

# **Micron Optics si425: Prototypentests und Untersuchungen für den Feldeinsatz**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science

**Florian Moser**



**Technische Universität Graz**

**Betreuer:**

Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut **Woschitz**

**Begutachter:**

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

**Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme**

Graz, Februar 2011

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

## EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

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

.....  
date

.....  
(signature)

## Kurzfassung

In der Geodäsie spielt das Wissen um die erreichbare Präzision eines Messsystems eine große Rolle. Damit werden Messaufgaben geplant und das dafür geeignete Instrumentarium gewählt. In dieser Masterarbeit sollen Prototypentests durchgeführt werden, die eine effiziente Verwendung der faseroptischen Interrogation Unit "Micron Optics si425" in der Praxis ermöglichen.

Da es sich um ein neuartiges Messsystem handelt, stehen nur spärliche Informationen über den Aufbau, die Funktionsweise und die Leistungsfähigkeit des Instrumentariums zur Verfügung. Daher werden zunächst das Funktionsprinzip des Instrumentariums, die verbauten Komponenten, sowie die Auswertung der Messsignale näher erläutert.

Im praktischen Teil der Arbeit wurden geeignete Referenzsensoren für die Experimente ausgewählt. Die Sensoren wurden zu ihrem Schutz in zwei robuste Kunststoffgehäuse eingebaut. Um möglichst konstante Temperaturbedingungen zu gewährleisten, wurden diese am Fuße des Bodenschachtes des Vertikalkomparators im institutseigenen Messlabor untergebracht. Die Eignung der Sensoren als stabile Referenz konnte in einer Voruntersuchung nachgewiesen werden.

Mithilfe der Referenzsensoren wurden verschiedene Experimente durchgeführt, um eine effizientere Nutzung des Instrumentariums im Feldeinsatz zu gewährleisten. Bei der durchgeführten Dauermessung konnte keine signifikante Drift in der Braggwellenlängenbestimmung festgestellt werden. Für präzise Messaufgaben konnte bei diesem Experiment zudem eine Aufwärmzeit für das Messsystem bestimmt werden, die sehr deutlich von der Herstellerangabe abweicht. Zudem kommt es bei der detektierten Wellenlänge, vermutlich aufgrund der Laserkalibrierung, zu Datensprüngen. Diese Datensprünge limitieren die erreichbare Präzision des Messsystems. Daher wurden aufgrund dieser Datensprünge Genauigkeitsangaben für die folgenden Experimente für jeden Sensor abgeleitet. Bei Experimenten zur Faserzentrierung konnte nachgewiesen werden, dass die bestimmte Wellenlänge unabhängig vom Anschließen der Faser an die Kanäle der si425 ist. Bei einem Experiment zur Signaldämpfung wurde durch Krümmung des Lichtwellenleiters künstlich die Signalintensität geschwächt. Die Messwerte zeigen bei einer niederen Signalintensität deutliche Abweichungen zu den zuvor bestimmten Werten.

## Abstract

Knowledge about the precision of a measurement system is important in geodesy. The planning of measuring tasks as well as the choice of appropriate instruments is based on this knowledge. In this master thesis prototype test are carried out, in order to provide information for the efficient use of the fiberoptic Interrogation Unit, Micron Optics si425 in practice.

As the measurement system is rather new, only little information is available about the structure, operating principle and performance of the instrument. Therefore the first part of the thesis describes its operating principle, the components used, as well as the computation of the measurement signals.

Firstly, appropriate reference sensors were chosen for the experiments carried out for this thesis. They were installed in two plastic boxes for mechanical protection. These boxes were installed at the bottom of the vertical comparator's shaft in the laboratory of the institute, in order to provide constant temperature conditions for the period of the experiments. In a preliminary investigation, the sensors proved themselves to be a stable reference.

Further, different experiments have been realized with the help of these reference sensors. A long term measurement showed no drift of the instrument's data. But the self-heating effect was found to be significantly longer than the one given by the manufacturer. Data jumps were found and the calibration of the swept laser is assumed to be the reason for them. As the data jumps limit the precision, a standard deviation was derived based on them. Another experiment showed that the alignment of the fiber to the interrogation system does not affect the measurement. An investigation on the signal attenuation has been achieved by using the macro bending effect and winding the fiber around an aluminium tube. When the signal intensity drops down to the critical level given by the manufacturer, the measurement data show large deviations compared to the unaffected data.

## Danksagung

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mich stets unterstützt und gefördert haben. Ohne diese Unterstützung wäre mit vieles nicht möglich gewesen.

Für die erstklassige Betreuung während der gesamten Masterarbeit möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Dr. Helmut Woschitz bedanken. Seine Ratschläge und Hinweise haben einen enormen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Einen weiteren Dank möchte ich Herrn Dipl. Ing. (FH) Robert Presl aussprechen, ohne dessen Unterstützung und Mitarbeit diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Zudem sei ein Dankeschön an alle Mitarbeiter des Institutes für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme für die stets freundliche Atmosphäre und die gute Betreuung gerichtet.

Hier möchte ich noch einen speziellen Dank an meine Freundin Valentina richten, die in den letzten Monaten sehr viel Geduld aufbringen musste, die mich immer wieder aufs Neue motiviert hat und die viel zu dieser Arbeit beigetragen hat.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung .....	2
1.2	Einsatzgebiete der Micron Optics si425.....	3
1.3	Überblick über die Arbeit.....	4
<b>2</b>	<b>DIE INTERROGATION UNIT SI425 DER FIRMA MICRON OPTICS.....</b>	<b>5</b>
2.1	Spezifikationen.....	6
2.2	Funktionsprinzip.....	7
2.2.1	<i>Durchstimmbarer Laser</i> .....	8
2.2.2	<i>FFP-TF</i> .....	10
2.2.3	<i>Faseroptischer Koppler</i> .....	11
2.2.4	<i>picoWave®</i> .....	11
2.2.5	<i>Photodetektor</i> .....	13
2.2.6	<i>FC/APC - Steckverbindung</i> .....	13
2.2.7	<i>Signalauswertung</i> .....	14
2.2.8	<i>Round Trip Delay</i> .....	16
2.2.9	<i>Temperatureinfluss</i> .....	18
2.3	Interne Kalibrierung des <i>Swept Lasers</i> .....	19
2.4	Software.....	21
2.4.1	<i>Channel Power Level View</i> .....	22
2.4.2	<i>Wavelength Measurement: Sensor Wavelength View</i> .....	23
2.4.3	<i>Wavelength Measurement: Table View</i> .....	24
<b>3</b>	<b>VORHANDENE UNTERSUCHUNGEN DER SI425 .....</b>	<b>25</b>
3.1	Untersuchungen von Micron Optics.....	26
3.1.1	<i>Temperaturuntersuchungen</i> .....	26
3.1.2	<i>Zusätzliche Temperaturuntersuchungen</i> .....	27
3.1.3	<i>Sonstige Untersuchungen</i> .....	28
3.2	Unabhängige Untersuchungen .....	28

<b>4</b>	<b>VORBEREITUNG DER EXPERIMENTE UND MESSAUFBAU .....</b>	<b>29</b>
4.1	Als Referenzsensoren verwendete FBG-Ketten .....	30
4.2	Aufbau während der Experimente .....	34
4.3	Voruntersuchung zur Vibrationsbeeinflussung .....	38
4.3.1	<i>Problemstellung</i> .....	38
4.3.2	<i>Durchführung</i> .....	39
4.3.3	<i>Vorverarbeitung der Daten</i> .....	40
4.3.4	<i>Analyse</i> .....	42
4.3.5	<i>Resultate</i> .....	44
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTE .....</b>	<b>45</b>
5.1	Dauermessung .....	45
5.1.1	<i>Problemstellung</i> .....	45
5.1.2	<i>Durchführung</i> .....	46
5.1.3	<i>Temperaturdaten</i> .....	47
5.1.4	<i>Aufheizeffekte</i> .....	49
5.1.5	<i>Datensprünge</i> .....	54
5.1.6	<i>Bestimmung von <math>\sigma_{ID, Dauer}</math></i> .....	58
5.1.7	<i>Resultate</i> .....	60
5.2	Faserzentrierung .....	62
5.2.1	<i>Problemstellung</i> .....	62
5.2.2	<i>Durchführung</i> .....	62
5.2.3	<i>Analyse</i> .....	64
5.2.4	<i>Resultate</i> .....	68
5.3	Faserzentrierung II .....	69
5.3.1	<i>Problemstellung</i> .....	69
5.3.2	<i>Durchführung</i> .....	69
5.3.3	<i>Analyse</i> .....	72
5.3.4	<i>Resultate</i> .....	75

5.4	Signaldämpfung .....	76
5.4.1	<i>Problemstellung</i> .....	76
5.4.2	<i>Durchführung</i> .....	76
5.4.3	<i>Analyse der Levelabnahme pro Wicklung</i> .....	81
5.4.4	<i>Analyse der Braggwellenlänge in Abhängigkeit des Levels</i> .....	82
5.4.5	<i>Evaluierung der Braggwellenlängenänderung aufgrund des Levels</i> .....	86
5.4.6	<i>Standardabweichung in Abhängigkeit des Levels</i> .....	87
5.4.7	<i>Resultate</i> .....	89
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>90</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>94</b>
	<b>ANHANG A: GRUNDLAGEN</b> .....	<b>A-1</b>
A.1	Prinzipieller Aufbau einer Glasfaser .....	A-1
A.2	Prinzip der FBG Sensoren .....	A-2
A.3	FBG Herstellung .....	A-4
A.4	Auswertung von FBG .....	A-6
	<b>ANHANG B: DETAILS UND WEITERE ERGEBNISSE DER EXPERIMENTE</b> .....	<b>B-1</b>
B.1	Voruntersuchung zur Vibrationsbeeinflussung .....	B-1
B.2	Dauermessung .....	B-4
B.3	Faserzentrierung .....	B-9
B.4	Faserzentrierung II .....	B-34
B.5	Signaldämpfung .....	B-46
	<b>ANHANG C: ÜBERBLICK SENSOREN (AUSFALTBAR)</b> .....	<b>C-1</b>



## Abkürzungsverzeichnis

DTG	Draw Tower Grating
DUT	Device Under Test
FBG	Faser Bragg Gitter / Fiber Bragg Grating
FC/APC	Fibre Connector / Angled Physical Contact
FFP	Fiber Fabry Perot
FFPI	FFP Interferometer
FFP-TF	FFP Tunable Filter
FSR	Freier Spektralbereich
IGMS	Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme
MAD	Median Absolute Deviation
Med	Median
MOI	Micron Optics Inc.
nm	Nanometer
pm	Pikometer
PZT	Piezoelectric Transducer
RASP	Rail Strain Pad
Std	Standardabweichung
TEC	Thermo Electric Cooler
VC	Vertikalkomparator
WDM	Wavelength Division Multiplexing

---

## 1 Einleitung

In der Geodäsie beschäftigen sich Ingenieure unter anderem mit der Überwachung von Anlagen und Bauwerken. Eine Messmethode, die in den letzten Jahren dabei immer mehr an Gewicht gewonnen hat, ist die Überwachung mittels faseroptischer Sensoren. Die Vorteile einer Bauwerksüberwachung durch faseroptische Sensoren wurde in den letzten Jahren anhand einer Vielzahl von Anwendungen (Graver et al., 2004) demonstriert. Durch diesen Sensortyp sind Präzisionen und Anwendungen realisierbar, die mit herkömmlichen geodätischen Methoden nicht möglich sind. So besitzt die in dieser Arbeit untersuchte Einheit eine kaum vorstellbare Wiederholpräzision von einem Pikometer für die optische Wellenlänge, was etwa  $0.8\mu\text{m}$  bei einer Basis von 1m entspricht. Durch eingebaute faseroptische Sensoren kann man zudem Vorgänge in einer Struktur messen und muss nicht durch Messungen von außen auf diese Vorgänge schließen.

Die inzwischen meist verbreiteten optischen Sensoren sind Faser Bragg Gitter (FBG) Sensoren (DeCusartis & Sher DeCusartis, 2006, S.21). Im Anhang A wird ein kurzer Überblick über den Aufbau und die Funktionsweise von FBG Sensoren gegeben.

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz beschäftigt sich seit einigen Jahren intensiv mit Faseroptischer Messtechnik, darunter auch mit Faser Bragg Gittern (FBG). So besitzt das Institut neben diversen Sensoren auch eine Interrogation Unit si425 der Firma Micron Optics Inc. (MOI) zum Erfassen dieser Sensoren.

Ein am IGMS durchgeführtes Forschungsprojekt (RASP) befasste sich mit der Entwicklung einer Messzwischenlage auf Basis von FBG Sensoren, die zwischen Schiene und Schwelle im Eisenbahnbereich eingesetzt werden soll (Woschitz, 2010A). Zur Messung der reflektierten FBG Wellenlängen kam die Interrogation Unit si425 (siehe Abbildung 1) der Firma Micron Optics zum Einsatz. Allerdings sind nur sehr wenige und oft unzureichende Informationen über die Funktionsweise und die Eigenschaften dieser Einheit bekannt. Aus diesen Gründen soll die Interrogation Unit in dieser Arbeit näher untersucht werden, um eine effiziente Nutzung des Instrumentariums in der Praxis zu ermöglichen.

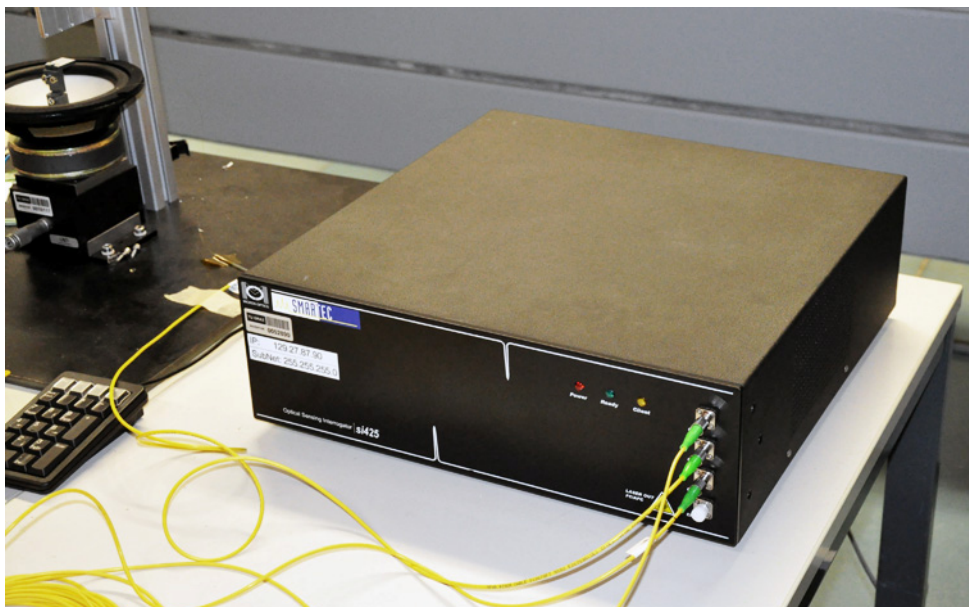


Abbildung 1: Interrogation Unit si425 der Firma Micron Optics

---

## 1.2 Einsatzgebiete der Micron Optics si425

Die Firma Micron Optics ist das führende Unternehmen im Bereich von faseroptischen Sensoren und hat mehr Interrogatoren im praktischen Einsatz als alle anderen Hersteller zusammen (Graver et al., 2004). Die Interrogation Units der Firma Micron Optics werden in vielen unterschiedlichen Bereichen eingesetzt, um Strukturen zu überwachen, so z.B. in verschiedenen Bauten, wie Brücken, Dämme, Tunnels, Windräder, Pipelines, Nuklearreaktoren oder aber auch in Flugzeugen, Schiffen, im Eisenbahnbau und in der Wissenschaft (Micron Optics, 2011B). Laut Micron Optics nutzen die Anwender dabei vor allem die Möglichkeit, schnelle und simultane Messungen zu Hunderten von Temperatur- und Dehnungssensoren zu machen.

Graver et al. (2004) sehen zwei Vorteile, die faseroptische Sensoren für eine Bauwerksüberwachung so attraktiv machen, nämlich ihre Multiplexfähigkeit und ihre Fähigkeit, über Jahre hinweg in extremen Umgebungen (z.B. in Jet Turbinen, Kraftwerkspipelines, Tragflächen von Flugzeugen, usw.) betrieben zu werden.

---

### 1.3 Überblick über die Arbeit

In Kapitel 2 wird die si425 Interrogation Unit näher beschrieben. Es werden das Funktionsprinzip und die einzelnen verbauten Teile detaillierter skizziert, sowie die vorhandene Software, die in der Masterarbeit verwendet wurde, kurz erläutert. In Kapitel 3 wird kurz auf die vorhandenen Untersuchungen der Firma Micron Optics eingegangen. Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit dem praktischen Teil dieser Arbeit. In Kapitel 4 werden die Vorbereitungen und der Aufbau im Messlabor vorgestellt. Ebenfalls in diesem Kapitel zu finden ist eine Voruntersuchung, in der die Stabilität der Referenzsensoren nachgewiesen wird. Kapitel 5 beschäftigt sich mit den durchgeführten Versuchen. Es werden eine Dauermessung und Untersuchungen zur Faserzentrierung sowie zum Einfluss der Signaldämpfung vorgestellt. Kapitel 6 zeigt neben einer Zusammenfassung auch weitere Möglichkeiten zur Untersuchung der Interrogation Unit auf.

Im Anhang A werden Informationen zu faseroptischen Sensoren allgemein und zu Fiber Bragg Gitter Sensoren im speziellen gegeben. Die Ergebnisse der im Hauptteil nicht gezeigten Sensoren sind für alle durchgeführten Experimente in Anhang B aufgelistet. In Anhang C ist eine Liste mit den verwendeten Sensoren zum Ausklappen verfügbar. Dies soll eine Interpretation der Ergebnisse und das Erkennen eventueller Abhängigkeiten erleichtern. Der Eindeutigkeit halber werden oft die englischen Originalbegriffe verwendet, anstatt diese zu übersetzen. Diese werden daher kursiv dargestellt.

---

## 2 Die Interrogation Unit si425 der Firma Micron Optics

Die zu untersuchende Interrogation Unit si425 der Firma Micron Optics wird von der Firma Smartec mit der Bezeichnung MuST weitervertrieben. MuST steht für *Multiplexed Strain and Temperature monitoring system based on Fiber Bragg Gratings*. Die Firma Smartec tritt hier nur als Zwischenhändler auf weshalb in dieser Arbeit die Bezeichnung si425 der Herstellerfirma Micron Optics Inc. (MOI) verwendet wird. Die Abkürzung si steht für Optical Sensing Interrogator. Da die am IGMS vorhandene si425 eine Spezialanfertigung ist, können die Daten in Abschnitt 2.1 von kommerziell erhältlichen Geräten der gleichen Typenbezeichnung leicht abweichen.

In den folgenden Abschnitten werden die in der Interrogation Unit verbauten Elemente sowie deren Abläufe aufgeschlüsselt behandelt. Ein besonderes Augenmerk gilt hierbei der im Manual der si425 (Micron Optics, 2004, S.8) beschriebenen *on-board calibration*. Die mit der Einheit gelieferte Software sowie die bei den Messungen benutzte Software werden am Ende des Kapitels dokumentiert.

## 2.1 Spezifikationen

Die wichtigsten Spezifikationen der si425 sind in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1: Wesentliche Spezifikationen si425 (Micron Optics, 2011B, S.9)**

Spezifikationen	si425
<b>Optisch</b>	
Anzahl der Kanäle	4
Messbereich <sup>1)</sup>	1520-1570nm
Abtastfrequenz	250 Hz
Auflösung	1pm (<0.2pm <sup>2)</sup> )
Wellenlängen Wiederholbarkeit <sup>3)</sup>	0.5pm
Wellenlängen Stabilität <sup>4)</sup>	typisch: 2pm; maximal 5pm
Maximale Anzahl an Sensoren/Kanal	32
<b>Mechanisch</b>	
Dimensionen	134x432x451mm
Gewicht	15,5 kg
<b>Umwelt</b>	
Arbeitstemperaturbereich	10 bis 40°C
Lagertemperaturbereich	-20 bis 70°C
Luftfeuchte Arbeitsbereich	0 bis 80%
Luftfeuchte Lagerung	0 bis 95%

<sup>1)</sup> Für eine Faserlänge <10km

<sup>2)</sup> erreicht durch Mittelbildung (Anzahl im Manual nicht angegeben)

<sup>3)</sup> Wavelength Repeatability 0.05pm with 250 averages (Micron Optics, 2011B)

<sup>4)</sup> Wavelength Stability (Micron Optics, 2011B)

Für eine "maximale Genauigkeit und Stabilität der Ergebnisse" gibt der Hersteller eine Aufwärmzeit von fünf Minuten an (Micron Optics, 2004, S.58).

## 2.2 Funktionsprinzip

In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise der si425 geschildert und anschließend wird auf die einzelnen Komponenten näher eingegangen. Die angeführten Informationen stammen großteils aus Patenten der Firma Micron Optics. Die wesentlichen Patente, in denen die Komponenten von *Interrogation Systems* allgemein beschrieben werden, werden in der Folge zur Erklärung verwendet und referenziert.

Das Messprinzip der si425 ist *Wavelength Division Multiplexing*, welches im Anhang A.4 näher erklärt wird.

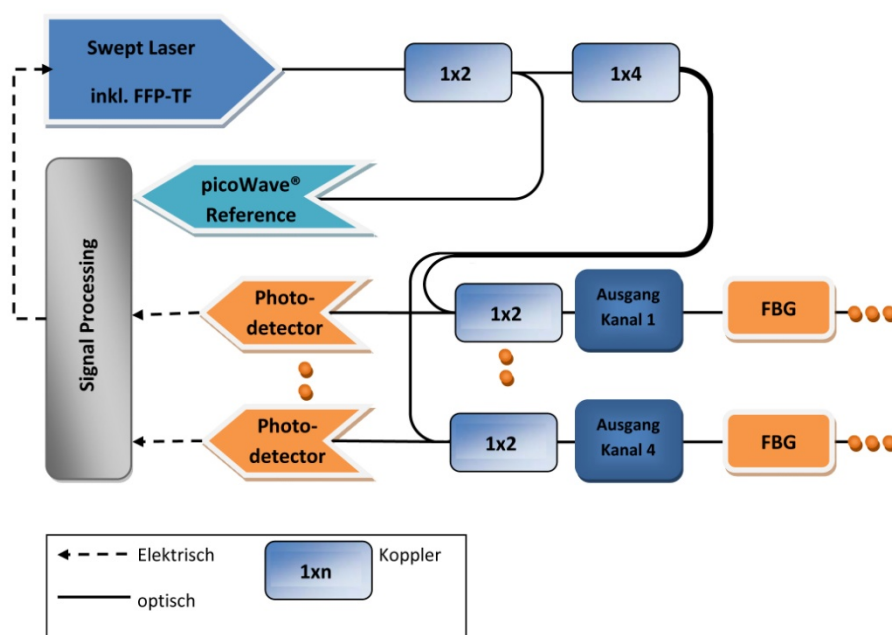


Abbildung 2: Schematische Funktionsweise si425 (nach Bao et al., 2002)

Abbildung 2 zeigt schematisch die Funktionsweise der si425 (*Swept Laser Interrogator*). Das vom *Swept Laser* (siehe Abschnitt 2.2.1) ausgesandte Signal wird durch einen optischen Koppler (siehe Abschnitt 2.2.3) auf einen Referenzarm und einen Messarm aufgeteilt. Das Messsignal wird wiederum auf die vier sogenannten Kanäle durch einen 1x4 Koppler aufgeteilt. Zur übersichtlicheren Darstellung sind in der Abbildung lediglich zwei Kanäle eingezeichnet. Auf jedem Kanal können je nach Abtastfrequenz bis zu 32 FBG Sensoren gemessen werden. Die von den Sensoren reflektierten Signale werden simultan ausgewertet. Dafür steht pro Kanal ein Photodetektor (siehe Abschnitt 2.2.5) zur Verfügung. Die Berechnung des rückreflektierten Signals wird in Abschnitt 2.2.7 detailliert beschrieben. Bei jedem *wavelength sweep* (siehe Abschnitt 2.2.1) des Lasers wird das ausgesandte Signal kalibriert und die Daten eines jeden Kanals werden aufgezeichnet (Bao et al., 2002).



### 2.2.1 Durchstimmbarer Laser

Das Herzstück der si425 bildet ein von Micron Optics entwickelter Faser-Ring-Laser, der den Messbereich von 50 Nanometern in 2 Millisekunden (vergleiche Abbildung 3) kontinuierlich durchfährt (Zhou et al., 2003).

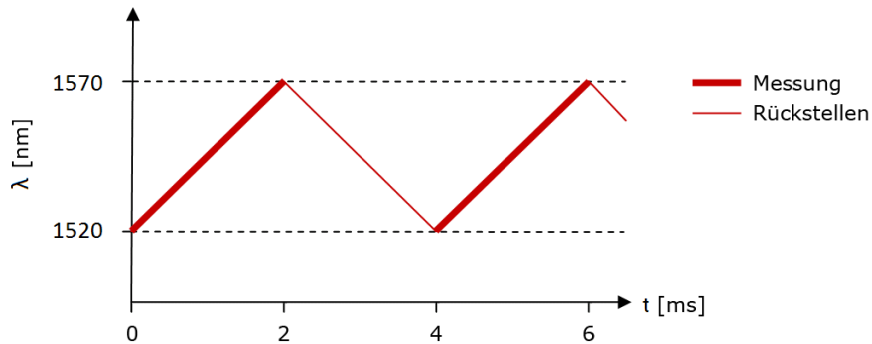


Abbildung 3: Durchstimmen eines Swept Lasers (nach Zhou et al., 2003)

Im Patent (Bao et al., 2002) wird die hier zusammengefasste Funktionsweise des Swept Lasers ausführlich erläutert.

In Abbildung 4 sehen wir den schematischen Aufbau des Lasers. Hier wird eine *pump wavelength* von einer Laserquelle (41) durch einen WDM Coupler (48) in den Fiber Ring eingespeist (Bao et al., 2002, S.13). Die Laserquelle ist hierbei ein *Linear Optical Amplifier*, hergestellt von der Firma Finistar Corporation (Typ G111 laut Micron Optics, 2003, S.79).

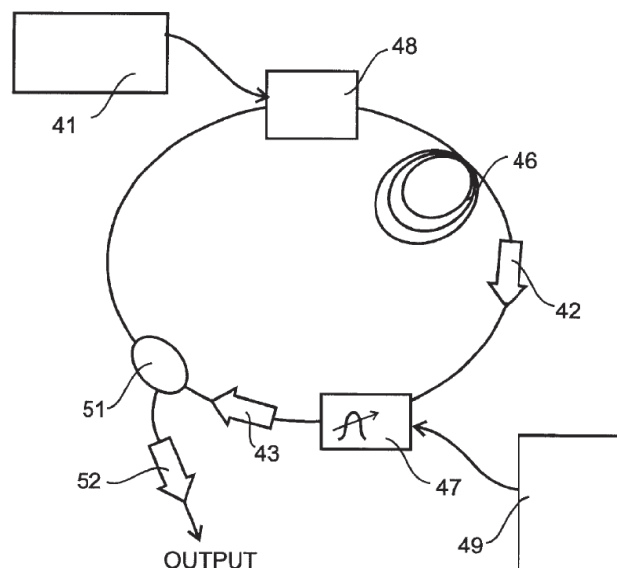


Abbildung 4: Aufbau Swept Laser (Bao et al., 2002, S.4)

Durch optische Isolatoren (42, 43) wird sichergestellt, dass das Signal sich in eine gewünschte Richtung (in diesem Fall im Uhrzeigersinn) bewegt. Das Signal durchläuft dann einen Erbium dotierten laseraktiven Faserkern (46) und schließlich noch einen *tunable Fiber Fabry Perot Filter* (47, FFP TF siehe Abschnitt 2.2.2). Der Laseroutput wird durch Änderung der Spiegelflächen im FFP TF (siehe Abschnitt 2.2.2) im Bereich von 1520 bis 1570nm abgestimmt. Der Laseroutput verlässt den Faser Ring Laser schlussendlich durch einen 50:50 Koppler (51).

Der Einsatz eines durchstimmbaren Lasers hat wesentliche Vorteile gegenüber Breitbandlichtquellen. Beim Durchstimmen wird die gesamte Energie des Lasers auf ein extrem kleines Frequenzband konzentriert. Durch diese Eigenschaft ist es auch möglich, FBG Sensoren mit einem geringen Reflexionsvermögen (<1%) noch mit guter Genauigkeit zu messen (Kreuzer, 2007). Auch kann das Lasersignal wegen des hohen Energiegehaltes ohne Qualitätsverluste auf die vier vorhandenen Ausgangskanäle aufgeteilt werden. Da jeder Kanal einen eigenen Empfänger besitzt, können an unterschiedlichen Kanälen FBG Sensoren mit gleicher Wellenlänge gemessen werden. Dadurch erhöht sich die zur Verfügung stehende Anzahl an Sensoren um das 4fache (Kreuzer, 2007).

Die hohe *output power* des Lasers macht es auch möglich, weit entfernte Sensoren zu messen. Bei einer SMF-28 Faser mit einer Dämpfung von 0.22dB/km können so Sensoren in einer Entfernung von bis zu 50km gemessen werden (Micron Optics, 2004, S.68).

### 2.2.2 FFP-TF

Das Herzstück des Lasers bildet ein *Fiber Fabry Perot Tunable Filter* (FFP-TF) (Zhou et al., 2003). Das Filter besteht aus einem simplen Etalon Design, das nur eine Faser und zwei Spiegel enthält (siehe Abbildung 5).

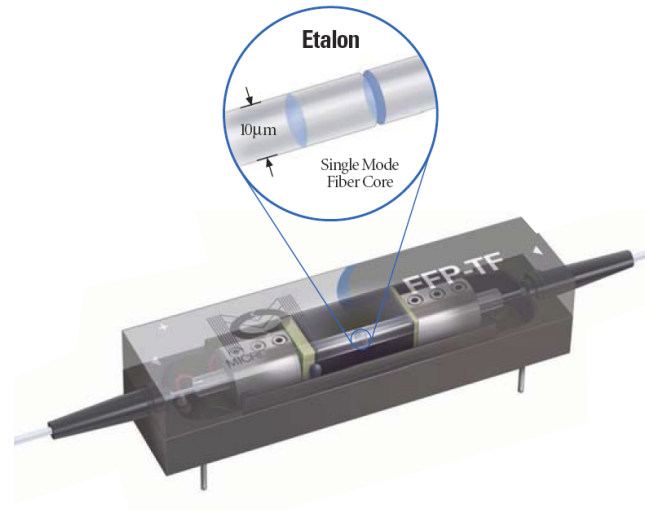


Abbildung 5: *Fiber Fabry Perot Tunable Filter*<sup>1</sup>

Das Durchstimmen des Filters geschieht durch Ändern des Abstandes zwischen den beiden Spiegeln. Diese Abstandsänderung der Spiegel wird durch einen *Piezoelectric Transducer* (PZT) durchgeführt. In Abbildung 6 ist ein Querschnitt eines FFP-TF dargestellt. Erhöht man die Spannung des PZT, so entfernen sich die beiden Spiegelflächen voneinander, vergrößern somit den Hohlraum und verschieben die interferometrischen *Peaks* zu einer höheren Wellenlänge (Micron Optics, 2009).

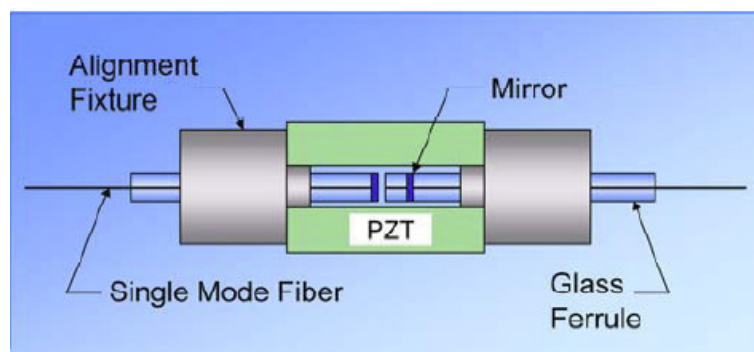


Abbildung 6: Querschnitt eines FFP TF (Micron Optics, 2009)

<sup>1</sup> [http://www.micronoptics.com.cn/pdfs/FFP Technology.pdf](http://www.micronoptics.com.cn/pdfs/FFP%20Technology.pdf)

### 2.2.3 Faseroptischer Koppler

Ein faseroptischer richtungsabhängiger Koppler ist eine der wichtigsten faseroptischen Komponenten und wird dazu verwendet, um optische Signale aufzuteilen und zu vereinen. Ein Koppler wird durch die Fusion zweier paralleler Fasern hergestellt. Wenn die Kerne der beiden Fasern nahe genug seitlich aneinander gebracht werden, überlappen sich ihre Ausbreitungsmoden und das optische Signal kann in beide Fasern transferiert werden (Hui & O`Sullivan, 2009, S.330).

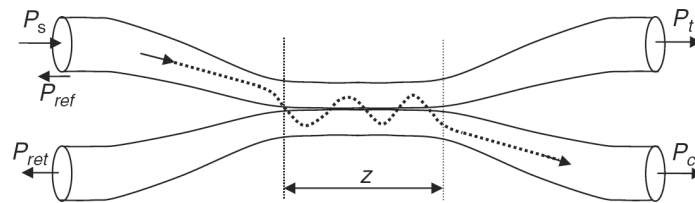
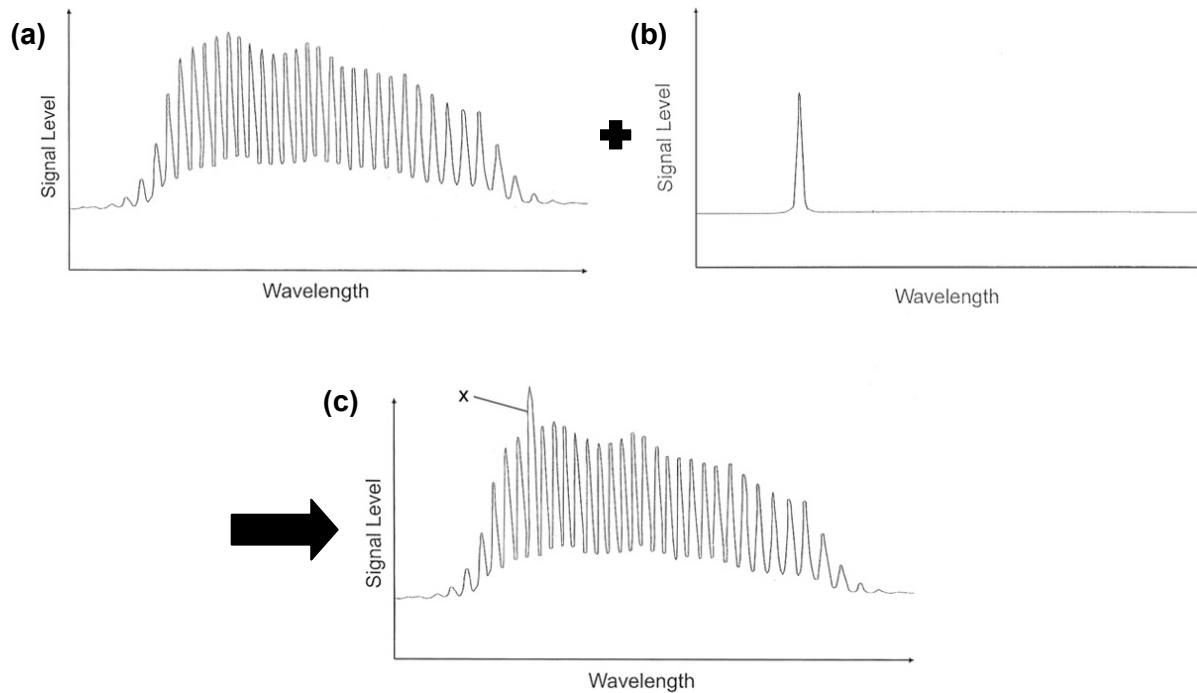


Abbildung 7: Querschnitt eines faseroptischen Kopplers (Hui & O`Sullivan, 2009)

### 2.2.4 picoWave®

Der folgende Abschnitt wurde aus dem Patent (Bao et al., 2001) stark gekürzt übernommen. Nähere Informationen können diesem Patent entnommen werden.

Die Wellenlängen Referenz picoWave® kombiniert ein fixes *Fabry Perot Interferometer* (FFPI) mit einem FBG (Micron Optics, 2009). Das Interferometer liefert dabei eine große Anzahl an präzisen und äquidistanten Wellenlängenpeaks (Abbildung 8a). Die Wellenlänge sowie der Abstand dieser so generierten *Peaks*, können bei der Kalibrierung des Interferometers exakt bestimmt werden. Nach der Kalibrierung jedoch gestaltet es sich als äußerst schwierig, einem *Peak* eine Wellenlänge zuzuordnen. Da der Abstand zwischen den vom FFPI generierten *Peaks* exakt bekannt ist, kann man allen *Peaks* eine Wellenlänge zuweisen, sobald dies bei einem *Peak* geschehen ist. Aus diesem Grund verwendet man ein FBG, um eine bekannte Wellenlänge zu generieren (Abbildung 8b) und dadurch die vom Interferometer generierten *Peaks* zu identifizieren (*Peak x* in Abbildung 8c). Die Wellenlänge des FBG wird dabei so gewählt, dass sie in den Bereich des FFPI fällt und vorzugsweise mit einem dieser generierten *Peaks* zusammenfällt.



**Abbildung 8: (a) Output FFPI, (b) Output FBG, (c) Kombination dieser beiden mit markierter Wellenlänge x nach Bao et al. (2001)**

Differenzen in den Temperaturexpansionskoeffizienten zwischen dem FFPI und dem FBG können dazu führen, dass sich der FBG-*Peak* relativ zu den *Peaks* des FFPI ändert. Bei Temperaturen, die von der Kalibriertemperatur abweichen, kann dies zu einer fälschlichen Identifizierung der Wellenlängen führen.

Es gibt verschiedene Ansätze um dieses Problem zu umgehen. So kann man beide Komponenten thermisch isolieren oder aber beide Komponenten wegen der Temperatur kompensieren, um diesen Einfluss so gering wie möglich zu halten. Der zweckmäßigere Ansatz ist aber, das FBG innerhalb der Faser des FFPI unterzubringen. Dadurch erreicht man, dass die Temperaturexpansionskoeffizienten von FBG und FFPI ausreichend übereinstimmen, um über einen weiten Temperaturbereich eine korrekte Identifizierung zu gewährleisten. Dies kann durch eine Unterbringung dieser beiden Elemente in einem isothermen Aufbau noch weiter optimiert werden. Daher sorgt beim picoWave® ein *Thermo Electric Cooler* (TEC) für zusätzliche thermische Stabilität (Micron Optics, 2011A).

## 2.2.5 Photodetektor

Mit einem Photodetektor wird das optische Signal in ein elektrisches umgewandelt, siehe z. B. DeCusartis & Sher DeCusartis (2006, S.55).

## 2.2.6 FC/APC - Steckverbindung

Die Faserketten oder auch einzelne FBG Sensoren werden mithilfe von Faseroptischen Steckern (FC) an die Kanäle der si425 angeschlossen. Bei diesen Steckern handelt es sich um sogenannte *angled physical contact* (APC) Stecker (Abbildung 9c), bei denen das Faserende schräg angeschliffen wurde. An den Ausgangskanälen der si425 ist daher eine Zentriervorrichtung (Abbildung 9b) vorhanden, um die faseroptischen Stecker exakt gegeneinander auszurichten. Die Benennung der Kanäle (*Channel 1* bis *Channel 4*) wird in Abbildung 9a gezeigt. Diese Nummerierung wird für die gesamte Arbeit weiterverwendet.

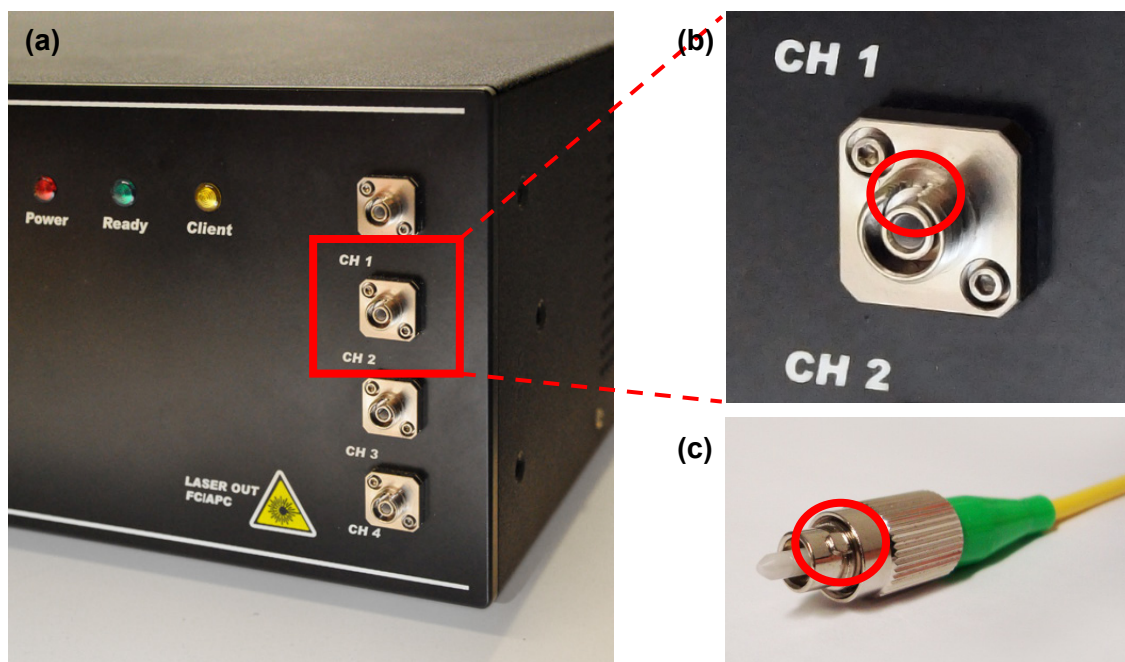


Abbildung 9: (a) Ansicht der si425 mit Kanalnummerierung, (b) Ausschnitt mit markierter Zentriervorrichtung, (c) FC/APC Stecker mit gekennzeichnetem Zentrierzapfen

## 2.2.7 Signalauswertung

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, wie die Interrogation Unit die Wellenlängen der einzelnen Sensoren berechnet. Die Berechnung basiert dabei auf dem Vergleich der Zeitpunkte, an denen die *Peaks* der Referenz und der *Peak* des Sensors den Photodetektor erreichen (Micron Optics, 2004, S.69).

In Abbildung 10 ist nochmals das Funktionsschema der si425 skizziert. Das ausgesandte Licht wird im ersten Koppler in zwei Teile aufgeteilt. Ein Teil durchläuft dabei die optische Referenz (picoWave®) und gelangt zum Referenz Photodetektor. Der andere Teil wird vom FBG (hier als *device under test*, DUT, bezeichnet) reflektiert und gelangt durch einen Koppler zum DUT Photodetektor. Eine simultane Aufzeichnung von beiden Photodetektoren wird durchgeführt und liefert die in Abbildung 11 dargestellten Daten.

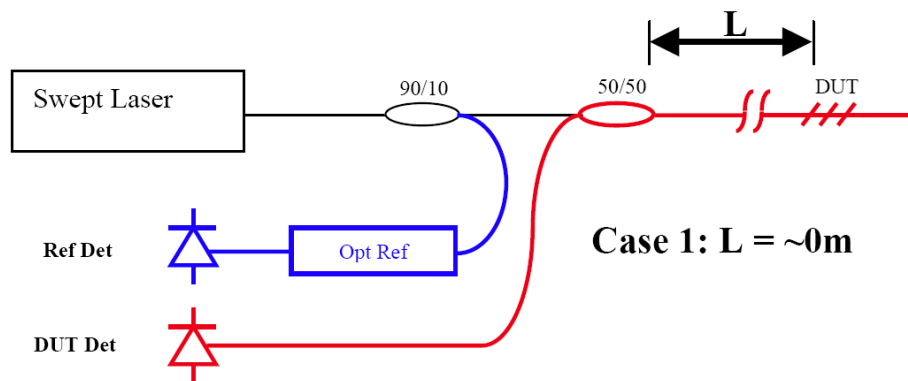


Abbildung 10: Funktionsschema si425, für eine Sensorlänge = 0m (Micron Optics, 2004, S.69)

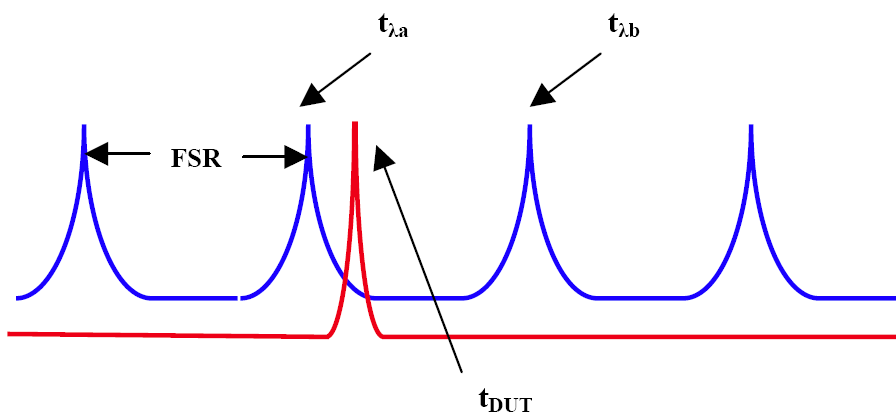


Abbildung 11: Darstellung der Berechnungsparameter (Micron Optics, 2004, S.69)

Die für die Berechnung der FBG Wellenlänge relevanten Parameter sind:

- $t_{\lambda a}$  ... Zeitpunkt, an dem Referenzpeak a detektiert wurde
- $\lambda_a$  ... Wellenlänge des Referenzpeaks a
- $t_{\lambda b}$  ... Zeitpunkt, an dem Referenzpeak b detektiert wurde
- $\lambda_b$  ... Wellenlänge des Referenzpeaks b
- $t_{DUT}$  ... Zeitpunkt, an dem der DUT Peak detektiert wurde

Um die DUT (Sensor) Wellenlänge zu berechnen, wird eine Interpolation durchgeführt. Die DUT Wellenlänge  $\lambda_{DUT}$  wird nach (2-1) berechnet, wobei hier FSR den freien Spektralbereich darstellt, der laut (2-2) berechnet wird (Micron Optics, 2004, S.69).

$$\lambda_{DUT} = \lambda_a + \left( \frac{t_{DUT} - t_{\lambda a}}{t_{\lambda b} - t_{\lambda a}} \right) * FSR \quad (2-1)$$

$$FSR = \lambda_b - \lambda_a \quad (2-2)$$

Ist die Anschlusslänge der Faser wesentlich größer, so sehen wir in (2-1), dass dies zu einer Verzögerung und damit zu einer Wellenlängenänderung führt. Dieser Umstand wird in Abbildung 12 visualisiert.

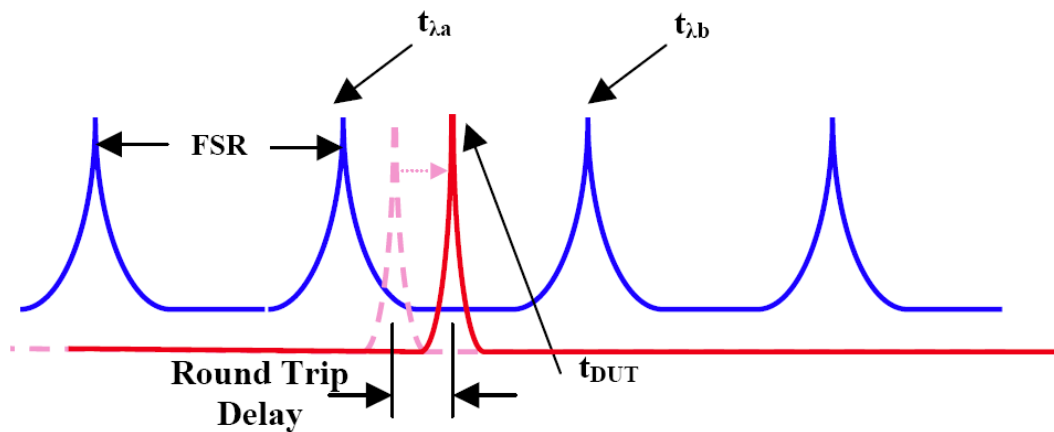


Abbildung 12: Wellenlängenänderung bei großen Distanzen (Micron Optics, 2004, S.69)

Bildet man die Differenz zwischen dem Fall  $L=0m$  ( $t_0$ ) und  $L=$ groß ( $t_L$ ), so erhält man (2-3) und nach Vereinfachung (2-4).

$$\Delta\lambda = \lambda_a + \left( \frac{t_0 - t_{\lambda a}}{t_{\lambda b} - t_{\lambda a}} \right) * FSR - \left( \lambda_a + \left( \frac{t_L - t_{\lambda a}}{t_{\lambda b} - t_{\lambda a}} \right) * FSR \right) \quad (2-3)$$

$$\Delta\lambda = (t_0 - t_L) * \frac{FSR}{t_{\lambda b} - t_{\lambda a}} \quad (2-4)$$



Somit ergibt sich in Abhängigkeit der Anschlussfaserlänge eine Wellenlängenänderung. Da das Signal diese Faser zweimal durchläuft wird dieser Effekt als *Round Trip Delay* bezeichnet.

### 2.2.8 Round Trip Delay

Die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Referenzpeaks lässt sich nach (2-5) berechnen. Dabei stellt  $\Lambda$  den gesamten durchstimmbaren Bereich von 50nm dar und  $T$  die dafür benötigte Zeit. Im Falle von 250Hz beläuft sich dieser Wert auf  $T=2\text{ms}$  (entspricht  $1/250/2$  s) für einen gesamten *Upscan*.

$$t_{\lambda b} - t_{\lambda a} = \frac{FSR}{\Lambda} * T \quad (2-5)$$

Die Zeit, die das Signal benötigt um eine Faser der Länge  $L$  zu durchlaufen, lässt sich mit (2-6) berechnen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in einem Medium  $c_n$  errechnet sich mittels (2-7), wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und  $n$  den Refraktionskoeffizienten des Mediums darstellt.

$$t_L = \frac{2*L}{c_n} \quad (2-6)$$

$$c_n = \frac{c}{n} \quad (2-7)$$

Setzt man (2-5) in (2-4) ein, kürzt sich der FSR und man erhält

$$\Delta\lambda = (t_0 - t_L) * \frac{\Lambda}{T} \quad (2-8)$$

In Tabelle 2 wurde (2-8) für verschiedene Faserlängen  $L$  ausgewertet.

**Tabelle 2: Wellenlängenänderung  $\Delta\lambda$  in Abhängigkeit der Faserlänge  $L$**

L [m]	$\Delta\lambda^*$ [pm]
2	0.5
5	1.2
10	2.5
15	3.7
25	6.1
100	24.5
500	122.5

*\*...für die Berechnung herangezogene Werte:*  
 $c = 2.997 \cdot 10^8$  m/s  
 $n = 1.4682$  (Standard SMF-28)  
 $\lambda = 50\text{nm}; T = 2\text{ms}$  (250Hz)

Formt man die oben erhaltenen Formeln, unter Verwendung von (2-6) und  $t_0=0$  noch um, ergibt sich für die si425 mit 250Hz

$$\Delta\lambda = L * \left( \frac{2}{c_n} * \frac{\lambda}{T} \right) = L * a \quad (2-9)$$

Führt man für den Klammerausdruck eine Konstante  $a$  ein, so errechnet sich  $a$  mit  $0.24 \cdot 10^{-12}$ . Für Abschätzungen im Feldeinsatz kann daher Näherungsgleichung

$$\Delta\lambda_{[pm]} \approx \frac{1}{4} * L_{[m]} \quad (2-10)$$

verwendet werden (Micron Optics, 2004, S.72).

### 2.2.9 Temperatureinfluss

Die Laufzeit innerhalb der Faser bis zum Sensor und retour wird durch einen vorhandenen Temperaturunterschied entlang der Faser beeinflusst. So beträgt die Änderung des Brechungsindex in Abhängigkeit einer Temperaturänderung laut Haber et al. (2009):

$$\frac{dn}{dT} = 10^{-5} / K \quad (2-11)$$

Die Temperatur beeinflusst den Brechungsindex und damit auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium aus (2-7). Die Auswirkung der Temperatur auf die detektierte Wellenlänge wurde in Tabelle 3 berechnet. Es ist ersichtlich, dass dieser Einfluss für Faserlängen unter 1km und Temperaturdifferenzen von unter 40°C vernachlässigt werden kann.

**Tabelle 3: Wellenlängenänderung  $\Delta\lambda$  bei einer Temperaturänderung  $\Delta t$  entlang der Faser für verschiedene Faserlängen L**

L [m]	$\Delta\lambda^*$ [pm] bei		
	$\Delta t = 10^\circ\text{C}$	$\Delta t = 40^\circ\text{C}$	$\Delta t = 70^\circ\text{C}$
1000	0.0	0.1	0.2
20000	0.5	2.0	3.4
50000	1.2	4.9	8.6

*\*...für die Berechnung herangezogene Werte:  $c=2.997 \cdot 10^8$  m/s;  $n_0=1.4682$*

## 2.3 Interne Kalibrierung des Swept Lasers

Im Produktblatt der si425 (Micron Optics, 2011B) ist von einem Kalibriervorgang des Signals bei jedem *wavelength sweep* (also alle 4ms) des Lasers zu lesen. Von Micron Optics wird sonst aber in keiner Weise beschrieben, wie diese Kalibrierung von statten geht. Im Patent Bao et al. (2002) hingegen wird die Kalibrierung des *Swept Lasers* für *Interrogation Systems* beschrieben, die im Folgenden erläutert wird. Obwohl nicht klar hervorgeht, ob diese Kalibrierung auch bei der si425 gültig ist, wird aufgrund der in Abschnitt 5.1.5 gezeigten Datensprünge vermutet, dass diese Kalibrierung eingebaut ist.

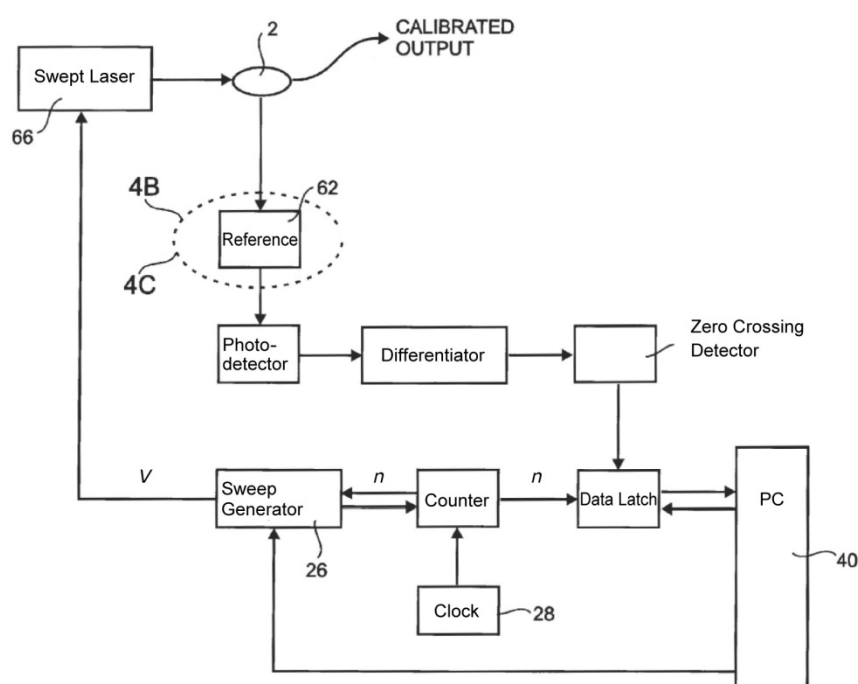


Abbildung 13: Schema eines kalibrierten *Swept Lasers* (nach Bao et al., 2002)

Abbildung 13 zeigt schematisch den Aufbau eines kalibrierten *Swept Lasers*. Eine Uhr (28) liefert eine Impulsfolge an den *Counter*. Dieser wiederum generiert eine numerische Variable  $n$ , die an den *Sweep Generator* und die *Data Latch* weitergeleitet wird. Im normalen Betrieb sind die Impulsfolgen der Uhr linear zur Zeit. Der *Sweep Generator* generiert einen linearen Spannungsanstieg  $V$ , basierend auf den bereitgestellten Werten des *Counters* und bringt diese Spannung an den PZT (siehe Abschnitt 2.2.2) an, um die Wellenlänge des Lasers durchzustimmen. Beim Durchstimmen des Lasers wird ein Teil des Signals in den Referenzarm abgezweigt und *Peaks*, die mit den kalibrierten Wellenlängen der Referenz übereinstimmen (siehe Abbildung 8c), werden detektiert. Die Intensität des Signals am Detektor  $h$  wird als eine Funktion der Zeit (während des *sweeps*) gemessen. Das elektrische Signal des *Detectors* wird an einen *Differentiator* weitergeleitet. Dieser generiert ein Signal

$dh/dt$ , das ein *zero-crossing* bei jenen Wellenlängen besitzt, bei denen die kalibrierten Referenzwellenlängen einen Maximumpeak erreichen. Nähere Details zum *zero-crossing* sind im Patent Miller et al. (1998) zu finden. Dieses differenzierte Signal wird nun an einen *zero-crossing detector* weitergeleitet, der ein elektronisches Signal produziert, das mit dem *zero-crossing* des Signals  $dh/dt$  koinzidiert. Dieses Signal gelangt nun zur *data latch*, die den Wert  $n$  eines jeden *zero-crossings*, der mit einer Referenzwellenlänge assoziiert werden kann, aufnimmt und diesen an den PC weitergibt. Der PC sendet daraufhin Kontrollsignale an den *sweep generator*, die dieser ebenfalls an den *counter* weiterleitet.

Eine Kalibrierung, die mit dieser Methode erreicht wird, ist über den gesamten durchstimmten Wellenlängenbereich höchst akkurat und trägt Nichtlinearitäten im Wellenlängen-tuning Rechnung. So ist in Bao et al. (2002) folgendes zu lesen:

*"In general, however, the referencing method employed in this invention not only stabilizes the system against thermal and mechanical drifts, but also corrects for filter and PZT non-linearities. Using the accurate interpolation methods of this invention, unknown FBG shifts can be measured to an accuracy of a few  $\mu$ strain over very long time periods."*

## 2.4 Software

In diesem Abschnitt soll die Software zum Auslesen und speichern der Daten der si425 erläutert werden. Es werden allerdings nur die für diese Arbeit relevanten Aspekte und Einstellungsmöglichkeiten erläutert. Nähere Informationen sind im Manual (Micron Optics, 2004, S.11ff) zu finden.

Die von der si425 ausgewerteten Ergebnisse können per Ethernet Kabel an einem angeschlossenen Bildschirm (siehe Abbildung 14) betrachtet werden oder aber an einen PC übermittelt und dort gespeichert werden.

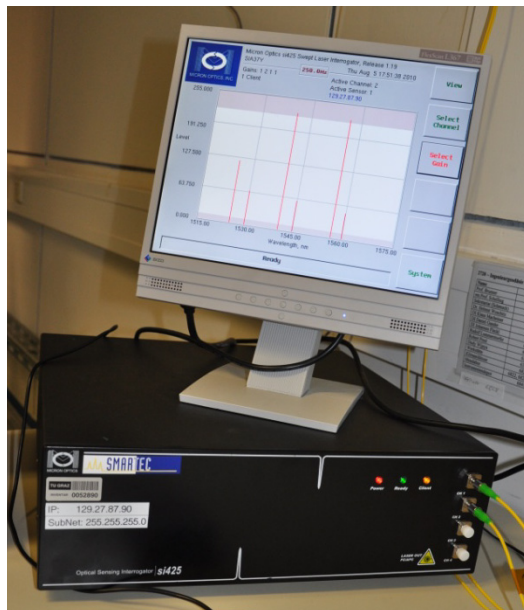


Abbildung 14: si425 mit angeschlossenem Bildschirm

Die Software für den PC ist ein offener LabView Code, der von Herrn Dr. Woschitz dahingehend modifiziert wurde, sodass zusätzliche Informationen (z.B. Signalintensität) mitgemessen und gespeichert werden können. Die in dieser Arbeit verwendete Version dieses modifizierten Codes ist

[si425v1.32 lv7.0 full version whd 20080717.vi](#).

Die Software Version der Interrogation Unit ist **Release 1.19**.

Es stehen vier Ansichtsmöglichkeiten zur Verfügung, die in den nächsten Abschnitten erläutert werden.

### 2.4.1 Channel Power Level View

Im *Channel Power Level View* (siehe Abbildung 15) ist die Intensität aller reflektierten FBG in Abhängigkeit der Wellenlänge eines selektierten Kanals dargestellt. Die Signalintensität auf der Y-Achse besitzt dabei keine Einheit und wird als **Level** bezeichnet. In dieser Ansicht sind die Bereiche unter einem *Level* von ca. 10 und oberhalb eines *Levels* von ca. 225 pink eingefärbt. Diese Bereiche markieren den *Level*, wo Messungen prinzipiell noch möglich aber "nicht optimal" sind (Micron Optics, 2004, S.12). Signale, die im oberen pinken Bereich angesiedelt sind, laufen Gefahr, in die Sättigung des Detektors zu gelangen, was zu großen Wellenlängenveränderungen führen kann (Micron Optics, 2004, S.12). Laut (Micron Optics, 2004, S.12) können Signale im unteren pinken Bereich unter das minimale detektierbare *Level* fallen, falls noch weitere Verluste auftreten. Es stehen allerdings keine Informationen zur Verfügung, ob die detektierte Braggwellenlänge durch einen tiefen *Level* beeinflusst wird.

Mit der Einstellungsmöglichkeit *Select Gain* (Abbildung 15 rechter Bildrand) kann der *Level* der Sensoren verstärkt werden<sup>2</sup>, allerdings ist dies nur für alle Sensoren eines selektierten Kanals möglich. Wird diese Einstellung selektiert, so erscheint ein Eingabefenster, in dem ein numerischer Wert für den *Gain* eingegeben werden kann. Als Standard ist *Gain* = 1 eingestellt. Die Einstellungen für den *Gain* pro Kanal sehen wir in Abbildung 15 im linken oberen Bildrand rot hervorgehoben. Der *Gain* sollte so gewählt werden, dass sich die *Levels* der Sensoren zwischen den beiden pinken Bereichen befinden (Micron Optics, 2004, S.12).

---

<sup>2</sup> In Abschnitt 2.2.1 wurde der Laser der Einheit als *Linear optical Amplifier* vorgestellt. *Optical Amplifiers* (optische Verstärker) bringen einen bestimmten **Gain** an ein optisches Signal an (Verhältnis zwischen *output power* und *input power*, gemessen in dB DeCusartis & Sher DeCusartis, 2006, S.115)

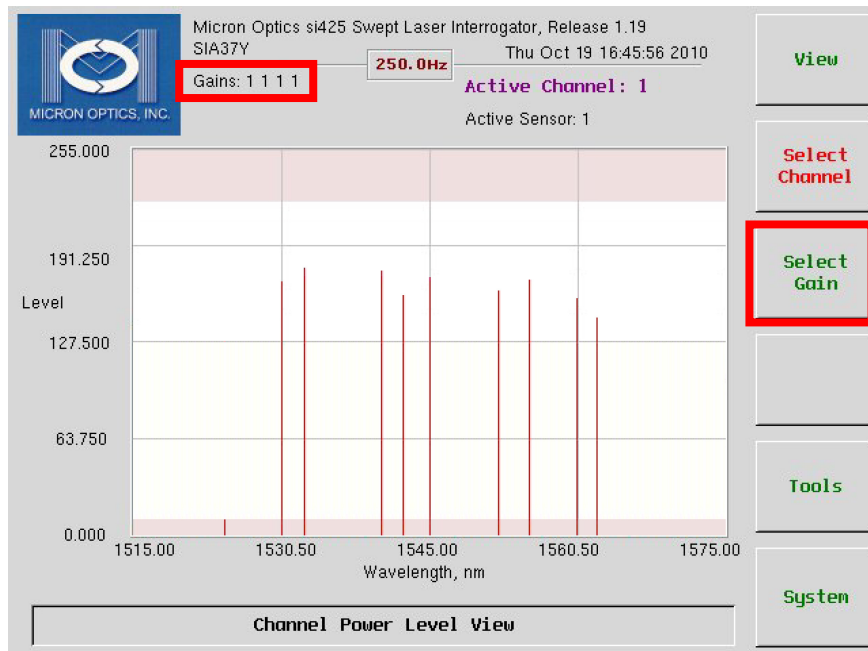


Abbildung 15: Channel Power Level View

### 2.4.2 Wavelength Measurement: Sensor Wavelength View

Im *Sensor Wavelength View* (siehe Abbildung 16) wird die gemessene Wellenlänge eines einzelnen Sensors dargestellt.

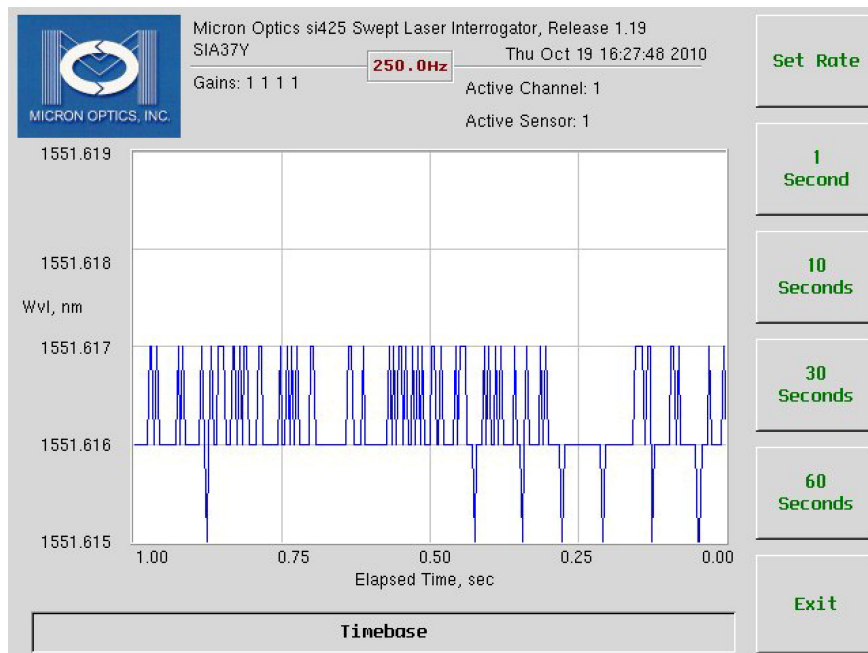


Abbildung 16: Sensor Wavelength View



### 2.4.3 Wavelength Measurement: Table View

Im *Table View* (siehe Abbildung 17a) werden die Wellenlängen aller erfassten Sensoren numerisch in einer Tabelle angezeigt. Im Header der Spalte steht dabei in Klammern die Gesamtanzahl der detektierten Sensoren für diesen Kanal. In dieser Ansicht besteht die Möglichkeit (Abbildung 17a, rechter Bildrand), den Abstand jedes Sensors von der Interrogation Unit einzugeben, um die in Abschnitt 2.2.8 vorgestellte Wellenlängenänderung aufgrund der Faserlänge zu kompensieren. Wird diese Option selektiert, öffnet sich das in Abbildung 17b dargestellte Fenster mit einer Eingabemaske. Bei den nachfolgenden Experimenten wurde diese Option nicht verwendet. Daher können die gemessenen Wellenlängen, je nach verwendeter Zwischenfaser, voneinander abweichen (siehe Tabelle 2). Die verwendeten Sensoren sollen für die einzelnen Experimente als stabile Referenz dienen und daher spielt ihre exakte Wellenlänge eine nebensächliche Rolle, da diese ohnedies auch durch Saisonale Temperaturänderungen im Bodenschicht des Vertikalkomparators (siehe Abschnitt 4.2) verfälscht werden.

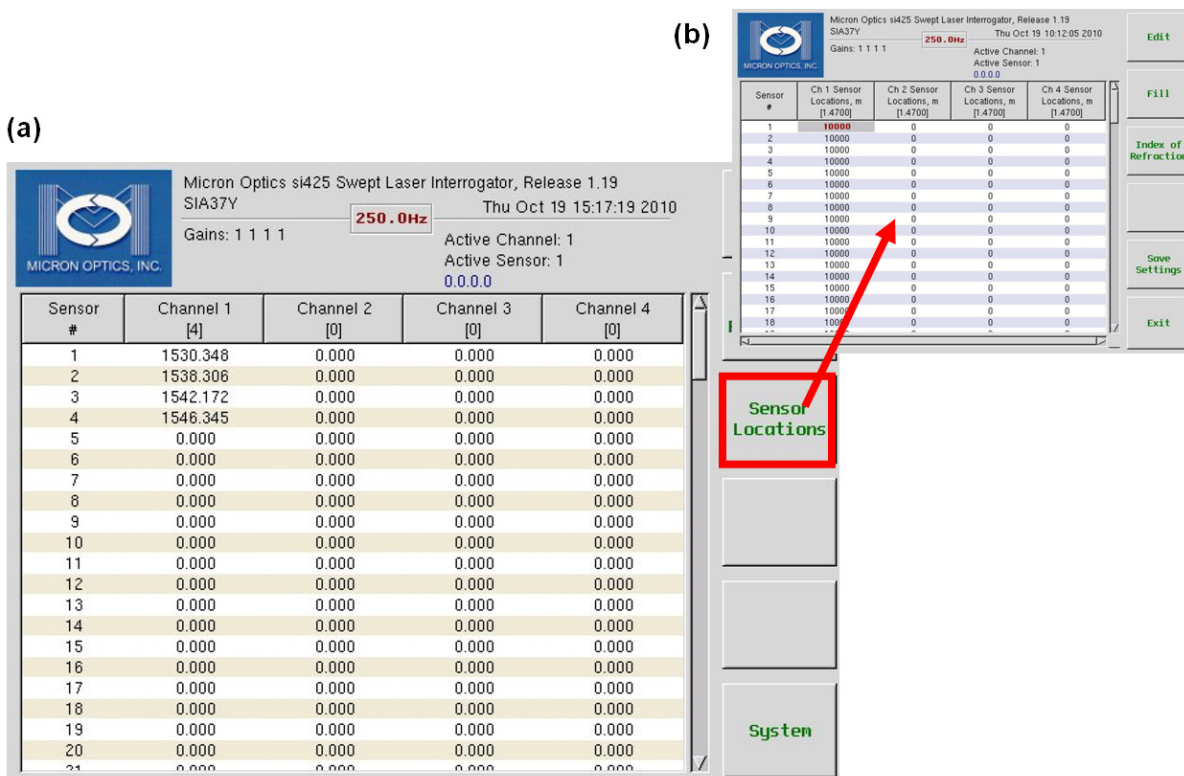


Abbildung 17: Table View (a), Sensor Location (b)

---

### 3 Vorhandene Untersuchungen der si425

Jede si425 durchläuft vor der Auslieferung ein voll automatisiertes Kalibrier- und Testprozedere, um einen einwandfreien Arbeitsablauf über den Temperatur- sowie den Wellenlängenbereich zu gewährleisten (Micron Optics, 2004, S.27). Das gesamte Spektrum an Sensorwellenlängen wird anhand eines *fixed Fabry Perot Interferometers*, das eine Serie von Sensoren mit einer Bandbreite von 0.8nm nachbildet (Micron Optics, 2004, S.27), getestet. Diese so generierten Sensoren werden zunächst von einem Referenzinstrument mit einer kalibrierten Genauigkeit von 0.3pm und im Anschluss daran mit der si425 ausgewertet. Die Differenz der beiden Ergebnisse wird als Fehler der si425 angesehen (Micron Optics, 2004, S.12). Diese Messungen wurden über einen Zeit- und über einen Temperaturbereich wiederholt, um zuverlässige Spezifikationen zu erhalten. In einer Untersuchung der Firma Micron Optics aus dem Jahre 2003 (Micron Optics, 2003) sind solche Messungen vorgestellt worden. Die dort durchgeführten Untersuchungen sowie die erhaltenen Ergebnisse sollen in diesem Abschnitt aufgezeigt werden. Es wurden insgesamt drei Interrogatoren untersucht.

## 3.1 Untersuchungen von Micron Optics

### 3.1.1 Temperaturuntersuchungen

In Micron Optics (2003) werden mehrere Temperaturuntersuchungen vorgestellt.

Es werden zwei Experimente gezeigt, bei denen die Interrogation Unit für drei Tage bei Temperaturen von  $-20^{\circ}\text{C}$  bzw.  $+70^{\circ}\text{C}$  gelagert und anschließend überprüft wurden. Als Ergebnis dieser Experimente wird lediglich berichtet, dass die Einheiten keine Schäden oder Funktionsminderungen aufweisen.

In einem weiteren Experiment wurde die Temperatur während des Betriebs über sieben Tage hinweg wie in Abbildung 18 ersichtlich variiert. Auch hier wurde lediglich angegeben, dass die Messwertänderungen innerhalb der Erfordernisse blieben, welche allerdings nicht näher spezifiziert wurden.

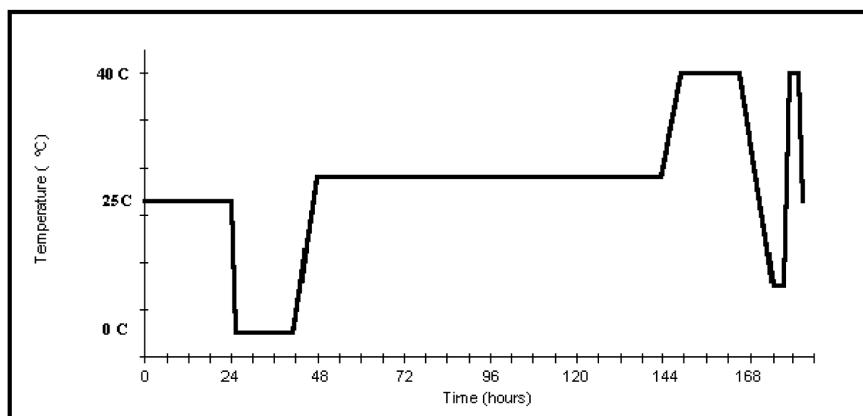


Abbildung 18: Temperaturänderung während des Arbeitstemperaturrexperiments (Micron Optics, 2003, S.7)

### 3.1.2 Zusätzliche Temperaturuntersuchungen

Der Arbeitstemperaturbereich der si425 reicht von 10 bis 40°C. Zusätzliche Untersuchungen zeigten jedoch auch reproduzierbare und rauscharme Wellenlängenmessungen außerhalb dieser Temperaturspanne (Micron Optics, 2003 S. 21). Messungen außerhalb des angegebenen Bereichs werden vom Hersteller nicht empfohlen, jedoch zeigen Messungen in einem Bereich von -10 bis +67°C recht gute Ergebnisse (siehe Abbildung 19). Bei Messungen über einer Temperatur von +67°C versagte die Datenaufzeichnung.

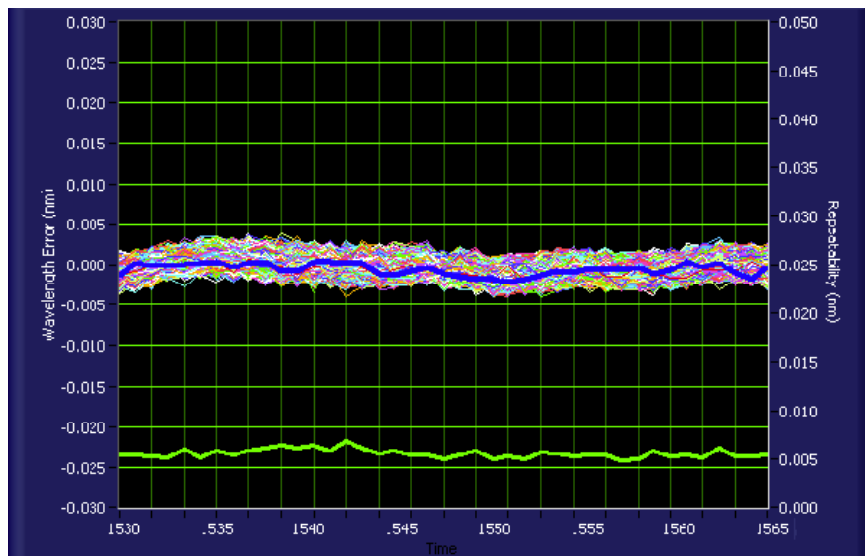


Abbildung 19: Wavelength Error einer si425 von -10 bis 67°C (Micron Optics, 2003 S 21)

Es werden von Micron Optics unklare Angaben über die erzielten Genauigkeiten gegeben:

*Figure 20 shows the distribution of the -10 to 67°C data points as distributed about -0.6 pm mean error. The resulting standard deviation is 1.0 pm with a  $2\sigma$  accuracy of 2.5 pm and a  $2\sigma$  repeatability of 1.9pm.*

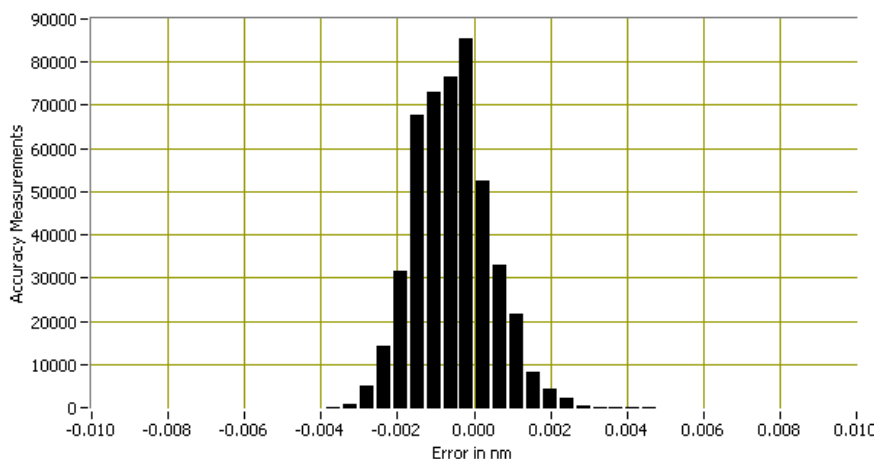


Abbildung 20: Verteilung der Temperaturuntersuchungsdaten von -10 bis 67°C (Micron Optics, 2003 S. 21)

### 3.1.3 Sonstige Untersuchungen

Außer den Temperaturuntersuchungen wurden von Micron Optics (2003) noch Fallversuche sowie Vibrationstests durchgeführt. Bei den Fallversuchen wurde die Interrogation Unit aus einer gewissen Höhe auf einen Betonboden fallengelassen und bei den Vibrationstests Beschleunigungen von bis zu 3g ausgesetzt. Es wurden keine strukturellen oder elektrischen Schäden festgestellt. Es werden keine Angaben zu Messabweichungen nach der Durchführung der Untersuchungen angegeben.

## 3.2 Unabhängige Untersuchungen

Während der gesamten Arbeit wurden unterschiedlichste Quellen nach Untersuchungen von unabhängigen Institutionen durchsucht. Die Hauptquelle war die Homepage<sup>3</sup> der Firma Micron Optics, da davon auszugehen ist, dass externe Untersuchungen am ehesten dort angeführt werden. Andere durchsuchte Quellen sind z.B. Universitätsbibliotheken, wissenschaftliche Veröffentlichungen oder andere Forschungsinstitutionen.

Es konnte in keiner Quelle eine Untersuchung der si425 gefunden werden, daher waren eigene Untersuchungen notwendig.

---

<sup>3</sup> [http://micronoptics.com/sensing\\_doc\\_library.php](http://micronoptics.com/sensing_doc_library.php)

## 4 Vorbereitung der Experimente und Messaufbau

Vor dem Beginn der eigenen Experimente galt es, geeignete Referenzsensoren zu finden, die möglichst stabil für die Dauer eines Experimentes sind.

Kreuzer (2007) gibt die Änderung der Braggwellenlänge aufgrund einer Temperaturänderung oder einer Verformung des Sensors mit

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k * (\varepsilon_m + \varepsilon_T) + \alpha_\delta * \Delta T \quad (4-1)$$

an. Dabei ist  $\Delta\lambda$  die Änderung der Wellenlänge,  $\lambda_0$  die Grundwellenlänge zu Beginn der Prüfung,  $k$  der  $k$ -Faktor ( $k=0,78$ ),  $\varepsilon_m$  die mechanisch verursachte Dehnung,  $\varepsilon_T$  die durch die Temperatur verursachte Dehnung,  $\alpha_\delta$  ( $\alpha_\delta=5\dots 8*10^{-6}/K$ ) die temperaturbedingte Änderung der Brechzahl und  $\Delta T$  die Temperaturänderung in Kelvin.

(4-1) verdeutlicht, dass die mechanische und temperaturbedingte Dehnung oder Stauchung des Sensors nicht ohne weiteres voneinander getrennt werden können. Daher galt es Sensoren zu finden, die während des Experiments keine mechanische Beanspruchung erfahren. Desweiteren sollten bei den Experimenten geringstmögliche Temperaturänderungen vorhanden sein, um diesen Einfluss so gering wie möglich zu halten.

#### 4.1 Als Referenzsensoren verwendete FBG-Ketten

Für diese Masterarbeit sowie für die RASP-Folgeuntersuchungen wurden zwei FBG Sensorketten (FBG<sub>iaB</sub>) hergestellt (Presl, 2010). Diese sind zum Schutz in ein robustes Kunststoffgehäuse eingebaut worden. Die FBG Sensoren wurden so gewählt, dass sie weitestgehend den gesamten Arbeitsbereich der Auswerteeinheit abdecken. In Sensorkette # 1 befinden sich vornehmlich Sensoren mit einer hohen Reflektivität (>70%) und in Sensorkette # 2 ausschließlich *Draw-Tower-Gratings* (DTG, siehe Anhang A.3) mit einer vergleichsweise geringen Reflektivität von 5-40%. Durch die unterschiedlichen Reflektivitäten der beiden Boxen lassen sich eventuelle Abhängigkeiten des *Gain* Faktors (Verstärkungsfaktor, siehe Abschnitt 2.4.1) ableiten.

Bei der Einbringung der Faserketten wurde besonders darauf geachtet, dass die Sensoren keine Verbindung zum Gehäuse aufweisen. Dadurch wird eine Beeinflussung der Sensoren durch eine temperaturbedingte Verformung des Gehäuses minimiert. Jedoch könnte sich dadurch eine Beeinflussung der Messergebnisse durch stärkere Vibrationen ergeben (Presl, 2010).

In Abbildung 21 ist die Sensorkette FBG**ia**B#1 schematisch dargestellt. Detailliertere Angaben dieser Sensorkette sind in Tabelle 4 finden.

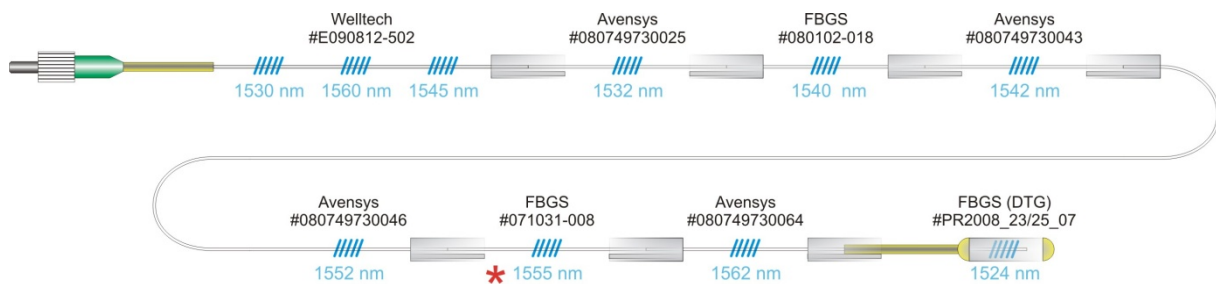


Abbildung 21: Schematischer Aufbau der Sensorkette FBG**ia**B # 1 (Presl, 2010)

Tabelle 4: Detailangaben zur FBG Sensorkette FBG**ia**Box # 1 (Presl, 2010)

ID	Seriennummer	$\lambda_c^{1)}$ [nm]	$\Delta\lambda^{2)}$ [nm]	Reflektivität	Gitterlänge [mm]	Beschichtung	Kern Ø [μm]	Hersteller
02		1530,228	0,514	85.00	5			
09	#E090812-502	1559.989	0.490	80.32	5	Acrylat	9	Welltech
06		1544.937	0.501	83.93	5			
03	#080749730025	1532.0*	*	*	*	Polyimide	9	Avensys
04	#080102-018	1540.088	0.151	87.32	*	Polyimide	9	FBGS
05	#080749730043	1542.0*	*	*	*	Polyimide	9	Avensys
07	#080749730046	1552.0*	*	*	*	Polyimide	9	Avensys
08	#071031-008	1555.154	0.225	94.38	15	Polyimide	9	FBGS
10	#080749730064	1562.0*	*	*	*	Polyimide	9	Avensys
01	#PR2008_23/25_07	1523.850	0.145	17.00	5	Ormocer	4 (DTG)	FBGS

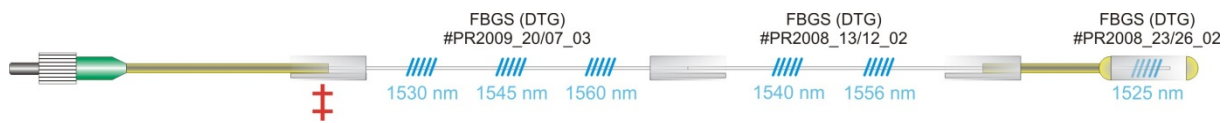
<sup>1)</sup>  $\lambda_c$ ...Zentrale Wellenlänge (Herstellerangabe)

<sup>2)</sup>  $\Delta\lambda$ ...Bandbreite (Herstellerangabe@3dB)

\*...detaillierte Angaben nicht verfügbar



In Abbildung 22 ist die Sensorkette FBG**i**aB#2 schematisch dargestellt. Detailliertere Angaben dieser Sensorkette sind in Tabelle 5 finden.



**Abbildung 22: Schematischer Aufbau der Sensorkette FBG**i**aB # 2 (Presl, 2010)**

Da beim Anschluss der Sensorkette FBG**i**aB # 2 an die Interrogation Unit keine *Patchcords* mit einem Modenfelddurchmesser ähnlich jenem der DTG-*Gratings* zur Verfügung standen, wurde die Kette an ein normales SMF28e-*Pachcord* mit einem Kerndurchmesser von  $\sim 9\mu\text{m}$  angespleißt (siehe Abbildung 22†).

**Tabelle 5: Detailangaben zur FBG Sensorkette FBG**i**aBox # 2 (Presl, 2010)**

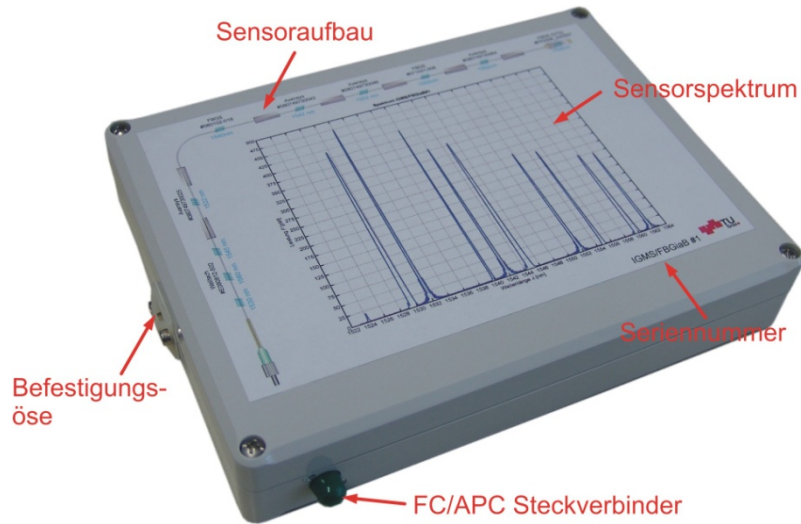
ID	Seriennummer	$\lambda_c$ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	Reflektivität	Gitterlänge [mm]	Beschichtung	Kern $\varnothing$ [ $\mu\text{m}$ ]	Hersteller
12		1530.35	0.136	6.6	5			
14	#PR2009_20/07_03	1545.26	0.141	5.4	5	Ormocer	4 (DTG)	FBGS
16		1560.30	0.142	4.4	5			
13	#PR2008_13/12_02	1540.15	0.086	42.3	10	Ormocer	4 (DTG)	FBGS
15		1556.18	0.088	44.4	10			
11	#PR2008_23/26_02	1524.84	0.146	15.9	5	Ormocer	4 (DTG)	FBGS

<sup>1)</sup>  $\lambda_c$ ...Zentrale Wellenlänge (Herstellerangabe)

<sup>2)</sup>  $\Delta\lambda$ ...Bandbreite (Herstellerangabe@3dB)

\*...detaillierte Angaben nicht verfügbar

In Abbildung 23 ist das Kunststoffgehäuse einer FBG Sensorkette dargestellt. Am Deckel jeder der beiden Boxen sind Informationen zum Sensorspektrum, Sensoraufbau und die Seriennummer vermerkt.



**Abbildung 23: Kunststoffgehäuse der FBG Sensorkette, ca. 20x15x4cm (Presl, 2010)**

Der genaue Aufbau sowie weitere technische Details können (Presl, 2010) entnommen werden.

Da bei den durchgeführten Experimenten Abhängigkeiten von den verschiedenen Sensortypen vermutet werden, wird für den Leser im Anhang C eine ausklappbare Übersicht der Sensoren zur Verfügung gestellt.

## 4.2 Aufbau während der Experimente

Nach der Wahl der Sensoren galt es noch, eine geeignete Position für die Unterbringung der beiden Sensorboxen zu finden. Um eine Beeinflussung der Messergebnisse durch die Temperatur so gering wie möglich zu halten, sollte diese Position möglichst geringe Temperaturschwankungen erfahren.

Im klimatisierten Messlabor des Institutes herrscht eine konstante Temperatur von  $20.0^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  vor (Woschitz & Brunner, 2003). Im Labor befindet sich zudem ein Vertikalkomparator mit einem ca. 1.6m in die Tiefe reichenden Bodenschacht. Abbildung 24a zeigt den unteren Teil des Vertikalkomparators. Abbildung 24b zeigt einen Schnitt durch den Bodenschacht mit den vorhandenen Temperatursensoren PT100#1, PT100#2 und PT100#3.

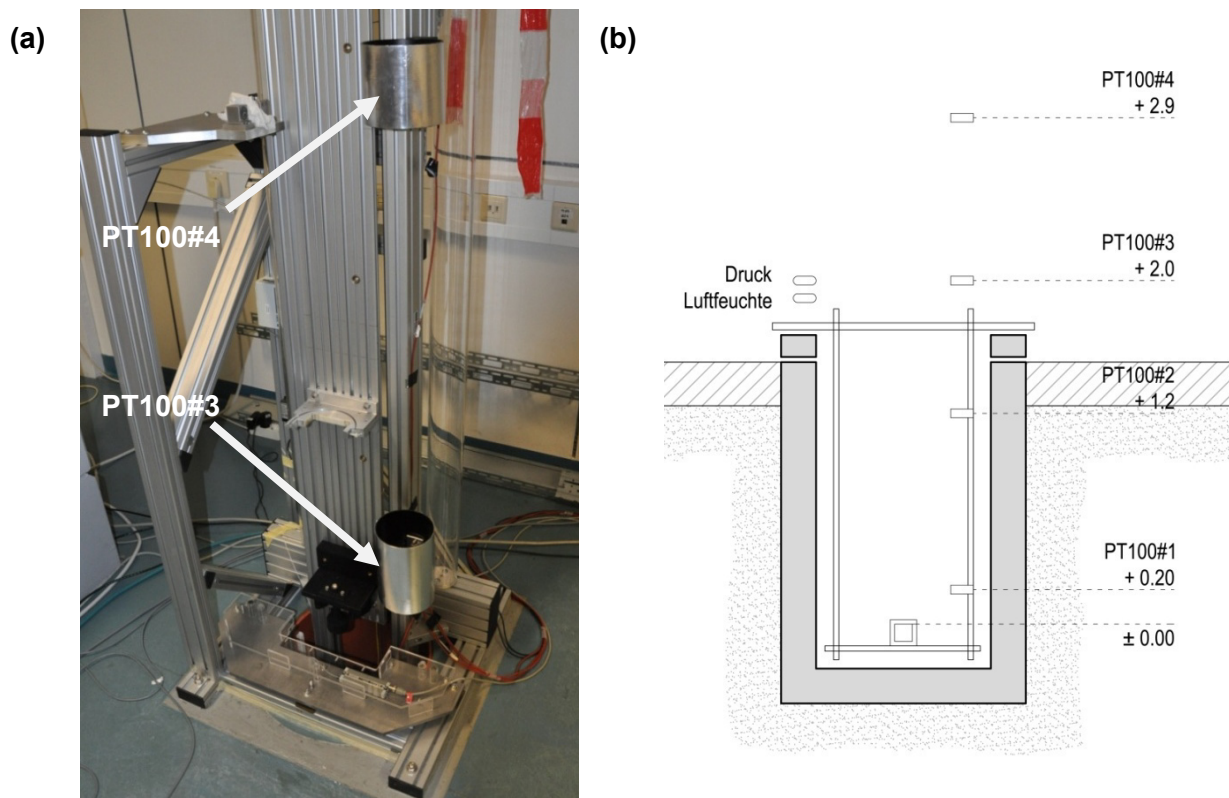
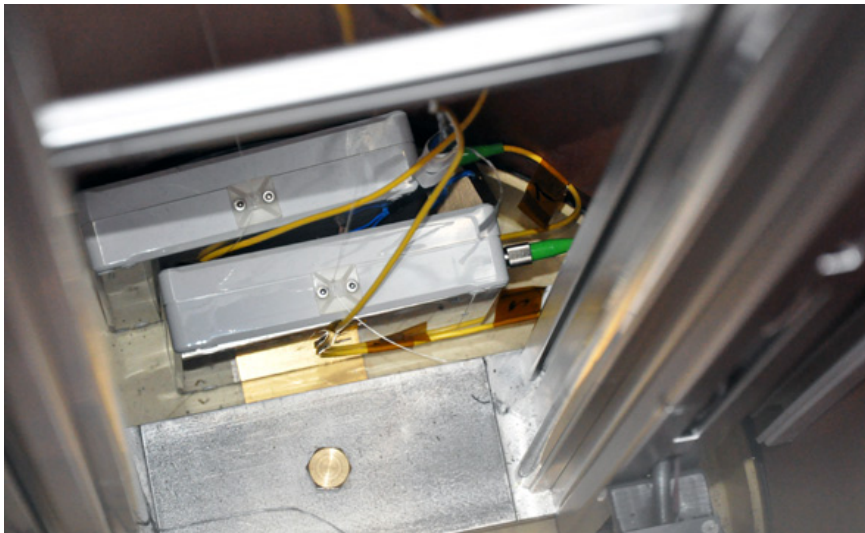


Abbildung 24: (a) Unterer Teil des Vertikalkomparators, (b) Schnitt durch den unteren Bereich des Vertikalkomparators

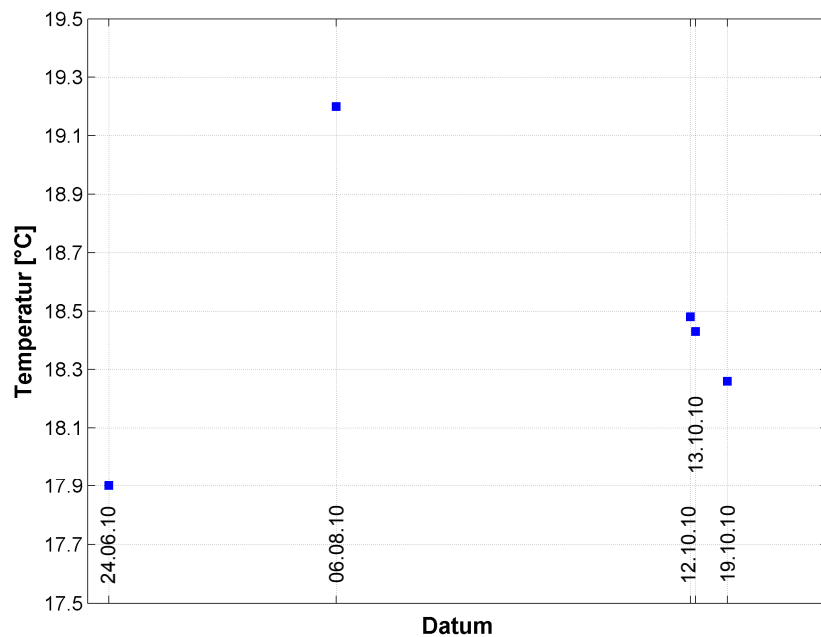
Der Bodenschacht des Vertikalkomparators wird nicht durch Resttemperaturschwankungen der Regelzyklen der Klimaanlage beeinflusst. Temperaturmessungen am Boden des Vertikalkomparatorschachts zeigen daher eine deutlich konstantere Temperatur, die aber saisonale Schwankungen aufweist. Zudem sind innerhalb des Schachtes zwei Temperatursensoren angebracht (siehe Abbildung 24b). Damit wird eine Dokumentation der Temperatur erleichtert. Weitere Informationen zum Vertikalkomparator sind in Woschitz & Brunner (2003) zu finden.

Für die nachfolgenden Experimente wurden die beiden FBGiAB Sensorketten am 20.05.2010 auf den Boden des Vertikalkomparators abgesenkt. Die beiden Sensorboxen befanden sich für alle Experimente an dieser Stelle (siehe Abbildung 25) und wurden in ihrer Lage nie verändert.



**Abbildung 25: Sensorboxen am Boden des Vertikalkomparators**

Abbildung 26 zeigt die gemessene Temperatur im Bodenschicht bei allen durchgeführten Experimenten.



**Abbildung 26: Temperatur im Bodenschicht bei allen Experimenten**

Der maximale Temperaturunterschied zwischen allen Experimenten beträgt ca.  $1.3^{\circ}\text{C}$ . Für eine Abschätzung des Temperatureinflusses auf die detektierte Wellenlänge wird der aus (Woschitz, 2009) geschätzte lineare Koeffizient der Temperaturkennlinie des Sensor ID1 von  $12.8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$  (siehe Tabelle C-1 in Anhang C) verwendet. Für die detektierte Braggwellenlänge bedeutet dies eine maximale Änderung um

$$\Delta\lambda \approx 1.3^{\circ}\text{C} * 12.8 \frac{\text{pm}}{^{\circ}\text{C}} \approx 16.6 \text{ pm} \quad (4-2)$$

über den Zeitraum der durchgeführten Experimente. Zwischen den Experimenten können daher keine direkten Vergleiche angestellt werden.

Die Interrogation Unit si425 ist nahe dem Vertikalkomparator auf der Arbeitsfläche aufgebaut (siehe Abbildung 27). Zur Aufzeichnung der Temperaturen im Schacht wurde ein separater PC verwendet, da ein einzelner PC mit beiden Aufzeichnungen (Spider8 mit Beam und si425 über LabView) überlastet ist und es damit zu Datenlücken bei der Aufzeichnung der si425 Daten kommen würde.

Zur Verbindung der beiden Sensorboxen mit der Interrogation Unit si425 wurden zwei neue, 10m lange *Patchcords* verlegt. Diese waren bei allen Experimenten unverändert im Einsatz. Lediglich bei manchen Experimenten wurde zusätzlich eine Zwischenfaser verwendet. Diese Zwischenfaser verlängert die Laufzeit des Signals und führt wiederum zu einer Änderung der detektierten Braggwellenlänge gemäß dem in Abschnitt 2.2.8 vorgestellten *Round Trip Delays*.

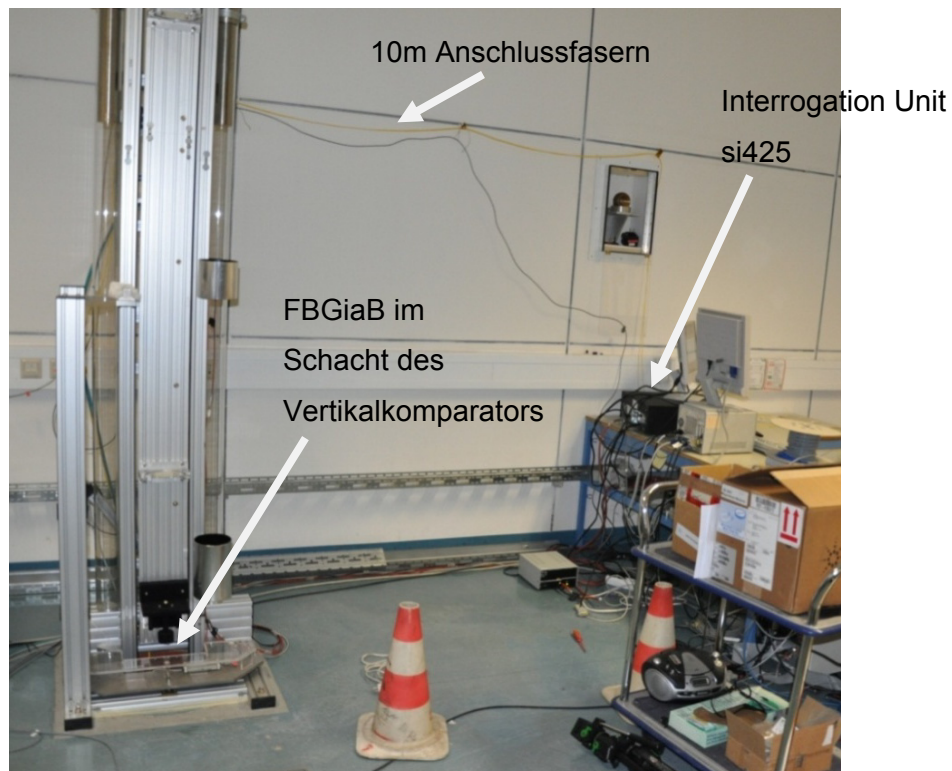


Abbildung 27: Versuchsaufbau im Messlabor

## 4.3 Voruntersuchung zur Vibrationsbeeinflussung

### 4.3.1 Problemstellung

Die Sensoren der beiden Sensorboxen (siehe Abschnitt 4.1) dienten als stabile Referenzsensoren für alle Experimente. Bei der Verwendung der Sensorboxen ist jedoch zu beachten, dass wegen des losen Einlegens der Faser in die Box, die FBG Sensoren sehr empfindlich gegenüber Vibrationen (Presl, 2010) sind. Da der Schacht des Vertikalkomparators sehr nahe zur Steyrergasse (siehe Abbildung 28) liegt, wurde vermutet, dass vorbeifahrende Fahrzeuge einen Einfluss auf die Messergebnisse haben könnten. Zwar ist das Fundament des Vertikalkomparators von dem des Gebäudes getrennt, jedoch konnte ein Einfluss des Verkehrs auf ein anderes Faseroptisches Messsystem bereits in Heim (2010) nachgewiesen werden.

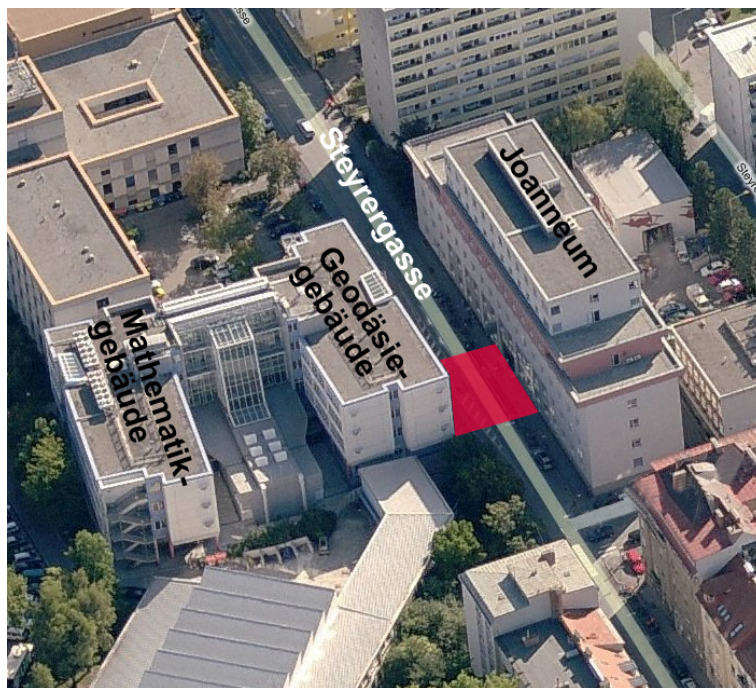


Abbildung 28: Steyrergasse mit Geodäsiegebäude und Joanneum (©Bing Maps) mit in rot markiertem Bereich, der für die Dokumentation des Verkehrsaufkommens überwacht wurde

Dieses Experiment soll klären, ob dies auch hier der Fall ist. Dazu wurde während dem Aufzeichnen der Daten das Verkehrsaufkommen des in Abbildung 28 gekennzeichneten Bereichs der Steyrergasse dokumentiert. Das Augenmerk wurde dabei auf besonders schwere Fahrzeuge gelegt.

### 4.3.2 Durchführung

Die wesentlichen Informationen zur Durchführung dieses Experiments sind in Tabelle 6 aufgelistet. Zwischen dem Einschalten der si425 und dem Beginn der Messungen liegen 20 Minuten. Vom Hersteller wird eine 5 minütige Aufwärmzeit (siehe Abschnitt 2.1) vorgegeben. Es lagen zu diesem Zeitpunkt keine weiteren Informationen über das Aufwärmverhalten vor, womit die 5 Minuten Akklimatisationszeit vorerst als ausreichend angesehen wurden.

**Tabelle 6: Informationen zum Experiment Vibrationsbeeinflussung**

Information	Versuch
Datum	27.05.2010
Datum	Messbeginn 09:40
Dauer	32 min
si425 ON vor Messbeginn	20 min
Sensor Nr.	FBGiaB # 1
Kanal	1
Gain	1
Position	VC <sup>1)</sup>
Sensor Nr.	FBGiaB # 2
Kanal	2
Gain	2
Position	VC <sup>1)</sup>
Aufzeichnungsrate	250Hz

<sup>1)</sup>VC... Vertikalkomparator, Bodenschacht

Für die Dauer dieses Versuchs wurde das Verkehrsaufkommen des in Abbildung 28 in rot gekennzeichneten Bereichs der Steyrergasse dokumentiert. Die Zeitbestimmung erfolgte mit einer Stoppuhr auf ca. 1 Sekunde genau. Im Folgenden werden Zeitabschnitte, in denen auf beiden Seiten der Straße kein Fahrzeug den Bereich passierte, als "kein Verkehr" und Zeitabschnitte, in denen ein LKW oder ein Transporter den roten Bereich auf Seiten des Geodäsiegebäudes passierte, als "Verkehr" bezeichnet. Autos und geringer gewichtige Verkehrsteilnehmer wurden wegen der höheren Frequenzen bei diesem Vorversuch nicht aufgezeichnet.



### 4.3.3 Vorverarbeitung der Daten

Wie in Abschnitt 2.2.7 gezeigt, erhält man als Outputwert der Interrogation Unit direkt die Wellenlängen aller detektierten Sensoren mit einer Auflösung von einem Pikometer.

Bei der Betrachtung der Rohdaten fällt auf, dass sich die Messdaten aller Sensoren innerhalb einer geringen Spannweite befinden. Die Spannweite der Rohdaten aller Sensoren ist in Abbildung 29 zu sehen. Die minimale Spannweite beträgt 2pm, die maximale 5pm.

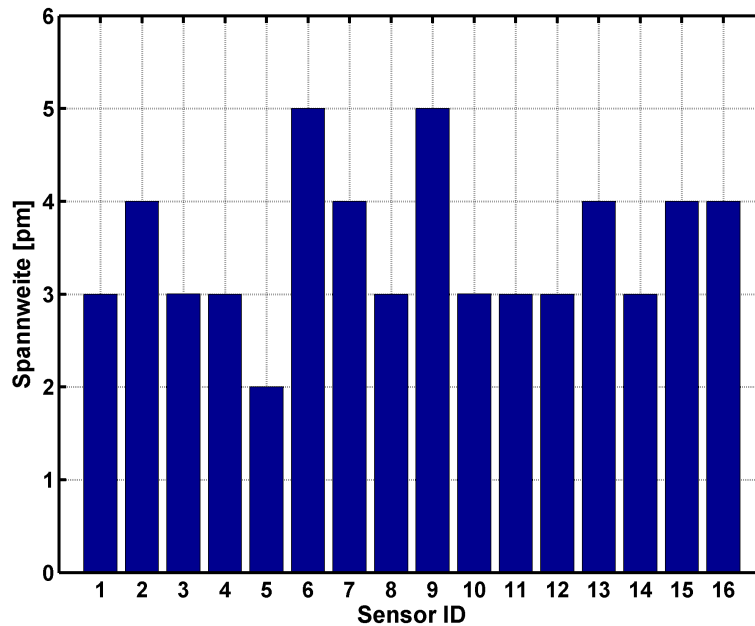


Abbildung 29: Spannweite der Rohdaten aller Sensoren

Abbildung 30a zeigt exemplarisch die Daten des Sensors ID6 über den gesamten Beobachtungszeitraum, der mit 5pm die größte Spannweite aller Sensoren besitzt. Abbildung 30b zeigt einen drei Sekundenausschnitt dieses Sensors. Diese beiden Abbildungen verdeutlichen, dass es sehr wenige, vereinzelte Spitzen in den Daten gibt. Nun gilt es abzuklären, ob diese Spitzen in den Daten vom Verkehr herrühren oder aber durch das Rauschen des Sensors verursacht werden.

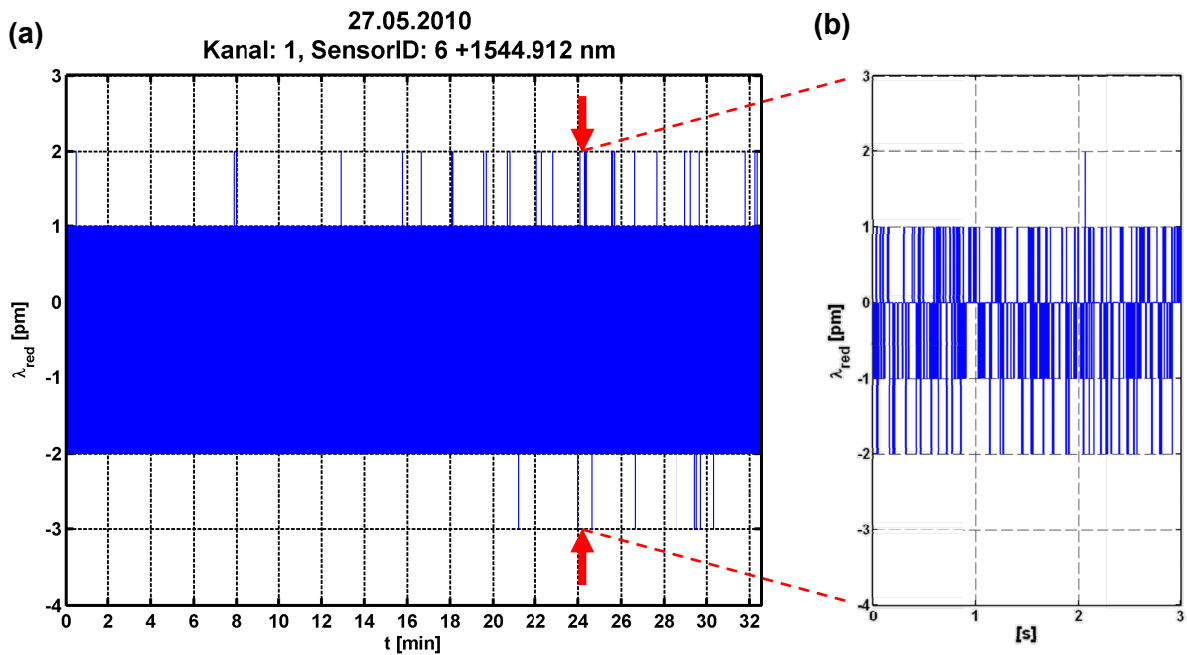


Abbildung 30: 250Hz Rohdaten der (a) gesamten Zeitreihe und (b) eines 3Sekunden Ausschnitts

Zur leichteren Interpretation der Messwerte werden die Rohdaten auf 1s Mittelwerte reduziert (siehe Abbildung 31a). Diese 1s Mittelwerte werden anhand des arithmetischen Mittels der Rohdaten generiert. Zum Vergleich dazu ist in Abbildung 31b ein Datensatz dargestellt, der aus dem arithmetischen Mittel aus 10 Sekunden der Rohdaten generiert wurde. Durch diese längere Mittelwertbildung wird eine weitere Reduktion des Rauschens erreicht. Zudem sind die in den 1s Mittelwertdaten schon erkennbaren vermeidlichen Systematiken (siehe dazu Abschnitt 5.1.5) hier besser erkennbar.

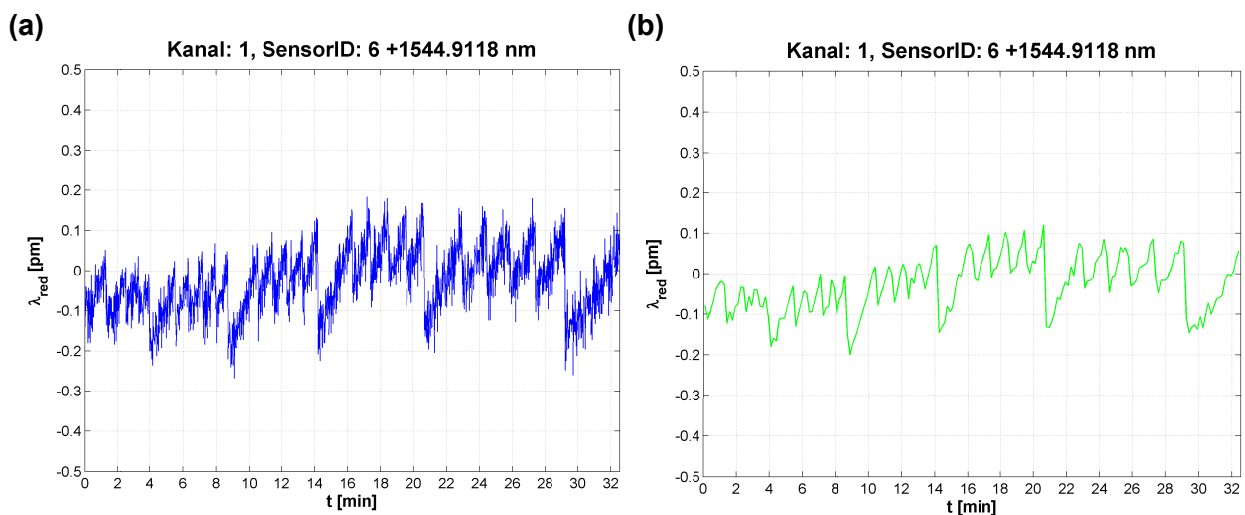


Abbildung 31: Arithmetische Mittelwertdaten generiert durch (a) 1 Sekundenintervall und (b) 10 Sekundenintervall

Um einen Vergleich mit der Herstellerangabe der *Wavelength Repeatability* von 0.05pm bei 250 averages (siehe Tabelle 1) zu ermöglichen, wurden jedoch die 1s Mittelwerte für diese Arbeit verwendet.

#### 4.3.4 Analyse

Abbildung 32a zeigt nochmals den Sensor mit der ID6, wobei die Zeitabschnitte mit bzw. ohne Verkehr (siehe dazu Abschnitt 4.3.2) ebenfalls eingezeichnet sind. Abbildung 32b zeigt die zugehörigen *Level*, die ebenso durch arithmetische Mittelwertbildung aus einer Sekunde generiert wurden. Die Auflösung des *Level*s bei 250Hz beträgt 1.

Die Daten der restlichen Sensoren sind im Anhang B.1 dargestellt.

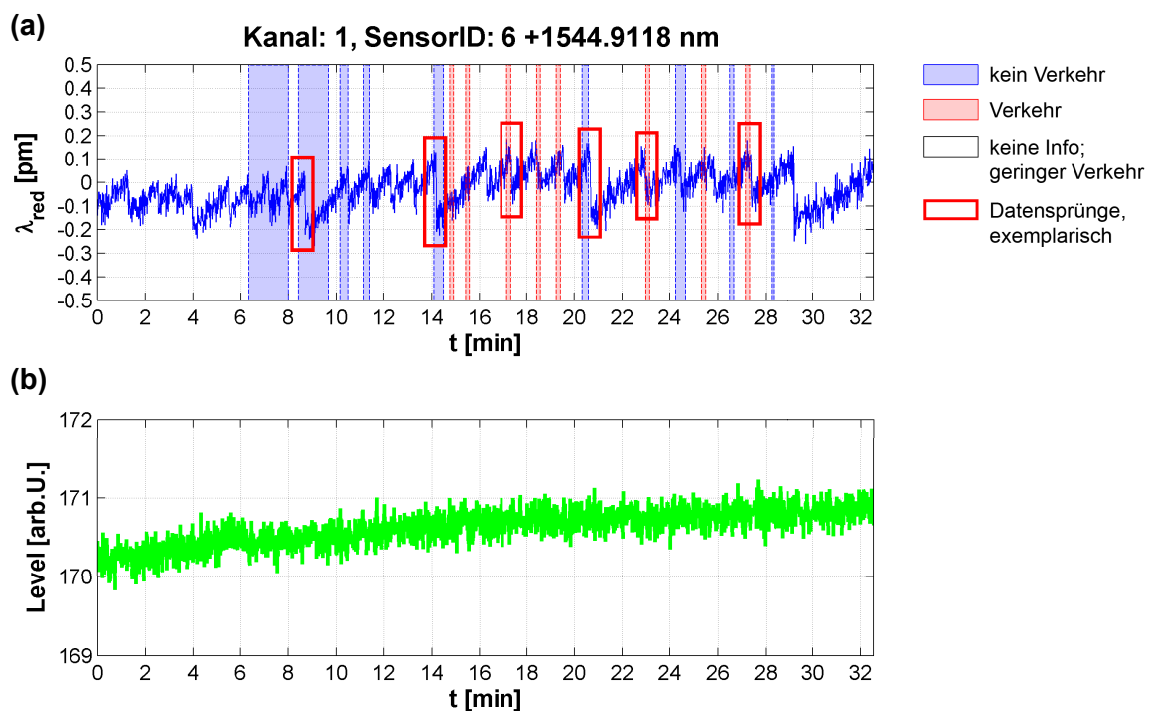
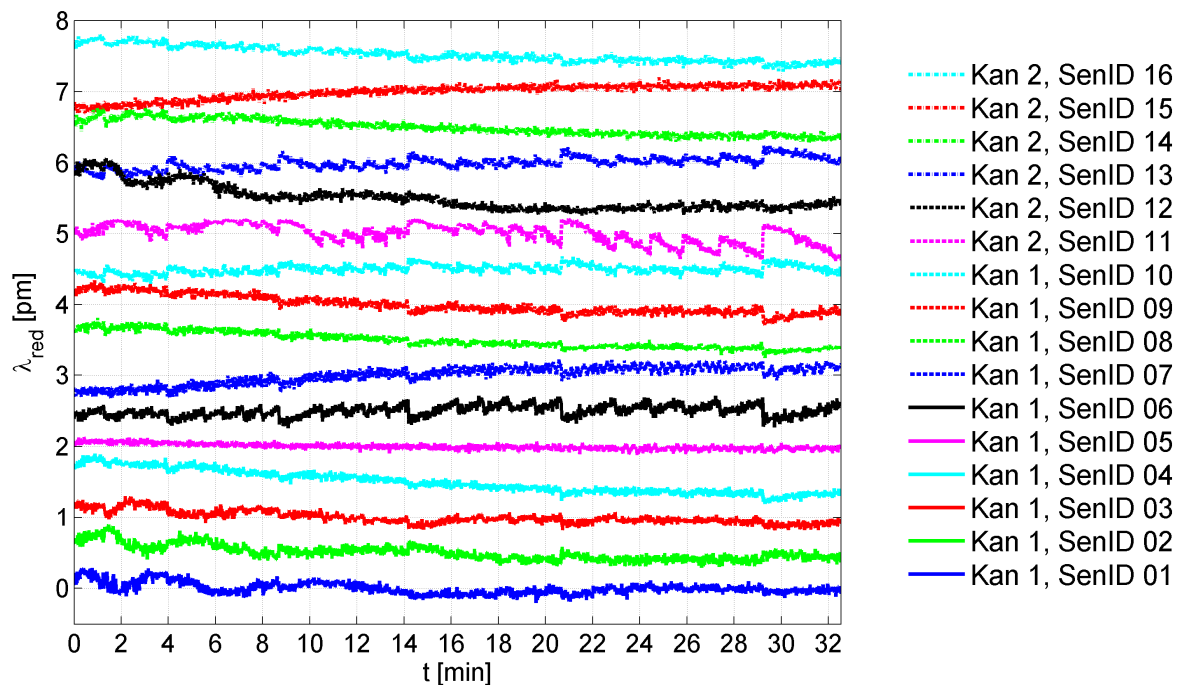


Abbildung 32: Voruntersuchung zur Vibrationsbeeinflussung (a) 1s Mittelwertdaten mit eingezeichneten Zeitpunkten wo Verkehr und kein Verkehr vorherrschte, (b) zugehöriger *Level*

Es ist gut zu erkennen, dass sowohl in den Abschnitten mit Verkehr als auch in den Abschnitten ohne Verkehr Datensprünge auftreten. Ansonsten sind keine Unterschiede zwischen Verkehr und kein Verkehr erkennbar. Wegen der auftretenden Datensprünge gestalten sich statistische Tests als sehr schwierig. Da keine Fehlerinformation vorhanden ist werden statistische Tests auch nicht gezeigt.

In Abbildung 33 ist eine Übersicht aller reduzierten 1s Mittelwertdaten Daten dargestellt, um systematisch anmutende Effekte zu untersuchen. Für die Darstellung wurde der Median der jeweiligen Zeitreihe abgezogen und die Daten der einzelnen Sensoren um  $n \cdot 0.5 \text{ pm}$  versetzt dargestellt.



**Abbildung 33:** Übersicht der um den Median reduzierten sowie zur besseren Darstellung um  $n \cdot 0.5 \text{ pm}$  versetzten Wellenlängen der erfassten Sensoren (die Reihenfolge der Legende entspricht den Datenreihen von oben nach unten sortiert)

Abbildung 33 verdeutlicht, dass die Datensprünge bei den Sensoren unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Bei den Sensoren mit der ID5 und ID15 lässt sich kein Datensprung finden.

Einige Sensoren weisen eine Drift oder ein Einschwingverhalten auf, weshalb das Aufwärmverhalten der si425 später im Experiment "Dauermessung" (Abschnitt 5.1) näher untersucht wurde.

### 4.3.5 Resultate

Bei diesem Experiment konnte folgendes nachgewiesen werden:

- Die Rohdaten weisen mit maximal 5pm eine sehr geringe Spannweite auf (siehe Abbildung 29). Zur leichteren Interpretation der Messergebnisse wurden die Daten daher auf 1s Mittelwerte reduziert. Erst durch diesen Schritt werden bestehende Effekte sichtbar.
- Die Datensprünge können bis zu ca. 0.4pm betragen und machten weitere Untersuchungen notwendig (siehe Abschnitt 5.1.5).
- Bei manchen Sensoren können allerdings keine Sprünge in den Daten beobachtet werden.
- Auftretende Datensprünge kommen sowohl bei Verkehr als auch ohne Verkehr vor. Daher ist davon auszugehen, dass die Sensoren nicht durch den Verkehr in der Steyrergasse beeinflusst werden.
- Da der Verkehr nicht die Ursache der Datensprünge darstellt konnte somit die Eignung der beiden Sensorboxen als stabile Referenz nachgewiesen werden.
- Bei manchen Sensoren konnten Drifteffekte beobachtet werden, weshalb vermutet wurde, dass wesentlich längere Aufheizeffekte als vom Hersteller angegeben vorhanden sind. Daher wurde das Aufwärmverhalten der si425 im Experiment "Dauermessung" (Abschnitt 5.1) näher untersucht.

## 5 Experimente

In den folgenden Abschnitten sind die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Experimente beschrieben. Nach Reduktion der Rohdaten gemäß Abschnitt 4.3.3 befinden sich die gesamten Ergebnisse im sub-Auflösungsbereich der si425, der laut Hersteller durch Mittelbildung erreicht werden kann. Dadurch gestaltete sich die Auswertung der Experimente als schwierig.

Bei den verschiedenen Experimenten wurden einige Herstellerangaben, wie Aufwärmzeit, Driftverhalten oder das Verhalten beim Variieren der Signalintensität untersucht. Ein weiterer genauer behandelte Punkt in dieser Arbeit ist ein möglicher Einfluss der Zentrierung auf die gelieferten Ergebnisse der Interrogation Unit.

### 5.1 Dauermessung

#### 5.1.1 Problemstellung

Die in Abschnitt 4.3 beobachteten Effekte (Driften und Datensprünge) sollen hier näher untersucht werden. Es wird vermutet, dass die Aufwärmzeit der Interrogation Unit nicht den vom Hersteller angegebenen 5 Minuten entspricht, was die Ursache für die Driften darstellen könnte.

Die Dauer dieses Experiments wurde mit 24 Stunden festgesetzt, da beim Experiment Voruntersuchung zur Vibrationsbeeinflussung nach 30 Minuten immer noch ein Schwingen und eine Drift in den Daten erkennbar war. Um mögliche Driften des Messsystems von temperaturbedingten Driften der Sensoren trennen zu können, wurde zusätzlich zu den im Schacht fix montierten Temperatursensoren ein Temperatursensor (PT100#T1) in den Schacht zwischen die beiden Sensorboxen abgesenkt (siehe Abbildung 34a).

### 5.1.2 Durchführung

Die wesentlichen Informationen zum Ablauf dieses Experiments sind in Tabelle 7 aufgelistet. Um die Aufwärmzeit bestimmen zu können, wurde sofort nach dem Einschalten der Einheit mit der Datenaufzeichnung begonnen.

Tabelle 7: Informationen zum Experiment "Dauermessung"

Information		Versuch
	Datum	24.06.2010
Datum	Beginn	13:00
	Dauer	24 h
si425 ON vor Messbeginn		0 min
Sensor #		FBGiaB # 1
Kanal		1
Gain		1
Position		VC <sup>1)</sup>
Sensor #		FBGiaB # 2
Kanal		2
Gain		2
Position		VC <sup>1)</sup>
Aufzeichnungsrate		250Hz

<sup>1)</sup>VC... Vertikalkomparator, Bodenschacht

### 5.1.3 Temperaturdaten

Die dokumentierten Ergebnisse der Temperatursensoren PT100#01 und PT100#T1 (siehe Abbildung 34a) sind in Abbildung 34b zu sehen. PT100#01 befindet sich in unmittelbarer Nähe und PT100#T1 zwischen den beiden Sensorboxen.

PT100#T1 ist erst kurz vor Messbeginn in den Schacht abgesenkt worden. Das erklärt auch das scheinbare Absinken der Temperatur von  $0.1^{\circ}\text{C}$ , das mit diesem Sensor in den ersten eineinhalb Stunden gemessen wurde.

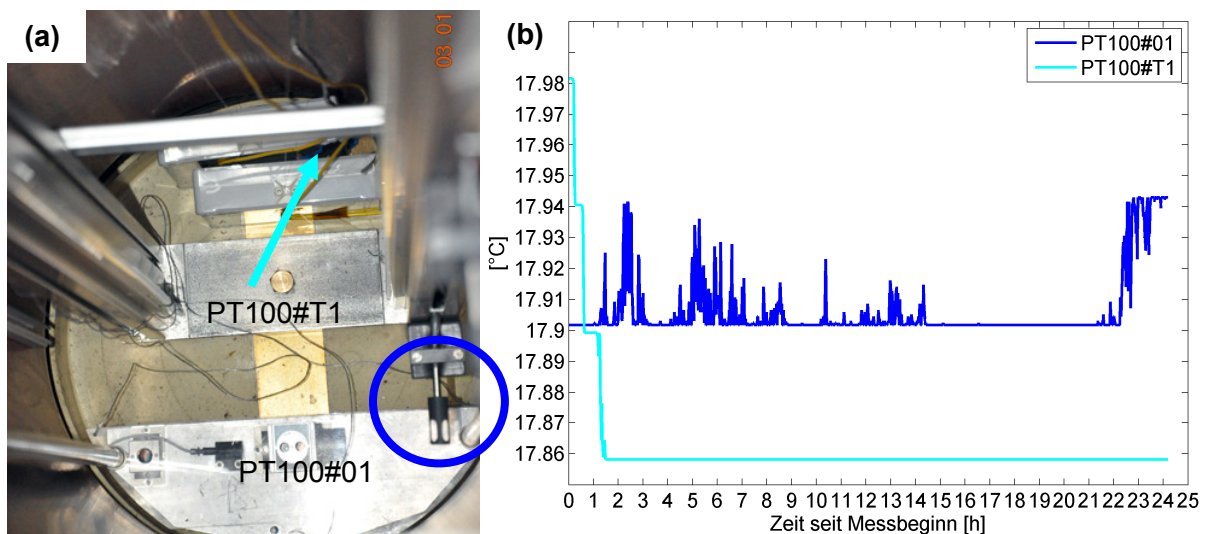


Abbildung 34: (a) Positionen der Temperatursensoren im Schacht, (b) Temperatur bei der Dauermessung (60s Mittel der Daten beider Sensoren)

Die beiden Temperatursensoren besitzen vor der Mittelung (Datenerfassung mit 1Hz) eine Auflösung von  $0.04^{\circ}\text{C}$ . Für den Sensor PT100#T1 ist, ausgenommen des erwähnten anfänglichen Temperaturabfalls, keine Änderung der Temperatur über die gesamte Versuchsdauer zu erkennen. Sensor PT100#01 (accuracy  $0.05\text{K}$  aus Woschitz & Brunner, 2003) weist Variationen von einem Quantisierungsintervall ( $0.04^{\circ}\text{C}$ ) auf. In den letzten zwei Stunden wird mit diesem Sensor ein allmählicher Anstieg der Temperatur um eben diese  $0.04^{\circ}\text{C}$  beobachtet.

PT100#02 zeigt die Temperatur knapp außerhalb des Vertikalkomparators und PT100#3 die Temperatur im Labor an. Die Messwerte dieser Temperatursensoren sind in Abbildung B.2-1 in Anhang B.2 dargestellt und zeigen eine Temperaturänderung von ca.  $0.2^{\circ}\text{C}$  über die Messdauer, was einen eventuellen Tagesgang der Temperatur andeutet.



Sollte am Schachtboden ein Anstieg der Temperatur um  $0.04^{\circ}\text{C}$  in den letzten zwei Stunden tatsächlich vorhanden sein, würde sich daraus eine Änderung der Braggwellenlänge von

$$\Delta\lambda = 0.04^{\circ}\text{C} * 12.8 \frac{\text{pm}}{^{\circ}\text{C}} \approx 0.5 \text{ pm} \quad (5-1)$$

ergeben. Zur Abschätzung von (5-1) wurde der in Woschitz (2009) bestimmte Koeffizient der Temperaturabhängigkeit von  $12.8\text{pm}/^{\circ}\text{C}$  (siehe Tabelle C-1) verwendet. Eine so große Änderung konnte aber bei keinem Sensor beobachtet werden.

Mit dem verfügbaren Instrumentarium ist aufgrund der Auflösung keine bessere Erfassung der Temperatur als  $0.04^{\circ}\text{C}$  möglich. Daher könnten durchaus geringe Temperaturänderungen vorhanden sein, die aber nicht messbar sind.

Für eine Abschätzung möglicher Resteffekte wird (5-2) verwendet. Bei den nachfolgenden Experimenten wurde die Temperatur aufgezeichnet, jedoch konnte im Rahmen der Auflösung keine Änderung der Temperatur festgestellt werden. Die maximale Dauer der weiteren Experimente betrug 6h.

Durch das verwendete Instrumentarium ist ein möglicher Tagesgang der Temperatur nur bis auf  $0.04^{\circ}\text{C}$  auflösbar. Aus dieser Auflösung errechnet sich, zusammen mit dem aus Woschitz (2009) geschätzten linearen Koeffizienten der Temperaturkennlinie der FBG Sensoren, eine minimal auflösbare Drift von

$$k_{max} = 0.04^{\circ}\text{C} * 12.8 \frac{\text{pm}}{^{\circ}\text{C}} * \frac{1}{12} \frac{1}{\text{h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \approx 1 \frac{\text{pm}}{\text{d}} \quad (5-2)$$

Steigungen unter dieser Grenze sind nicht von Resteffekten der Temperatur trennbar.

## 5.1.4 Aufheizeffekte

### 5.1.4.1 Regressionsgerade

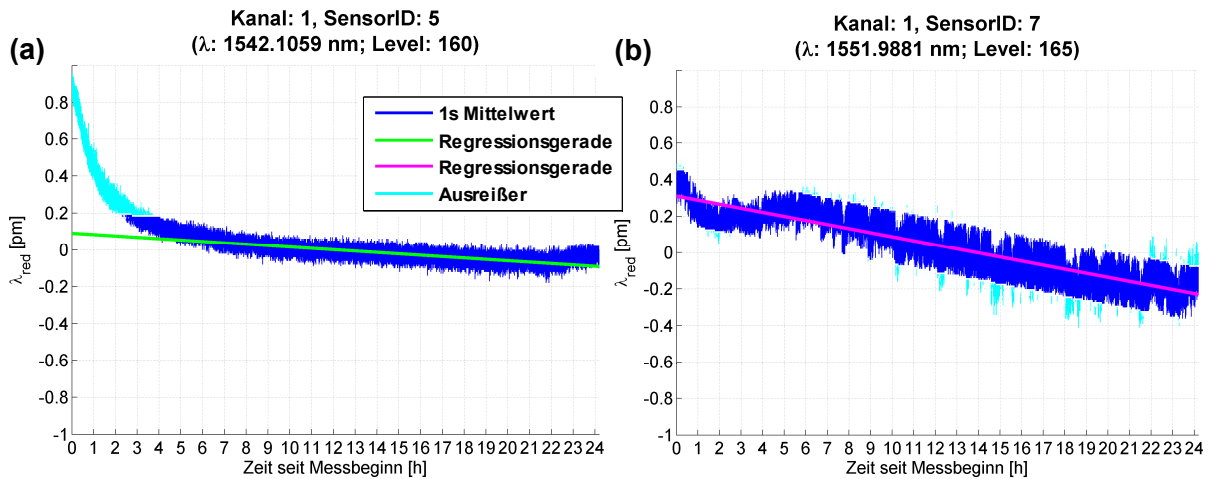
Wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert, wurden aus praktischen Gründen aus den Rohdaten 1 Hz Daten generiert. Die Verwendung der Rohdaten würde für die hier gewählte Messdauer von 24 Stunden 7.2GB an Daten für die Berechnungen ergeben. Daher ist eine Reduktion der Daten notwendig und auch sinnvoll. Eine Messung mit einer kleineren Messfrequenz als 250Hz wäre wegen der fehlenden Mittelbildung jedoch nicht sinnvoll.

Zur Bestimmung einer eventuell auftretenden linearen Drift wurde eine Regressionsgerade aus den Daten geschätzt. Die Berechnung einer linearen Regression erfolgte nach der Methode der kleinsten Quadrate, wobei alle Messwerte gleichgewichtet wurden (Niemeier, 2008 S.383). Bedingt durch eventuelle Messeffekte infolge des Aufheizvorgangs wird die Berechnung iterativ, mit einer Ausreißerdetektion zwischen den Iterationsschritten, durchgeführt. Die Ausreißer werden anhand der Verbesserungen mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99.7%, identifiziert und aus dem Schätzprozess ausgeschlossen. Die verwendete Standardabweichung wird dabei aus dem maximalen Datensprung einer Datenreihe abgeleitet. Die Berechnung dieser Standardabweichung ( $\sigma_{ID, Dauer}$ ) wird in Abschnitt 5.1.5, Formel (5-4) erläutert. Im Anschluss an die Iterationsschritte wird ein Globaler Modelltest zur Überprüfung auf Modellfehler durchgeführt. Wird dieser Test abgelehnt, kann dies drei Ursachen haben (Niemeier, 2008):

- Die verwendete Standardabweichung gilt nicht für die vorhandenen Messbedingungen.
- Das funktionale Modell ist nicht zutreffend. Dies ist z.B. der Fall, wenn nichtlineare Driften auftreten.
- Das stochastische Modell ist nicht zutreffend.

Wird der Globale Modelltest angenommen, so wird vor Angabe eines numerischen Wertes getestet, ob sich die Steigung der Regressionsgeraden signifikant (Sicherheitswahrscheinlichkeit 99.7%) von Null unterscheidet.

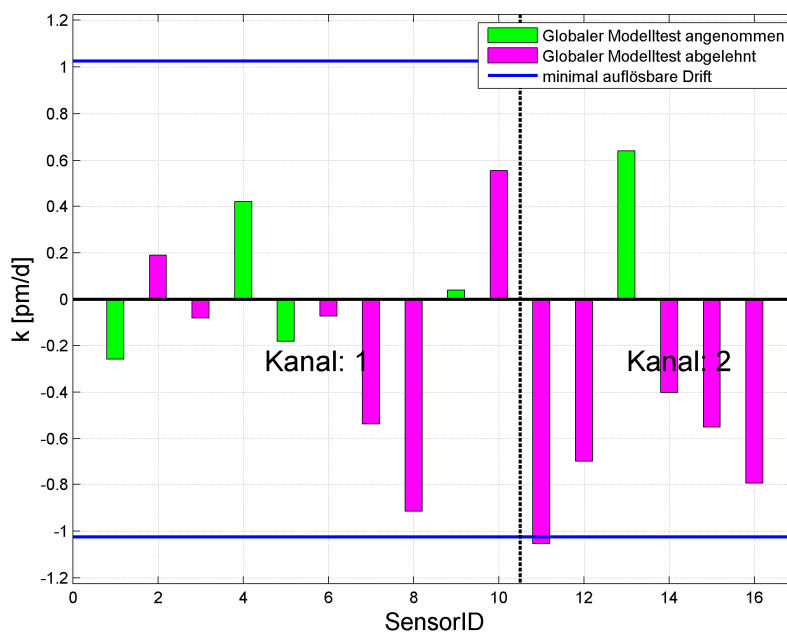
In Abbildung 35 sind Daten zweier gemessener Sensoren mit der iterativ bestimmten Regressionsgeraden zu sehen. Gut erkennbar sind die Ausreißer im Anfangsbereich (in der Grafik in Cyan dargestellt) bei Sensor ID5. Sensor ID7 hingegen zeigt im Anfangsbereich ein ganz anderes Verhalten. Die unterschiedlichen Verhalten werden im Abschnitt 5.1.4.2 behandelt.



**Abbildung 35: Sensoren mit eingezeichneter Regressionsgerade (a) Globaler Modelltest angenommen, (b) Globaler Modelltest abgelehnt**

In Abbildung 36 sind die unterschiedlichen Steigungen der Regressionsgeraden für alle Sensoren dargestellt. Die Detailplots aller Sensoren sind in Anhang B.2.1 in Abbildung B.2.1-1 bis Abbildung B.2.1-3 abgebildet.

Bei einem Temperatureinfluss der Drift sollten die Regressionsgeraden ähnliche Steigungen aufweisen und unterhalb der in (5-2) errechneten minimal auflösbaren Drift von 1pm/d (in der Grafik durch die beiden blauen Linien markiert) liegen. Nur der Sensor mit ID11 auf Kanal 2 überschreitet diesen Bereich minimal, jedoch wird bei diesem Sensor der Globale Modelltest abgelehnt. Die Regressionsgeraden der Sensoren zeigen kein einheitliches Verhalten. Ihre Steigungen schwanken von +0.6pm pro Tag bis -1.0pm pro Tag.



**Abbildung 36: Steigungen der Regressionsgeraden mit eingezeichneten Grenzen ( $\pm 1\text{pm/d}$  siehe Text)**

Um eine mögliche Abhängigkeit der Steigung der Regressionsgeraden von der Braggwellenlänge zu zeigen, wurde Abbildung 37 geplottet. Es konnte kein funktionaler Zusammenhang zwischen der Braggwellenlänge und der Steigung der Regressionsgeraden gefunden werden.

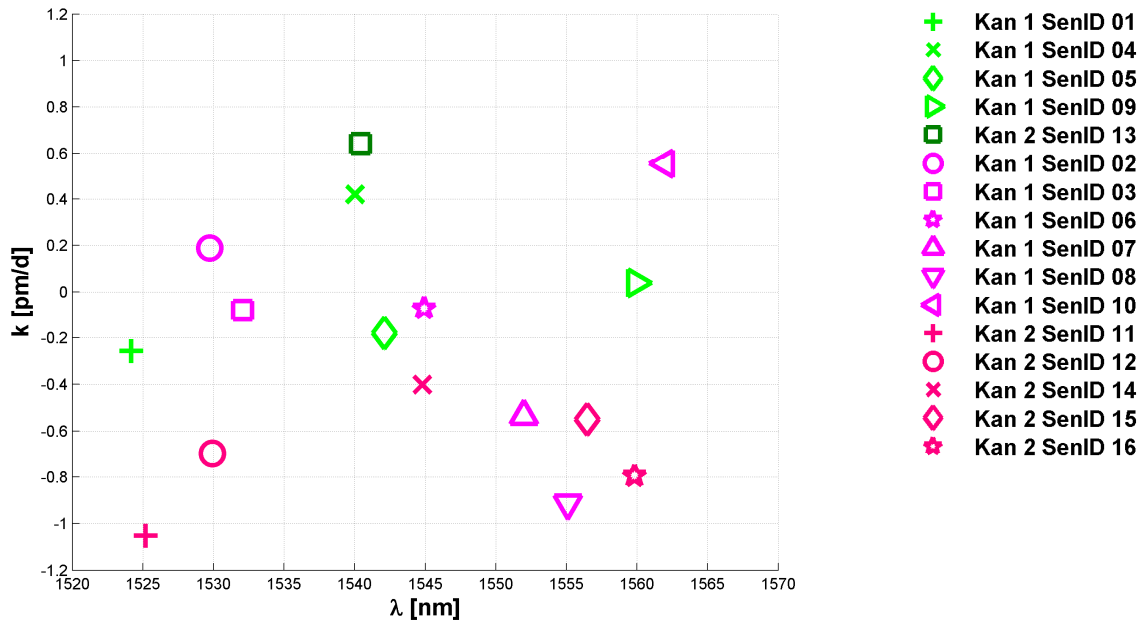


Abbildung 37: Steigungen der Regressionsgeraden in Abhängigkeit der Gitter Wellenlänge (bei den grünen Symbolen wurde der Modelltest angenommen und bei den magentafarbenen abgelehnt)

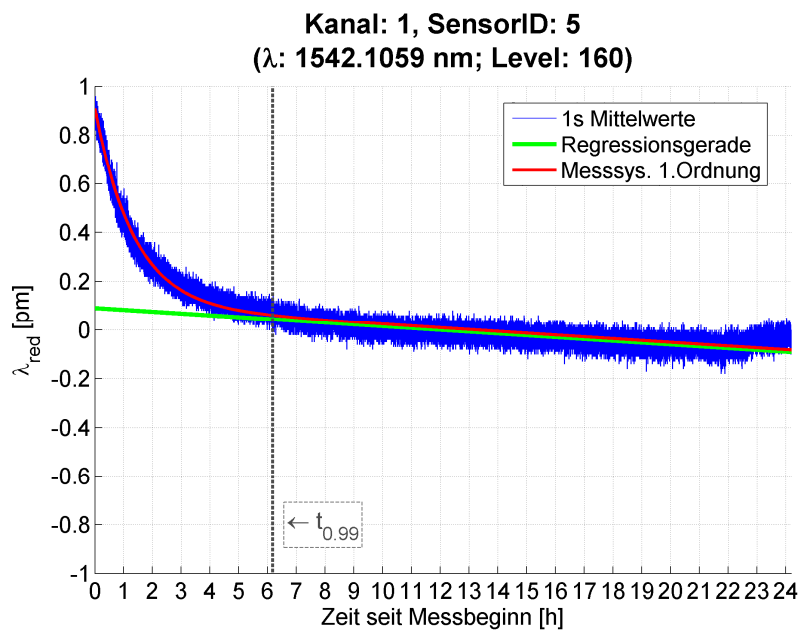
### 5.1.4.2 Messsystem 1. Ordnung

Zu Beginn der Zeitreihen kommt es bei einigen Sensoren zu einer Änderung der detektierten Braggwellenlänge (siehe Abbildung 35). Es kann allerdings kein allgemeines Verhalten festgestellt werden, da sich alle Sensoren unterschiedlich verhalten (siehe z.B. Abbildung 35). Es konnte kein Zusammenhang dieses Verhaltens mit der Braggwellenlänge oder dem *Level* gefunden werden (siehe Ergebnisse in Anhang B.2). Einige Sensoren zeigen eine exponentielle Annäherung zu Beginn der Datenreihe (siehe Sensoren mit den IDs 3,4,5,10). Daher wurde das Systemverhalten durch ein dynamisches Messsystem 1. Ordnung (Profos & Pfeifer, 1994, S.77) modelliert:

$$\lambda_t = K * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (5-3)$$

Der Faktor  $K$  entspricht dem Übertragungsfaktor und  $\tau$  der Zeitkonstante des Systems. Vor der Schätzung wurden die Daten um die zuvor bestimmte Regressionsgerade reduziert. Nach Schätzung dieser Funktion wurde wieder ein Globaler Modelltest zur Überprüfung auf Modellfehler durchgeführt. Als Standardabweichung diente wieder  $\sigma_{ID, Dauer}$  (aus Abschnitt 5.1.6). Wurde dieser Test angenommen, so wurde der Kennwert  $t_{0,99}$  für diesen Sensor berechnet. Dieser Kennwert bezeichnet die Zeit, die das Messsystem benötigt, um 99% des Beharrungswertes zu erreichen. Als letzter Schritt dieses Verfahrens wurde der maximale Wert für  $t_{0,99}$  aller Sensoren als Akklimatisationszeit definiert. Der maximale Wert für  $t_{0,99}$  beträgt bei Sensor ID10 15.8h

Abbildung 38 zeigt exemplarisch einen Sensor mit dem modellierten Messsystem 1. Ordnung.



**Abbildung 38: Braggwellenlänge Sensor ID5, modelliert als Messsystem 1. Ordnung (rote Linie)**

Eine generelle Modellierung als Messsystem 1. Ordnung ist allerdings nicht für alle Sensoren sinnvoll, da nicht alle Sensoren dasselbe Verhalten zeigen (siehe z.B. Abbildung 35b). Daher wurde diese Berechnung nur für fünf der Sensoren durchgeführt. Details und Resultate dieser fünf Sensoren sind im Anhang B.2.2 zu sehen.

### 5.1.5 Datensprünge

Wie schon in Abschnitt 4.3.4 erwähnt und auch schon in Abbildung 35b zu erkennen war, treten in den detektierten Braggwellenlängen Sprünge auf. Dieser Umstand wird in Abbildung 39 anhand der 1s Mittelwertdaten eines Sensors gezeigt, wobei trendreduzierte Daten verwendet werden. Abbildung 39b zeigt zur Verdeutlichung der Datensprünge einen Ausschnitt aus Abbildung 39a. In den 250Hz Rohdaten würden solche Datensprünge aufgrund des Rauschens nicht erkennbar sein.

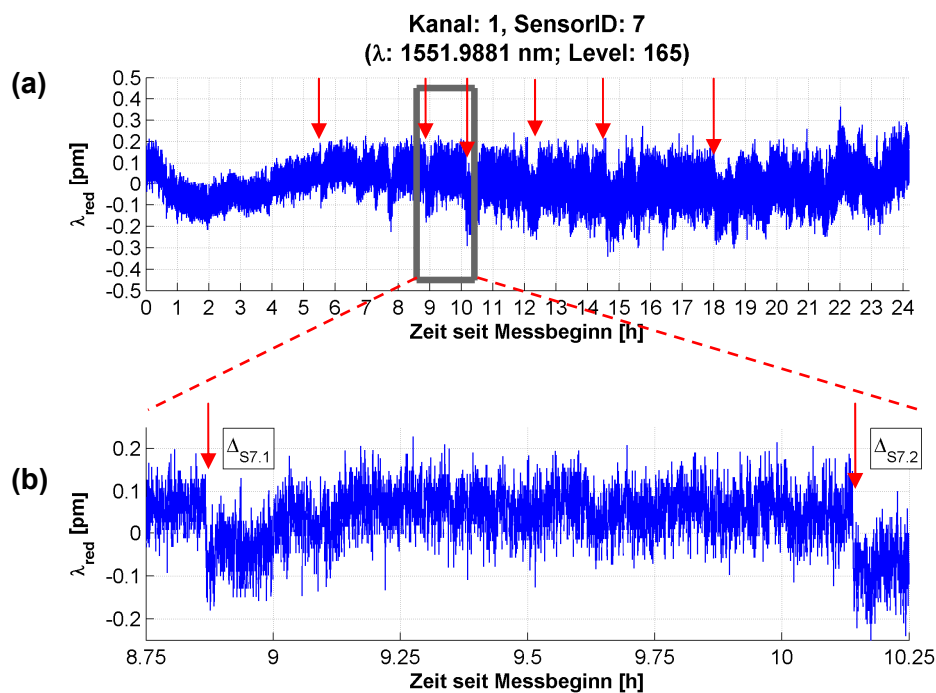
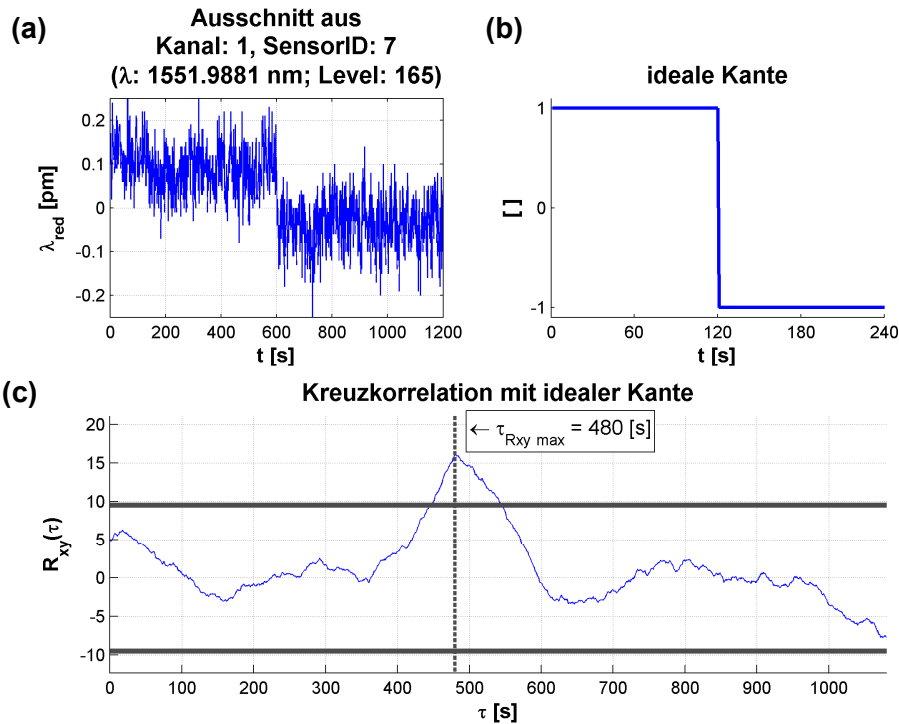


Abbildung 39: Datensprünge (1Hz Daten, trendeliminiert) (a) Sensor ID7 mit markierten Datensprüngen (rote Pfeile), (b) Ausschnitt mit zwei Datensprüngen  $\Delta_{S7.1}$  und  $\Delta_{S7.2}$

Es wurde vermutet, dass die Kalibrierung des *Swept Lasers* (siehe Abschnitt 2.3) die Ursache für diese Datensprünge darstellt. Durch diese Kalibrierung soll ein Einfluss von thermischen und mechanischen Driften, sowie Nichtlinearitäten des PZT und des Filters vermieden werden. Dadurch, dass ein Kontrollsignal an den PZT gesendet wird, sobald diese Driften zu groß werden, könnte es zu Datensprüngen kommen. Diese Kalibrierung geschieht aber wie in Abschnitt 2.3 erwähnt laut Hersteller mit 250Hz.

Für die Untersuchung der Datensprünge müssen der Datensprung selbst sowie der Zeitpunkt von dessen Auftreten detektiert werden. Die Datensprungdetektion wurde mithilfe einer Kreuzkorrelation der Daten mit einer idealen Kante durchgeführt. Dieses Vorgehen wird in Abbildung 40 schematisch dargestellt. Abbildung 40a zeigt einen Ausschnitt der Daten des Sensors ID6. Die Länge der idealen Kante wurde empirisch festgelegt.

Als Sprünge wurden all jene Zeitabschnitte angenommen, die größer als  $2 \cdot s_K$  ( $s_K$ ...Standardabweichung der  $R_{xy}$ , empirisch bestimmt) sind, siehe horizontale graue Linien in Abbildung 40c. Der Zeitpunkt des Datensprungs errechnet sich aus dem Zeitpunkt des Maximums von  $R_{xy}$  (entspricht  $\tau_{R_{xy} \max}$ ) plus der halben Länge der idealen Kante (hier 120).



**Abbildung 40:** (a) zweiter Sprung ( $\Delta_{S7.2}$ ) aus Abbildung 39b, (b) ideale Kante, (c) Kreuzkorrelation von (a) mit (b)

Der oben beschriebene Prozess wurde für alle Sensoren durchgeführt. Abbildung 41 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Kreuzkorrelation der Daten aus Abbildung 39b mit einer idealen Kante. Eingezeichnet sind in dieser Abbildung die beiden detektierten Datensprünge. Anhand dieser Datensprünge wird in Abschnitt 5.1.6 eine Standardabweichung für die einzelnen Sensoren abgeleitet.



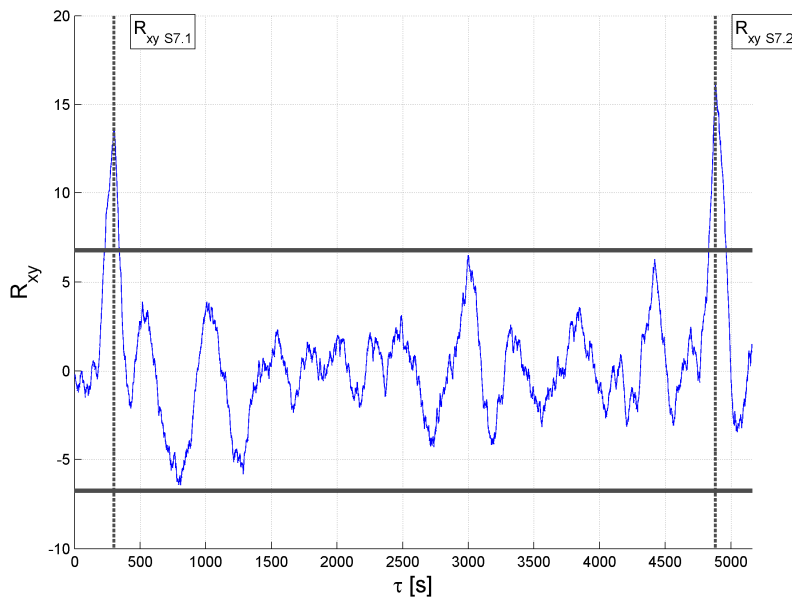


Abbildung 41: Kreuzkorrelation mit einer idealen Kante der Daten aus Abbildung 39b mit den bestimmten Datensprüngen  $R_{xy S7.1}$  und  $R_{xy S7.2}$

Abbildung 42 zeigt eine Übersicht aller Sensoren für den gleichen zeitlichen Abschnitt wie Abbildung 39b. Für die Darstellung wurden die reduzierten Daten jeweils um  $n \cdot 0.5 \mu\text{m}$  versetzt dargestellt. Diese Grafik soll verdeutlichen, dass die Datensprünge bei den Sensoren unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Lediglich Sensor ID5 zeigt in diesem Ausschnitt keinen Datensprung.

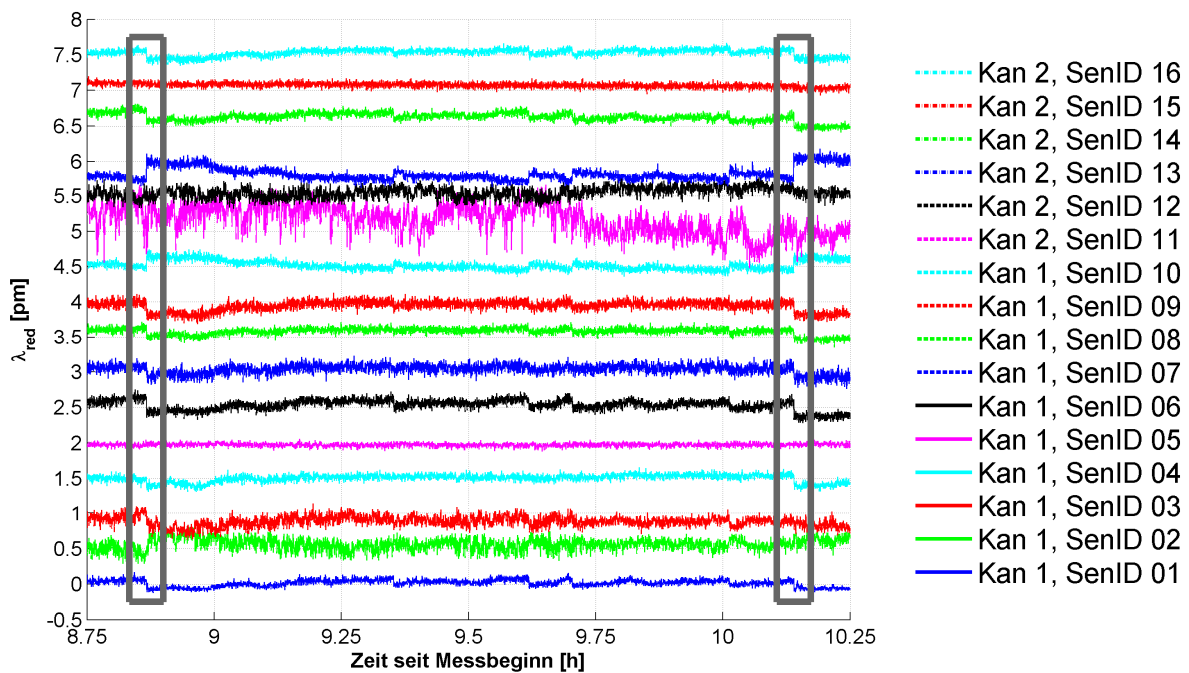


Abbildung 42: Übersicht der reduzierten Wellenlängen aller Sensoren, zur besseren Darstellung um  $n \cdot 0.5 \mu\text{m}$  versetzt (die Legende entspricht den Datenreihen von oben nach unten sortiert)

Weiters wird in der Grafik deutlich, dass die Datensprünge bei allen Sensoren annähernd zeitgleich (max.  $\pm 2s$  Abweichungen, die durch das Rauschen, sowie durch die Mittelbildung für die 1s Werte entstehen können) auftreten, was auf ein Vorhandensein von systematischen Effekten schließen lässt.

Sensor ID11 zeigt in Abbildung 42 ein deutlich höheres Rauschen als die restlichen Sensoren. Dieses Verhalten könnte sich durch die Position des Sensors innerhalb der Sensorkette ergeben. Sensor ID11 befindet sich an der letzten Position der Sensorkette FBGiA#2 und das Signal muss daher auch die meisten *Spleiße* durchlaufen.

Abbildung 43 zeigt die kombinierte Anzahl der detektierten Sprünge aller Sensoren pro Stunde. Anhand der Grafik könnte man vermuten, dass bei einer längeren Messdauer diese Anzahl leicht abnimmt.

Es treten zwischen 20 und 85 Sprünge pro Stunde auf, wobei lediglich größere Sprünge (gesteuert durch Länge der Kante sowie die empirisch bestimmte  $2 \cdot s_K$  Grenze) berücksichtigt wurden. Kleinere Sprünge sind nicht von Interesse, da anhand der größten Sprünge eine Standardabweichung abgeleitet werden soll.

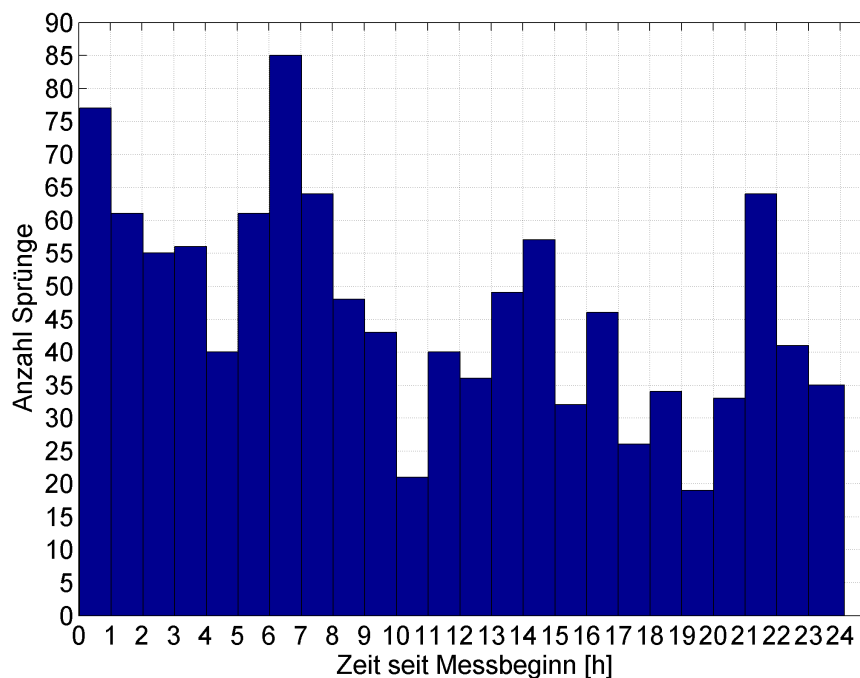


Abbildung 43: Anzahl der Datensprünge je 1h Intervall aller Sensoren

Es soll nun untersucht werden, ob eine konstante Zeit zwischen den Datensprüngen verstreicht oder ob Systematiken im Auftreten der Datensprünge vorhanden sind. Abbildung 44 zeigt die Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Datensprüngen zweier Sensoren.

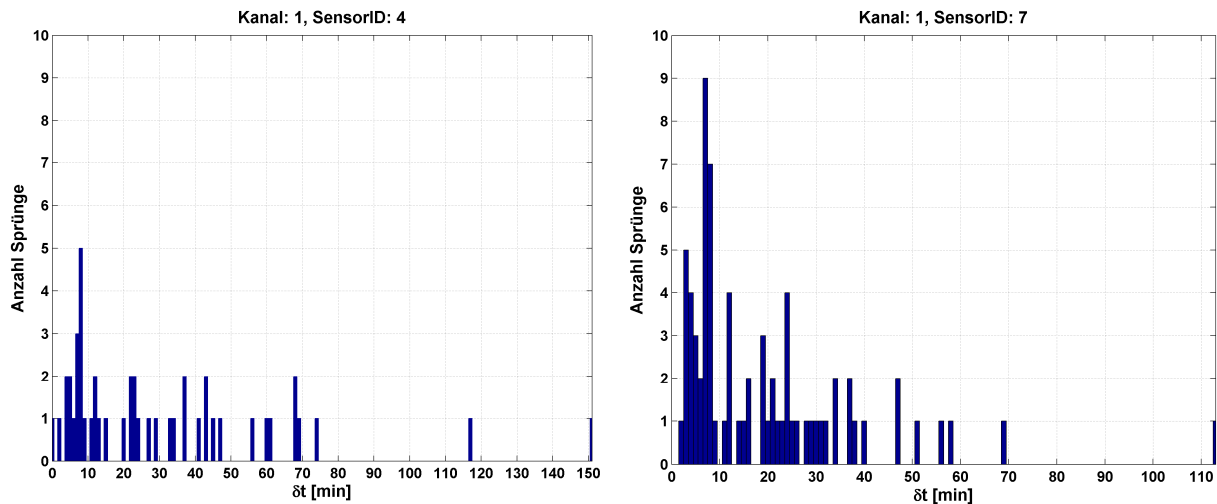


Abbildung 44: Zeitdifferenz zwischen den Datensprüngen in 1 Minuten Intervallen (a) Sensor ID4, (b) Sensor ID7

Die einzelnen Sensoren verhalten sich beim zeitlichen Abstand der Datensprünge recht unterschiedlich. Der Abstand und die Anzahl (maximal 9) der Sprünge variieren dabei stark. Die Ergebnisse lassen keine Zusammenhänge oder Regelmäßigkeiten beim Auftreten der Datensprünge erkennen.

Durch das Vorhandensein dieser nicht präzifizierbaren Datensprünge ist die zu erreichende Präzision durch die Höhe dieser Sprünge begrenzt. Daher wird auf Grundlage der maximalen Datensprünge eine Standardabweichung für jeden Sensor bestimmt.

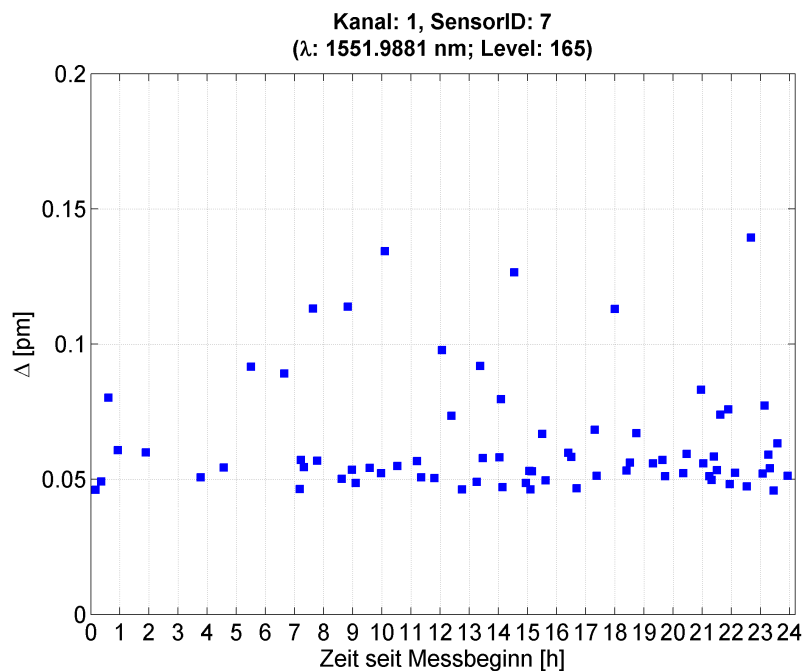
### 5.1.6 Bestimmung von $\sigma_{ID, Dauer}$

Die Berechnung von  $\sigma_{ID, Dauer}$  erfolgt auf Grundlage des maximalen Datensprungs  $\Delta_{max}$  für jeden Sensor. Die Standardabweichung  $\sigma_{ID, Dauer}$  errechnet sich nach

$$\sigma_{ID, Dauer} = \Delta_{ID, max} / \sqrt{12} \quad (5-4)$$

(Oppenheimer & Schaefer, 1999 S.196). Dabei wird angenommen, dass die Daten mit gleicher Wahrscheinlichkeit über die Breite des Sprunges verteilt sind. Dadurch liegt den Daten eine Rechtecksverteilung zugrunde.

Die Größe des maximalen Datensprungs wird aus den Daten der Kreuzkorrelation mit einer idealen Kante abgeleitet. So errechnen sich die Datensprünge  $\Delta_{S7.1}$  und  $\Delta_{S7.2}$  aus Abbildung 41 aus dem lokalen Maximum von  $R_{xy, S7.1}$  bzw.  $R_{xy, S7.2}$  dividiert durch die halbe Länge der idealen Kante (120 siehe Abbildung 40b). Dabei ergibt sich für  $R_{xy, S7.1}$  ein  $\Delta_{S7.1}$  von 0.12pm und für  $R_{xy, S7.2}$  ein  $\Delta_{S7.2}$  von 0.14pm. Abbildung 45 zeigt die errechneten  $\Delta$  des Sensors ID7.



**Abbildung 45: Berechnete Datensprünge  $\Delta$  des Sensors ID7**

Da die Sprünge bei den Sensoren mit den IDs 5 bzw. 15 weit geringer als das Rauschen sind, kann für diese Sensoren keine Standardabweichung auf Grundlage des Datensprungs errechnet werden. Daher wurde für Sensor ID5 eine Standardabweichung nach Abzug des Messsystems 1.Ordnung bestimmt. Für Sensor ID15 wurde die Standardabweichung aus einem linearen Teil der Daten (nach Abzug der Regressionsgeraden) bestimmt. Die Verteilung der für die Berechnung der Standardabweichung herangezogenen Daten wurde mittels QQ-Plot und Histogramm überprüft.

Die hier berechnete Standardabweichung wird allerdings bereits bei der Ausreißerdetektion für die iterative Berechnung der Regressionsgeraden, sowie beim Globalen Modelltest für die Regressionsgerade und dem Globalen Modelltest der Modellierung des Messsystems 1. Ordnung benötigt. Daher musste die gesamte Berechnung iterativ erfolgen. Für den ersten Durchlauf der Berechnung wurde  $\Delta$  anhand der Plots manuell bestimmt und daraus eine empirische Standardabweichung  $\sigma_{ID, empirisch}$  nach (5-4) berechnet. Für die nächsten Iterationsschritte wird  $\sigma_{ID, empirisch}$  durch  $\sigma_{ID, Dauer}$  ersetzt.

### 5.1.7 Resultate

Bei diesem Experiment konnte folgendes nachgewiesen werden:

- Die Interrogation Unit weist keine linearen Driften auf. Alle rechnerisch signifikanten Driften sind kleiner als die durch mögliche Restabweichungen der Temperatur abgeleitete Grenze von ca. 1pm pro Tag (siehe Abbildung 36). Es ist auch kein Zusammenhang zwischen errechneter Steigung einer Regressionsgeraden und der Braggwellenlänge erkennbar (siehe Abbildung 37).
- Es konnte für einige der Sensoren ein Messsystem 1.Ordnung modelliert werden (siehe Abbildung 38). Für diese Sensoren wurde ein maximaler Wert für  $t_{0,99}$  von ca. 16 Stunden abgeleitet (siehe Tabelle 8), wobei die gesamte Messdauer lediglich 24 Stunden betrug. Somit sollte für präzise Messungen eine lange Aufwärmzeit berücksichtigt werden. Vom Hersteller werden für eine Aufwärmzeit lediglich 5 Minuten angegeben.

Eine generelle Modellierung der Sensoren als Messsystem 1.Ordnung ist allerdings nicht sinnvoll, da sich die Sensoren unterschiedlich verhalten (siehe Abbildung 35 sowie Anhang B.2.1).

- Bei den detektierten Braggwellenlängen kommt es zu Datensprüngen (siehe z.B. Abbildung 39 oder Abbildung 42). Mittels einer Kreuzkorrelation mit einer idealen Kante (siehe Abbildung 40) konnten die Zeitpunkte dieser Datensprünge berechnet werden. Es konnten keine Systematiken im Auftreten der Datensprünge gefunden werden (siehe Abbildung 44).
- Die vorhandenen Datensprünge (max. 0.5pm) limitieren auch die maximal erreichbare Präzision der Interrogation Unit. Aus den Datensprüngen wurde für die nachfolgenden Experimente für jeden Sensor eine Standardabweichung  $\sigma_{ID, Dauer}$  der 1s Mittelwerte abgeleitet (siehe Tabelle 8).

Die erzielten Ergebnisse dieses Experiments sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Ergebnisse des Experiments "Dauermessung"<sup>1)</sup>

ID	$\lambda$ [nm]	Spannweite		Gain	Level	$t_{0,99}$ <sup>2)</sup>
		1s Daten [pm]	$\sigma_{ID\text{ Dauer}}$ 1Hz [pm]			
01	1524.1781	1.3	0.11	1	10	14.7
02	1529.7288	0.9	0.07	1	169	-
03	1532.0680	1.4	0.06	1	177	4.4
04	1540.0192	1.3	0.07	1	179	4.4
05	1542.1059	1.1	0.04	1	160	6.2
06	1544.9218	1.3	0.06	1	173	-
07	1551.9881	1.0	0.05	1	165	-
08	1555.0992	1.2	0.05	1	169	-
09	1559.9319	1.4	0.10	1	157	-
10	1561.9902	1.2	0.06	1	147	15.8
11	1525.1879	2.2	0.15	2	104	-
12	1529.9092	1.3	0.07	2	57	-
13	1540.4232	0.9	0.09	2	226	-
14	1544.7972	1.2	0.05	2	49	-
15	1556.4887	1.1	0.04	2	225	-
16	1559.8426	1.4	0.08	2	41	-

<sup>1)</sup> Farblich hervorgehoben wurden der kleinste bzw. größte Wert für Spannweite und  $\sigma_{ID\text{ Dauer}}$  in grün bzw. in rot

<sup>2)</sup> Nicht für alle Sensoren schätzbar (-), siehe Abschnitt 5.1.4.2

## 5.2 Faserzentrierung

### 5.2.1 Problemstellung

In diesem Experiment soll, falls vorhanden, die Auswirkung der Zentrierungenauigkeiten bei der Befestigung der faseroptischen Stecker an die Kanäle der MOI si425 untersucht werden. Fraglich ist, ob es zu Abweichungen bei unterschiedlich stark angezogenen Steckern kommen kann, so z.B. bei der Bedienung durch verschiedene Personen. Zu diesem Zweck wird die Faser einer Sensorbox wiederholt an alle vier Kanäle der Interrogation Unit angesteckt und gemessen.

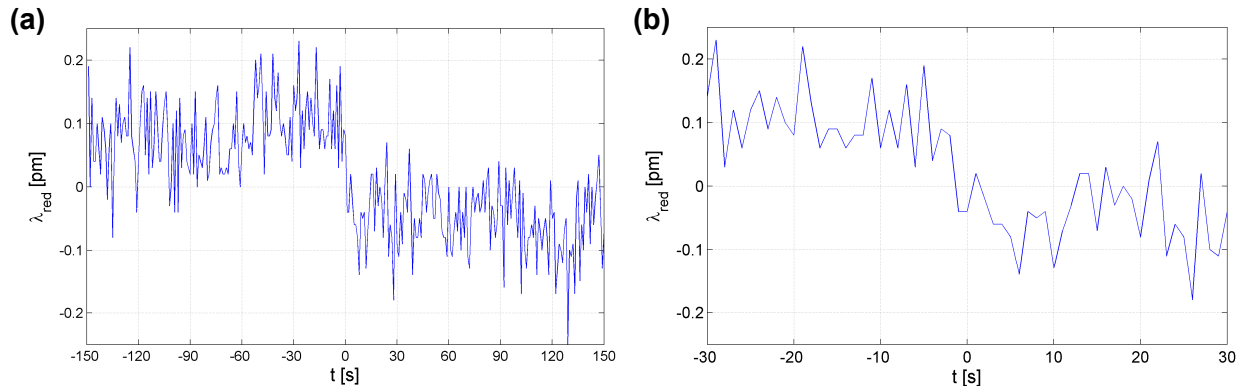
### 5.2.2 Durchführung

Die Sensorwahl fiel auf die Sensorkette FBG<sub>ia</sub>B #1, da diese eine höhere Sensoranzahl und damit zusammenhängend eine bessere Verteilung der Sensoren über den Messbereich aufweisen kann (siehe Tabelle 8). Zudem befinden sich die Sensoren dieser Sensorkette in einem optimaleren Levelbereich (siehe Tabelle 8). Die Messdauer der einzelnen Ansteckversuche wurde auf 60 Sekunden festgesetzt, um die Dauer des Experiments in Grenzen zu halten aber dennoch Sprünge erkennen zu können. In Abbildung 46 ist der Datensprung  $\Delta_{S7.2}$  zur Veranschaulichung von unterschiedlich langen Messdauern in einem 5 Minuten Ausschnitt und in einem 1 Minuten Ausschnitt dargestellt.

Sollten zwei aufeinanderfolgende Ansteckversuche vor und nach dem Datensprung durchgeführt werden, würde der maximale Unterschied dieser beiden Messreihen in der Größenordnung des Datensprungs liegen. Da  $\sigma_{ID, Dauer}$  in Abschnitt 5.1.5 aus den Datensprüngen abgeleitet wurde, wurden diese in diesem Experiment zur Überprüfung herangezogen.

Die Anzahl der Ansteckversuche wurde pro Kanal auf 20 festgelegt, wobei zwischen den Versuchen der Sensor 20-mal vom jeweiligen Kanal vollkommen entfernt und wieder angeschraubt wurde.

Anschließend wurde versucht, die Faser jeweils fünf mal lose (eine Umdrehung der Arretierschraube) und fünf mal fest an die Interrogation Unit anzuschrauben, um zu untersuchen, ob es Unterschiede in der detektierten Braggwellenlänge bei verschiedenen Personen gibt.



**Abbildung 46: Detail eines Sprungs ( $\Delta_{S7.2}$ ) der in Abbildung 39a gezeigten Daten (1s Mittelwertdaten des Sensors ID7): (a) 5 Minuten Ausschnitt (b) 1 Minuten Ausschnitt; zur Veranschaulichung zweier unterschiedlicher Messdauern**

Die wesentlichen Informationen zum Ablauf dieses Experiments sind in Tabelle 9 aufgelistet. Da bei der 24h Dauermessung (Abschnitt 5.1) ein Aufheizeffekt von bis zu 15,8 Stunden beobachtet wurde, wurde die si425 schon am Vorabend dieses Experiments eingeschaltet. Somit sollten alle Resteffekte eliminiert sein.

**Tabelle 9: Informationen zum Experiment "Faserzentrierung"**

Information	Versuch
Datum	06.08.2010
Datum	Beginn
	09:30
	Dauer
	6 h
si425 ON vor Messbeginn	17 h
Sensor #	FBGiaB # 1
Kanal	1, 2, 3, 4
Gain	1
Position	VC <sup>1)</sup>
Sensor #	FBGiaB # 2
Kanal	2, 1, 1, 1
Gain	2
Position	VC <sup>1)</sup>
Aufzeichnungsrate	250Hz

<sup>1)</sup>VC... Vertikalkomparator, Bodenschacht

Zu Kontrollzwecken wurde FBGiaB #2 an einen freien Kanal angeschlossen und mit gemessen. Bei der Untersuchung von Kanal 1 wurde diese Box auf Kanal 2 und ansonsten auf Kanal 1 angeschlossen. Die Fasern sowie die Kanäle wurden vor Messbeginn von Herrn Presl penibel gereinigt.



### 5.2.3 Analyse

Zunächst wurden für alle 30 Datenreihen aus den verrauschten Rohdaten und für jeden Sensor 1s Mittelwertdaten generiert. Für jeden dieser Datensätze wurde pro Sensor die detektierte Braggwellenlänge mittels Median bestimmt. Der Median wurde gewählt für den Fall, dass ein Datensprung in den Daten vorkommen sollte, was praktisch aber nie vorgekommen ist. Die maximale Abweichung zwischen Median und Mittelwert betrug bei diesem Experiment gerade einmal 0.04pm. Die allermeisten Abweichungen sind jedoch weit unter 0.01pm.

Zur Reduktion der Daten der einzelnen Sensoren wurde aufgrund der Abweichungen einzelner Ansteckversuche ebenfalls der Median verwendet.

Von dieser reduzierten Wellenlänge ausgehend wurde überprüft, ob die Werte der Ansteckversuche innerhalb eines  $3\sigma$  Bereichs (entspricht einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99.7%) liegen. Als  $\sigma$  dient die aus den Datensprüngen abgeleitete Größe  $\sigma_{ID, Dauer}$  (siehe Tabelle 8). In den nächsten Abschnitten sind die an den vier Kanälen erzielten Ergebnisse beschrieben.

#### 5.2.3.1 Ergebnisse des Umsteckens FBG<sub>iaB</sub>#1 auf Kanal 1

Abbildung 47 zeigt einen Ergebnisplot dieses Experiments. Exemplarisch wird der Sensor mit dem geringsten  $\sigma_{ID, Dauer}$  (Sensor ID5) dargestellt.

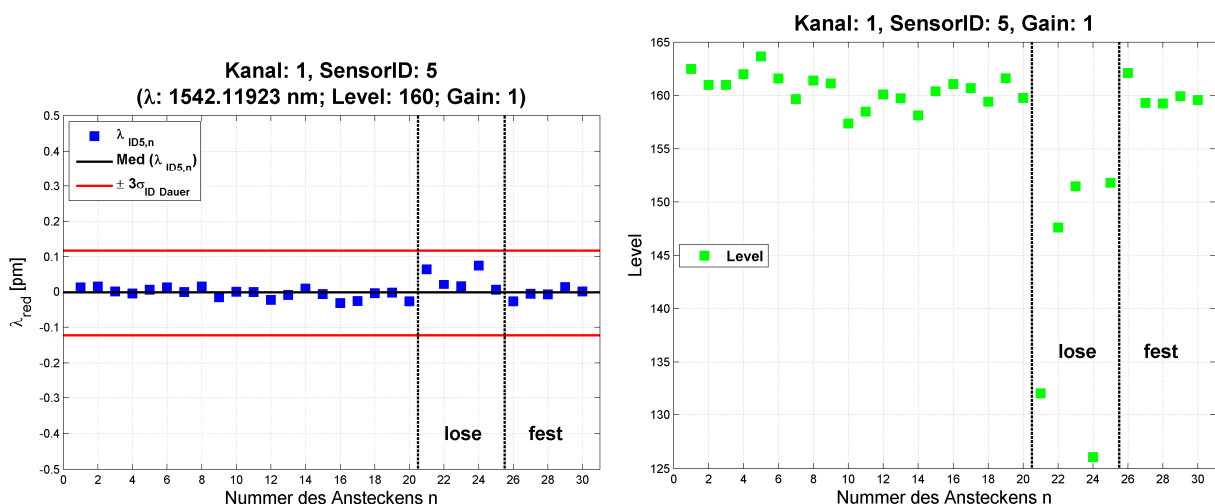


Abbildung 47: Ergebnisplots eines Sensors beim Experiment "Faserzentrierung" (links) reduzierte Daten, (rechts) Level; (Versuche mit lose und fest angezogenem Stecker sind markiert dargestellt)

Fast alle Sensoren weisen wesentlich kleinere Abweichungen zwischen den Ansteckversuchen als  $3\sigma_{ID, \text{Dauer}}$  auf (siehe Anhang B.3.1). Einzig beim Sensor mit der ID1 (geringster *Level* der untersuchten Sensoren, siehe Tabelle 8) liegen zwei Umsteckversuche außerhalb dieses Bereichs (siehe Abbildung 48a). Dies lässt sich durch den Versuch, die Faser ab Ansteck Nummer 20 nicht mehr so fest anzudrücken und den damit verbundenen Levelverlust (siehe Abbildung 48b) erklären. Der *Level* beträgt bei den ersten Messungen 10 und für die Versuche mit nicht fest angeschraubter Faser nur noch 8, was, wie im Experiment Signaldämpfung in Abschnitt 5.4 gezeigt wird, zu einer Änderung der Wellenlänge führen kann. Dort wurde für ein Absinken des *Level*s von 10 auf 8 ein  $\Delta\lambda$  von ca. +0.8pm beobachtet. Dadurch sind diese beiden Ausreißer erklärbar.

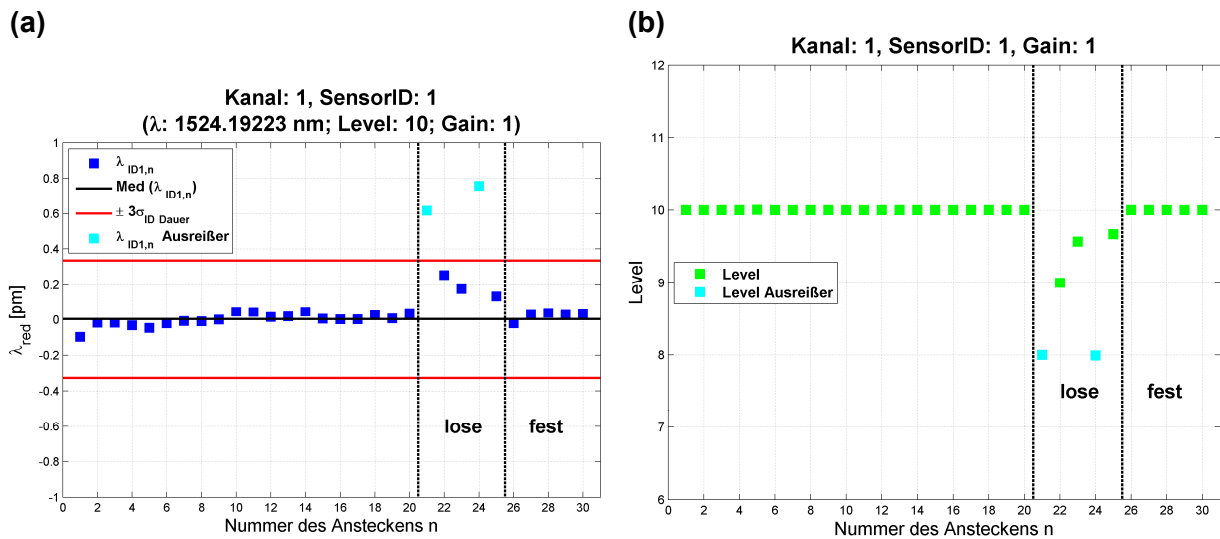


Abbildung 48: (a) Ergebnis des Sensors ID1 mit lose und fest angezogenem Stecker, (b) *Level* des Sensors

### 5.2.3.2 Ergebnisse des Umsteckens FBG<sub>ia</sub>B#1 auf Kanal 2

Auf Kanal 2 befinden sich alle durchgeführten Messungen innerhalb des  $3\sigma$  Bereichs. Die Resultate dieses Kanals sind in Anhang B.3.3 zu finden.

### 5.2.3.3 Ergebnisse des Umsteckens FBG<sub>ia</sub>B#1 auf Kanal 3

Es wurde bei jedem Anschrauben der Faser vor Beginn der Datenaufzeichnung der *Level* der Sensoren kontrolliert. Auf Kanal 3 wurde nach dem 25. Anschrauben ein wesentlich geringerer *Level* als bei den Versuchen zuvor beobachtet. Bei der daraufhin durchgeführten Kontrolle wurde eine Verschmutzung der Faser festgestellt.

Die Messung wurde daraufhin unterbrochen und die Fasern sowie alle Kanäle wurden gereinigt. Nach dem Reinigen wurde der normale Versuchsablauf mit stark angezogener Faser und im Anschluss daran mit zwei Kontrollmessungen weitergeführt.

Bei den Versuchen nach dem Reinigen traten bei manchen Sensoren deutliche Unterschiede (bis zu 0.7pm bei  $Gain = 1$ ) zu den Ergebnissen der zuvor durchgeführten Ansteckversuche (vergleiche Abbildung 49) auf. Solche Unterschiede sind jedoch nicht bei allen Sensoren sichtbar (siehe z.B. Abbildung 50). Die gesammelten Ergebnisse dieses Experiments sind im Anhang B.3.5 zu finden.

An den Kontrollsensoren der FBG<sub>ia</sub>B#2 auf Kanal 1 (mit der Einstellung  $Gain = 2$ ) konnten bei den Sensoren mit hohem *Level* (225 bis 227) Abweichungen zu den Messungen vor dem Reinigen von 3pm festgestellt werden (siehe Anhang B.3.6 Abbildung B.3.6-1e sowie Abbildung B.3.6-1i).

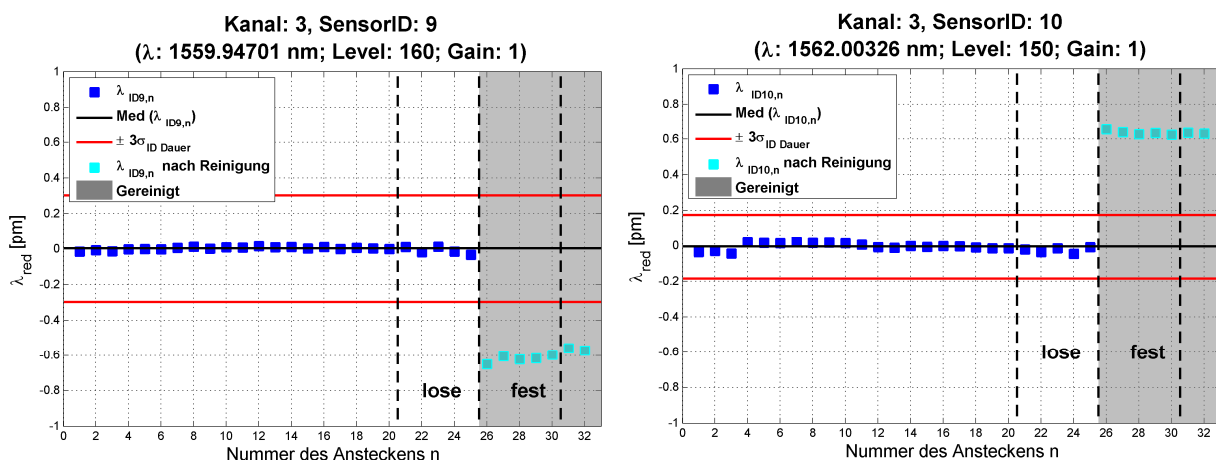


Abbildung 49: Sensoren mit Abweichung nach der Sensorreinigung

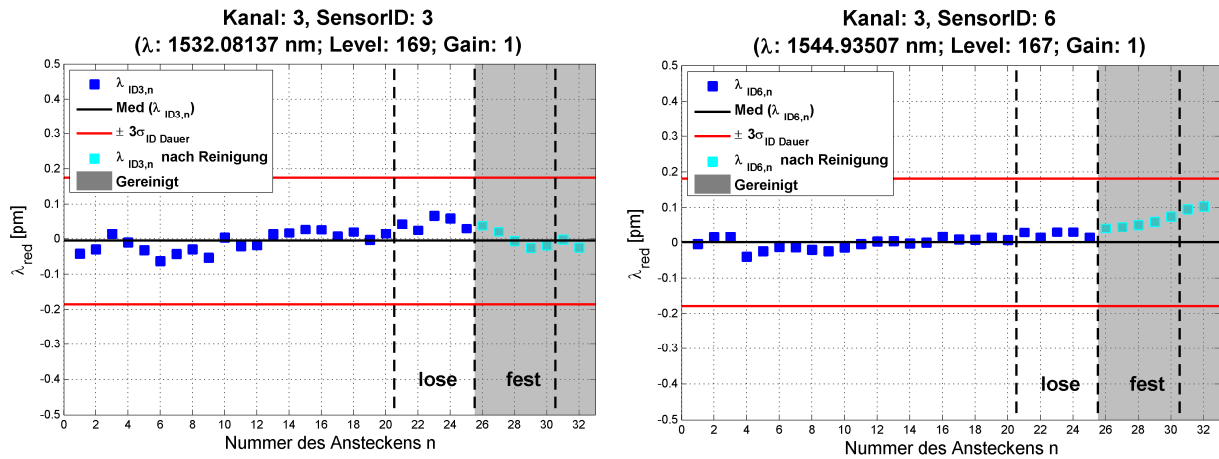


Abbildung 50: Sensoren ohne Abweichungen nach der Sensorreinigung

Es wurde befürchtet, dass das Reinigen der Kanäle die APC-Steckverbindung leicht verdreht hat und nun das Faserende nicht mehr exakt anliegen kann. Diese Befürchtung bildete die Grundlage des nachfolgenden Experiments (Abschnitt 5.3), konnte dort allerdings widerlegt werden. Woher die Abweichungen einiger Sensoren schlussendlich kommen, konnte somit nicht geklärt werden.

#### 5.2.3.4 Ergebnisse des Umsteckens FBG<sub>iaB</sub>#1 auf Kanal 4

Auf Kanal 4 befinden sich alle durchgeführten Messungen innerhalb des  $3\sigma$  Bereichs. Eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse ist im Anhang B.3.7 zu finden.

### 5.2.4 Resultate

Bei diesem Experiment konnte folgendes nachgewiesen werden:

- Die Auswirkungen eines Zentrierfehlers bei zwanzigfachem Anstecken ist auf allen Kanälen kleiner als 0.18pm (siehe z.B. Abbildung 47 bis Abbildung 50).
- Bei den Versuchen mit einem losen (eine volle Umdrehung der Arretierschraube) Anschrauben der Faser, konnten für den Sensor ID1 Abweichungen von 0.75pm festgestellt werden (siehe Abbildung 48a). Für alle anderen Sensoren blieb die Abweichung aufgrund der Zentrierung unter 0.3pm. Eine Erklärung für das Verhalten des Sensors ID1 konnte durch das Absinken des *Levels* von 10 auf 8 gefunden werden. Ein solches Absinken des *Levels* kann, wie in Abschnitt 5.4 gezeigt wird, zu Wellenlängenänderungen von ca. +0.8pm führen. Für einen *Level* unter 10 sollten ohnedies keine Messungen durchgeführt werden (siehe Abschnitt 2.4.1 sowie Abschnitt 5.4.4).
- Nach dem Reinigen der Faser und der Kanäle kam es bei einigen Sensoren zu Wellenlängenänderungen von bis zu 0.7pm (siehe Abbildung 49). Die Ursache für dieses Verhalten konnte nicht geklärt werden. Vermutet wird ein Einfluss des eventuell nicht ganz verdampften Alkohols, der beim Reinigen eingesetzt wurde.
- Die Interrogation Unit liefert unabhängig vom Anziehen der Stecker, für einen *Level* von über 10, präzise Messungen.

## 5.3 Faserzentrierung II

### 5.3.1 Problemstellung

Dieses Experiment baut auf dem Experiment aus dem vorhergehenden Abschnitt 5.2 auf. Dort wurde nach dem Reinigen der Kanäle und Sensoren eine sprunghafte Änderung der detektierten Braggwellenlänge beobachtet. Es wurde befürchtet, dass sich durch das Reinigen, welches mithilfe eines sich drehenden fuselfreien Tuches durchgeführt wurde, die Anschlusskanäle der Interrogation Unit verdreht haben könnten.

### 5.3.2 Durchführung

Für dieses Experiment wurde von der Zentriervorrichtung zweier *Mating Adapter* links (MatingL in Abbildung 51a) bzw. rechts (MatingR in Abbildung 51b) der Zentrierschlitz um jeweils 0.1mm verbreitert (abgefräst). Dadurch ist es möglich, den daran angeschlossenen optischen Stecker in diese Richtung (mit MatingL nach links und mit MatingR nach rechts) leicht zu verdrehen (Abbildung 52) und die in Abschnitt 5.2.3.3 vermutete Ursache zu simulieren. Die Richtungen werden durch die schwarzen Pfeile an den Verbindungsstücken gekennzeichnet (siehe Abbildung 51 blau hervorgehoben).

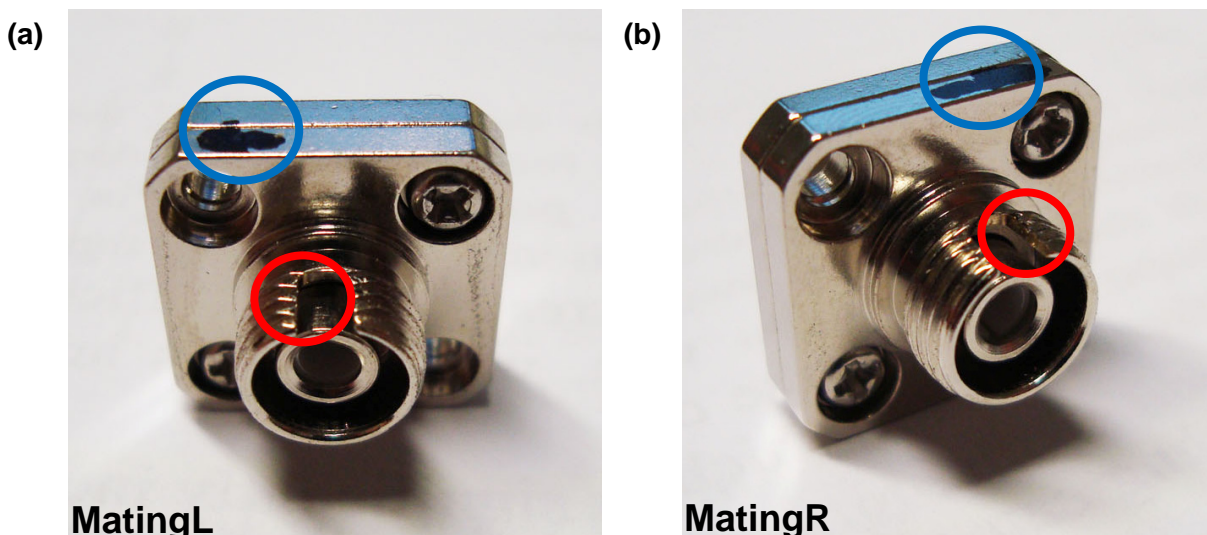


Abbildung 51: *Mating Adapter*: (a) MatingL, (b) MatingR

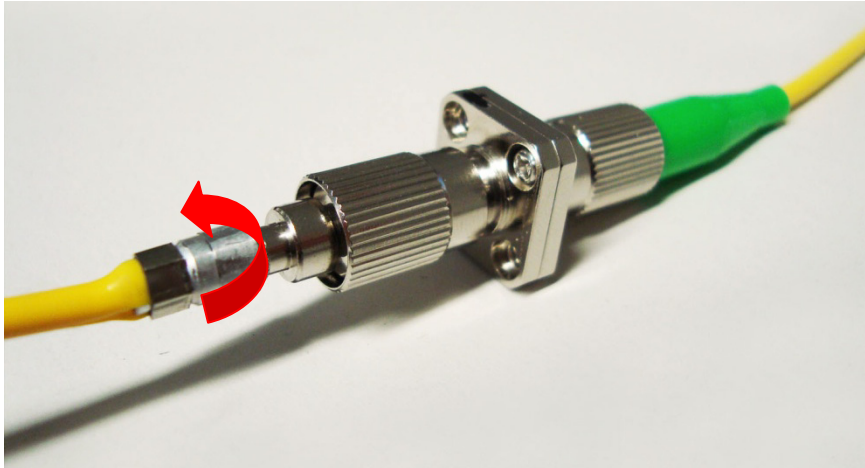


Abbildung 52: MatingL mit drehbarer Faser

Die Verdrehung der Faser, die in Abbildung 52 schematisch durch den roten Pfeil dargestellt ist, wurde sehr sorgfältig durchgeführt. Um die Faser drehen zu können, musste die grüne Schutzabdeckung entfernt werden (siehe Abbildung 52). Die Faser selbst wurde wiederholt an den *Mating Adapter* angeschraubt und anschließend in die entsprechende Richtung bis zum neu ausgefrästen Anschlag verdreht. Der Messaufbau mit dem *Mating Adapter* ist in Abbildung 53 zu sehen.

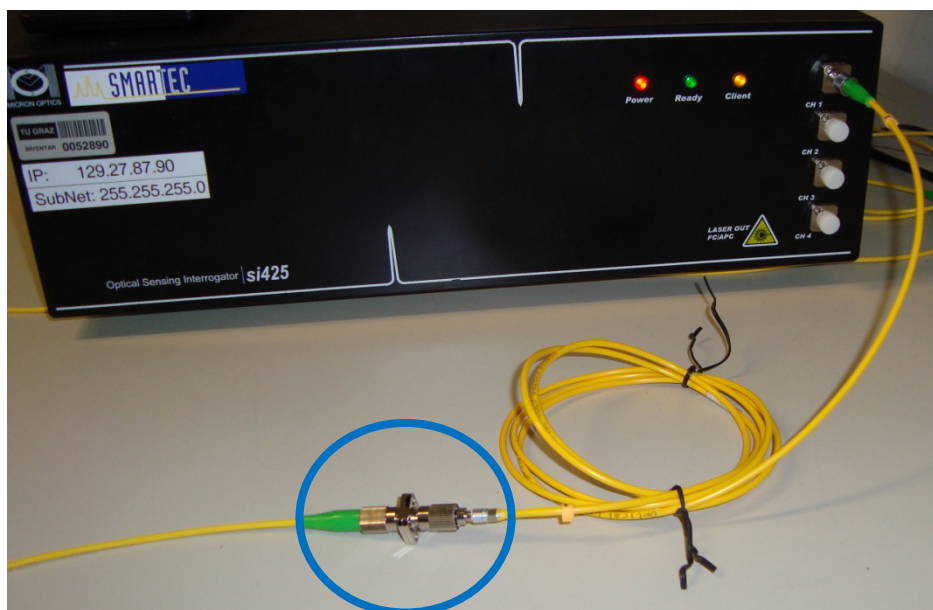


Abbildung 53: Messaufbau Experiment "Faserzentrierung II" mit markiertem *Mating Adapter*

### Faserzentrierung IIa

Der Messablauf des ersten Teils dieses Experiments ist in Tabelle 10 aufgelistet. Unter "nicht verdreht" verstehen sich Messungen, die ohne ein Verdrehen (Anschlag an der unveränderten Kante des Zentrierschlitzes) durchgeführt wurden. Zum Abschluss einer Versuchsreihe mit einem Verbindungsstück wurde nochmals eine Messung in nicht verdrehter sowie verdrehter Lage gemessen. Dort betrug die Messdauer zwischen 4 und 15 Minuten. Diese Messungen werden in der Tabelle 10 als *Dauer* bezeichnet. Die vorangegangene Messdauer betrug zum Vergleich, wie im Experiment "Faserzentrierung", jeweils eine Minute (siehe Abschnitt 5.2.2).

**Tabelle 10: Messablauf Experiment "Faserzentrierung IIa"**

Messung	Anzahl Messungen	Verbindungsstück
nicht verdreht	5	MatingL
verdreht	10	MatingL
nicht verdreht	10	MatingL
verdreht	10	MatingL
nicht verdreht	5	MatingL
nicht verdreht	1 (Dauer)	MatingL
verdreht	1 (Dauer)	MatingL
nicht verdreht	5	MatingR
verdreht	10	MatingR
nicht verdreht	10	MatingR
verdreht	10	MatingR
nicht verdreht	5	MatingR
nicht verdreht	1 (Dauer)	MatingR
verdreht	1 (Dauer)	MatingR

*MatingL...Abbildung 51a; MatingR...Abbildung 51b*

### Faserzentrierung IIb

Im Anschluss an das Experiment "Faserzentrierung IIa" wurde ein weiterer Versuch realisiert, bei dem ein Verdrehen (20s nicht verdreht, 20s verdreht) des FC/APC Steckers während der Messdatenaufzeichnung durchgeführt wurde.



Die wesentlichen Informationen zum Ablauf dieses Experiments sind in Tabelle 11 aufgelistet. Beide Sensorboxen befinden sich nach wie vor im Vertikalkomparatorschacht.

**Tabelle 11: Informationen zum Experiment "Faserzentrierung II"**

Information	Versuch
Datum	13.10.2010
Datum	Beginn 09:30
	Dauer 3 h
<hr/>	
si425 ON vor Messbeginn	40 h
<hr/>	
Sensor #	FBGiAB # 1
Kanal	1
Gain	1
Position	VC <sup>1)</sup>
<hr/>	
Sensor #	FBGiAB # 2
Kanal	2
Gain	2
Position	VC <sup>1)</sup>
<hr/>	
Aufzeichnungsrate	250Hz

<sup>1)</sup>VC... Vertikalkomparator, Bodenschacht

### 5.3.3 Analyse

Die Auswertung wurde wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben durchgeführt. Für die vier längeren Messungen (siehe Tabelle 10) wurde die Auswerterroutine der Dauermessung herangezogen. Da hier der Einfluss einer Verdrehung der Faser untersucht werden soll, wurde abweichend vom Experiment "Faserzentrierung" (Abschnitt 5.2) lediglich auf einem Kanal gemessen. Es wurde wiederum untersucht, ob sich die Werte der Ansteckversuche innerhalb eines  $3 \cdot \sigma_{ID, \text{Dauer}}$  Bereichs (siehe Tabelle 8) befinden.

### Faserzentrierung IIa

In Abbildung 54 sehen wir die beiden Sensoren, bei denen nach dem Reinigen beim Experiment "Faserzentrierung" Abweichungen aufgetreten sind. Bei einer Verdrehung der Faser zeigen diese Sensoren wesentlich kleinere Abweichungen als  $3\sigma_{ID, \text{Dauer}}$ . Auch die meisten der übrigen Sensoren befinden sich innerhalb des  $3\sigma_{ID, \text{Dauer}}$  Bereichs. Die Plots der hier nicht gezeigten Sensoren sind im Anhang B.4.1 dargestellt.

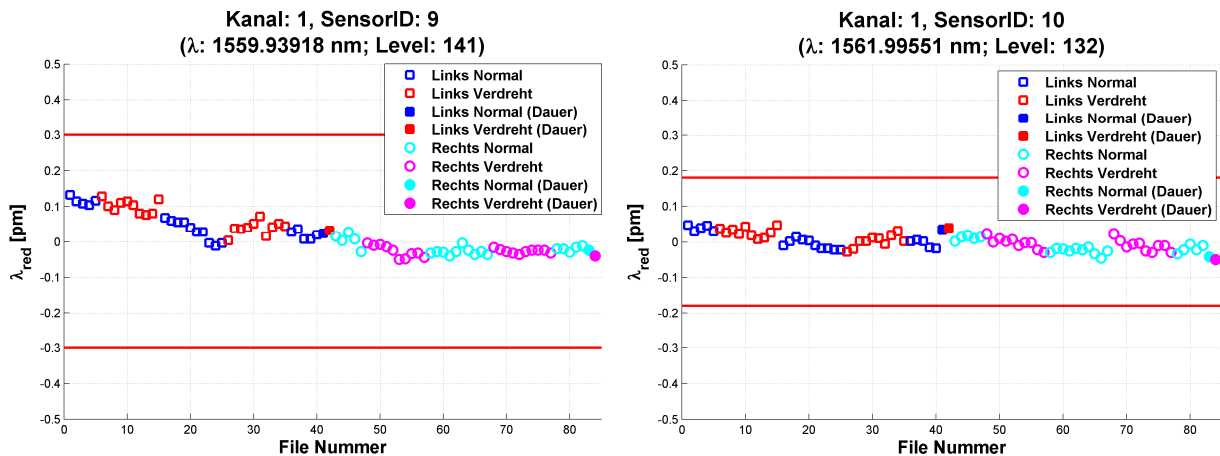


Abbildung 54: Typische Ergebnisse Experiment "Faserzentrierung IIa", exemplarisch für zwei Sensoren

Einzig Sensor ID5 und Sensor ID1 weisen ein abweichendes Verhalten auf (siehe Abbildung 55). Sensor ID1 weist, wie auch schon bei den vorangegangenen Experimenten, größere Abweichungen auf. Der *Level* dieses Sensors (ca. 9) befindet sich im unteren Bereich. Sensor ID5 weist ebenfalls einige Messungen auf, die außerhalb des  $3\sigma_{ID, \text{Dauer}}$  Bereichs liegen. Diese Abweichungen sind mit 0.01pm jedoch sehr gering und treten lediglich bei 3 der insgesamt 84 Messungen auf.

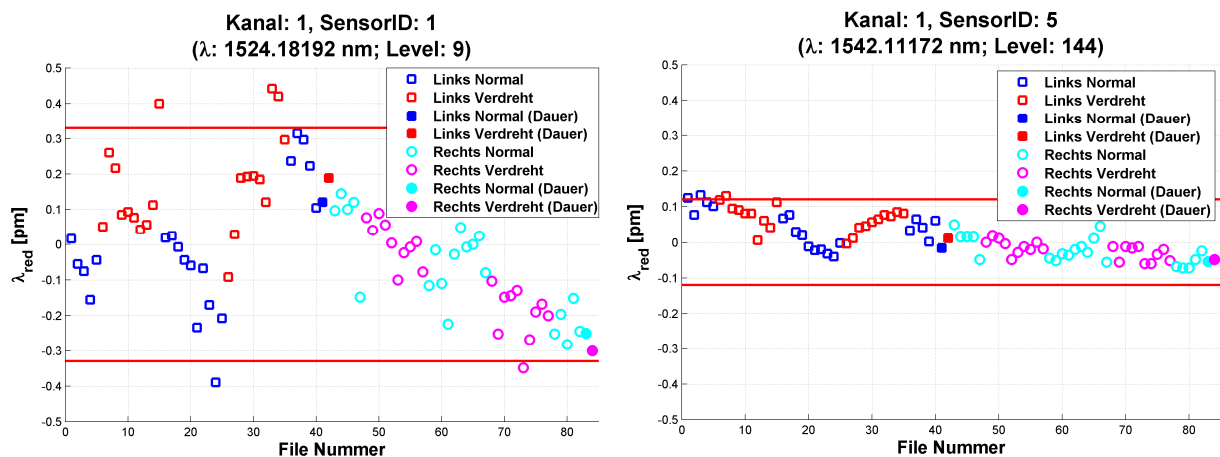


Abbildung 55: Abweichende Ergebnisse Experiment "Faserzentrierung II" bei Sensor ID1 (links) und Sensor ID5 (rechts)

In Abbildung 56 sind die zugehörigen *Levels* der in Abbildung 55 dargestellten Sensoren visualisiert. Die Leveldaten weisen keine Auffälligkeiten auf und bewegen sich im normalen Bereich.

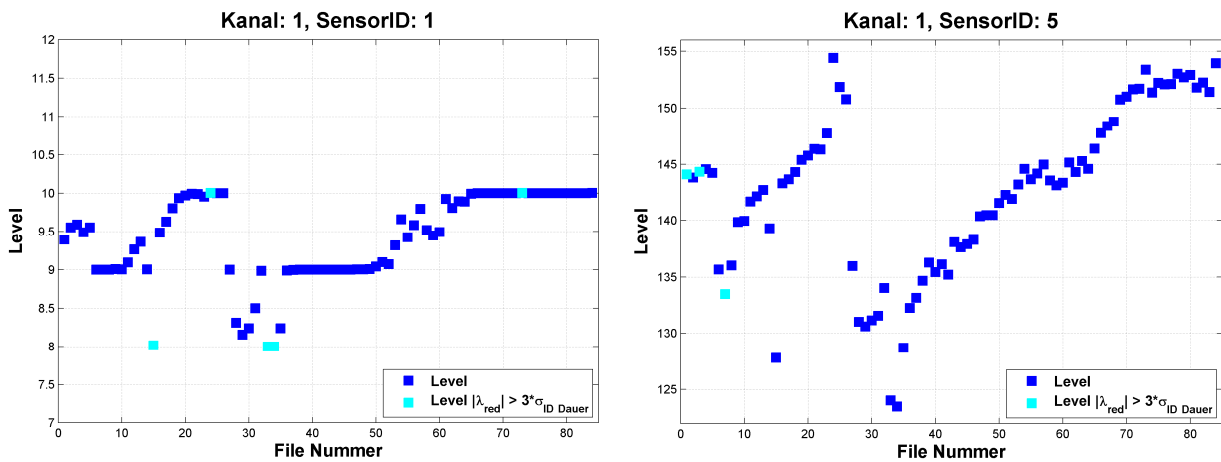


Abbildung 56: Levels der in Abbildung 55 dargestellten Sensoren

### Faserzentrierung IIb

Für den Versuch, die Faser während der Datenaufzeichnung zu verdrehen ("Faserzentrierung IIb"), ergaben sich die in Abbildung 57 dargestellten Ergebnisse. Der FC/APC Stecker wurde abwechselnd jeweils für 20s in verdrehter und anschließend für 20s in nicht verdrehter Lage belassen. Diese beiden Lagen wurden mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet und der Mittelwert der 20s wurde durch eine horizontale Linie dargestellt.

Die Ergebnisse befinden sich fast ausschließlich weit unter der, aus den Datensprüngen abgeleiteten, Grenze von  $3 \cdot \sigma_{ID, \text{Dauer}}$ .

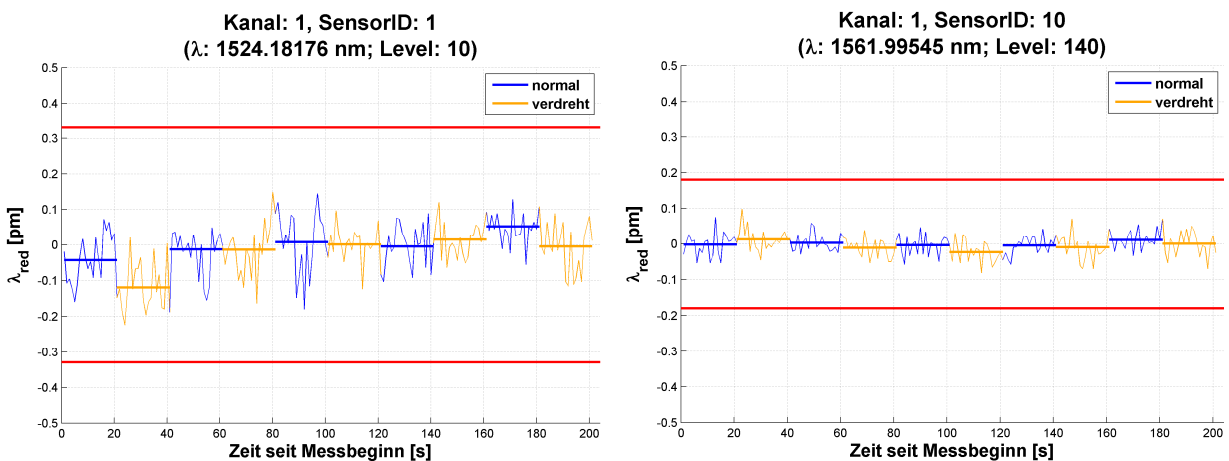


Abbildung 57: Ergebnisse "Faserzentrierung IIb" (Verdrehung während der Datenaufzeichnung) für MatingR

Die gesammelten Ergebnisse dieses Experiments sind im Anhang B.4.2 zu finden.

### 5.3.4 Resultate

Bei diesem Experiment konnte folgendes nachgewiesen werden:

- Eine leichte Verdrehung der Faser hat keinen Einfluss auf die gelieferten Messergebnisse. Die realisierten Verdrehungen waren dabei größer als sie mit dem Standardequipment im Normalbetrieb je erreichbar wären.
- Sowohl die Ergebnisse mit wiederholtem Anstecken und Verdrehen als auch die Ergebnisse bei einer Verdrehung während der Datenaufzeichnung liefern dieselben Messwerte.

## 5.4 Signaldämpfung

### 5.4.1 Problemstellung

Der *Level* ist ein einheitsloses Maß für die Intensität des rückgestreuten Signals. Er sollte laut Hersteller für optimale Messergebnisse in einem Bereich von ca. 10 bis ca. 225 liegen, wobei diese Werte lediglich graphisch angegeben werden. In Bereichen außerhalb dieses Fensters sind laut Hersteller "Messungen möglich, jedoch nicht optimal". Dies konnte vor allem bei Sensor ID1 schon mehrfach beobachtet werden. In diesem Experiment soll nun untersucht werden, welchen Einfluss ein *Level* von unter 10 bzw. über 225 auf die Messergebnisse hat. Des Weiteren gibt der Hersteller an, dass der *Level* eine lineare Skala besitzt (Micron Optics, 2004, S.12). Die bisher gemachten Beobachtungen widersprechen jedoch dieser Aussage. Daher soll die Abnahme des *Levels* mit einem künstlich generierten Signalverlust untersucht werden.

### 5.4.2 Durchführung

Mit der Einstellung *Gain* steht ein simples Mittel zur Verfügung, um den *Level* zu erhöhen. Das in der Faser verlaufende Signal erleidet bei einer Biegung der Faser eine Abschwächung. Biegestellen, bei denen die Faser mit einem konstant bleibenden Radius gekrümmt wird, werden als Makrokrümmungen bezeichnet. Infolge der Krümmung kommt es zu Strahlungsverlusten. Der Dämpfungskoeffizient  $\alpha_r$  errechnet sich dabei nach Gloge (1976) mit

$$\alpha_r = c_1 * e^{(-c_2 * R)}, \quad (5-5)$$

wobei  $c_1$  und  $c_2$  vom Radius  $R$  unabhängige Variablen sind. Die entscheidende Komponente in (5-5) ist die exponentielle Abhängigkeit des Dämpfungskoeffizienten  $\alpha_r$  vom Biegeradius  $R$  (Gloge, 1976). Somit kann die Dämpfung je nach Radius einen beträchtlichen oder aber einen vernachlässigbar kleinen Dämpfungswert ergeben. Nähere Details zur Makrokrümmung sind in Gloge (1976) zu finden.

Um eine Schwächung des Signals zu erzeugen, wurde bei diesem Experiment eine Faser mehrfach um ein Alurohr mit einem konstanten Radius gewickelt (siehe Abbildung 58a und b sowie Abbildung 59). Abbildung 58a zeigt den Versuchsaufbau im Labor und Abbildung 58b zeigt die schematische Darstellung einer Wicklung.

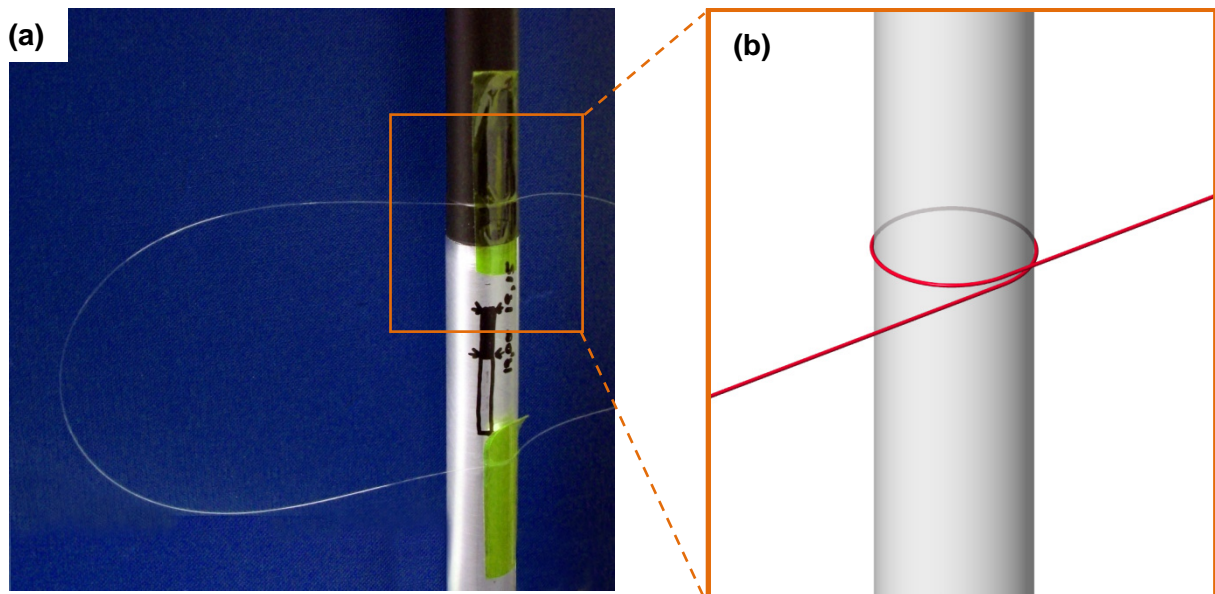


Abbildung 58: (a) Aufbau des Experiments "Signaldämpfung" im Labor, (b) Schematische Darstellung einer Wicklung der Faser um das Rohr

Die Faser wurde so lange aufgewickelt (siehe z.B. Abbildung 59), bis das Signal so stark gedämpft wurde, dass kein Sensor der Sensorkette mehr messbar war. Für die Durchführung dieses Experiments wurde FBG<sub>ia</sub>B#1 gewählt, da die Sensoren in dieser Box einen höheren *Level* aufweisen und somit mehrere Messungen bei *Gain* = 1 und *Gain* = 2 möglich sind. Daher finden sich auch nicht alle Sensoren in den Ergebnissen.



Abbildung 59: Um ein Rohr ( $\varnothing 19\text{mm}$ ) gewickelte Faser

Abbildung 60 zeigt den Rückgang der Signalintensität bei mehreren Wicklungen um unterschiedlich große Radien. Für die Berechnung wurde  $10^4$  für  $c_1$  und 100 für  $c_2$  aus Gloge (1976) herangezogen. Diese Werte gelten allerdings nur für eine Faser mit einer Indexdifferenz von 0.001 und einem  $\lambda$  von  $0.63\mu\text{m}$  (vs.  $1.55\mu\text{m}$  bei si425). Für die Berechnung wurde lediglich eine einfache Gleichung herangezogen um den prinzipiellen Zusammenhang von Signaldämpfung und Radius zu zeigen.

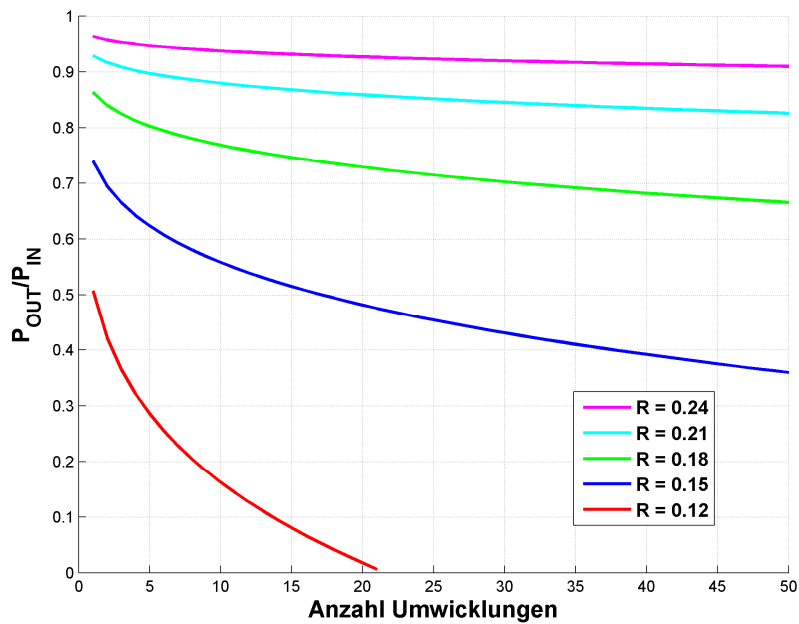


Abbildung 60: Theoretischer Rückgang der Signalintensität bei Wicklungen um unterschiedlich große Radien

Die wesentlichen Informationen zum Aufbau dieses Experiments sind in Tabelle 12 aufgelistet. Beide Sensorboxen befinden sich nach wie vor im Vertikalkomparatorschacht.

**Tabelle 12: Informationen zum Experiment Signaldämpfung**

Information	Versuch 1	Versuch 2
Datum	12.10.2010	19.10.2010
Uhrzeit	10:30	09:00
Dauer, gesamt	6 h	6h
Dauer je Wicklung	1-3 min	1-2 min
si425 ON vor Messbeginn	17 h	17 h
Sensor #	FBGiaB # 1	FBGiaB # 1
Kanal	1	1
Gain	1	1+2
Position	VC <sup>1)</sup>	VC <sup>1)</sup>
Durchmesser Rohr [mm]	25 <sup>2)</sup>	19 <sup>3)</sup>
Aufzeichnungsrate	250Hz	250Hz

<sup>1)</sup> VC... Vertikalkomparator, Bodenschacht

<sup>2)</sup> ...24.7mm (fertigungsbedingt)

<sup>3)</sup> ...19.05mm (fertigungsbedingt)

Es waren zwei Versuche notwendig, da beim ersten Versuch ein zu großer Durchmesser des Alurohres gewählt wurde und sich die Messdauer bei der Einstellung  $Gain = 1$  mit 95 Umwicklungen in die Länge zog. Beim zweiten Versuch wurde ein geringerer Rohrdurchmesser gewählt, um Messungen mit der Einstellung  $Gain = 1$  und  $Gain = 2$  durchführen zu können.

Die Verdrillung der Faser während des Wickelns machte ein entwirren der Faser nach ca. jeder vierten Messungen notwendig. Dazu musste der FC/APC Stecker von der Interrogation Unit gelöst werden und anschließend neu angesteckt werden. Durch diesen Vorgang ist jedoch, wie im Experiment "Faserzentrierung" (siehe Abschnitt 5.2) nachgewiesen, keine Beeinflussung der Messergebnisse zu erwarten.



Um mit dem *Level* in einen Bereich von über 225 zu gelangen, wurde die Einstellung von *Gain* = 1 auf *Gain* = 2 geändert. Da der *Level* für die Sensorbox FBGiaB#1 bei dieser Einstellung über dem Maximalbereich von 250 liegen würde, wurde diese Einstellung erst geändert, als das Signal durch die Wicklungen um das Alurohr abgeschwächt war. So erhöht sich der *Level* beispielhaft für den Sensor ID2 von ca. 40 auf ca. 230 bei 10 Umwicklungen. Gleich bei den ersten Messungen mit der Einstellung *Gain* = 2 konnte das Auftreten eines fälschlicherweise detektierten Sensors, einem sogenannten *ghost*, beobachtet werden (siehe Abbildung 61).

Abbildung 61 zeigt den *Level* bei der Einstellung *Gain* = 2 für die Sensoren der Sensorbox FBGiaB#1 bei 10 Wicklungen. Möchte man mehrere Sensoren in den Levelbereich von über 225 bringen, müsste man die Faser noch weiter vom Alurohr abwickeln, um die Signaldämpfung wieder zu verringern. Dies ist aber mit der vorhandenen Sensorbox nicht möglich, da die beiden Sensoren ID2 und ID3 dabei über das Levelmaximum von 250 geraten würden. Daher wurde dies bei diesem Experiment nicht durchgeführt.

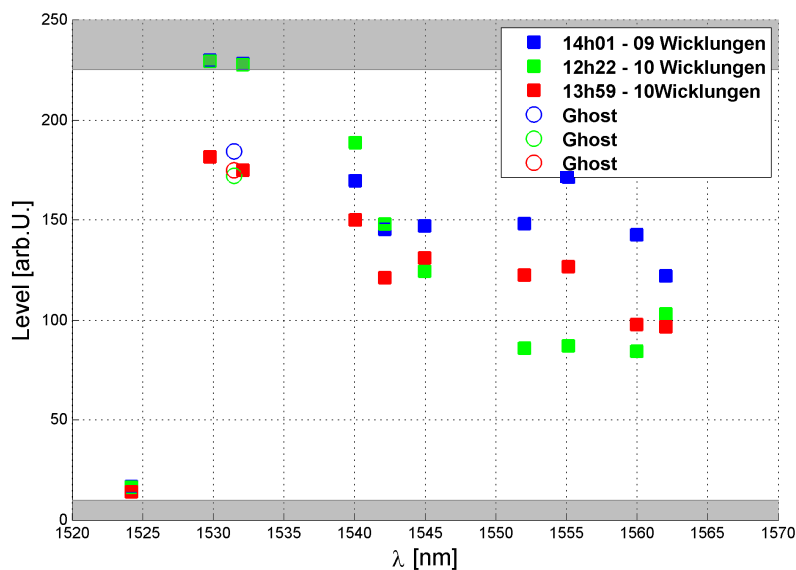


Abbildung 61: *Level* bei *Gain* = 2 für die Sensoren der FBGiaB#1 mit auftretenden *ghost* Sensoren

### 5.4.3 Analyse der Levelabnahme pro Wicklung

Der Hersteller Micron Optics gibt an, dass der *Level* eine lineare Skala besitzt (siehe Micron Optics, 2004, S.12: "*The y-axis is a unitless linear measure*"). Diese Aussage kann anhand der hier durchgeführten Wickelversuche überprüft werden.

In Abbildung 62 ist die Levelabnahme pro Wicklung um das Alurohr dargestellt. Zu beachten ist die logarithmische Skala des *Levels*. Alle Wickelversuche zeigen eine logarithmische Abnahme des *Levels* mit steigender Zahl der Wicklungen. Dies belegt, dass der *Level* keine lineare Skala besitzt.

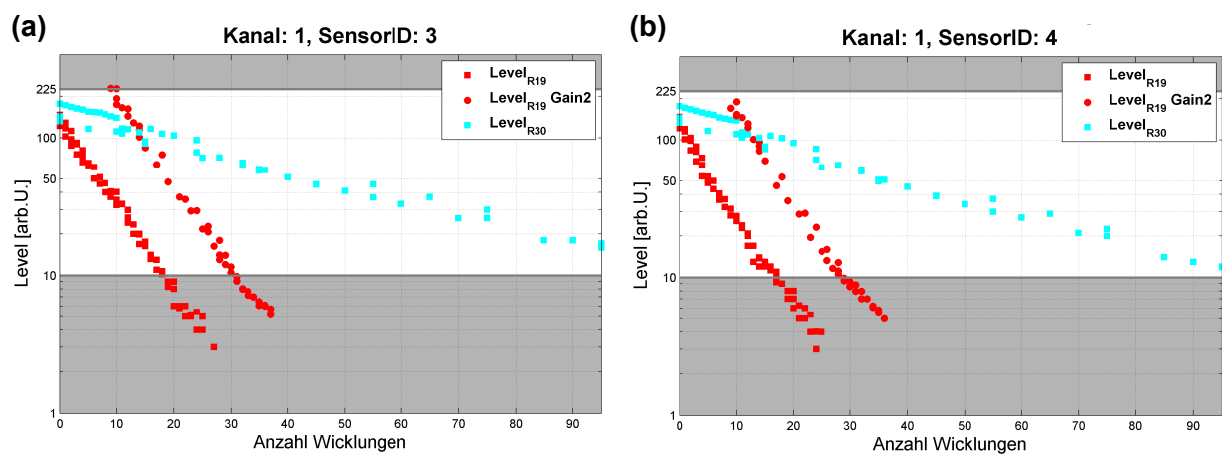


Abbildung 62: Levelabnahme pro Umwicklung

#### 5.4.4 Analyse der Braggwellenlänge in Abhängigkeit des Levels

Aus den Rohdaten der einzelnen Wicklungen (ca. 60s Messung pro Wicklung) wurden zunächst, wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben, 1s Mittelwertdaten generiert. Die Braggwellenlänge pro Wickelversuch wurde wie bei den vorherigen beiden Experimenten als Median bestimmt.

Die Temperatur im Schacht an beiden Messtagen (die zweite Messung erfolgte eine Woche später) unterschied sich um  $0.25^{\circ}\text{C}$ , was ein  $\Delta\lambda$  von ca. 3.2pm verursacht, siehe z.B. (4-2). Es liegt aber lediglich für einen Sensor der Koeffizient  $d\lambda/dt$  vor, weshalb eine Temperaturkompensation aller Sensoren nicht möglich ist. Um die Daten beider Tage gemeinsam vergleichen zu können, wurden diese daher um den Median (1 Wert pro Sensor und Tag) reduziert. Da die detektierte Braggwellenlänge eine Abhängigkeit vom *Level* zeigte, wurde der Median für die Sensoren lediglich aus Daten berechnet, die im Bereich von  $\pm 20$  des Startlevels lagen und die Einstellung *Gain* = 1 aufweisen. Dieser Bereich leitet sich aus Erfahrungen ab, die beim Experiment "Faserzentrierung" (siehe z.B. Abbildung 47) gemacht wurden. Bei diesem Experiment trat ein maximaler Levelunterschied von 40 auf. Es lieferte dennoch Messwerte, die im Bereich von  $\pm 3 \cdot \sigma_{\text{ID Dauer}}$  liegen.

Abbildung 63 zeigt exemplarisch die um den Median reduzierten Daten des Sensors ID3 (12.10.2010  $\lambda_{\text{Med}}=1532.0772$  und 19.10.2010  $\lambda_{\text{Med}}=1532.0742$ ) der beiden Tage. Eine Sammlung der Resultate aller Sensoren ist im Anhang B.5 zu finden.

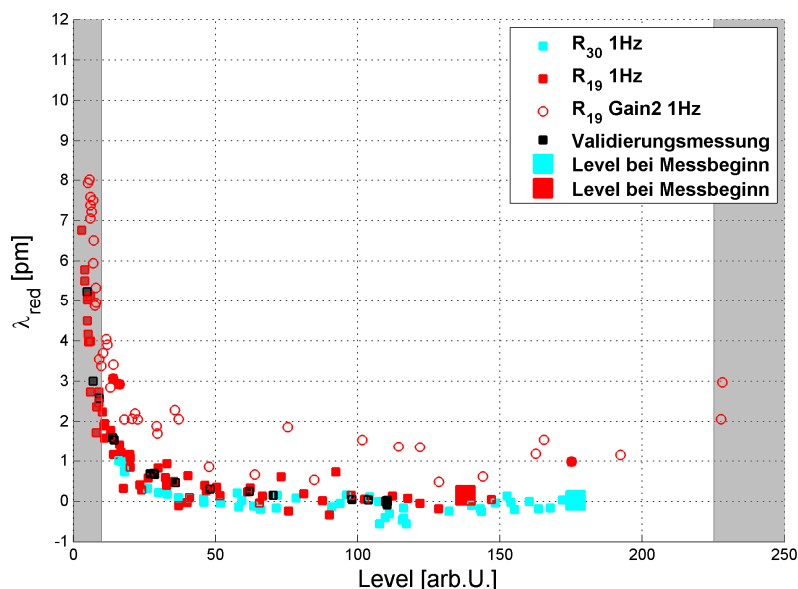


Abbildung 63: Wellenlängen in Abhängigkeit vom *Level*, bei den Rohdurchmessern 19mm ( $R_{19}$ ) und 30mm ( $R_{30}$ ) für den Sensor ID3

In Abbildung 63 ist ein Anstieg der detektierten Braggwellenlänge um bis zu +8pm bei einem niedrigen *Level* zu erkennen. Ebenfalls zu erkennen ist, dass die Messwerte bei der

Einstellung  $Gain = 2$  stärker ( $\pm 1\text{pm}$ ) streuen und einen Offset von ca.  $1\text{pm}$  gegenüber den  $Gain = 1$  Daten aufweisen.

In der Folge werden die Ergebnisse aller Sensoren der FBGiaB#1 besprochen. Der minimal messbare  $Level$  betrug 2. Interessant ist auch die Tatsache, dass sich die Sensoren je nach Hersteller unterschiedlich verhalten. So zeigen etwa die Sensoren des Herstellers Welltech mit den IDs 2, 6 und 9 ein ähnliches, von den anderen Sensoren abweichendes Verhalten (siehe Abbildung 64 und Abbildung 65). Diese drei Sensoren haben eine Gitterlänge von  $5\text{mm}$  und eine Acrylat Beschichtung. Die Welltech Sensoren beginnen bei sinkendem  $Level$  sehr stark zu streuen und haben bei einem  $Level$  unter 10 mit  $20\text{pm}$  (siehe Abbildung 64) eine deutlich größere Abweichung der Messwerte, als die übrigen Sensoren (max.  $12\text{pm}$  in Abbildung 65) der FBGiaB#1, deren Hersteller FBGS und Avensis sind. Diese sind mit einer Polymide Beschichtung ausgestattet (Welltech: Acrylat) und besitzen teils unterschiedliche oder nicht bekannte Gitterlängen.

Einzige Ausnahme bildet Sensor ID1, der mit einer Ormocer Beschichtung versehen ist. Da dieser lediglich einen  $Level$  zwischen 3 und 17 aufweist, kann hier keine eindeutige Aussage über dessen Verhalten getroffen werden. Um Sensoren mit einer Ormocer Beschichtung zu untersuchen, ist ein gesondertes Experiment mit dafür geeigneten Sensoren (größeren Gitterlängen) notwendig. Die Sensoren der FBGiaB#2 besitzen alle eine Ormocer Beschichtung, allerdings liegt der maximale  $Level$  bei  $Gain = 1$  lediglich bei 70 und daher sind sie für ein solches Experiment ungeeignet.

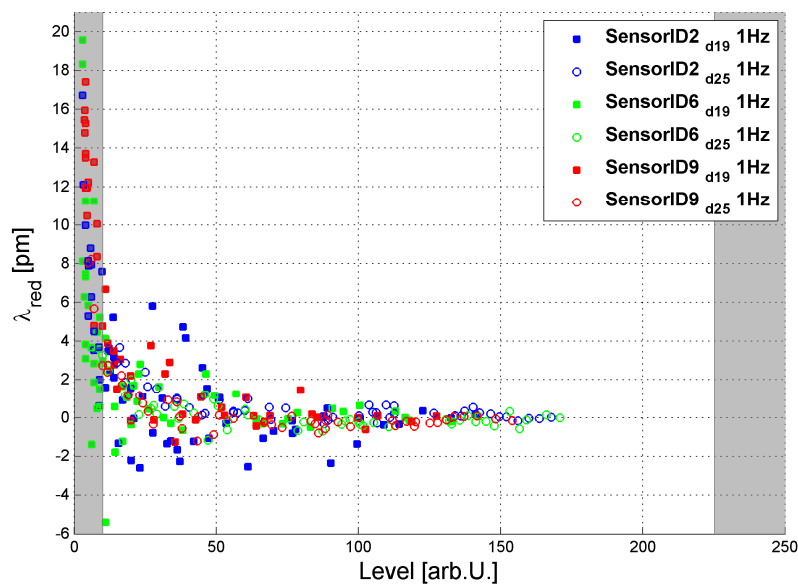
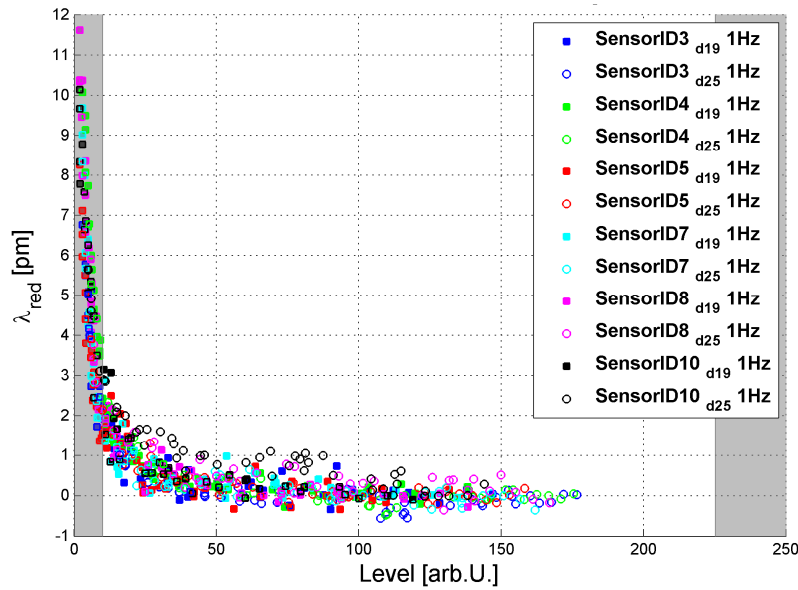


Abbildung 64: Wellenlängenabhängigkeit der Sensoren des Herstellers Welltech ( $5\text{mm}$  Länge, Acrylat Beschichtung,  $Gain = 1$ ) vom  $Level$  (Rohrdurchmesser  $\varnothing 19$  und  $25\text{mm}$ )



**Abbildung 65: Wellenlängenabhängigkeit der Sensoren der Hersteller FBGS und Avensis (*Gain* = 1) vom *Level* (Rohrdurchmesser Ø 19 und 25mm)**

Aus Abbildung 64 und Abbildung 65 geht hervor, dass die Messwerte für einen kleinen *Level* nicht ohne weiteres mit jenen bei einem hohen *Level* vergleichbar sind.

Da die Sensoren der Hersteller FBGS und Avensis das gleiche Verhalten zeigen und die Messwerte in einem schmalen Band liegen, wird versucht, für diese Werte eine Funktion zu modellieren. Da unter einem *Level* von 50 ein leichter und unter einem *Level* von 20 ein starker Anstieg der detektierten Wellenlänge beobachtet wird, werden die  $\Delta\lambda$  mit

$$\lambda = a * e^{(b*Level)} + c * e^{(d*Level)} \tag{5-6}$$

modelliert. Die Schätzung nach kleinsten Quadraten lieferte für die Variablen (a, b, c, d) die in Tabelle 13 angeführten Werte.

**Tabelle 13: Geschätzte Parameter der angeglichenen Funktion (5-6) mit Standardabweichungen**

Variable	Werte	$\sigma$
a	1.7	0.3
b	-0.032	0.005
c	13.9	0.4
d	-0.25	0.01

Die geschätzte Funktion (5-6) ist in Abbildung 66 dargestellt, wobei für die in Abbildung 65 gezeigten Werte nun ein einheitliches Symbol (blaue Punkte) verwendet wurde. Ebenfalls eingezeichnet wurden die Ergebnisse einer später zur Verifizierung der hier erzielten Ergebnisse durchgeführten Validierungsmessung (grüne Punkte, siehe Abschnitt 5.4.5).

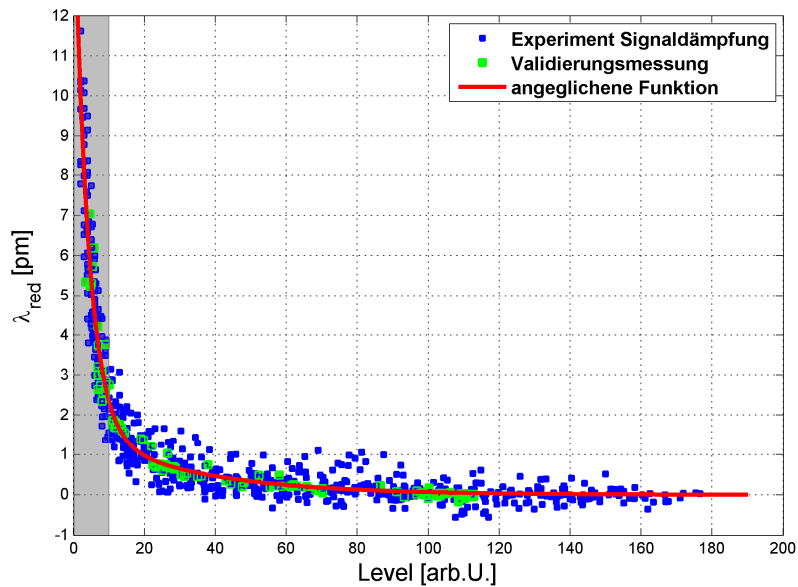


Abbildung 66: Messwerte mit geschätzter Funktion

Die Restabweichungen werden später in Abbildung 68 gezeigt.

### 5.4.5 Evaluierung der Braggwellenlängenänderung aufgrund des *Levels*

Um sicherzustellen, dass das Verhalten der Messwerte nicht durch das Wickeln verursacht wurde, wurde eine Validierungsmessung durchgeführt. Dabei wurde der *Level* mit einem *Mode Scrambler* (siehe Abbildung 67a) und nicht durch Wickeln der Faser gesenkt. Beim *Mode Scrambler* wird die Faser zwischen zwei gewellte Oberflächen gedrückt (siehe Abbildung 67b), was eine Mikrokrümmung der Faser verursacht. Durch Variation des Abstands der beiden Oberflächen kann der Energieverlust (siehe rotes Licht des *Fault Locators* in Abbildung 67b) und damit der *Level* geregelt werden.

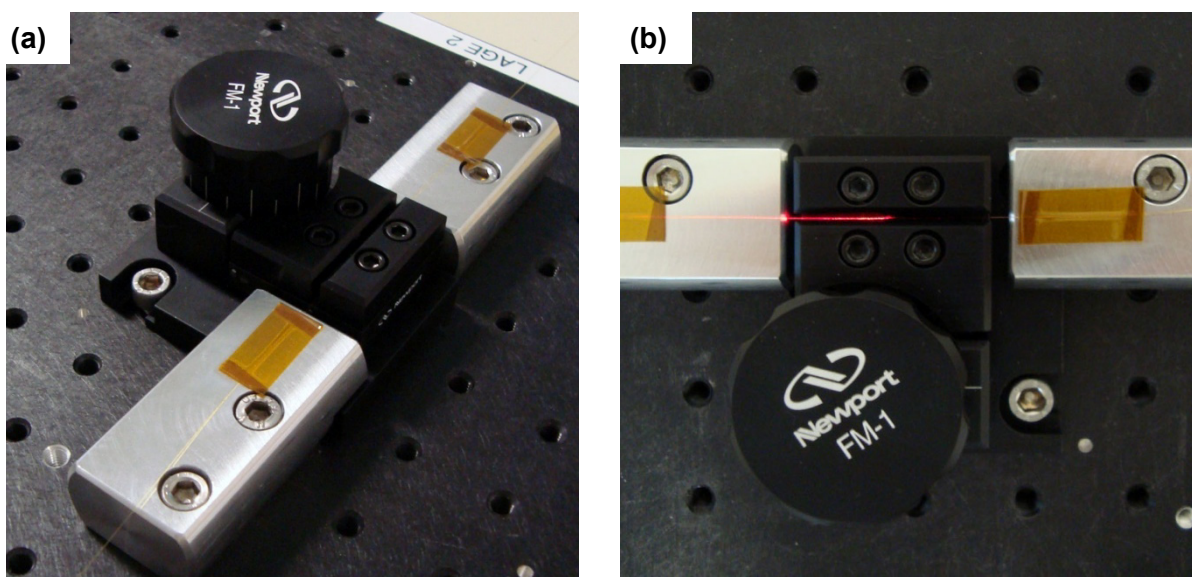


Abbildung 67: (a) Beim Validierungsexperiment verwendeter *Mode Scrambler*, (b) Signalverlust in der Faser beim *Mode Scrambler* (austretendes rotes Licht, visualisiert mithilfe eines *Fault Locators*)

Diese Validierungsmessung zeigte das gleiche Verhalten der Messwerte wie bei dem Experiment "Signaldämpfung" (siehe Abbildung 66). Somit ist das Verhalten der si425 ( $\Delta\lambda$  in Abhängigkeit des *Levels*) bestätigt worden und die geschätzte Funktion kann zur Korrektur der Messwerte herangezogen werden. Die Restabweichungen nach der Korrektur sind in Abbildung 68 zu sehen.

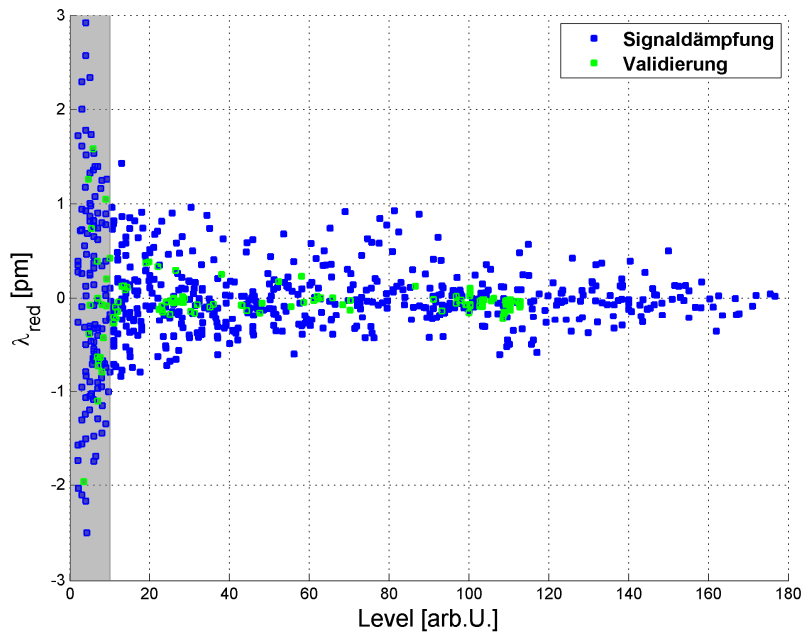


Abbildung 68: Verbesserungen zur geschätzten Funktion

Die Ergebnisse für einen *Level* von über 10 (entspricht in etwa der vom Hersteller angegebenen Untergrenze siehe Abschnitt 2.4.1) befinden sich in einem Bereich von  $\pm 1$ pm. Die Standardabweichung der Daten (wohlgemerkt über alle Sensoren der Hersteller FBGS und Avensis) über dem Grenzlevel von 10 beträgt 0.34pm. Messwerte mit einem *Level* von unter 10 weisen eine größere Streuung auf und sollten auch deshalb eher mit Vorsicht verwendet werden.

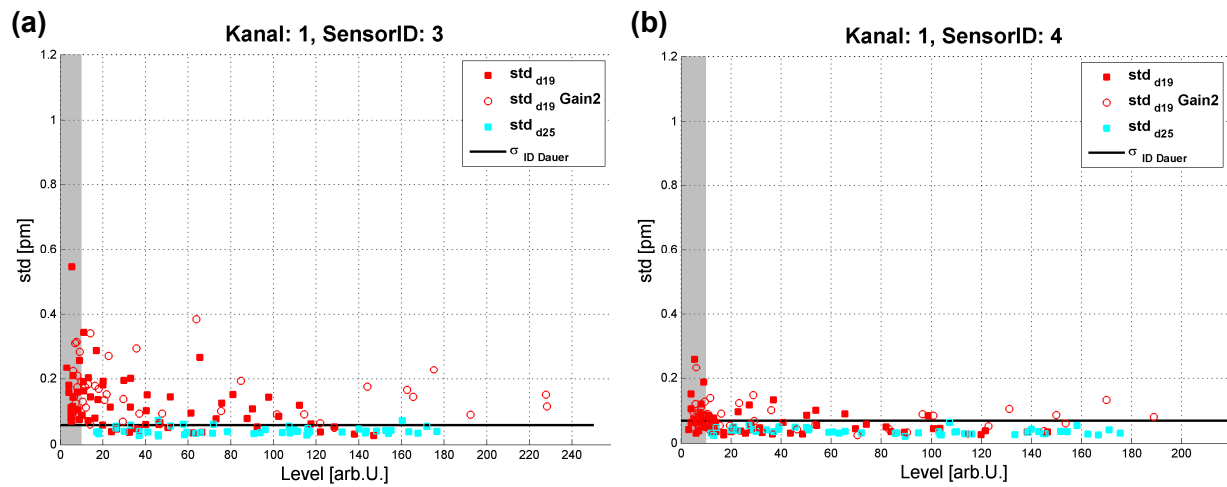
#### 5.4.6 Standardabweichung in Abhängigkeit des *Levels*

Für die Analyse der Standardabweichung wurde für jeden Wickelversuch eine Standardabweichung der 1s Mittelwertdaten berechnet. Die Berechnung der Standardabweichung erfolgte nach einer Ausreißereliminierung mittels Median Absolute Deviation (Hartung, 1999, S.865), wobei anzumerken ist, dass es üblicherweise kaum Ausreißer in den Daten gab: Bei den Sensoren des Herstellers Welltech mussten in einzelnen Datensätzen aber zwischen 10 und 20 (von ca. 120) Daten eliminiert werden. Im Durchschnitt allerdings wurde lediglich eine Braggwellenlänge als Ausreißer eliminiert.

In Abbildung 69 sind beispielhaft die Standardabweichungen von zwei Sensoren der Hersteller Avensis und FBGS dargestellt. Auffällig ist, dass die Standardabweichung beim Wickelversuch mit dem kleineren Durchmesser meist höher ist als die beim größeren Durchmesser erzielte. Ebenfalls zu beobachten ist eine Zunahme der Standardabweichung für einen geringen *Level* beim Wickelversuch mit 19mm Durchmesser.

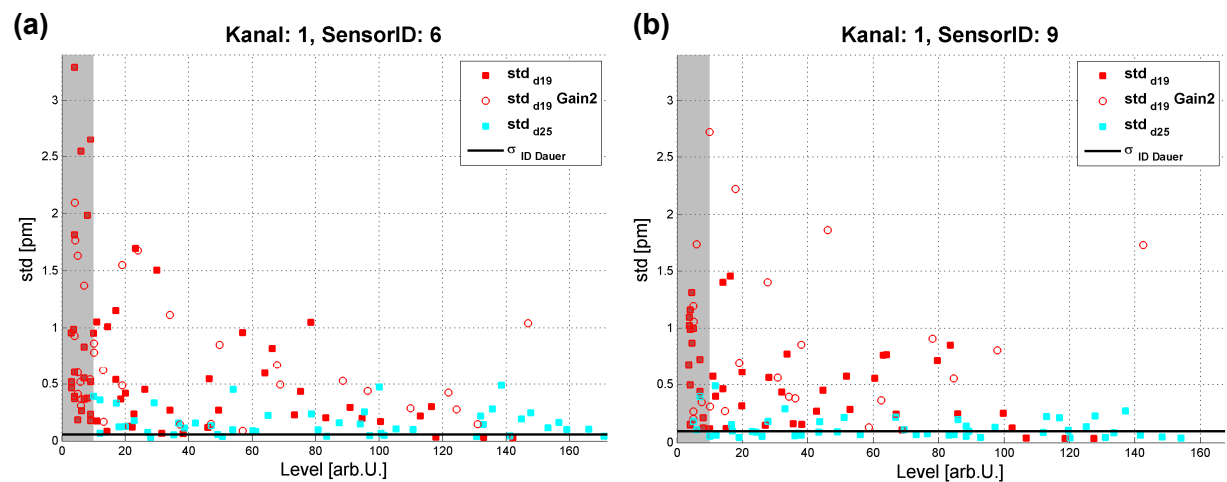


Auch zeigen die Messungen mit der Einstellung  $Gain = 2$ , wie vermutet wurde, eine oftmals deutlich höhere Standardabweichung.



**Abbildung 69: Standardabweichung zweier Sensoren der Hersteller Avensis (a) und FBGS (b) in Abhängigkeit des Levels**

Wieder zeigen die Sensoren mit einer Gitterlänge von 5mm des Herstellers Welltech ein den anderen Sensoren abweichendes Verhalten (siehe Abbildung 70). Die Maximalwerte liegen mit 3.4pm um das 3fache höher als bei den Sensoren der beiden anderen Hersteller (siehe Abbildung 69). Bei diesen Sensoren liegen die Werte der Standardabweichung auch deutlich über der aus der Dauermessung abgeleiteten Größe  $\sigma_{ID\text{ Dauer}}$ .



**Abbildung 70: Standardabweichung zweier Sensoren des Herstellers Welltech (a und b) in Abhängigkeit des Levels**

Die gesamten Ergebnisse dieses Experiments sind im Anhang B.5 zu finden.

### 5.4.7 Resultate

Bei diesem Experiment konnte folgendes nachgewiesen werden:

- Der *Level* besitzt entgegen der Herstellerangabe, keine lineare Skala, sondern eine logarithmische Skala.
- Im Levelbereich von unter 10 kann es zu großen Verfälschungen der Braggwellenlängendetektion kommen (siehe Abbildung 63), wobei für die Sensoren des Herstellers Welltech bis zu +20pm festgestellt wurden (siehe Abbildung 64). Für die Sensoren der Hersteller Avensis und FBGS betragen die Abweichungen maximal +12pm (siehe Abbildung 65).
- Für die Sensoren der beiden Hersteller Avensis und FBGS ist eine Korrektur durch eine, an die Daten angeglichene, Funktion (Gleichung 5-6, Tabelle 13) möglich. Nach Abzug dieser Funktion ergeben sich Restabweichungen von unter einem Pikometer bei einem *Level* von über 10 (siehe Abbildung 66 bzw. Abbildung 68). Die Standardabweichung über alle Sensoren, nach Abzug der geschätzten Funktion und über dem Grenzlevel von 10, beträgt 0.34pm (für 1s Mittelwertdaten).
- Wird die Faser über einen kleineren Radius gekrümmt, ergeben sich größere Standardabweichungen. Ebenso ergibt sich eine größer Standardabweichung mit der Einstellung *Gain* = 2 (siehe Abbildung 69 und Abbildung 70).
- Die Sensoren des Herstellers Welltech weisen deutlich höhere Standardabweichungen auf als die Sensoren der Hersteller Avensis und FBGS (siehe Abbildung 69 und Abbildung 70).

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Masterarbeit war es, anhand von Prototypentests Informationen für eine effiziente Nutzung der Interrogation Unit si425 in der Praxis abzuleiten.

Ein detailliertes Verständnis über die Funktionsweise sowie über die verbauten Komponenten ist für die Durchführung von Prototypentests unerlässlich. Daher wurden diese beiden Punkte zu Beginn der Arbeit ausgearbeitet.

Im praktischen Teil der Arbeit wurden geeignete Referenzsensoren für die Experimente ausgewählt bzw. deren Eignung als stabile Referenz untersucht. Wegen der Auflösung (1pm) der Rohdaten und deren geringen Spannweite, war es nötig, die Daten vor einer Auswertung zu reduzieren, um auftretende Effekte besser erkennen zu können. Diese Reduktion wurde anhand von 1s Mittelwerten durchgeführt, da vom Hersteller für 1s Daten eine Genauigkeitsangabe vorhanden ist. Der Hersteller gibt für die *repeatability* bei Mittelbildung von 250 Daten einen Wert von 0.05pm an (Auflösung = 1pm!). Durch die Bildung von 1s Mittelwerten konnten Messwerte generiert werden, die sich im sub-Auflösungsbereich der si425 befinden. Die tatsächlich erreichte Präzision der Einheit wird im Experiment Dauermessung beschrieben.

Bei allen durchgeführten Experimenten konnte eine sehr geringe Spannweite der Daten beobachtet werden. Die größte aufgetretene Spannweite beträgt lediglich 2pm bei der 24h Messung. Daher erwies sich eine geeignete Auswertung und Interpretation der Ergebnisse als herausfordernd.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst, die für die Interrogation Unit si425 mit der *Release* 1.19 Gültigkeit haben.

### Dauermessung (24h)

- Die Interrogation Unit weist keine linearen Driften auf. Für die unterschiedlichen Sensoren ergaben sich unterschiedliche Drifteffekte von ca. -1pm/d bis ca. +0.6pm/d. Alle signifikanten Driften sind kleiner als die durch mögliche Restabweichungen der Temperatur auf die Sensoren wirkende, ableitbare Beeinflussung (ca. 1pm/d).
- Es konnte für einige der Sensoren ein Messsystem 1.Ordnung modelliert werden. Für diese Sensoren wurde ein maximaler Wert für  $t_{0,99}$  von ca. 16 Stunden abgeleitet. Dieser Wert liegt deutlich über der vom Hersteller angegebenen Aufwärmzeit von 5 Minuten. Für präzise Messungen (von unter 1pm) sollte daher eine lange Aufwärmzeit berücksichtigt werden.
- Es kommt bei den detektierten Braggwellenlängen zu Sprüngen in den Daten. Es konnten jedoch keine Systematiken in der Auftretzeit der Datensprünge gefunden werden.
- Die vorhandenen Datensprünge (max. 0.5pm) limitieren auch die erreichbare Präzision der Einheit. Aus den Datensprüngen wurde daher für die Analyse der Experimente für jeden Sensor eine Standardabweichung der 1s Mittelwerte abgeleitet ( $0.04 < \sigma_{ID, \text{Dauer}} < 0.15\text{pm}$ ). Auch diese Werte sind für den Großteil der Sensoren größer als die vom Hersteller angegebene *repeatability* von 0.05pm bei Mittelung von 250 Rohdatenwerten.

### Faserzentrierung:

- Das Anstecken der Faser an die Interrogation Unit hat keine Auswirkungen auf die erzielten Ergebnisse.
- Der Zentrierfehler, der durch loses (eine volle Umdrehung der Arretierschraube) und festes Anstecken der faseroptischen Stecker entsteht, ist bei allen Kanälen kleiner als 0.3pm, sofern der *Level* über 10 ist.
- Nach dem Reinigen der Faser und der Kanäle kam es bei einigen Sensoren zu Wellenlängenänderungen von bis zu 0.7pm. Eine befürchtete Verdrehung der Kanäle durch das Reinigen konnte in einem Folgeexperiment ("Faserzentrierung II") ausgeschlossen werden. Die Ursache für die Änderungen konnte nicht geklärt werden. Vermutet wird ein Einfluss des eventuell nicht ganz verdampften Alkohols, der beim Reinigen eingesetzt wird.
- Auch größere Verdrehungen als mit dem Standardequipment (FC/APC Stecker) je möglich wären haben keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

**Signaldämpfung:**

- Der *Level* besitzt entgegen der Herstellerangabe keine lineare Skala, sondern eine logarithmische Skala.
- Im Levelbereich von unter 10 kann es zu starken Änderungen in der Braggwellenlängendetektion kommen. Für Sensoren des Herstellers Welltech wurden Abweichungen von bis zu +20pm festgestellt. Für Sensoren der Hersteller Avensis und FBGS betragen die Abweichungen immerhin noch bis zu maximal +12pm.
- Unter einem *Level* von 2 waren keine Messungen mehr möglich.
- Für die Sensoren der beiden Hersteller Avensis und FBGS ist eine Korrektur durch eine, an die Daten angegliche, Funktion möglich. Nach Abzug dieser Funktion ergeben sich Restabweichungen für einen *Level* von über 10 von unter einem Pikometer. Die Standardabweichung über alle Sensoren, nach Abzug der geschätzten Funktion und über dem Grenzlevel von 10, beträgt 0.34pm.
- Die Braggwellenlängenänderung aufgrund des *Levels* konnte anhand einer Validierungsmessung mit einem *Mode Scrambler* verifiziert werden. Auch hier ergaben sich beim Absinken des *Levels* dieselben Wellenlängenänderungen.
- Die detektierten Braggwellenlängen weisen bei der Einstellung *Gain* = 2 ein größeres Rauschen auf.
- Es ergeben sich größere Standardabweichungen wenn die Faser über einen kleineren Radius gekrümmt wird.
- Die Sensoren des Herstellers Welltech weisen teils deutlich höhere Standardabweichungen (bis zu 3pm) auf als die Sensoren der Hersteller Avensis und FBGS (maximal 1pm).

### Empfehlungen für den Feldeinsatz

Für praktische Messungen der Interrogation Unit ergibt sich aus den hier erzielten Ergebnissen, dass

- ein Absinken des *Levels* möglichst vermieden werden soll. Die Herstellerangabe, keine Messungen unter einem *Level* von 10 durchzuführen (ohne genaue Grundangabe des Herstellers), kann bestätigt werden.
- die Messungen mit der Einstellungsmöglichkeit *Gain* = 1 bzw. *Gain* = 2 nicht direkt miteinander verglichen werden sollten. Es konnten Abweichungen bis zu 12.8pm zwischen diesen Einstellungen beobachtet werden.
- die Interrogation Unit nach einer Aufwärmzeit von ca. 16 Stunden Ergebnisse liefert, die im Bereich der Datensprünge liegen.
- Abweichungen durch ein verschmutztes *Patchcord* entstehen könnten. Daher sollte eine Verschmutzung der faseroptischen Stecker in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden.

### Mögliche Folgeuntersuchungen

Als Folgeuntersuchungen für diese Arbeit können folgende Punkte vorgeschlagen werden:

- Durchführen einer wesentlich längeren Dauermessung als 24h. Dadurch erhofft man sich bessere Aufschlüsse über das Driftverhalten der Interrogation Unit, da der Einfluss eines möglichen Tagesgangs der Temperatur in den Daten erkennbar sein sollte. Anhand der längeren Messdauer sollte es auch möglich sein, ein besseres Aufwärmverhalten der Sensoren modellieren zu können. Zudem kann das Verhalten der Datensprünge über einen wesentlich längeren Zeitraum analysiert werden.
- Eine weiterführende Untersuchung könnte die Untersuchung der Messwerte über den gesamten Temperaturbereich sein. Zwar wurden solche Untersuchungen schon vom Hersteller durchgeführt, jedoch sollten diese Angaben für praktische Aufgaben kontrolliert werden.
- Bei der Faserzentrierung wurde ein Einfluss des Reinigungsalkohols auf die Messergebnisse vermutet.
- Untersuchungen des Verhaltens der Interrogation Unit bei einem hohen *Level* von über 225 konnten in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden, da dazu mehrere Sensoren mit einem ähnlichen Startlevel erforderlich sind, um genügend Messwerte in diesem Bereich zu generieren.
- Ableiten der Temperaturkennlinie aller untersuchten Sensoren, um die Messergebnisse aller Experimente miteinander vergleichbar zu machen.

**Literaturverzeichnis**

**Bao, Y., D. Daugherty, K. Hsu, T. Li, C. Miller, J. Miller (2001)** *Fabry Perot/Fiber Bragg Grating multi-wavelength reference*. United States Patent 6,327,036 USA, 4. Dezember 2001.

**Bao, Y., D. Daugherty, K. Hsu, T. Li, C. Miller, J. Miller (2002)** *Calibrated swept-wavelength laser and interrogator system for testing wavelength-division multiplexing systems*. United States Patent 6,449,047 B1 USA, 10. September 2002.

**DeCusatis, C. und C. Sher DeCusatis (2006)** *Fiber Optic Essentials*. Academic Press, Oxford, 284 Seiten.

**Gloge, D. (1976)** *Optical Fiber Technology*. IEEE Press, New York, 429 Seiten.

**Graver, T., D. Inaudi, J. Doornink (2004)** *Growing Market Acceptance for Fiber-Optic Solutions in Civil Structures*. [online, eingesehen Jänner 2011], <http://micronoptics.com/uploads/library/documents/growingmarket.pdf>.

**Haber, T., J. Mock, V. Jerry, (2009)** *Method and apparatus for multiple scan rate swept wavelength laser-based optical sensor interrogation systems with optical path length measurement capability*. United States Patent 7,573,021 B2 USA, 11. August 2009.

**Hartung, J. (1999)** *Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. Oldenbourg Verlag, München, 1002 Seiten.

**Heim, M. (2010)** *Untersuchungen des faseroptischen Messsystems "SOFO Dynamic"*. Unpublizierte Masterarbeit Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme TU Graz, 104 Seiten.

**Hui, R., M. O'Sullivan (2009)** *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier Academic Press, Burlington USA, 657 Seiten.

**Kashyap, R. (1999)** *Fiber Bragg Gratings*. Elsevier Academic Press, San Diego, 478 Seiten.

**Kreuzer, M. (2007)** *Dehnungsmessung mit Faser Bragg Gitter Sensoren*. HBM Darmstadt, [online, eingesehen Jänner 2011], [http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/techarticles/2007/FBGS\\_StrainMeasurement\\_de.pdf](http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/techarticles/2007/FBGS_StrainMeasurement_de.pdf).

**Micron Optics (2003)** *Environmental Simulation & Electrical Testing Report of Compliance for the si425 Swept Laser Interrogator*. Technical Manual, Micron Optic, Atlanta, 129 Seiten.

**Micron Optics (2004)** *si425 Optical Sensing Interrogator Instruction Manual*. Micron Optics, Atlanta, 79 Seiten.

**Micron Optics (2009)** *Fiber Fabry-Perot Tunable Filter Technical Reference*. [Online, eingesehen Jänner 2011], [http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/TF2\\_Technical\\_Reference.pdf](http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/TF2_Technical_Reference.pdf).

**Micron Optics (2011A)** *Fiber Fabry-Perot Interferometer*. Datenblatt Fiber Fabry Perot Interferometer. [Online, eingesehen Jänner 2011], <http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/Datasheets/Micron Optics FFP-I.pdf>.

**Micron Optics (2011B)** *Produktblatt: Optical Sensing Interrogator si425*. [Online, eingesehen Jänner 2011], <http://www.micronoptics.com.cn/en/pdfs/si425.pdf>.

**Miller, C., J. Miller, K. Hsu, Y. Bao, T. Li (1998)** *Reference system for optical devices including optical scanners and spectrum analysers*. United States Patent 5,838,437 USA, 17. November 1998.

**Niemeier, W. (2008)** *Ausgleichsrechnung*. de Gruyter Verlag, Berlin 2008, 508 Seiten.

**Oppenheimer, A. V., R. W. Schaefer (1999)** *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall, New Jersey, 895 Seiten.

**Peters, K. (2009)** *Fiber Bragg Grating Sensors*. In *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, Volume 3., Chapter 61. John Wiley & Sons Ltd, Seite 1097-1111.

**Presl, R. (2010)** *Fertigung von FBG-Ketten in Schutzboxen; FBG IN A BOX*. Unpublizierter technischer Bericht (IGMS\_2010\_06), Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, 8 Seiten.



**Profos, P., T. Pfeifer (1994)** *Handbuch der industriellen Messtechnik*. Oldenbourg Verlag, München, 1202 Seiten.

**Woschitz, H, F. K. Brunner (2003)** *Development of a Vertical Comparator for System Calibration of Digital Levels*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 91: 68-76.

**Woschitz, H (2009)** *Kalibrierung der für RASP\_218 bis RASP\_232 gefertigten FOS-t° Sensoren*. Unpublizierter technischer Bericht (RASP-2009/06), Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz.

**Woschitz, H. (2010A)** *Entwicklung eines Rail-Strain-Pads unter Verwendung von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren*. In Wunderlich T (Hrsg.) Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München 2010, Wichmann Verlag, Seite 171-182.

**Woschitz, H. (2010B)** *Faseroptische Sensoren*. Tutorium im Rahmen des 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München, Handout, 114Seiten.

**Z. Zhou, T. W. Grawer, L. Hsu, J. Ou (2003)** *Techniques of Advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges*. In Pacific Science Review, vol. 5, Seite 116-121.

## Anhang A: Grundlagen

In Anhang A werden die wesentlichen Grundlagen zum Messen mit Faser Bragg Gitter Sensoren behandelt. Es wird das Konzept der FBG Sensoren erläutert, was zum besseren Verständnis der Arbeit beitragen soll, sofern Faseroptik Grundkenntnisse nicht vorhanden sind. Ebenfalls werden einige Auswerteverfahren der Sensoren angeführt.

### A.1 Prinzipieller Aufbau einer Glasfaser

In der Faseroptischen Sensorik bilden Glasfaserkabel als Lichtwellenleiter die Grundlage der Signalübertragung. Sie bestehen aus einem Kern (*Core*), der von einem Fasermantel (*Cladding*) umgeben wird und einer Beschichtung (*Coating*) zum Schutz (siehe Abbildung A-1a).



Abbildung A-1: (a) Schematischer Aufbau eines Lichtwellenleiters, (b) Brechungsindexverlauf

Der Kern hat, wie in Abbildung A-1b ersichtlich einen höheren Brechungsindex als der Mantel. So kann sich eingekoppeltes Licht durch Totalreflexion im Faserkern ausbreiten. Die Abweichungen im Brechungsindex liegen dabei üblicherweise zwischen 0,002 und 0,008 (DeCusartis & Sher DeCusartis, 2006, S.5).

FBG Sensoren sind standardmäßig in Singlemode Fasern mit einem Kerndurchmesser von  $9\mu\text{m}$  ausgeführt. Manche Spezialsensoren weisen abweichende Kerndurchmesser von

z.B. 4µm auf. Typische Durchmesser für Kern, Mantel und Beschichtung sind in Tabelle A-1 aufgelistet.

**Tabelle A-1: Typische Durchmesser Glasfasern (DeCusartis & Sher DeCusartis, 2006)**

	Durchmesser [µm]
Kern	4 – 62,5
Mantel	125

Die Beschichtung kann, je nach Anwendung aus verschiedensten Materialien bestehen. Drei am IGMS häufig verwendete Beschichtungen und deren Eigenschaften sind in Tabelle A-2 angeführt.

**Tabelle A-2: Eigenschaften von Standardbeschichtungen (Woschitz, 2010B)**

Beschichtung	Durchmesser [µm]	Temperaturbereich [°C]
Acrylat	250	-40 bis +100
Polymide	155	-40 bis +250
Ormocer <sup>1)</sup>	195	-180 bis +200

<sup>1)</sup>...ORganic MOdulated CERamic

## A.2 Prinzip der FBG Sensoren

FBG Sensoren werden durch eine periodische Änderung des Kernbrechungsindex mit einer Gitterperiode von  $\Lambda_B$  realisiert (siehe Abschnitt A.3).

In Abbildung A-2 ist das Prinzip von FBGs schematisch abgebildet. Es wird breitbandiges Licht von einer Quelle emittiert und über die Faser übertragen. Das Licht durchläuft dann einen Koppler und Anteile des eingekoppelten Spektrums werden am FBG reflektiert. Dieser reflektierte Anteil besitzt die Wellenlänge  $\lambda_B$ :

$$\lambda_B = 2 * n_B * \Lambda_B$$

(A-1)

Wobei hier  $n_B$  den effektiven Brechungsindex und  $\Lambda_B$  die Gitterperiode darstellt. Die übrigen Anteile des Lichts passieren das Gitter und werden eventuell noch von weiteren FBGs mit einer anderen Gitterperioden reflektiert. Die reflektierten Anteile gelangen wiederum zum Koppler und dann zu einer Auswerteeinheit, die die Wellenlänge der zurückgestrahlten Anteile bestimmt (siehe z.B. Abschnitt 2.1.7).

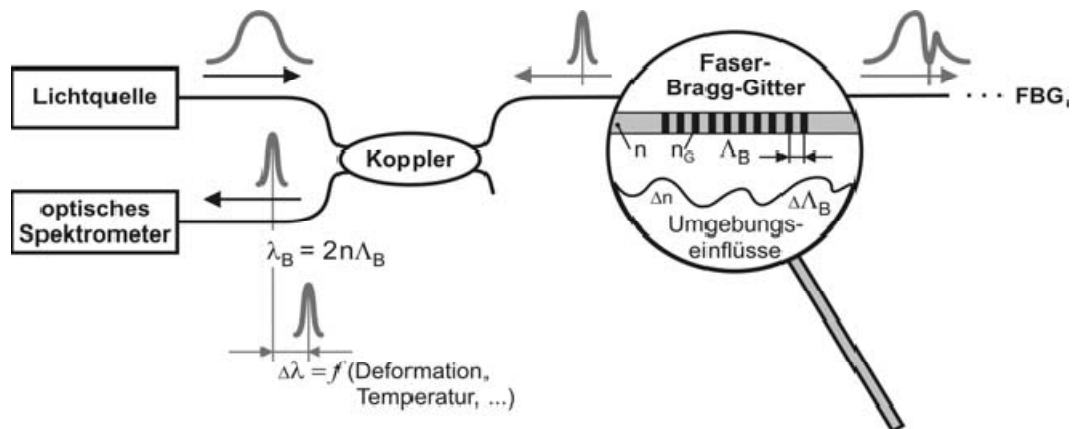


Abbildung A-2: Grundschemata der Funktionsweise von Faser Bragg Gittern (Woschitz, 2010A)

Bei Änderungen infolge von Verformungen oder Temperatur ändert sich auch die Braggwellenlänge und somit die Wellenlänge (siehe A-2, Kreuzer, 2007) des rückreflektierten Signals.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k * (\varepsilon_m + \varepsilon_T) + \alpha_\delta * \Delta T \quad (A-2)$$

$\Delta\lambda$  gibt die Änderung der Wellenlänge,  $\lambda_0$  die Grundwellenlänge zu Beginn der Prüfung,  $k$  den  $k$ -Faktor ( $k=0,78$ ),  $\varepsilon_m$  die mechanisch verursachte Dehnung,  $\varepsilon_T$  die durch die Temperatur verursachte Dehnung,  $\alpha_\delta$  ( $\alpha_\delta=5\dots 8 \cdot 10^{-6}/K$ ) die Änderung der Brechzahl und  $\Delta T$  die Temperaturänderung in Kelvin an. Aus (A-2) ist auch ersichtlich, dass eine Dehnung des Objektes, auf dem ein FBG Sensor aufgebracht ist, nicht von einer Temperaturdehnung unterschieden werden kann. Daher ist zur Erfassung der Dehnung eine Temperaturkompensation notwendig. Zur Temperaturkompensation wird im Normalfall ein zusätzlicher, von der Dehnung entkoppelter Temperatur FBG Sensor verwendet um die anderen Dehnungssensoren mit diesen Daten zu korrigieren (Kreuzer, 2007). Reine FBG Temperatursensoren werden nur an einem Punkt mit entsprechender Entfernung vom Sensor am Prüfgegenstand fixiert (Kreuzer, 2007). Dadurch wird eine Änderung des rückgestreuten Signals lediglich durch eine Änderung infolge einer Temperaturänderung indiziert.

### A.3 FBG Herstellung

Die Brechzahl in der Faser wird durch ultraviolettes Licht dauerhaft verändert. Diese Eigenschaft macht man sich zunutze, um ein Bragg Gitter in die Faser zu "brennen". Es gibt verschiedene Möglichkeiten, diese permanente Änderung der Brechzahl zu erzeugen, siehe z.B. Kashyap (1999). Die zwei bekanntesten Methoden sind die Holographische- und die Phasenmask – Methode (Zhou et al., 2003), die in der Folge kurz beschrieben werden.

#### Holographische Methode

Bei der Holographischen Methode wird ein UV-Strahl in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Diese werden über einen Spiegel abgelenkt und im Bereich, in dem sich die Faser befindet wieder vereinigt und erzeugen dadurch ein Interferenzmuster. Durch Photosensitivität der Faser wird so das gewünschte Gitter in die Faser gebrannt (siehe Abbildung A-3). Die Gitterperiode  $\Lambda_G$  lässt sich durch den Überschneidungswinkel steuern. Vergleiche dazu Peters (2009):

$$\Lambda_B = \frac{\lambda_{UV}}{2 \cdot \sin \frac{\theta}{2}} \quad (A-3)$$

Aufgrund von mechanischen Vibrationen ist diese Methode aber schwierig zu realisieren (Peters, 2009).

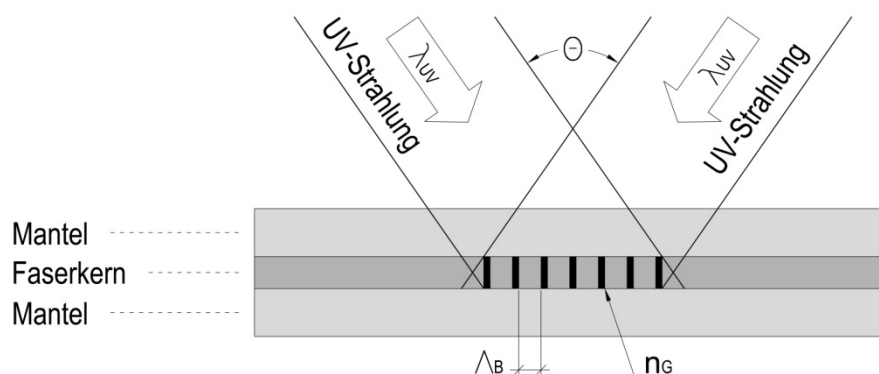


Abbildung A-3: Herstellung eines FBG mittels Holographischer Methode

### Phasenmaske Methode

Wegen seiner Einfachheit ist die Phasenmaskemethode die weitgehend verbreitetste Methode (Peters, 2009). Bei diesem Verfahren wird die Faser durch eine Maske hindurch mit UV-Licht belichtet (siehe Abbildung A-4).

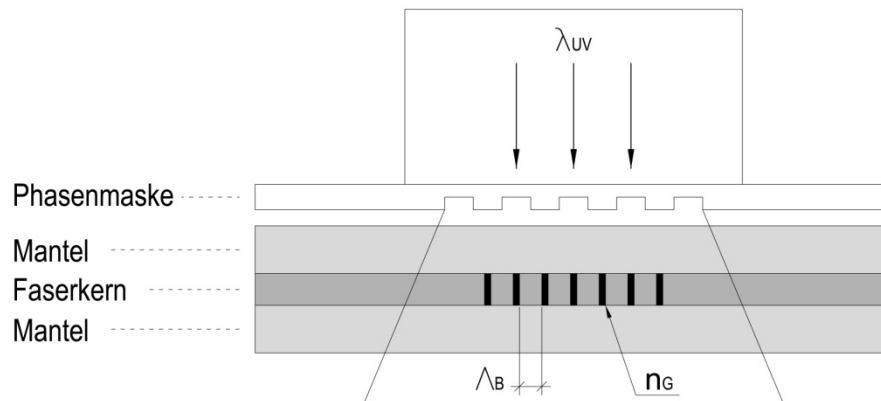


Abbildung A-4: Herstellung eines FBG mit einer Phasenmaske

Die Maske besitzt dabei eine periodische Struktur und dadurch bilden die UV-Strahlen im Kern der Faser ein Streifenmuster. Die Gitterperiode  $\Lambda_B$  entspricht der Hälfte des Gitters (Peters, 2009):

$$\Lambda_B = \frac{1}{2} \lambda_{PhMask}$$

(A-4)

Aus (A-4) geht hervor dass, ohne weitere Maßnahmen, nur Gitter mit einer festen Gitterperiode erzeugt werden können. Da die Faser meist nahe der Maske angebracht wird, wird der Einfluss von mechanischen Vibrationen minimiert (Peters, 2009).

Die beiden genannten Methoden werden dazu verwendet, um das Gitter in den Faserkern zu brennen. Dies kann entweder beim Herstellungsprozess oder im Nachhinein durch Entfernen der Ummantelung geschehen. Standardmäßig wird der Mantel einer Faser entfernt und das Gitter wird in den Faserkern eingebracht. Bei diesem Verfahren entstehen, durch die lange Belichtungszeit, stark reflektierende FBG's, deren Reflexionsfaktor über 90% beträgt. Jedoch haben diese nachträglich aufgebrauchten Gitter einen entscheidenden Nachteil. Die Faser wird durch das Entfernen und das nachträgliche Wiederaufbringen der Beschichtung geschwächt. Wird die Faser schon während der Herstellung am Ziehturm mit UV belichtet,

---

so spricht man von *Draw Tower Grating* (DTG). Der Mantel wird dabei erst im Anschluss auf die gesamte Faser aufgebracht. Dadurch wird die Faser nicht geschwächt, jedoch ergibt sich durch die geringere Belichtungszeit ein niederer Reflexionsfaktor (10-20%).

#### A.4 Auswertung von FBG

Aus Abschnitt A.2 ist bekannt, dass das rückgestreute Signal die eigentliche Messgröße darstellt. Es gibt mehrere Verfahren, um dieses rückgestreute Signal zu erfassen und auszuwerten. Diese Verfahren werden in zwei Kategorien unterteilt: *Time Division Multiplexing* (TDM) und *Wavelength Division Multiplexing* (WDM).

Es ergeben sich durch die unterschiedlich weit entfernten Messstellen Unterschiede in den Laufzeiten des Signals. ***Time Division Multiplexing*** nutzt diese Unterschiede um die einzelnen Sensoren voneinander zu unterscheiden. Es ist somit möglich, dass alle Sensoren dieselbe Gitterwellenlänge besitzen. Dieses Verfahren benötigt zwischen den einzelnen Sensoren eine gewisse Länge (typisch einige Meter) an optischer Faser, sodass es sich besonders für Messungen an großen Bauwerken eignet.

Beim verbreiteterem ***Wavelength Division Multiplexing*** Verfahren werden die Sensoren anhand ihrer unterschiedlichen Gitterwellenlängen unterschieden. Die Sensoren können somit in sehr kurzen Abständen (einige Zentimeter) hintereinander angebracht werden. Die Gitterwellenlängen sollten hier einen Abstand von zumindest wenigen nm besitzen (Zhou et al., 2003).

## Anhang B: Details und weitere Ergebnisse der Experimente

Die Berechnungen wurden allesamt im Programm Matlab (Version R2009b) durchgeführt. Für jedes Programm wurden die eingelesenen Daten in einem .mat-File gespeichert um einen erneuten Programmdurchlauf zu beschleunigen. Zudem finden sich dort zusätzliche statistische Parameter der Daten.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die im Hauptteil der Arbeit nicht gezeigten Grafiken dargestellt.

### B.1 Voruntersuchung zur Vibrationsbeeinflussung

Um einen Überblick über die erzielten Ergebnisse zu geben, werden alle Sensoren wie in der Arbeit beschrieben (siehe Abschnitt 4.3, 1s Mittelwerte) und ohne weitere Kommentare dargestellt.

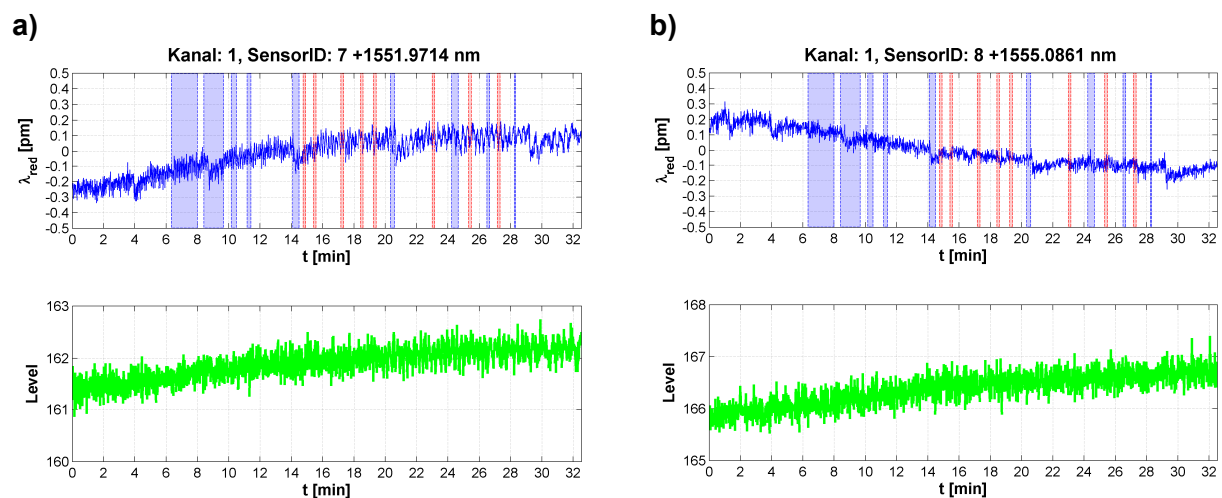


Abbildung B.1-1: Ergebnisse Voruntersuchung zur Vibrationsbeeinflussung

Für Sensor ID12 (Abbildung B.1-1f) wurde die Achsskalierung aufgrund des Schwingens im Anfangsbereich etwas vergrößert.



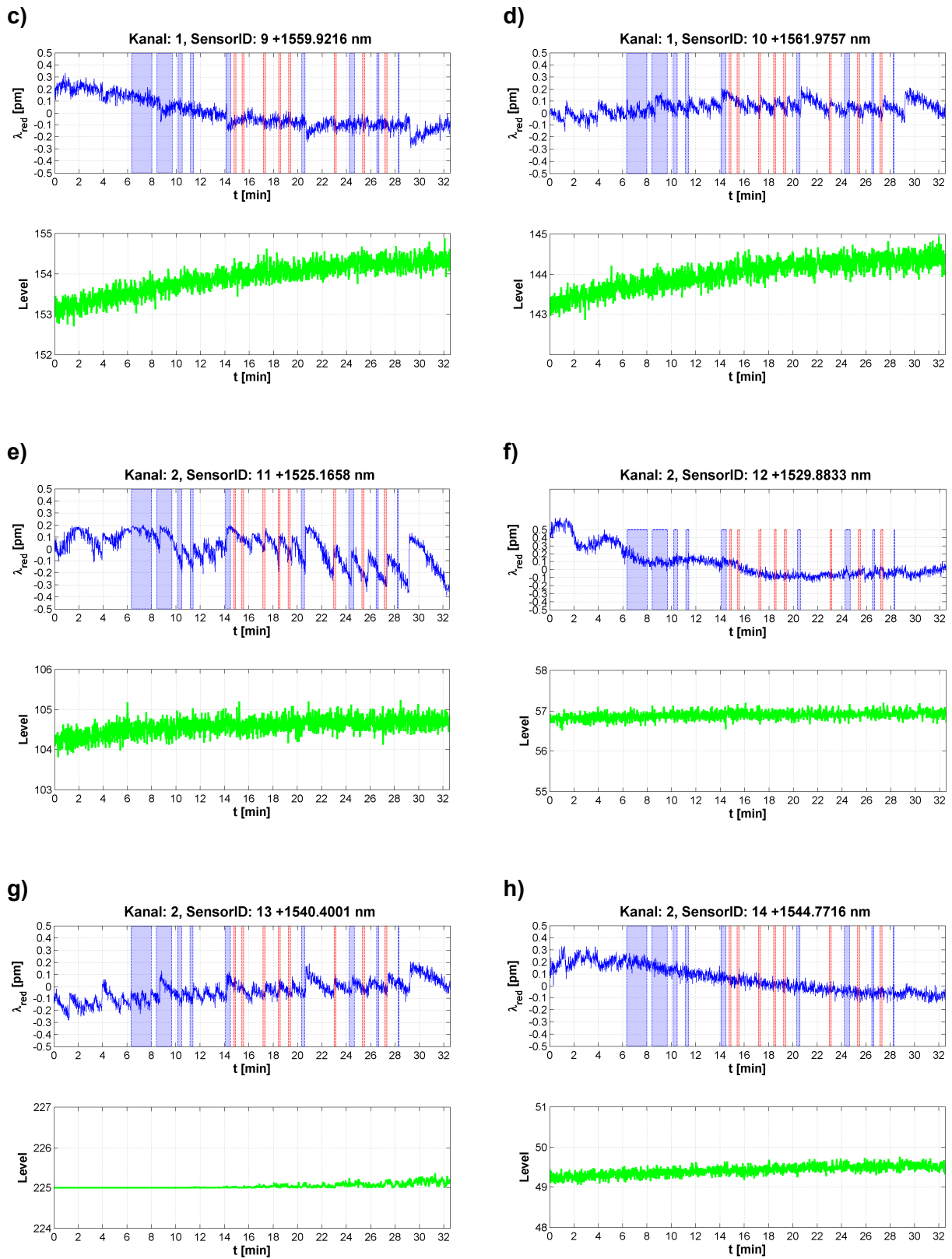


Abbildung B.1-1: Ergebnisse Voruntersuchung zur Vibrationsbeeinflussung

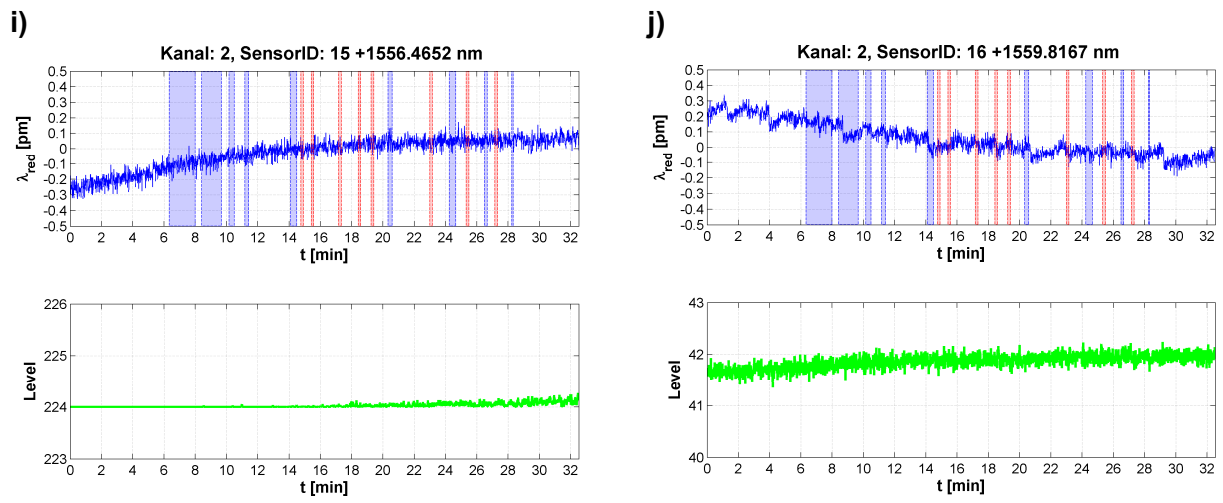


Abbildung B.1-1: Ergebnisse Voruntersuchung zur Vibrationsbeeinflussung

## B.2 Dauermessung

### Temperaturdaten

In Abbildung B.2-1 sind die Daten der beiden Temperatursensoren PT100#2 und PT100#3 dargestellt. Die Abbildung zeigt deutlich höhere Temperaturen als Abbildung 34b. Diese Änderungen sind auf die Lage der Temperatursensoren zurückzuführen (siehe dazu Abbildung 24b). PT100#3 zeigt die Temperatur im Labor und PT100#2 die oberste Temperatur innerhalb des Vertikalkomparators. PT100#2 befindet sich ca. 1.2m oberhalb der beiden Sensorboxen und zeigt noch leichte Änderungen der Temperatur über die 24h. Daher ist auch davon auszugehen, dass wie in Abschnitt 5.1.3 vermutet sich die Temperatur für den Sensor PT100#1 leicht ändern dürfte.

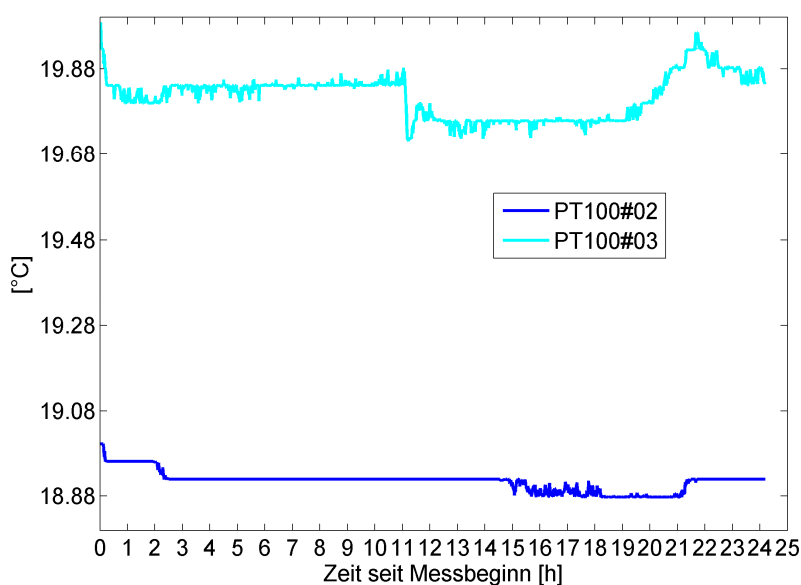


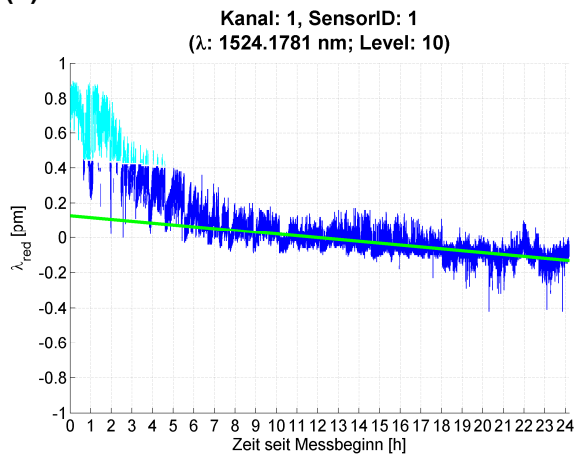
Abbildung B.2-1: Temperatur der Dauermessung (60s Mittel der Daten mit einer Auflösung von 0.04°C)

### Ergebnisse

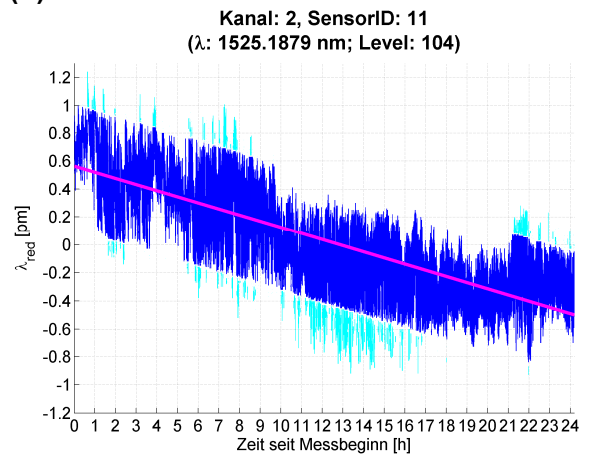
Um einen Überblick über die erzielten Ergebnisse zu geben, werden alle Sensoren wie in Abschnitt 5.1 beschrieben dargestellt ohne diese weiter zu kommentieren. Diese Plots sind nach steigenden  $\lambda$  sortiert, da wellenlängenabhängige Effekte vermutet wurden.

## B.2.1 Regressionsgerade

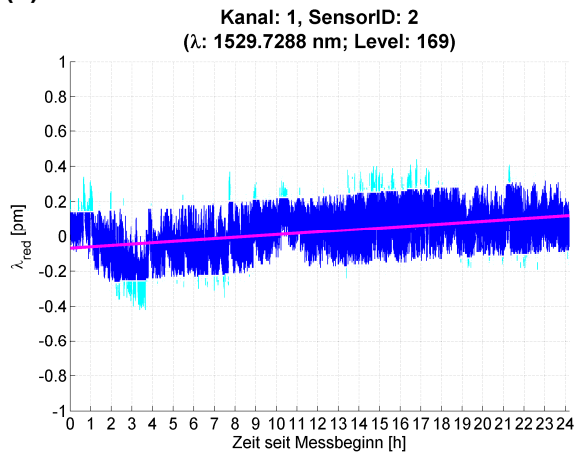
(a)



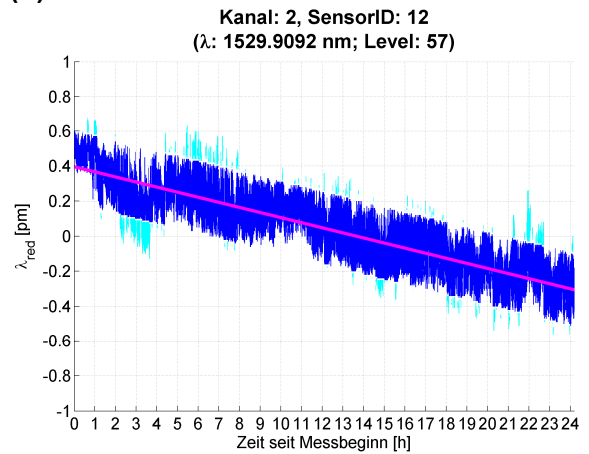
(b)



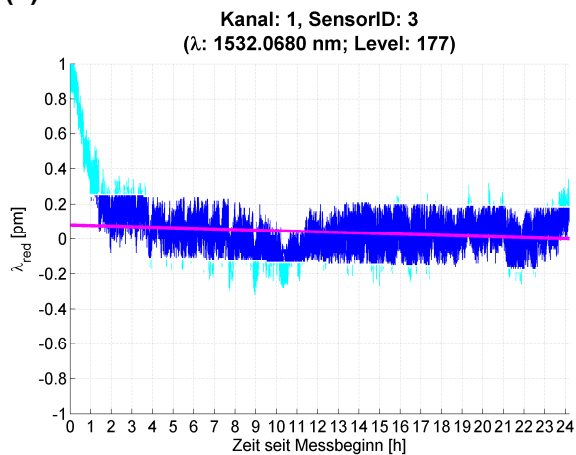
(c)



(d)



(e)



(f)

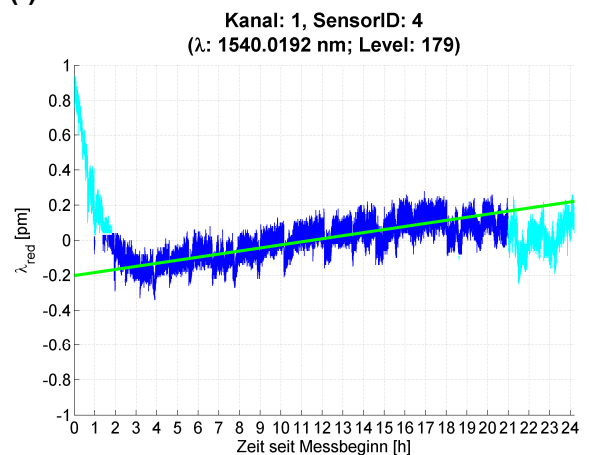
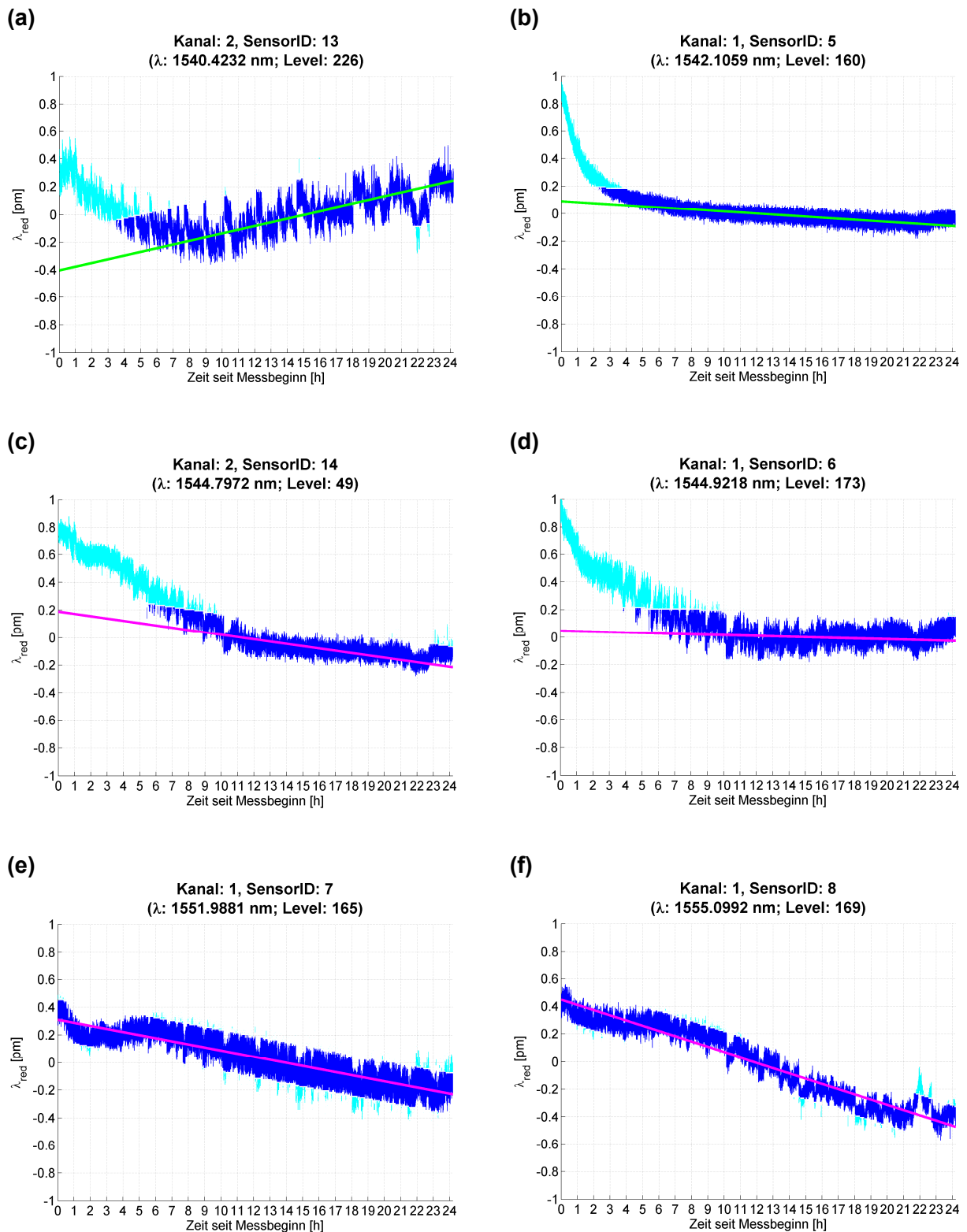
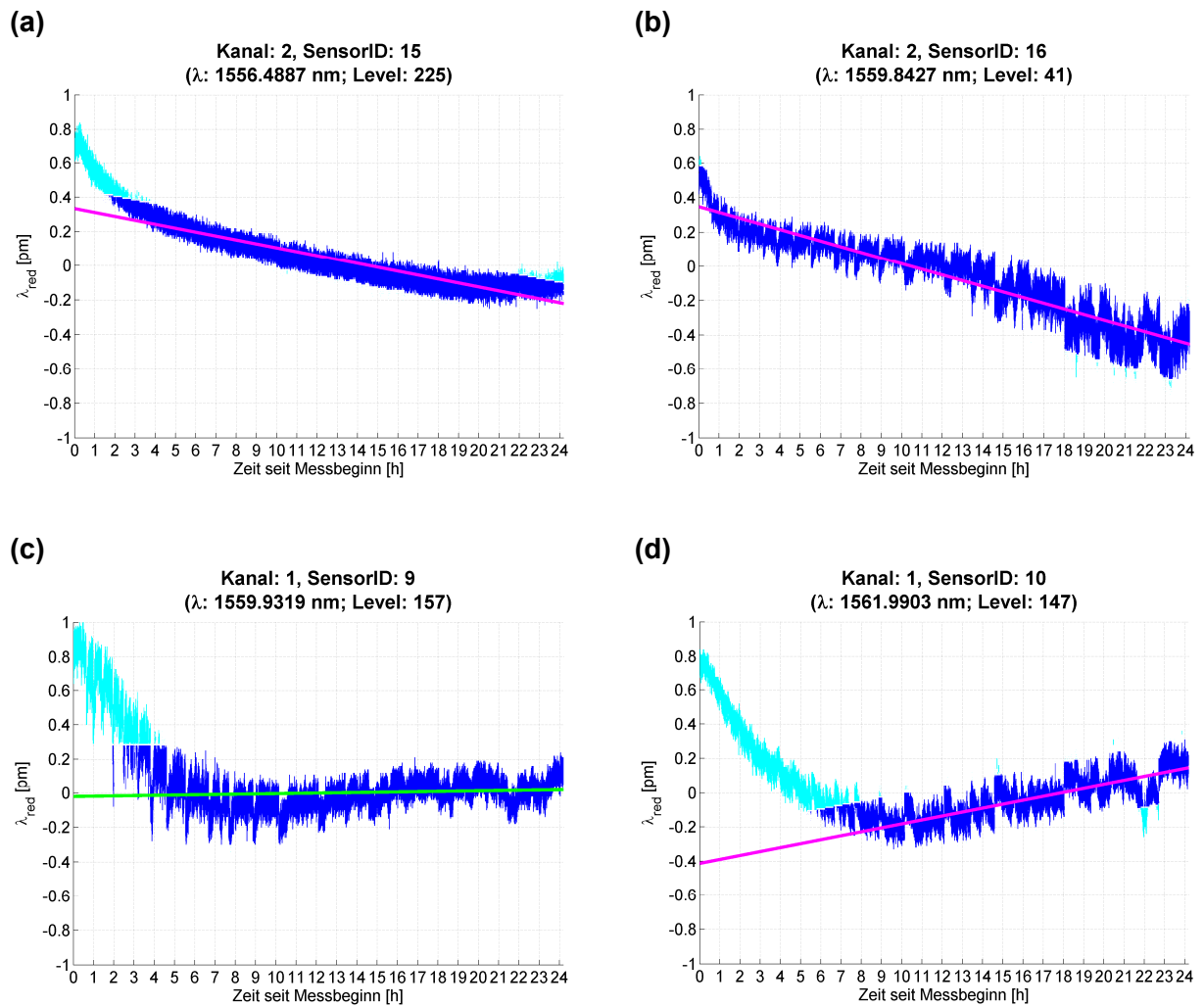


Abbildung B.2.1-1: Regressionsgeraden der Sensoren von  $\lambda=1524$ - $1540.0$ nm

Abbildung B.2.1-2: Regressionsgeraden der Sensoren von  $\lambda=1540.4$ -1555nm

Abbildung B.2.1-3: Regressionsgeraden der Sensoren von  $\lambda=1556-1562\text{nm}$

## B.2.2 Messsystem 1.Ordnung

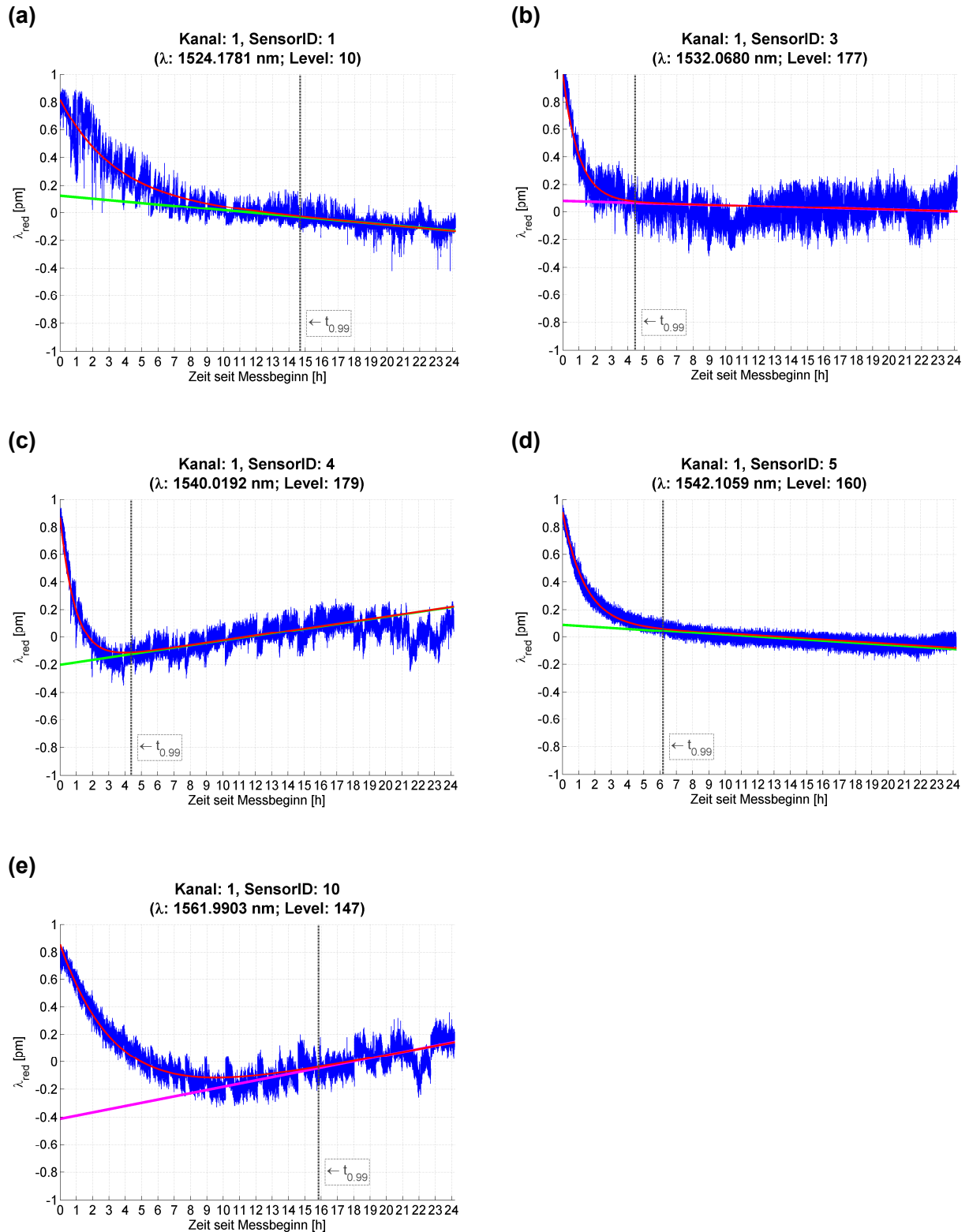


Abbildung B.2.2-1: Messsystem 1.Ordnung der Sensoren ID1,3,4,5,10

Für die restlichen Sensoren ist das Messsystem nicht schätzbar.

### B.3 Faserzentrierung

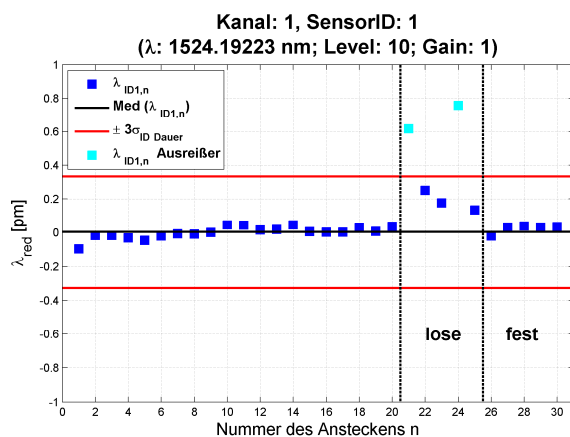
Besondere Vorkommnisse während der Durchführung dieses Experiments waren:

- Beim ersten Tausch der Sensorboxen (FBG<sub>ia</sub>B#1 von Kanal 1 auf Kanal 2 und FBG<sub>ia</sub>B#2 von Kanal 2 auf Kanal 1) wurde der *Gain* für die Sensorbox #2 erst bei der vierten Messung auf 2 gestellt. Dies ist in den Ergebnissen des Versuchs deutlich durch eine große Wellenlängenänderung zu sehen (siehe Abbildung B.3.4-1a bis Abbildung B.3.4-1l auf Seite B-20f).
- Auf Kanal 3 wurde nach dem 25. Anschrauben der Faser eine Verschmutzung der Faser festgestellt. Die Fasern, sowie alle Kanäle wurden daraufhin gereinigt.

Um einen Überblick über die erzielten Ergebnisse zu geben, werden alle Sensoren wie in Abschnitt 5.2 beschrieben dargestellt ohne diese weiter zu kommentieren.

#### B.3.1 Ergebnisse des Umsteckens FBG<sub>ia</sub>B#1 auf Kanal 1

(a)



(b)

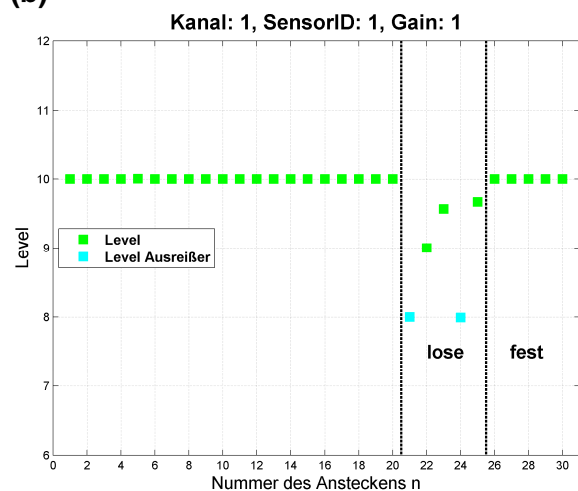
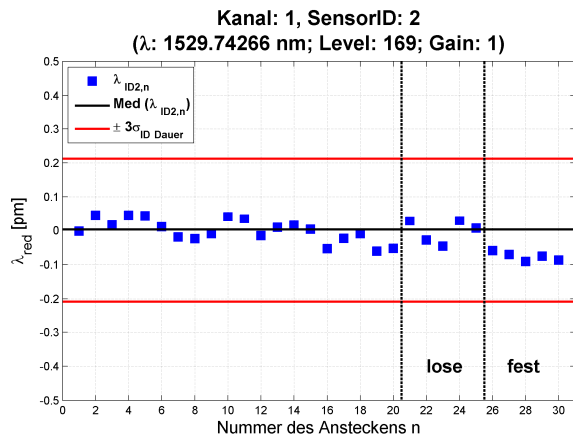


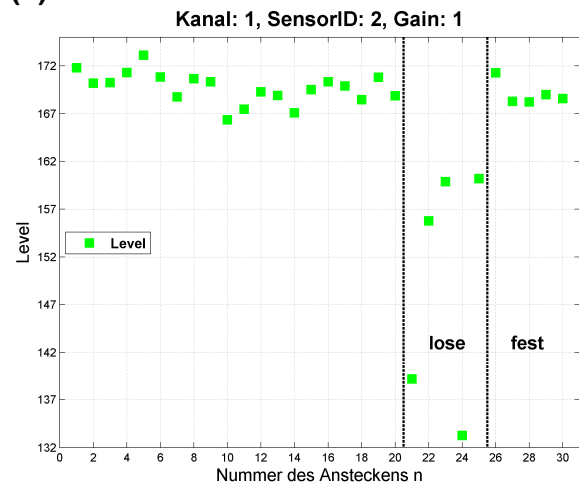
Abbildung B.3.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 1



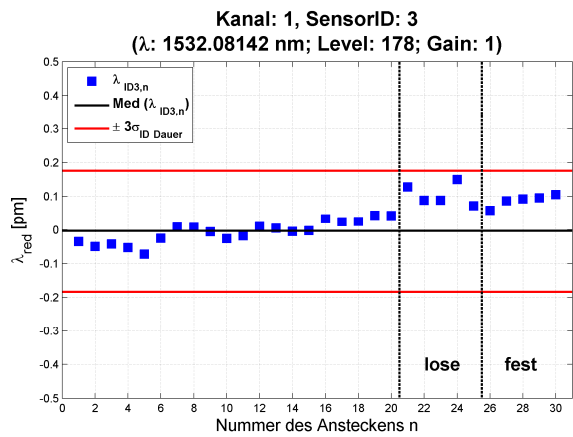
(c)



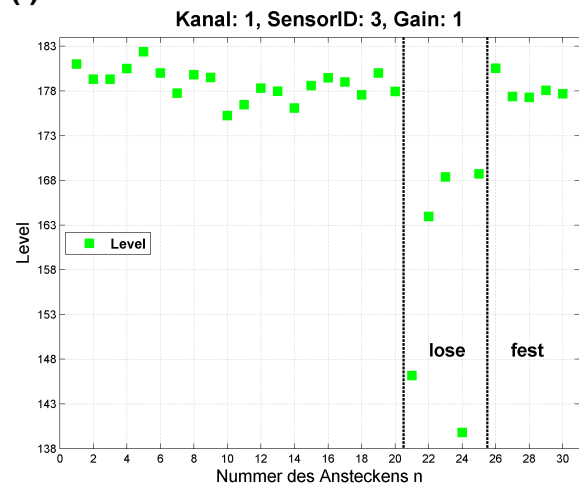
(d)



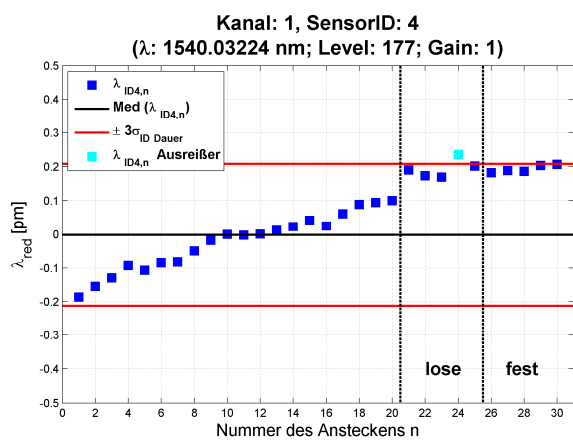
(e)



(f)



(g)



(h)

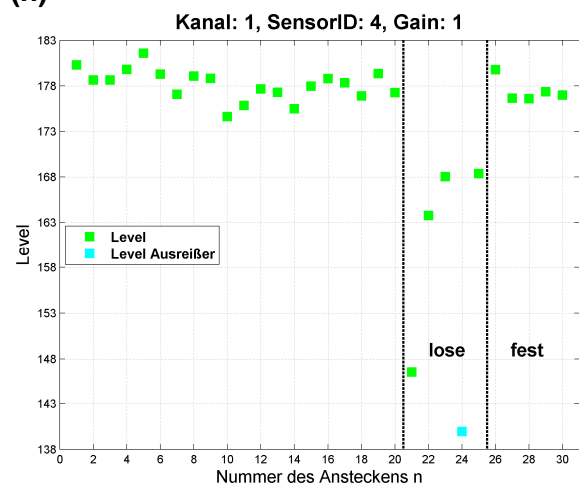
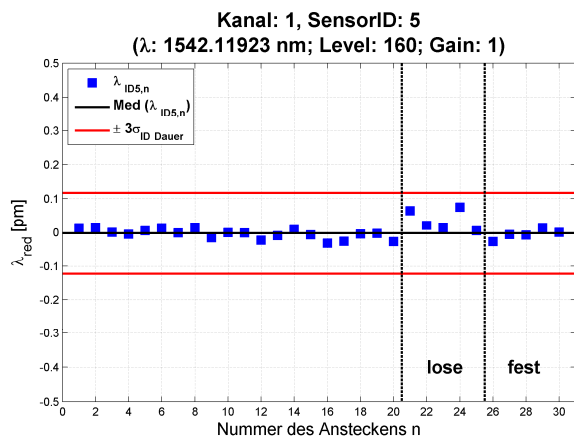
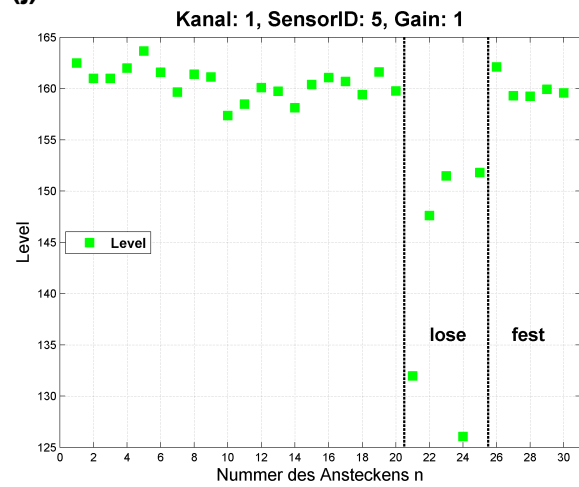


Abbildung B.3.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 1

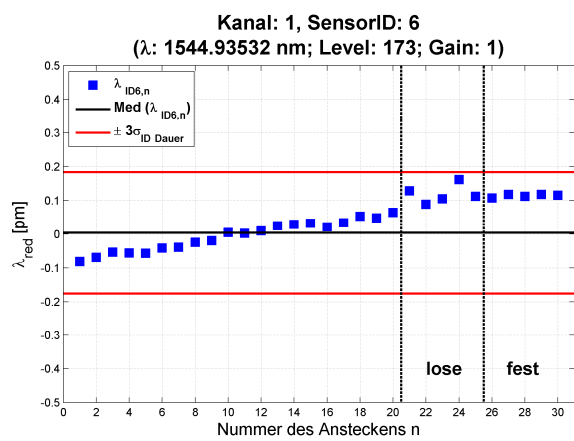
(i)



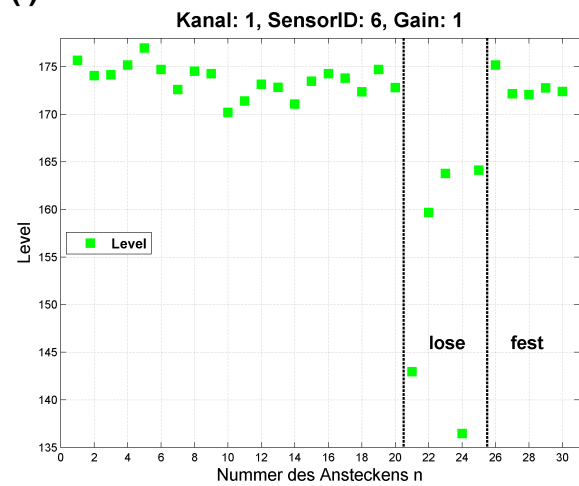
(j)



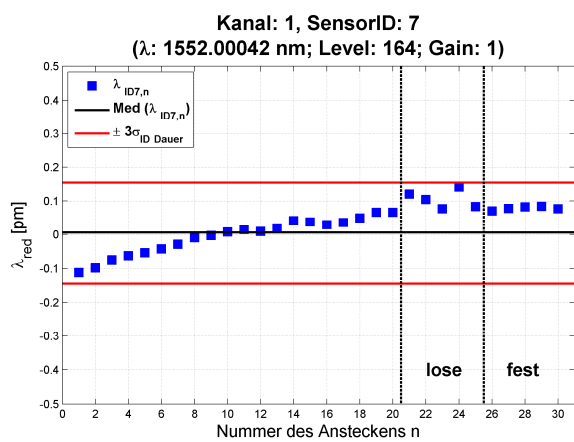
(k)



(l)



(m)



(n)

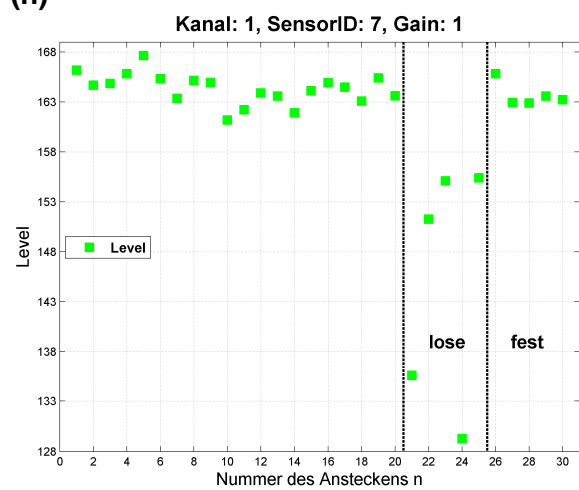
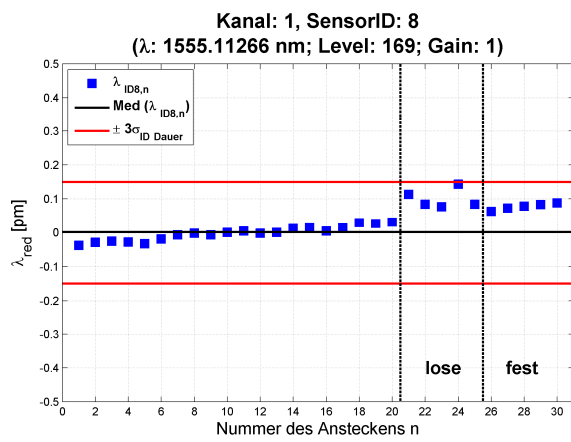
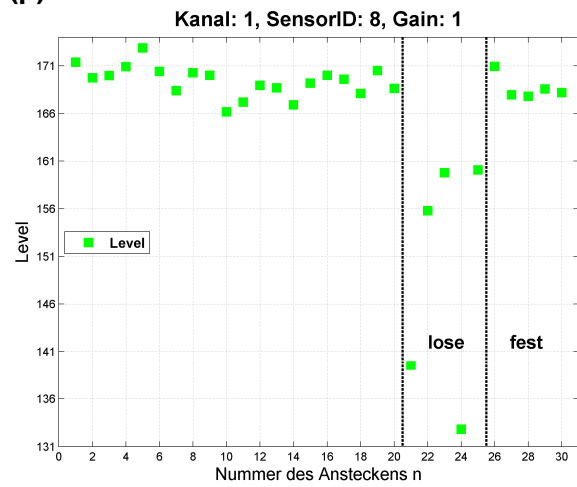


Abbildung B.3.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 1

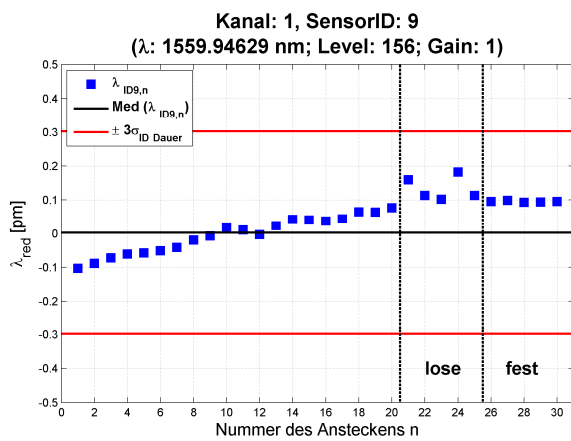
(o)



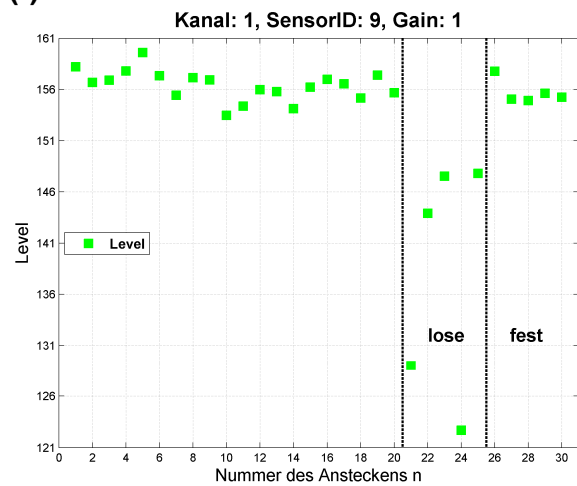
(p)



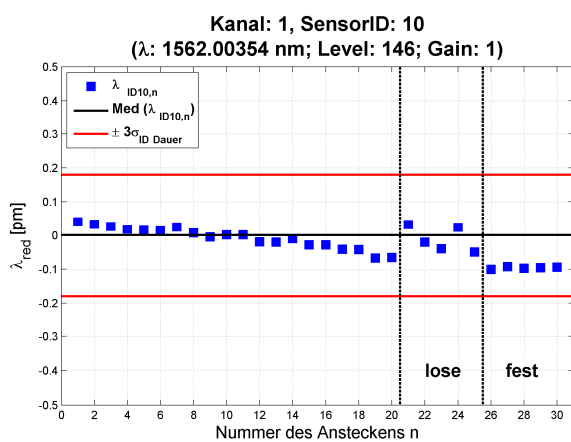
(q)



(r)



(s)



(t)

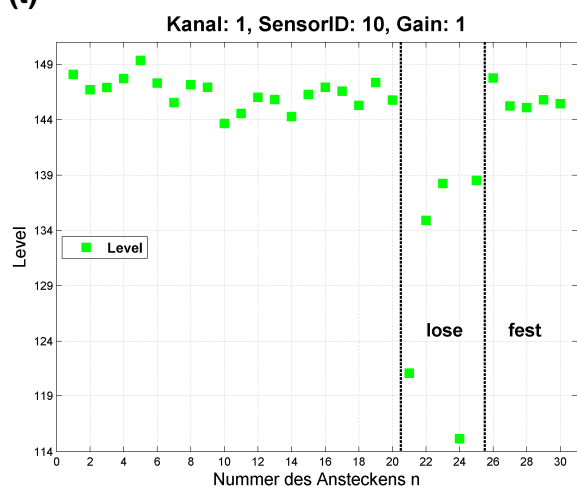
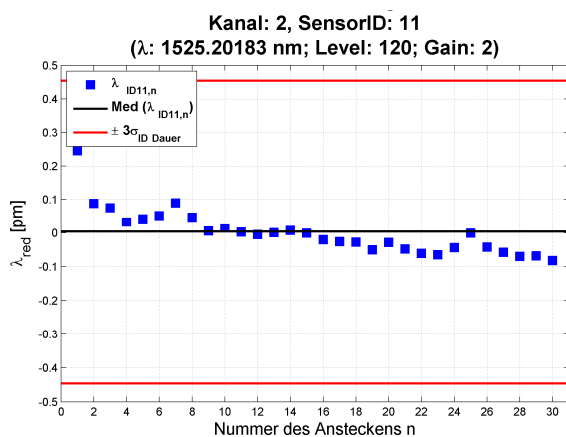


Abbildung B.3.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 1

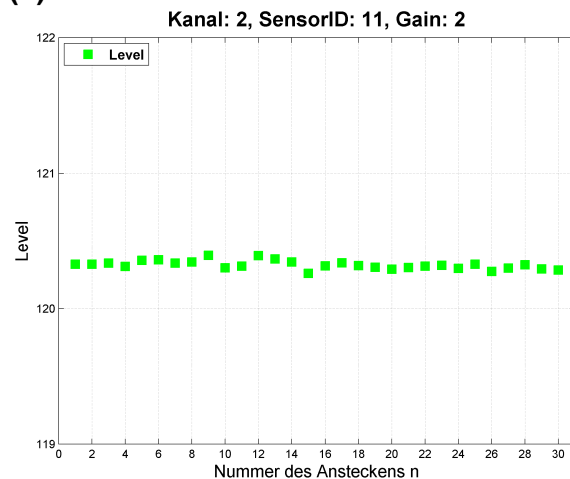
### B.3.2 Zu B.3.1 gehörige Ergebnisse der Kontrollsensoren (FBGiaB#2 auf Kanal 2)

Obwohl die Kontrollsensoren im Gegensatz zur Sensorbox FBGiaB#1 nicht neu angesteckt wurden konnte bei Sensor ID15 für die letzten 8 Messwerte eine Änderung in der detektierten Braggwellenlänge von ca. 0.2pm (siehe Abbildung B.3.2-1i) festgestellt werden. Der betroffene Sensor besitzt mit 226 einen sehr hohen, schon über der Grenze der Sättigung des Detektors liegenden *Level*. Sensor ID13 besitzt jedoch mit 227 einen ähnlich hohen *Level* und es sind für diesen Sensor keine Änderungen bemerkbar (siehe Abbildung B.3.2-1e).

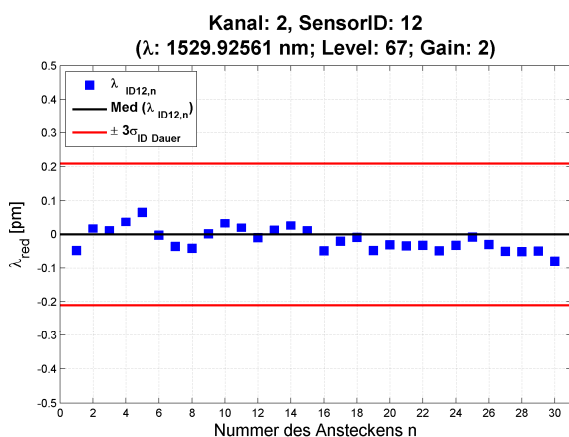
(a)



(b)



(c)



(d)

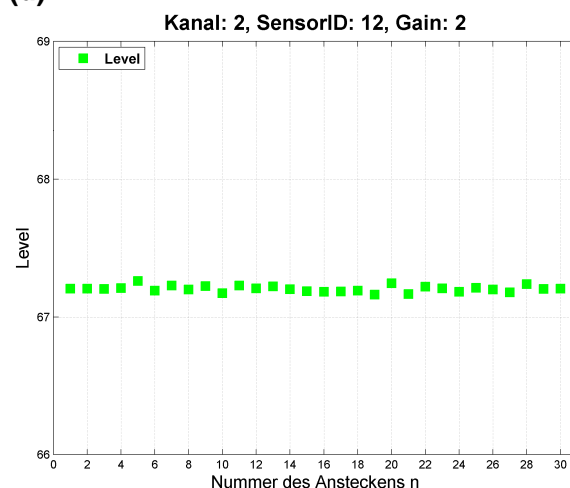
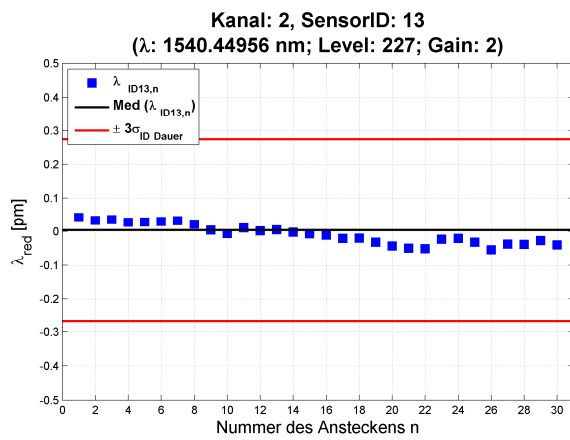
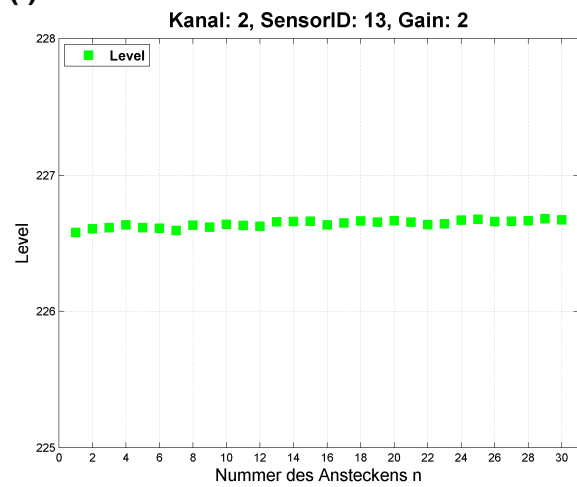


Abbildung B.3.2-1: Zu B.3.1 gehörige Kontrollsensoren FBGiaB#2 auf Kanal 2

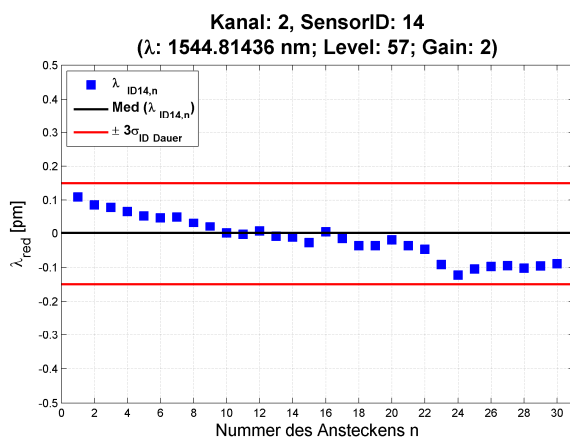
(e)



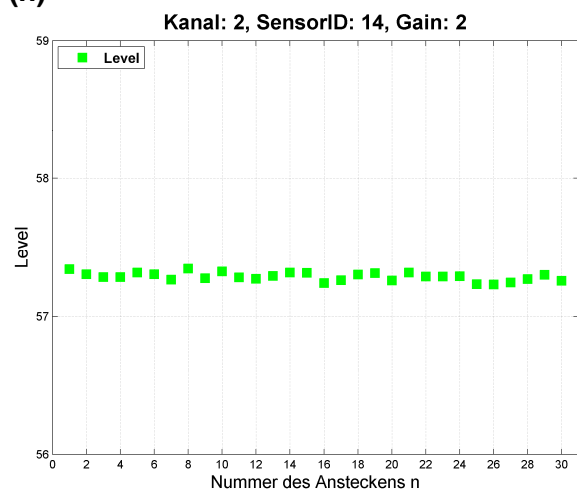
(f)



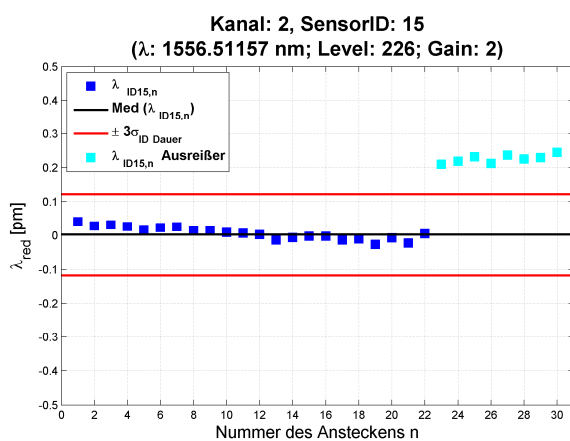
(g)



(h)



(i)



(j)

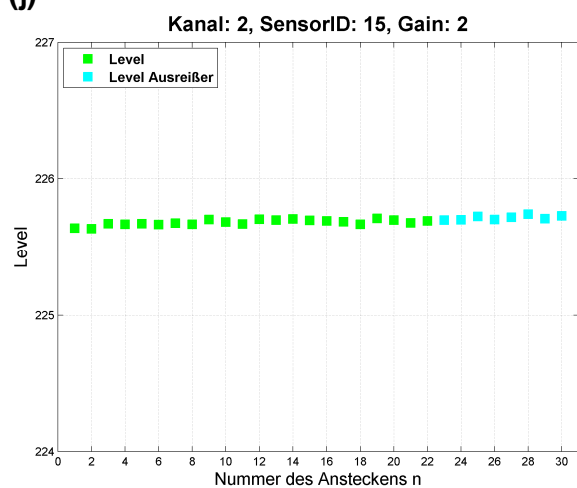
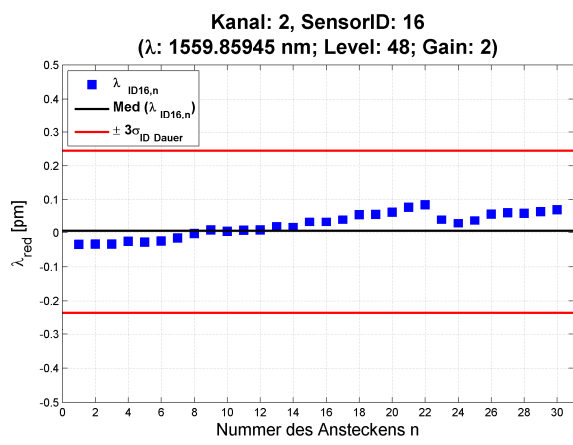


Abbildung B.3.2-1: Zu B.3.1 gehörige Kontrollsensoren FBGiaB#2 auf Kanal 2

(k)



(l)

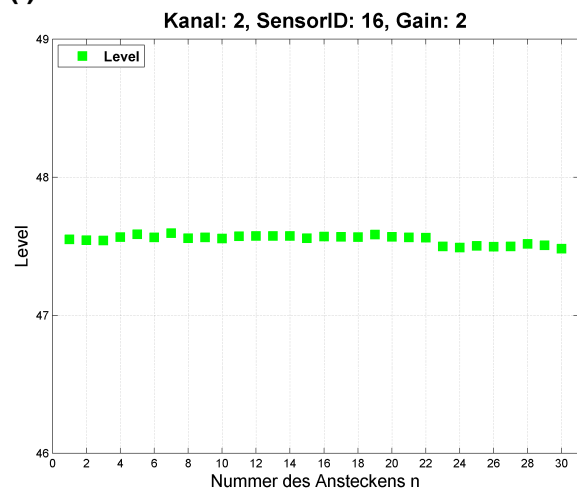
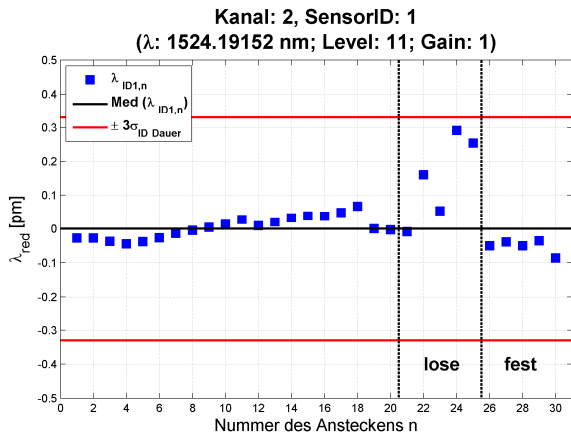


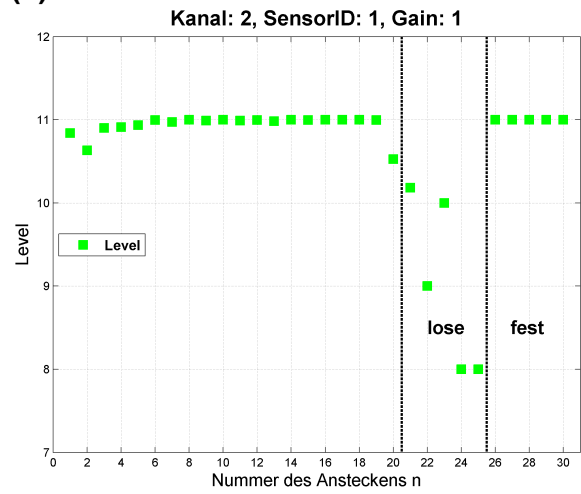
Abbildung B.3.2-1: Zu B.3.1 gehörige Kontrollsensoren FBGiaB#2 auf Kanal 2

**B.3.3 Ergebnisse des Umsteckens FBG#1 auf Kanal 2**

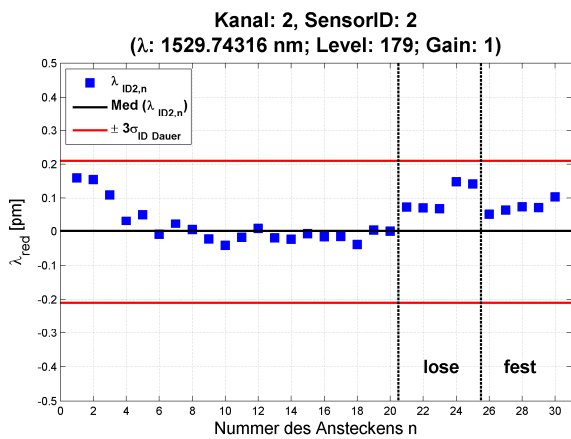
(a)



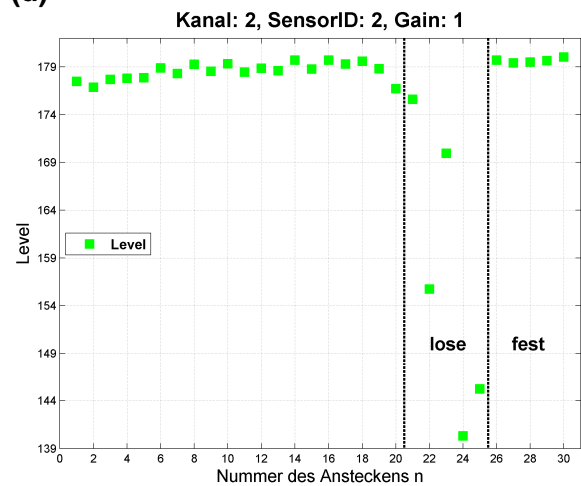
(b)



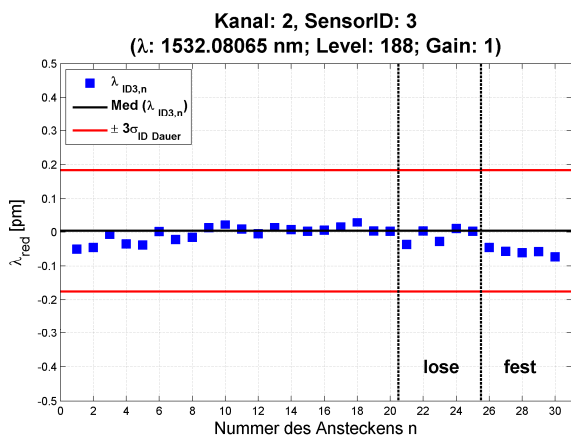
(c)



(d)



(e)



(f)

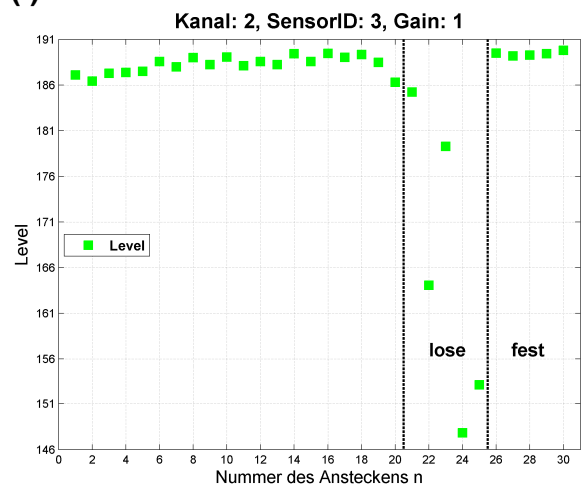
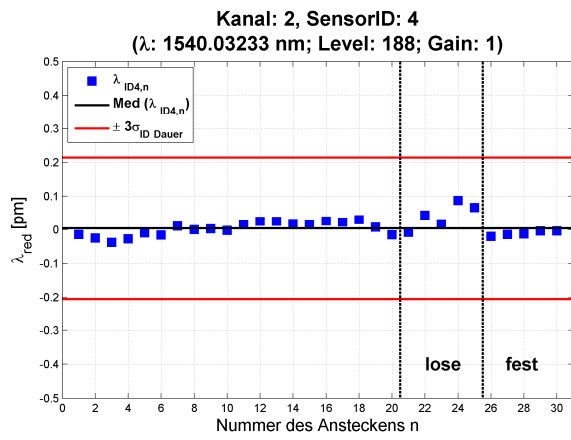
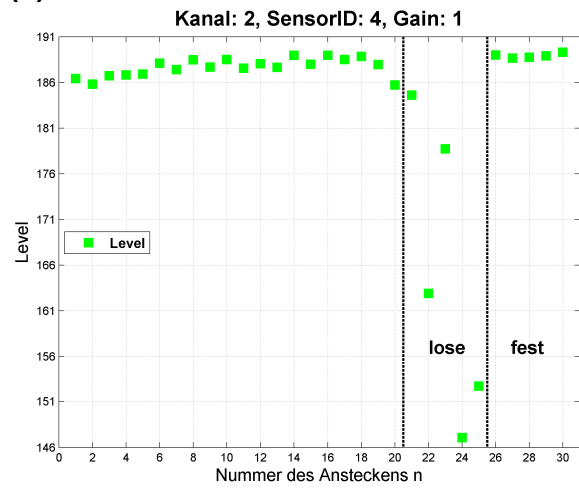


Abbildung B.3.3-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 2

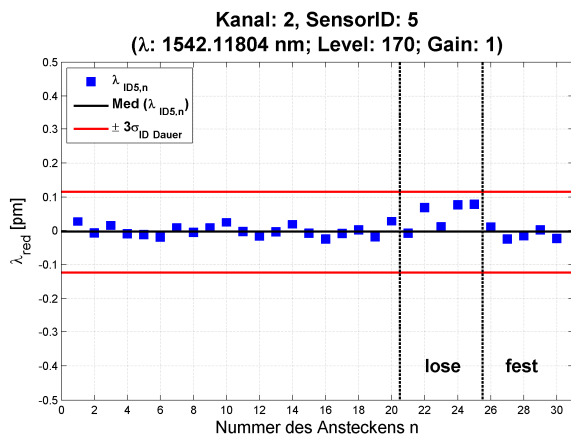
(g)



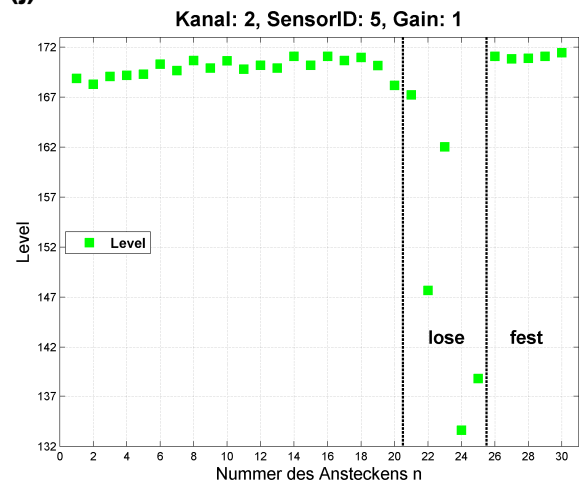
(h)



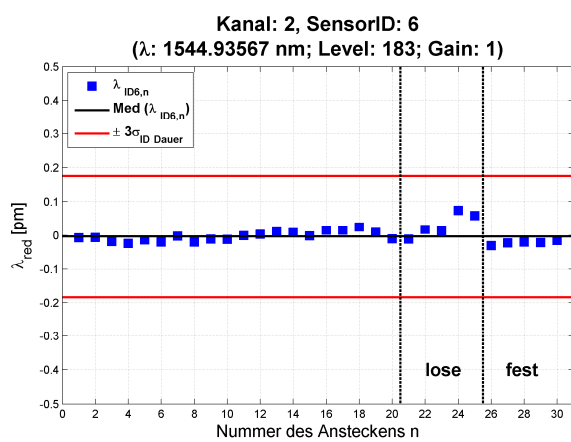
(i)



(j)



(k)



(l)

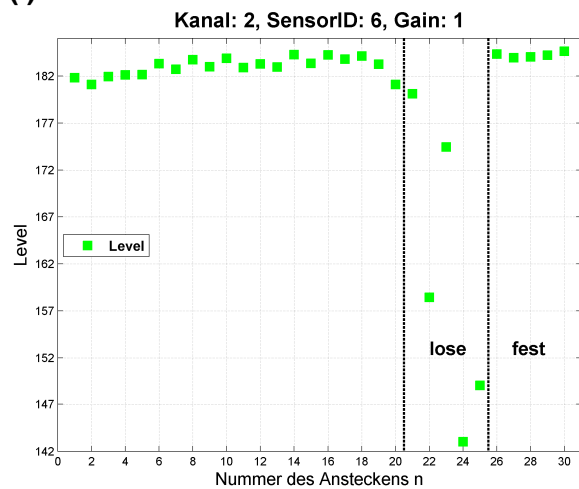
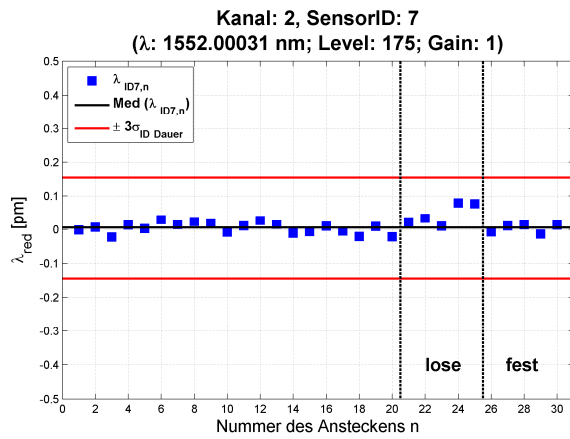


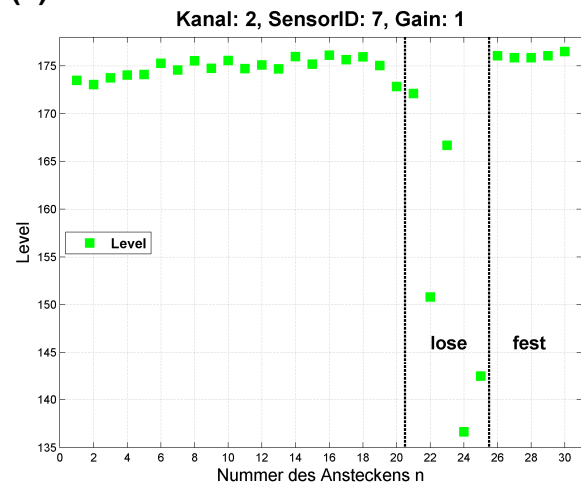
Abbildung B.3.3-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 2



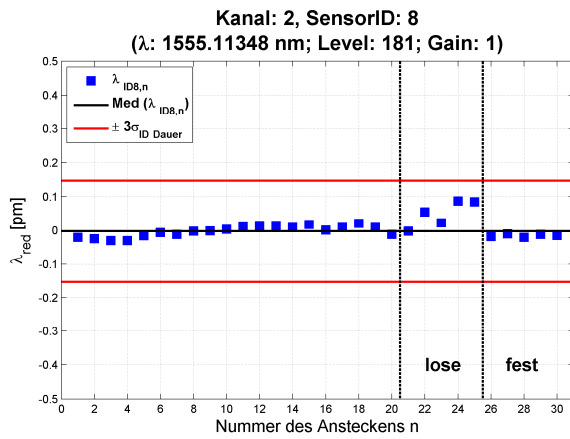
(m)



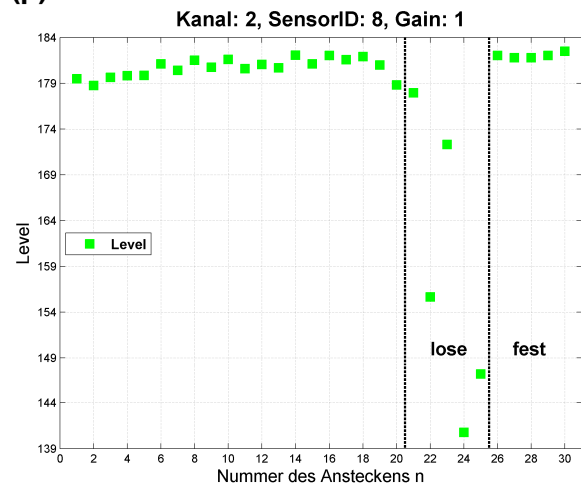
(n)



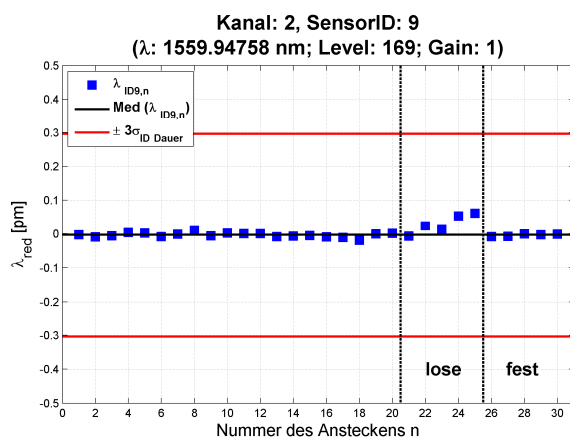
(o)



(p)



(q)



(r)

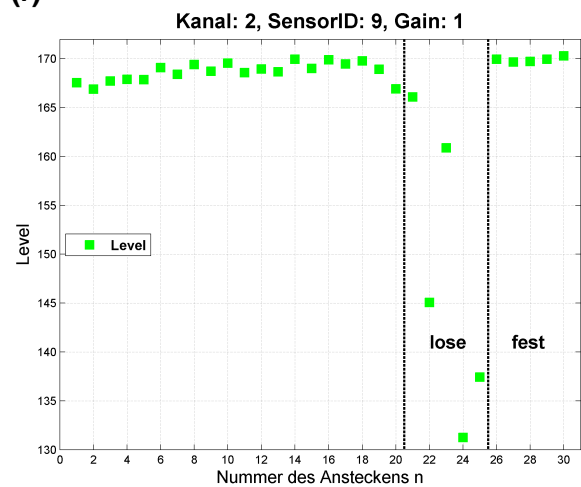
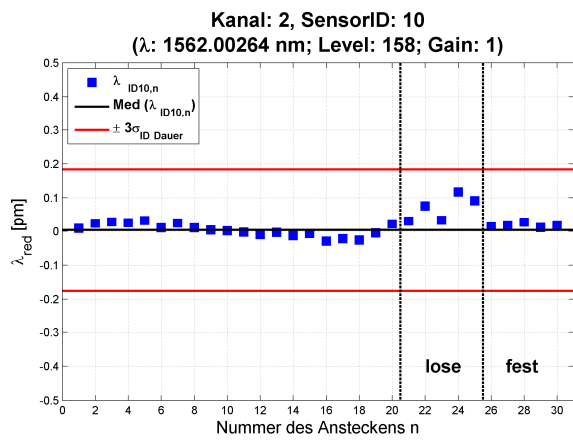


Abbildung B.3.3-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 2

(s)



(t)

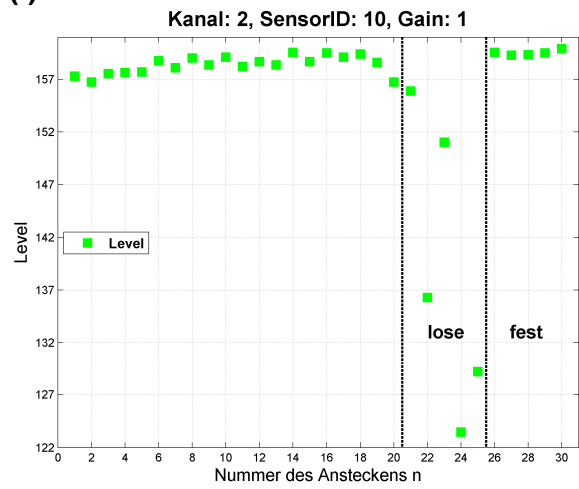
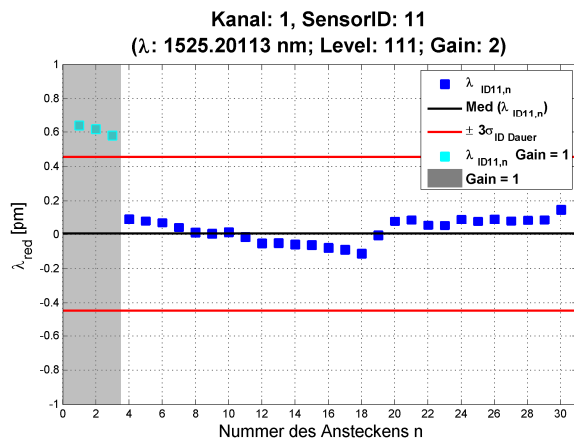


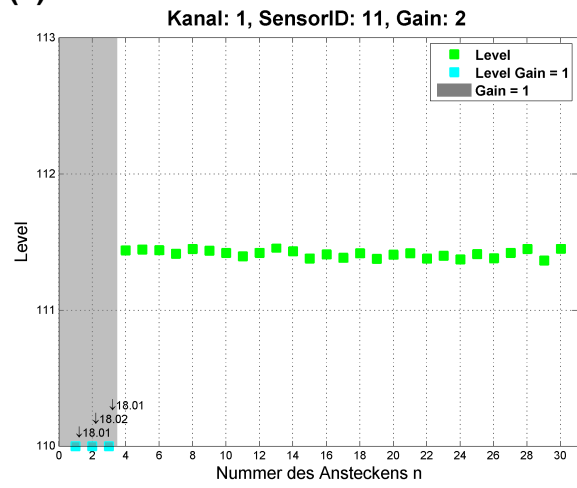
Abbildung B.3.3-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 2

**B.3.4 Zu B.2.3 gehörige Ergebnisse der Kontrollsensoren (FBGiB#2 auf Kanal 1)**

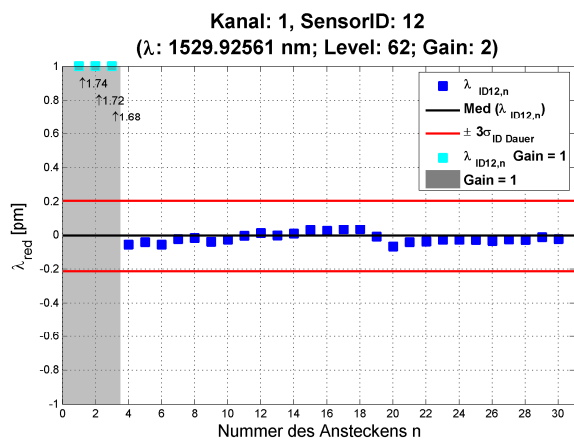
(a)



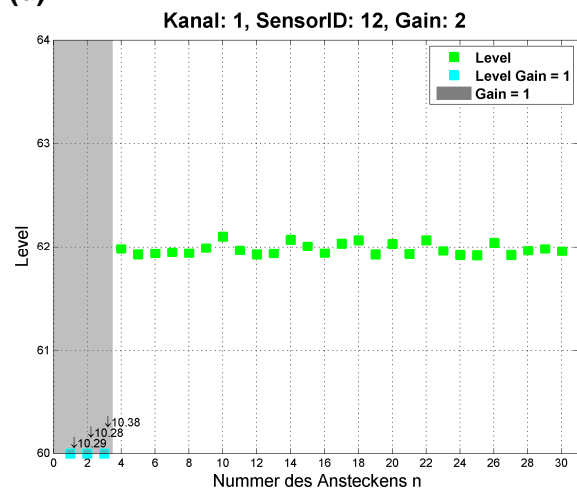
(b)



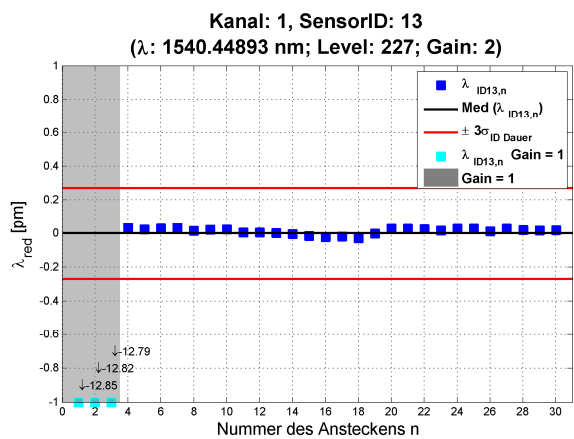
(c)



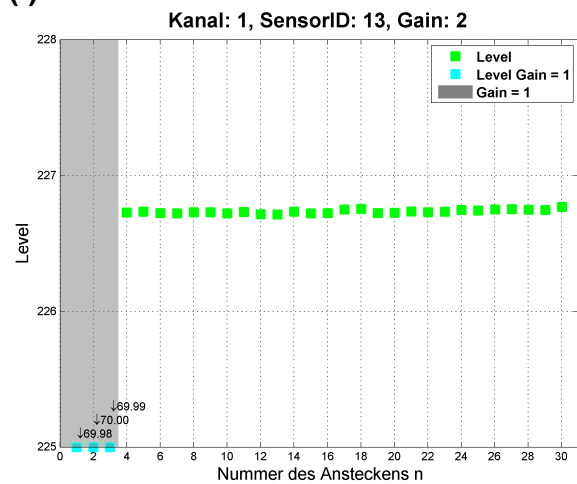
(d)



(e)

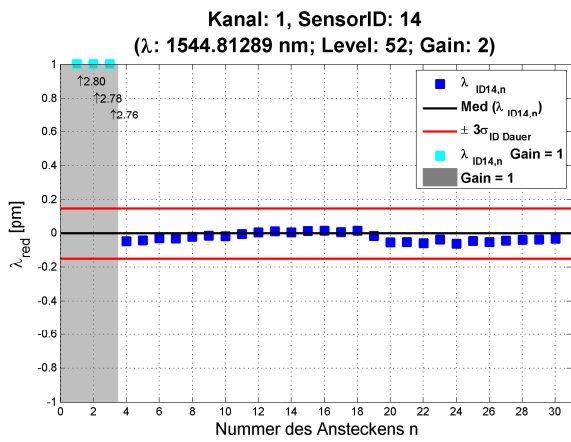


(f)

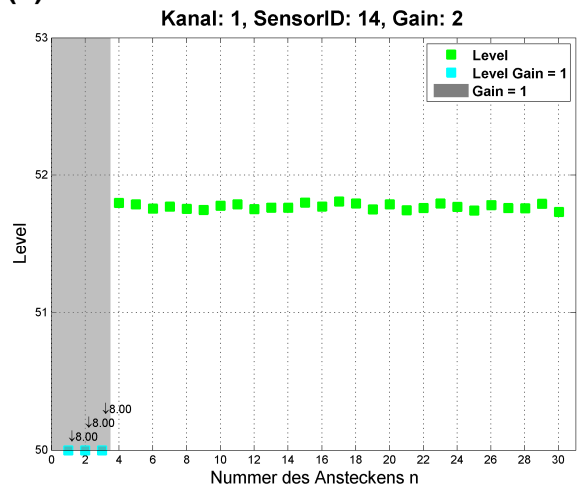


**Abbildung B.3.4-1: Zu B.3.3 gehörige Kontrollsensoren FBGiB#2 auf Kanal 1 (erste 3 Messungen mit Gain = 1; anschließend Gain = 2)**

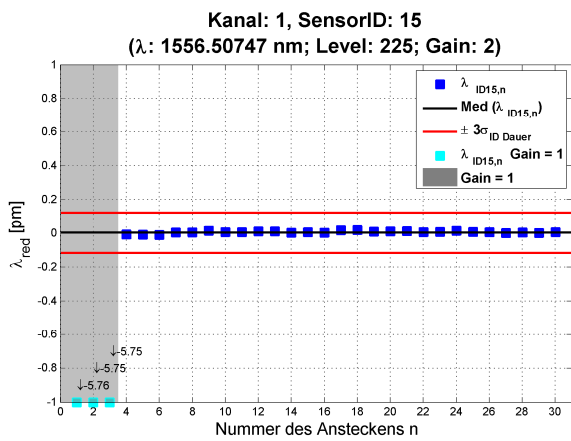
(g)



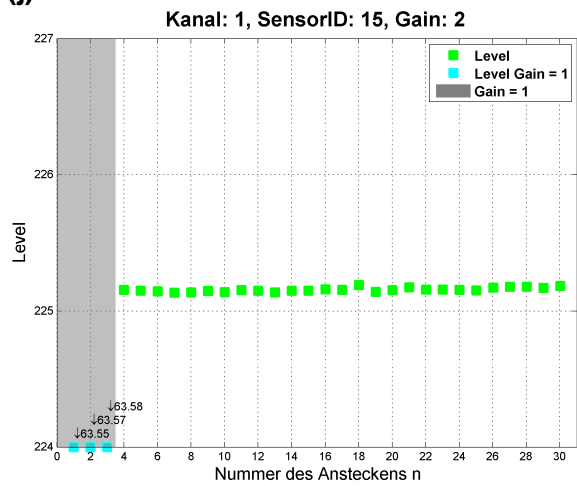
(h)



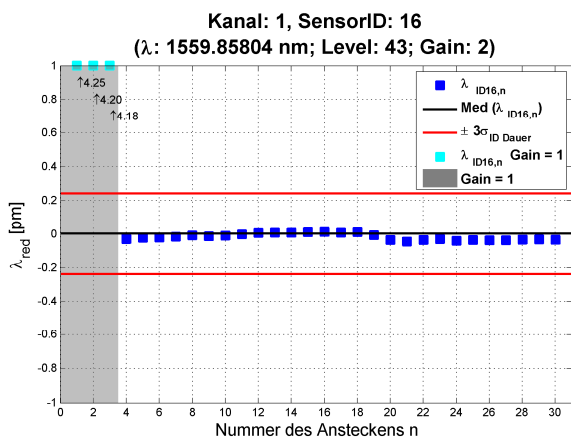
(i)



(j)



(k)



(l)

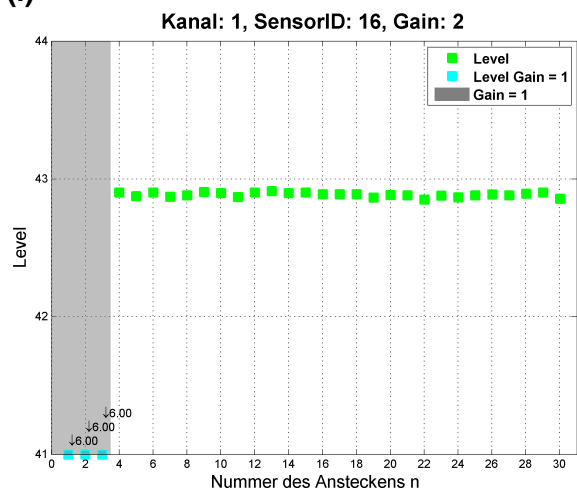
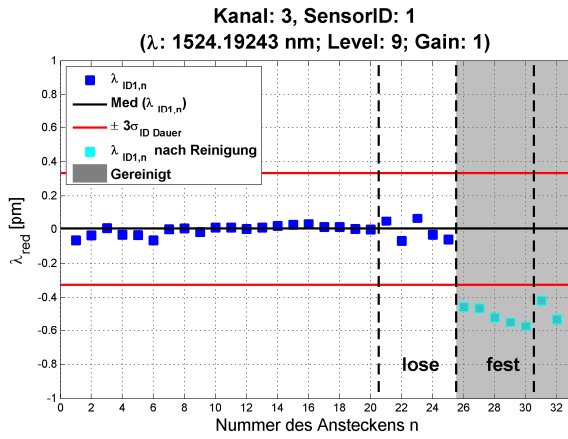


Abbildung B.3.4-1: Zu B.3.3 gehörige Kontrollsensoren FBGiA#2 auf Kanal 1 (erste 3 Messungen mit Gain = 1; anschließend Gain = 2)

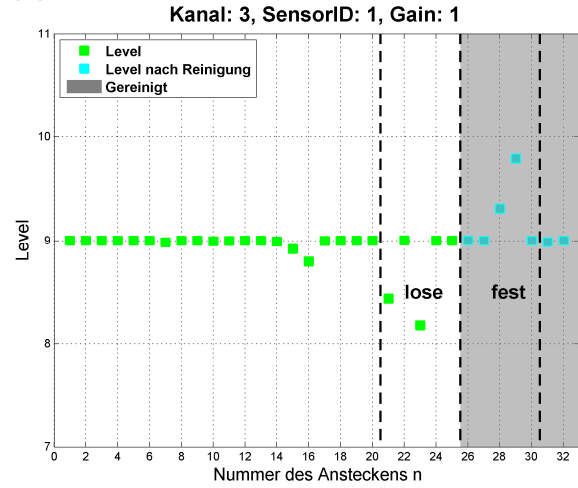
### B.3.5 Ergebnisse des Umsteckens FBGiA#1 auf Kanal 3

Nach Wiederholungsmessung 25 wurden die Faser sowie die Kanäle der si425 gereinigt.

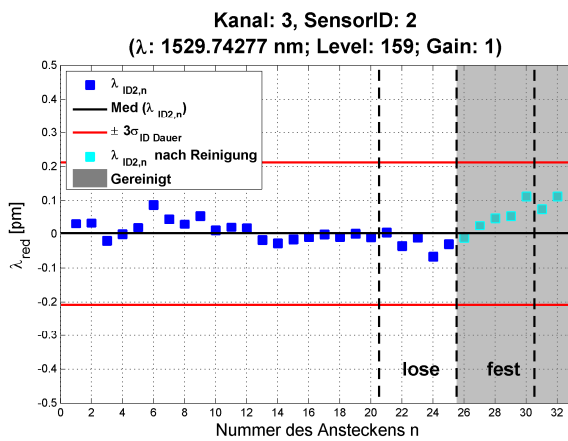
(a)



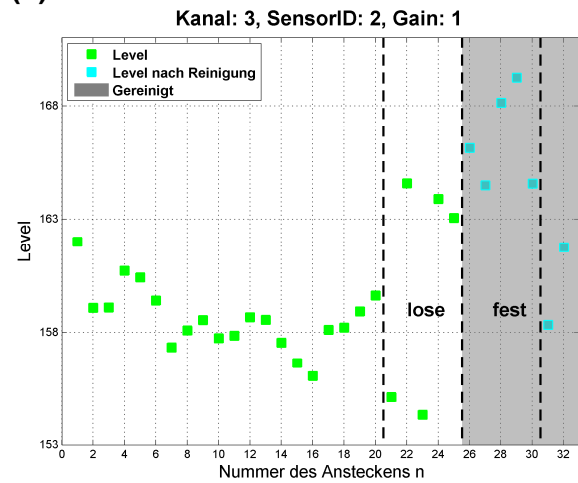
(b)



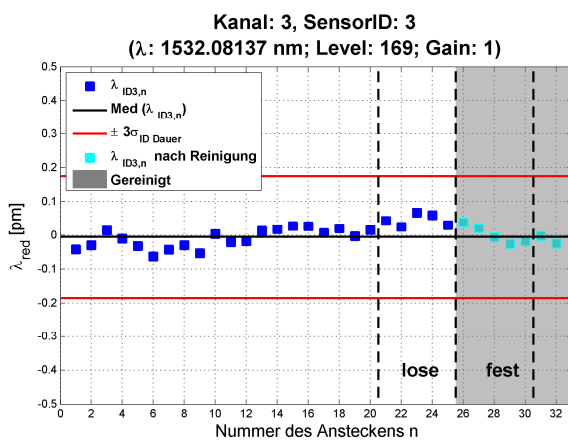
(c)



(d)



(e)



(f)

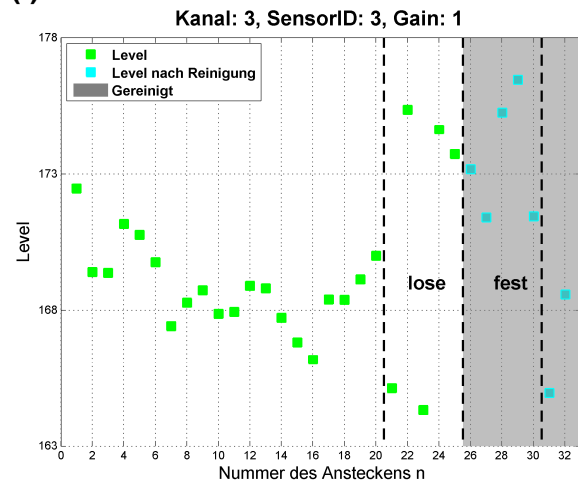
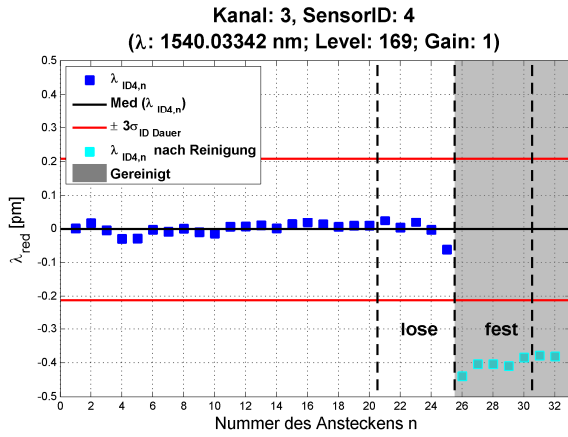
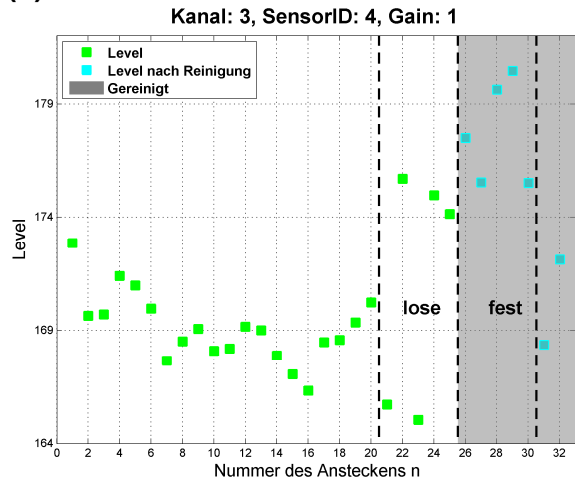


Abbildung B.3.5-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 3

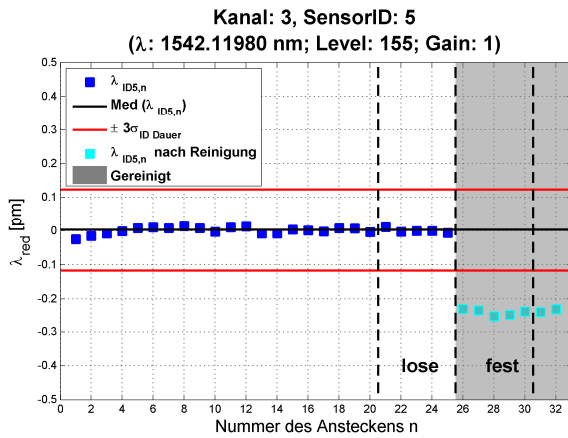
(g)



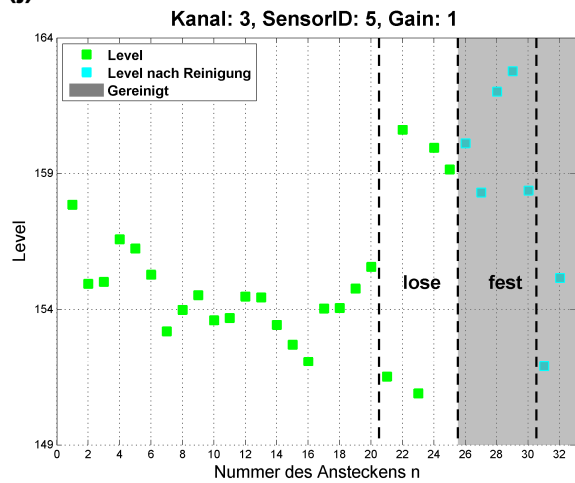
(h)



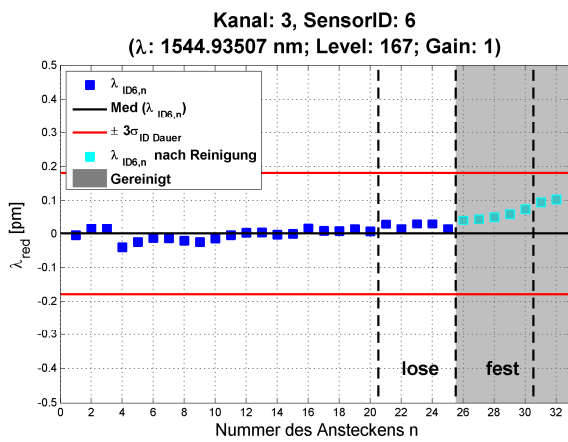
(i)



(j)



(k)



(l)

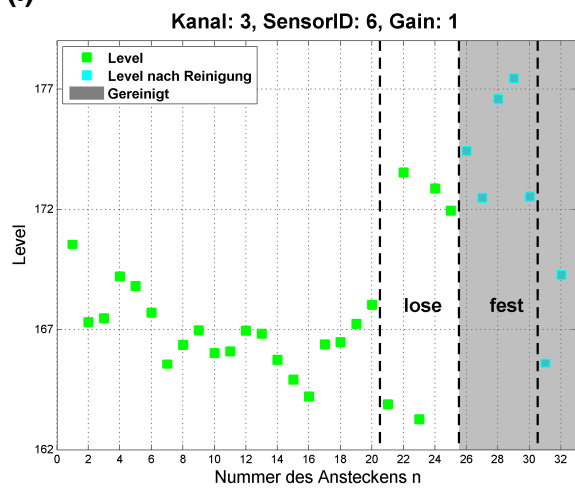
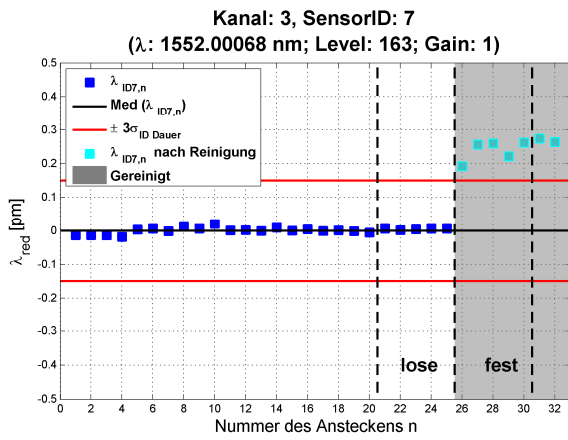
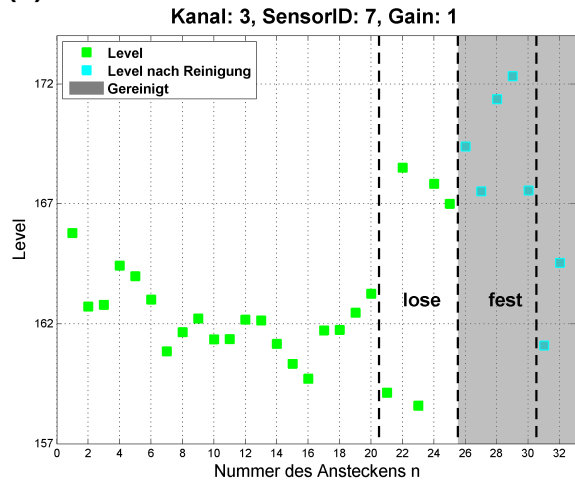


Abbildung B.3.5-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 3

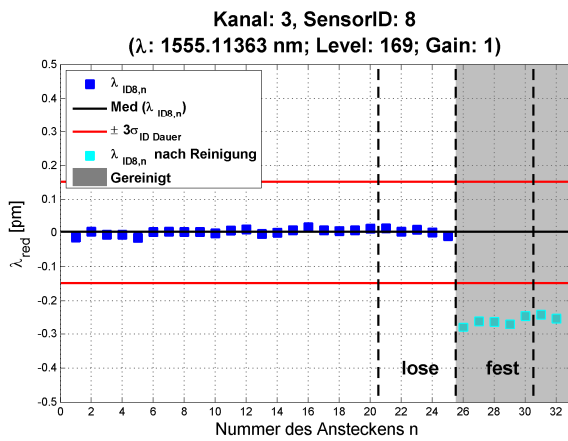
(m)



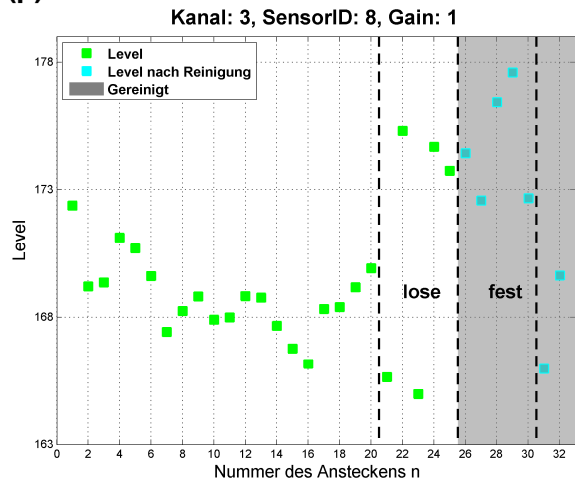
(n)



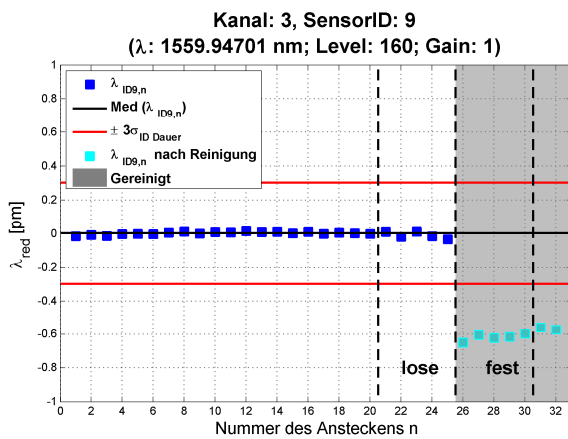
(o)



(p)



(q)



(r)

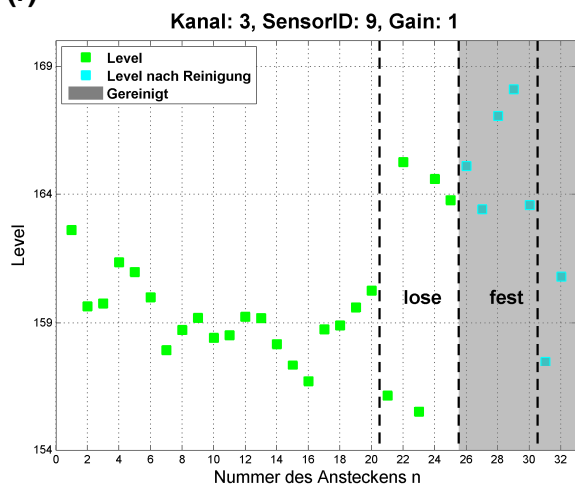
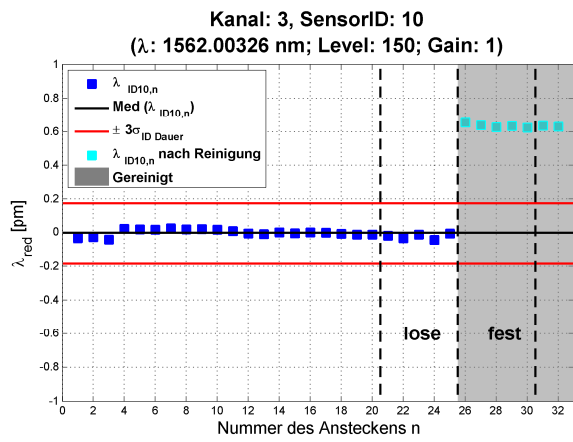


Abbildung B.3.5-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 3

(s)



(t)

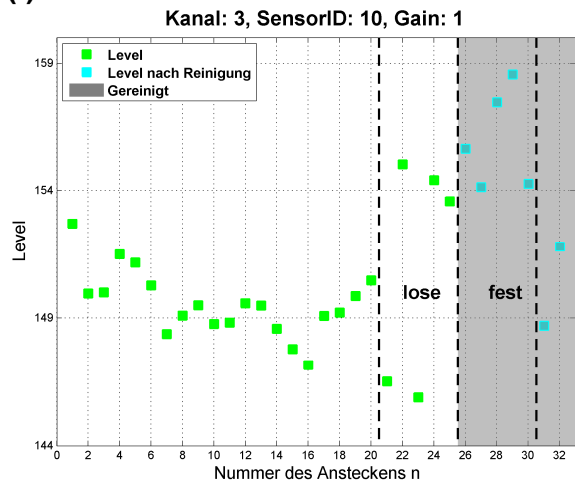
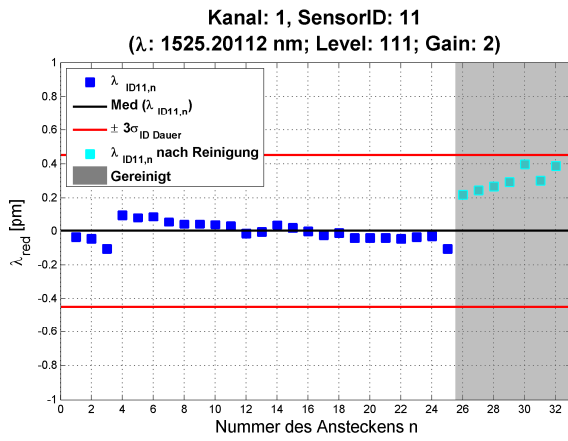


Abbildung B.3.5-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 3

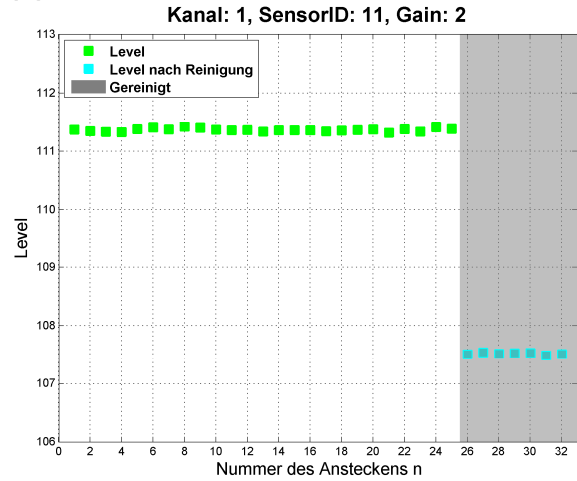


**B.3.6 Zu B.3.5 gehörige Ergebnisse der Kontrollsensoren (FBGiaB#2 auf Kanal 1)**

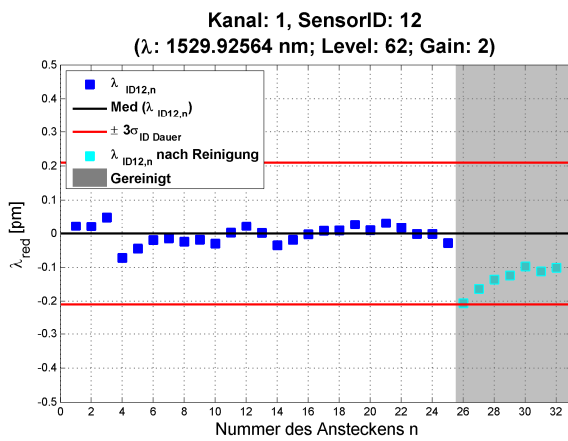
(a)



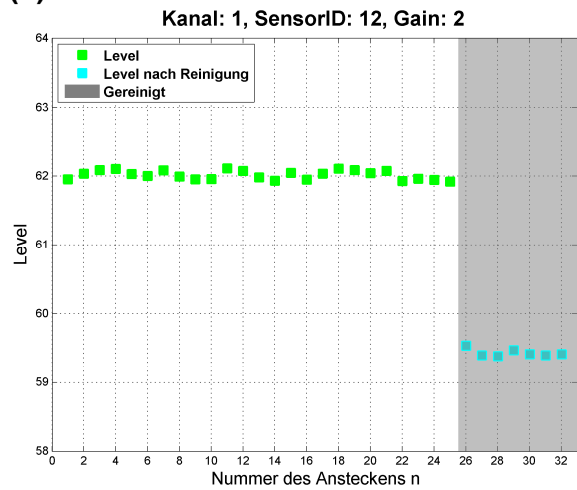
(b)



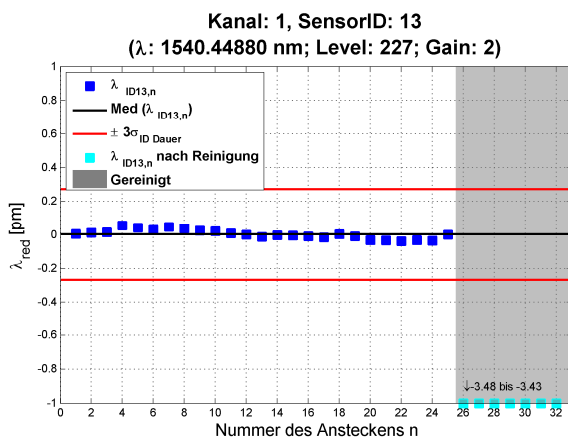
(c)



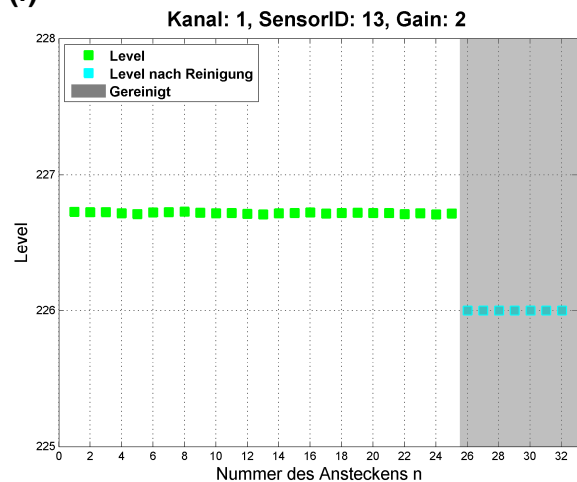
(d)



(e)

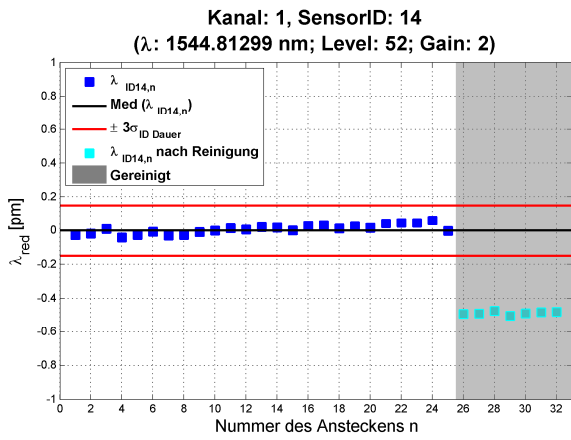


(f)

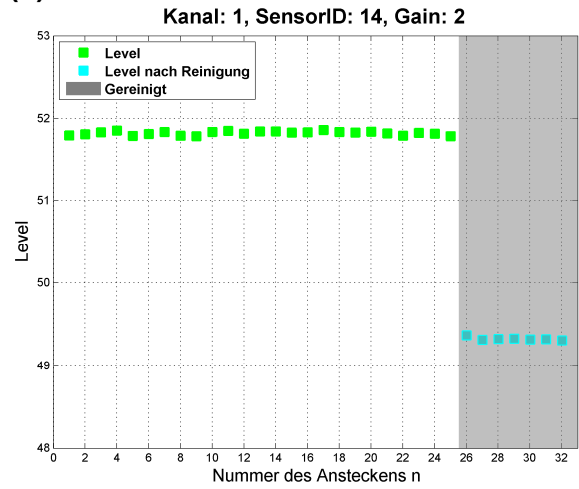


**Abbildung B.3.6-1: Zu B.3.5 gehörige Kontrollsensoren FBGiaB#2 auf Kanal 1**

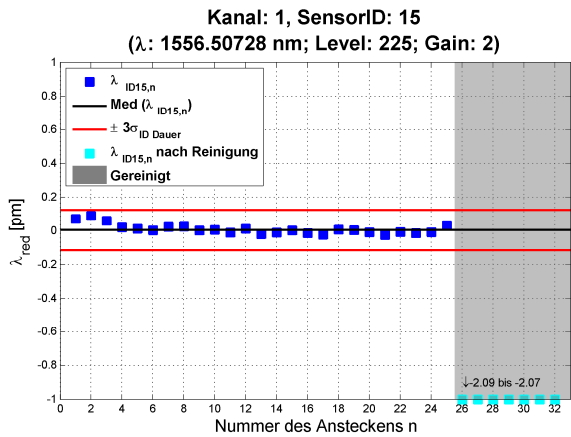
(g)



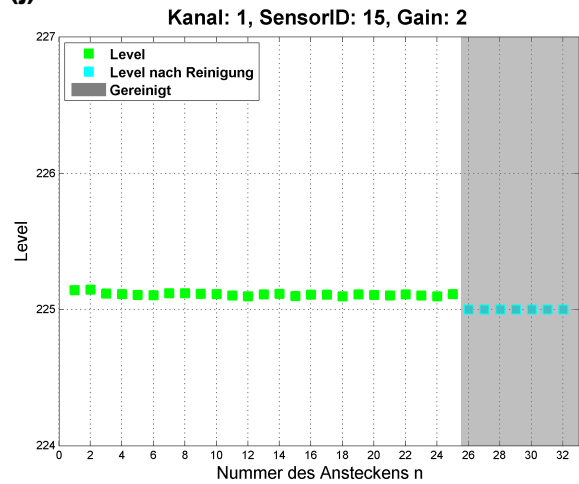
(h)



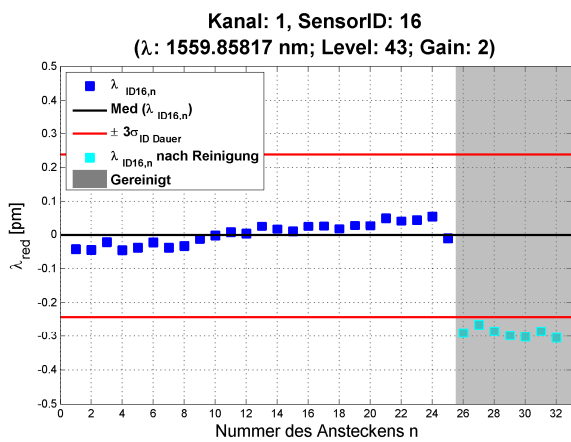
(i)



(j)



(k)



(l)

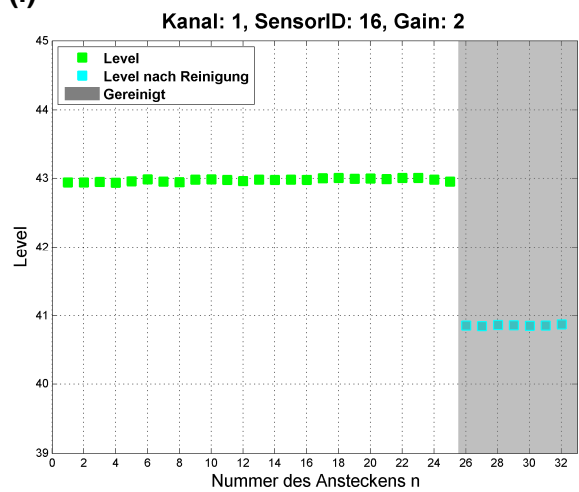
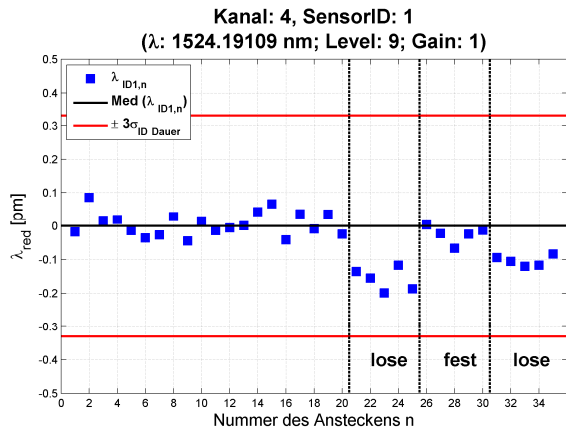


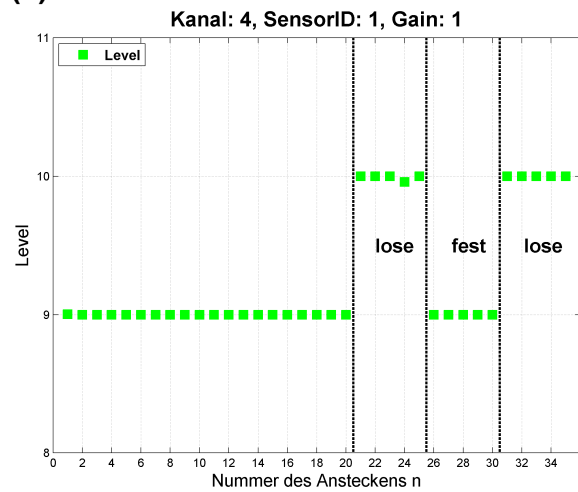
Abbildung B.3.6-1: Zu B.3.5 gehörige Kontrollsensoren FBG<sub>ia</sub>B#2 auf Kanal 1

## B.3.7 Ergebnisse des Umsteckens FBG#1 auf Kanal 4

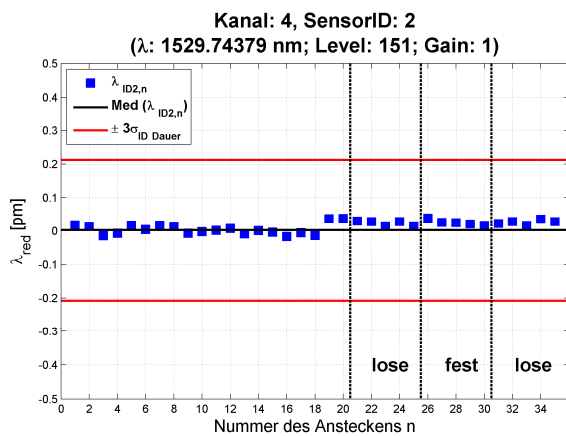
(a)



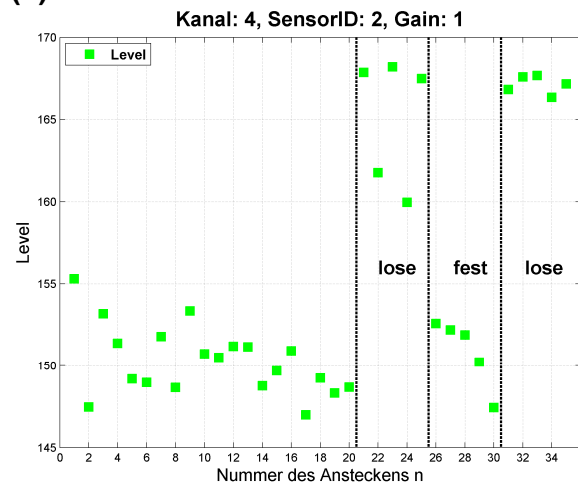
(b)



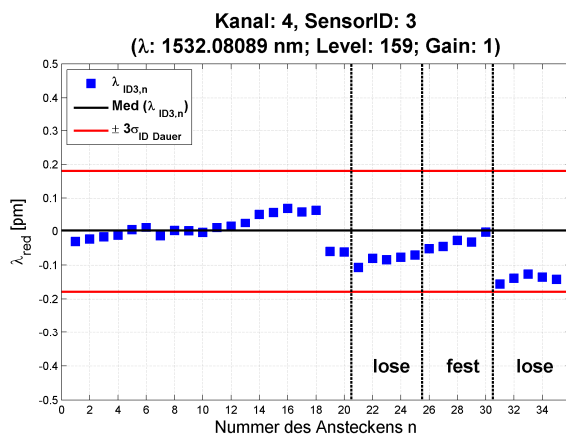
(c)



(d)



(e)



(f)

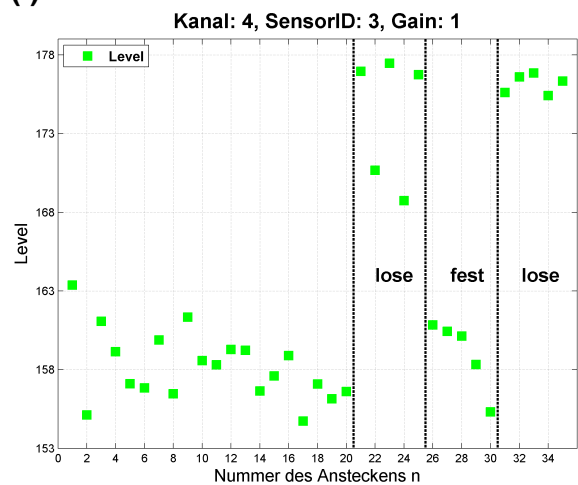
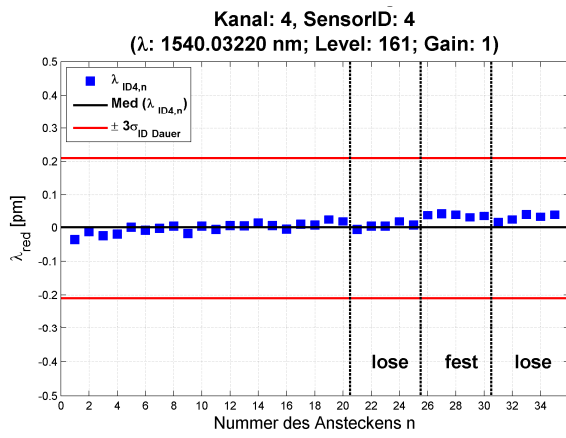
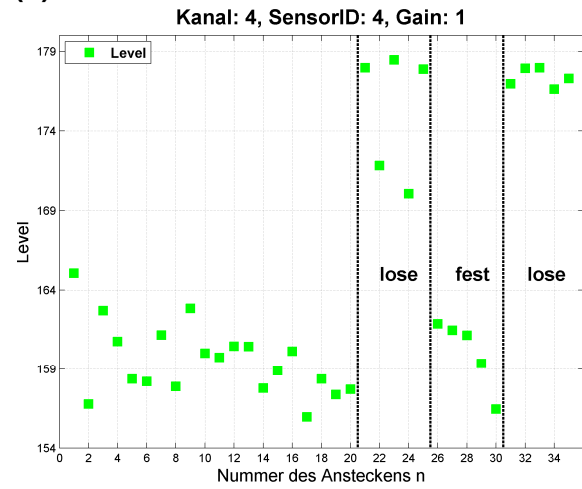


Abbildung B.3.7-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 4

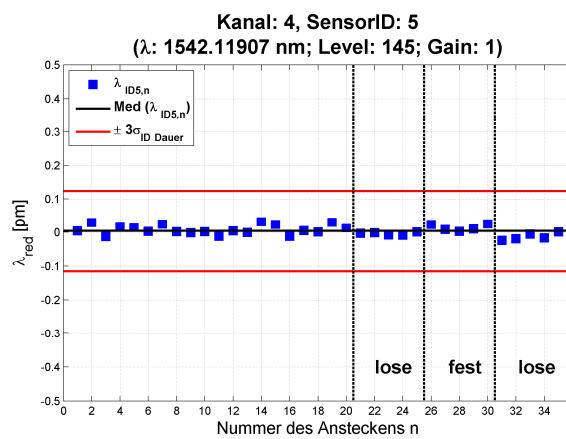
(g)



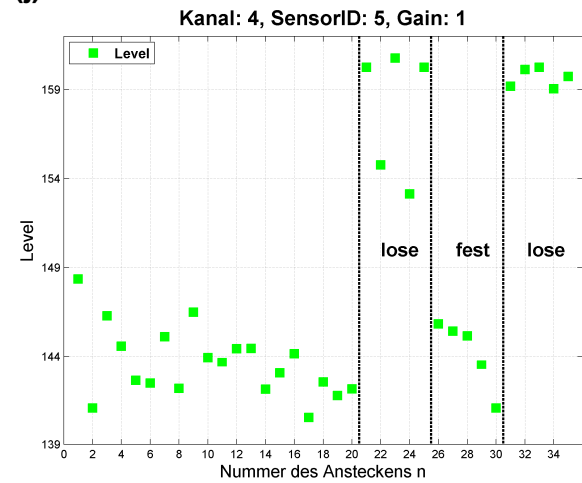
(h)



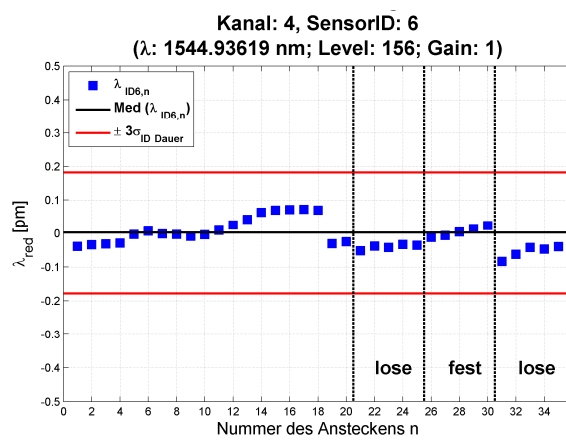
(i)



(j)



(k)



(l)

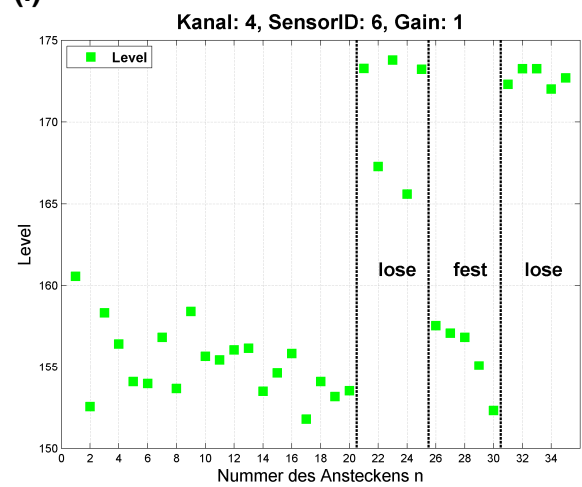
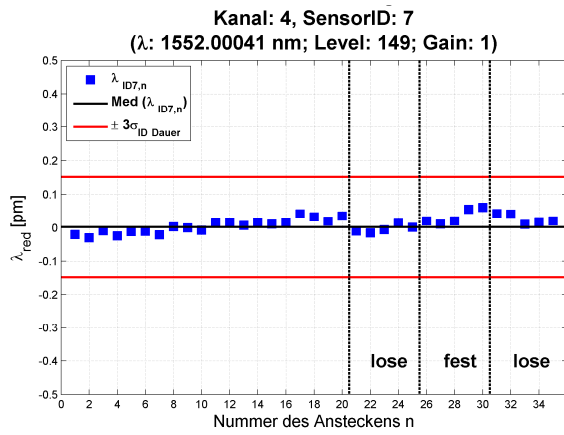
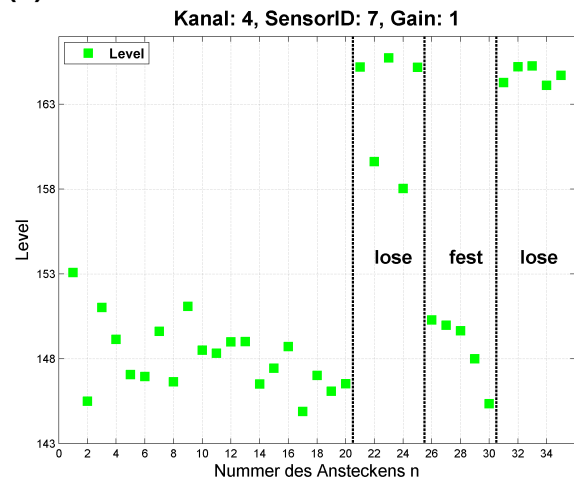


Abbildung B.3.7-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 4

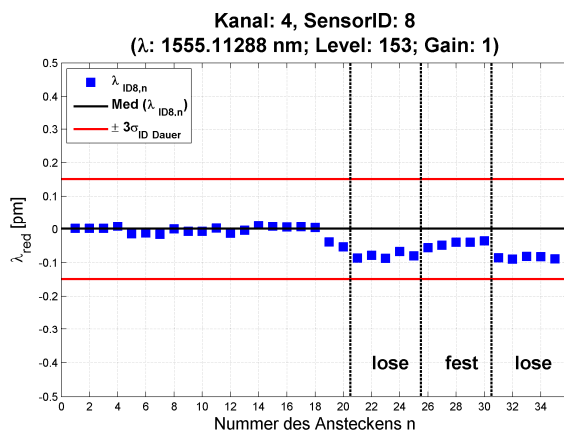
(m)



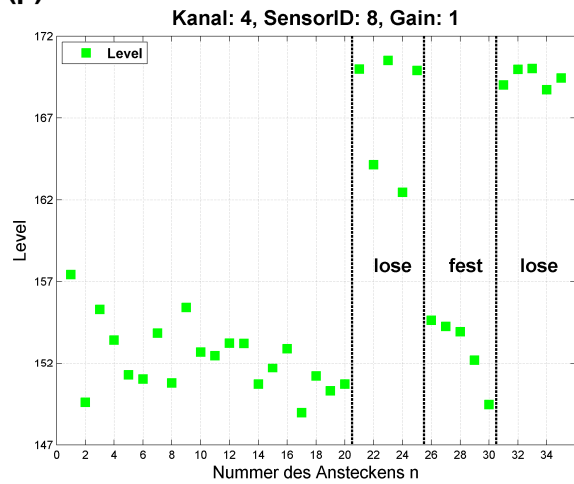
(n)



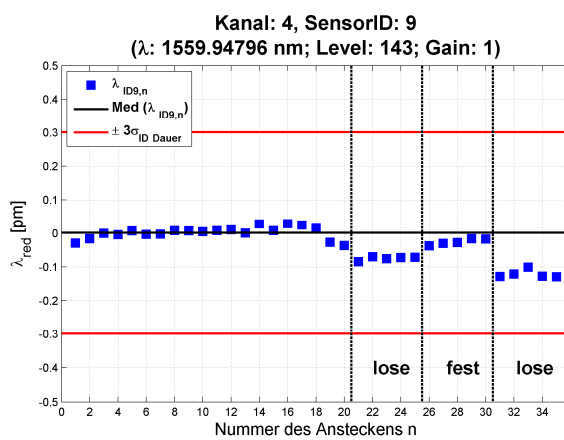
(o)



(p)



(q)



(r)

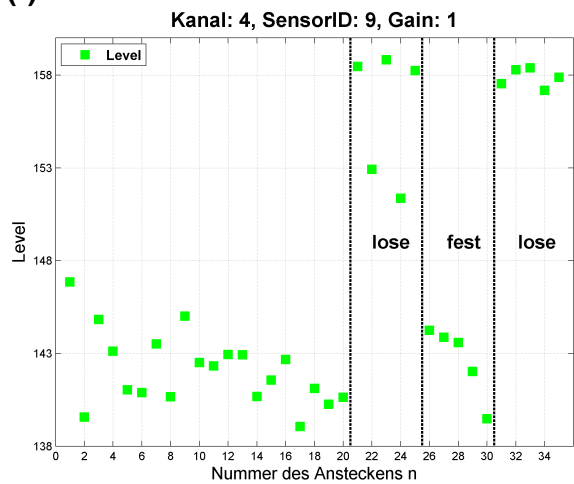
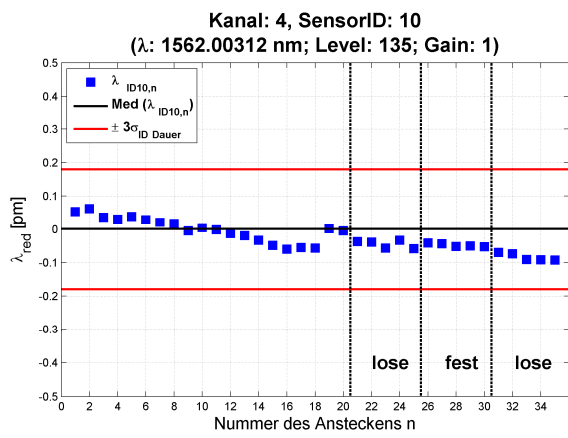


Abbildung B.3.7-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 4

(s)



(t)

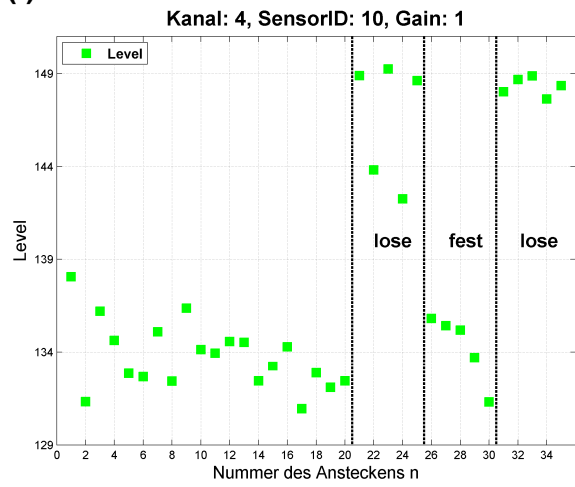
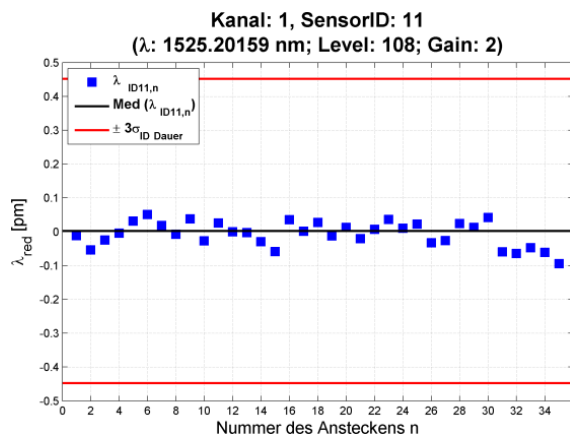


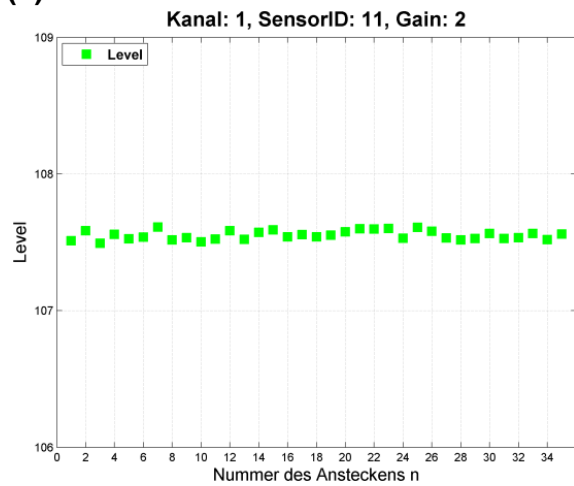
Abbildung B.3.7-1: Ergebnisse Faserzentrierung Kanal 4

## B.3.8 Zu B.3.7 gehörige Ergebnisse der Kontrollsensoren (FBGiaB#2 auf Kanal 1)

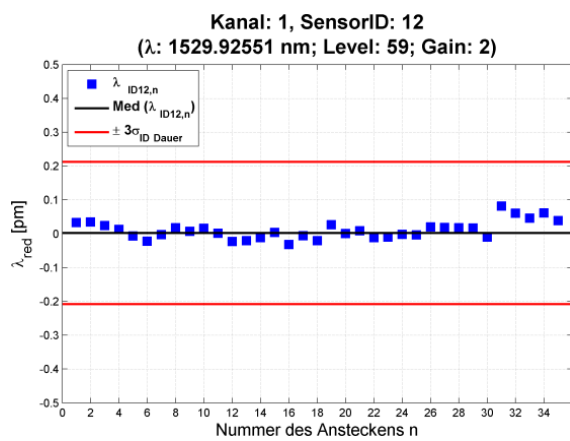
(a)



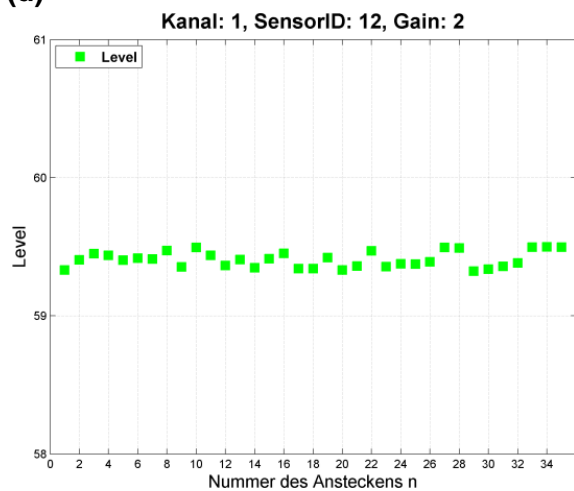
(b)



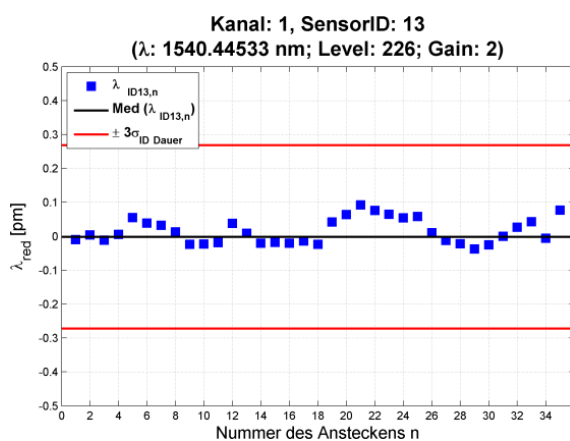
(c)



(d)



(e)



(f)

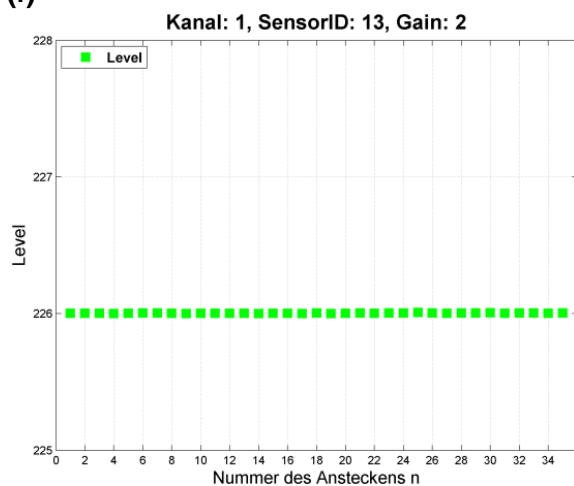
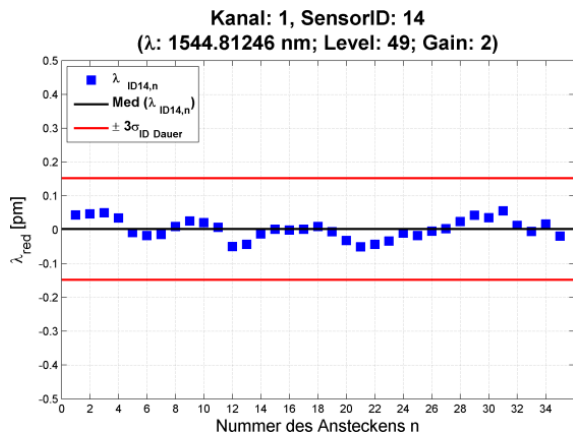
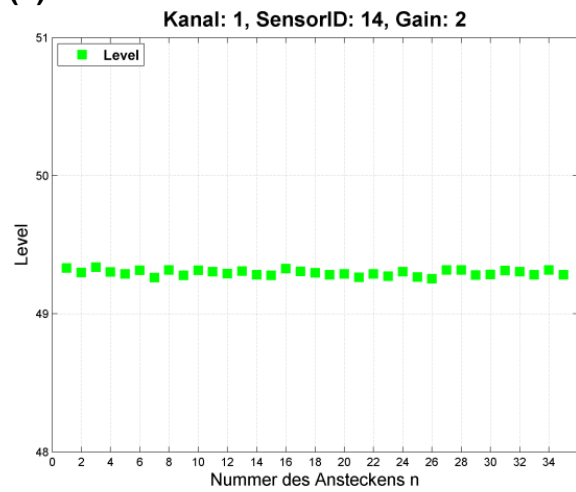


Abbildung B.3.8-1: Zu B.3.7 gehörige Kontrollsensoren FBGiaB#2 auf Kanal 1

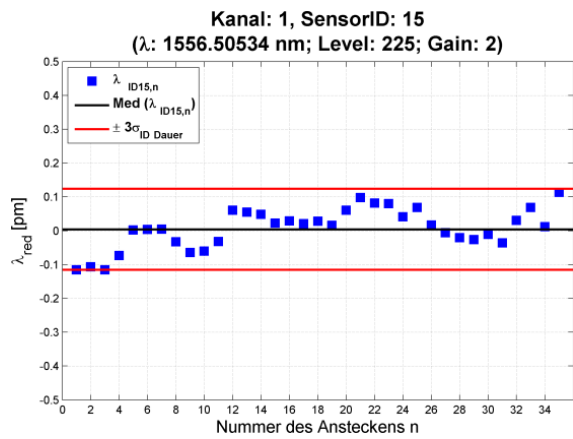
(g)



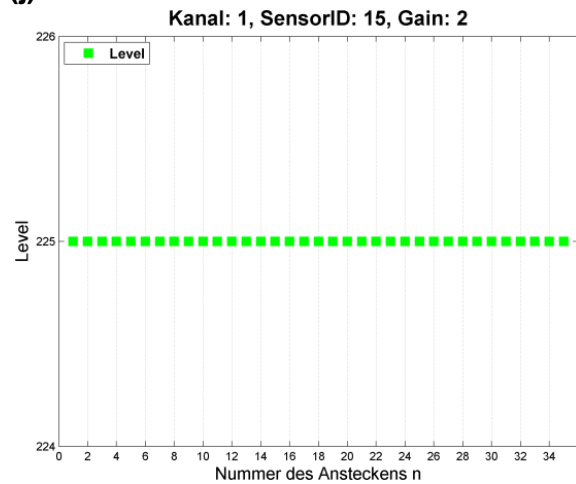
(h)



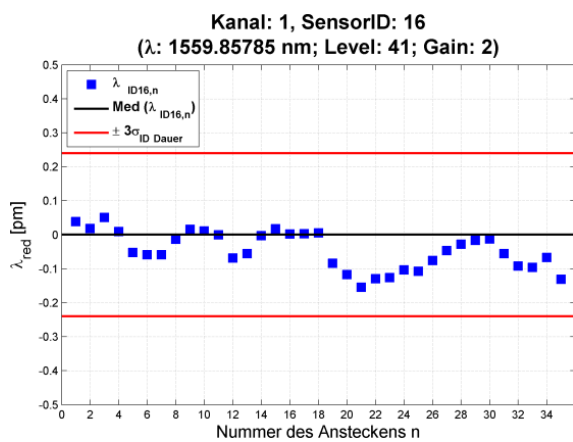
(i)



(j)



(k)



(l)

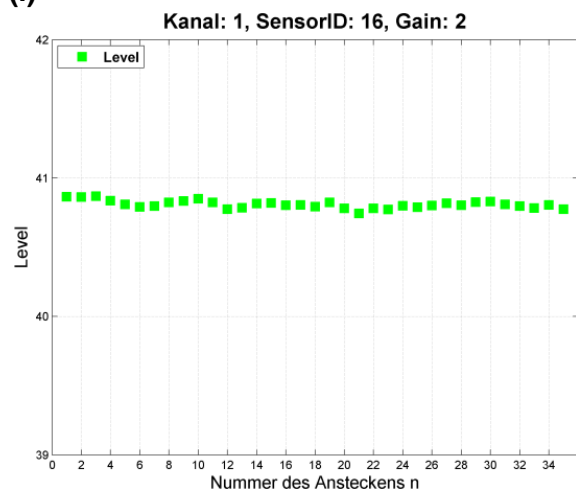


Abbildung B.3.8-1: Zu B.3.7 gehörige Kontrollsensoren FBGiaB#2 auf Kanal 1



## B.4 Faserzentrierung II

In Ergänzung zu den in Abschnitt 5.3 gezeigten Ergebnissen werden hier alle Daten der Sensoren ohne weitere Kommentare dargestellt.

### B.4.1 Faserzentrierung IIa

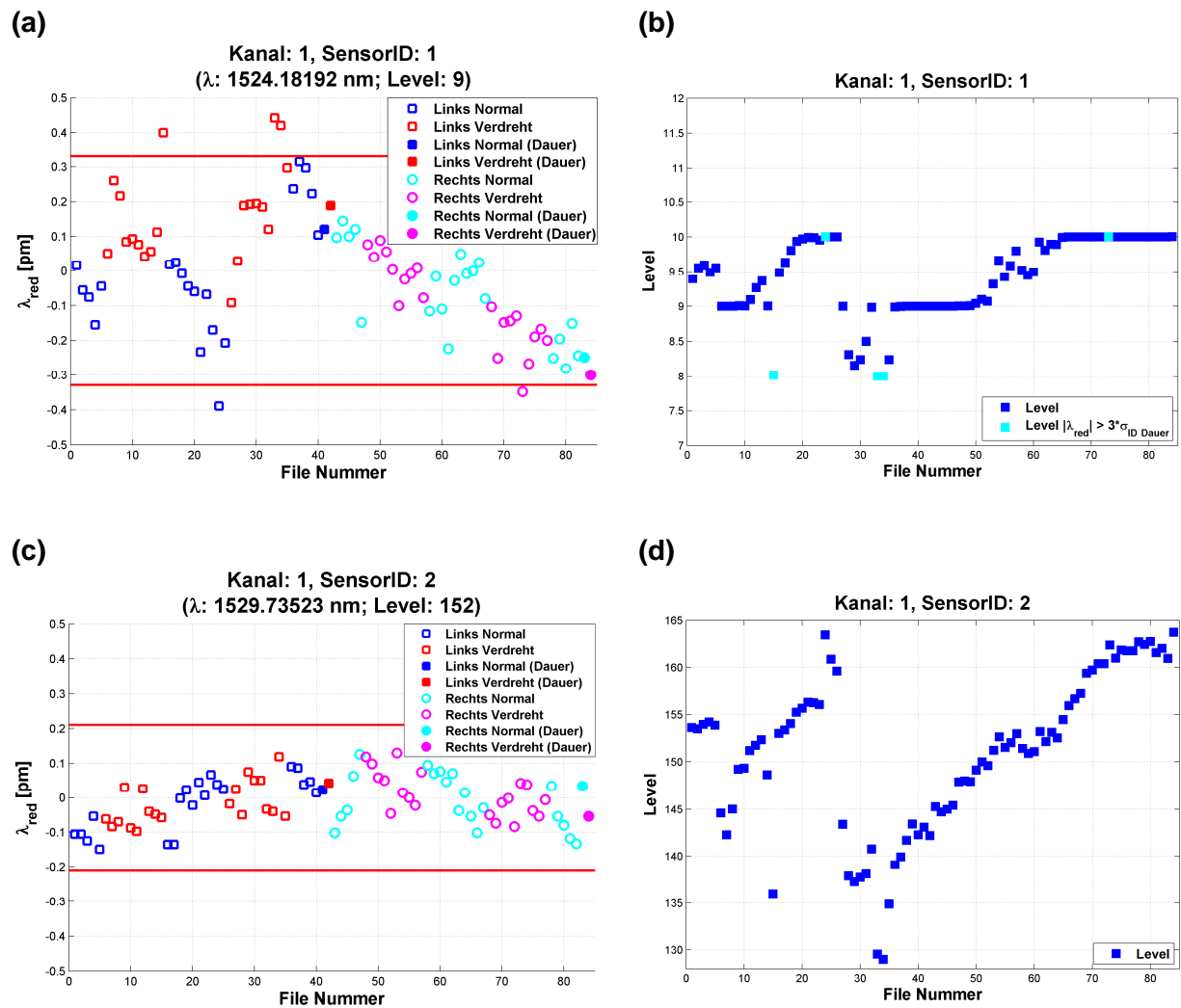


Abbildung B.4.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIa

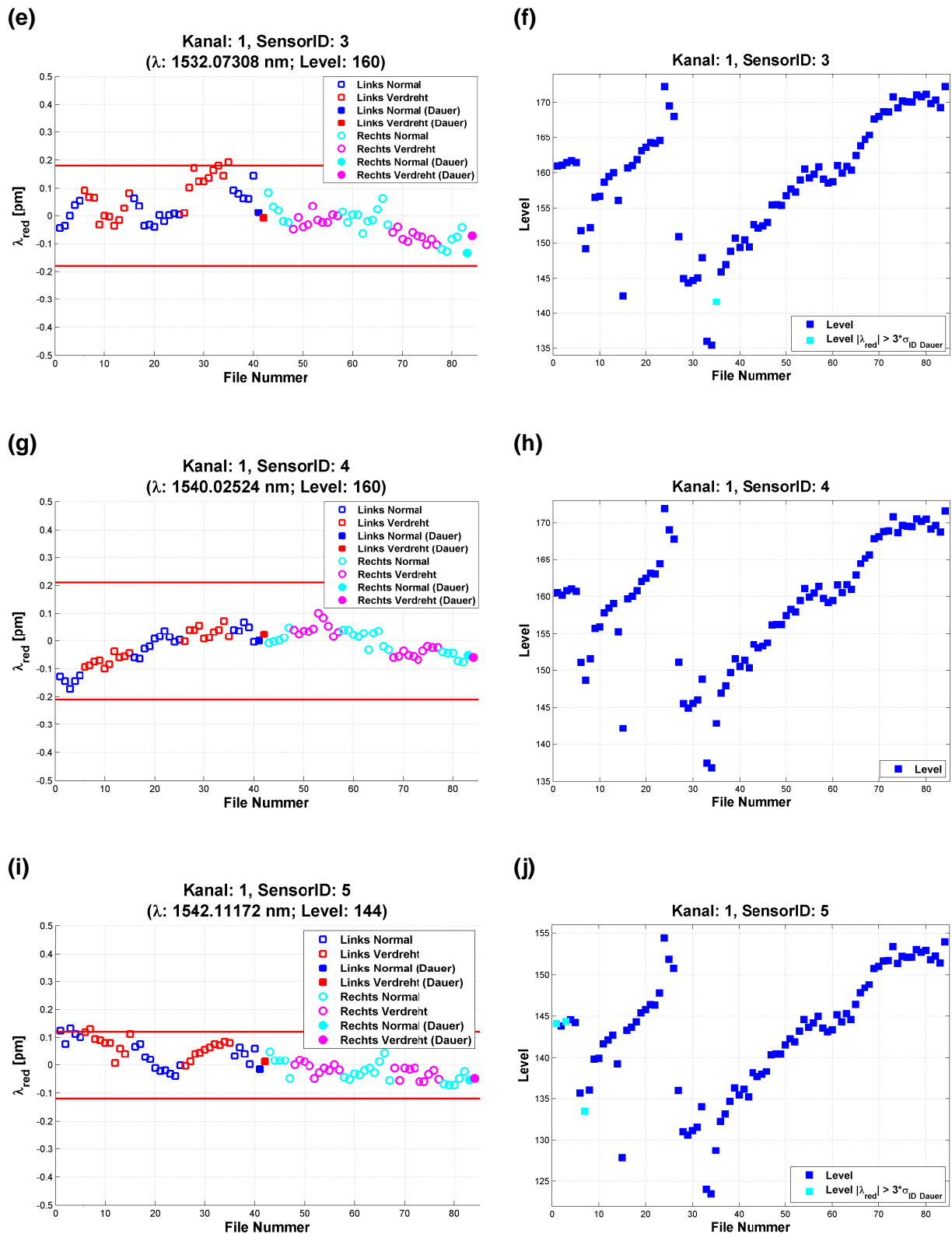
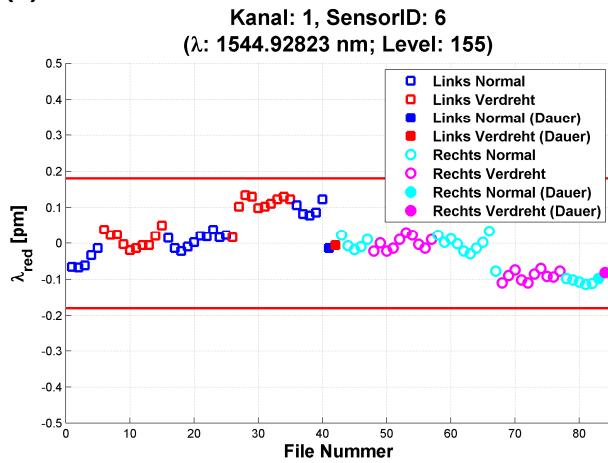
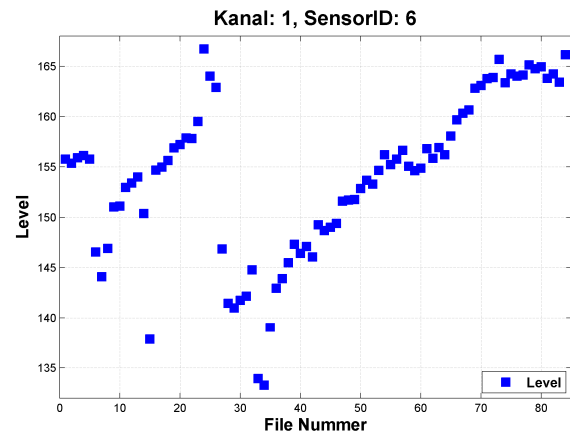


Abbildung B.4.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIa

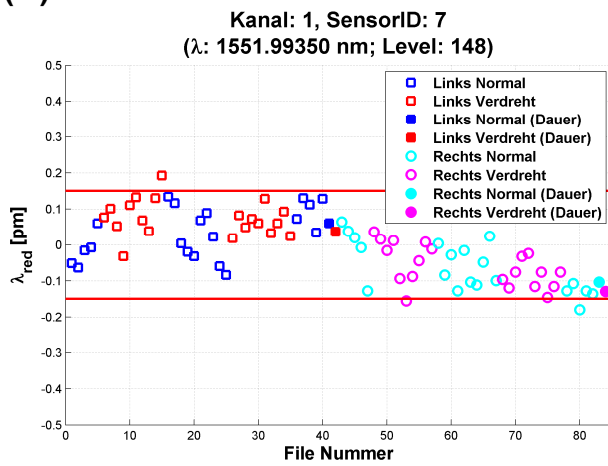
(k)



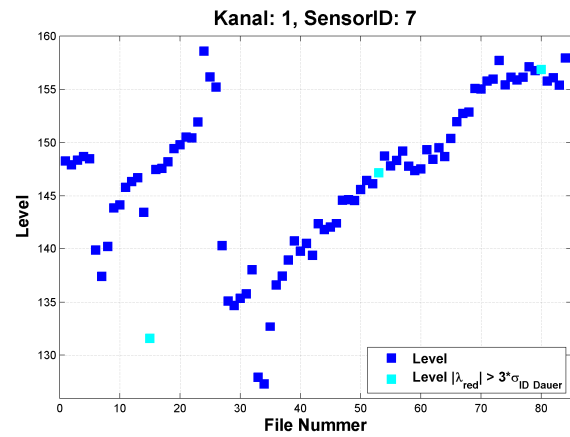
(l)



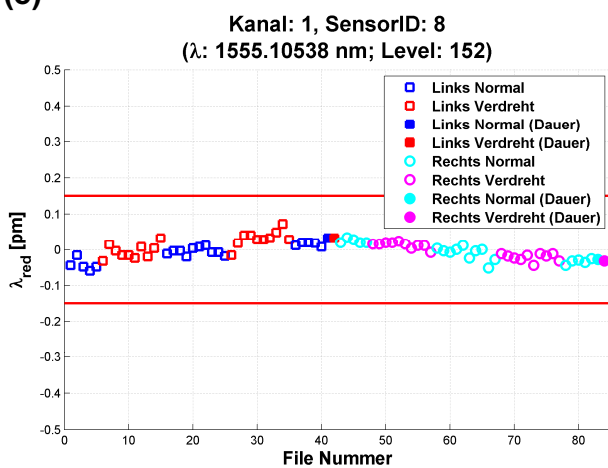
(m)



(n)



(o)



(p)

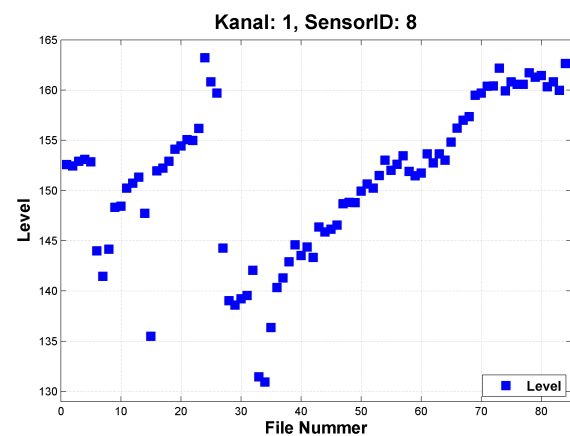
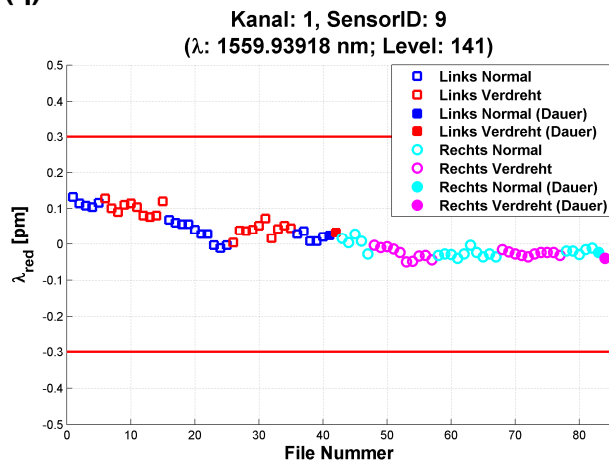
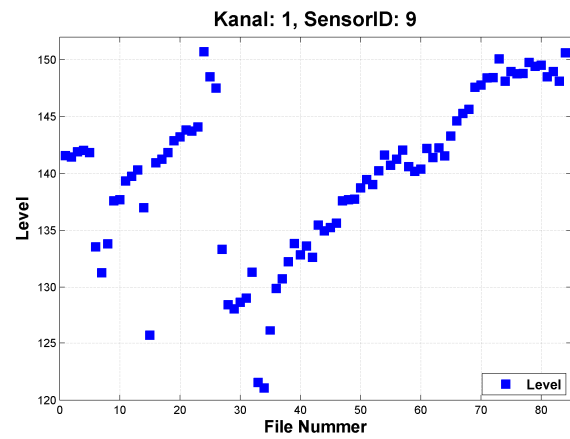


Abbildung B.4.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIa

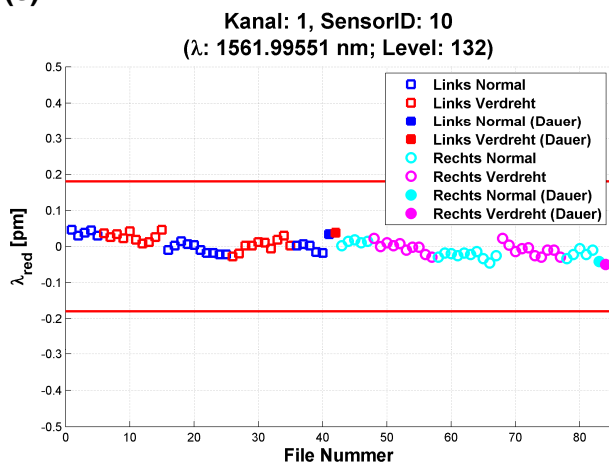
(q)



(r)



(s)



(t)

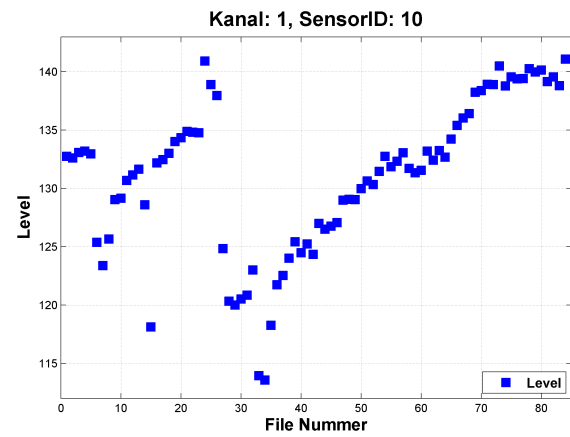


Abbildung B.4.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIa

## B.4.2 Faserzentrierung IIb

Hier werden ergänzend zu den in Abschnitt 5.3.3 gezeigten Ergebnissen die restlichen Daten der Sensoren dargestellt, die bei einer Verdrehung der Faser während der Datenaufzeichnung erzielt wurden. Da zwei *Mating Adapter* vorhanden sind, wurde diese Untersuchung in zweifacher Ausfertigung durchgeführt. Erst werden die Ergebnisse von MatingL (siehe Abbildung 51a) gezeigt und anschließend die von MatingR (siehe Abbildung 51b).

### B.4.2.1 MatingL

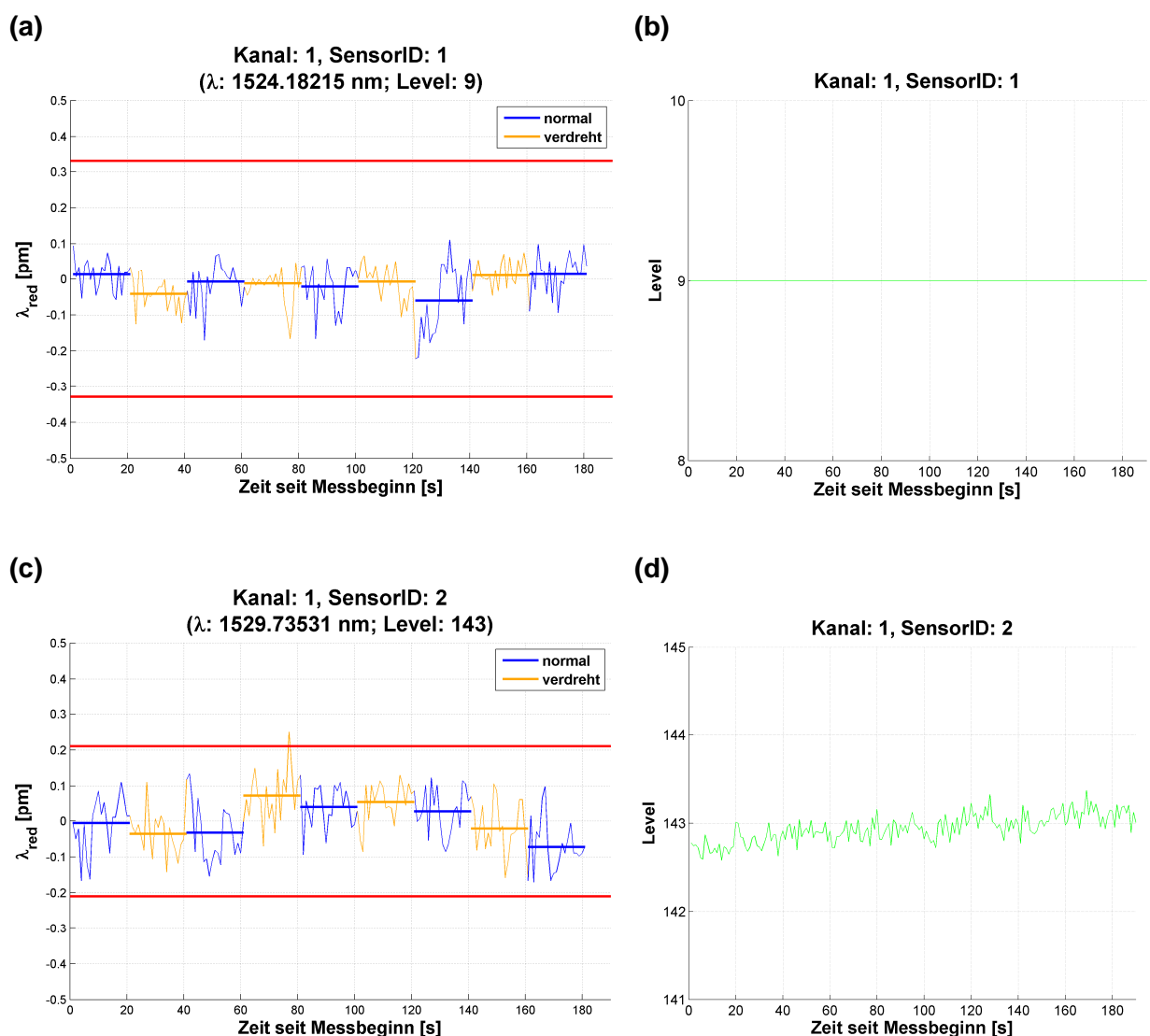


Abbildung B.4.2.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIb MatingL

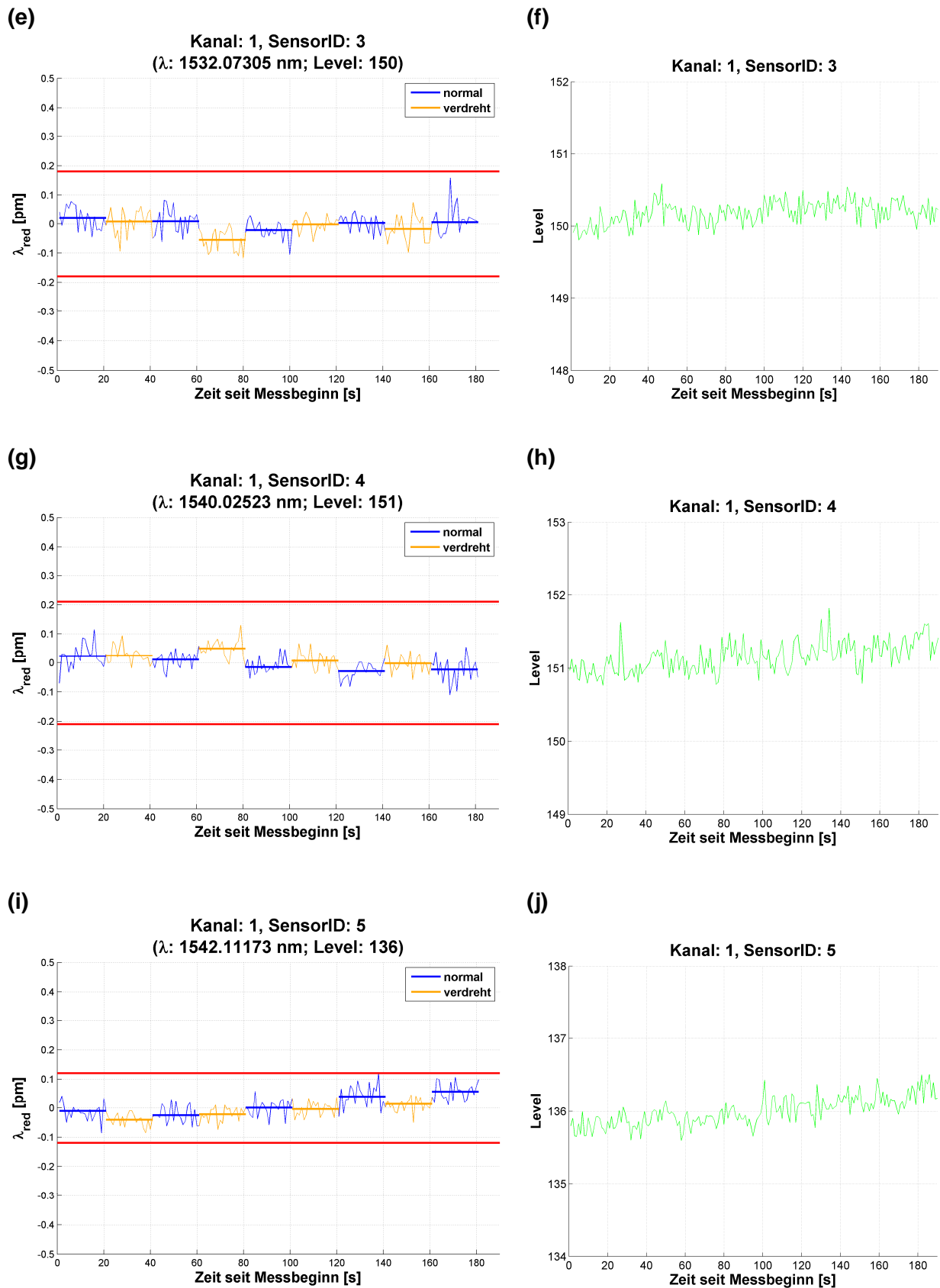
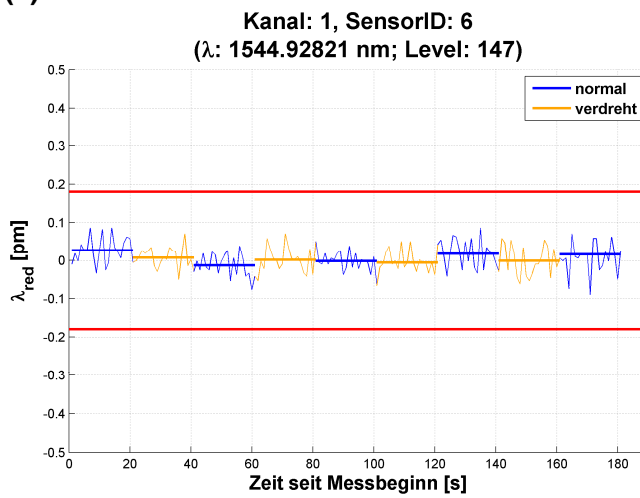
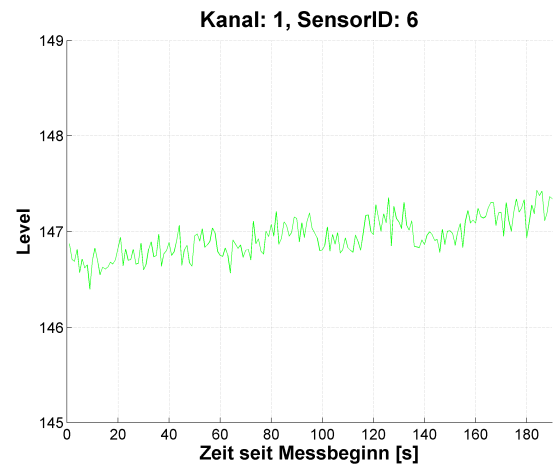


Abbildung B.4.2.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIb MatingL

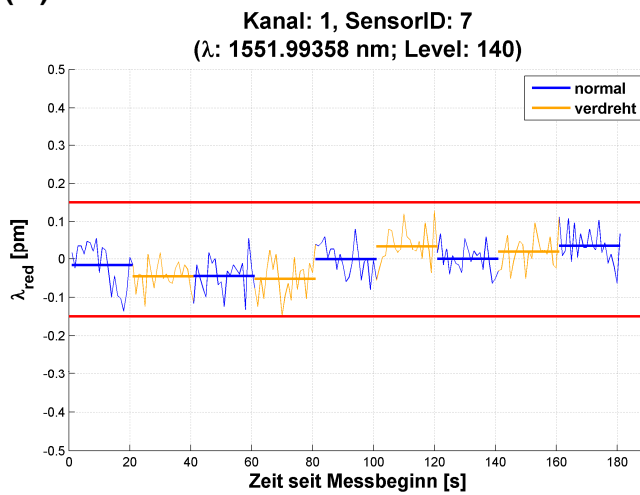
(k)



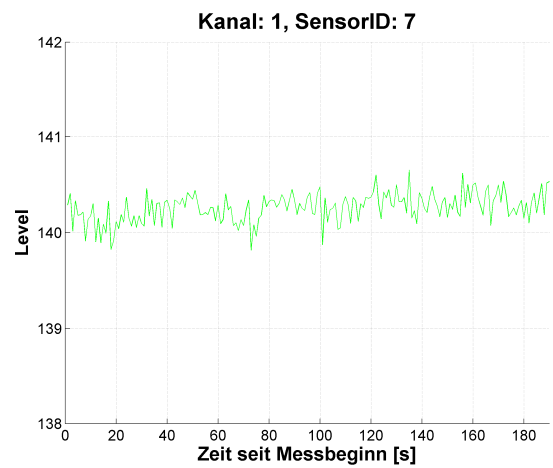
(l)



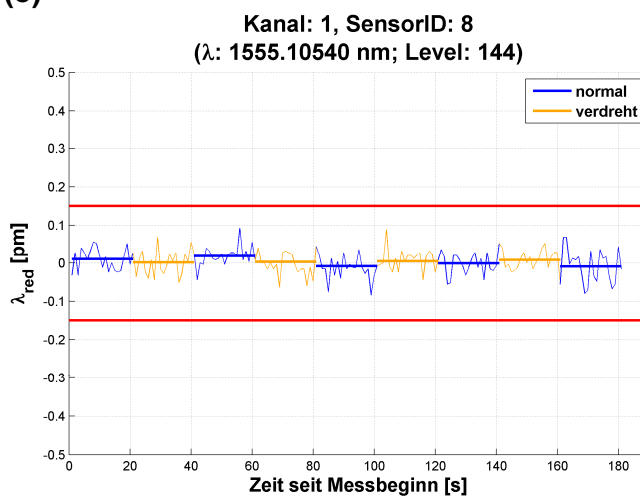
(m)



(n)



(o)



(p)

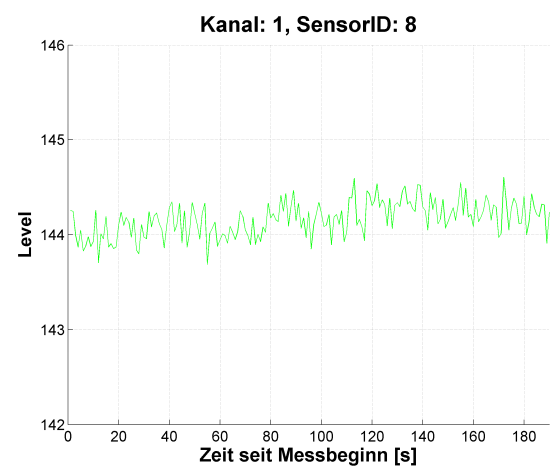
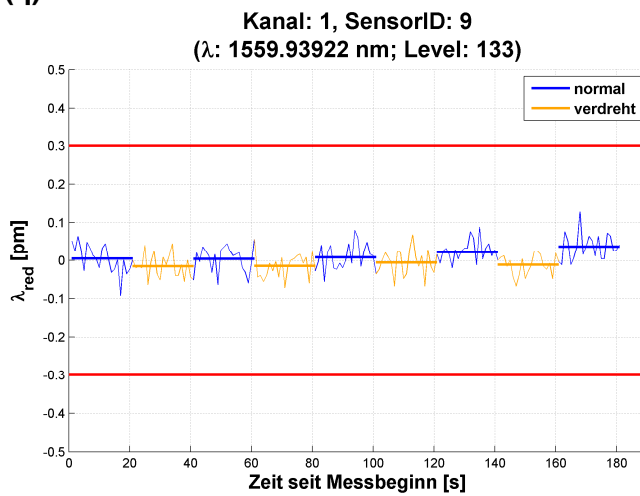
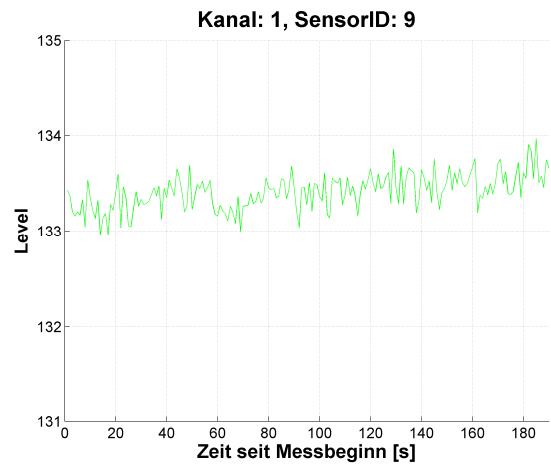


Abbildung B.4.2.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIb MatingL

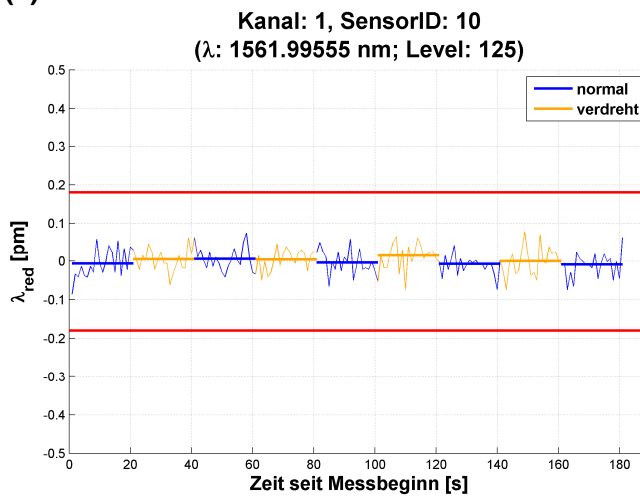
(q)



(r)



(s)



(t)

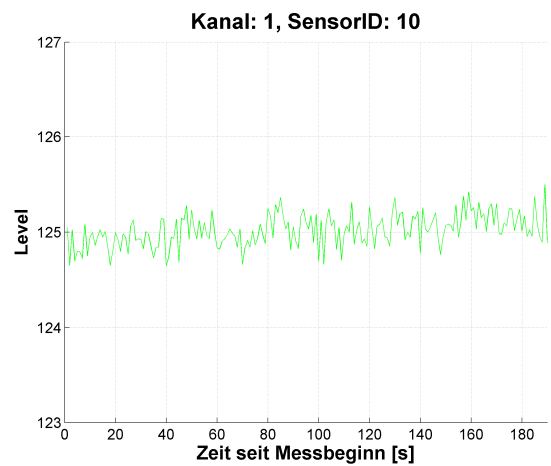


Abbildung B.4.2.1-1: Ergebnisse Faserzentrierung Ilb MatingL



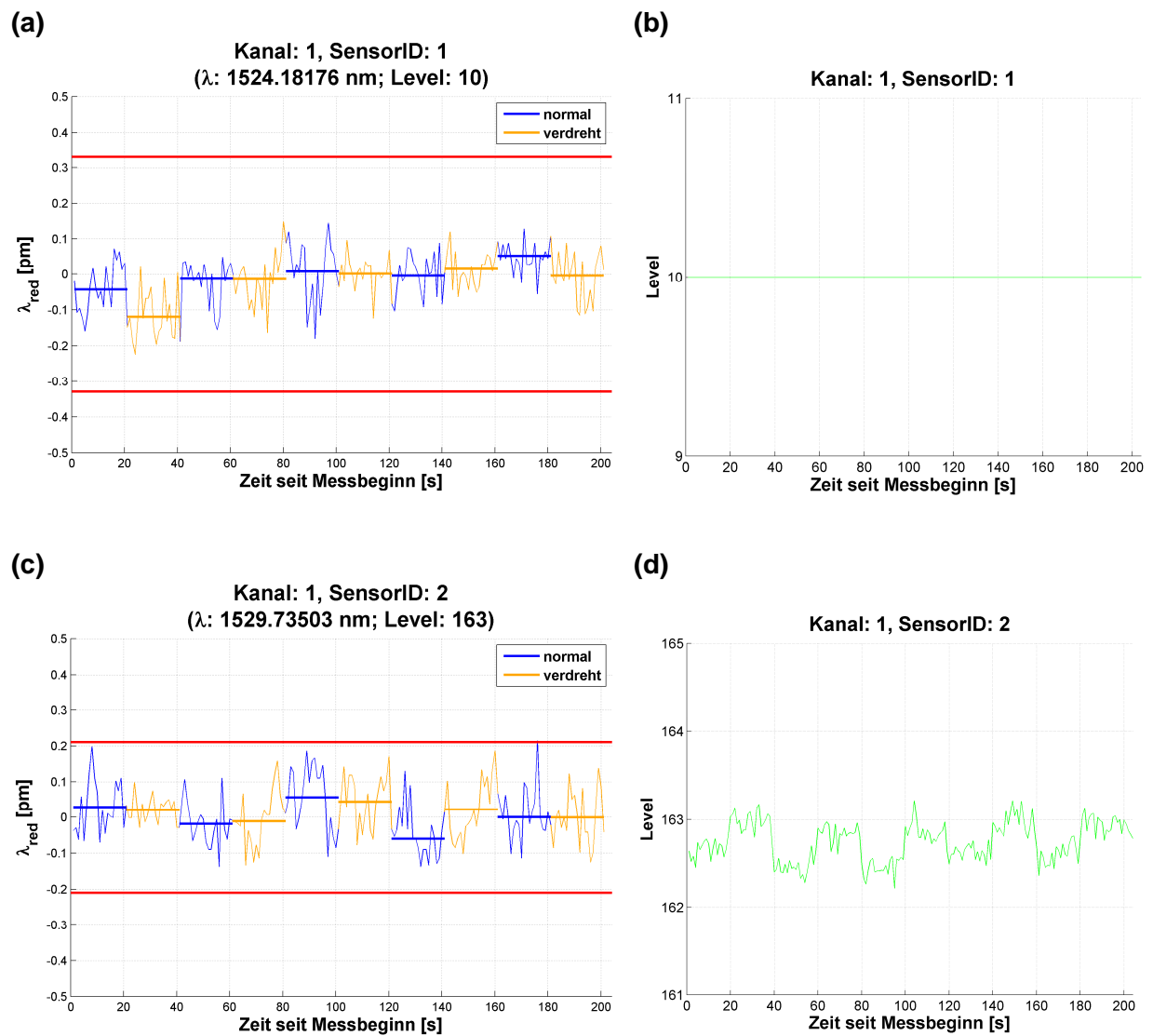
**B.4.2.2 MatingR**

Abbildung B.4.2.2-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIb MatingR

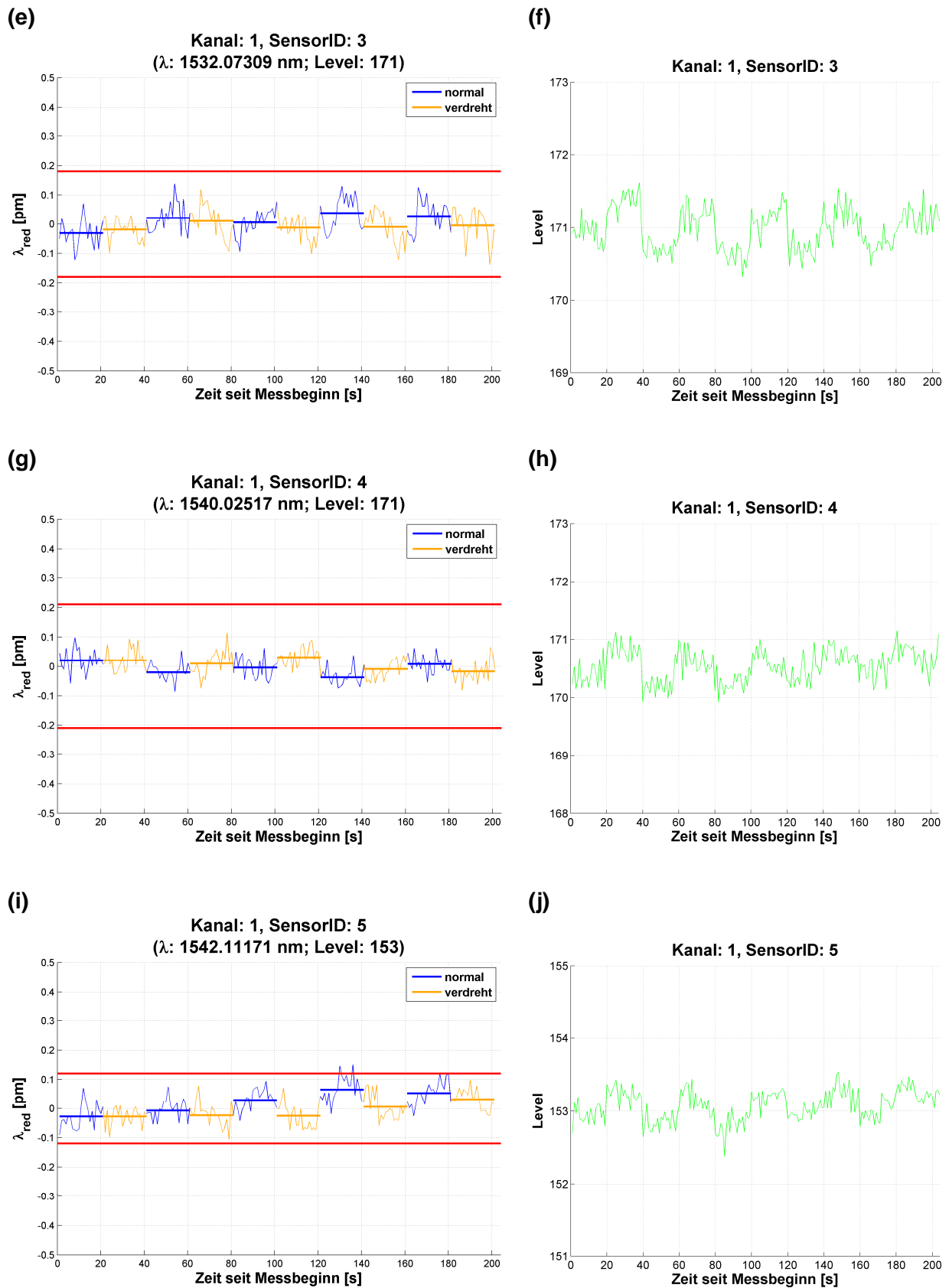
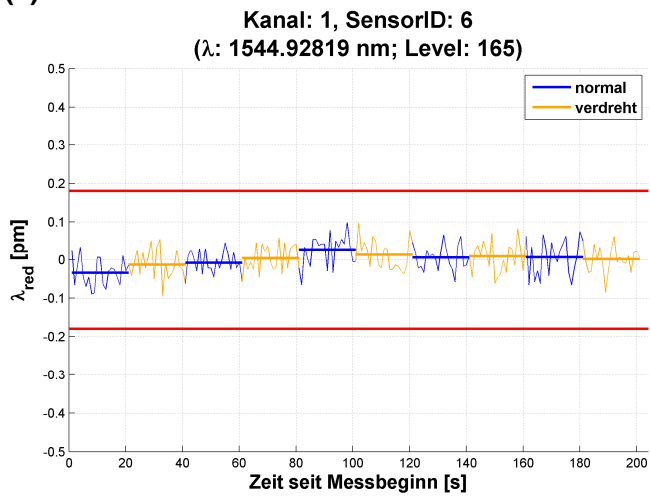
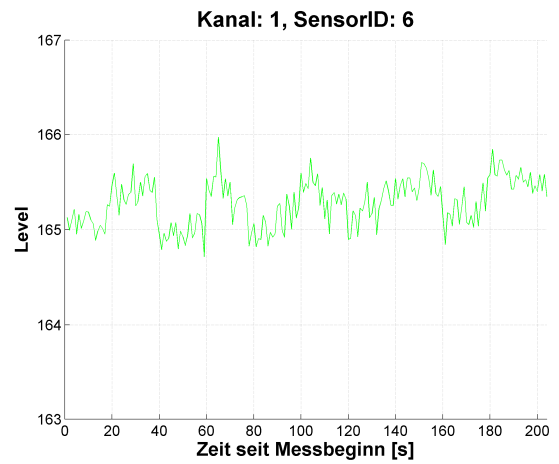


Abbildung B.4.2.2-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIb MatingR

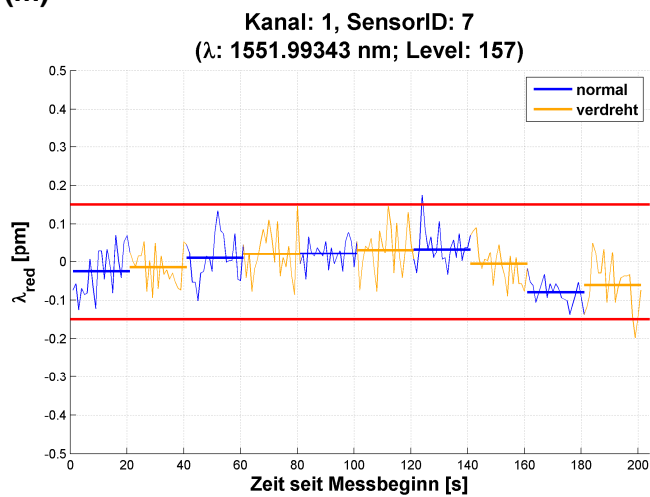
(k)



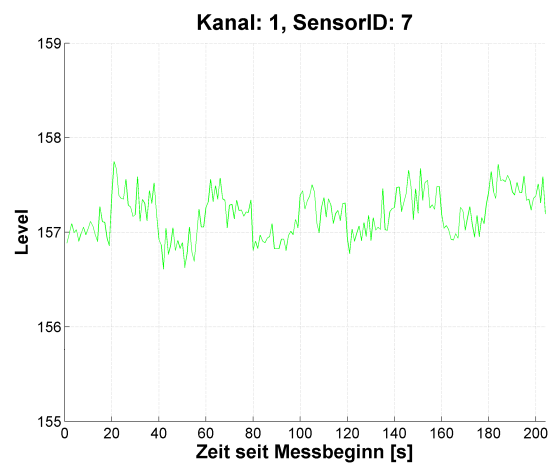
(l)



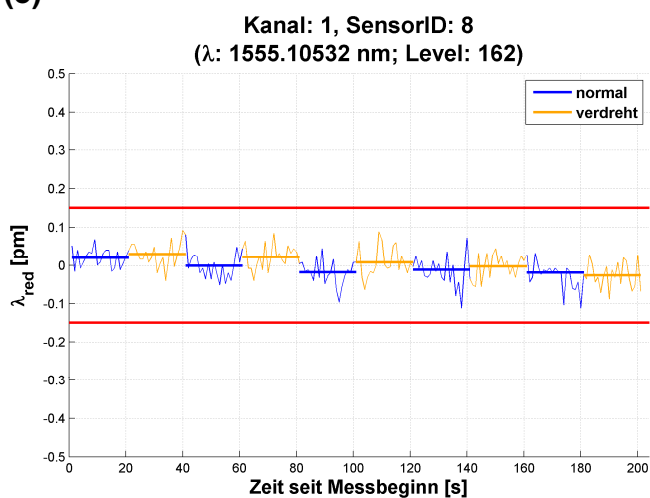
(m)



(n)



(o)



(p)

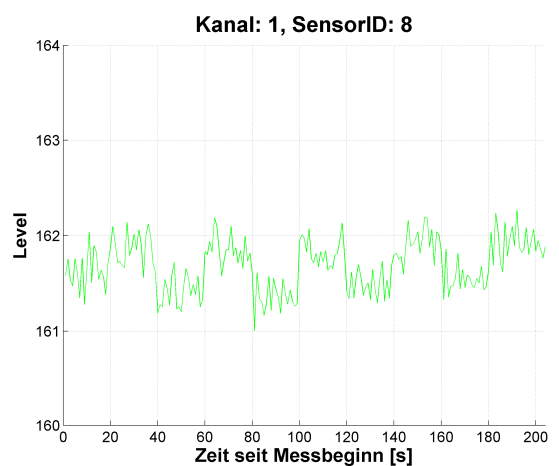
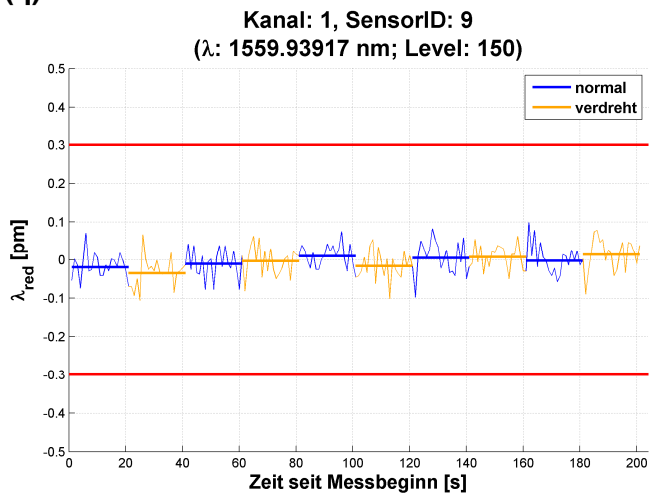
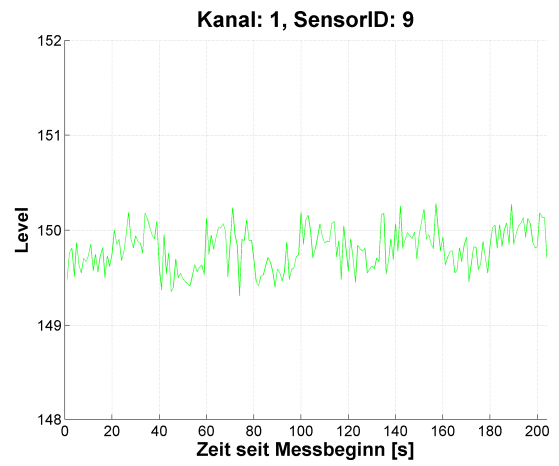


Abbildung B.4.2.2-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIb MatingR

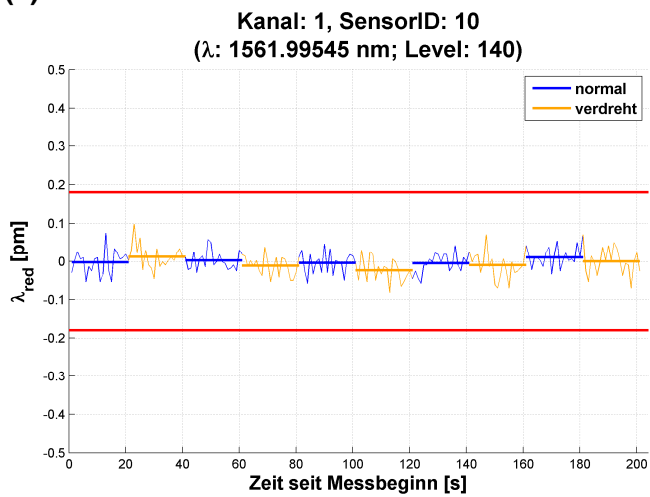
(q)



(r)



(s)



(t)

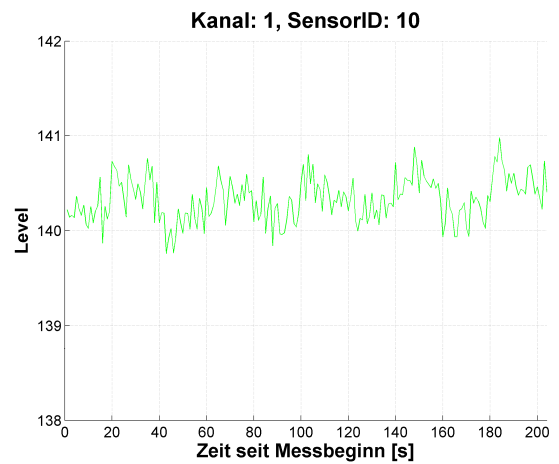


Abbildung B.4.2.2-1: Ergebnisse Faserzentrierung IIb MatingR

## B.5 Signaldämpfung

Um einen Überblick über die erzielten Ergebnisse zu geben, werden alle Sensoren wie in Abschnitt 5.4 beschrieben dargestellt ohne diese weiter zu kommentieren.

### B.5.1 Analyse der Levelabnahme pro Wicklung

Zu beachten ist in diesem Abschnitt die gewählte logarithmische Achsenskalierung der Ordinatenachse.

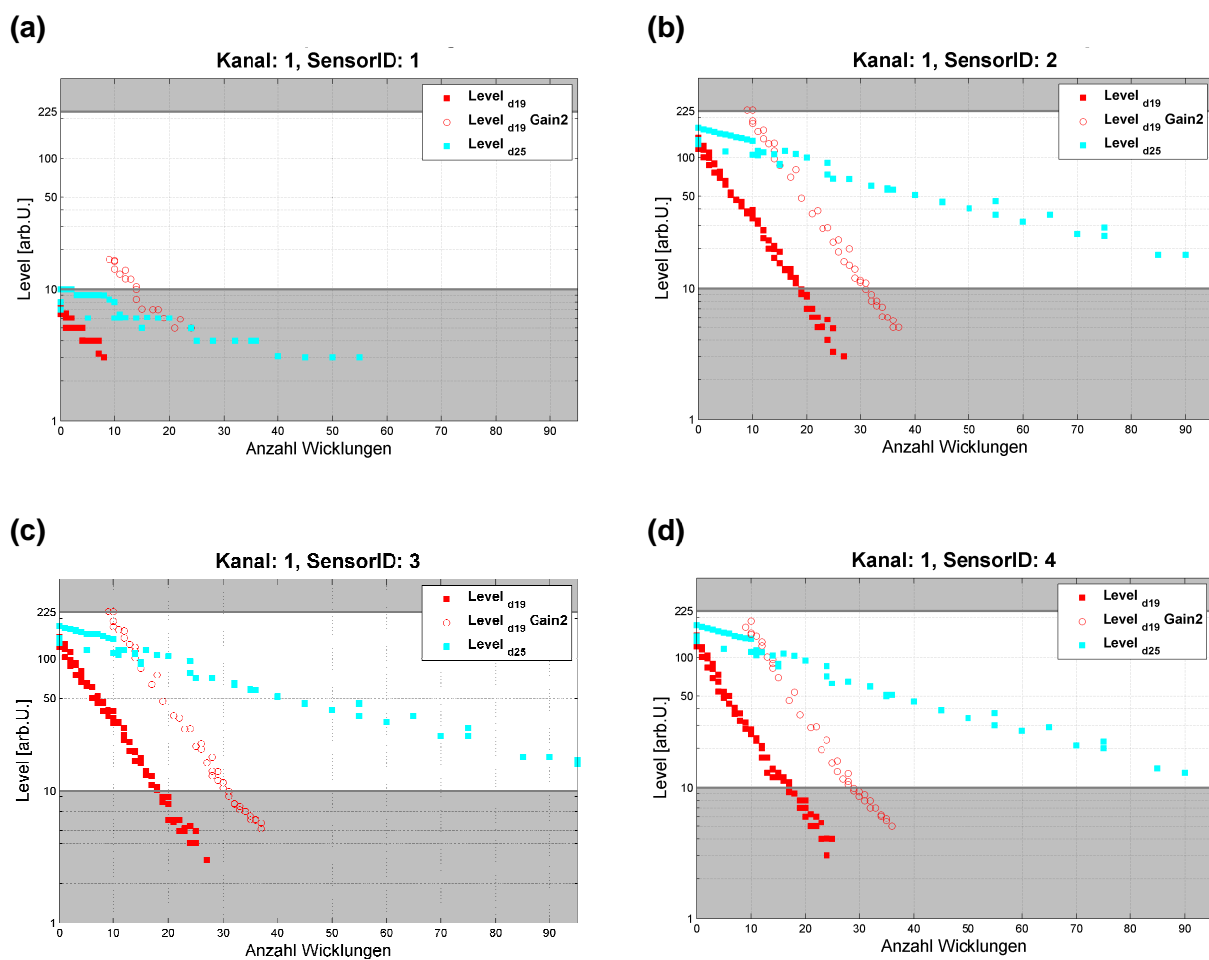


Abbildung B.5.1-1: Analyse Levelabnahme pro Wicklung

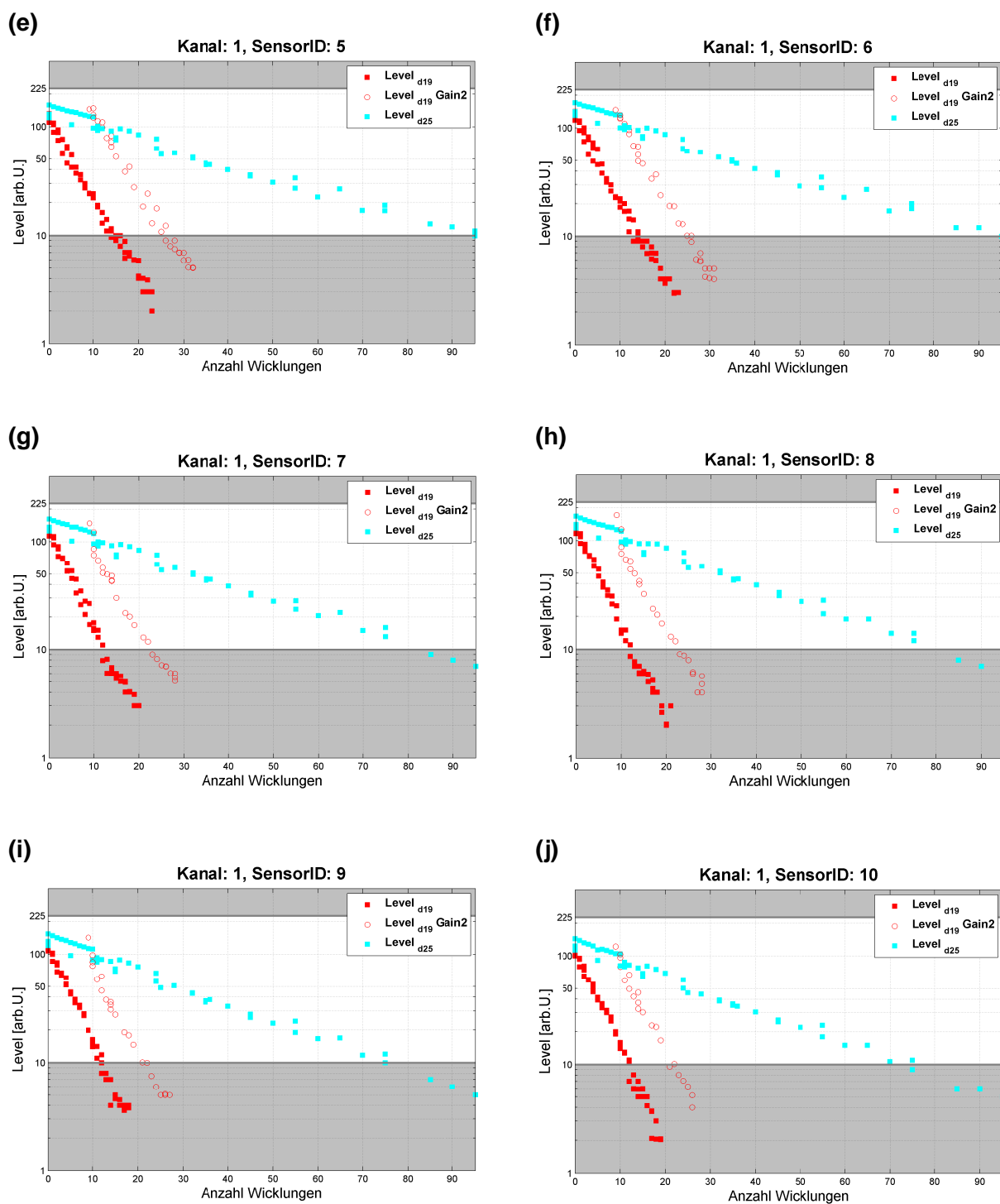


Abbildung B.5.1-1: Analyse Levelabnahme pro Wicklung

## B.5.2 Analyse der Braggwellenlänge in Abhängigkeit des Levels

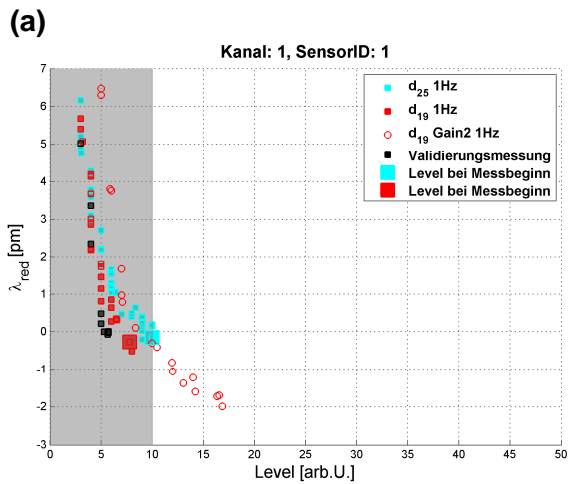


Abbildung B.5.2-1: Wellenlängenabhängigkeit der Sensoren des Herstellers FBGS (5mm Länge, Ormocer Beschichtung, Gain = 1) vom Level (Rohrdurchmesser  $\varnothing$  19 und 25mm)

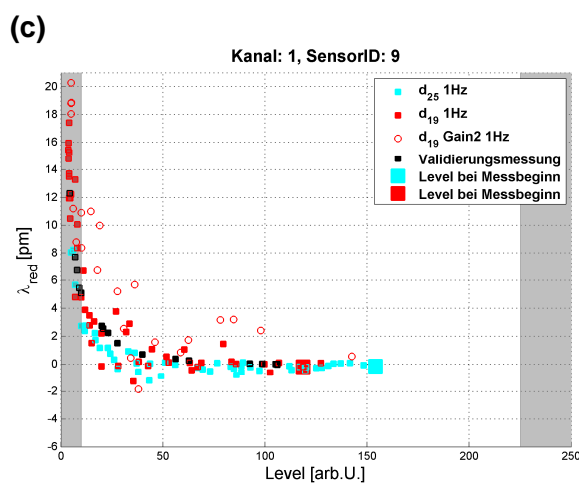
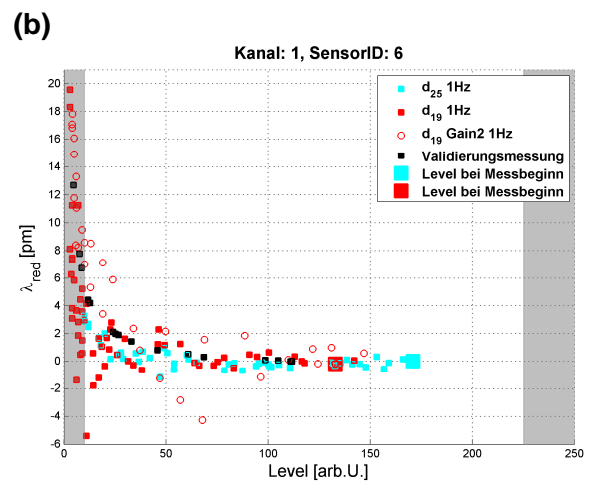
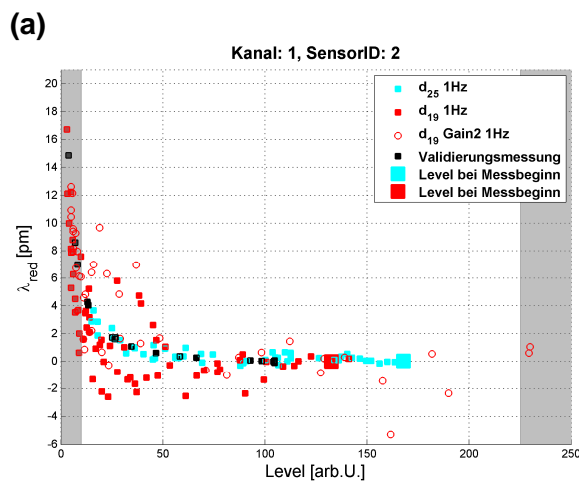


Abbildung B.5.2-2: Wellenlängenabhängigkeit der Sensoren des Herstellers Welltech (5mm Länge, Acrylat Beschichtung, Gain = 1) vom Level (Rohrdurchmesser  $\varnothing$  19 und 25mm)

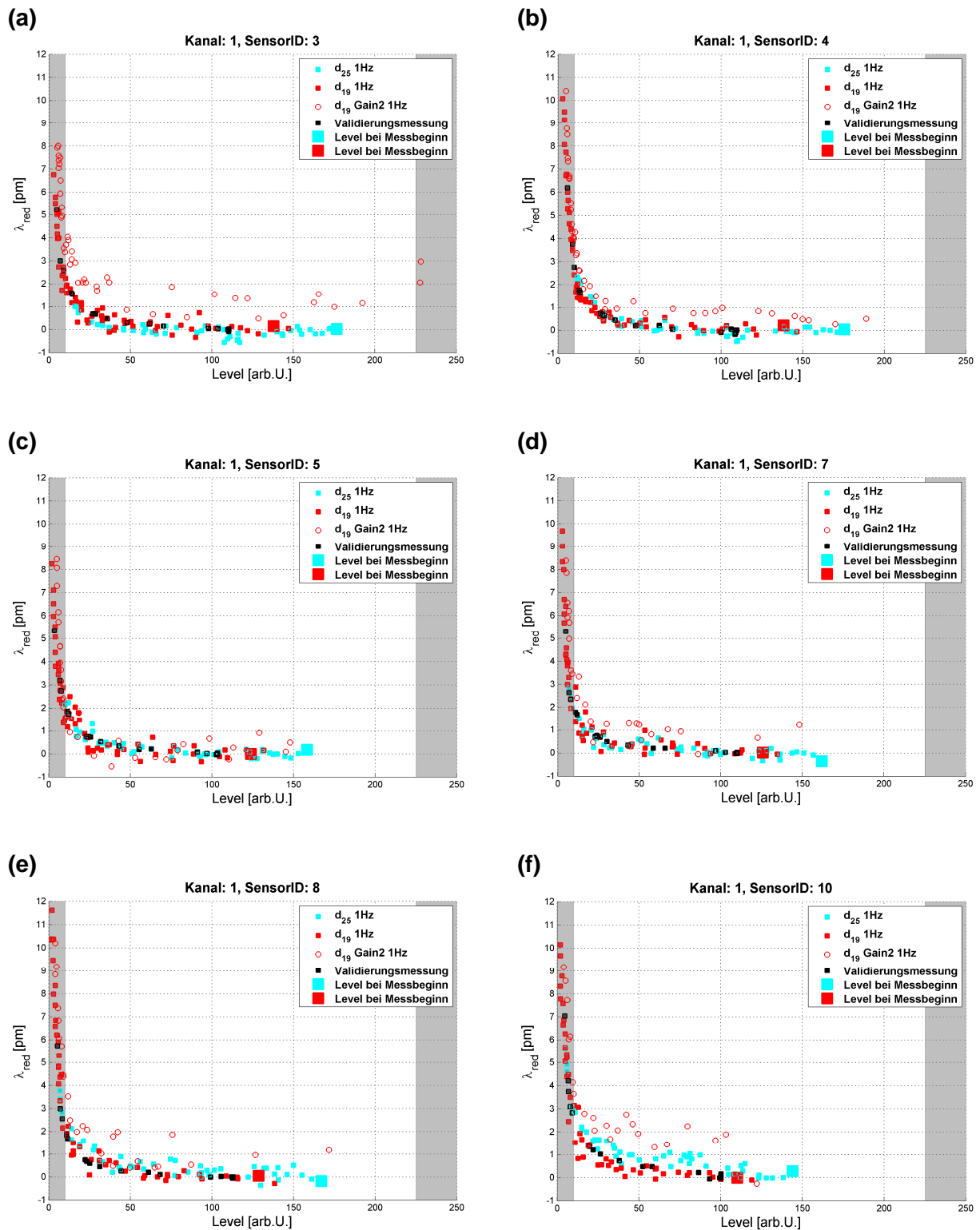


Abbildung B.5.2-3: Wellenlängenabhängigkeit der Sensoren der Hersteller FBGS und Avensis ( $Gain = 1$ ) vom  $Level$  (Rohrdurchmesser  $\varnothing 19$  und  $25\text{mm}$ )



### B.5.3 Standardabweichung in Abhängigkeit des *Levels*

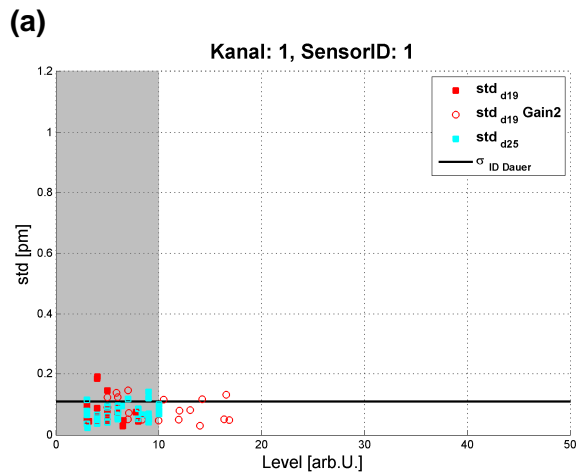


Abbildung B.5.3-1: Standardabweichung in Abhängigkeit des *Levels*: Ormocer Sensor

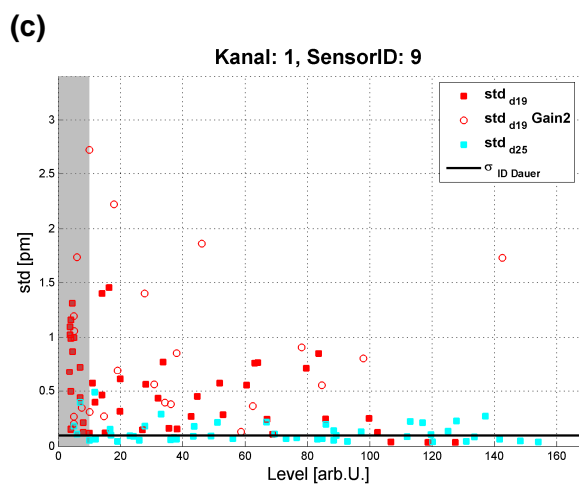
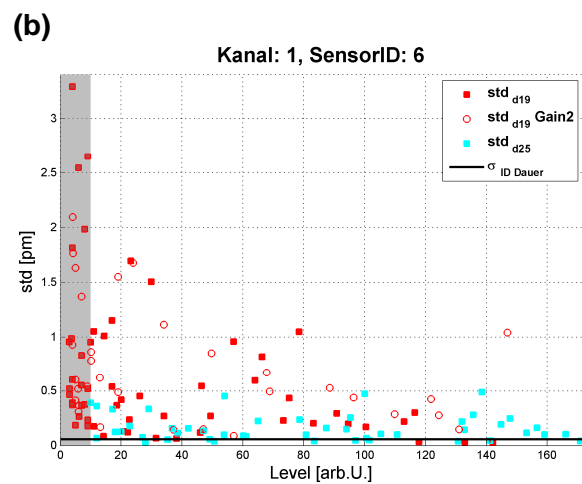
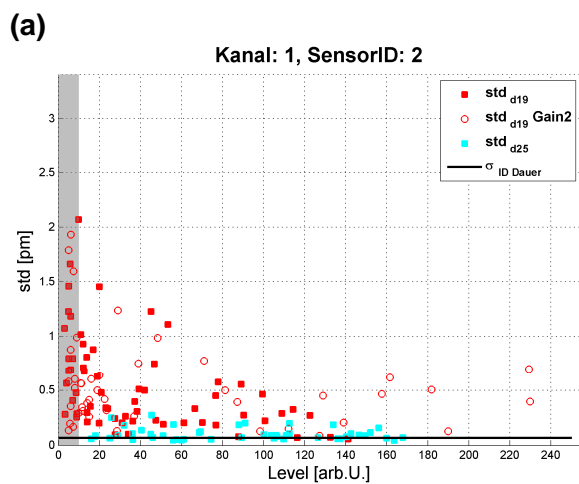


Abbildung B.5.3-2: Standardabweichung in Abhängigkeit des *Levels*: Welltech Sensoren

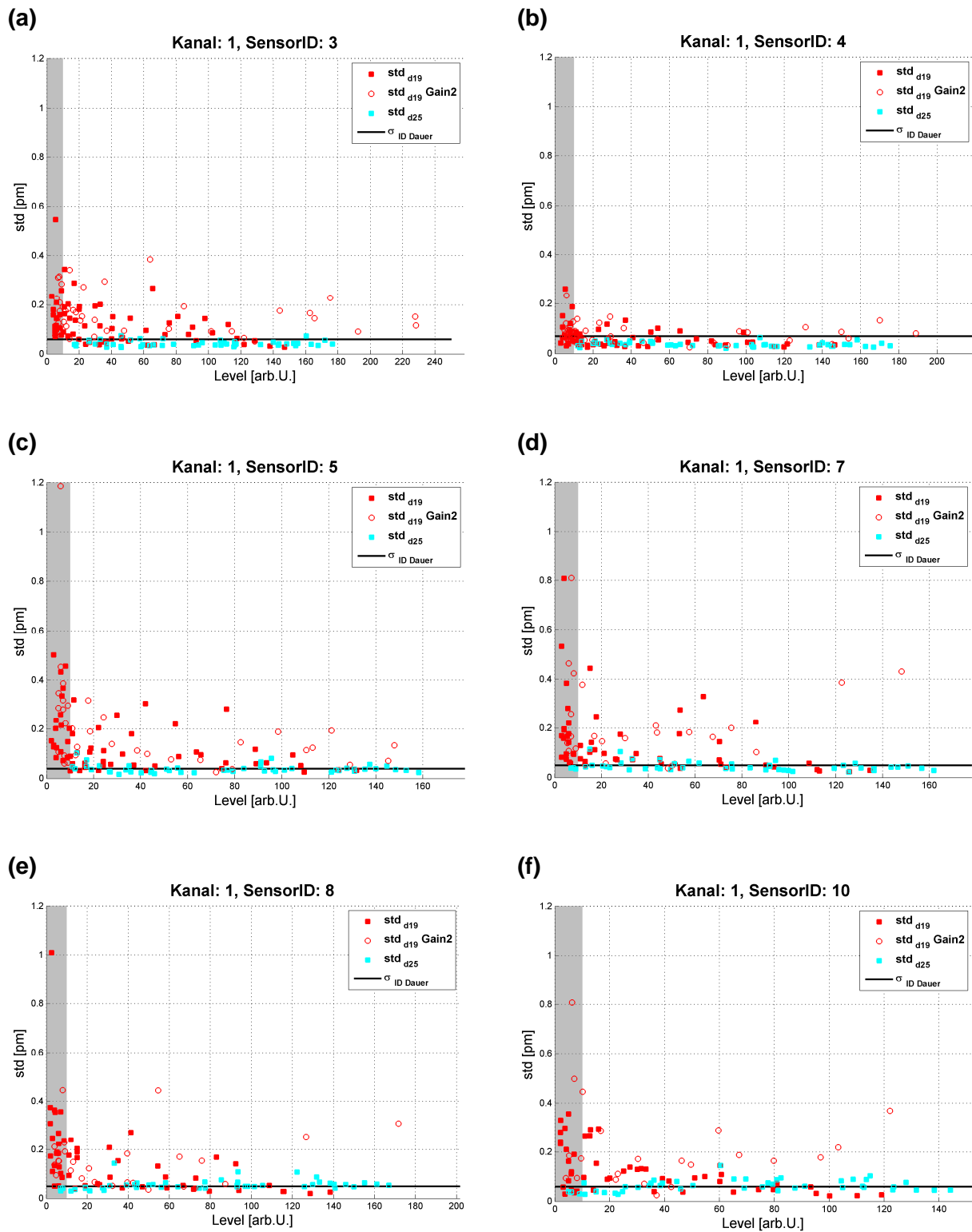


Abbildung B.5.3-3: Standardabweichung in Abhängigkeit des Levels: FBGS und Avensis Sensor

**Anhang C: Überblick Sensoren**

Tabelle C-1 mit einer Beschreibung der verwendeten Sensoren ist hier zum Ausklappen verfügbar.



Tabelle C-1: Sensoren der beiden Sensorboxen FBGiaB<sup>1)</sup>

ID	$\lambda_c^{2)}$ [nm]	Reflektivität	Gitter Länge [mm]	Beschichtung	Kern Ø [µm]	Hersteller	$\Delta\lambda/\Delta t$ pm/°C	
01	1523.850	17.00	5	Ormocer	4 (DTG)	FBGS	12.8	FBGiaB#1
02	1530.228	85.00	5	Acrylat	9	Welltech	*	
03	1532.0*	*	*	Polyimide	9	Avensys	*	
04	1540.088	87.32	*	Polyimide	9	FBGS	*	
05	1542.0*	*	*	Polyimide	9	Avensys	*	
06	1544.937	83.93	5	Acrylat	9	Welltech	*	
07	1552.0*	*	*	Polyimide	9	Avensys	*	
08	1555.154	94.38	15	Polyimide	9	FBGS	*	
09	1559.989	80.32	5	Acrylat	9	Welltech	*	
10	1562.0*	*	*	Polyimide	9	Avensys	*	
11	1524.84	15.9	5	Ormocer	4 (DTG)	FBGS	12.9	FBGiaB#2
12	1530.35	6.6	5	Ormocer	4 (DTG)	FBGS	*	
13	1540.15	42.3	10	Ormocer	4 (DTG)	FBGS	*	
14	1545.26	5.4	5	Ormocer	4 (DTG)	FBGS	*	
15	1556.18	44.4	10	Ormocer	4 (DTG)	FBGS	*	
16	1560.30	4.4	5	Ormocer	4 (DTG)	FBGS	*	

<sup>1)</sup> Quellen: (Woschitz, 2009) und (Presl, 2010)

<sup>2)</sup> Zentrale Wellenlänge (Herstellerangabe)

\*...keine Angaben verfügbar

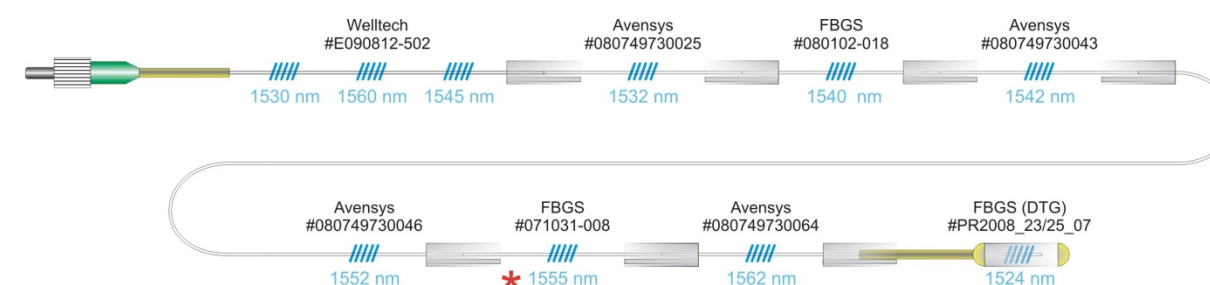


Abbildung C-1: Anordnung der Sensoren in FBGiaB#1 (Presl, 2010)

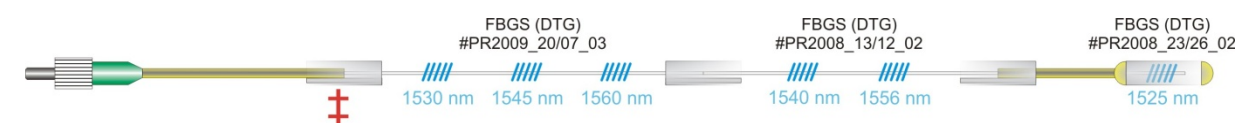


Abbildung C-2: Anordnung der Sensoren in FBGiaB#2 (Presl, 2010)