD = \text{median}(\text{abs}(x - \tilde{y})) \quad (5-2)$$

Somit wird die STD mit Gleichung (5-3) berechnet. Der Wert 1.483 entspricht dem reziproken Wert des 0.75-Quantils der Standardnormalverteilung.

$$s = 1.483 * MAD \quad (5-3)$$

Vorher wurden von den Daten stichprobenartig Histogramme und QQ-Plots erstellt, um die Normalverteilung der Daten zu kontrollieren, da sonst der MAD nicht angewendet werden darf. Danach werden alle Beobachtungen, die mehr als  $\pm 3 s$  betragen, als Ausreißer detektiert und gelöscht. Das 3-Sigma-Intervall wurde deshalb verwendet, da zum Beispiel bei einer Anzahl von 30 000 Datenpunkten (entspricht z.B. 5 Min. bei 100 Hz) 99.7% der Daten innerhalb des Bereichs liegen und 0.3% als Ausreißer detektiert werden. Dies entspricht 90 Ausreißern.

## 5.4 Phasensprungbereinigung

Aufgrund der auftretenden Phasensprünge bei den Langzeitmessungen mit der *SOFO Dynamic Reading Unit* ab Mai 2009 (siehe Abschnitt 10.2.1) wurde versucht eine Möglichkeit zu finden, die *Data Offsets* zu korrigieren um die gemessenen Daten noch verwerten zu können. Auch bei den Kurzzeitmessungen kommen Zeitreihen vor, die aufgrund des hohen *Gain* und dadurch niederen *Level* Phasensprünge vorweisen. Anhand so einer Kurzzeitmessung von 2 Minuten wird erklärt, wie versucht wurde diese Phasensprungbereinigung durchzuführen.

Als erster Schritt werden Differenzen der benachbarten Messpunkte der Rohdatenzeitreihe berechnet. Damit wird festgestellt, in welchem Teil der Datenreihe die Messwerte gleichmäßig verteilt sind beziehungsweise erkannt, wo Ausreißer vorhanden sind. Im zweiten Schritt wird von den ermittelten Differenzen ein robustes 6-Sigma-Intervall als Grenzwert für die im weiteren Schritt gemachte Offset-Berechnung festgelegt. Durch Verwendung der robusten STD wird diese für ihre Berechnung nicht durch die Phasensprünge beeinflusst, falls es weniger als 50% aller Daten der Zeitreihe sind. Danach werden die *Offsets* in den Daten über eine eigens erstellte *Matlabfunktion* gerechnet. Bei Überschreitung des berechneten Intervalls von  $\pm 6$  Sigma wird der Datenpunkt auf den Wert des vorherigen Datenpunktes gesetzt. Eine Darstellung der Zeitreihe vor und nach der Phasensprungkorrektur ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

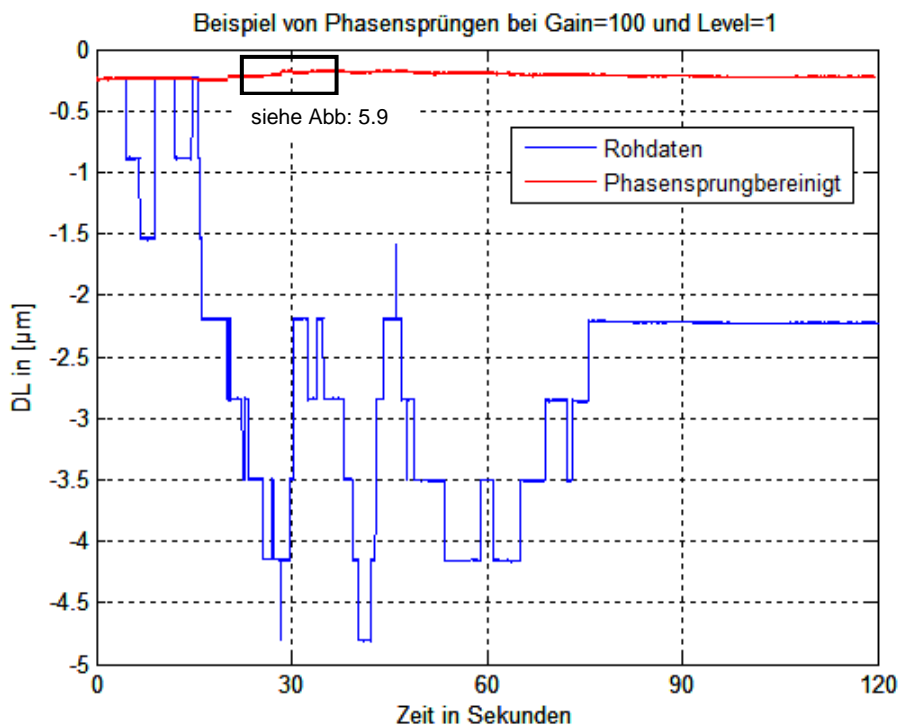


Abbildung 5.8: Zeitreihe mit und ohne Phasensprungbereinigung

Diese Methode hat aber auch Mängel. Die Mehrheit der Sprünge wird richtig korrigiert. Es gibt aber auch wenige kleine Sprünge, die wie in Abbildung 5.9 gezeigt, in-

nerhalb des 6-Sigma-Intervalls liegen. Das ist damit zu begründen, dass diese Phasensprünge aus meist 2 bis 3 kleinen Sprüngen oder noch mehreren bestehen, die nicht alle außerhalb des 6-Sigma-Intervalls liegen.

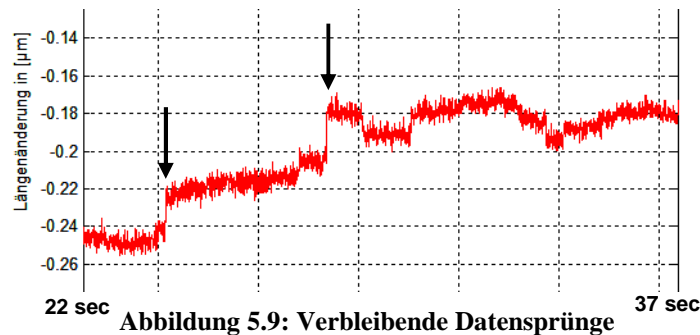


Abbildung 5.9: Verbleibende Datensprünge

Für die Phasensprünge der Langzeitmessungen, wie in Abbildung 10.2 zu sehen, gilt auch dieser Ansatz. Nur werden dort die „down-gesampelten“ Daten, die zum Beispiel auf 1 Minute gemittelt sind, von Phasensprüngen bereinigt. Aufgrund der genannten Probleme und Unsicherheiten wurde die oben beschriebene Methode für die Untersuchung der Zeitreihen der Langzeitmessung nicht verwendet.

Die Phasensprünge entstehen aufgrund der Veränderungen des *Gain* und *Level*. Die möglichen Gründe dafür werden in Abschnitt 10.1 und 10.2.1 erläutert. Um sich nicht immer die gesamten Rohdaten anschauen zu müssen, um zu wissen ob die Daten eventuell Phasensprünge beinhalten, könnte das in der Software des *SOFO Dynamic* Messgeräts mögliche Format 1 (Optiphase, Softwaremanual, 2005, Seite 39) helfen (siehe Abschnitt 3.2.4), wo nach bestimmten Intervallen der *Gain* und *Level* Status zusätzlich mit den Messdaten erfasst wird. Es wurde herausgefunden, dass dies nur bei einer Abtastrate von 20 kHz möglich ist. Mit dieser hohen Frequenz können aufgrund der großen Datenmengen längere Zeiträume nicht untersucht werden. Deswegen wurde dies auch nicht bei den Untersuchungen angewendet. Es müsste dazu eine eigene Software programmiert werden um dieses und möglicherweise noch weitere Features einbinden zu können.

## 6 Planung und Überblick der Experimente

In den folgenden Kapiteln wird eine Reihe von Versuchen gezeigt, die im Rahmen der Masterarbeit durchgeführt wurden. Ein Überblick über die Experimente zu den unterschiedlichen Versuchsgruppen ist in Tabelle 6-1 zu sehen. Alle Versuche wurden im Messlabor des IGMS an der TU Graz gemacht.

### 6.1 Planung eines Experiments

Schon zu Beginn der Untersuchung sollte bei der Planung der Experimente darauf geachtet werden, möglichst viele Eckdaten vor dem Versuch abzuklären. Fragen wie die folgenden sollten dabei beantwortet werden:

- *Was soll untersucht werden?*
- *Steht das Messgerät zur gewünschten Zeit zur Verfügung?*
- *Sind die Laptops des Instituts am gewünschten Tag zur Verwendung freigegeben, oder muss ein Laptop organisiert werden?*
- *Wie muss ich das Messformular modifizieren, um alle wichtigen Daten mit zu protokollieren?*
- *Wie lange soll die Messung dauern?*
- *Werden mehrere Messungen hintereinander durchgeführt?*
- *Wie viele Frames muss man einstellen um die Dauer der Messung zu berechnen?*
- *Mit was für einer Frequenz soll gemessen werden?*
- *Soll das Messgerät vorher eingeschaltet werden um die Messung im Warmzustand zu beginnen, oder soll bewusst gleich nach dem Einschalten zu messen begonnen werden?*

Ein wichtiger Teil der Versuche sind unter anderem die Messformulare, die für jedes Experiment angefertigt wurden. In Abbildung 6.1 wird ein Beispiel eines verwendeten Formulars dargestellt. Wichtige Informationen wie das Datum des Messtages, der Typ des verwendeten Computers, Start und Ende der Messung, die Anordnung der Sensoren, die Anzahl der Frequenzen und der Frames und noch weitere Details werden hier notiert.

Messformular und Checkliste: Untersuchungen zur Präzision: Signalstärke – Gain/Level Untersuchung

**Vor Start der Messungen**

Datum des Messtages [dd.mm.yyyy]	22. April 2009	
Einschalten der SOFO Dyn. Reading Unit	22. April ~Mittags	Seriennr. 96
Welcher Laptop wird verwendet?	Samsung P35 NB6 Labor	
Name von .doc – files der Screenshots	Siehe 20090422_sofa_dyn	
Datum auf dem PC OK?		

**SOFO Sensoren**

Kanal	Sensor Seriennr.	Bezeichnung	Kontrolliert?
# 1	149	Referenz	
# 2	5433	1,5 m hinter	Komparatorbank
# 3	4277	5 m alt #2	
# 4	2358	+ C151 Adapter	

**System Setup / Configuration: A priori Herstellerangaben werden verwendet**

Frequ- ency	Digital Average	Restart Demod.	Muss ich?	Anzahl der Frames	Filename Folder:	Kalkulierte Dauer	Vorher Gain [%] Level	Nachher Gain [%] Level	Messung Start	Messung Ende Visuell   Watchdog	Error nach Messung	All Servos On / Off
20 kHz	1			6 Mio.	20090422_sof	5min						
10 kHz	2			3 Mio.	o_dyn	oder						
5 kHz	4			1,5 Mio.		300 sec.						
1 kHz	20			300 000		für alle						
500	40			150 000								
250	80			75 000								
100	200			30 000								
50	400			15 000								
25	800			7 500								
10	2000			3 000								
5	4000			1500								
1	20000			300								

**Mögliche Störung der Messung**

Ankunft	Zeit:	Uhr	min	Zeit:	Uhr	min
Abgang	Zeit:	Uhr	min	Zeit:	Uhr	min
Sonstiges:	Zeit:	Uhr	min	Zeit:	Uhr	min

**Sonstiges/Notizen**

Abbildung 6.1: Beispiel eines der verwendeten Messformulare

## 6.2 Durchführung und Überblick

Bei der Durchführung eines Versuches musste das Messformular ausgefüllt werden, soweit die Informationen vorhanden waren. Weiters wurden vor und auch sofort nach jeder Messung *Screenshots* von der Software (siehe dazu Abschnitt 3.2.3) eines Kanals gemacht, falls bei diesem ein Sensor angeschlossen war. Der Hauptgrund dafür ist die Aufzeichnung der *Gain*- und *Level*werte um bei den Auswertungen und der Analyse der Versuche diese Informationen verwerten zu können. Aber auch die vielen anderen Informationen in den *Screenshots* wurden gespeichert, da die zum Zeitpunkt der Messung noch uninteressanten Daten zu einem späteren Zeitpunkt vielleicht doch aufschlussreiche Informationen liefern könnten. Desweiteren wurde die Anordnung der Sensoren überprüft und kontrolliert, ob die angegebene Sensorreihenfolge auch so angeschlossen war, wie notiert.

In Tabelle 6-1 ist ein Überblick aller Versuchsgruppen gegeben und kurz erklärt, zu welchem Zweck die Untersuchung durchgeführt wurde. Zu jeder Gruppe sind mehrere Experimente durchgeführt worden. Insgesamt sind dies circa 270 Messungen. In den folgenden Kapiteln werden meist immer nur ein bis zwei Versuche pro Gruppe gezeigt und interpretiert. Oft wurden zu den unterschiedlichen Versuchsreihen Vorversuche durchgeführt.

Tabelle 6-1: Überblick über die unterschiedlichen Versuchsgruppen

Versuchsgruppe	Kap.	Zweck	Datum	Anzahl	Fs [Hz]	Dauer je Versuch
Unterschiedliche Abtastraten $f_s$	7.1	STD bei verschiedenen Frequenzen von 20 kHz – 1 Hz	10.03.2009 25.03.2009 01.04.2009	12	variabel	5 Min
Referenzsensor 149 auf allen 4 Kanälen	7.2	Überprüfung ob sich die STD's bei Messung an verschiedenen Kanälen ändern und Herausfinden ob es zu Problemen kommt, wenn der Sensor auf Kanal 1 nicht angeschlossen wird	10.03.2009 23.03.2009	4x1 4x2	1000 1000	5 Min
			06.11.2009 06.11.2009	4x2 4x2	1000 100	2 Min
Tausch der Sensoren	7.3	Belegung von mehreren Kanälen; Sensoren werden auf allen Kanälen gemessen. Herausfinden wie sich STD in Abhängigkeit von Kanalnummer, Gain & Sensor verhält	22.10.2009 22.10.2009	9x1 9x1	1000 100	2 Min
			22.10.2009 22.10.2009	3x3 3x3	1000 100	
			06.11.2009 06.11.2009	3x3 3x3	1000 100	
			06.11.2009 06.11.2009	3x3 3x3	1000 100	
Tausch aller 4 Sensoren	7.3.1		10.09.2009	4x1	1000	10 Min
			23.10.2009 23.10.2009	4x2 4x2	1000 100	2 Min
			06.11.2009 06.11.2009	4x2 4x2	1000 100	2 Min
			20.11.2009 20.11.2009	9x1 9x1	1000 100	2 Min
Tausch der Sensoren mit Referenzsensor auf Kanal 1	7.3.2		23.10.2009 23.10.2009	9x1 9x1	1000 100	2 Min
			20.11.2009 20.11.2009	9x1 9x1	1000 100	
Signalstärke	7.4	Bewusste Erhöhung des Gains durch Krümmung der Anschlussfasern. Zusätzlicher Beweis, dass sich STD mit größerem Gain erhöht	22.04.2009	6x4	1000	2 Min
Langzeitmessungen	7.5	Wie verhält sich die STD bei Messung von einer Woche? Ähnliches Verhalten durch Parallelmessung mit Neigungssensor analysieren	7.4-14.4.09	4	100	1 d, 1d,
			13.-20.5.09	1	10	1 d, 7 d
			26.5.-2.6.09	1	10	7 d
			27.10.-3.11.09	1	100	6 d
						7 d

Tabelle 6-1 fortgesetzt						
Versuchsgruppe	Kap.	Zweck	Datum	Anzahl	Fs [Hz]	Dauer je Versuch
Detektion des Verkehrs durch SOFO Dynamic Messung	7.5.2	Beweis, dass Peaks in Zeitreihen-Messungen vom Verkehr in der Steyrgasse kommen	siehe 7.5 31.10.2009 1.11.2009 3.11.2009	1xNacht 1xNacht 1xTag		
Aufheizverhalten des SOFO Dynamic	8.1	Aufheizverhalten des Geräts wird untersucht. Herausfinden wie lange das Gerät eingeschaltet werden muss, bevor die Messung beginnen kann	18.03.2009 23.03.2009 31.03.2009 04.04. 2009 27.10.2009	1 1 1 1 1	100 250 100 100 100	3h 15h 15h 24h 24h
Langzeitdrift	8.2	Aufzeigen wie viel Drift mit Referenzsensor reduziert werden kann	7.4.-14.4.09 27.10-3.11.09	1 1	1 Min-Mean 1 Sek-Mean	7 d 7 d
SOFO Static vs. Dynamic	8.3	Vergleich der tatsächlichen Längenänderung mit den SOFO Dynamic Driften bzw. Längenänderungen	siehe Lanzeitdrift SOFO Static Messungen $\Sigma$ 7			
Absolute Bewegung der Komparatorbank	8.3.2	Tatsächliche Längenänderung der einzelnen Sensoren von März bis November 2009	7 mit SOFO Static			
Sinusähnliche Schwingungen	8.4	Möglicher Einfluss der Klimaanlage auf die Messung	13. Juli 2009 14. Juli 2009 16. Juli 2009 (Wechselrichter)	1 1 1	10 Hz 10 Hz 10 Hz	12 h 24 h 24 h
Untersuchung der Messzeitlänge	9	Überprüfen ob die Messung mit der berechneten Zeit übereinstimmt		28	variabel	
Sprung des Levels	10.1	Erklärung warum Level auf Null geht	Laufend in Verbindung mit den meisten Versuchen			
Phasensprünge	10.2	Problemläuterung Untersuchung Warum diese vorkommen!	siehe Langzeitmessung Mai 2009			
				$\Sigma$ ~ 270Messungen		

## 7 Untersuchungen zur Präzision

Die Daten der durchgeführten Experimente sind von Rauschen überlagert. Daher ist die Untersuchung des Rauschanteils beziehungsweise die Berechnung der Präzision ein zentraler Punkt dieser Arbeit. Nach Vorverarbeitung der Daten durch Anwendung eines Highpass und Bandstop-Filters (siehe Abschnitt 5.2) kann die Standardabweichung berechnet werden. In den folgenden Abschnitten wird die Präzision der Messdaten untersucht.

### 7.1 Unterschiedliche Abtaststraten $f_s$

Einer der ersten Versuche war die Untersuchung des Geräts in Bezug auf verschiedene Abtaststraten  $f_s$ , um zu überprüfen wie sich die Standardabweichung verhält, aber auch um das Gerät kennenzulernen. Die Standardeinstellung in der Software beträgt 20 kHz für die Frequenzeinstellung. Wenn eine kleinere Abtastrate gewünscht ist, kann dies durch den *Digital Average* (Standardeinstellung = 20, damit 1 kHz Standard) gesteuert werden. Detailliertere Informationen dazu siehe Abschnitt 3.2.2. Somit werden die Werte alle mit 20 kHz gemessen, aber je nach gewünschter Abtastrate gemittelt. Ziel war es dies zu überprüfen und herauszufinden,

ob wirklich gemittelt wird und die STD mit Erhöhung der Mittelung  $n$  um  $\frac{1}{\sqrt{n}}$  zurück

geht beziehungsweise bis zu welchem  $n$  das Gerät funktioniert. Dazu wird in Abbildung 7.1 eine Grafik gezeigt, die den Idealverlauf der STD bei den verschiedenen Abtaststraten wiedergibt. Dabei wurden für  $n$  die Werte des jeweiligen *Digital Average* eingesetzt, die aus Tabelle 7-1 zu entnehmen sind. Zu beachten ist, dass die Abszisse, die die Frequenz angibt, nicht äquidistant ist.

Tabelle 7-1: Abtaststraten über *Digital Average* gesteuert

Abtast-Frequenz $f_s$ [Hz]											
20 000	10 000	5 000	1 000	500	250	100	50	25	10	5	1
Digital Average											
1	2	4	20	40	80	200	400	800	2 000	4 000	20 000

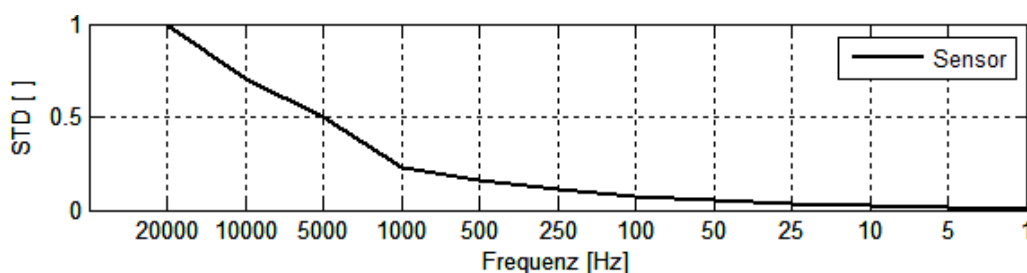


Abbildung 7.1: Rückgang der STD infolge von  $n$  bei verschiedenen Abtaststraten, (Abszisse nicht äquidistant)



Wie die Auswertung der praktischen Messungen mit dem theoretischen Idealverlauf übereinstimmt, wurde durch einen Versuch überprüft. Allgemeine Informationen zu den zwei Versuchen kann aus Tabelle 7-2 entnommen werden. Die Messung von Sensor 4277 wurde vom Vorversuch am 10. März 2009 eingefügt, da durch externen Einfluss die Messung vom 1. April 2009 für diesen Sensor unbrauchbar wurde.

**Tabelle 7-2: Allgemeine Informationen zum Versuch – Unterschiedliche Abtastraten  $f_s$**

	<b>Versuch</b>
<b>Datum der Messung</b>	1. April 2009
<b>Gerät ON vor Messbeginn</b>	20 h vor der Messung
<b>Abtastfrequenzen <math>f_s</math></b>	in 12 Schritten: 20 kHz, 10 kHz, 5 kHz, 1kHz, 500 Hz, 250 Hz, 100 Hz, 50 Hz, 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz
<b>Dauer der Messung</b>	je $f_s$ 5 Minuten

In Tabelle 7-3 werden Informationen zu den einzelnen Sensoren aufgelistet. Dabei sind vor allem die jeweiligen durchschnittlichen *Gain* und *Level*werte (siehe Abschnitt 3.2.3) wichtig.

**Tabelle 7-3: Gain- und Levelwerte beim Versuch**

<b>Kanal</b>	<b>Sensor SN</b>	<b>~ Gain/Level [%]</b>
#1	149	37/10
#2	5433	27/10
#3	4277 (10. März 2009)	100/10
#4	2358+C151	100/2

Wie in Abbildung 7.2 zu sehen ist, wird die Frequenz von 20 kHz auf 1 Hz in unterschiedlich großen Schritten variiert, die für spätere Einsätze plausibel erscheinen (siehe Tabelle 7-1). Bei Betrachtung der Graphik ist als Vorzeigebeispiel der Referenzsensor 149 zu nennen. Bei diesem Sensor wird der Verlauf in Abbildung 7.1 annähernd wiedergegeben.

Weiters ist erkenntlich, dass die robuste Standardabweichung bei den Sensoren 5433 und 4277 (siehe Tabelle 7-4) bei den hohen Abtastraten von 20 bis 1 kHz eine bessere STD aufweisen als der Referenzsensor 149, obwohl dieser einen besseren Gainwert hat, als Sensor 4277. Dieses Gain/Level-Verhältnis von 4277 ist aber noch durchaus im Bereich, wo die STD gegenüber dem Normalwert noch nicht signifikant schlechter ist, wie im nächsten Abschnitt 7.3 gezeigt wird. In einer anderen Größenordnung befindet sich die STD von Sensor 2358. Dieser weist aufgrund des zwischengeschalteten Adapters C151 (siehe Abschnitt 4.3.4) und kleineren Signalstärke eine Standardabweichung auf, die circa viermal so groß ist als beispielsweise die des Referenzsensors 149.

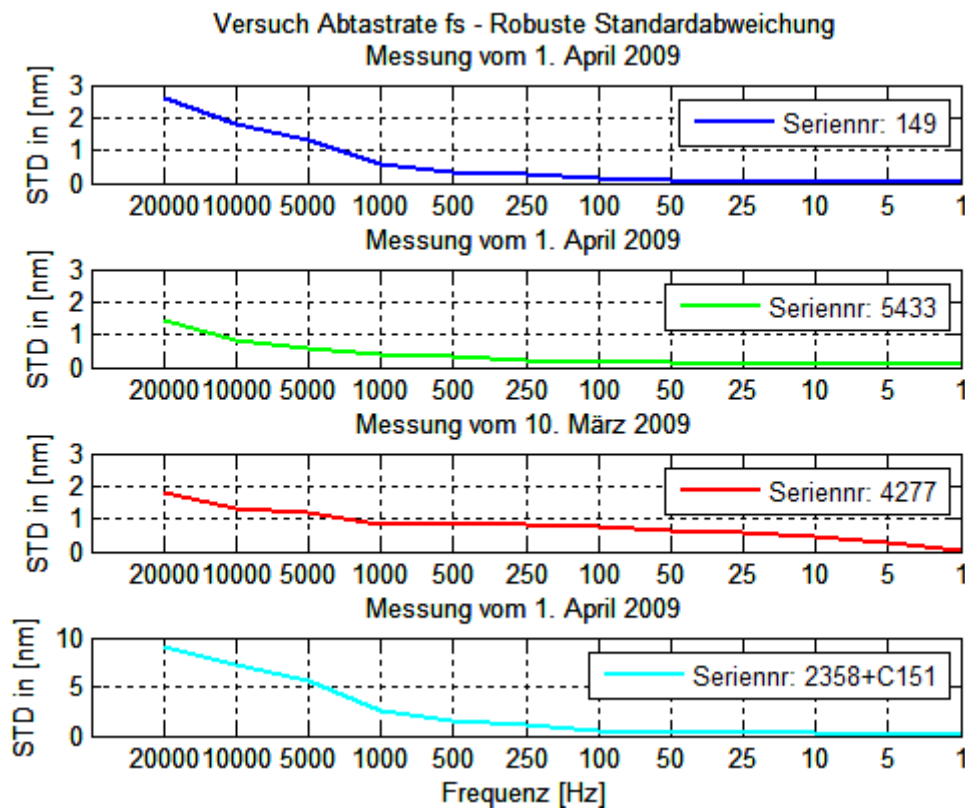


Abbildung 7.2: STD in Abhängigkeit verschiedener Abtastraten, je 5 Minuten Aufzeichnungsdauer

Tabelle 7-4: STD's der Messungen bei verschiedenen Abtastraten  $f_s$

	robuste STD [nm] bei verschiedenen Abtastraten $f_s$ [Hz]			
Abtastrate [Hz]	Kanal#1SN 149	Kanal #2 SN 5433	Kanal #3 SN 4277 10.03.2009	Kanal #4 SN 2358C
20 000	2.58	1.44	1.79	9.03
10 000	1.81	0.81	1.35	7.34
5 000	1.31	0.61	1.21	5.71
1 000	0.56	0.37	0.83	2.61
500	0.36	0.33	0.83	1.56
250	0.26	0.24	0.81	1.09
100	0.14	0.16	0.74	0.58
50	0.08	0.14	0.64	0.33
25	0.05	0.09	0.58	0.23
10	0.06	0.09	0.45	0.26
5	0.03	0.06	0.26	0.18
1	0.01	0.06	0.02	0.06

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die STD's ungleich auf den unterschiedlichen Kanälen sind. Speziell bei den höheren Abtastraten ist die STD gut, obwohl das Gain/Level-Verhältnis schlechter ist. Um nun herauszufinden, wie groß die STD ist, wenn nur der Referenzsensor 149 verwendet wird und dieser an verschiedenen Kanälen angeschlossen ist, wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

## 7.2 Referenzsensor 149 auf allen 4 Kanälen

Die Überprüfung, ob sich die vom Hersteller angegebene Empfehlung, den Referenzsensor am Kanal 1 anzuschließen, als richtig erweist, wird in diesem Abschnitt untersucht. Es wurde nur der Referenzsensor mit der Seriennummer 149 an die Kanäle 1 bis 4 angeschlossen. Die drei restlichen Kanäleingänge pro Messung waren nicht besetzt und mit Schutzkappen geschützt (siehe Abbildung 7.3 und Tabelle 7-6).

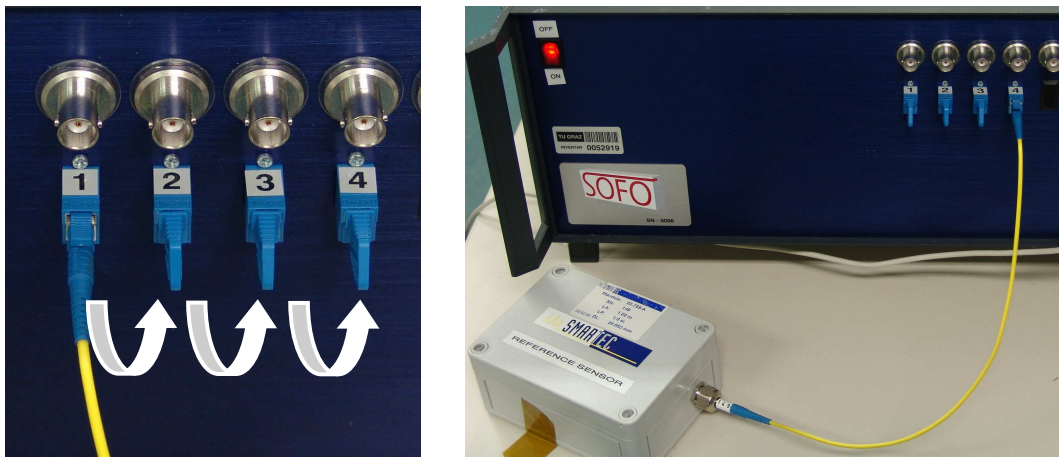


Abbildung 7.3: Nur der Referenzsensor wurde jeweils an einem Kanal von 1-4 angeschlossen

Somit wurde von den Daten jedes Kanals, bei dem der Referenzsensor angeschlossen war, die STD berechnet. In Tabelle 7-5 sind die allgemeinen Informationen zu den Versuchen aufgelistet.

Tabelle 7-5: Allgemeine Informationen zu den Versuchen

	Versuch 1	Versuch 2	
Datum der Messung	23. März 2009	6. November 2009	
Gerät ON	3.5 h vor der Messung	20 h vor der Messung	
Dauer der Messung	je 5 Minuten	je 2 Minuten	
Anzahl der Messungen	2x4	2x4	2x4
fs Abtastfrequenzen	1 kHz	1 kHz	100 Hz

Tabelle 7-6: Messanordnung des Referenzsensors 149

Kanal	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
# 1	149	-	-	-
# 2	-	149	-	-
# 3	-	-	149	-
# 4	-	-	-	149

In Abbildung 7.4 werden die Messungen mit dem Referenzsensor in Abhängigkeit von den *Gain*- bzw. *Level*werten und der Kanalnummer miteinander verglichen. Die auf der Abzisse dargestellten Gain/Level-Verhältnisse steigen für Gain bis 100%, der Level bleibt bis dahin immer auf circa 10%. Falls sich der Gain noch stärker erhöht

und die Anzeige trotzdem auf 100 bleibt, fällt der Level immer mehr bis der Level nahe 0% erreicht wird. Dabei ist erstens gut zu erkennen, dass die STD bei höher werdendem im *Gain* zunimmt und ab  $\text{Gain}=100$  sogar drastisch ansteigt. Die hohen Gainwerte sind beim Versuch 1 am 23. März 2009 vorgekommen. Dies liegt eventuell daran, dass die Kanaleingänge und die Sensormatings erst nach Versuch 1 mit Spezialreinigungsmittel (Sopropanol) geputzt wurden. Weiters ist im oberen Plot zu sehen, dass die STD's bis zum Gainwert von 40% bei circa 0.5 nm liegen. Dabei spielt die Kanalnummer keine Rolle. Im unteren Plot werden die STD's gezeigt, die mit 100 Hz gemessen wurden und circa 0.15 nm betragen. Diese Werte entsprechen auch denen in Tabelle 7-4.

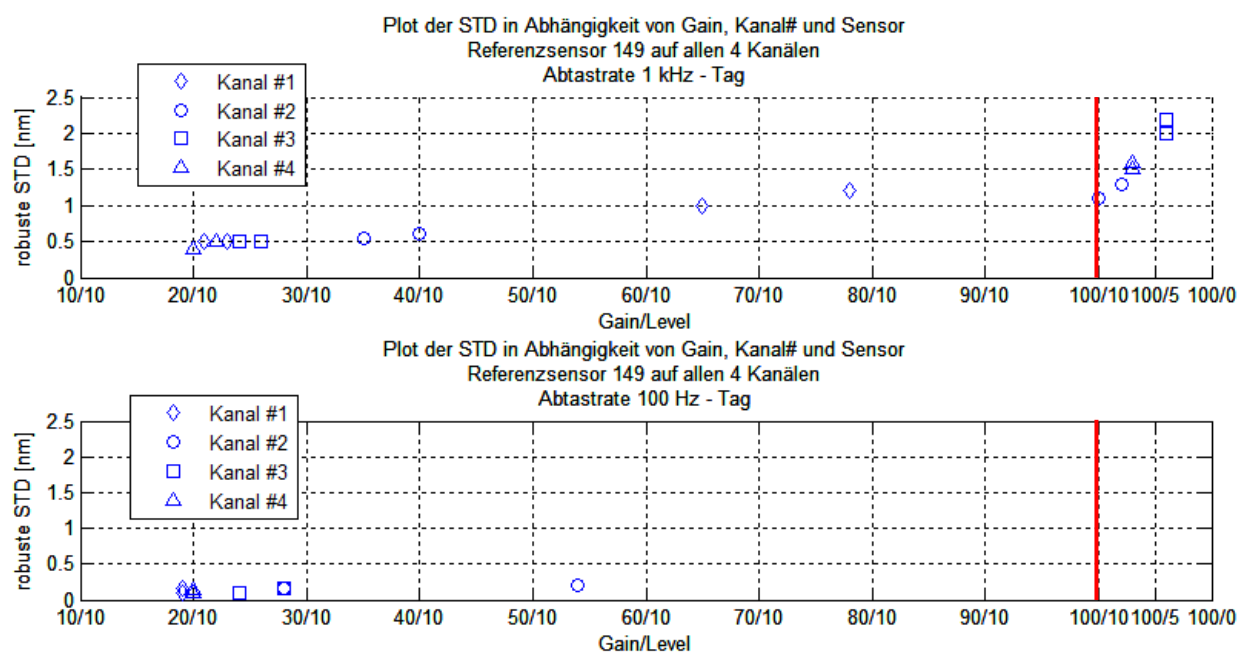


Abbildung 7.4: Plot der STD des Referenzsensors (SN:149) in Abhängigkeit von Gain und Kanalnummer, bei beliebigem Zustand der Stecker (siehe Text)

Somit ist die Erkenntnis, dass die Kanalnummer in Bezug auf die STD keine Rolle spielt, sondern der Gain die Präzision verschlechtert.

Hier wurde der Referenzsensor alleine auf den verschiedenen Kanälen angeschlossen und somit die Empfehlung vom Hersteller, dass Kanal 1 immer belegt sein muss, nicht eingehalten. Deswegen wird im nächsten Abschnitt untersucht, wie gut die STD's sind, wenn alle Kanäle mit verschiedenen Sensoren besetzt werden.

### 7.3 Tausch der Sensoren

#### 7.3.1 Tausch aller 4 Sensoren

Bei dieser Versuchsreihe waren immer alle 4 Kanäle der *SOFO Dynamic RU* besetzt (siehe Abbildung 7.5). Es werden insgesamt vier Versuche, die an unterschiedlichen Tagen durchgeführt wurden, für die Analyse verwendet, da somit genügend Messdaten für den Zweck der Untersuchung vorhanden sind. In Tabelle 7-7 werden allgemeine Informationen zu den Versuchen angegeben.

Tabelle 7-7: Allgemeine Informationen zu den vier Versuchen

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Datum der Messung	24.03.2009	10.09.2009	23.10.2009	6.11.2009
Gerät ON vor der Messung	1.5 h	28 h	~41 h	22 h
Dauer der Messung	je 10 Minuten	je 10 Minuten	je 2 Minuten	je 2 Minuten
Anzahl der Messungen	2x4	1x4	2x4	2x4
Abtastfrequenzen $f_s$	1 kHz	1 kHz	1 kHz	1 kHz

Jeder Sensor (149, 5433, 4277, 4275) wurde jeweils einmal auf allen vier Kanälen angeschlossen, wobei immer alle Kanäle belegt waren. Das heißt, pro Messung wurden die Daten von allen vier Sensoren aufgezeichnet.

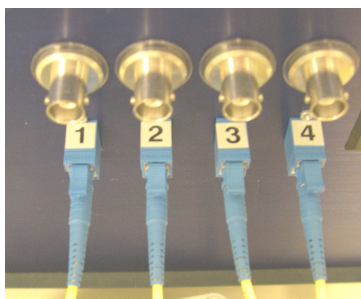


Abbildung 7.5: Alle vier Kanäleingänge mit Sensoren besetzt

In Tabelle 7-8 werden die Kombinationen dargestellt, nach denen bei den Versuchen vorgegangen wurde. Alle verwendeten Kombinationen und die Angabe der einzelnen Gain- und Levelwerte sind im Anhang C vorzufinden.

Tabelle 7-8: Ansteckvarianten der Sensoren

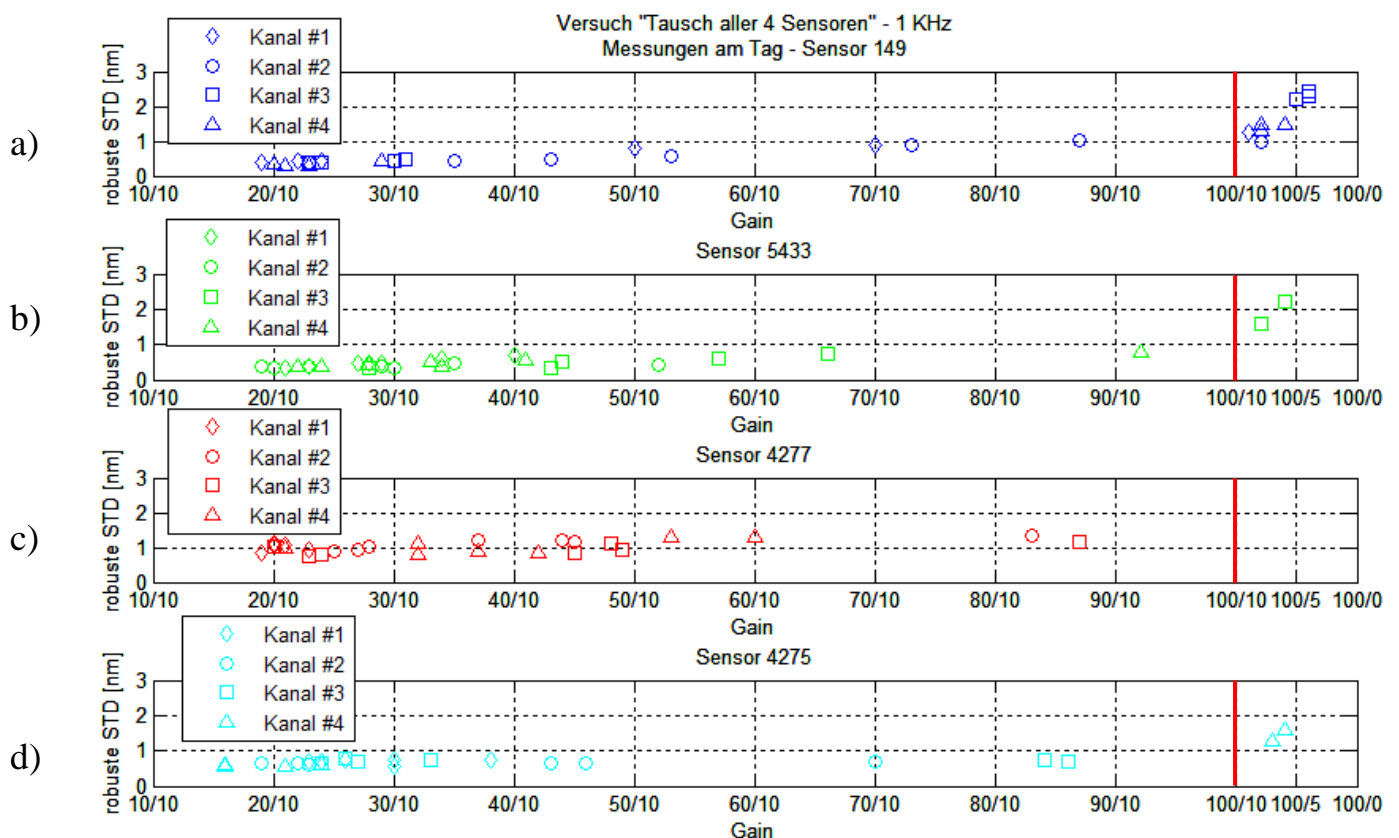
Kanal	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
# 1	149	4277	4275	5433
# 2	4277	149	5433	4275
# 3	4275	5433	149	4277
# 4	5433	4275	4277	149

In Abbildung 7.6 werden die STD's der Messungen in Abhängigkeit vom Gain, der Kanalnummer und den Sensoren dargestellt. Dabei können beim Referenzsensor 149 und den anderen Sensoren wieder folgende STD's festgestellt werden, die in Tabelle 7-9 aufgelistet werden. Dies gilt, falls die Gain/Level-Werte im Normalbereich von 20/10 bis 40/10 sind.

**Tabelle 7-9: Auf allen vier Kanälen auftretende robuste STD's der einzelnen Sensoren, bei 1 kHz Abtastrate**

Sensor SN	robuste STD [nm]
149	~0.4
5433	~0.4
4277	~1.0
4275	~0.7

Durch Abbildung 7.6 wird gezeigt, dass die STD's bei den einzelnen Sensoren nicht vom Kanal, wohl aber vom Gain/Level-Verhältnis abhängen. Auffallend ist, dass die Gains bei allen Sensoren auf Kanal #1, bis auf eine Ausnahme, nie hohe Werte aufweisen.



**Abbildung 7.6: Plot der STD's in Abhängigkeit von Gain, Kanalnummer und Sensor, (a) Sensor 149, (b) Sensor 5433, (c) Sensor 4277, (d) Sensor 4275**

Die Untersuchung, wie groß die STD's der Sensoren 5433, 4277 und 4275 sind, wenn der Referenzsensor 149 immer auf Kanal 1 bleibt (wie vom Hersteller *Smartec SA* empfohlen) wird im Folgenden behandelt.

### 7.3.2 Tausch der Sensoren mit Referenzsensor auf Kanal 1

In diesem Abschnitt wird analysiert, ob es einen Unterschied in den STD's zu den vorhergehenden Untersuchungen gibt, wenn der Referenzsensor 149 bei allen Messungen auf Kanal #1 bleibt und die anderen Sensoren oft umgesteckt werden. Insgesamt wurden zu diesem Thema vier Versuche an unterschiedlichen Tagen durchgeführt, siehe Tabelle 7-10.

Tabelle 7-10: Allgemeine Informationen zu den Versuchen

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Datum der Messung	22.10.2009	20.11.2009	23.10.2009	20.11.2009
Gerät ON vor der Messung	~21 h	~41 h	~46 h	~43 h
Dauer der Messung	je 2 Minuten			
Anzahl der Messungen	1x9 mit 1 kHz, 1x9 mit 100 Hz			

Die bei den Versuchen verwendeten Sensoren waren so angeordnet, wie in Tabelle 7-11 und Tabelle 7-12 dargestellt, wobei der Referenzsensor 149 nie abgesteckt wurde. Im Gegensatz zu den ersten beiden Versuchen waren bei Versuch 3 und 4 immer alle Kanäle belegt um bei der Analyse mögliche Unterschiede feststellen zu können. Hier wurde auch mit der Frequenz von 100 Hz gemessen um zu schauen, ob die unterschiedliche Abtastrate bei dieser Anordnung einen Einfluss hat.

Tabelle 7-11: Messanordnung bei den Versuchen 1 und 2

Kanal	Set 1.1	Set 1.2	Set 1.3	Set 2.1	Set 2.2	Set 2.3	Set 3.1	Set 3.2	Set 3.3
# 1	149	149	149	149	149	149	149	149	149
# 2	5433	-	-	4277	-	-	4275	-	-
# 3	-	5433	-	-	4277	-	-	4275	-
# 4	-	-	5433	-	-	4277	-	-	4275

Tabelle 7-12: Messanordnung bei den Versuchen 3 und 4

Kanal	Set 1.1	Set 1.2	Set 1.3	Set 2.1	Set 2.2	Set 2.3	Set 3.1	Set 3.2	Set 3.3
# 1	149	149	149	149	149	149	149	149	149
# 2	5433	4275	4277	4277	4275	5433	4275	4277	5433
# 3	4277	5433	4275	5433	4277	4275	5433	4275	4277
# 4	4275	4277	5433	4275	5433	4277	4277	5433	4275

In Abbildung 7.7 werden die STD's der einzelnen Sensoren bei einer Abtastrate von 1 kHz und 100 Hz in Abhängigkeit von *Gain*- bzw. *Level*wert und der Kanalnummer dargestellt. Bei den Sensoren 149 und 5433 beziehungsweise 4277 und 4275 ist festzustellen, dass sich die robusten STD's von 100 Hz und 1 kHz mit den Ergebnis-

sen der vorhergehenden Untersuchungen decken. Tabelle 7-13 fasst die durchschnittliche Standardabweichung der einzelnen Sensoren zusammen.

Tabelle 7-13: Robuste STD's der einzelnen Sensoren

Sensor	robuste STD [nm]	
	1 kHz	100 Hz
149	~0.4	~0.1
5433	~0.4	~0.2
4277	~1.0	~0.7
4275	~0.6	~0.5

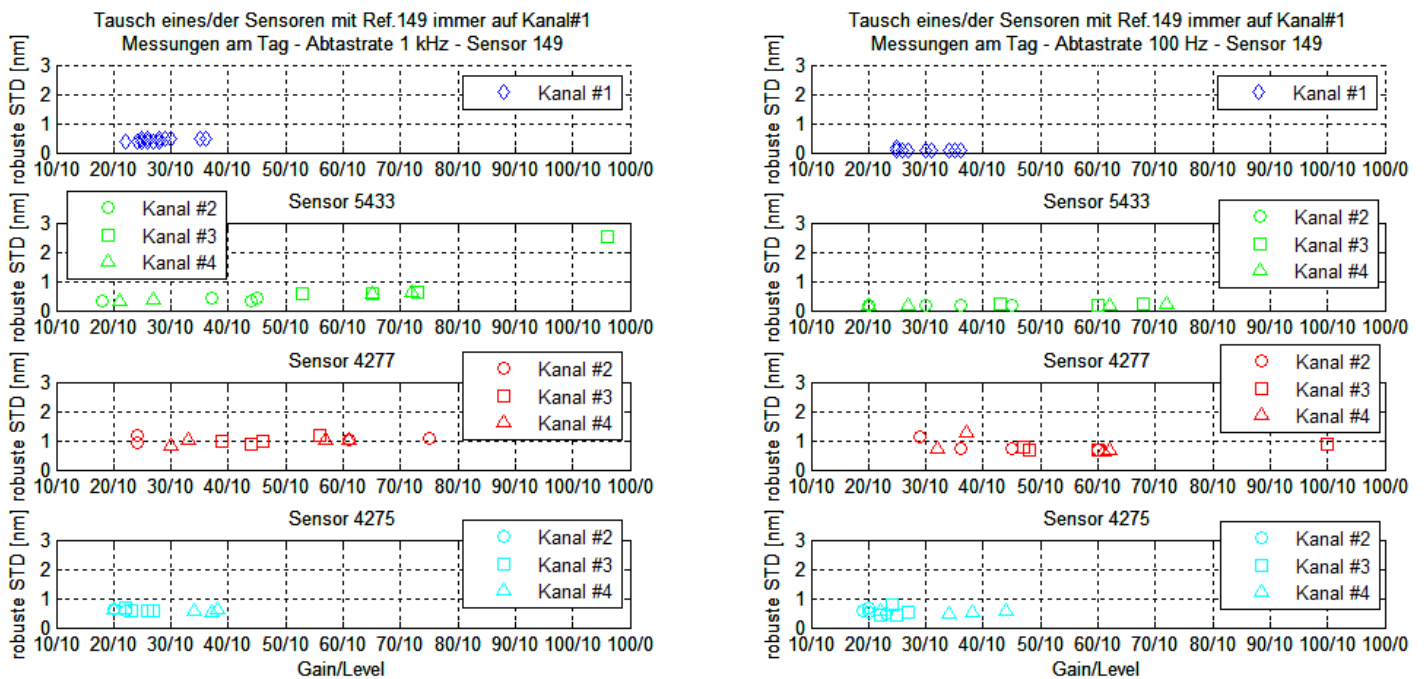


Abbildung 7.7: Plot der STD in Abhängigkeit des Gains, der Kanal# und dem Sensor, (links) 1kHz und (rechts) 100 Hz Daten

Somit konnte festgestellt werden, dass es keinen Unterschied macht, ob alle oder nur der jeweilige Sensor plus Referenzsensor am Gerät angesteckt sind beziehungsweise die STD's auch bei 100 Hz, wie in Abschnitt 7.1 festgestellt, besser sind. Im nächsten Abschnitt wird nochmals überprüft, ob die STD mit der Erhöhung des Gain und dadurch mit der Verringerung des Levelwertes steigt.



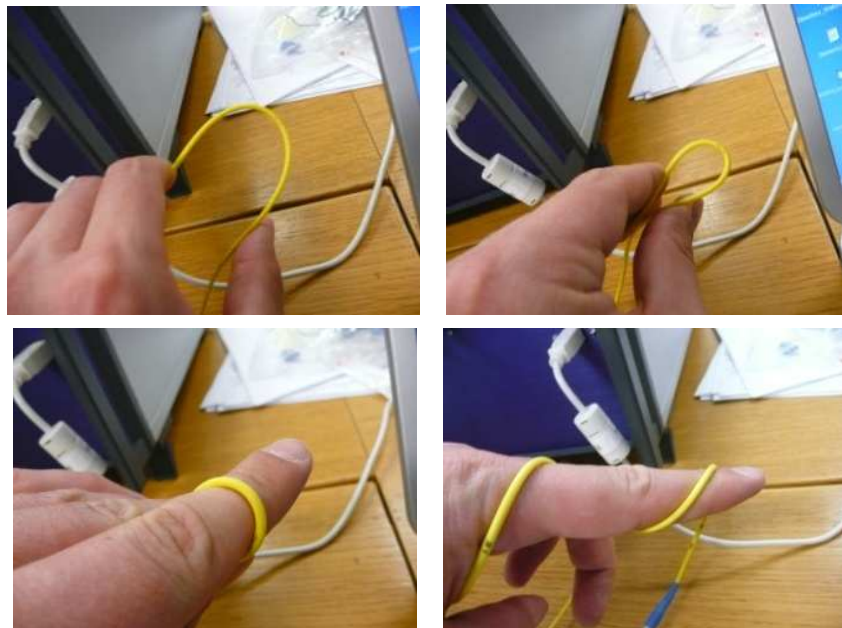
## 7.4 Signalstärke

Bei dieser Versuchsreihe geht es um die Untersuchung der Signalstärke. Es gilt herauszufinden wie sich die *Gain* und *Level*-Werte bei Krümmung der Anschlussfasern beziehungsweise als Folge die Standardabweichungen ändern. Tabelle 7-14 gibt Auskunft über allgemeine Informationen zum Versuch.

**Tabelle 7-14: Allgemeine Informationen zum Versuch**

<b>Datum der Messung</b>	22. April 2009
<b>Gerät ON vor der Messung</b>	3 h
<b>Dauer der Messung</b>	je 2 Minuten
<b>Anzahl der Messungen</b>	7x mit SN 149 8x mit SN 4277 7x mit SN 5433 8x mit SN 2358C
<b>fs Abtastfrequenzen</b>	1 kHz

Die gelben Anschlussfasern wurden in einigen Schritten immer mehr mit der Hand gekrümmt, wie Abbildung 7.8 zeigt. Durch die Krümmung steigt der *Gain*-Wert je nach Stärke bis zum Höchstwert 100% an, da dadurch Signalverluste entstehen. Wie in Abschnitt 3.2.1 erklärt, zeigt der *Level* an wie gut die Verstärkung des Signals noch funktioniert beziehungsweise was und wie viel vom Signal noch zurückkommt. Dieser Wert sinkt mit der Erhöhung der Krümmung. Deswegen geht der *Level*, von seinem anfänglichen Normalwert von circa 10% auf nahe 0% herunter.



**Abbildung 7.8: Visuelle Veranschaulichung der (oben) leichten und (unten) stärkeren Krümmung der Sensoren mit der Hand**

Es waren immer alle Sensoren an der *SOFO Dynamic RU* angeschlossen. Bei der Messung selbst wurde aber immer nur ein Sensor in der Reihenfolge gekrümmt, wie in Tabelle 7-15 gezeigt. In Abbildung 7.9 ist der Verlauf der Standardabweichung je nach Krümmungsstufe (K) zu erkennen. Dabei steht K0 für keine Krümmung und K1 bis K7 für immer stärker werdende Krümmungen.

Die STD ist in ihrer Größe zwar je nach Sensor unterschiedlich groß, wie die Analyse der vorhergehenden Experimente schon gezeigt hat, aber die Zunahme der STD ist gut sichtbar (siehe Tabelle 7-15). Bei Sensor 5433 wurde zu wenig gekrümmt, deswegen ist keine Steigung zu sehen, wie in Abbildung 7.9 gezeigt wird. Sensor 2358 stellt insofern die Ausnahme dar, da dort der Kompensator C151 zwischengeschaltet ist. Durch diesen Ausgleichsadapter muss von Anfang an das Signal erhöht werden, dadurch ist auch die *Gain*-Anzeige von Beginn an auf 100% und als Folge der *Level* nahe 0%. Somit konnte beim Sensor 2358+C151 kein steigender Trend festgestellt werden, sondern im Mittel gesehen blieb der Wert der STD derselbe.

Tabelle 7-15: Numerische Ergebnisse der STD's vom Versuch

Kanal#: Sensor	robuste Standardabweichungen in [nm]							
	K0...keine Krümmung, K7...stärkste Krümmung							
	K0	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
#1: 149	0,4	0,5	1,3	1,4	6,1	4365,1	4389,6	-
#2: 4277	0,8	1,1	1,1	1,2	1,3	1,2	2,9	2513,2
#3: 5433	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	4612,7	4365,6	-
#4: 2358C	5,0	1,6	5,2	6,3	10,1	5,2	2,6	4433,3

Die Erkenntnis ist also, wie auch schon im Abschnitt 7.2 festgestellt, dass sich die STD bei steigendem *Gain* und sinkendem *Level* erhöht. Dieser Vorgang ist in etwa linear bis zum *Gain* – *Level* Verhältnis von 100% – 1%. Wenn die Anschlussfasern noch weiter mit der Hand gekrümmt werden, dann steigt die STD sprunghaft auf mehrere tausend Nanometer an. Dieser abrupte Anstieg kann nur damit erklärt werden, dass das durchgehende Lichtsignal so schwach wird bis es nicht mehr detektiert wird.

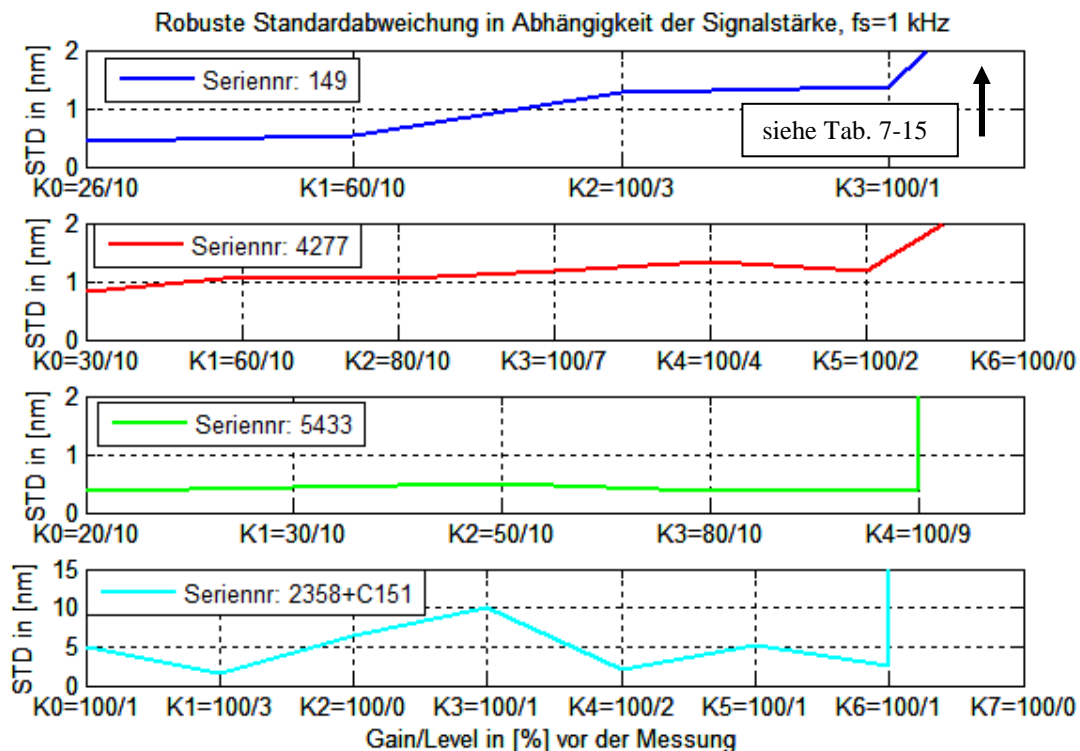


Abbildung 7.9: STD bei *Gain/Level*-Werten infolge Krümmung der Anschlussfasern mit der Hand

Die Erkenntnisse aus diesem Versuch bestätigen die Ergebnisse der Experimente von den Abschnitten 7.2 und 7.3. Somit wurde gezeigt, dass *Gain* und *Level* die STD in Ihrer Güte beeinflussen.

## 7.5 Langzeitmessungen

Um herauszufinden wie sich die Standardabweichung in Bezug auf Langzeitmessungen mit dem *SOFO Dynamic* Messgerät verhält, wurden mehrere Versuche durchgeführt, wobei in etwa eine Woche gemessen wurde.

### 7.5.1 Langzeitmessung mit *SOFO Dynamic* und Wyler Neigungssensor

Als Beispiel wird die Zeitreihe einer Langzeitmessung analysiert und gezeigt (siehe Tabelle 7-16). Vom Dienstag, 27. Oktober bis Dienstag, 3. November 2009 wurden jeweils Messungen von 24 Stunden mit Unterbrechungen von circa einer  $\frac{3}{4}$  Stunde gemessen, die dazu benötigt wurden um *Screenshots* der *Gain*- und *Level*werte aufzuzeichnen und um *SOFO Static* Messungen durchzuführen (siehe Abschnitt 8.3). Die Angabe der *Gain*- und *Level*werte für die einzelnen Messtage der Langzeitmessung können im Anhang D eingesehen werden.

Tabelle 7-16: Informationen zur Langzeitmessung

<b>Datum der Messung</b>	27. Oktober – 3. November 2009
<b>Gerät OFF vor Messung</b>	4 Tage
<b>Gerät ON vor Messung</b>	25 Minuten
<b>Dauer der Messung</b>	je 24 Stunden
<b>Anzahl der Messungen</b>	insgesamt 7
<b>Abtastfrequenzen <math>f_s</math></b>	alle 100 Hz
<b>Restart Modulation</b>	vor jeder der 7 Messungen

Nach Hochpassfilterung und robuster Ausreißerdetektion der Rohdaten wurden die ermittelten Daten in 5 Minuten-Intervalle eingeteilt und von jedem Intervall (30 000 Messwerte) die robuste STD berechnet. Der Bandstop-Filter wurde hier nicht eingesetzt, da sonst der Einfluss des Verkehrs nicht mehr in den STD's erkennbar wäre und gerade dieser gezeigt werden soll (siehe Abschnitte 5.2.1 ff). Bei Betrachtung von Abbildung 7.10 kann ein Zyklus beziehungsweise eine Periodizität im Verlauf der Zeitreihe festgestellt werden, wo am Tag höhere Standardabweichungen als in der Nacht vorhanden sind. Einerseits wurde mit dem *SOFO Dynamic* Gerät gemessen. Dort verdeutlichen diesen Verlauf besonders die Sensoren mit der Seriennummer 4277 und 4275. Der Referenzsensor 149 ist, wie im Graph gut ersichtlich, von den Einflüssen so gut wie nicht berührt worden und hat eine annähernd konstante STD  $\sim 0.15$  nm vorzuweisen.

Andererseits wurde parallel und zeitsynchron (auf circa 1 Sekunde genau) zur SOFO Messung ein Neigungssensor der Firma *Wyler* (Schweiz) dazu geschaltet, der am hinteren Ende der Komparatorbank neben dem Interferometer aufgebaut war (siehe Detailinformationen im Anhang B.2 bzw. Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3). Dies hatte den Zweck, um überprüfen zu können, wie sich die Komparatorbank in ihrer Neigung verändert. Wie schon bei der Langzeitmessung mit der *SOFO Dynamic RU* wurde auch hier aus den Rohdaten des Neigungssensors (ca. 35 Hz) die Standardabweichung im fünf Minuten-Intervall berechnet. Es konnte dadurch ein ähnliches Verhalten der STD des Neigungssensors wie bei der Messung mit den SOFO Sensoren festgestellt werden. Die Erkenntnis daraus ist, dass auch hier ein eindeutiger Tag – Nacht Zyklus zu sehen ist.

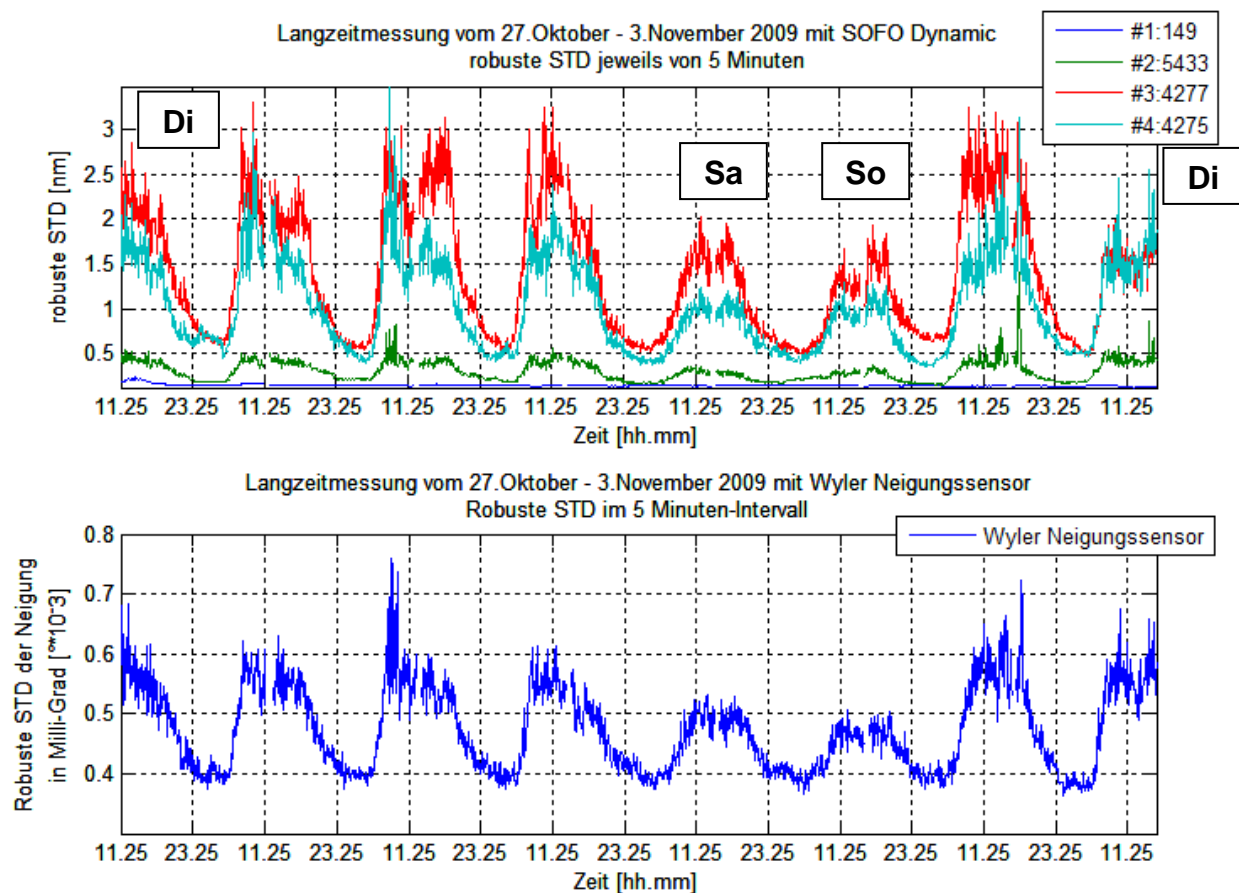


Abbildung 7.10: Robuste Standardabweichung der Langzeitmessung

Aufgrund dieses Verhaltens der STD bei beiden Messgeräten, das auch schon bei den früheren Langzeitmessungen festgestellt wurde, ist die Vermutung aufgekommen, dass der hohe Tagesgang der STD eventuell durch den Verkehr auf der angrenzenden Steyrgasse beziehungsweise durch andere Störeinflüsse hervorgerufen wird. Bei Betrachtung der Abszisse von Abbildung 7.10 werden äquidistante Zeitpunkte angezeigt, die die Tage (11.25 Uhr entspricht dem Messstart der 1. Messung) und für die Nächte (23.25 Uhr) darstellen. Einfach erklärt tritt am Tag, beginnend zwischen 7 und 8 Uhr, ein eventuell verstärktes Verkehrsaufkommen aufgrund des Berufsverkehrs ein. Gleichzeitig erhöht sich auch die Standardabweichung und bleibt dann bis circa 18 Uhr auf hohem Niveau. Der absolute Tiefpunkt der STD tritt von etwa 2 bis 4 Uhr früh ein. Auch hier ist es plausibel, dass dort auch der Verkehr am geringsten ist. Ein weiteres interessantes Phänomen ist in Abbildung 7.10 gut erkennbar. Am Wochenende, wenn der Berufsverkehr ausfällt, geht auch die Standardabweichung im gesamten Tag-Nacht-Zyklus zurück.

Um den Verkehr auch in den SOFO Dynamic Messdaten finden zu können wurde bei der gezeigten Langzeitmessung eine Untersuchung mit Fokus auf die Detektion des Verkehrs durchgeführt, welche im nächsten Abschnitt näher erklärt wird.

### 7.5.2 Detektion des Verkehrs durch SOFO Dynamic Messung

In der Zeit der beschriebenen Langzeitmessung im vorhergehenden Abschnitt 7.5.1 wurde der Verkehr zu bestimmten Zeiten für maximal 20 Minuten auf der Steyrergasse im Bereich des Labors am Tag und in der Nacht beobachtet (siehe Abbildung 7.11).

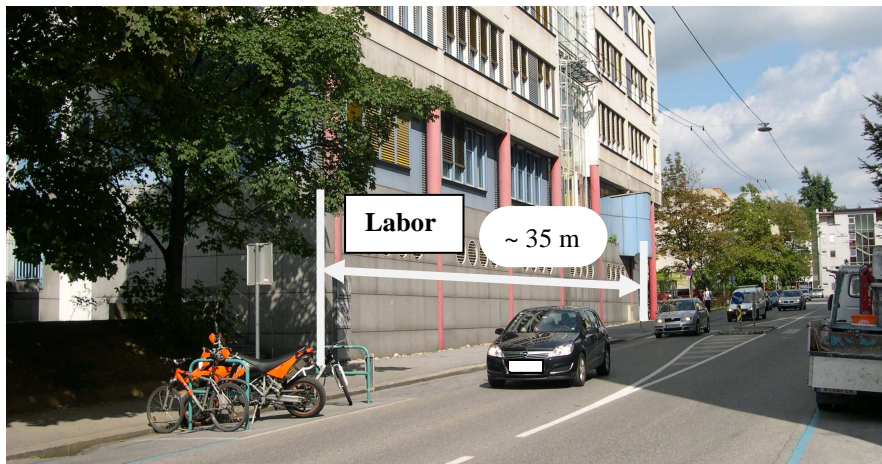


Abbildung 7.11: Laboraußenwand und befahrene Steyrergasse

In Abbildung 7.12 wird die mit einem Hochpassfilter versehene Zeitreihe der *SOFO Dynamic* Messdaten in der Nacht gezeigt (versetzt um jeweils 50 nm). Es wurde von jedem Fahrzeug der Zeitpunkt notiert, das von 3.33 Uhr bis 3.53 Uhr die Steyrergasse in diesem Stück passierte. In der Graphik ist gut zu erkennen, dass die notierten Zeitpunkte in der Abszisse gut mit den Peaks in der Zeitreihe übereinstimmen. Wenn die STD's, die in der Abbildung pro Sensor angegeben sind, mit den berechneten aus dem Abschnitt 7.3.2 (100 Hz Messung) verglichen werden, kann festgestellt werden, dass diese von der Größenordnung sehr ähnlich sind.

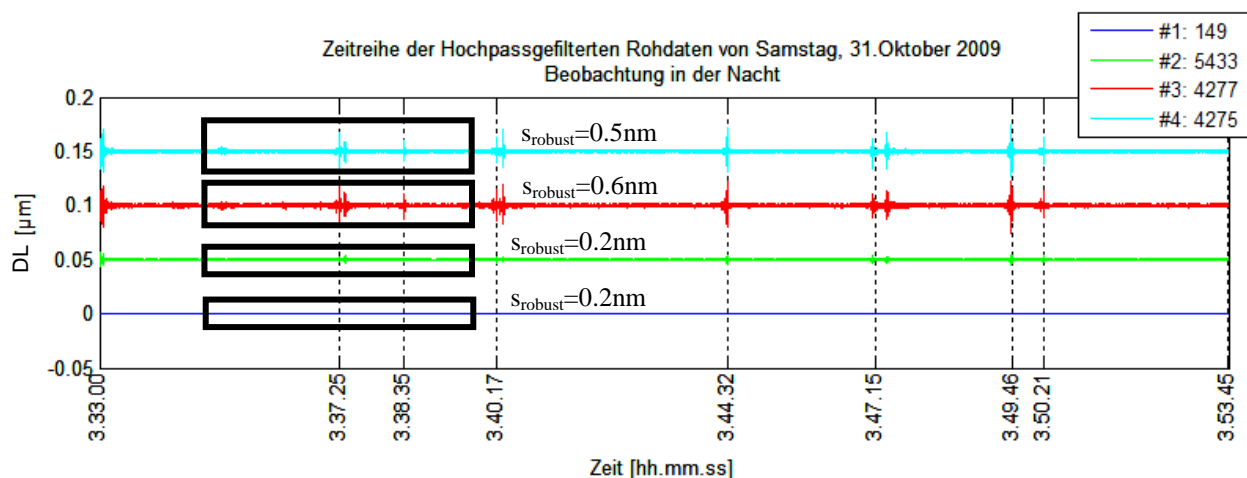


Abbildung 7.12: Zeitreihe der *SOFO Dynamic* Daten - Verkehr in der Nacht beobachtet

In Abbildung 7.13 wird ein etwa halb so langer Ausschnitt von einer Beobachtung am Tag gezeigt. Dabei wurde im Gegensatz zur Nacht, eine Fotoserie am Dienstag, dem 3. November 2009 von 13.45.48 Uhr bis 13.57.44 Uhr durchgeführt. Im Vergleich zum Ausschnitt in der Nacht ist die Tagesbeobachtung durch ein vielfaches mehr an Peaks gekennzeichnet, was Folge eines höheren Verkehrsaufkommens ist.

Durch Verwendung einer Fotokamera konnte die Zeit mit der kleinsten Einheit Sekunden gespeichert werden. Bevor die Fotoaufnahmen begannen, sind die Zeiten vom Computer der *SOFO Dynamic* Messung mit der Uhr der Fotokamera synchronisiert worden. In Abbildung 7.13 wurde von einem ausgewählten 5 Minutenintervall, die robuste STD vom jeweiligen Sensor für den Tag angegeben. Diese ist bei Sensor 4277 und 4275 um das Dreifache höher als in der Nacht.

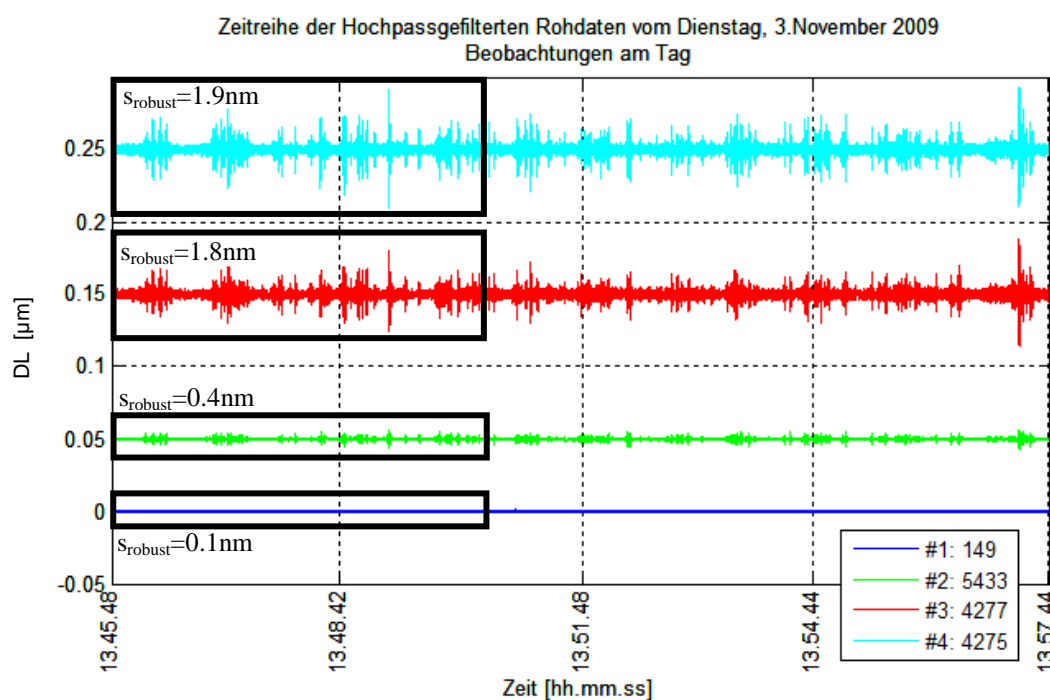


Abbildung 7.13: Zeitreihe der SOFO Dynamic Daten - Verkehr am Tag beobachtet, (zur besseren Visualisierung um 5 bzw. 10 nm versetzt)

In der nächsten Abbildung 7.14 wird ein Teil der in Abbildung 7.13 gezeigten Zeitreihe am Tag dargestellt. Dabei sind die Zeitpunkte der auf der Abszisse aufgetragenen Zeitpunkte die Zeiten an denen die Fotos gemacht wurden. Zur Unterscheidung der verschiedenen Szenarien in den Bildern sind Farbunterscheidungen vorgenommen worden, die unterhalb der Grafik erläutert werden.

Im Zeitreihenplot der Abbildung 7.14 wurde die STD von einem Abschnitt am Tag gerechnet wo kein Verkehr beobachtet werden konnte. Die STD am Tag ohne Verkehr ist größer als die STD in der Nacht. Dies gibt den Hinweis, dass am Tag noch andere Einflüsse durch das *SOFO Dynamic* Messgerät detektiert werden, diese aber nicht eruiert werden können. Mögliche Störfaktoren könnten zum Beispiel Schwingungen durch Baustellen, die Straßenbahn in der Münzgrabenstraße oder Personen in den Gebäuden sein.

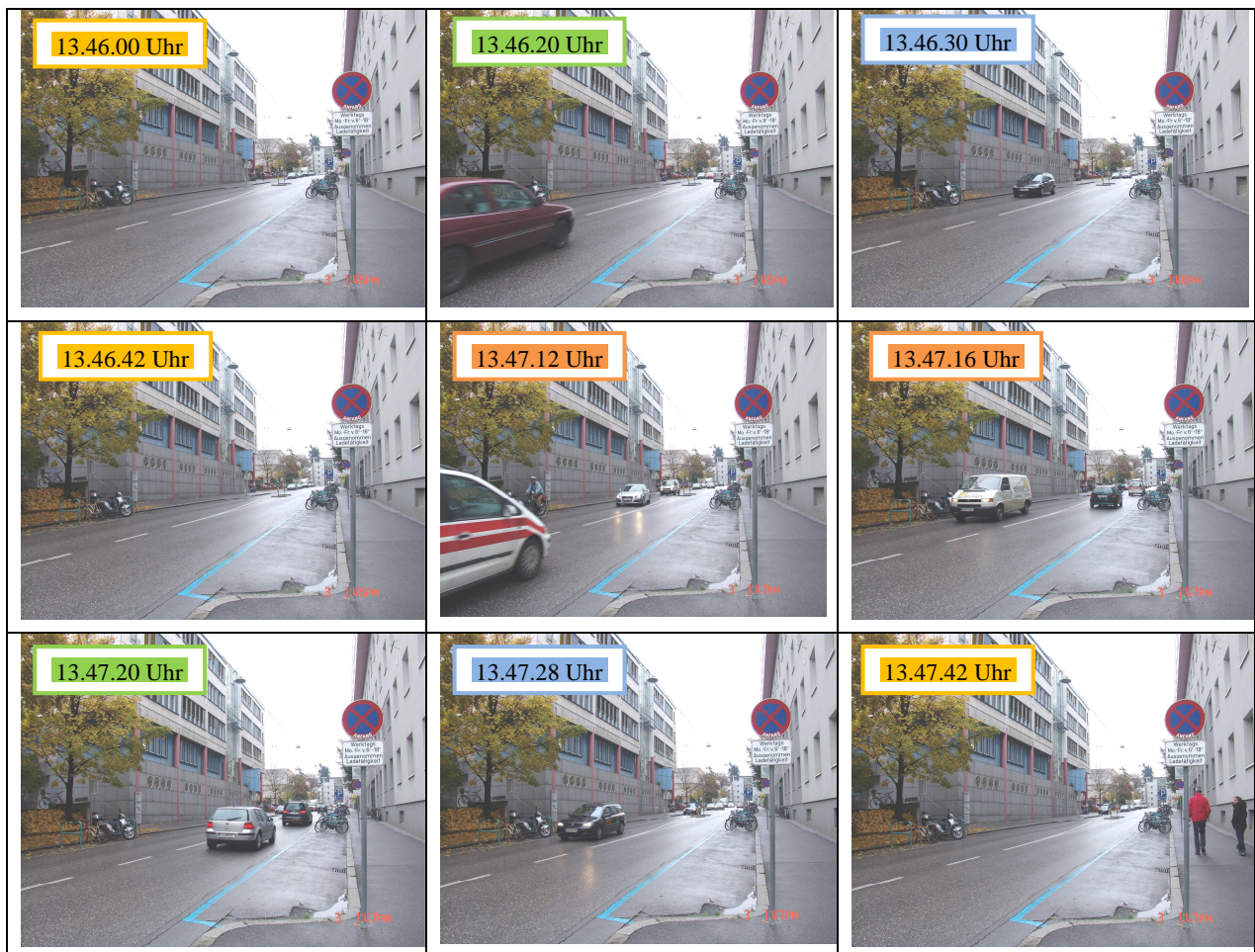
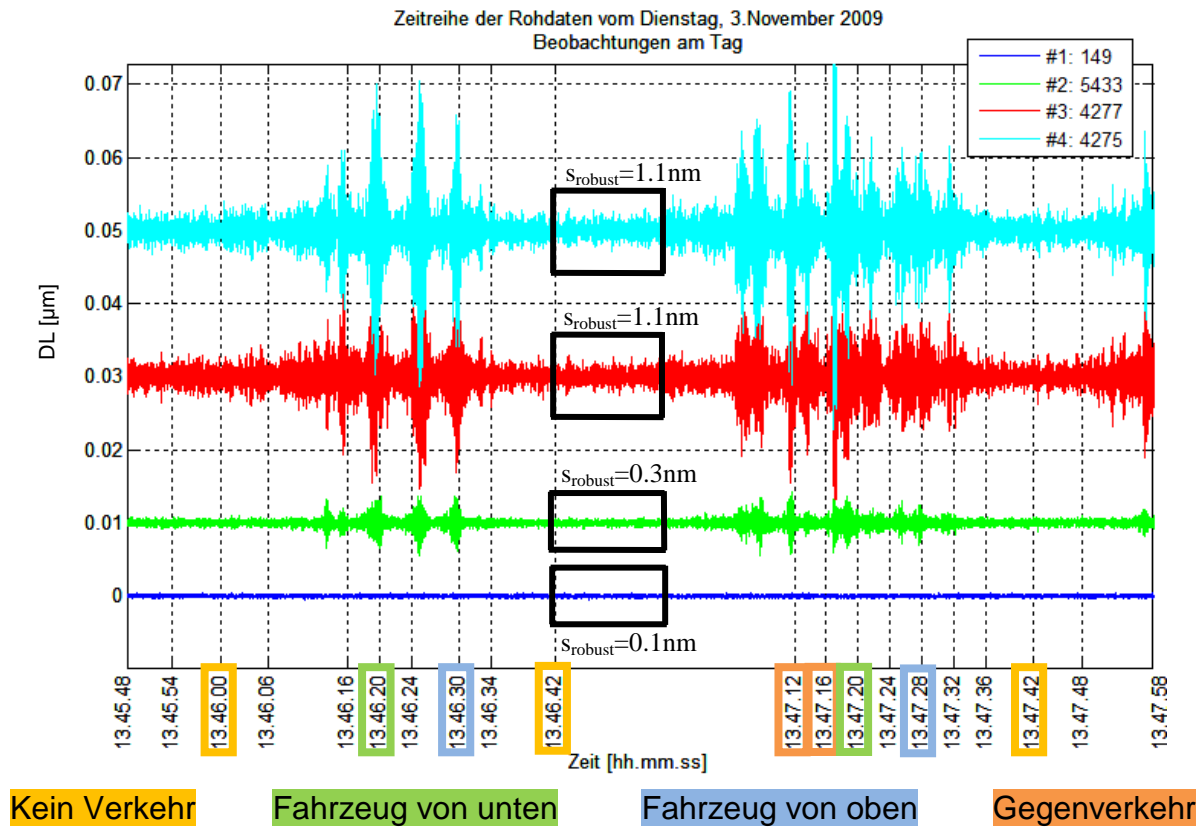


Abbildung 7.14: (oben) Ausschnitt der Zeitreihe, (unten) dazugehörige Fotoserie



Es wurde versucht die Fotoaufnahmen zu kategorisieren, in der Unterscheidung ob das Auto von Osten oder Westen kommt, da Fahrzeuge näher oder weiter entfernt zum Messlabor sind, beziehungsweise Gegenverkehr herrscht oder gar kein Auto zum Zeitpunkt der Aufnahme in dem Abschnitt ist. Bei keinem Verkehr ist auch kein Peak zu erkennen. Die Unterscheidung, aus welcher Richtung die Autos kommen sollte dazu dienen ob die Peaks in der Zeitreihe dadurch anders sind. Es konnte aber kein Unterschied festgestellt werden. Bei Gegenverkehr sind bei den Untersuchungen teilweise Peaks nicht zur Gänze zustande gekommen, da sich, so die Annahme, die Schwingungen der Fahrzeuge gegenseitig aufheben.

## 8 Driftverhalten

### 8.1 Aufheizverhalten des SOFO Dynamic

In diesem Abschnitt wurde das Gerät auf das Driften nach einem Kaltstart überprüft. Es ist aufgrund von den festzulegenden Einstellungen in der Software und der Aufnahme von *Screenshots* für die *Gain/Level*-Information für die einzelnen Sensoren nicht sofort nach dem Einschalten der *SOFO Dynamic RU* mit der Messung begonnen worden, sondern erst 5 bis 25 Minuten später (siehe Tabelle 8-1).

Tabelle 8-1: Allgemeine Informationen zu den Kaltstarts

	Kaltstart 1	Kaltstart 2
<b>Datum der Messung</b>	31. März 2009	27. Oktober 2009
<b>Gerät OFF seit...</b>	6 Tage vor der Messung	4 Tage vor der Messung
<b>Einschaltzeitpunkt SOFO Dynamic</b>	31. März 2009 17.25 Uhr	27. Oktober.2009 11.00 Uhr
<b>Messbeginn</b>	17.30 Uhr	11.25 Uhr
<b>Dauer der Messung</b>	15 Stunden	24 Stunden
<b>Abtastfrequenzen fs</b>	100 Hz	100 Hz

In Tabelle 8-2 werden *Gain*- und *Level*werte der Messungen vor und nach der Messung angezeigt. Auffallend ist, dass sich die *Gain*werte am Ende der Messung bei allen Sensoren erhöht haben. Dies hat, wie schon in Kapitel 7 erklärt, mit der Erhöhung der STD zu tun. Bei Kaltstart 1 fehlen die Daten von Sensor 4275, da bei dieser Messung noch Sensor 2358C verwendet wurde. Die Messdaten des Sensors 2358C haben aber zu viele Phasensprünge und wurden für die Auswertung nicht mehr verwertet.

Tabelle 8-2: Angabe der *Gain/Level*werte der Kaltstarts

	Kaltstart 1	Kaltstart 2
<b>Kanal # Sensoren</b>	<b>Gain/Level [%] vor-nach</b>	<b>Gain/Level [%] vor-nach</b>
# 1: 149	19/10-42/10	15/10-28/10
# 2: 5433	100/11-2/0	22/10-1/0
# 3: 4277	12/10-34/10	17/10-41/10
# 4: 4275	-	15/10-74/10

Es wird anhand von zwei Kaltstarts das Verhalten der Zeitreihe in den ersten drei Stunden (siehe Abbildung 8.1) beziehungsweise der ersten 24 Stunden (siehe Abbildung 8.2) analysiert. Zusätzlich wurde der *Range* und die STD der jeweiligen Messungen untersucht. Für die Berechnung der robusten STD wurden die ungemittelten Daten der Messungen verwendet, die aber mit Hochpass und Bandstop gefiltert wurden. In der Darstellung der Plots werden aber gemittelte Zeitreihen (1-Minutenintervall und 1-Sekundenintervall) verwendet. Dies geschah deswegen, weil sich mit der Datenreduktion leichter umgehen lässt und für den Zweck dieser Versuchsreihe keine höheren Abtastraten nötig sind.

Bei allen Kaltstart-Versuchen (siehe Tabelle 6-1) ist der Verlauf der Kurve sehr ähnlich. Die Analyse der Messungen zeigt, dass sich die Driften der Rohdatenzeitreihe in den ersten 12 Stunden sehr ähnlich verhalten und sich das Gerät erst nach circa 24 Stunden „einpendelt“. Das heißt, das Gerät sollte mindestens einen Tag (24 Stunden) vor Messbeginn eingeschaltet werden um größere Driften zu vermeiden. Zusätzlich fällt auf, dass die STD vom Referenzsensor 149 in den ersten drei Stunden (siehe Abbildung 8.1) mit 0.4 nm schlechter im Vergleich mit den Ergebnissen in Kapitel 7 ist.

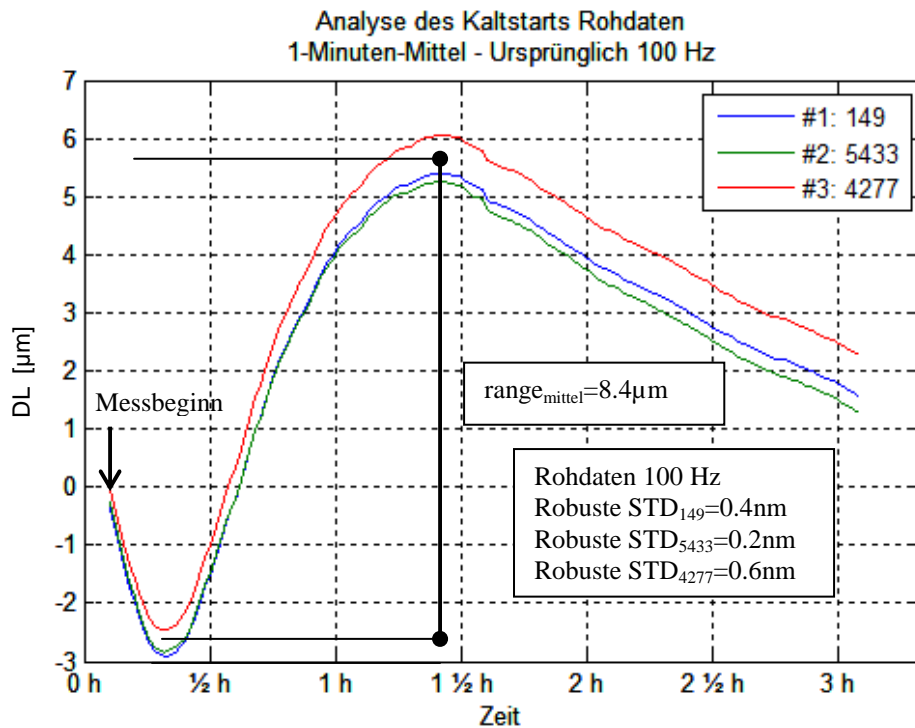


Abbildung 8.1: Analyse des Kaltstarts # 1

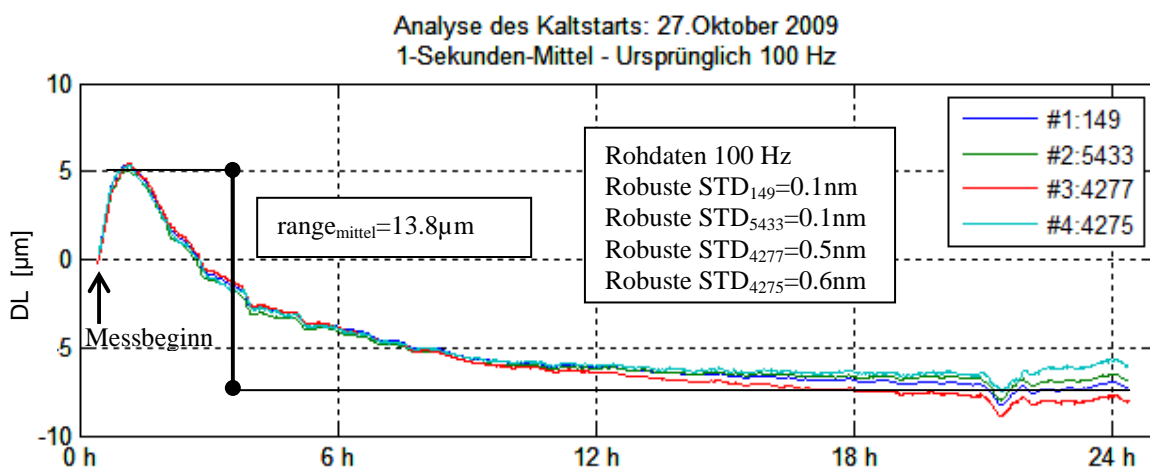


Abbildung 8.2: Analyse des Kaltstarts # 2

Im nächsten Abschnitt wird untersucht, wie groß die Driften sind, wenn circa eine Woche gemessen wird.

## 8.2 Langzeitdrift

Die erfassten Daten, welche schon für die Analyse im Kapitel 7.5 verwendet wurden, sind hier auf das Langzeitdriftverhalten untersucht worden. Allgemeine Informationen zum Versuch sind in Tabelle 7-16 nachzulesen beziehungsweise sind die Angabe der *Gain*- und *Level*werte in Anhang D vorzufinden. Es wird die Rohdatenzeitreihe dahingehend verwendet, um zu eruieren, wie sich die Driften des jeweiligen Sensors innerhalb dieser Woche entwickeln. Diese analysierte Langzeitmessung wird in Abbildung 8.3 dargestellt. In Anhang D wird eine andere Langzeitmessung gezeigt, bei der aber noch nicht mit dem SOFO Static (siehe 8.3) gemessen wurde. Desweiteren wird in Abschnitt 10.2.1 eine Messung dargestellt, bei der allerdings große Phasensprünge aufgetreten sind und diese dadurch unbrauchbar wurde.

Im oberen Plot der Abbildung 8.3 wird die Zeitreihe ohne Abzug des Referenzsensors 149 gezeigt. Dabei ist erkennbar, dass große Driften, wie schon in Abschnitt 8.1 erläutert, in den ersten 24 Stunden entstehen. Dieser Anteil kann aber größtenteils vom Referenzsensor kompensiert werden. Im unteren Plot ist die Zeitreihe mit Abzug von Referenzsensor 149 abgebildet. Dadurch kann das Driften für die ganze Woche auf einen Maximalwert wie beispielsweise bei Sensor 4275 auf  $5.4 \mu\text{m}$  reduziert werden, was ein mittleres Driften von  $0.8 \mu\text{m}/\text{Tag}$  entspricht. Weiters muss hier noch erwähnt werden, dass bei der Zeitreihe des Sensors 4277 zwei Phasensprünge bereinigt wurden (siehe Abschnitt 5.4).

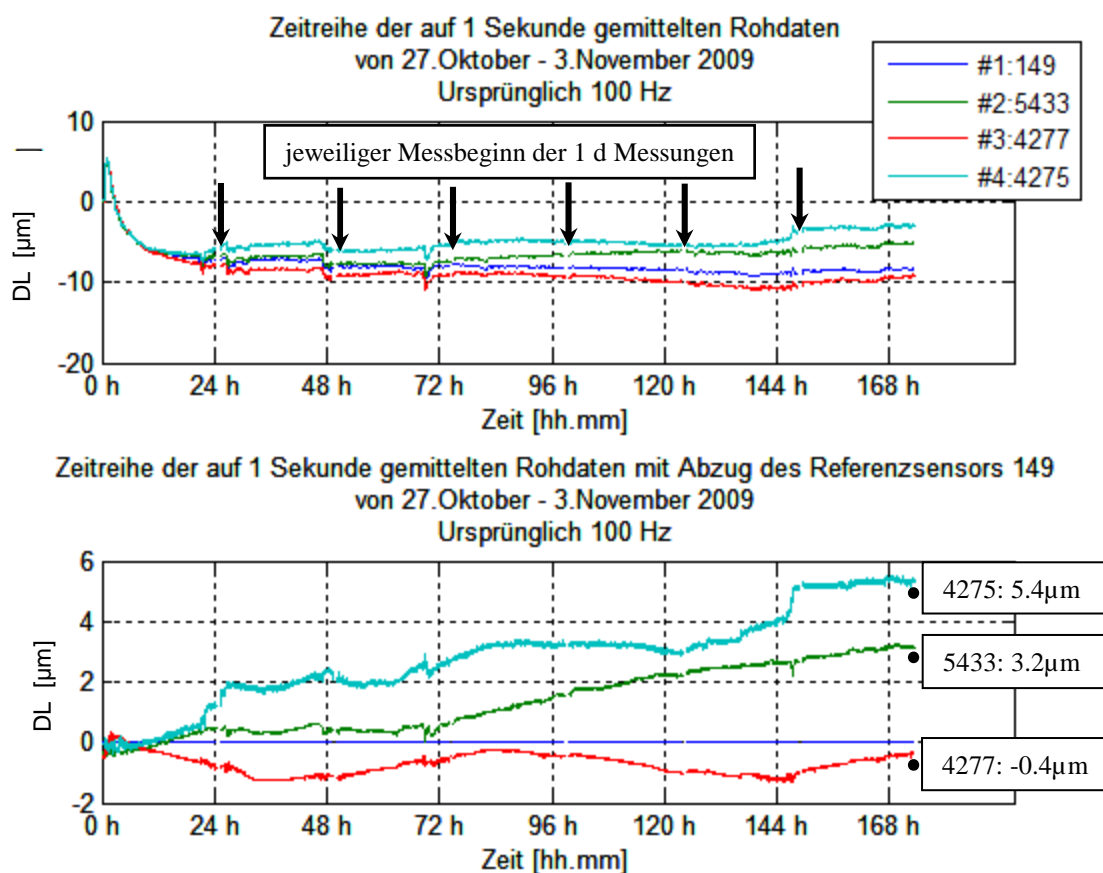


Abbildung 8.3: Untersuchung des Driftverhaltens bei einer Messdauer von einer Woche, (oben) ohne Abzug des Referenzsensors 149, (unten) mit Abzug des Referenzsensors 149

Im Vergleich zu den Labordaten wurden Daten von einer Messkampagne am Gradenbach (Brunner & Woschitz, 2008) vom IGMS herangezogen, wo im Feld unter Einfluss von der Temperatur, die im Labor konstant ist, Messungen mit dem *SOFO Dynamic* durchgeführt wurden (siehe Abbildung 8.4).

Im obersten Plot der Abbildung 8.4 ist eine Periodizität in der Zeitreihe erkennbar. Der Temperaturverlauf gemessen am Server, was ungefähr der Instrumententemperatur des *SOFO Dynamic* Geräts entspricht, und der Außentemperatur zeigen einen ähnlichen Zyklus mit geringem Zeitversatz auf, wie der in der Zeitreihe der Rohmessdaten. Das heißt, im Feld sind besonders die Temperatureinflüsse ausschlaggebend für den Verlauf der Zeitreihe. Ohne Abzug des Referenzsensors werden innerhalb von 12 Stunden Driften von 30  $\mu\text{m}$  erreicht. Im Labor sind es zum Vergleich bei vorherig dargestellter Langzeitmessung in Abbildung 8.3 in sieben Tagen 15  $\mu\text{m}$ . Wird der Wert des Referenzsensors abgezogen kann schon eine deutliche Verringerung festgestellt werden und das Driften geht nicht mehr über 2  $\mu\text{m}$  pro 12 Stunden hinaus. Als Schlussfolgerung kann gesagt werden, dass die Driften im Labor im Vergleich zum Feld um circa einen Faktor 7 kleiner sind.

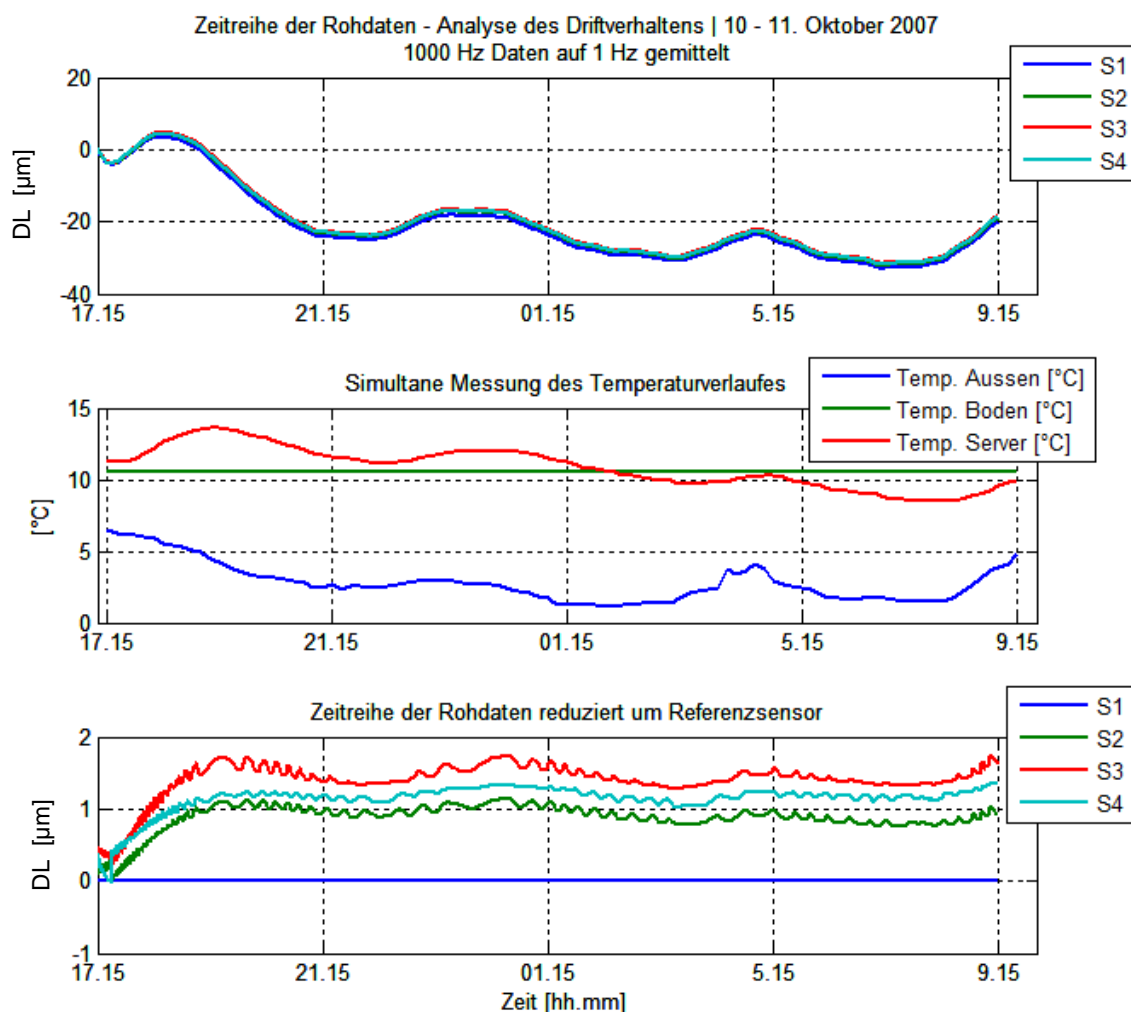


Abbildung 8.4: Vergleichsdaten (16 h) vom Feldeinsatz in Gradenbach (Kärnten), (oben) Zeitreihe der Rohdaten, (mitte) Temperaturmessung, (unten) Zeitreihe der Rohdaten mit Referenzsensor reduziert

## 8.3 SOFO Static vs. Dynamic

### 8.3.1 Vergleich der Langzeitmessung mit SOFO Static

In einem weiteren Schritt wurde versucht die berechneten Driften, wie in Abbildung 8.3, mit den tatsächlichen Bewegungen der Komparatorbank zu vergleichen um Aufschlüsse über die auftretenden Driften zu bekommen. Der Zweck dieser Versuchsreihe war die tatsächliche Dehnung des Betonträgers, sprich der Komparatorbank, mit den Driften vom *SOFO Dynamic* gegenüberzustellen. Dabei sind kurz vor und nach der Messung alle Sensoren, die für die *SOFO Dynamic* Messung gebraucht wurden mit dem *SOFO Static* Messgerät gemessen worden. Dabei wurden mit jedem Sensor je 16 Einzelmessungen ( $n$ ) durchgeführt, um mit den Standardabweichungen der Einzelmessungen ( $\sigma_{\text{Einzel}}=2 \mu\text{m}$ ) durch Gleichung (8.1) die STD des Mittels auf  $\sigma_{\text{Mittel}}=0.5 \mu\text{m}$  verringern zu können.

$$\sigma_{\text{Mittel}} = \frac{\sigma_{\text{Einzel}}}{\sqrt{n}} \quad (8.1)$$

Als erstes wurden die gemittelten Messungen der beiden Referenzsensoren untersucht, ob diese einen Trend aufweisen und somit von den anderen Sensoren abgezogen werden müssen (siehe Abbildung 8.5).

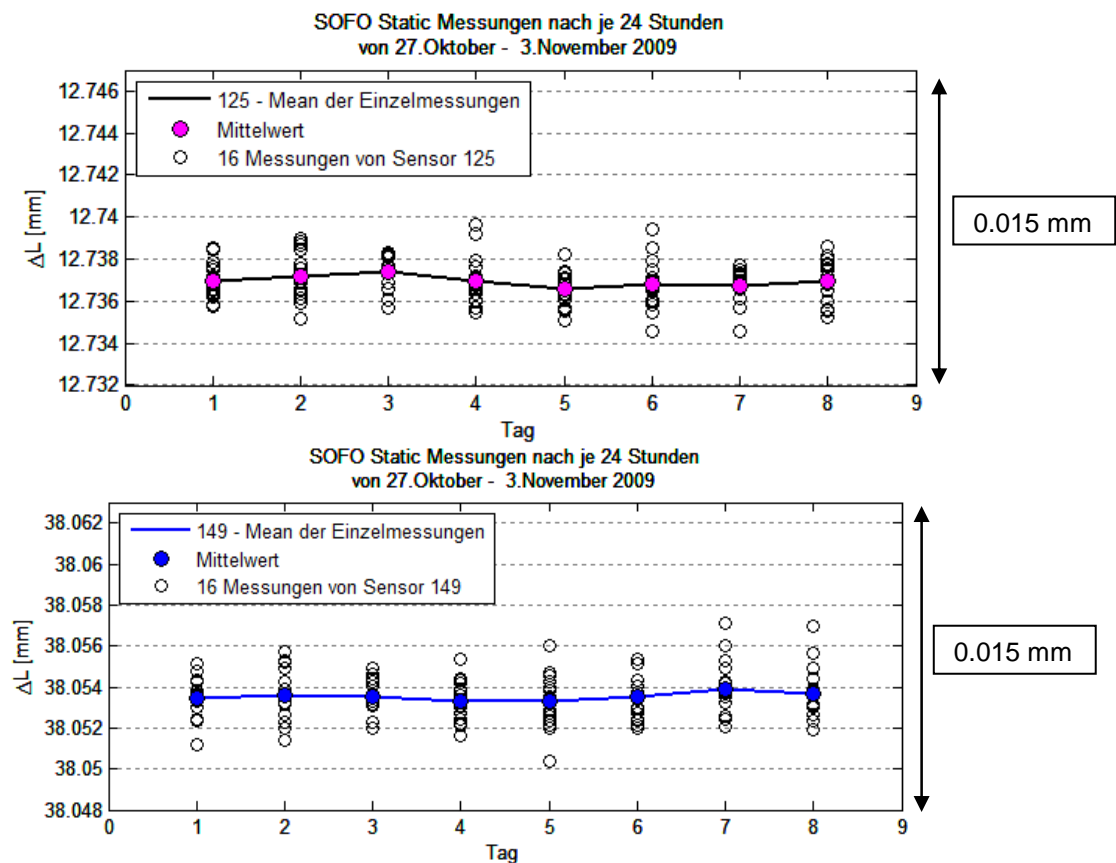


Abbildung 8.5: Messwerte der mit SOFO Static gemessenen Referenzsensoren (oben) 125, (unten) 149

Aufgrund dessen, dass kein Trend feststellbar war und die Werte nur mit maximal  $0.25\ \mu\text{m}$  um den Mittelwert gestreut sind und sich diese somit nicht signifikant voneinander unterscheiden, brauchen die *SOFO Static* Messungen von den Referenzsensoren nicht von den anderen Sensoren 5433, 4277 und 4275 abgezogen werden. In Abbildung 8.6 werden die Mittelwerte und die Einzelmessungen pro jeweiligem Tag der ganzen Woche dargestellt. Im Gegensatz zur Auflösung der Messungen der Referenzsensoren wurden die Einzelmessungen mit der Angabe auf  $1\ \mu\text{m}$  gemittelt, da dies Längenunterschiede zur jeweiligen Epoche waren und somit keine kleineren Angaben notwendig sind. Bis auf die Abweichung bei Sensor 4275 am Tag 4 sind der Verlauf und die Größenordnung ähnlich wie bei Sensor 5433. Die Streckung der Sensoren beträgt bei Sensor 5433  $\sim 4\ \mu\text{m}$  und bei 4277  $\sim 5\ \mu\text{m}$ . Sensor 4275 hat über die ganze Woche gesehen weder Stauchung noch Streckung erfahren und bleibt im Mittel annähernd gleich.

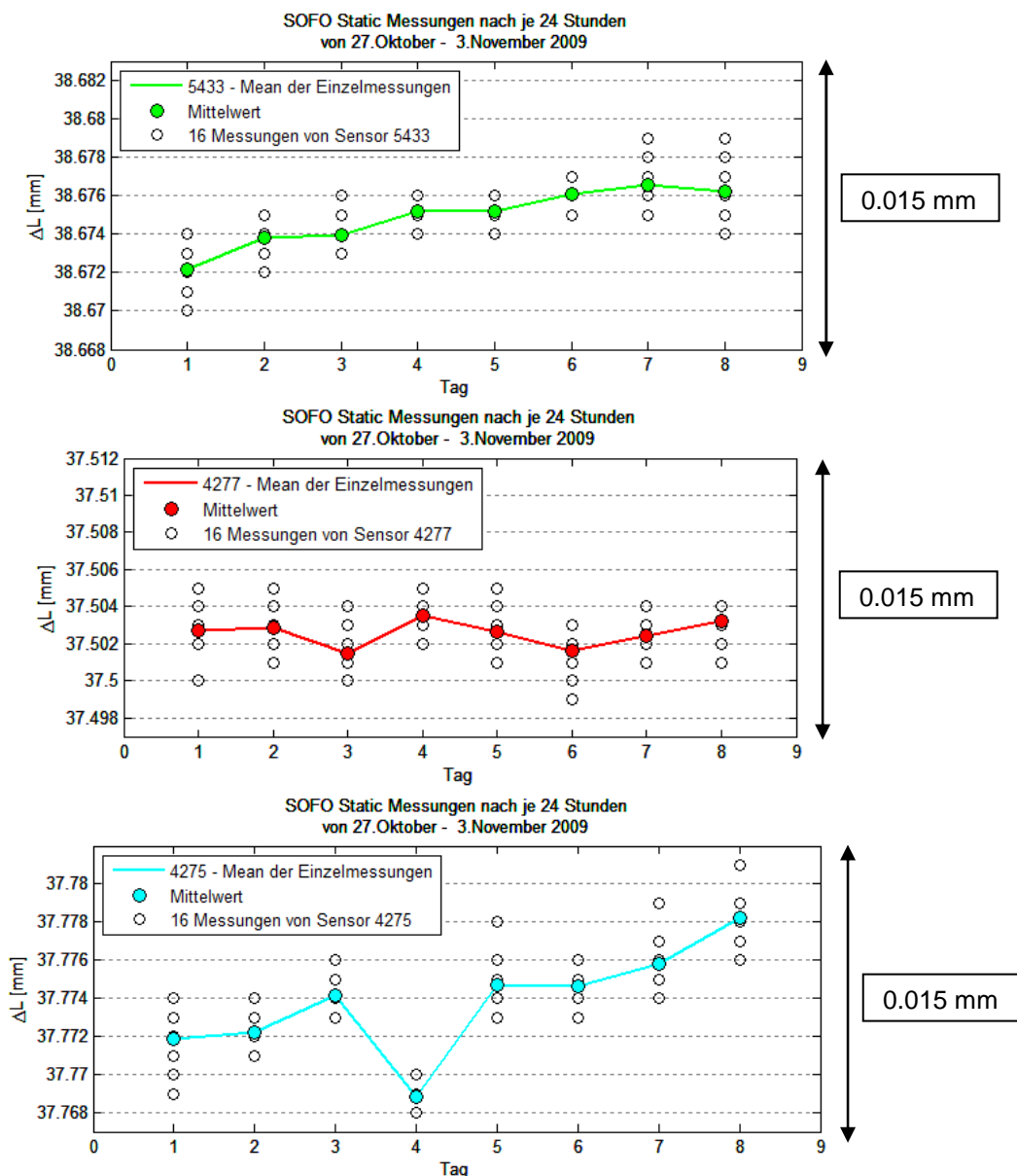


Abbildung 8.6: Messwerte der mit *SOFO Static* gemessenen Sensoren während der in Abbildung 8.3 dargestellten Messung von einer Woche

Somit konnten die Messungen mit dem *SOFO Dynamic* den absoluten der *SOFO Static* Resultate gegenübergestellt werden, wie in Abbildung 8.7 dargestellt. Beim Sensor 5433 und 4277 passen die absoluten Längenmessungen vom *SOFO Static* mit den Messungen der *SOFO Dynamic* Zeitreihe mit einem Differenzwert unter  $1\ \mu\text{m}$  in 7 Tagen sehr gut überein. Aber auch bei Sensor 4275 wurde mit einer Differenz von  $2.2\ \mu\text{m}$  ein relativ geringer Unterschied festgestellt. Wenn einberechnet wird, dass die Standardabweichung aller Mittelwerte  $\sigma_{\text{Mittel}}=0.5\ \mu\text{m}$  der *SOFO Static* Messungen ( $n=8$ ) mit Gleichung (8.2) einen Wert von  $\sigma_{\text{Alle}}=1.41\ \mu\text{m}$  ergibt, dann kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

$$\sigma_{\text{Alle}} = \sqrt{n} * \sigma_{\text{Mittel}} \quad (8.2)$$

Das heißt, dass de facto innerhalb der ganzen Woche keine Driften durch das *SOFO Dynamic* Messgerät verursacht wurden.

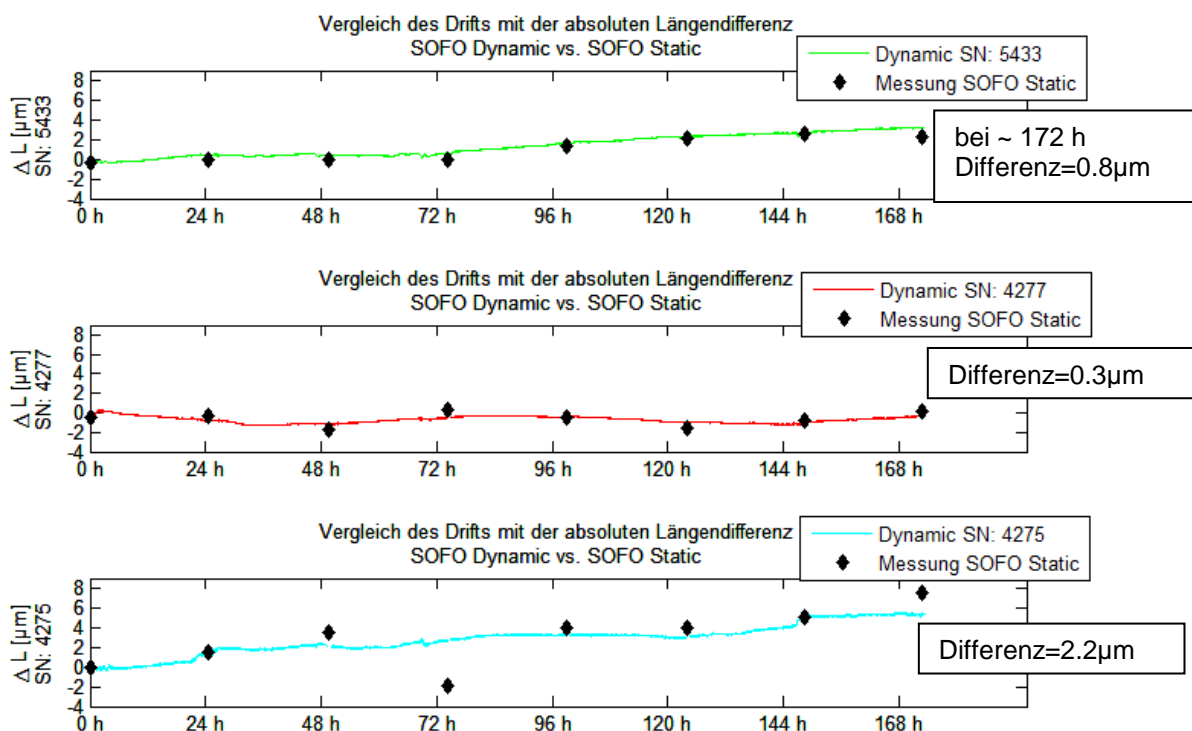


Abbildung 8.7: Gegenüberstellung der *SOFO Dynamic* Driften mit den tatsächlichen Bewegungen gemessen mit *SOFO Static*

Bei Sensor 4275 (ca. 72 h) weicht der Mittelwert der 16 *SOFO Static* Einzelmessungen um circa  $4\ \mu\text{m}$  ab. Es wurde untersucht ob ein Fehler bei der Berechnung gemacht wurde, aber dies ist der tatsächliche Wert.



### 8.3.2 Absolute Bewegung der Komparatorbank von Mai – November 2009

Im Laufe dieser Masterarbeit ist in unregelmäßigen Abständen mit dem *SOFO Static* gemessen worden, das für die Versuche im vorherigen Abschnitt gebraucht wurde. Deshalb sind in Abbildung 8.8 die absoluten Bewegungen der Komparatorbank im Zeitraum von Mai bis Oktober 2009 dargestellt.

In den oberen zwei Plots der Abbildung werden die Längenänderungen der Referenzsensoren 125 (*SOFO Static*) und 149 (*SOFO Dynamic*) dargestellt, die bis auf ein Rauschen keine Veränderung aufweisen. Dies sollte auch so sein, da die Referenzsensoren nicht mit einer Struktur verbunden sondern nur frei aufgehängt sind. Die Sensoren 5433, 4277, 4275 und der mit einem Kompensator C151 versehene Sensor 2358 weisen alle einen ähnlichen Verlauf der Zeitreihe innerhalb dieser fast 6 Monate auf. Zur Erklärung der Abbildung muss erwähnt werden, dass die äquidistanten Plots nicht einem gleichen Abstand des Zeitverlaufs entsprechen. Es wurde festgestellt, dass die Komparatorbank bis zu einem Maximalwert von 20  $\mu\text{m}$  bewegt wird.

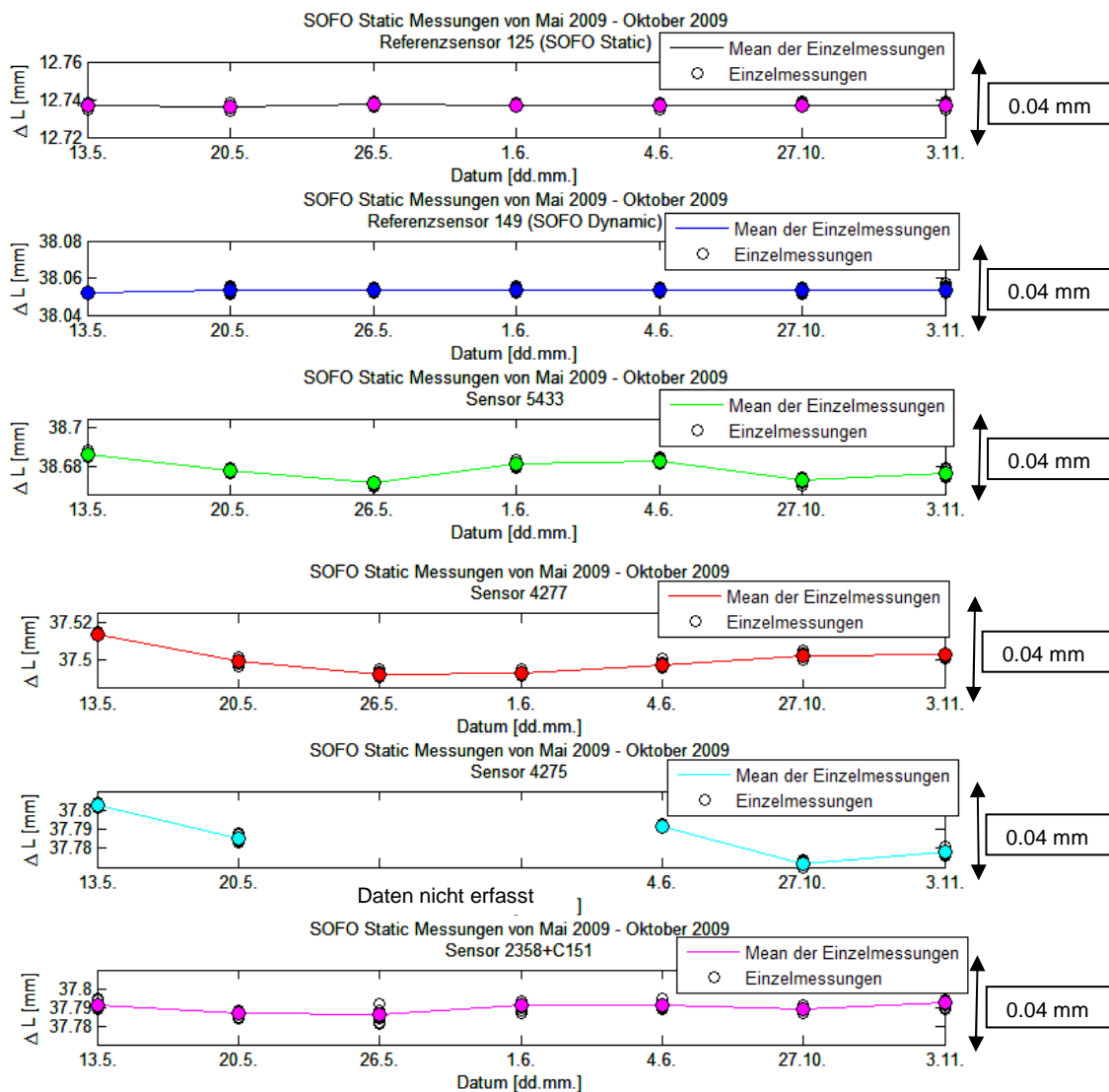


Abbildung 8.8: Absolute Bewegungen im gesamten Zeitraum gemessen mit *SOFO Static* (nicht-äquidistante Zeiträume)

## 8.4 Sinusähnliche Schwingungen

Die im Juli 2009 durchgeführte Messung, die hier als Beispiel angeführt und stellvertretend für die anderen 2 Messreihen im selben Zeitraum ist (siehe Tabelle 6-1), zeigen besonders gut nach Abzug des Referenzsensors 149 sinusähnliche Schwingungen (siehe Abbildung 8.9). Die Frequenzanalyse hat ergeben, dass die Zeitreihe eine Frequenz von  $\sim 1.3$  Schwingungen pro Stunde hat. Tabelle 8-4 gibt Auskunft über das *Gain*- und *Level*verhältnis vor und nach der Messung.

Tabelle 8-3: Allgemeine Information über den gezeigten Versuch zum sinusförmigen Driften

	Versuch
Datum der Messung	14. Juli 2009, 11.19 Uhr
Gerät ON vor der Messung	1 Tag
Gerät OFF vor der Messung	1 Monat ausgeschalten
Dauer der Messung	24 Stunden
Abtastfrequenzen $f_s$	10 Hz
Restart Demodulation	vor Beginn der Messung

Tabelle 8-4: Gain- und Levelinformation

Kanal # Sensoren	Gain/Level [%] vor-nach
# 1: 149	84/10-70/10
# 2: 5433	100/8-72/10
# 3: 4277	42/10

Der Grund für diese Schwingungen ist nicht bekannt.

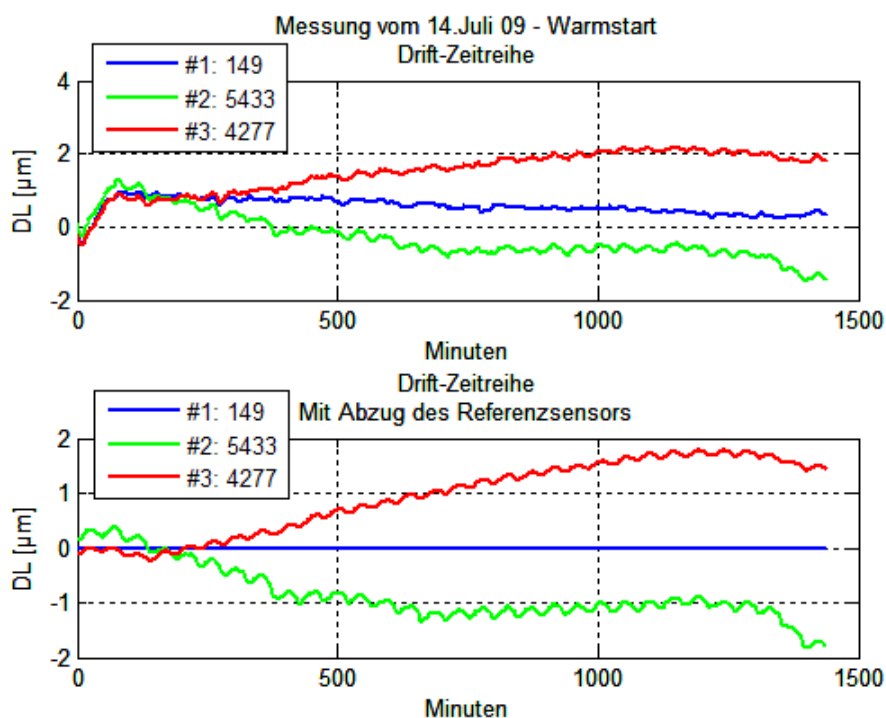


Abbildung 8.9: Zeitreihen der Messungen die sinusähnliche Schwingungen aufweisen

## 9 Untersuchung der Messzeitlänge

Im Zuge der Messungen wurden auch die Start- und Endzeiten (PC-Zeit) im jeweiligen Messformular notiert. Durch die Einstellung der Frames kann die Dauer der Messung vorher berechnet werden. Somit ist bekannt wann eine Messung beendet wird beziehungsweise werden sollte.

### 9.1 Watchdog-Zeiten

Einerseits wird das Messende über den blauen Balken in der Software, der den Fortschritt der Messung angibt und andererseits durch die *Windows*-Uhr am Laptop bestimmt. Bei einigen Messungen wurde aber auch ein „*Watchdog*“ eingesetzt. Dieser *Watchdog*, von Ing. Presl programmiert, ist im Zuge der SOFO Dynamic Gradenbach Messkampagne (10/2007) erstellt worden um zeitliche Driften verfolgen zu können, die ungleich der Temperaturen im Feld sind. Es werden mit dem *Watchdog* alle Vorgänge durch ständige Abfrage der Größe des zuvor angegebenen Datenordners im Sekunden-Intervall überwacht. Wird also eine Messung beendet und die Datei somit im angegebenen Ordner abgespeichert, schreibt der *Watchdog* diesen Zeitpunkt in einer Zeile mit, wie dies auch in Abbildung 9.1 sichtbar ist. Dabei wird der Zeitpunkt der Speicherung aufgezeichnet. Mit bekannter Startzeit (manuell dokumentiert) ist die Länge einer Messung berechenbar.

Beispiel:

```
Datei 003: 20090417_13h17m_500Hz.csv erstellt: 17.04.2009 13:22:01.12  
Datei 004: 20090417_13h28m_500Hz.csv erstellt: 17.04.2009 13:33:01.29  
Datei 005: 20090417_13h39m_500Hz.csv erstellt: 17.04.2009 13:44:03.14  
Datei 006: ~WRL2090.tmp erstellt: 17.04.2009 13:51:43.13  
Datei 007: 20090417_13h48m_500Hz.csv erstellt: 17.04.2009 13:53:04.11
```

Abbildung 9.1: Format der erstellten INFO-Datei des *Watchdogs*

In Abbildung 9.2 werden die jeweiligen Zeiten, die vom Sollwert des berechneten Messzeitendes abweichen in Abhängigkeit der Abtastrate gegenübergestellt. Es ist gut erkennbar, dass bei niedrig werdender Abtastrate die Dauer länger wird. Dabei braucht aber vermutlich nicht die Messung selbst länger, sondern es wird auf den Grund zurückgeführt, dass bei kleinerer Frequenz mehr an Mittelung der Daten notwendig ist und deshalb die interne Verarbeitung der Messdaten länger dauert bevor diese am Computer abgespeichert werden (Informationen zum Datenformat siehe Abschnitt 5.1.2).

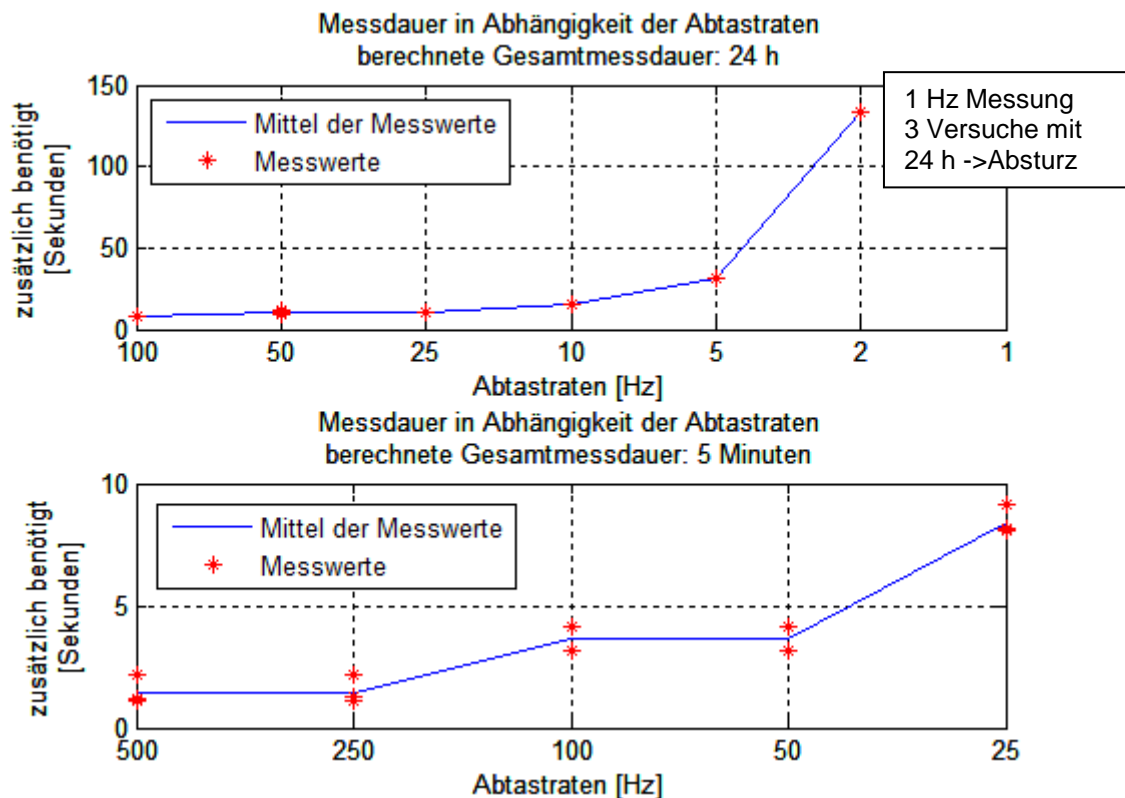


Abbildung 9.2: Verlängerung der mit *Watchdog* festgestellten Messdauer bei verschiedenen Abtastraten infolge des Speichervorgangs für unterschiedlich lange Messzeiten, (oben) 24 h, (unten) 5 Minuten

## 9.2 Untersuchung der Messfrequenz

Im Zuge dieser Untersuchung mit den *Watchdog*-Zeiten wurde herausgefunden, dass die Messung zeitlich versetzt ist. Dafür wurde bei Messungen circa 5 Minuten vor dem Ende der Messung und beim prognostizierten Ende anhand der *Windows*-Uhr (PC-Zeit), nach der auch der *Watchdog* und das *SOFO Dynamic* Gerät läuft, mehrere Male im 1-Sekundenabstand auf den Tisch geklopft. Auf diesem Tisch steht das *SOFO Dynamic* Messgerät und der Referenzsensor 149, der darauf reagiert.

Dazu wird eine Zeitreihe in Abbildung 9.3 gezeigt. Dort kann gut erkannt werden, dass die Peaks (5x) nicht genau um 15h05m00s Uhr anfangen, sondern schon circa 3 Sekunden vorher. Ab 15h10m00s, dem berechneten Messende, wurde wieder fünfmal im Sekundentakt geklopft. Die Messzeit müsste eigentlich vorbei sein, somit sollten auch keine Peaks mehr sichtbar sein. Es sind aber auch hier 3 Peaks sichtbar. Weiters ist zu erwähnen, dass die berechnete Frameanzahl auch die im tatsächlich abgespeicherten CSV File war, also nicht mehr Frames vorhanden waren.

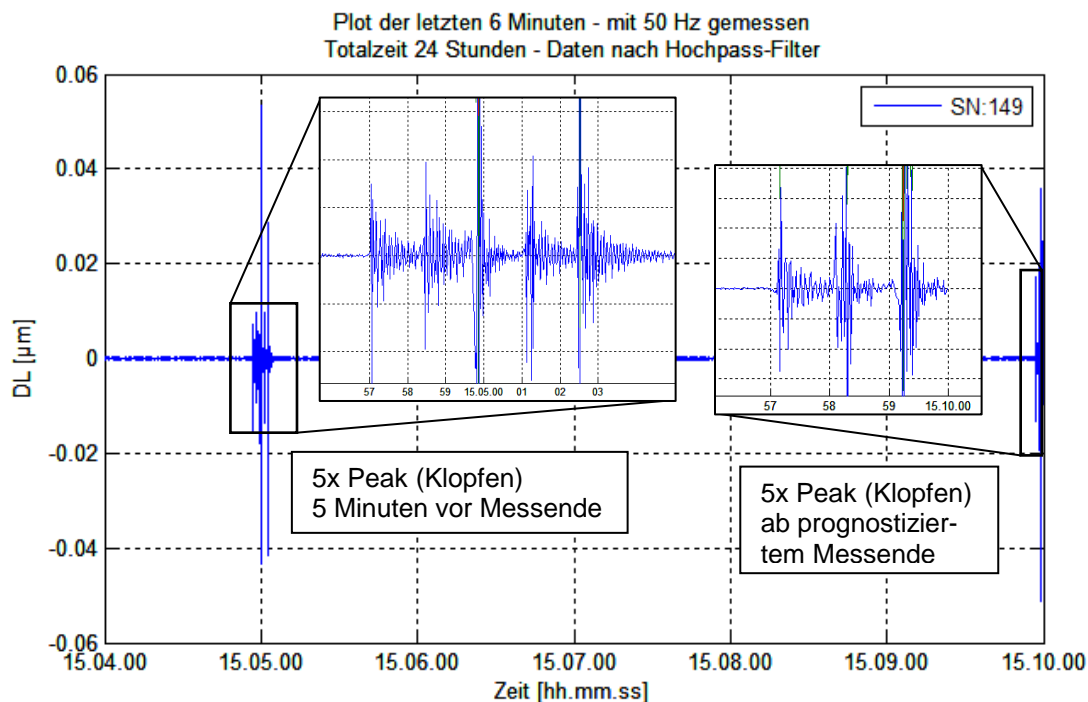


Abbildung 9.3: Untersuchung des Zeitversatzes am Messende einer 24 h andauernden Messung

In Tabelle 9-1 wird der Zeitversatz bei unterschiedlichen Messzeiten und Abtastraten aufgelistet. Es lässt sich ableiten, dass sich ein durchschnittlicher Zeitversatz von 3-4 Sekunden in 24 h ergibt.

Tabelle 9-1: Im Messlabor (20°C) festgestellter Zeitversatz bei unterschiedlichen Messzeiten und Abtastraten zwischen PC-Zeit und SOFO Dynamic

Messzeit	24 h	6 h
1000 Hz	-	ca. 1 Sekunde
50 Hz	ca. 3 Sekunden <sup>1)</sup>	-
2 Hz	ca. 4 Sekunden	-

<sup>1)</sup> Start der Messung manuell, deswegen besteht Unsicherheit von ca. 0.5 Sek.

Das heißt, dass es einen Unterschied zwischen der über die Frames ermittelte Zeitangabe und der *Windows*-Zeituhr gibt. Ein möglicher Grund dafür könnte aber auch die *Clock Source* sein (siehe Abbildung 3.4). Im Handbuch (Optiphase, User Manual, 2006, Seite 16 ff) wird empfohlen, dass der *DDS* (Dynamical Digital Synthesizer) als Defaultwert eingestellt werden soll, daher wurde dieser bei den Messungen auch verwendet (siehe Abschnitt 3.2.2). Weiters steht, dass die *internal* und *external clock sources* nur für spezielle Kundenapplikationen vorgesehen sind. Diese *Clock Source* ist für das *SOFO Dynamic* vom IGMS mit 19,920,000 Hz eingestellt. Dies könnte dazu dienen um den Schwingquarz zu kalibrieren und aber der gesuchte Grund für diesen Zeitversatz sein.

Außerdem ist noch zu erwähnen, dass im Laufe der Arbeit manche Messungen nie beendet wurden (ca. bei 10 Messungen). Der Grund dafür ist nicht bekannt.

# 10 Weitere Untersuchungen

## 10.1 Sprung des Levels auf Null

Bei jeder Messung wurde vorher und nachher ein *Screenshot* vom jeweiligen angesteckten Sensor gemacht, um die Messungen zu dokumentieren und den *Gain* und das *Level* als Referenz für etwaige spätere Vergleiche verwenden zu können.

Es wurde sporadisch, rein zufällig und vom Sensor unabhängig nach der Messung ein *Level* von 0% und ein im Prozentwert vermindertes *Gain* im Bereich von circa 3% festgestellt. Dies ist auch in der folgenden Abbildung 10.1 veranschaulicht. Es wurden insgesamt 624 *Screenshots* untersucht und 72 solche Level=0 Fälle gezählt. Relativ gesehen sind das gerundet circa 10% aller Messungen.

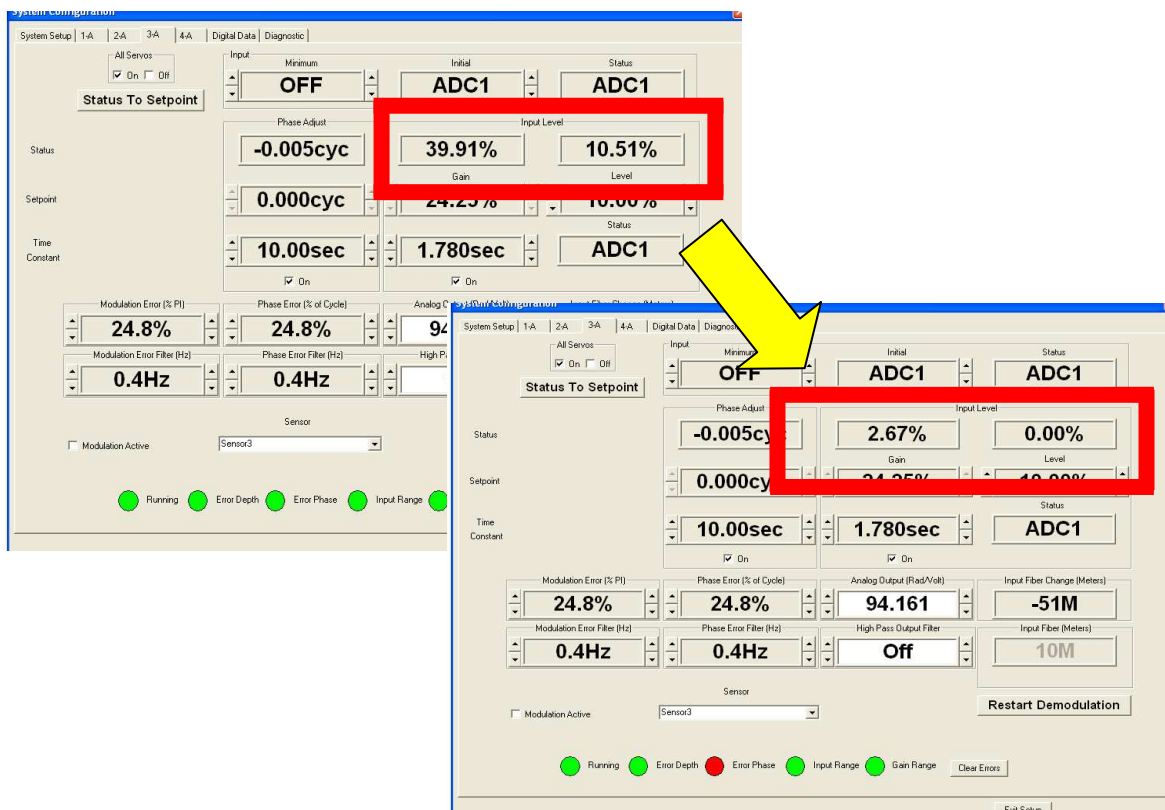


Abbildung 10.1: Ein Beispiel für die *Gain*-/*Level*werte vor und nach der Messung

Interessant ist, dass diese 0%-*Level*werte nur auf den Kanälen 2, 3 und 4 detektiert wurden, nie aber auf Kanal 1. In Tabelle 10-1 wird eine Übersicht über die wichtigsten Erkenntnisse gegeben. Es wurde auch untersucht, ob dieser Nullsprung des *Levels* in den Rohdaten der Zeitreihe sichtbar ist. Dafür sind entsprechende Messreihen ausgesucht worden, wo der Sprung des *Levels* auf Null auftrat. Desweiteren wurden die Rohdatenzeitreihe auf mögliche signifikante Sprünge untersucht. Es konnte aber kein Zusammenhang beziehungsweise keine Sprünge festgestellt werden.

Tabelle 10-1: Übersicht über die wichtigsten Erkenntnisse zur Untersuchung Level=0

<b>Screenshots insgesamt</b>	624 Screenshots untersucht (1 Screenshot entspricht 1 Sensor und 1 Messung)
<b>Level=0 Fälle</b>	72 oder ~10 %
<b>Welche Kanäle betroffen?</b>	Kanal 2-3, Kanal 1 nie (an dem war zu ca. 80% der Referenzsensor angeschlossen)
<b>Messdauer der Level=0 Fälle</b>	sowohl bei Kurzzeit- als auch bei Langzeitmessungen aufgetreten

Im Untersuchungszeitraum dieser Masterarbeit von März bis Dezember 2009 wurden mehrmals (1. April, 10. September, Anfang Oktober) alle Kanaleingänge an der *SOFO Dynamic RU* und die Faserenden der Sensoren mit Spezialreinigungsmittel (Sopropanol) von eventuellen Staub- und Schmutzpartikeln gereinigt. Auch diese Maßnahme hatte keinen Einfluss auf den Sprung des Levels auf Null beziehungsweise konnten keine Unterschiede zu vorher festgestellt werden.

Im Zuge dieser Untersuchung wurde der zuständige Techniker *Allen Cekorich* der Firma *Optiphase (Kalifornien, USA)* angeschrieben und ihm oben beschriebenes Problem erklärt. Von diesem Unternehmen stammt der optische Phasendemodulator, der in das *SOFO Dynamic* Messgerät integriert ist. Als Antwort wurde folgendes erhalten (Cekorich, 9. April 2009, Mitteilung an Dr. Woschitz):

*"The gain level tracks the actual input light. If you have too much light, or the light increases during the run, the level will go to zero and then the demodulator will eventually saturate.*

*At a minimum gain level, the servo cannot operate anymore and the data will eventually be invalid. You must attenuate your light if this is the case.*

*Also, sometimes the carrier can be very noisy and the servos cannot track well and the level can go to zero. In this case, you need a cleaner interferometer or source. If there is no light or noisy light, the demodulator cannot operate correctly, there is no magic inside our box."*

Bestätigt wurde hierbei, dass bei zu hohem *Gain* der Level auf Null geht und bei einem zu geringem *Gain* der *Servo* nicht mehr richtig arbeiten kann. Da in den untersuchten Rohdatenzeitreihen keine Veränderung zu erkennen war, wird angenommen, dass die Veränderungen der *Gain* und *Level*werte nur sehr kurz relativ zur Gesamtmessung dauern und nachher der *Gain* und *Level* wieder auf den Normalzustand zurückgeht.

## 10.2 Phasensprünge

### 10.2.1 Problemerkklärung

Ab Mai 2009, wo mehrere Langzeitmessungen durchgeführt wurden, traten bei allen verwendeten Sensoren, ausgenommen beim Referenzsensor mit der Seriennummer 149, in unterschiedlicher Ausprägung Phasensprünge auf. Diese wurden bei der Analyse der Rohdatenzeitreihe gesichtet. Wie in Abbildung 10.2 gut zu erkennen ist, sind die größten Sprünge in einem Messbereich von  $\pm 1.3$  mm.

Eine Ausnahme ist Sensor 2358, der bei allen Messungen den Adapter C151 zwischengeschaltet hatte. Dort kamen von Anfang an Phasensprünge vor, aber auch nie in dieser Intensität wie zum Beispiel bei Sensor 4277 in Abbildung 10.2. Im nächsten Abschnitt 10.2.2 wird beschrieben was unternommen wurde um die Ursache dieser Sprünge zu finden.

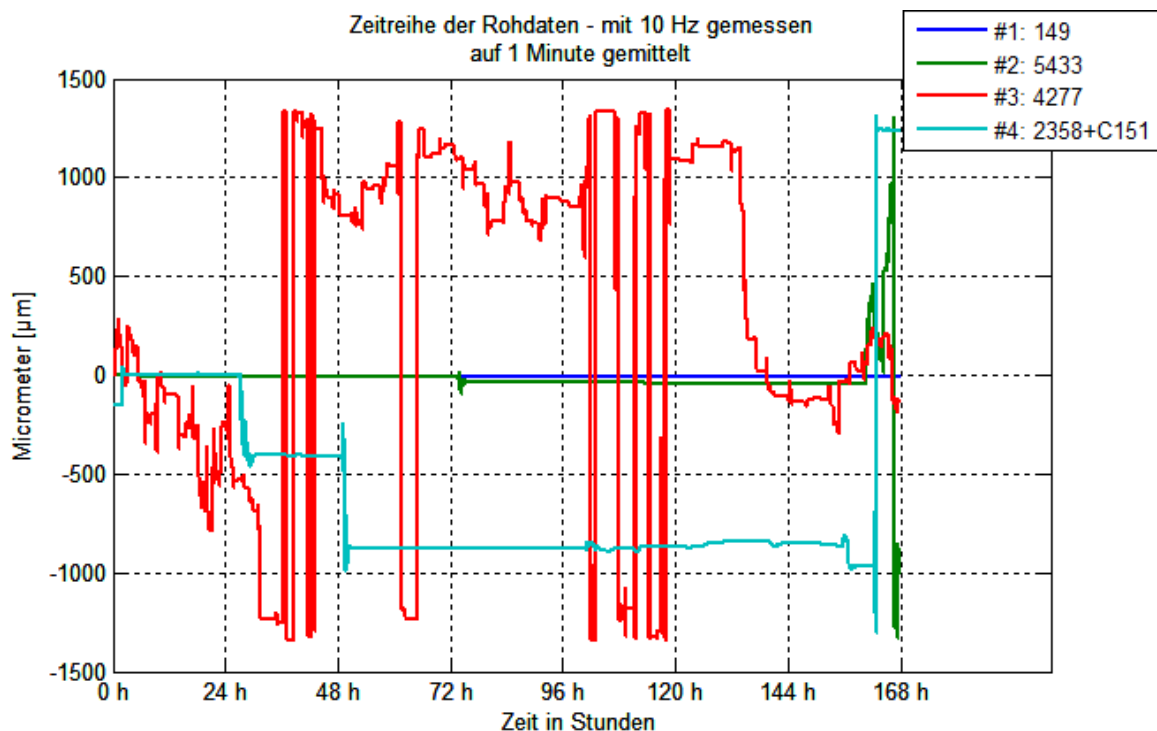


Abbildung 10.2: Beispiel einer Langzeitmessung mit Phasensprüngen

Im Zuge dieser Untersuchung wurde Dr. Inaudi, *Chief Technology Officer* von *Smartec SA* und Entwickler des *SOFO Systems*, angeschrieben um von ihm eine Erklärung zu den Phasensprüngen zu erhalten. Er schreibt dazu folgendes:<sup>1</sup>

*“The reason for the jumps is a loss of phase tracking by the SOFO Dynamic demodulator. This can have several reasons:*

*1) Fast strain: if the strain rate exceeds the value of  $\pm 10$  mm/s, the tracking can be lost*

<sup>1</sup> Inaudi (2010), personnel communication, email vom 11.01.2010



2) *Polarization fading*: in rare occasions, the visibility of the interference fringes can be reduced by the so-called polarization fading effect. This happens when the polarization state of the reference and measurement fibers are orthogonal and therefore no interference can take place. The polarization state of the two fibers is uncontrolled and changes with time, due to temperature and strain effects. Normally this effect does not produce tracking losses, unless it is combined with effect 1) or 3)

3) *Low signal*: If the signal is low, due to losses in the cables and connectors, phase tracking can be lost permanently or randomly, when polarization fading or high strain rates are present. The signal is also lower when the light source is warmer.

*I suspect that in your case 1) does not apply, but 2) and 3) could explain the observed behavior."*

Aufgrund der Messungen im Labor mit statischer Anordnung kann der von Dr. Inaudi beschriebene *Fast strain* (1) ausgeschlossen werden. Falls aber das *Polarization Fading* (2) und das *Low Signal* (3) in Kombination auftreten, können solche Phasensprünge entstehen. Dr. Inaudi erwähnt auch, dass das Signal kleiner wird wenn die Lichtquelle wärmer wird. Dies könnte bei den Messungen der Fall gewesen sein, da das Gerät vor den Versuchen schon mehrere Wochen durchgehend eingeschaltet war. Bei der in Abbildung 8.3 gezeigten Messung wurde darauf geachtet, dass das *SOFO Dynamic* mehrere Tage vor Messbeginn ausgeschalten wurde (siehe Tabelle 7-16).

### 10.2.2 Phasensprunguntersuchung

Für die Gründe der Phasensprünge war zunächst keine Information erhältlich, deshalb wurden einige Tests zur Erörterung des Problems durchgeführt, die in diesem Abschnitt beschrieben werden. Vorweg muss gesagt werden, dass alle Untersuchungen das Problem nicht erklären konnten.

#### **Einfluss von Gewittern und Blitzen**

Aufgrund der im Kapitel 10.2.1 erläuterten Probleme mit Phasensprüngen wurde der Grund für dieses Verhalten untersucht. Durch Diskussion über dieses Thema mit meinem Betreuer Dr. Woschitz wurden Spannungsschwankungen infolge von Gewittern (Blitze) vermutet, die eventuell kurze Störungen im Stromnetz verursachen könnten. Deswegen ist Kontakt zu ALDIS - **Austrian Lightning Detection & Information System** – hergestellt und nach einer Blitzstatistik angefragt worden. Es wurden die Zeitpunkte der aufgetretenen Blitze im Umkreis von 15 km mit den gemessenen *SOFO Dynamic* - Zeitreihen verglichen. Dabei wurde versucht, einen zeitlichen Zusammenhang zwischen Auftreten der Phasensprünge und den Blitzen zu finden. Es konnte allerdings kein Zusammenhang festgestellt werden. Die wenigen sporadisch zusammenfallenden Zeiten können nur als Zufall angenommen werden.



Abbildung 10.3: Demonstrationsbild eines Blitzes (links) und Logo des Austrian Light Detection Information System (rechts)

In Abbildung 10.4 wird das Dateiformat dargestellt, in dem die Daten von ALDIS geschickt wurden. Es sind die Zeiten der einzelnen Blitzschläge oder *strokes*, wie sie international genannt werden, in Nanosekunden und die Amplitude beziehungsweise die Stärke des Blitzes in der Einheit Kiloampere angegeben. Das negative Vorzeichen der Amplitude hat den Grund, dass die meisten Blitze Negativblitze sind. Nach Klose (2008, Seite 314) kommt bei dieser Art von Blitzen negative Ladung von der Wolkenunterseite zum Boden.

```
Datum      Zeit      Nano      Breite    Länge     Amplitude
2009/04/17 10:14:36 810454271 47.002100 15.484300 -3.600000
2009/04/17 10:14:36 876297335 47.009400 15.426100 -3.000000

Nano: Nanosekunden
Amplitude: in kA
```

Abbildung 10.4: Daten und Format von ALDIS

## USV – Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Für eine mögliche Lösung des Phasensprungproblems wurde zwischen dem Stromanschluss und der *SOFO Dynamic RU* ein USV – Gerät dazwischen geschaltet. Siehe dazu Abbildung 10.5 beziehungsweise eine detailliertere Beschreibung des Geräts in Anhang B.4. Dieses Gerät ist in der Lage kleinste Strominbalancen oder Unterbrechungen im Stromkreislauf im Bereich von Tausendstel Sekunden zu überbrücken, indem es auf Batteriebetrieb umschaltet.

Es wurden jeweils zwei Langzeitmessungen (mehrere Tage) durchgeführt. Leider stoppte die Software der *SOFO Dynamic RU* bei beiden Versuchen die Messung nicht nach der berechneten Beendigungszeit, das auch bei anderen Messungen wenige Male vorkam. Dies hatte zur Folge, dass die Software über den Taskmanager abgebrochen werden musste. Deswegen wurden auch keine Daten gewonnen, da bei Abbruch der Messung keine Daten gespeichert werden.

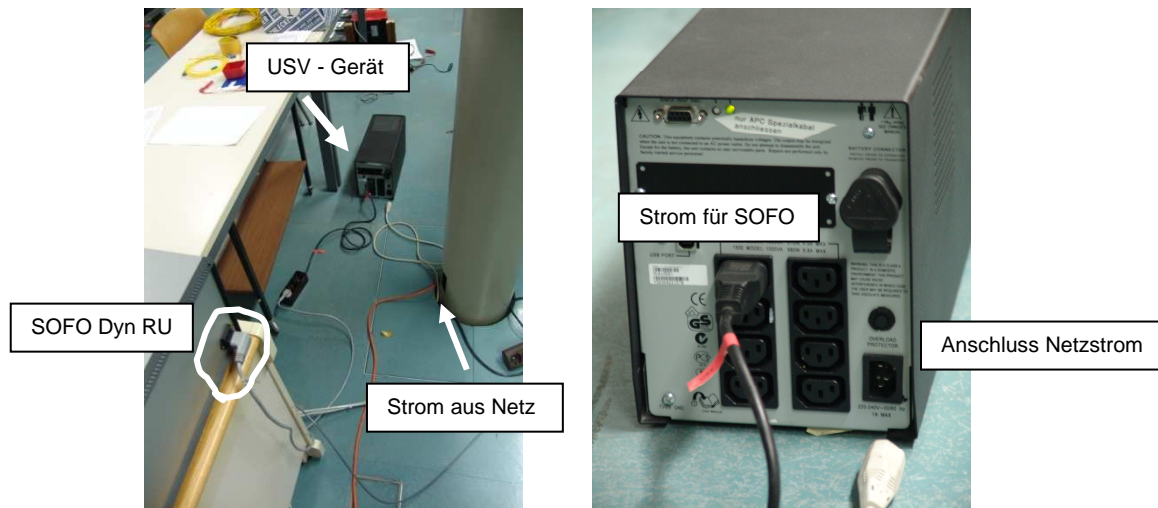
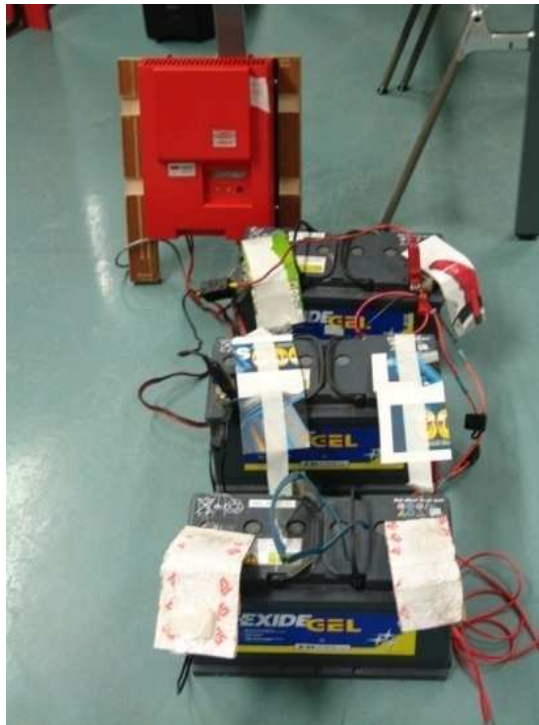


Abbildung 10.5: Aufstellung und Anordnung der USV (links) & Darstellung der Anschlussseite des USV-Geräts (rechts)

Somit war eine Überprüfung, ob durch diese Maßnahme Phasensprünge vermieden werden können, nicht möglich. Dass dies am USV-Gerät liegt wurde mit einem weiteren Versuch widerlegt. Es wurde dafür zweimal je 15 Minuten lang gemessen, dabei war das USV-Gerät zwischengeschaltet. Der Stecker vom Netz, von dem auch das USV-Gerät Strom bekommt, wurde mehrmals in verschiedenen Minutenintervallen an- und abgesteckt. Somit war die Stromversorgung für kurze Zeit von bis zu acht Minuten über die unterbrechungsfreie Stromversorgung gewährleistet. Weder auf der Softwareoberfläche, noch in den nachher analysierten Daten gab es irgendwelche Hinweise auf das Auftreten von Phasensprüngen. Zudem wurden die beiden Messungen regulär, wie vorher auch eingestellt, nach 15 Minuten automatisch beendet.

### Batterieverorgung - Wechselrichter

Zur weiteren Untersuchung des Auftretens von Phasensprüngen und Driften wurde die *SOFO Dynamic RU* unabhängig vom Stromnetz gemacht und an insgesamt vier externe Akkumulatoren gehängt (siehe Abbildung 10.6). Eine genauere Beschreibung über den Wechselrichter kann im Anhang B.5 nachgelesen werden. Somit wurde die Stromversorgung ident wie beim Geo-Monitoring-Projekt am Gradenbach (Mölltal, Kärnten) realisiert. Über einen Wechselrichter wurde die Stromspannung von den 12 V – Akkumulatoren mit Gleichspannung auf 220 V Wechselspannung umgewandelt. Damit konnte eine permanente Messung von 24 Stunden durchgeführt werden.



**Abbildung 10.6: Anordnung des Wechselrichters und der Batterien**

Diese Zeitspanne wurde deshalb gewählt, da nach Angabe von Herrn Ing. Lummerstorfer eine Stromversorgung mit vier Akkumulatoren für diese Zeit maximal gewährleistet werden kann (Erfahrung von Gradenbach-Messeinsätzen).

Der Laptop (INAS-NB10), der für diese Messung verwendet wurde und auf dem die Software läuft, ist aber am normalen Stromnetz angeschlossen worden. Es war zwar geplant, auch diesen an die Akkumulatoren anzuschließen, nur konnte bei der Messdauer von 24 Stunden nicht gewährleistet werden, ob für diese Zeitspanne genug elektrische Energie durch die Akkumulatoren vorhanden ist. Es wurden hier wie vermutet, keine Phasensprünge in der Zeitreihe entdeckt. Dies kann aber nicht als Beweis verwendet werden, da auch schon zwei Tage vorher ohne Batterieanschluss oder USV-Gerät, die Zeitreihe (siehe Abschnitt 8.4) frei von Phasensprüngen war.

## 11 Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen des *SOFO Dynamic* Messgeräts von der Masterarbeit mit den Herstellerangaben der Firma *Smartec SA* gegenübergestellt.

### 11.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

#### Präzision

Die Präzision des Geräts beziehungsweise die STD hängt stark von der gewählten Messfrequenz beziehungsweise Abtastrate ab, wie in Tabelle 11-2 ersichtlich ist. Dies wurde mit dem Versuch in Abschnitt 7.1 untersucht. Weiters ist die STD je nach Sensor unterschiedlich. Zu erwähnen ist Sensor 2358, der den Ausgleichsadapter C151 zwischengeschaltet hatte. Dieser Sensor hat im Gegensatz zu den anderen verwendeten Sensoren eine um das Vielfache höhere STD.

**Tabelle 11-1: STD's der verwendeten Sensoren bei unterschiedlicher Abtastrate  $f_s$**

Sensor	Standardabweichung [nm]	
	1 Hz	20 kHz
149	0.01	2.6
5433	0.06	1.4
4277	0.02	1.8
2358C	0.06	9.0

In den Abschnitten 7.3 und 7.4 wurde bei allen durchgeführten Versuchen die Erkenntnis gewonnen, dass die Gain- und Levelwerte einen starken Einfluss auf die Standardabweichung haben.

#### Driftverhalten

Beim Vergleich der Driften können die angegebenen Werte vom Hersteller erreicht werden, die in Tabelle 11-2 mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen werden. Die in der Masterarbeit berechneten Driften sind sogar besser als die vom Hersteller angegebenen. Es muss aber berücksichtigt werden, dass meine Messungen, die für die Auswertung herangezogen worden sind, alle im Labor des IGMS bei konstanter Temperatur von 20°C gemessen wurden. Das heißt, in der praktischen Anwendung im Feld werden diese Laborwerte nicht erreicht werden.

In Abschnitt 8.1 wurde das Aufheizverhalten des *SOFO Dynamic* untersucht. Dabei wurde nach einer Aufheizzeit von einer Stunde ein Drift von kleiner 1 nm/s festgestellt, was um circa das dreifache niedriger ist als das vom Hersteller angegebene. Bei der weiteren Untersuchung der Langzeitdriften konnte erstens durch Abzug des Referenzsensors 149 und zweitens durch den Abzug der tatsächlichen Bewegung

der Komparatorbank auch hier die Herstellerangabe mit Werten kleiner  $0.4 \mu\text{m}/\text{Tag}$  unterboten werden.

**Tabelle 11-2: Gegenüberstellung der Charakteristiken zum Driftverhalten- Hersteller vs. IGMS Gerät**

	Angaben von Hersteller Smartec	Ergebnisse Masterarbeit
<b>Kurzzeit-Drift:</b> (nach 1 h Aufwärmzeit)	< 3 nm/s entspricht <10.8 $\mu\text{m}/\text{h}$	< 1 nm/s entspricht 2.7 $\mu\text{m}/\text{h}$ (bei Laborbedingungen)
<b>Langzeit-Drift:</b> (mit Abzug Referenzsensor)	< 0.5 $\mu\text{m}/\text{Tag}$	< 0.4 $\mu\text{m}/\text{Tag}$ (mit Abzug von tatsächlicher Bewegung der Komparatorbank durch Vergleich mit <i>SOFO Static</i> )

### Abtastrate fs

Bei den Untersuchungen wurde eine Bandbreite von 1 Hz bis 20 kHz getestet, obwohl der Hersteller nur genau 10 kHz angibt. Es gab aber keinerlei Probleme mit der Abtastrate von 20 kHz.

## 11.2 Weitere Untersuchungen und Ausblick

Als nächstes wird auf die Möglichkeit von weiteren Untersuchungen eingegangen und ein kurzer Ausblick gegeben. Die am Anfang geplante Bestimmung der statischen Kennlinie (Variation von DL), der Temperaturuntersuchung (Klimakammer) und den Experimenten zum dynamischen Verhalten konnten aufgrund der umfangreicher als geplanten Versuche und deren Analyse nicht mehr in dieser Arbeit untersucht werden. Dies könnte in einer eigenen Masterarbeit abgefasst werden und würde weiteren Aufschluss über die Eigenschaften des Messinstruments *SOFO Dynamic* geben.

Desweiteren wurden nur die wichtigsten Funktionen und Möglichkeiten in der Software behandelt (siehe dazu Kapitel 3.2). Zum Beispiel könnten Experimente im Bereich *System Setup* mit verschiedenen Einstellungen der *Clock Source*, des *Digital Data Check* und *All Servos Off* durchgeführt werden um die Möglichkeiten mit dem *SOFO Dynamic* System zu erweitern und ausschöpfen zu können. Diese Funktionen sind allerdings kaum dokumentiert. Zusätzlich würde eine genauere Untersuchung der Funktion *Run Mode* oder die Abspeicherung im *Binary* Format in der *Digital Data* Registerkarte (siehe Kapitel 3.2.4) eventuell neue Erkenntnisse bringen.

Weiters könnten noch Experimente zur Untersuchung der Messlänge bzw. Messfrequenz durchgeführt werden. Zum Beispiel würden eine Untersuchung des Schwingquarzes im Bezug auf Temperatureffekte und ein Vergleich der Messzeit mit einer Funkuhr oder der GPS-Zeit neue Erkenntnisse bringen.

---

## Referenzen

- Balageas, D., Fritzen, C. P., Güemes, A. (2006) *Structural Health Monitoring*. ISTE, London, U.K.
- Brunner, F. K., Woschitz, H. (2008) Eingebetteter faseroptischer Verformungssensor: Statische und dynamische Messungen. *Messen in der Geotechnik*, TU Braunschweig, Deutschland, Heft 87, 61-80.
- Brunner, F. K., Woschitz, H., Macheiner, K. (2007) Monitoring of Deep-Seated Mass Movements. *3rd Int. Conf. Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Vancouver, Kanada, CD-Proceedings, 10 pages.
- Del Grosso, A., Torre, A., Inaudi, D., Brunetti, G., Pietrogrande, A. (2005) Monitoring system for a Cable-Stayed Bridge using static and dynamic fiber optic sensors. *2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII 2)*, Shenzhen, China, 415-420.
- Glišić, B., Inaudi, D. (2007) *Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring*. Wiley, New Jersey, USA.
- Hartung, J. (1998) *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. R. Oldenbourg Verlag, München, Deutschland.
- Inaudi, D., Elamari, A., Pflug, L., Gisin, N., Breguet, J., Vurpillot, S. (1994) Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil engineering structures. *Sensors and Actuators*, Vol 44, 125-130.
- Inaudi, D. (1997) *Fiber optic sensor network for the monitoring of civil engineering structures*, PhD thesis. EPFL Lausanne, Switzerland.
- Inaudi, D., Glišić, B. (2004) Combining Static and Dynamic deformation monitoring with long-gauge fiber optic sensors. *Proc. IABMAS '04, International Association for Bridge Maintenance and Safety*, Kyoto, Japan, October 19-22, 7 pages.
- Klose, B. (2008) *Meteorologie - Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Springer, Berlin, Deutschland.
- Lienhart, W., Brunner, F. K. (2003) Monitoring of bridge deformations using embedded fiber optical sensors. in *Stiros St. and Pytharouli St. (Eds.) Proc. 11th International Symposium on Deformation Measurements*, Santorini, Greece, 555-561.
- Measures, R. M. (2001) *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. Academic Press, San Diego, USA.
- Peng, G., Chu, P. (2002) *Fiber Optic Sensors*. Dekker, New York, USA.

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

Rogers, A. (2001) *Understanding optical fiber communications*. Artech House, Boston, USA.

Thyagarajan, K., Ghatak, A. (2007) *Fiber Optic Essentials*. Wiley, New Jersey, USA.

Werner, M. (2006) *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB*. Vieweg, Wiesbaden, Deutschland.

### **Manuals zum SOFO Dynamic Messsystem**

*OPD-4000 - Optical Phase Demodulator, User Manual*. Optiphase Inc., Kalifornien, USA, Version vom 21. Juli 2006.

*OPD-4000 - Optical Phase Demodulator, Software Manual*. Optiphase Inc., Kalifornien, USA, Version vom 6. Juli 2005.

*Smartec SOFO Dynamic, User Manual*. Smartec SA, Manno, Switzerland, February 2006.



## Anhang A: Ausschreibung der Masterarbeit

### Masterarbeit

**Thema: Smartec SOFO Dynamic: Prototypentests und Untersuchungen für den Feldeinsatz**

Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme beschäftigt sich seit einigen Jahren intensiv mit Faseroptischer Messtechnik und hat bei den Anwendungen dieser neuen Methoden im Baubereich eine europäische Vorreiterrolle erlangt.

Neben der traditionellen Erfassung von Deformationen mittels geodätischer Messmethoden haben die Methoden des Structural Health Monitorings zunehmend an Bedeutung gewonnen. Dabei werden wegen ihrer exzellenten Langzeitstabilität und Immunität gegen elektromagnetische Störungen insbesondere faseroptischen Sensoren verwendet, die z.B. direkt in eine Staumauer einbetoniert werden können.

Eines der am Institut vorhandenen Instrumente, das derzeit im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes im Geo-Monitoringbereich verwendet wird, ist das SOFO Dynamic (Smartec). Dessen wesentliche Spezifikationen sind

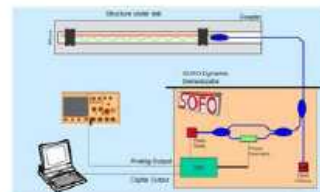
- simultane Messung von
- 4 Sensoren
- Abtastfrequenz von 1-20 kHz und einer
- Auflösung von  $<0.05\mu\text{m}$ , unabhängig von der Sensorlänge

Mit diesem Instrument können Messungen durchgeführt werden, die bisher nicht einmal ansatzweise möglich waren. Da das Instrument jedoch hauptsächlich für den Betrieb in Gebäuden entwickelt wurde, ist dessen Feldtauglichkeit im Rahmen von Prototypentests zu untersuchen.

#### Aufgaben:

Für die Masterarbeit relevante Themen sind

- Einarbeitung in die Thematik
- Statische Untersuchungen (Linearität, Hysterese, Driften)
- Bestimmung des Temperaturverhaltens
- Untersuchung des dynamischen Verhaltens
- Effekte verschiedener Sensortypen
- Möglicher Einsatz bei Strain Rosette BTZ/Gradenbach im Feld



Die Untersuchungen können im Messlabor des Instituts durchgeführt werden, wobei z.B. folgendes Spezial-Instrumentarium verwendet werden kann: Interferometer, automatischer Verschiebeapparat, Klimabox, Piezo Aktuator.

**Betreuer:** Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut WOSCHITZ

**Bearbeiter:** gesucht

## Anhang B: Verwendetes Zusatzinstrumentarium

### B.1 SOFO Static

Die in Abbildung B.1 dargestellte *SOFO Static* Reading Unit vom Typ V mit der Seriennr. 001FA9777, die Eigentum des IGMS ist, wurde für Referenzmessungen bei den Versuchen zum Driftverhalten verwendet, siehe Kapitel 8.3.



Abbildung B.1: SOFO Static Reading Unit

Das Messsystem des *SOFO Static* basiert auf dem Prinzip eines nieder-kohärenten doppelten Michelson-Interferometers in einer Tandemkonfiguration. Eine Lichtdiode (LED) sendet infrarotes Licht mit einer Kohärenzlänge von 30  $\mu\text{m}$  zum Sensor beziehungsweise ist ein beweglicher Spiegel notwendig um Interferenz zu erzeugen. Dies führt zu einer Messzeit von 6 Sekunden. Der Vorteil der nieder-kohärenten Interferometrie ist, dass absolute Messungen möglich sind, weil Interferenzen nur innerhalb der Kohärenzlänge auftreten. Weiters hat das Messgerät eine Präzision von 2  $\mu\text{m}$  vorzuweisen. Für eine genauere Beschreibung der Funktionsweise und des Messprinzips ist in Lienhart & Brunner (2003) enthalten.

### B.2 Wyler Neigungssensor

Wie in Abschnitt 7.5 beschrieben, wurde als Referenzmessung für die Versuche im Labor ein Neigungssensor der Firma *Wyler* (Schweiz) verwendet, der in Abbildung B.2 dargestellt wird. Die Typbezeichnung lautet Zerotron Typ 3 (ZERO 10) und die Seriennummer ist 03553 3CK-19-097. Dabei steht 10 für den Messbereich von  $\pm 10^\circ$ . Die Auflösung des Sensors liegt bei einem Messbereich von 24 h und einer Temperatur von 20°C bei 3,2“ bei 0.1 s Abtastrate beziehungsweise 0.2“ bei 10 s Abtastrate.



Abbildung B.2: Verwendeter ZEROTRONIC Neigungssensor der Firma Wyler (Schweiz)

Es ist gut zu erkennen, dass der Sensor in eine spezielle Halterung beziehungsweise in ein Gehäuse eingebaut ist, das wiederum auf einer Unterplatte fixiert ist. Diese Unterplatte ist auf die Lochrasterplatte des Interferometers aufgebaut und montiert, wie in Abbildung B.3 zu sehen ist. Dort wird der Aufbau des Neigungssensors und dessen Messachse gezeigt.

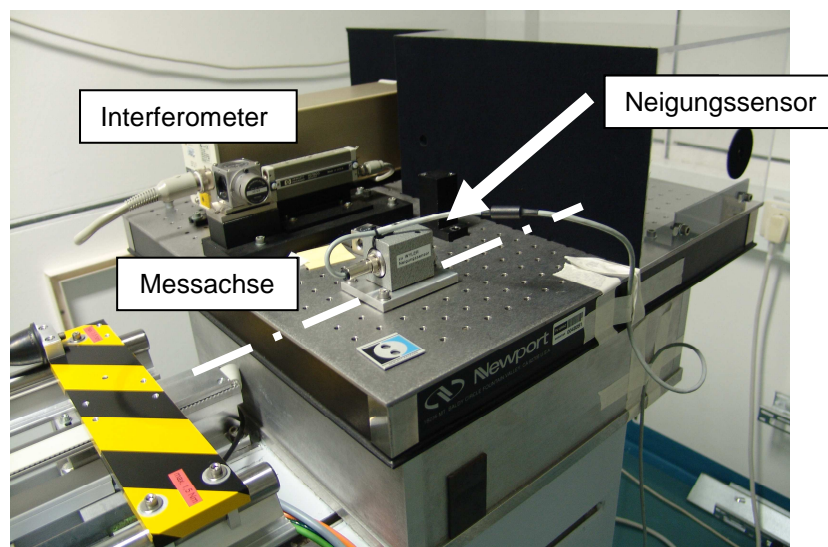


Abbildung B.3: Aufbau des Neigungssensors von Wyler & dessen Messachse

Die Messdaten des Sensors wurden zu einem PC übertragen und durch eine eigens von Ing. Presl (IGMS) entwickelte Software aufgenommen und gespeichert.

### B.3 Verwendete Computer

Für die Versuche wurden zur Speicherung der digitalen Daten unterschiedliche Computer (je nach Verfügbarkeit) verwendet. Dabei sind verschiedene Typen von Notebooks und zwei PC's im Einsatz gewesen. In den ersten Monaten, in denen Experimente gemacht wurden sind die beiden *Samsung*-Laptops des IGMS verwendet worden. Aufgrund von Messeinsätzen des Instituts waren aber zeitweise beide Com-

puter in Verwendung und es wurde beim Institut für Navigation und Satellitengeodäsie (INAS) an der TU Graz ein Gerät ausgeliehen. Für die letzten Wiederholungsmessungen und die Messungen vom Neigungssensor wurden zwei PCs verwendet, die im Labor des IGMS stationiert sind. Tabelle B-1 gibt einen Überblick über die verwendeten Computer.

**Tabelle B-1: Übersicht der verwendeten Computer**

Gerät	Eigentümer	Hersteller/Typ	Bez.	Betriebssystem	Pentium	GHz
Laptop	IGMS	Samsung/P35 XVM	NB 5	Windows XP	Intel Centrino Pentium 725	
Laptop	IGMS	CEN 1600/3	NB 6	Professionell		
Laptop	INAS	HP	NB 10	-	-	-
PC	IGMS	HP/ Compaq dc7100CMT (2004)	PC 29	Windows XP Professionell	Intel Celeron	2.8
PC	IGMS	LG/Shuttle	PC 23		Pentium 4	2.6

Beim Gebrauch vom INAS-Laptop wurde das USB-Interface nicht erkannt. Somit wurde die Software laut Anleitung im Manual der *SOFO Dynamic RU* installiert. Vorher musste aber ein vom Internet heruntergeladenes Software-Programm<sup>1</sup> installiert werden. Dies wurde im Zusammenhang mit dem Gerätemanager verwendet, um die *SOFO Dynamic* Software ausführen zu können. Dieser Vorgang musste zwar vor jeder Messung vollzogen werden, dafür gab es einen Vorteil: Der blaue Balken in der verwendeten Software (siehe Kapitel 3.2) wurde dadurch circa mit der fortgeschrittenen Messdauer mehr und mehr gefüllt. Das war vorher nicht der Fall.

## B.4 USV-Gerät

Für die Phasensprunguntersuchung in Kapitel 10.2.2 wurde ein USV-Gerät der Firma APC des Typs Smart-UPS 1000 (Leistung 100 VA) verwendet, siehe Abbildung B.4. Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) schützt angeschlossene Systeme vor Störungen wie Stromausfall. Weiters auch bei Unterbeziehungsweise Überspannung, Frequenzänderungen oder Oberschwingungen. Durch das Schalten großer Ströme treten ständig ungewollte Rückwirkungen auf das Stromnetz auf. Spannungsanhebungen treten zum Beispiel durch das Abschalten großer Lasten oder durch entfernte Blitzeinschläge auf. Letzteres Beispiel wurde auch bei meinen Messungen als Ursache vermutet.

<sup>1</sup> Quelle: <http://usb-fehlerbehebung.soft-ware.net/> (09/2009)



Abbildung B.4: Verwendete USV - APC SMART-UPS 1000

In Tabelle B-2 werden die wichtigsten technischen Daten des USV-Geräts aufgelistet.

Tabelle B-2: Technische Daten des USV-Geräts<sup>2</sup>

<b>Manufacturer</b>	APC
<b>Type</b>	Smart-UPS 1000
<b>Output Power Capacity</b>	670 Watts / 1000 VA
<b>Nominal Output Voltage</b>	230V
<b>Output Voltage Distortion</b>	Less than 5% at full load
<b>Output Frequency (sync to mains)</b>	47 - 53 Hz for 50 Hz nominal, 57 - 63 Hz for 60 Hz nominal
<b>Nominal Input Voltage</b>	230V
<b>Input Frequency</b>	50/60 Hz +/- 3 Hz (auto sensing)
<b>Waveform Type</b>	Sine wave
<b>Operating Relative Humidity</b>	0 - 95%
<b>Operating Environment</b>	0 - 40 C

## B.5 Wechselrichter

Der Wechselrichter Solarix 550 RI (Seriennr.: 18202954) von der Firma Fronius & Steca wurde für die Untersuchung der Phasensprünge verwendet (siehe Kapitel 10.2.2). Es handelt sich dabei um dasselbe Gerät, das auch schon für das ISDR-Projekt am Gradenbach verwendet wurde. Ein Wechselrichter, auch *Inverter* genannt, ist ein elektrisches Gerät, das Gleichspannung in Wechselspannung beziehungsweise Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Das verwendete Gerät wird in Abbildung B.5 dargestellt und für meinen Fall dazu verwendet um die Gleichspannung der Akkumulatoren in Wechselspannung umzuwandeln.

<sup>2</sup> Quelle: [http://www.apc.com/resource/include/techspec\\_index.cfm?base\\_sku=sua1000i](http://www.apc.com/resource/include/techspec_index.cfm?base_sku=sua1000i)



Abbildung B.5: Verwendeter Wechselrichter namens Solarix

In Tabelle B-3 werden die wichtigsten technischen Daten des verwendeten Wechselrichters angegeben.

Tabelle B-3: Technische Daten des Wechselrichters<sup>3</sup>

<b>Hersteller</b>	Fronius Steca
<b>Typ</b>	Solarix 500 RI
<b>Frequenz</b>	50 Hz (optional 60 Hz)
<b>Ausgangsspannung</b>	220 V + / - 10 %
<b>Nennleistung</b>	550 W
<b>Überlastbarkeit (AC)</b>	300 %
<b>Kurvenform</b>	reiner Sinus
<b>AC-Betriebsarten</b>	Dauer / Stand-by / Aus
<b>Eigenverbrauch</b>	430 mA / 50 mA / 15 mA
<b>DC-Eingangsspannung</b>	nom. 12 V
<b>DC-Eingangsstrom</b>	nom. 46 A (Inverter) + 15 A (DC-Last)
<b>Modulstrom</b>	nom. 25 A
<b>DC-Laststrom</b>	nom. 15 A
<b>Umgebungstemperatur</b>	- 15 bis + 45°C

<sup>3</sup> Quelle: [http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-17C30DC3-6F/fronius\\_international/hs.xml/83\\_3891\\_DEU\\_HTML.htm](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-17C30DC3-6F/fronius_international/hs.xml/83_3891_DEU_HTML.htm) (09/2009)

## Anhang C: Untersuchungen zur Präzision

In der unten stehenden Tabelle C-1 werden die verschiedenen Kombinationen bei den beschriebenen Versuchen in Abschnitt 7.3.1 „Tausch der Sensoren“ gezeigt.

Tabelle C-1: Ansteckvariationen von den Versuchen „Tausch der Sensoren“

Kanal	Set 1	Gain/Level [%] vor-nach	Set 2	Gain/Level [%] vor-nach	Set 3	Gain/Level [%] vor-nach	Set 4	Gain/Level [%] vor-nach
<b>Versuch 1 (1. Messreihe)</b>								
# 1	149	50/10	4277	19/10	4275	24/10	5433	21/10
# 2	4277	27/10	149	73/10	5433	29/10	4275	46/10
# 3	4275	84/10	5433	43/10	149	100/5	4277	49/10
# 4	5433	22/10	4275	21/10	4277	32/10	149	100/8
<b>Versuch 1 (2. Messreihe)</b>								
# 1	149	70/10	4277	21/10	4275	30/10	5433	23/10
# 2	4277	25/10-2/0	149	100/8-7/0	5433	30/10-2/0	4275	70/10
# 3	4275	86/10	5433	28/10	149	100/4	4277	45/10
# 4	5433	24/10	4275	24/10	4277	32/10	149	100/8
<b>Versuch 2</b>								
# 1	149	100/9	4277	20/10	5433	29/10	2358C	100/1
# 2	5433	35/10	149	83/9-92/10	2358C	100/0	4277	28/10
# 3	4277	20/10	2358C	100/1	149	100/4-13/0	5433	44/10
# 4	2358C	100/0 - 54/0	5433	92/9-6/0	4277	21/10	149	100/6
<b>Versuch 3 – 1. Messreihe – 1 kHz</b>								
# 1	149	22/10	4277	20/10	5433	28/10	4275	30/10
# 2	5433	23/10-2/0	149	53/10	4275	19/10	4277	44/10
# 3	4277	93/10-80/10	4275	24/10	149	30/10	5433	66/10
# 4	4275	100/8 – 100/5	5433	28/10	4277	60/10	149	29/10
<b>Versuch 3 – 2. Messreihe – 1 kHz</b>								
# 1	149	24/10	4277	20/10	5433	27/10	4275	38/10
# 2	5433	52/10-3/0	149	43/10-3/0	4275	43/10	4277	37/10
# 3	4277	48/10	4275	27/10	149	31/10-2/0	5433	57/10
# 4	4275	100/7	5433	34/10	4277	53/10	149	23/10-2/0
<b>Versuch 3 – 1. Messreihe – 100 Hz</b>								
# 1	149	21/10	4277	20/10	5433	25/10	4275	34/10
# 2	5433	100/10	149	34/10-2/0	4275	35/10	4277	58/10-4/0
# 3	4277	54/10-4/0	4275	26/10	149	25/10	5433	100/9
# 4	4275	100/7	5433	31/10	4277	42/10-3/0	149	23/10
<b>Versuch 3 – 2. Messreihe – 100 Hz</b>								
# 1	149	21/10	4277	18/10	5433	25/10	4275	36/10
# 2	5433	100/8	149	27/10-2/0	4275	63/10	4277	40/10-3/0
# 3	4277	56/10	4275	28/10	149	25/10	5433	100/9
# 4	4275	100/8	5433	23/10	4277	42/10	149	23/10

Tabelle C-1 fortgesetzt

<b>Versuch 4 – 1. Messreihe – 1 kHz</b>								
# 1	149	19/10	4277	20/10	5433	31/10-49/10	4275	26/10
# 2	5433	20/10	149	20/10-54/10	4275	22/10	4277	89/10-78/10
# 3	4277	23/10	4275	26/10	149	24/10	5433	100/7-100/5
# 4	4275	16/10-1/0	5433	33/10	4277	37/10	149	20/10
<b>Versuch 4 – 2. Messreihe – 1 kHz</b>								
# 1	149	19/10	4277	23/10	5433	29/8-39/10	4275	23/10
# 2	5433	19/10	149	23/10	4275	23/10	4277	45/10
# 3	4277	24/10	4275	33/10	149	23/10-2/0	5433	100/8
# 4	4275	16/10	5433	41/10-3/0	4277	42/10	149	21/10
<b>Versuch 4 – 1. Messreihe – 100 Hz</b>								
# 1	149	19/10	4277	45/10-49/10	5433	100/9	4275	100/8
# 2	5433	23/10	149	26/10	4275	20/10	4277	48/10-3/0
# 3	4277	36/10-2/0	4275	32/10-2/0	149	21/10	5433	100/9
# 4	4275	17/10	5433	38/10	4277	46/10	149	21/10
<b>Versuch 4 – 2. Messreihe – 100 Hz</b>								
# 1	149	22/10	4277	30/10	5433	42/10	4275	51/10
# 2	5433	21/10-1/0	149	36/10	4275	19/10	4277	59/10
# 3	4277	33/10	4275	33/10	149	22/10	5433	100/5
# 4	4275	20/10	5433	39/10	4277	46/10-3/10	149	20/10



## Anhang D: Langzeitmessung

In Tabelle D-1 werden die Gain und Level – Werte der untersuchten Langzeitmessung vom 27. Oktober – 3. November 2009 gezeigt (siehe Abbildung 7.10 und Abbildung 8.3).

**Tabelle D-1: Gain/Level der Langzeitmessung**

<b>24 h</b>		
Messung	Beginn: 27.10.09 11.25.45	Ende: 28.10.09 11.25.53
Kanal# Sensor	GAIN/LEVEL VOHER [%]	GAIN/LEVEL NACHER [%]
# 1: 149	15/10	28/10
# 2: 5433	22/10	1/0
# 3: 4277	17/10	41/10
# 4: 4275	15/10	74/10

<b>48 h</b>		
Messung	Beginn: 28.10.09 12.25.30	Ende: 29.10.09 12.25.37
Kanal# Sensor	GAIN/LEVEL VOHER [%]	GAIN/LEVEL NACHER [%]
# 1: 149	26/10	21/10
# 2: 5433	22/10	1/0
# 3: 4277	44/10	45/10
# 4: 4275	50/10	76/10

<b>72 h</b>		
Messung	Beginn: 29.10.09 13.13.30	Ende: 30.10.09 13.13.37
Kanal# Sensor	GAIN/LEVEL VOHER [%]	GAIN/LEVEL NACHER [%]
# 1: 149	24/10	24/10
# 2: 5433	19/10	1/0
# 3: 4277	56/10	69/10
# 4: 4275	32/10	28/10

<b>96 h</b>		
Messung	Beginn: 30.10.09 13.55.00	Ende: 31.10.09 13.55.08
Kanal# Sensor	GAIN/LEVEL VOHER [%]	GAIN/LEVEL NACHER [%]
# 1: 149	24/10	21/10
# 2: 5433	20/10	1/0
# 3: 4277	37/10	35/10
# 4: 4275	20/10	21/10

<b>120 h</b>		
Messung	Beginn: 31.10.09 14.43.00	Ende: 1.11.09 14.43.07
Kanal# Sensor	GAIN/LEVEL VOHER [%]	GAIN/LEVEL NACHER [%]
# 1: 149	24/10	23/10
# 2: 5433	22/10	22/10
# 3: 4277	36/10	28/10
# 4: 4275	18/10	20/10

<b>144 h</b>		
Messung	Beginn: 1.11.09 15.31.30	Ende: 2.11.09 15.31.37
Kanal# Sensor	GAIN/LEVEL VOHER [%]	GAIN/LEVEL NACHER [%]
# 1: 149	19/10	22/10
# 2: 5433	19/10	20/10
# 3: 4277	35/10	3/0
# 4: 4275	16/10	17/10

<b>168 h</b>		
Messung	Beginn: 2.11.09 16.14.00	Ende: 3.11.09 16.14.07
Kanal# Sensor	GAIN/LEVEL VOHER [%]	GAIN/LEVEL NACHER [%]
# 1: 149	17/10	18/10
# 2: 5433	23/10	20/10
# 3: 4277	31/10	31/10
# 4: 4275	18/10	18/10

Der in Abbildung D.1 gezeigte Plot stellt eine Langzeitmessung dar, wo der Langzeitdrift untersucht wurde. Die Messung erfolgte in der Osterwoche vom 7. bis 14. April 2009. Die Messdaten wurden in mehreren Abschnitten und mit 100 Hz ermittelt. Diese Zeitreihe gilt als Vorversuch zu den Untersuchungen in Abschnitt 8.2. Die Phasensprünge kamen nur bei Sensor 2358C vor.

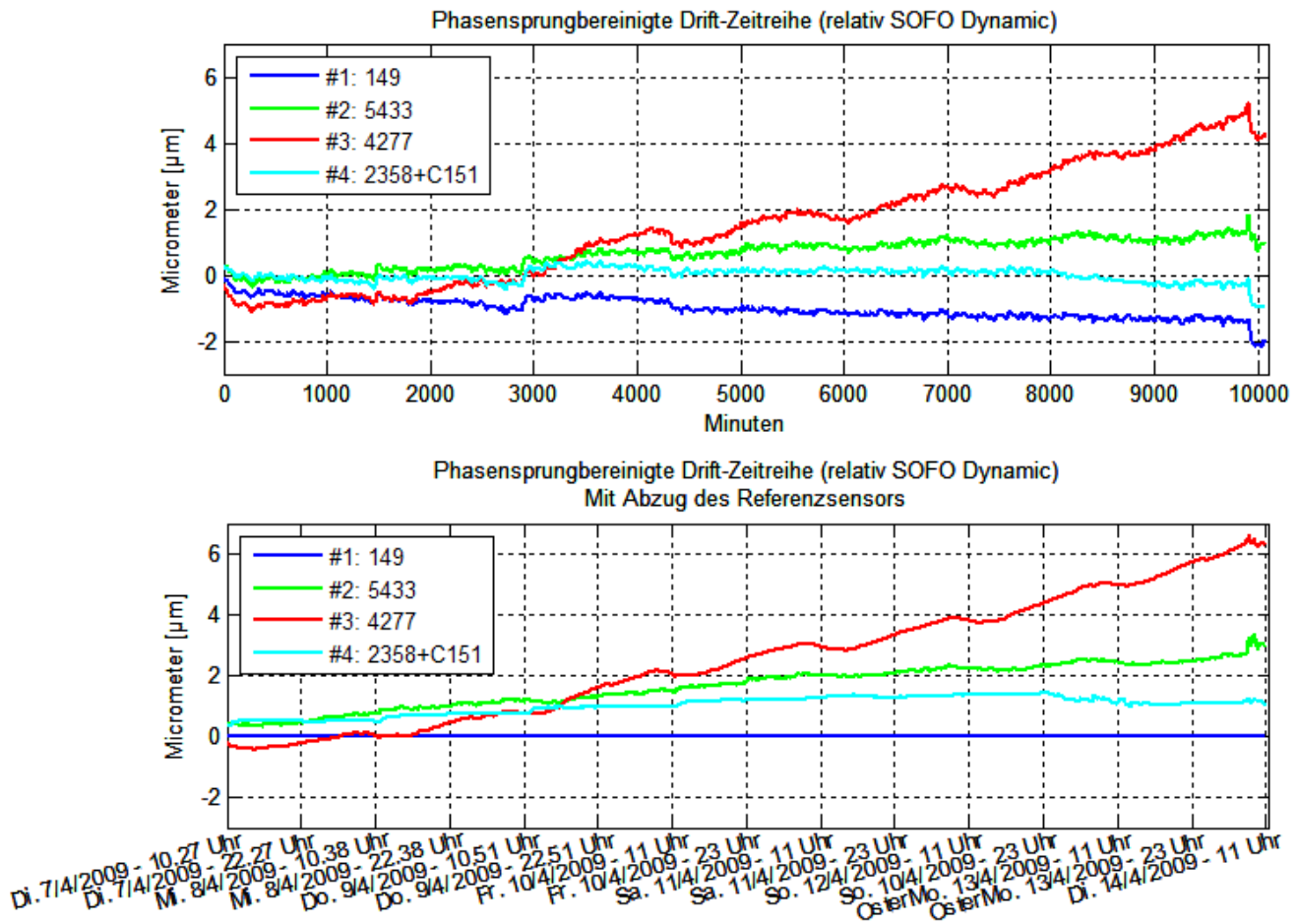


Abbildung D.1: Untersuchung des Driftverhaltens bei einer Messdauer von einer Woche

## Anhang E: Smartec Datenblätter

Alle folgenden Smartec Datenblätter wurden von der Webpage [www.smartec.ch](http://www.smartec.ch) entnommen.

### E.1: SOFO Dynamic Reading (5.2.2010)



#### GENERAL DESCRIPTION

The SOFO Dynamic reading unit allows to measure SOFO sensors at high frequencies. One reading unit can be used to demodulate up to 8 channels. Multiple units can be combined when higher channel counts are needed.

SOFO Dynamic compatible sensors can be measured with both the SOFO Dynamic (dynamic measurements) and the SOFO V or SOFO VI reading unit (static and long-term measurements, reduced range). Most standard SOFO sensors can be measured by the SOFO Dynamic reading unit using an external custom-made compensator.

#### TECHNICAL DESCRIPTION

The SOFO Dynamic reading unit is based on a heterodyne low-coherence interferometer operating at 1550 nm. The optical signal is phase modulated by the demodulation interferometer. After detection, the reading unit tracks the phase modulation introduced by the sensors and converts it into a displacement. The resulting deformation is available in analog form on the analog outputs or in digital form on the USB connection that can be used to transfer the measurements directly to a PC for storage and further analysis. The measurements are relative and the zero point is lost on power off, but can be recalibrated using the SOFO V or SOFO VI reading unit.

#### Application domains:

- Measurements of dynamic deformations of structures under dynamic loads such as traffic, wind, seismic, waves, ...
- Evaluation of dynamic amplification factors.
- System identification through modal analysis (ambient and forced vibrations). Determination of mode-shapes and modal curvatures.
- Damage detection through changes in modal parameters, stiffness and damping factors.
- Weight-in-motion through structural response.]



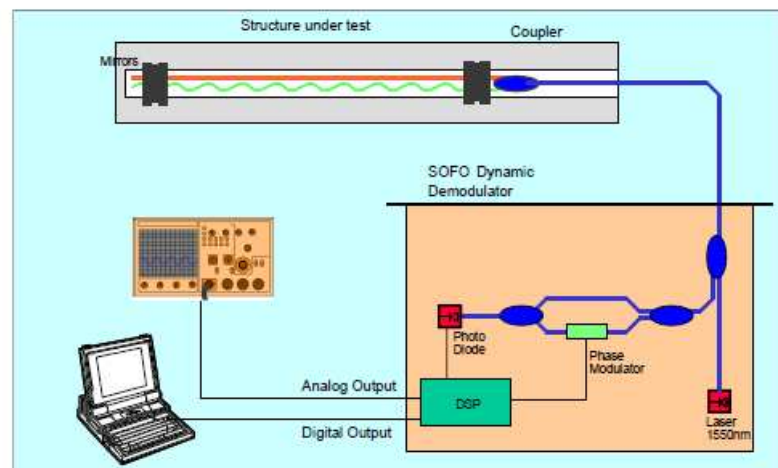
#### FEATURES

- Dynamic measurements (0 to 10'000 Hz)
- High resolution
- High linearity and accuracy
- Compatible with all types of sensors based on SOFO technology
- No calibration required
- Portable system

## E.1 fortgesetzt

**PERFORMANCES**

Bandwidth	0 (true DC deformation) to 10 kHz
Measurement range	±5 mm (maximum deformation)
Deformation rate	±10'000 µm/s (maximum deformation speed)
Sensor path unbalance	38 mm ± 5 mm ("DL" value)
Resolution	0.01 µm
Drift	<0.003 µm/s (after 1 h warm-up time); <0.5 µm/day with compensation (reduced no. of channels to 7)
Number of channels	8 per module, simultaneous acquisition
Digital readout	USB 2.0, up to 10 kHz refresh rate, 32 bits
Analog output	8 channels, 10 kHz refresh rate, 20 bits

**TECHNICAL CHARACTERISTICS**

Power supply	115 / 235 VAC
Dimensions / Weight	480 mm x 180 mm x 440 mm (19" rack mountable, 4HE) / 12 kg
Casing options	Optional rugged transport (shipping) metallic casing (610 mm x 305 mm x 736 mm)
Operating temperature	0°C to +30°C

**ORDERING INFORMATION**

Number of channels (4 or 8).

Option: Rugged transport metallic casing (yes or no).

Option: Compensators for Standard SOFO sensors (quantity and preferred "DL" value for each Compensator to be specified).

## E.2: SOFO Static (5.2.2010)

## 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 though 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 2 $\mu$ m
- 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

## E.2 fortgesetzt

**PERFORMANCES**

Measurement resolution	2 $\mu$ m 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 <sup>(1)</sup> optical ports, power supply,, ADAM modules connection port, modem power supply <sup>(1)</sup>
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 <sup>(1)</sup>
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

<sup>(1)</sup> optional

**ORDERING INFORMATION**

## E.3: SOFO Standard Deformation Sensor (5.2.2010)

## 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.

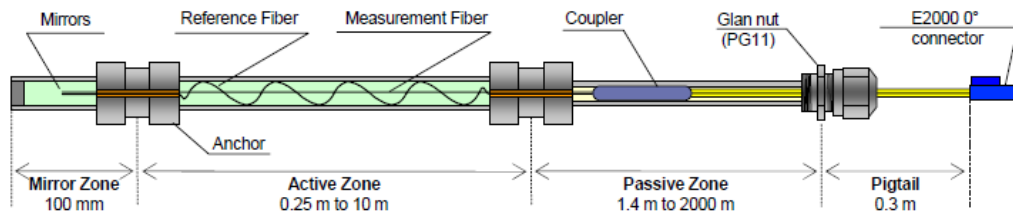


### FEATURES

- 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

## E.3 fortgesetzt

## SENSOR CONFIGURATION



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 $\mu\text{m}$ 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 $^{\circ}\text{C}$ to +110 $^{\circ}\text{C}$ Special active zone (upon request): -50 $^{\circ}\text{C}$ to +170 $^{\circ}\text{C}$ Passive zone: -40 $^{\circ}\text{C}$ to +80 $^{\circ}\text{C}$
Waterproof	5 bars (15 bars with extra protection on anchoring points)
Calibration	Not required

## ORDERING INFORMATION

Smartec SA · Via Pobietto 11, CH-8928 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. © Rodest Ltd.

v. 2009/05