



Fabian Buchmayer BSc

# **Automatisierte Dehnungsüberwachung basierend auf vorhandenen faseroptischen Kommunikationsleitungen**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Fakultät für Mathematik, Physik und Geodäsie

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

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

---

Datum

---

Unterschrift

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich dem Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme einen herzlichen Dank aussprechen. Insbesondere gilt mein Dank meinem Betreuer, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart, für die Unterstützung während dieser Masterarbeit. Durch die vielen Besprechungen wurden alle Unklarheiten geklärt und ich konnte die gewonnenen Erkenntnisse in meine Masterarbeit einfließen lassen.

Überdies gilt mein Dank meinem zweiten Betreuer, Herrn Dipl.-Ing. Ferdinand Klug, für die Hilfe bei Problemen, die sich während der Masterarbeit ergeben haben.

Weiters möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Christoph Monsberger BSc danken, der mir mit seinem Wissen aus seiner Masterarbeit im faseroptischen Bereich des Öfteren bei Schwierigkeiten zur Seite gestanden ist.

Auch Herrn Ing. Rudolf Lummerstorfer möchte ich für die Unterstützung danken. Er war immer hilfsbereit, wenn ich diverse Geräte bzw. Arbeitsmaterial für meine Arbeit brauchte.

Insbesondere gilt mein Dank auch meiner Familie und Eva, die während meines Studiums immer an meiner Seite und somit eine große Unterstützung waren.

# Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Monitoringsoftware für das Gerät fTB 2505 in Matlab zu schreiben. Diese soll es ermöglichen, vollautomatisiert Messungen von Brillouin-Frequenzverschiebungen durchzuführen. Ab einer zweiten Messung können Dehnungs- und Temperaturänderungen anhand der faserspezifischen Koeffizienten entlang der Glasfaser berechnet werden. Für die Auswertung der Daten wurde in weiterer Folge ein Analysetool implementiert.

Nachdem die ersten Testmessungen im faseroptischen Labor des Instituts für Ingenieur-geodäsie und Messsysteme durchgeführt wurden, folgten Messungen in einer Testschleife des Zentralen Informatikdienstes an der TU Graz. Besonders war in diesem Fall, dass die Glasfasern, welche für die Messungen verwendet wurden, normalerweise für Datenkommunikation eingesetzt werden.

Die dritte Messphase fand im Rahmen eines Projekts mit dem Institut für Felsmechanik und Tunnelbau statt. Ein Betonbalken wurde dabei mit faseroptischen Sensoren ausgestattet und während des Aushärtens überwacht. Anschließend folgte ein Belastungstest. Dieser Versuch diente dazu, Erfahrung im Umgang mit verschiedenen Sensoren für eine spätere Anwendung im Tunnelbau zu sammeln.

Die entwickelte Monitoringsoftware kann verwendet werden, um sowohl vorhandene Kommunikationsglasfasern bzw. eigens installierte Systeme zu überwachen. In den Versuchen zeigte sich, dass eine Überwachung der Dehnungs- und Temperaturwerte mit am Markt verfügbaren Sensoren durchgeführt werden kann.

# Abstract

The aim of this thesis was to implement a monitoring software for the device fTB 2505 in Matlab. This monitoring tool allows performing Brillouin Frequency Shift measurements automatically. From the second measurement onwards, strain and temperature changes can be computed using fiber-specific coefficients. To analyze the measured data, a second tool was programmed.

The first test measurements were conducted in the fiber optical laboratory of the Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems at TU Graz. The second round of test measurements took place in a test loop with fibers which are normally used for the communication of data by the IT Services at TU Graz.

The third round of test measurements was performed as part of a project with the Institute of Rock Mechanics and Tunneling. A concrete girder was equipped with fiber optical sensors and monitored while hardening. Afterwards a stress test was performed. The goal of the project was to gain knowledge about the usability of fiber optical sensors in tunneling applications.

The software developed in the scope of this thesis can be used to monitor and analyze both new and already installed optical fibers. The results of the measurements prove that monitoring temperature and strain is possible with the fiber optical sensors available on the market.

# Abkürzungen

<b>APC</b>	angled physical contact
<b>BFS</b>	Brillouin-Frequenzversatz (Brillouin frequency shift)
<b>BGS</b>	Brillouin Rückstreuungs-Spektrum (Brillouin gain spectrum)
<b>BOCDA</b>	Brillouin-optische Kohärenzbereichsanalyse (Brillouin optical coherence-domain analysis)
<b>BOCDR</b>	Brillouin-optische Kohärenzbereichsreflektometrie (Brillouin optical coherence-domain reflectometry)
<b>BOFDA</b>	Brillouin-optische Frequenzbereichsanalyse (Brillouin optical frequency-domain analysis)
<b>BOTDA</b>	Brillouin-optische Zeitbereichsanalyse (Brillouin optical time-domain analysis)
<b>BOTDR</b>	Brillouin-optische Zeitbereichsreflektometrie (Brillouin optical time-domain reflectometry)
<b>CW</b>	Kontinuierliche Lichtquelle (Continuous wave)
<b>EDFA</b>	Erbium-dotierter Faserverstärker (Erbium-doped fiber amplifier)
<b>FBA</b>	Fiber Brillouin Analysis
<b>FBM</b>	Fiber Brillouin Monitoring
<b>FMT</b>	Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, TU Graz
<b>fT</b>	fibrisTerre Systems GmbH
<b>GUI</b>	graphische Benutzeroberfläche (Graphical user interface)
<b>IGMS</b>	Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz
<b>LKI</b>	Labor für konstruktiven Ingenieurbau, TU Graz
<b>OFDR</b>	Optische Frequenzbereichsreflektometrie (Optical frequency-domain reflectometry)
<b>OTDR</b>	Optische Zeitbereichsreflektometrie (Optical time-domain reflectometry)
<b>PC</b>	physical contact
<b>SBS</b>	Stimulierte Brillouin-Streuung (Stimulated Brillouin scattering)
<b>SHM</b>	Structural Health Monitoring
<b>SSMF</b>	Standard-Singlemodefaser (Standard-singlemode fiber)
<b>ZAMG</b>	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
<b>ZID</b>	Zentraler Informatikdienst, TU Graz

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Abkürzungen	VI
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Themenstellung . . . . .	2
<b>2 Verteilte faseroptische Messsysteme: Ein Überblick</b>	<b>3</b>
2.1 Rayleigh-Streuung . . . . .	4
2.2 Raman-Streuung . . . . .	4
2.3 Brillouin-Streuung . . . . .	5
2.3.1 Stimulierte Brillouin Streuung und BOFDA . . . . .	8
<b>3 Monitoringsoftware und Analysetool</b>	<b>12</b>
3.1 Messablauf . . . . .	12
3.2 Analysetool . . . . .	15
<b>4 Labormessungen mit fTB 2505</b>	<b>17</b>
4.1 Wiederholbare Genauigkeit von fTB2505 Messungen . . . . .	18
4.2 Einfluss eines verunreinigten Steckers auf die Messung . . . . .	22
4.3 Auswirkung unterschiedlicher Ausgabestärken des EDFA . . . . .	24
4.4 Einfluss der Ortsauflösung auf die Position . . . . .	26
<b>5 Teststrecke des Zentralen Informatikdiensts</b>	<b>29</b>
5.1 Leitungsverlauf . . . . .	30

5.2	OFDR und OTDR Messungen . . . . .	32
5.3	Messungen mit fTB 2505 . . . . .	34
5.3.1	Brillouin Signal . . . . .	34
5.3.2	Brillouin-Frequenzverschiebung gegenüber der Position . . . . .	36
5.3.3	Zeitreihen der Messkampagnen . . . . .	37
5.3.4	Vergleich der Messepochen im März und im April . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Betonbalkentests</b>	<b>41</b>
6.1	Allgemeines . . . . .	41
6.2	Aushärtvorgang . . . . .	43
6.2.1	Ergebnisse . . . . .	45
6.2.1.1	Zeitreihe des Betonbalkens . . . . .	45
6.2.1.2	Zeitreihe der Halle . . . . .	46
6.3	Belastungstest . . . . .	48
6.3.1	Allgemeines . . . . .	48
6.3.2	Ergebnisse . . . . .	50
6.3.2.1	Brillouin Verschiebung aller 5 Sensoren - absolut . . . . .	50
6.3.2.2	Brillouin Verschiebung - relativ . . . . .	53
6.3.2.3	Darstellung des Belastungstest in einer Zeitreihe . . . . .	56
6.3.2.4	Verformung gegenüber der Vertikalkraft . . . . .	58
6.3.2.5	Vergleich mit OFDR . . . . .	61
6.3.2.6	Untersuchung auf Besonderheiten . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Resümee</b>	<b>71</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>IX</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIV</b>
<b>A</b>	<b>fTB 2505 Datenblatt</b>	<b>i</b>
<b>B</b>	<b>Datenblatt: BRUsens strain V3</b>	<b>ii</b>
<b>C</b>	<b>Datenblatt: BRUsens strain V9</b>	<b>iii</b>
<b>D</b>	<b>Datenblatt: BRUsens temperature</b>	<b>iv</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Die Welt ist heutzutage aufgrund der Internet- und Telefonleitungen ein „Netz aus Sensoren“. Kommunikationsleitungen aus Glasfasern können genutzt werden, um mit faseroptischen Messgeräten verteilte Messungen durchzuführen. Die Ergebnisse der Messungen können als Indikatoren gesehen werden, ob sich ein Gebiet (z.B. Rutschhang) bewegt. In weiterer Folge können Deformationsgebiete mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet werden, um diese Gebiete genauer zu überwachen.

Auch im Bereich des Structural Health Monitoring (SHM) können faseroptische Messsysteme die bestehende Sensorik der Messtechnik sinnvoll erweitern. Durch faseroptische Sensoren kann eine kontinuierliche Überwachung eines Bauwerkes durchgeführt werden, um eventuelle Gefahren schnell zu erkennen und rechtzeitige Maßnahmen treffen zu können.

Im Zuge dieser Masterarbeit wurde das Messgerät fTB 2505 von fibrisTerre Systems GmbH (fT) verwendet. Derzeit können mit der dazugehörigen Software-Unterstützung automatisierte faseroptische Überwachungsmessungen nur im kleinen Maßstab durchgeführt werden. Es können zum Beispiel alle zwei Stunden Messungen oder 100 Messungen nacheinander durchgeführt werden. Man kann jedoch nicht in unterschiedlichen Zeitabständen und innerhalb einer Messkampagne mit unterschiedlichen Einstellungen Messungen durchführen. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird eine Software entwickelt mit der man mit beliebigen Einstellungen und mit unterschiedlichen Zeitabständen ein Bauwerk (Pipeline, Damm, Brücke) vollautomatisiert überwachen kann.

## 1.2 Themenstellung

Diese Masterarbeit ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird ausgehend von einer Befehlsbibliothek (fTView remote) eine Monitoringsoftware implementiert. Diese führt mit den gegebenen Befehlen aus der Bibliothek automatisierte Überwachungsmessungen zu gewünschten Zeitpunkten durch und verspeichert Brillouin-Frequenzen, Temperatur- und Dehnungswerte. Mithilfe der Software können Einzelmessungen, Messungen mit gleichen Einstellungen und Messungen mit unterschiedlichen Einstellungen aufgezeichnet werden.

Der zweite Teil behandelt drei Teststadien. Zuerst werden mit der Software Messungen im Labor (erstes Teststadium) durchgeführt. In weiterer Folge werden zwischen dem Campus Alte Technik und dem Campus Neue Technik an der TU Graz Messungen durchgeführt (zweites Teststadium). Dabei werden bereits bestehende Kommunikationsleitungen für die Messungen verwendet. Im dritten Teststadium wird ein Betonbalken mit unterschiedlichen faseroptischen Kabeln ausgestattet und während des Aushärtens des Betons überwacht. Anschließend wird ein Belastungstest mit einem vier-Säulen-Prüfgerüst durchgeführt, um eine stark auftretende Kraft entlang der Achse orthogonal zu Faser zu realisieren.

Für die Auswertung der Daten wurde ein Analysetool programmiert, welches eine Darstellung der Brillouin-Frequenzverschiebung sowie des Spektrums ermöglicht. Weiters können bei einer längeren Messung die Daten in einer Zeitreihe dargestellt werden. Um eine Verformung leichter darzustellen, kann eine Messung als Referenz gewählt werden und weitere Messungen relativ zu dieser dargestellt werden.

# Kapitel 2

## Verteilte faseroptische Messsysteme: Ein Überblick

Im Groben werden drei unterschiedliche Arten von verteilten Messsystemen unterschieden: Messsysteme basierend auf der Rayleigh, der Brillouin und der Raman-Streuung [1].

Im Allgemeinen wird bei verteilten faseroptischen Messsystemen ein Lichtpuls in die Glasfaser gesendet, welcher an Inhomogenitäten im Glas streut und einen Teil des Lichts zurückstret (siehe Abbildung 2.1). Durch die Rückstreuung und die Laufzeit des Lichts können Schlüsse über Temperatur, Dehnungen und Dämpfungen gezogen werden.

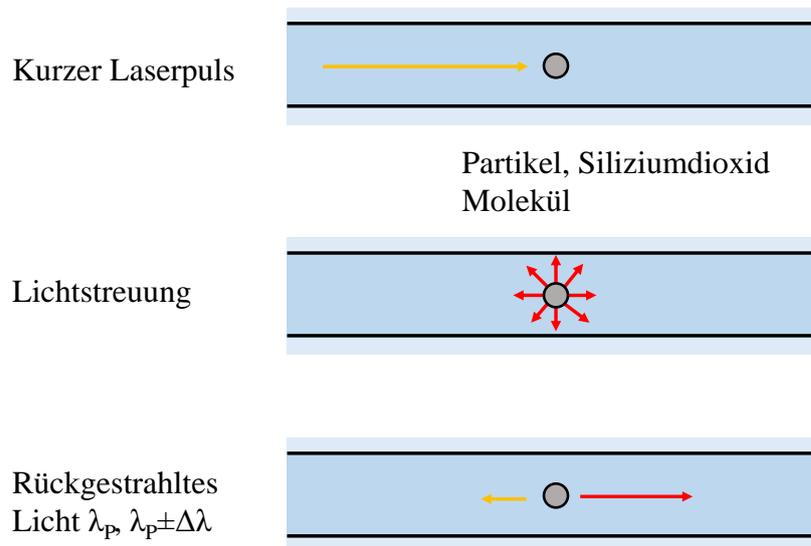


Abbildung 2.1: Prinzip der Rückstreuung

## 2.1 Rayleigh-Streuung

Bei der **Rayleigh-Streuung** wird ein Teil des Lichtpulses aufgrund der Variationen des Brechungsindex rückgestreut. Diese zufälligen Variationen entstehen aus Inhomogenitäten im Faser-Kern. Beim Optischen Zeitbereichsverfahren Reflektometer (Optical time-domain reflectometer) (OTDR), welches die Rayleigh-Streuung nützt, werden die Intensität des rückgestreuten Lichtpulses sowie die Laufzeit erfasst. Aus der Zeit lässt sich anhand der Lichtgeschwindigkeit im Medium die Positionsbestimmung eines Events durchführen. Anhand der Änderung der Rückstreuung können starke Krümmungen und andere Informationen, wie beispielsweise Dämpfungen aus dem Signal gewonnen werden (siehe Abbildung 2.2).

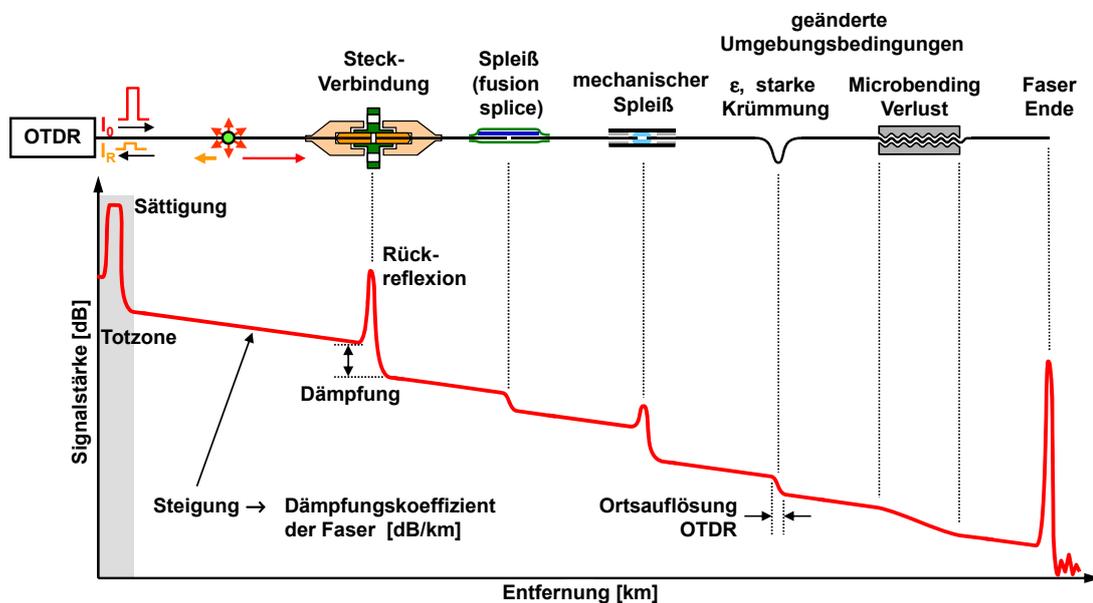


Abbildung 2.2: OTDR Signalverlauf [13]

## 2.2 Raman-Streuung

Bei dem Verfahren, welches auf der **Raman-Streuung** basiert, wird wiederum ein Lichtimpuls ausgesendet. Wenn dieser auf andere Moleküle im Faserkern trifft, ändert sich das Energielevel des Lichtimpulses (siehe Abbildung 2.3). Aus dem Verhältnis der Stokes und Anti-Stokes Komponenten kann die lokale Temperatur berechnet werden. Dies kann unter anderem in der Brandüberwachung von Gebäuden angewendet werden.

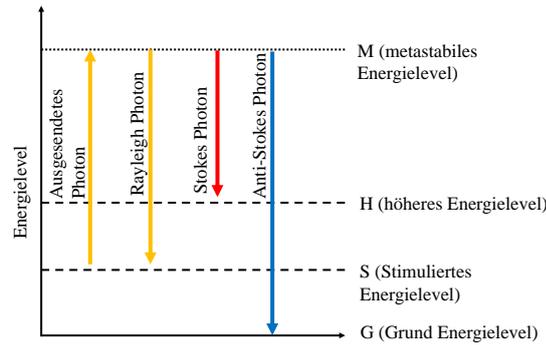


Abbildung 2.3: Energielevel

## 2.3 Brillouin-Streuung

Die **Brillouin-Streuung** entsteht aus der Streuung von ausgesendeten Lichtwellen an hochfrequenten Schallwellen in einem Medium. Im Fall von verteilten Messsystemen ist dieses Medium Glas, der Glasfaser. Bereits im Jahr 1922 wurde die spontane Streuung von ihrem Namensgeber L. Brillouin entdeckt. Das verwendete Messgerät im Rahmen dieser Arbeit von fT verwendet nicht die spontane, sondern die Stimulierte Brillouin-Streuung (Stimulated Brillouin scattering) (SBS). Der Unterschied besteht darin, dass bei der spontanen Streuung nur eine Lichtwelle ausgesendet wird und bei der SBS zwei entgegengesetzte. Im Unterschied zur Raman-Streuung bei der nur Temperaturänderungen festgestellt werden, können mit der Brillouin-Streuung (indirekt) Dehnungs- und Temperaturänderungen ermittelt werden (siehe Abbildung 2.4).

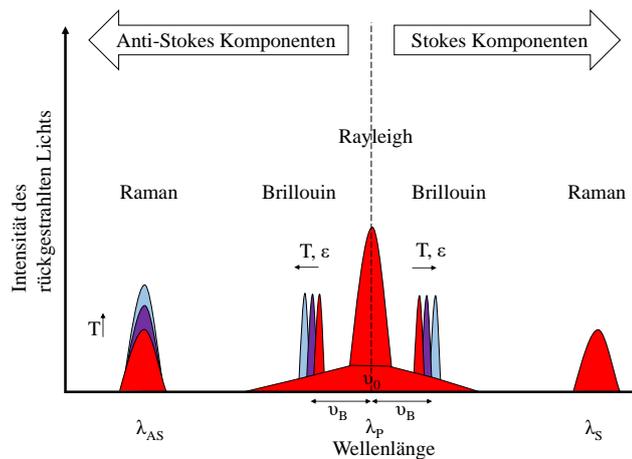
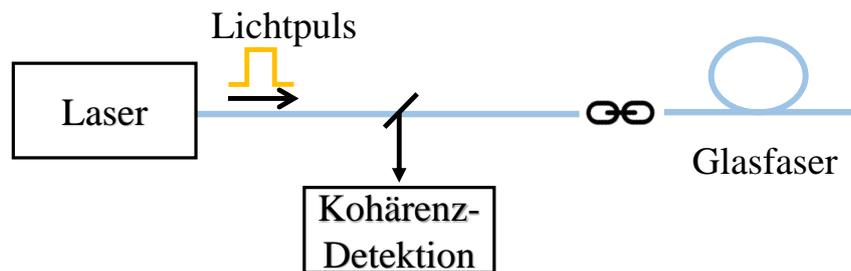


Abbildung 2.4: Intensitäten des rückgestreuten Lichts

Um die lokalen Dehnungs- und Temperaturänderungen entlang der Faserstrecke ermitteln zu können, muss zuerst entlang der Faser in zwei Epochen der Brillouin-Frequenzversatz (Brillouin frequency shift) (BFS) bestimmt werden. Mithilfe der Faserparameter können anschließend aus den Frequenzverschiebungen Dehnungs- und Temperaturunterschiede dargestellt werden. Hierfür kann zwischen zwei Messsystemen unterschieden werden [3]:

- Reflektometer: Bei diesem Messsystem muss die Faser nur von einer Seite zugänglich sein. Durch die schwache spontane Brillouin-Streuung entsteht ein schlechtes Signal-Rauschverhältnis, welches wiederum zu einer geringen Messgenauigkeit führt. Messinstrumente basierend auf der Brillouin-optischen Zeitbereichsreflektometrie (Brillouin optical time-domain reflectometry) (BOTDR) (siehe Abbildung 2.5) und der Brillouin-optischen Kohärenzbereichsreflektometrie (Brillouin optical coherence-domain reflectometry) (BOCDR) zählen zu den Reflektometern. Durch den Vorteil, dass keine Rückleitung notwendig ist, kann bei einem Faserbruch bis zur Bruchstelle weiter gemessen werden. Somit kann auch die Fehlerstelle lokalisiert werden.



**Abbildung 2.5:** Brillouin-optische Zeitbereichsverfahren Reflektometer

- Analysatoren: In diesem Fall muss die Faserstrecke einen geschlossenen Ring bilden und von zwei Seiten zugänglich sein. Dabei wird an einer Seite die Pumplichtwelle (gepulste Lichtquelle) und an der anderen Seite die Stokes-Welle (Kontinuierliche Lichtquelle (Continuous wave) (CW)) in die Faser eingekoppelt. Durch die starke SBS kommt ein gutes Signal-Rauschverhältnis zustande, welches diesen Systemen zu einer hohen Messgenauigkeit verhilft. Bei einem Faserbruch hat dieses Messsystem den Nachteil, dass keine Messung mehr durchgeführt werden kann und somit auch die Fehlerstelle nicht lokalisiert werden kann. Neben der in dieser Arbeit verwendeten Brillouin-optischen Frequenzbereichsanalyse (Brillouin optical frequency-domain analysis) (BOFDA) zählen auch die Brillouin-optische Zeitbereichsanalyse (Brillouin

optical time-domain analysis) (BOTDA) (siehe Abbildung 2.6) und die Brillouin-optische Kohärenzbereichsanalyse (Brillouin optical coherence-domain analysis) (BOCDA) zu diesen Messsystemen [10].

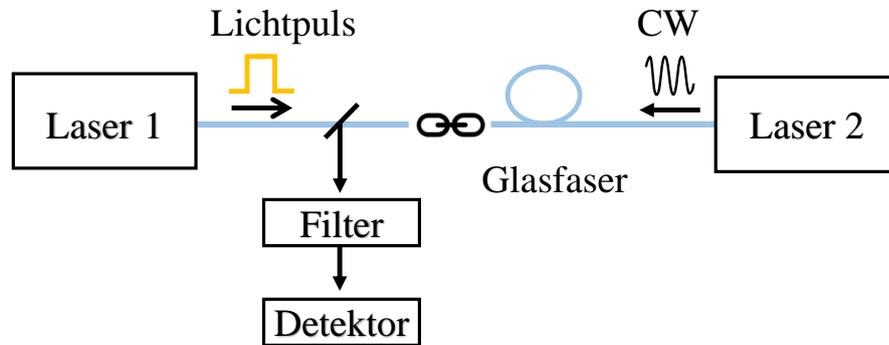


Abbildung 2.6: Brillouin-optische Zeitbereichsverfahren Analysator

Der Zahlenwert des BFS ist die Differenz des Peaks des Brillouin Rückstreuungs-Spektrums (Brillouin gain spectrum) (BGS) und der Pumpwelle (siehe Abbildung 2.7).

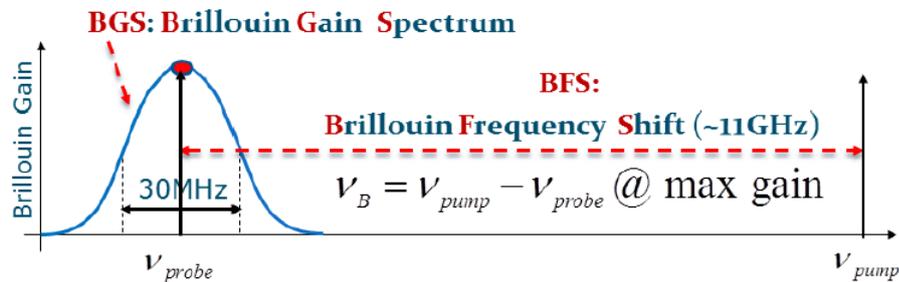


Abbildung 2.7: Zusammenhang: BFS und Spektrum [12]

Im Groben können drei Methoden zum Einsatz kommen:

- *Pulslaufzeitverfahren*: Bei diesem Verfahren wird ein Lichtimpuls (Pumpwelle) mit kurzer Zeitdauer ausgesendet. Die Frequenz der zurückkommende Stokes-Welle wird über die Zeit aufgezeichnet. Aus der Laufzeit kann die Position und über den Frequenzversatz der Stokes-Welle zur Pumpwelle die Dehnungs- und Temperaturänderungen bestimmt werden. Dafür müssen entweder zwei Epochen gemessen werden oder das Verhalten der Faser bei 20 °C im Vorhinein bestimmt

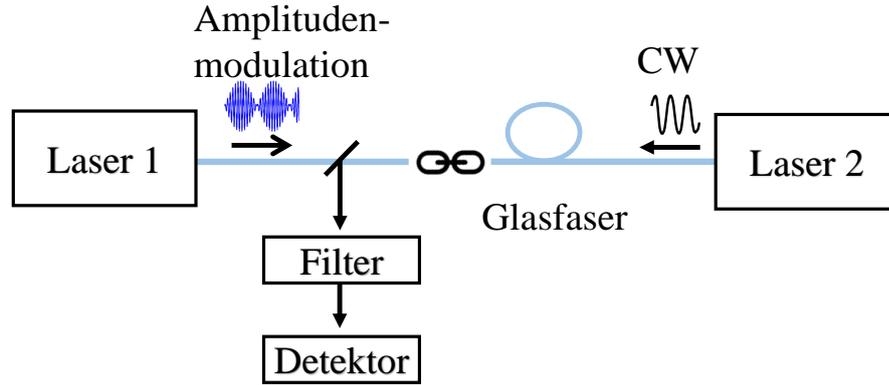
werden. Diese Methode wird als Brillouin-optisches Zeitbereichsverfahren (Brillouin optical time-domain, BOTD) bezeichnet.

- *Frequenzmodulationsverfahren:* Bei diesem Verfahren kommt es zu einer Amplitudenmodulation der Pumpwelle. Durch SBS kommt es zu einer Interferenz zwischen Pumpmodulation und Stokes-Welle (CW). Diese Methode, bekannt als FM-CW Verfahren, wird auch in der Radar-Technik eingesetzt. Die Messungen werden im Frequenzbereich durchgeführt und anschließend über eine inverse Fouriertransformation in den Zeitbereich übergeführt. Die Distanzinformation kommt wiederum aus der Laufzeit. Dieses Verfahren wird als Brillouin-optisches Frequenzverfahren (Brillouin optical frequency domain, BOFD) bezeichnet [2].
- *Korrelations- oder Kohärenzverfahren:* Hierbei werden die Phase und Frequenz der CW und/oder Pumpwelle direkt moduliert. An einer Photodiode werden infolge die relative Phasen- und Frequenzlage durch Mischung der beiden Wellen aufgezeichnet. Die Lichtwellen können durch Modulation der Phase und Frequenz so verändert werden, dass sie nur an bestimmten Orten mit der Brillouin-Frequenz korrelieren. Diese Methode wird als Brillouin-optisches Kohärenzverfahren (Brillouin optical coherence-domain, BOCD) bezeichnet.

### 2.3.1 Stimulierte Brillouin Streuung und BOFDA

Im folgenden Unterkapitel wird die SBS näher erklärt und auf das Messverfahren BOFDA eingegangen.

Beim BOFDA sendet das Messgerät in beide Enden der Schleife Lichtsignale mit unterschiedlichen Frequenzen. Auf der ersten Seite erfährt die Pumpwelle  $f_p$  eine sinusartige Amplitudenmodulation [14]. Auf der anderen Seite wird ein durchgehender Laserstrahl (CW,  $f_s$ ) ausgesendet (siehe Abbildung 2.8). Die Differenz der beiden optischen Frequenzen bewegt sich dabei in einem definierten Bereich. Bei einer bestimmten Differenz, dem BFS, kommt es zu einer Brillouin-Interaktion und ein Teil des Lichts wird zurück zum Messgerät gesandt. SBS tritt nur auf, wenn der lokale Frequenzversatz der Brillouin-Streuung gleich dem Frequenzversatz  $f_p - f_s$  ist. Mit einem Scan über die Differenzen erhält man so für jeden Punkt entlang der Faser einen BFS. Da die Messungen im Frequenzbereich erfolgen, muss danach eine inverse Fouriertransformation durchgeführt werden, um in den Zeitbereich zu kommen.



**Abbildung 2.8:** Brillouin-optische Frequenzbereichsverfahren Analysator

Die Brillouin Streuung beschreibt eine Kollision von gestreutem Licht mit akustischen Phononen. Durch die Kollision entsteht ein Frequenzversatz, der maximal wird, wenn das Licht rückgestreut wird [7]. Der BFS setzt sich dabei aus

$$\nu_B = \pm \frac{2n v_a}{\lambda_P} \quad (2.1)$$

zusammen, wo  $n$  der Refraktionsindex,  $v_a$  die Schallgeschwindigkeit und  $\lambda_P$  die Wellenlänge der Pumpwelle ist. Überlicherweise liegt der BFS bei einer Glasfaser mit einer Pumpwellenlänge von 1300 nm zwischen 11,5 und 13 GHz [8], je nachdem wie hoch das Refraktionsindexprofil ist.

Der BFS ist abhängig von den Eigenschaften des Materials aus dem die Glasfaser besteht und vom Medium, welches das Licht während der Messung passiert. Aus diesem Grund ändert sich dieser Wert abhängig von der Temperatur und der Dehnung, welche die Glasfaser erfährt. Der BFS ermöglicht daher das Messen dieser Größen.

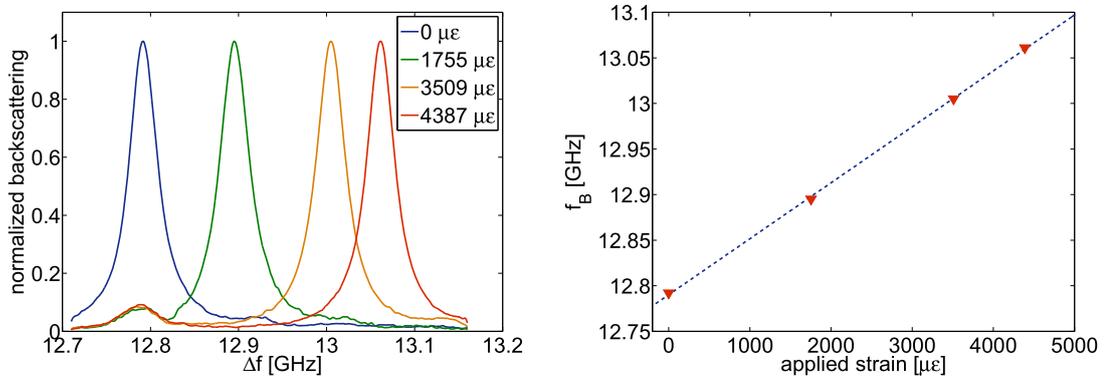
Der BFS hat eine näherungsweise lineare Abhängigkeit (siehe Abbildung 2.9 und 2.10) von der auftretenden Dehnung [5] und Temperatur

$$\nu_B(\varepsilon) = \nu_{B0}(1 + C_\varepsilon \varepsilon) \quad C_\varepsilon = 4,6 \quad (2.2a)$$

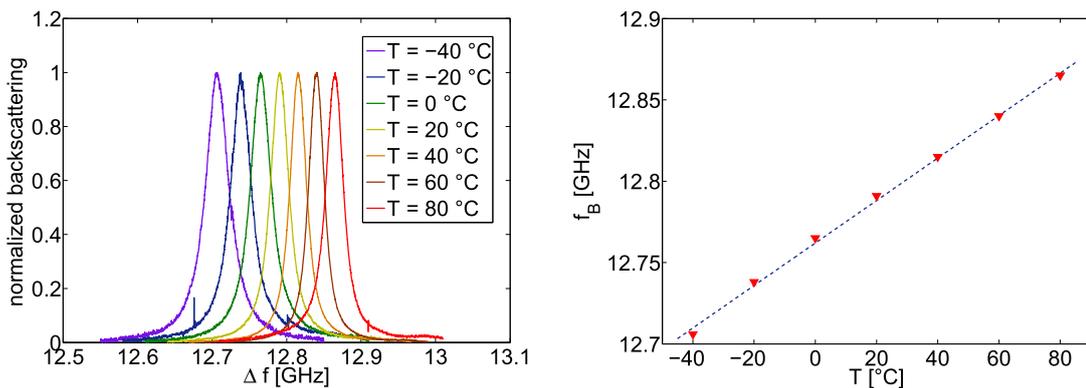
$$\nu_B(T) = \nu_{B0}(1 + C_T \Delta T) \quad C_T = 9,4 \cdot 10^{-5} K^{-1} \quad (2.2b)$$

wo  $\varepsilon$  die Dehnung,  $T$  die Temperatur und  $\Delta T$  der Temperaturunterschied ist. Typische Werte für  $C_\varepsilon$  und  $C_T$  sind  $\sim 500$  MHz/% Dehnung und  $\sim 1$  MHz/1 °C Temperaturänderung. Zu beachten ist dabei, dass sich die Dehnung auf die Längsrichtung der Faser

bezieht und keine seitliche Dehnung gemeint ist. Ein lateraler Druck von bis zu 2,2 kg/m hat jedoch nur einen geringen Effekt auf den BFS [6].



**Abbildung 2.9:** Abhängigkeit der Dehnung (längs) und dem BFS (Links: Brillouin Spektrum; Rechts: Dehnung und Frequenz der maximalen Brillouin Rückstreuung) [9]



**Abbildung 2.10:** Abhängigkeit von Temperatur und dem BFS (Links: Brillouin Spektrum; Rechts: Temperatur und Frequenz der maximalen Brillouin Rückstreuung) [9]

In Abbildung 2.9 ist ersichtlich, dass sich die Kurve (Lorentz Profil) bei einer Dehnung nach rechts und bei einer Stauchung nach links verschiebt. Das Lorentz Profil ist die Dichtefunktion der Cauchy-Verteilung, sie wird in der Physik eingesetzt, um Spektren (Rückstreuung) zu beschreiben. Ändert sich die Höhe der Kurve, lässt dies auf eine Dämpfung des Signals schließen. Je weiter die untersuchte Stelle vom Messgerät entfernt ist, desto weniger Rückstreuung ist zu erwarten, was zu einem niedrigeren Peak führt. Sollte ein weiterer Peak auftreten, könnte dies ein Indikator für eine starke Veränderung (z.B. ein Riss) im untersuchten Objekt sein (siehe Abbildung 2.11).

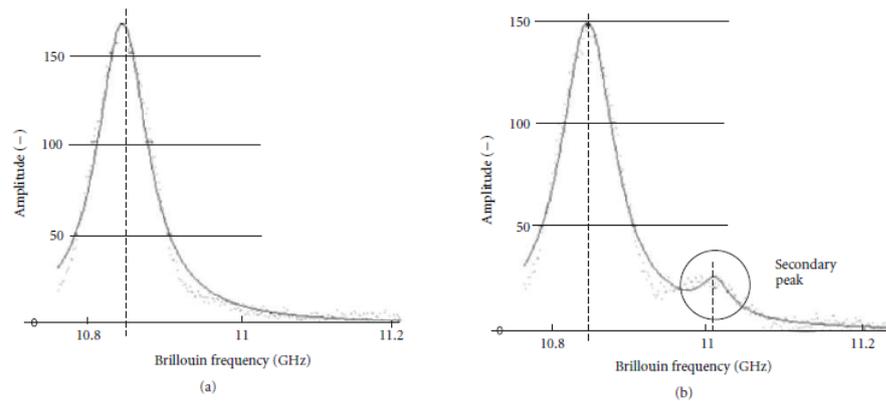


Abbildung 2.11: Spektrum ohne Riss (a) und mit Riss (b) (nach [4])

Ein Beispiel für die Auswirkung einer Dehnung entlang einer Glasfaser ist in Abbildung 2.12 im dreidimensionalen BGS zu sehen. Die x-Achse stellt die Position in der Faser dar und auf der y-Achse ist der BFS dargestellt. In der z-Achse ist die Intensität der Rückstreuung ersichtlich. Bei 47 m erfährt die Faser eine Verformung und somit verschiebt sich das Spektrum in einen anderen Frequenzbereich. Je mehr Verformung auftritt, umso mehr verschiebt sich auch das BGS.

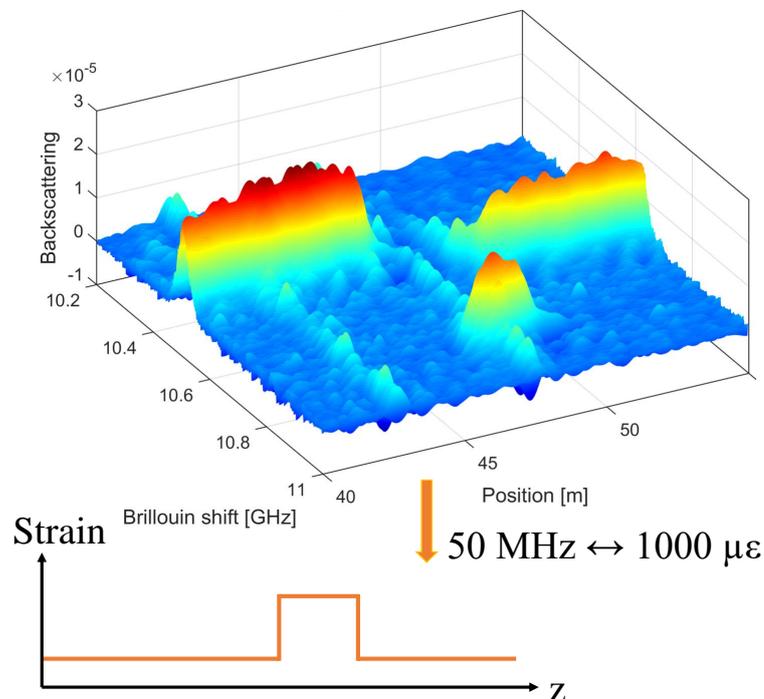


Abbildung 2.12: Zusammenhang: Verformung und Spektrum der Brillouin Verschiebung

# Kapitel 3

## Monitoringsoftware und Analysetool

Um zu beliebigen Zeitpunkten Messungen durchführen zu können, wurde die Monitoringsoftware Fiber Brillouin Monitoring (FBM) entwickelt. In diesem Kapitel werden die Funktionsweise der Software FBM und des Analysetools Fiber Brillouin Analysis (FBA) erläutert. Nachdem beides in Englisch geschrieben wurde, sind alle Grafiken in dieser Arbeit, welche mit FBM und FBA erstellt wurden, mit englischen Bezeichnungen versehen.

Das verwendete Messgerät der Firma fT (fTB 2505) beruht auf dem Messprinzip BOFDA. Die Ansteuerung des Geräts erfolgt über Matlab R2015a (32-Bit), welches Befehle an fTView remote (Schnittstelle) sendet. In weiterer Folge gibt fTView remote die Befehle an das Messinstrument weiter und steuert so den Messablauf.

### 3.1 Messablauf

In Abbildung 3.1 ist der Aufbau des Messprogramms schematisch dargestellt. Nach dem Starten der Monitoringsoftware erscheint ein Fenster (siehe Abbildung 3.2) und der Benutzer kann über eine graphische Benutzeroberfläche (Graphical user interface) (GUI) entscheiden, welche Monitoring Konfiguration er verwenden möchte. Weiters können ein Kommentar über die Messung eingegeben und die gewünschten Output Files festgelegt werden. Drei verschiedene Messmodi stehen zur Verfügung. Der Benutzer kann eine Einzelmessung bzw. mehrere Messungen mit den gleichen Parametern durchführen. Als dritte Variante steht das Einlesen aus einer Excel-Tabelle zur Verfügung. Bei dieser Variante wird der Messablauf eines Tages in der Exceltabelle festgelegt und es können für

jede Epoche unterschiedliche Einstellungen gewählt werden. Bei Variante eins und zwei erscheint in weiterer Folge ein Fenster für die Einstellungen der Messparameter (siehe Abbildung 3.3). Dort müssen alle Parameter für eine Messung festgelegt werden. Die Länge der Glasfaser sowie die ausgegebene Stärke des Erbium-dotierten Faserverstärkers (Erbium-doped fiber amplifier) (EDFA) müssen vor einer ersten Messung mit der Software fTView UI bestimmt werden.

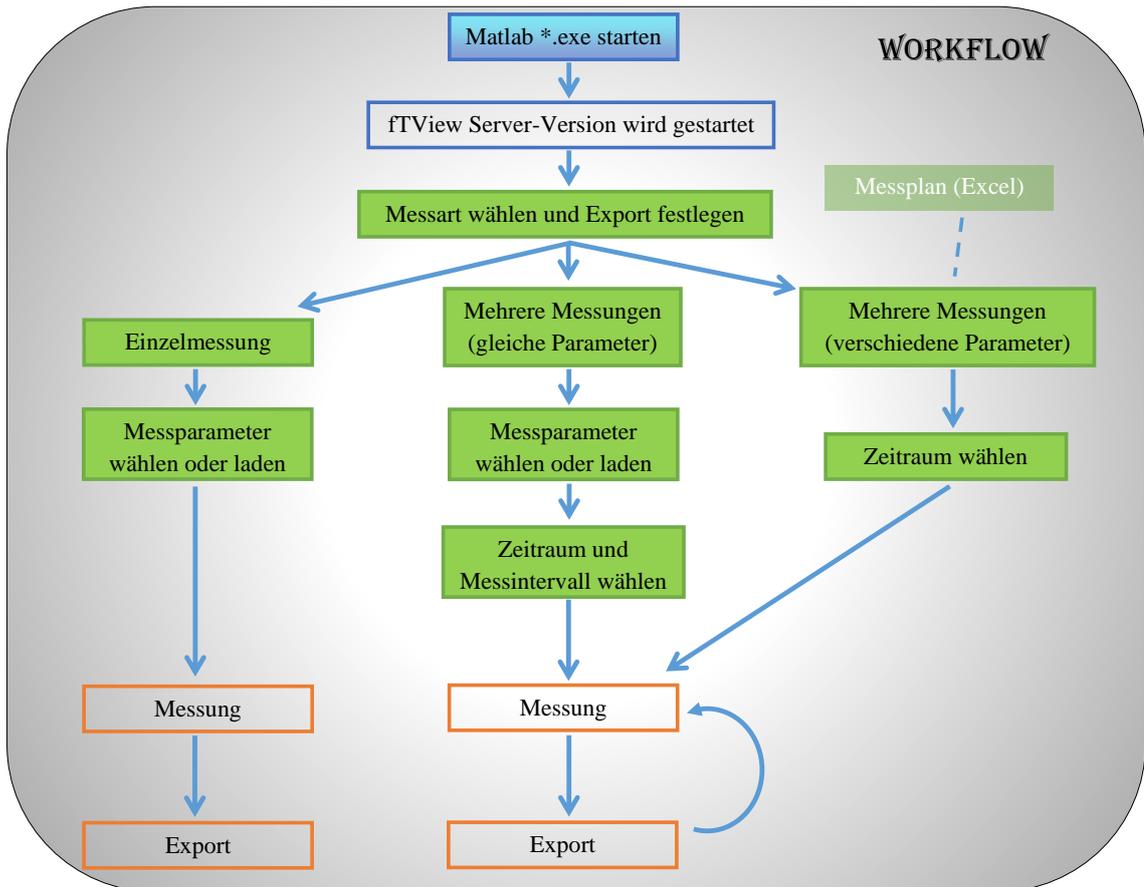


Abbildung 3.1: Workflow der Monitoringsoftware

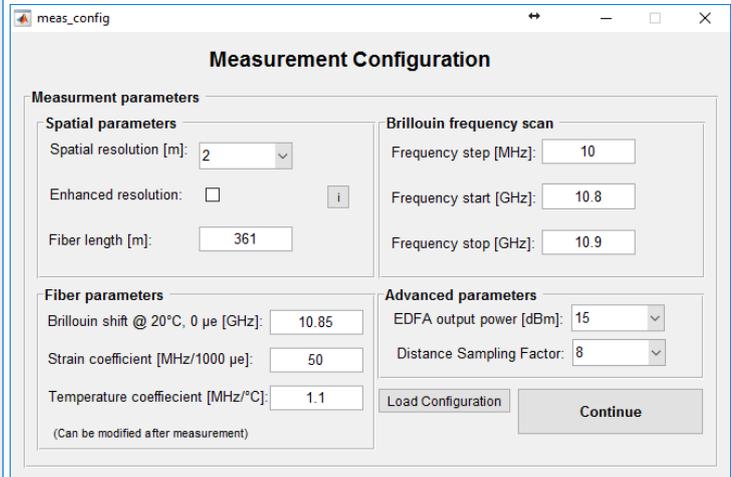
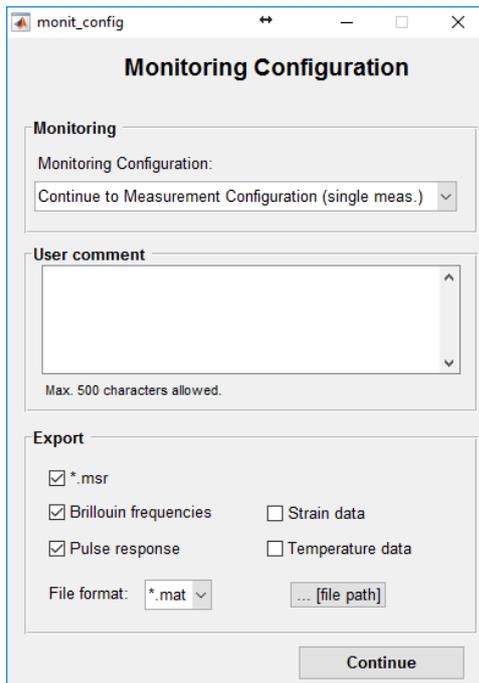


Abbildung 3.3: Konfiguration der Messung (FBM-GUI)

Abbildung 3.2: Monitoring Konfiguration (FBM-GUI)

Wird die Variante zwei gewählt, erscheint ein weiteres Fenster (siehe Abbildung 3.4) für die Einstellungen der Messzeiten. Start und Endzeit geben den Zeitpunkt der ersten Messung und das Ende der Messkampagne an.

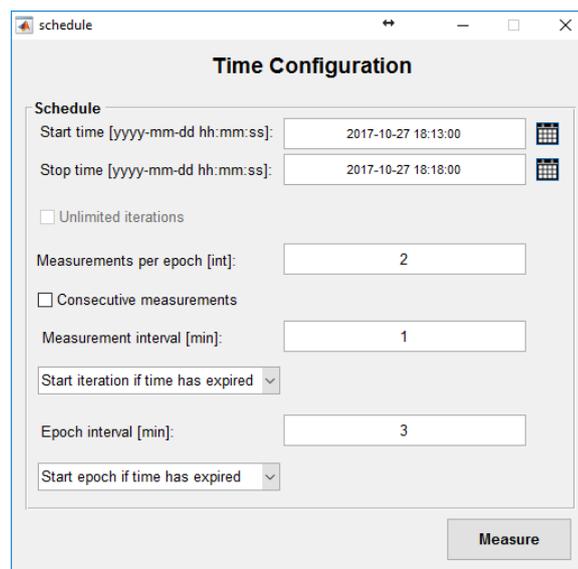


Abbildung 3.4: Konfiguration der Messzeiten (FBM-GUI)

## 3.2 Analysetool

Für die Analyse der Messdaten wurde das GUI FBA in Matlab R2015a implementiert.

Mit dem Analyse GUI (siehe Abbildung 3.5) können je nach aufgezeichneten Daten das Brillouin Spektrum (3D), das Brillouin Signal (2D) bzw. der BFS gegenüber der Position geplottet werden. Weiters kann der BFS, die Dehnungs- und die Temperaturänderung relativ zu einer Referenzmessung angezeigt werden:

$$\Delta\nu_B [MHz] = (\nu_{B,gemessen} - \nu_{B,Referenz}) [MHz] \quad (3.1a)$$

$$\Delta\epsilon [\mu\epsilon] = \frac{(\nu_{B,gemessen} - \nu_{B,Referenz}) [MHz]}{\text{Dehnungskoeffizient} [MHz/\mu\epsilon]} \quad (3.1b)$$

$$\Delta T [^\circ C] = \frac{(\nu_{B,gemessen} - \nu_{B,Referenz}) [MHz]}{\text{Temperaturkoeffizient} [MHz/^\circ C]} \quad (3.1c)$$

Die Koeffizienten sind abhängig vom Material und der Produktion und können aus einer Kalibrierung der Faser gewonnen werden. Falls nur eine Messung getätigt wurde, kann als Referenz- BFS die Frequenzverschiebung einer Messung bei 20 °C, 0  $\mu\epsilon$  (kann aus einer Kalibrierung gewonnen werden) herangezogen werden. Wenn mehrere Messungen vorliegen, kann auch der Brillouin-Frequenzversatz einer anderen Iteration eingefügt werden.

Um ein leichteres Vergleichen unterschiedlicher Epochen zu ermöglichen, kann eine Referenziteration festgelegt werden. Es kann je nach Wunsch die gesamte Faserlänge oder ein Ausschnitt geplottet werden. Ein weiteres Analysetool erlaubt es, eine Position (bzw. das Mittel über einen Bereich) über einen längeren Zeitraum zu plotten. Zusätzlich können darin Ereignisse und Bereiche dargestellt werden.

Ein weiteres Tool erlaubt es, die Messkonfigurationen (Faserlänge, EDFA output power usw.) aller geladenen Epochen in eine Excel-Tabelle zu exportieren. Dort wird auch die Messdauer jeder einzelnen Iteration gespeichert.

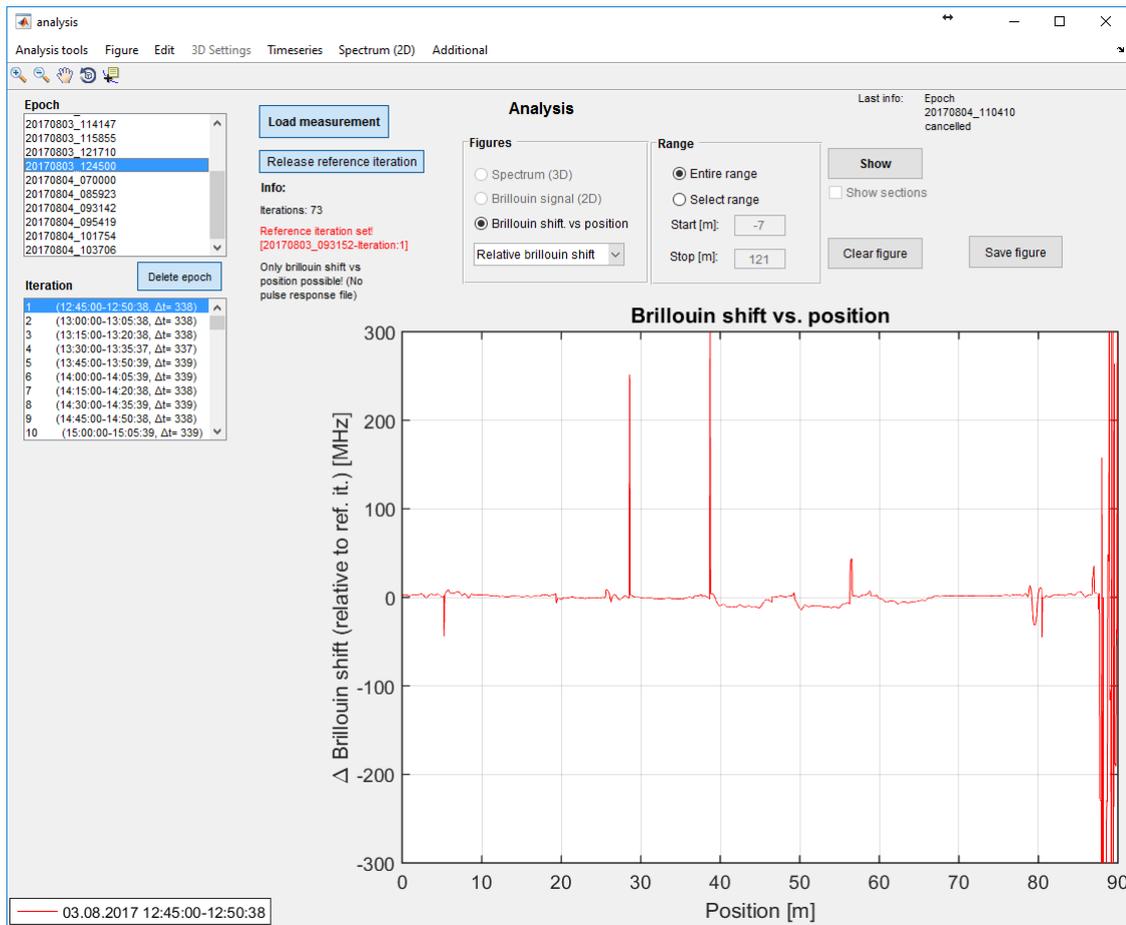


Abbildung 3.5: Analyse GUI (FBA)

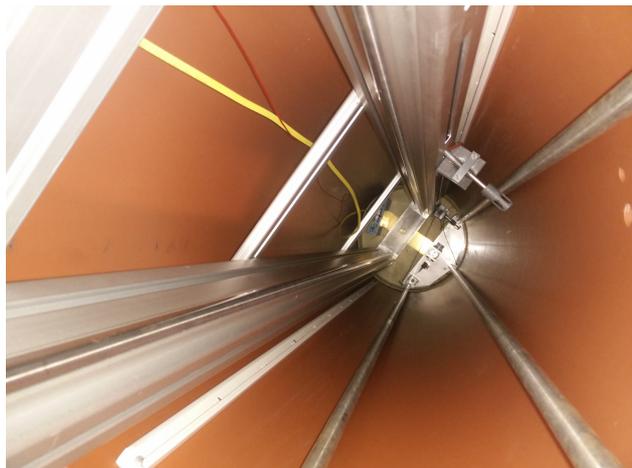
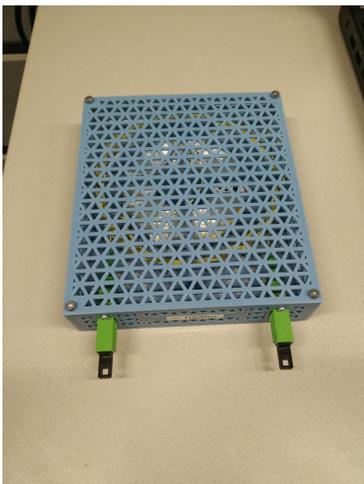
Weitere Analysefunktionen erlauben die Darstellung des BGS an einer bestimmten Position. Daraus kann eine Aussage über die Intensität der Rückstreuung getroffen werden. Es kann somit die Änderung des Spektrums an einer bestimmten Position über mehrere Epochen hinweg dargestellt und analysiert werden. Falls gewünscht, können auch unterschiedliche Positionen mehrerer Epochen miteinander verglichen werden.

Die dargestellten Daten können mit dem Button *Save figure* im \*.png, \*.pdf und im \*.fig Dateiformat abgespeichert werden. Zusätzlich können Farbe, Stärke und Linienart der geplotteten Linien geändert werden.

# Kapitel 4

## Labormessungen mit fTB 2505

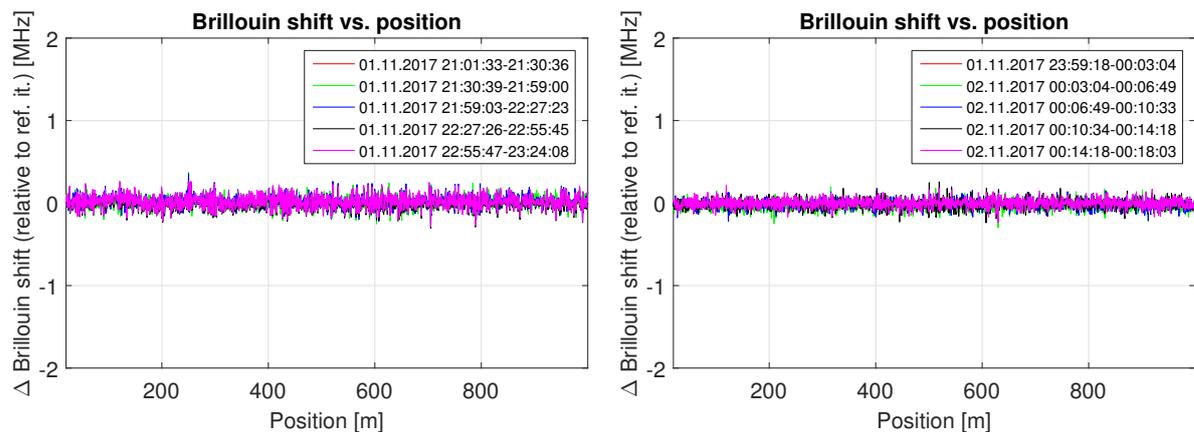
Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen unterschiedlicher Einstellungen der ausgegebenen Stärke des EDFA bzw. der Ortsauflösung auf die Messungen untersucht (Teststadium 1). Dafür wurde eine Standard-Singlemodefaser (Standard-singlemode fiber) (SSMF) mit einer Länge von 1000 m im Vertikalkomparator des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der TU Graz (IGMS) abgelassen (siehe Abbildung 4.1). Die Versuchsmessungen wurden dort durchgeführt, da die Temperaturdifferenzen nur wenige Zehntel °C über mehrere Stunden ausmachen. Es konnte somit sichergestellt werden, dass keine signifikanten Temperatur- bzw. Dehnungsänderungen während der Messungen auftraten. Eine Messkampagne dauerte zirka eineinhalb Tage, wobei die Messungen mit gleichen Einstellungen für die Untersuchung der Genauigkeit innerhalb von zwei Stunden lagen.



**Abbildung 4.1:** Messungen im Vertikalkomparator

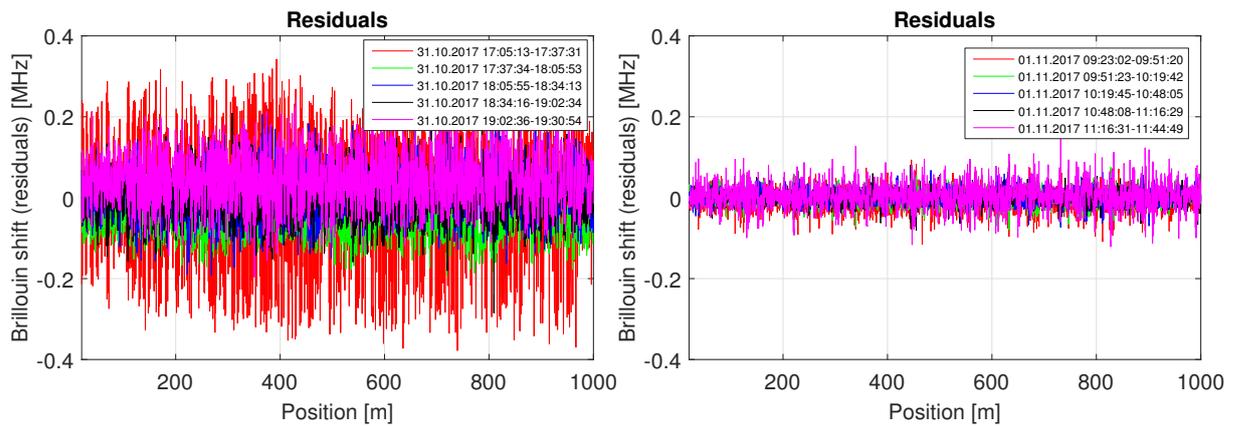
## 4.1 Wiederholbare Genauigkeit von fTB2505 Messungen

In Abbildung 4.2 sind jeweils fünf Messungen bei einer räumlichen Auflösung von 0,5 m und Frequenzschritten von 0,1 MHz (links) und 1 MHz (rechts) dargestellt. Im Unterschied zu einem verunreinigten Stecker (siehe Abbildung 4.8) ist eine gleichmäßige Abweichung zur Referenziteration zu sehen.

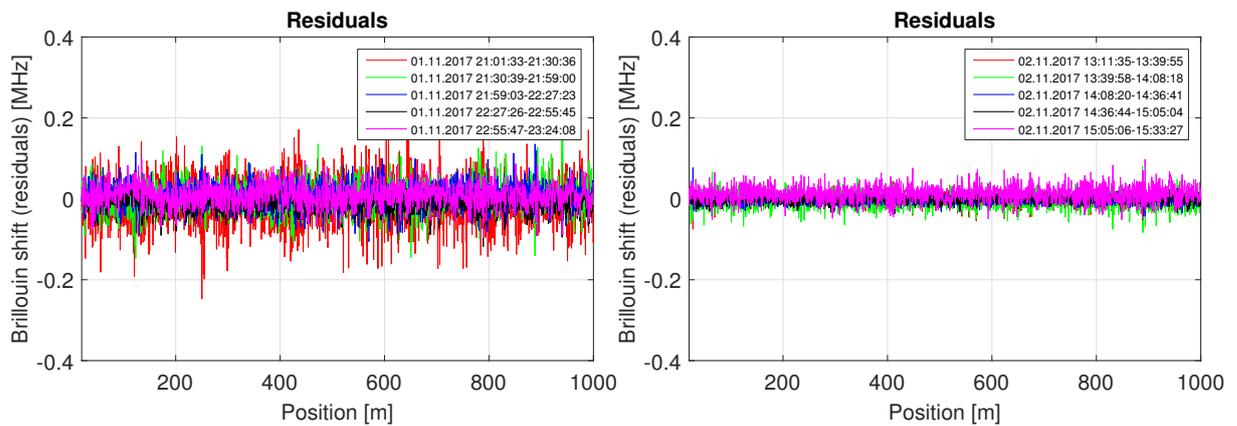


**Abbildung 4.2:** Relativer BFS (links: 0,1 MHz Frequenzschritt, rechts: 1 MHz Frequenzschritt)

Um die wiederholbare Genauigkeit der fTB 2505 Messungen bestimmen zu können, wurden mit unterschiedlichen Einstellungen jeweils fünf Messungen hintereinander durchgeführt. Der gesamte Messversuch wurde zweimal wiederholt. In den Abbildungen 4.3 und 4.4 sind jeweils die erste und letzte Messung der Messkampagnen dargestellt. Diese wurden mit 0,5 m Ortsauflösung und 0,1 MHz Frequenzschritt durchgeführt. Die erste Messkampagne (Versuch I) weist sowohl am Anfang als auch am Ende ein schlechteres Ergebnis als die des Versuchs II auf. Weiters fällt auf, dass bei der ersten Messung die erste Iteration eine höhere Abweichung vom Mittelwert aufweist als die übrigen Iterationen (jeweils in der linken Grafik). Im Gegensatz dazu haben die Iterationen der Messungen am Ende der Messkampagnen ähnliche Abweichungen. Ein Grund dafür könnte eine Aufwärmphase des Messinstrumentes sein.



**Abbildung 4.3:** Residuen von 5 Messungen bei 0,5 m Ortsauflösung und 0,1 MHz Frequenzschritt (Versuch I, links: erste Messung und rechts: letzte Messung)



**Abbildung 4.4:** Residuen von 5 Messungen bei 0,5 m Ortsauflösung und 0,1 MHz Frequenzschritt (Versuch II, links: erste Messung und rechts: letzte Messung)

In Abbildung 4.5 ist ein Histogramm mit der relativen Häufigkeit der Abweichungen und der Normalverteilung als rote Linie eingezeichnet. Weiters ist auf der linken Seite eine Grafik mit den Abweichungen gegenüber der einzelnen Iterationen dargestellt. Das Histogramm zeigt, dass die Abweichungen normalverteilt sind und im Bereich von  $\pm 300$  KHz liegen. In der linken Grafik sind nochmals die erhöhten Abweichungen der ersten Iteration ersichtlich (vgl. 4.3). Die geringsten Abweichungen weist die zweite Iteration auf.

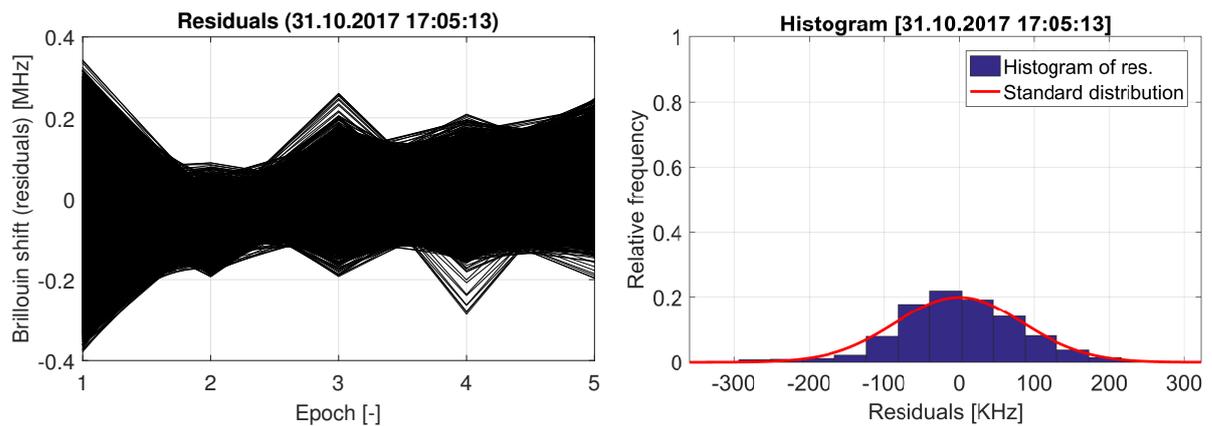


Abbildung 4.5: Abweichungen vs. Iteration und Histogramm (Versuch I)

In Abbildung 4.6 sind die maximalen Verbesserungen und die Standardabweichungen der Abweichungen vom Mittelwert dargestellt. Die erste Messkampagne ist als durchgezogene Linie dargestellt, die zweite als strichlierte Linie.

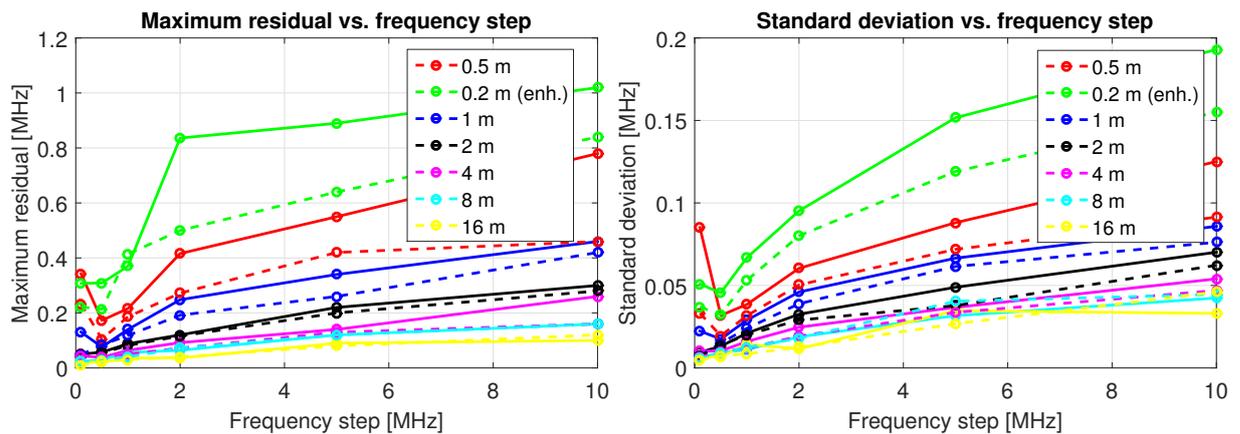


Abbildung 4.6: Maximale Verbesserungen zu den Abweichungen vom Mittelwert (links) und Standardabweichung (rechts)

Je niedriger die räumliche Auflösung, desto besser wird auch die wiederholbare Genauigkeit. Bei einer räumlichen Auflösung von 0,5 m werden somit höhere Standardabweichungen als bei 16 m erreicht. Weiters nimmt die wiederholbare Messgenauigkeit mit zunehmender Schrittweite der Frequenz ab. Auch innerhalb der beiden Messkampagnen weichen die erreichten Werte vor allem bei 0,5 m und 0,2 m enhanced voneinander ab.

In Tabelle 4.1 sind die Standardabweichungen  $\sigma$  mit den einzelnen Messeinstellungen des ersten Versuchs in MHz dargestellt. Laut Hersteller liegt die wiederholbare Genauigkeit unter 100 KHz. Alle Werte bis auf einen liegen in diesem Bereich.

**Tabelle 4.1:** Standardabweichung der Brillouin Frequenzverschiebung (Versuch I)

Spatial resolution [m]	0,5	1	2	4	8	16
Frequency step [MHz]	$\sigma$ [MHz]	$\sigma$ [MHz]	$\sigma$ [MHz]	$\sigma$ [MHz]	$\sigma$ [MHz]	$\sigma$ [MHz]
0,1	0,09	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
0,5	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
1	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
2	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01
5	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03
10	0,13	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03

In den Tabellen 4.2 und 4.3 sind die Standardabweichungen in Dehnungen und Temperaturen umgerechnet. Als Umrechnungsfaktor wurden 48 MHz/1000  $\mu\epsilon$  und 1 MHz/1,2 °C herangezogen. Auch hier sind die Werte, welche innerhalb der Herstellerangaben liegen, grün eingefärbt. Die wiederholbare Genauigkeit für die Dehnung wird mit  $<2 \mu\epsilon$  und für die Temperatur mit  $<0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  angegeben (siehe Datenblatt im Anhang A).

Bei den Dehnungsänderungen ist lediglich die Messung mit einer Ortsauflösung von 0,5 m und einem Frequenzschritt von 10 MHz oberhalb der  $2 \mu\epsilon$ . Bei den Temperaturdifferenzen kommt es durch die Umrechnung bei insgesamt vier Standardabweichungen zu einer Überschreitung der Herstellerangabe.

**Tabelle 4.2:** Standardabweichung der Dehnungsänderung (Versuch I)

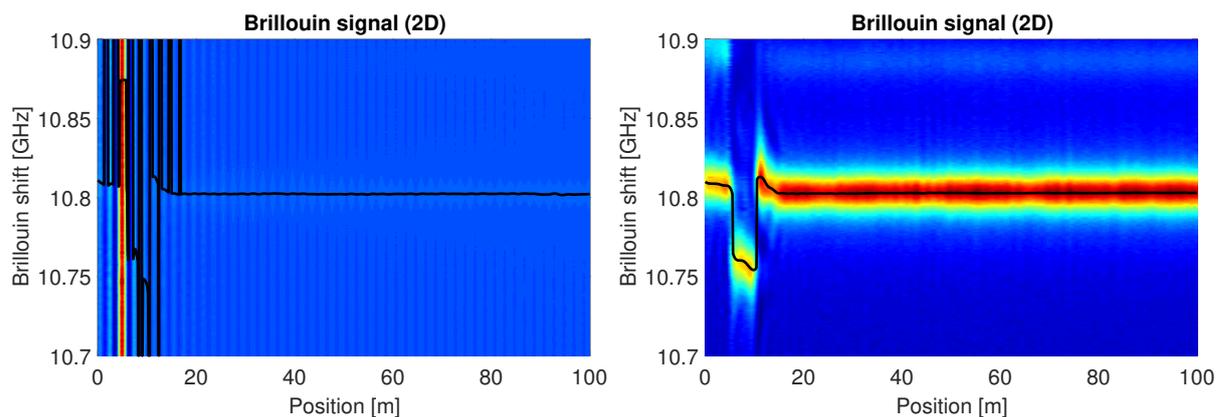
Spatial resolution [m]	0,5	1	2	4	8	16
Frequency step [MHz]	$\sigma$ [ $\mu\epsilon$ ]					
0,1	1,77	0,47	0,20	0,21	0,13	0,13
0,5	0,66	0,36	0,27	0,21	0,19	0,14
1	0,80	0,60	0,44	0,33	0,23	0,30
2	1,26	0,96	0,68	0,51	0,39	0,24
5	1,83	1,39	1,02	0,76	0,66	0,72
10	2,61	1,79	1,46	1,12	0,88	0,69

**Tabelle 4.3:** Standardabweichung der Temperaturänderung (Versuch I)

Spatial resolution [m]	0,5	1	2	4	8	16
Frequency step [MHz]	$\sigma$ [°C]					
0,1	0,10	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
0,5	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
1	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02
2	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01
5	0,11	0,08	0,06	0,04	0,04	0,04
10	0,15	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04

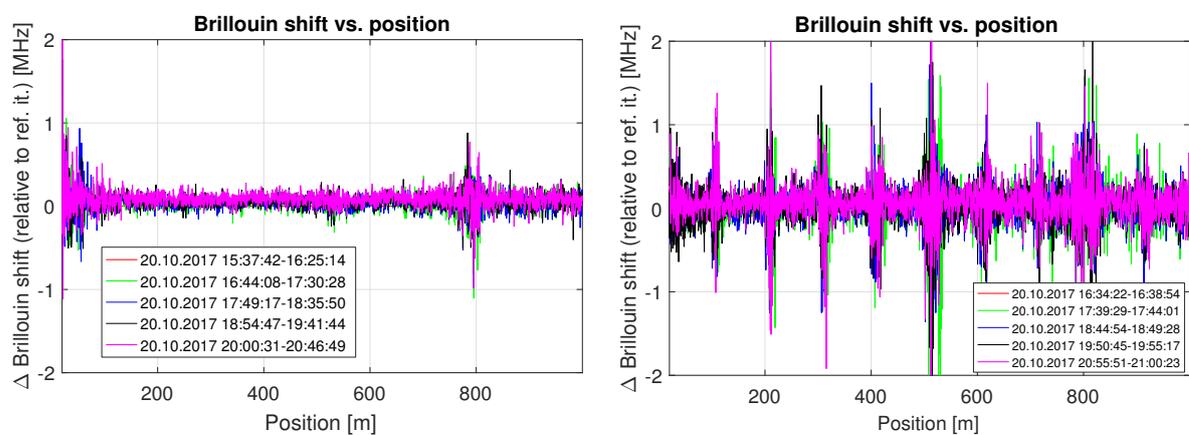
## 4.2 Einfluss eines verunreinigten Steckers auf die Messung

Abbildung 4.7 zeigt die Auswirkung eines verunreinigten Steckers auf die Messung. Bei diesem Messversuch ist die Rückreflexion so stark, dass das Spektrum komplett abgeflacht ist. Im linken Bild ist bei einem Patch Cord der Stecker verunreinigt und somit kommt es bei 5 m zu einer sehr starken Rückstreuung. Die Messung weist danach fast keine Rückstreuung mehr auf, da die Intensität nicht mehr dazu ausreicht. Im rechten Bild wurde dieser Stecker geputzt und über die gesamte Faser wird ein natürliches Spektrum geliefert.



**Abbildung 4.7:** Auswirkung eines verschmutzten (links) und geputzten (rechts) Steckers auf das Brillouin Signal

Die Auswirkungen spiegeln sich nicht nur im Brillouin Signal wieder, sondern verändern auch den BFS der Messungen. In Abbildung 4.8 ist auf der linken Seite eine Grafik mit fünf Epochen mit einer räumlichen Auflösung von 0,5 m und einem Frequenzschritt von 0,1 MHz zu sehen. Auf der rechten Seite wurde der Frequenzschritt auf 1 MHz bei der Brillouin Modulation erhöht. Bei der Messung mit einem Frequenzschritt von 0,1 MHz sind lediglich zwei größere Abweichungen zur Nullepoche bei 20 m und 800 m zu sehen. Erhöht man den Frequenzschritt jedoch auf 1 MHz, treten diese Abweichungen alle 100 m auf und die Messung wird durch den verunreinigten Stecker erheblich negativ beeinflusst.



**Abbildung 4.8:** Auswirkung verschmutzter Stecker auf den BFS (links: 0,1 MHz Frequenzschritt, rechts: 1 MHz Frequenzschritt)

Auch bei der Intensität sind die Auswirkungen der Verunreinigung klar ersichtlich (siehe Abbildung 4.9). Beim verunreinigten Stecker ist die Intensität bei 5 m sehr hoch, danach fällt sie jedoch auf ein niedriges Niveau zurück. Bei der Messung mit dem geputzten Stecker, in blau dargestellt, ist die Intensität über die ganze gemessene Faser auf einem gleichmäßigen Wert. Aus diesem Grund sollte jedes mal nachdem Stecker bzw. Splices neu zusammengesetzt werden, die Enden der Glasfaser auch geputzt werden. Bei geputzten Steckern kommt dieser Effekt nicht zum Vorschein (vgl. Kapitel 4.1).

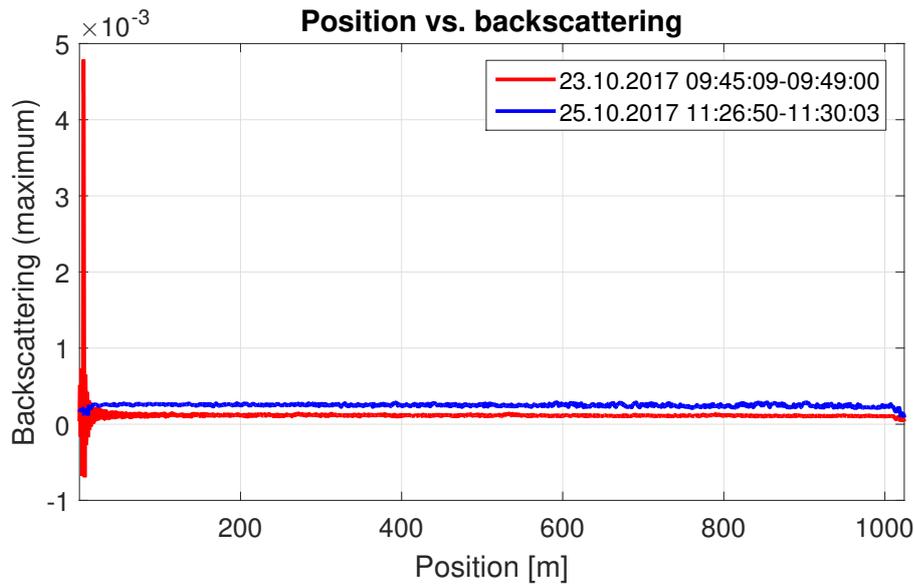


Abbildung 4.9: Auswirkung verschmutzter Stecker auf die Intensität

### 4.3 Auswirkung unterschiedlicher Ausgabestärken des EDFA

Im Folgenden werden die Auswirkungen unterschiedlicher Ausgabestärken des EDFA auf die fTB 2505 Messungen untersucht. Dieses Phänomen hängt eng mit dem vorherigen Unterkapitel zusammen, da die optische Ausgabestärke des EDFA automatisch ermittelt und stark von den Dämpfungen (Stecker und Splices) entlang der Faser beeinflusst wird. Die optische Verstärkung ist abhängig von der Länge der Faser und von der Dämpfung. Eine längere Faser benötigt somit eine höhere optische Verstärkung als eine kurze. Typische Werte für die Dämpfung liegen bei 0,3 dB/km. Dazu kommen noch eventuelle Stecker mit 0,5 dB und Splices mit 0,1-1 dB. Sollte eine Strecke mehr als 3 dB pro Kilometer aufweisen, ist diese zu untersuchen, da sie eventuell verunreinigte Stecker bzw. hohe Krümmungen aufweist. Beim Gerät fTB 2505 ist die maximale Dämpfung laut Hersteller mit 20 dB angegeben. Bei der maximalen messbaren Länge von 50 km und 10 Steckverbindungen würde man in etwa diese 20 dB erreichen.

In Abbildung 4.10 ist in rot die automatisch detektierte Verstärkung mit 10 dBm und eine erhöhte Verstärkung mit 15 dBm in grün dargestellt. In den Randbereichen passen die Messungen, abgesehen von einer Verschiebung (rührt von der Temperaturdifferenz der

beiden Messungen her), gut zusammen. Von 300 m bis 700 m jedoch ist der BFS stark verändert und spiegelt nicht die tatsächliche Brillouin-Frequenzverschiebung wieder. Im rechten Bild (siehe Abbildung 4.11) sind die maximalen Rückstreuungen dreier Messungen mit unterschiedlichen Ausgabestärken des EDFA dargestellt. In grün ist wiederum die erhöhte Verstärkung mit 15 dBm, in rot die mit 10 dBm und in blau eine mit 0 dBm dargestellt.

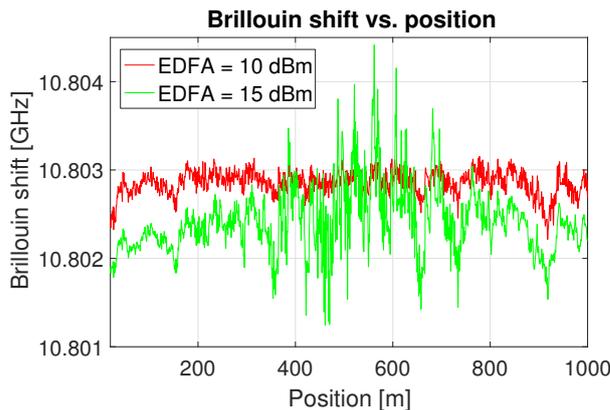


Abbildung 4.10: EDFA und BFS

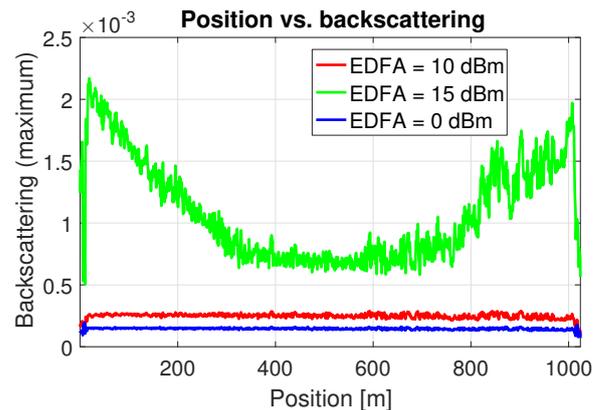


Abbildung 4.11: EDFA und Rückstreuung

Die maximale Rückstreuung der Messung mit 15 dBm ist viel höher als die der anderen und weist auch ein untypisches Verhalten auf. Die Rückstreuungen sollten nämlich (ohne signifikante Temperatur- bzw. Dehnungs-Einwirkungen, ohne Stecker/Splices und ohne Bewegung der Faser selbst [Krümmung]) auf einem ähnlichen Niveau liegen. In diesem Fall sinkt sie zuerst ab und steigt danach wieder an. Die beiden anderen Messungen weisen wie erwartet eine konstante maximale Rückstreuung auf, lediglich die mit 0 dBm ist geringer.

In Abbildung 4.12 sind die Auswirkungen unterschiedlicher optischer Ausgangsstärken des EDFA auf das Spektrum (BGS) dargestellt. Es ist jeweils bei 100 m und 500 m der 1000 m langen Glasfaser das Spektrum bei den Ausgangsstärken 0, 10 und 15 dBm des EDFA dargestellt. Bei den beiden niedrigeren optischen Ausgangsstärken ist das Spektrum bei beiden Positionen sehr ähnlich. Bei der Verstärkung des EDFA auf 15 dBm ändert sich jedoch das Spektrum und weist zwei Peaks auf. Dadurch kommt es zu Schwierigkeiten bei der Schätzung des Lorentz-Profiles und somit zu falschen Frequenzverschiebungen. Am Anfang und am Ende der Faser ist nur ein Peak vorhanden, in der Mitte jedoch immer zwei. Dies passt auch mit dem Ergebnis des BFS zusammen (vgl. Abbildung 4.10).

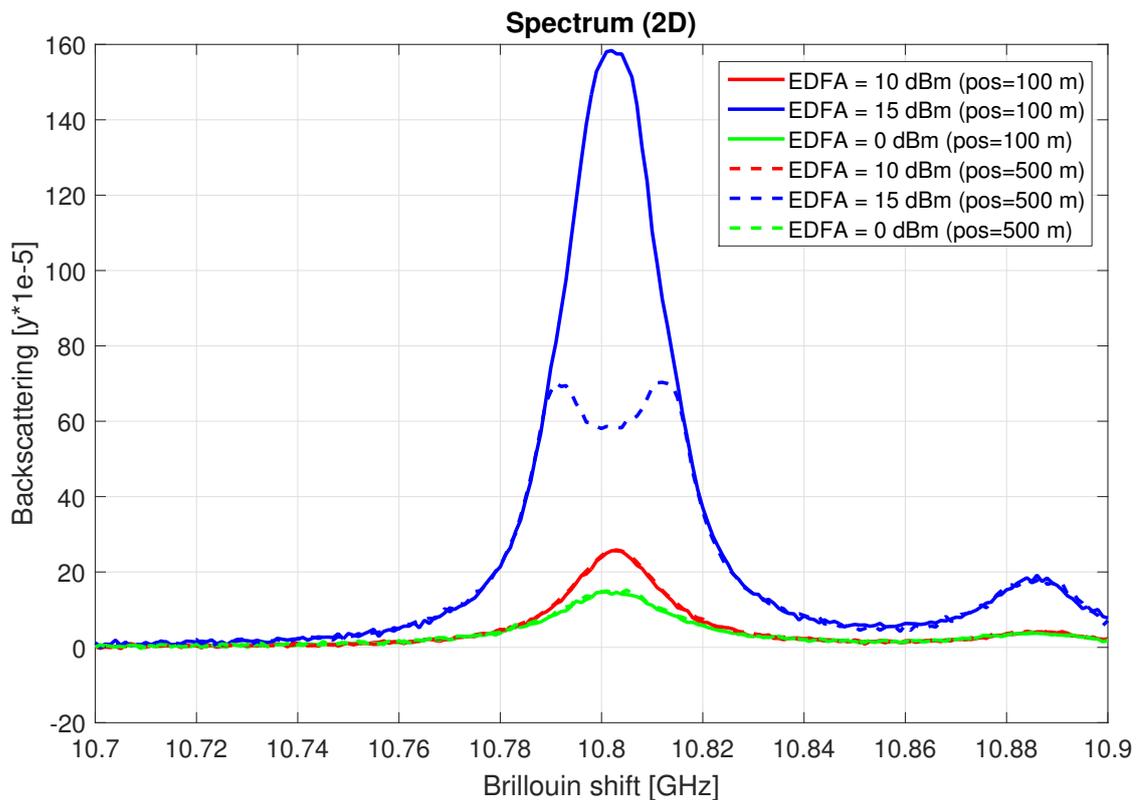


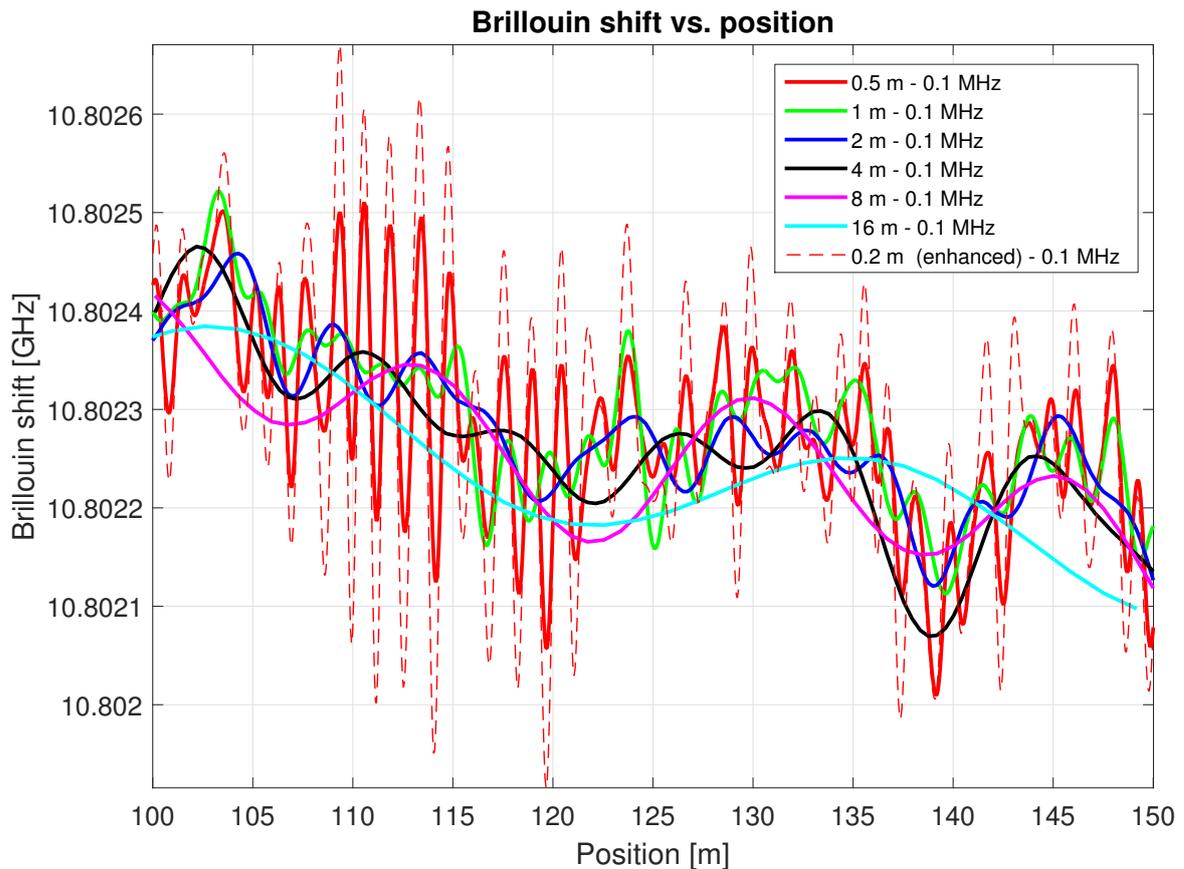
Abbildung 4.12: Auswirkung unterschiedlicher EDFA auf das Spektrum

## 4.4 Einfluss der Ortsauflösung auf die Position

In Abbildung 4.13 sind alle räumlichen Auflösungen, die beim Messinstrument FTB 2505 zur Verfügung stehen, dargestellt. Als Frequenzschritt für den Brillouinscan wurde die höchste zur Verfügung stehende Auflösung von 0,1 MHz gewählt. Als erweiterte Variante kommt eine Softwarelösung zum Einsatz, welche die tatsächliche Ortsauflösung von 0,5 m auf 0,2 m verbessert (laut dem Hersteller für mehr Details für Längen bis zu 2 km und insgesamt maximal 5 dB Dämpfung empfohlen). Es wird ersichtlich, dass je nach Anwendungsbereich eine entsprechende Ortsauflösung zu wählen ist. Vergleicht man zum Beispiel die Auflösungen von 0,5 m und 16 m wird deutlich, dass viele Details bei einer niedrigeren Ortsauflösung verloren gehen.

Bei der Darstellung der unterschiedlichen Ortsauflösungen wird auch die Problematik ersichtlich, welche ein Vergleichen unterschiedlicher faseroptischer Messungen mit sich bringt. Durch unterschiedliche Ortsauflösungen und das Messen an den nicht exakt

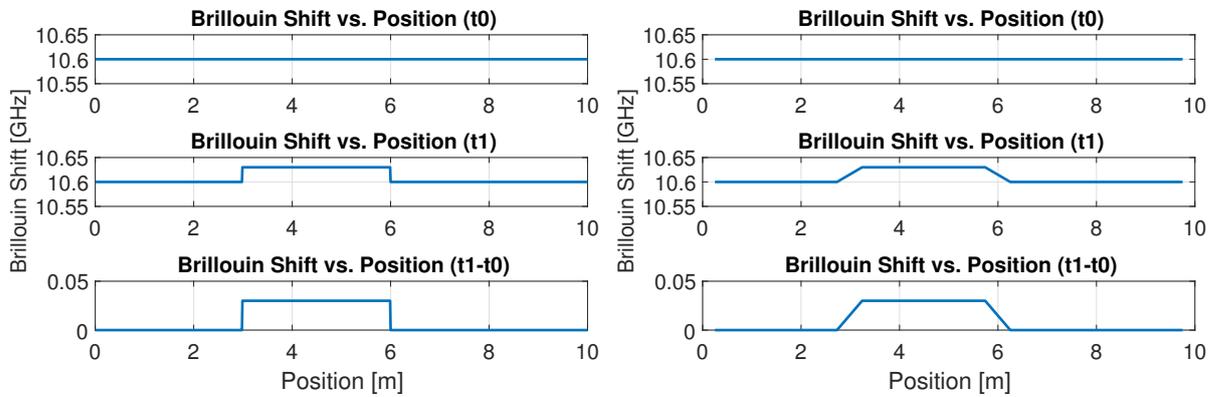
selben Positionen ist beim Vergleichen von Messungen unterschiedlicher Messinstrumente besondere Vorsicht angebracht. Das Messgerät Luna OBR 4600 nimmt viel mehr Details mit 1 cm Ortsauflösung auf, als das FTB 2505 im Vergleich mit nur 50 cm. Vergleicht man hier die Positionen miteinander kommen mit großer Sicherheit unterschiedliche Ergebnisse heraus. Das selbe Problem tritt bei Messungen mit unterschiedlichen Ortsauflösungen mit dem FTB 2505 auf. Aus diesem Grund sollten die Messungen eines Einsatzgebietes immer mit denselben Einstellungen durchgeführt werden.



**Abbildung 4.13:** Unterschiedliche räumliche Auflösungen

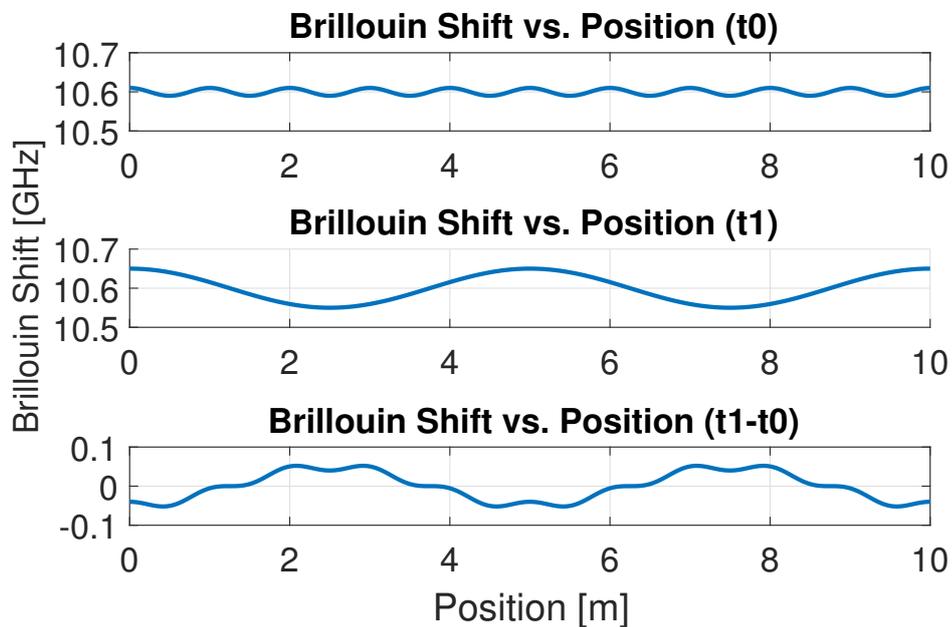
In Abbildung 4.14 sind die Auswirkungen einer theoretischen Ortsauflösung von 0,5 m durch einen gleitenden Mittelwert im Vergleich zu einer Ortsauflösung von 1 cm dargestellt. Im obersten Subplot ist keine Deformation und im mittleren eine im Abschnitt von 3 m bis 6 m dargestellt. Der unterste Subplot zeigt die Differenz dieser beiden Zeitreihen. Würde die Ortsauflösung 1 cm betragen, wäre die linke Seite das Resultat. Wenn man jedoch 0,5 m als Ortsauflösung nimmt, entstehen dadurch Glättungen des eigentlichen

Rechtecks bei 3 m und 6 m. Die Differenzen zwischen den Epochen sind also im Bereich um 3 m und 6 m unterschiedlich.



**Abbildung 4.14:** Auswirkung einer Ortsauflösung von 1 cm (l.) und 50 cm (r.) auf die Position

Durch die Amplituden- und Frequenzmodulation kommt es beim BOFDA Verfahren zu einer wellenartigen Funktion. In Abbildung 4.15 sind Lichtquellen (Pump und Stokes-Welle) mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen und deren Überlagerung dargestellt. Dadurch kommt es zum gleichen Effekt wie in Abbildung 4.13.



**Abbildung 4.15:** Wellenartiges Verhalten der Frequenzverschiebung

# Kapitel 5

## Teststrecke des Zentralen Informatikdiensts

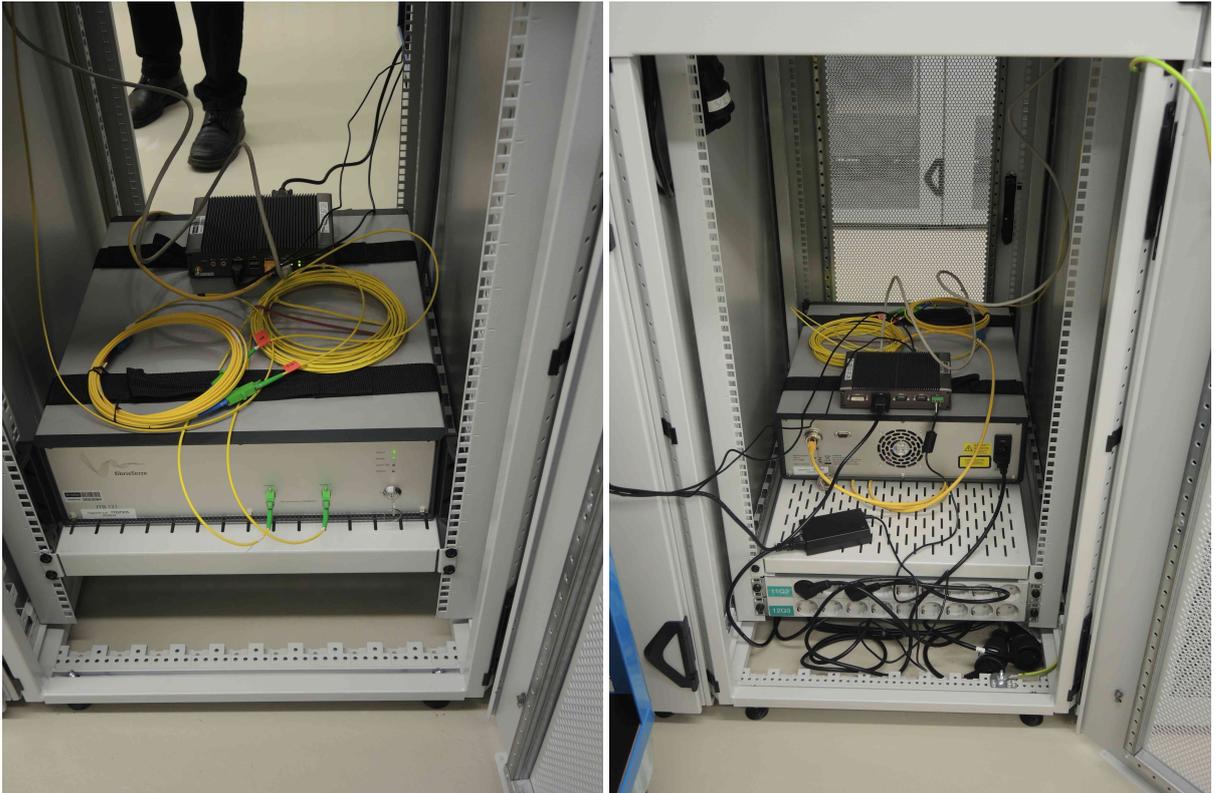
In diesem Kapitel erfolgt die Analyse des zweiten Teststadiums. Dieses umfasst eine Schleife vom Campus Neuen Technik zum Campus Alten Technik an der TU Graz und wieder zurück.

Hervorzuheben ist dabei, dass die verwendete Messfaser eine normale Kommunikationsfaser des Zentraler Informatikdienst, TU Graz (ZID) ist und keine speziell für die Sensorik hergestellte Glasfaser. Weiters besitzt diese Strecke ausschließlich physical contact (PC) Stecker, welche grundsätzlich eine höhere Rückreflexion als angled physical contact (APC) Stecker verursachen.

Da die Schleife nicht speziell für eine Monitoringmessung verlegt wurde, sind die auftretenden Werte (BFS) ein Gesamtwert aus den Dehnungs- und Temperatureinflüssen. Um die Einflüsse von Dehnung und Temperatur trennen zu können, müsste die Leitung so verlegt sein, dass eine Strecke Temperatur- und Dehnungssensitiv und die andere nur Temperatursensitiv (von Dehnungseinflüssen z.B. durch ein Hüllrohr isoliert) ist. Weiters sind Kommunikationsfasern bewusst so ausgelegt, dass kein direkter Dehnungstransfer stattfinden sollte. Deshalb handelt es sich bei den auftretenden Unterschieden zwischen den Messungen um Temperaturdifferenzen.

## 5.1 Leitungsverlauf

Das Messgerät befindet sich für diese Messung in einem Rack des ZID (siehe Abbildung 5.1) in der Stremayrgasse 16 am Campus Neue Technik der TU Graz. Am Bild sind das Messgerät und der Feldrechner zu sehen, welcher die Messungen mithilfe der Monitoringsoftware FBM steuert.



**Abbildung 5.1:** Messgerät FTB 2505 im Rack

Der genaue Verlauf der Messstrecke wurde zum einen durch Abgehen der Kabel und zum anderen durch die Erhebung eines Leitungskatasters festgestellt. Der grobe Verlauf des Kabels ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Kommunikationsfaser ist als rote Linie eingezeichnet und die weißen Quadrate sind Kabelschächte. Das Kabel durchquert die Steyrergasse 30 am Campus Neue Technik und die beiden Gebäude Technikerstraße 4 und Lessingstraße 25 am Campus Alte Technik der TU Graz.

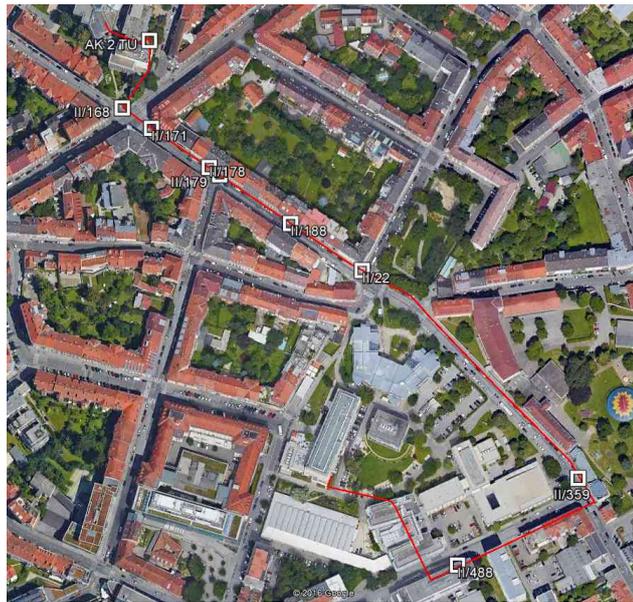


Abbildung 5.2: ZID Teststrecke Leitungsverlauf (Hintergrundbild: Google Earth)

Ein Beispiel für den erhobenen Plan (siehe Abbildung 5.3) von A1 Telekom Austria ist im Folgenden zu sehen. Der Verlauf der Kommunikationsfaser ist in Orange strichliert eingezeichnet.

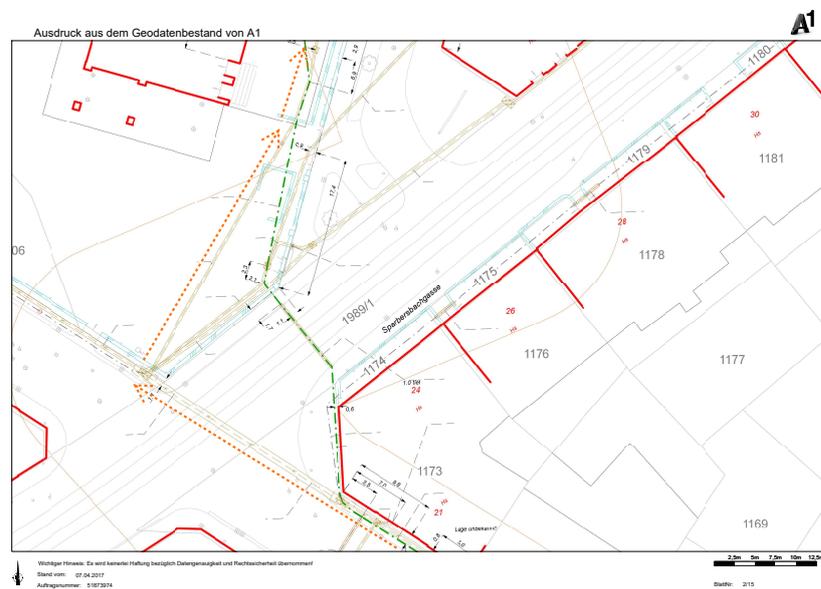


Abbildung 5.3: Leitungskataster: Ecke Mandellstraße/Sparbersbachgasse; Glasfaser ist Orange strichliert (Quelle: A1 Telekom Austria)

## 5.2 OFDR und OTDR Messungen

Mit der Erhebung des Leitungskatasters sowie der örtlichen Begehung war zwar der grobe Leitungsverlauf geklärt, jedoch konnten daraus keine Informationen über Stecker und andere Signalauffälligkeiten entlang der Strecke gewonnen werden. Aus diesem Grund erfolgte eine Messung mit dem OTDR Messverfahren (siehe Abbildung 5.4). Es diente dazu, allererste Informationen über die Dämpfungen (Stecker- und Splicepositionen) entlang der Strecke zu bekommen.

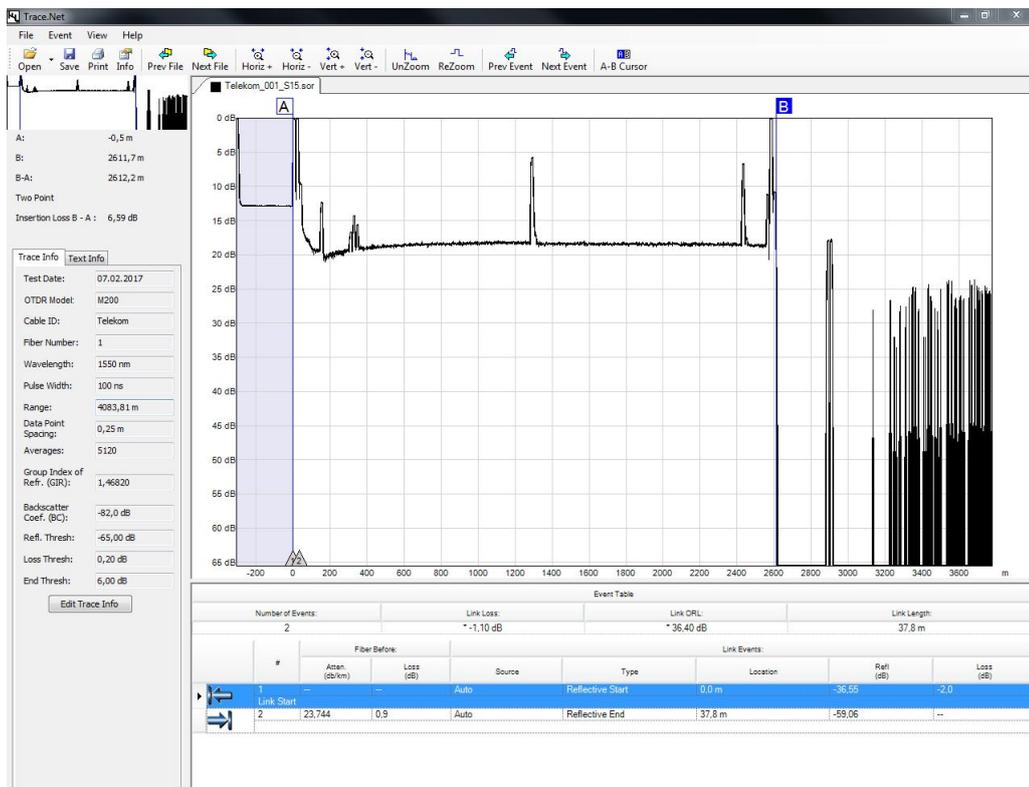
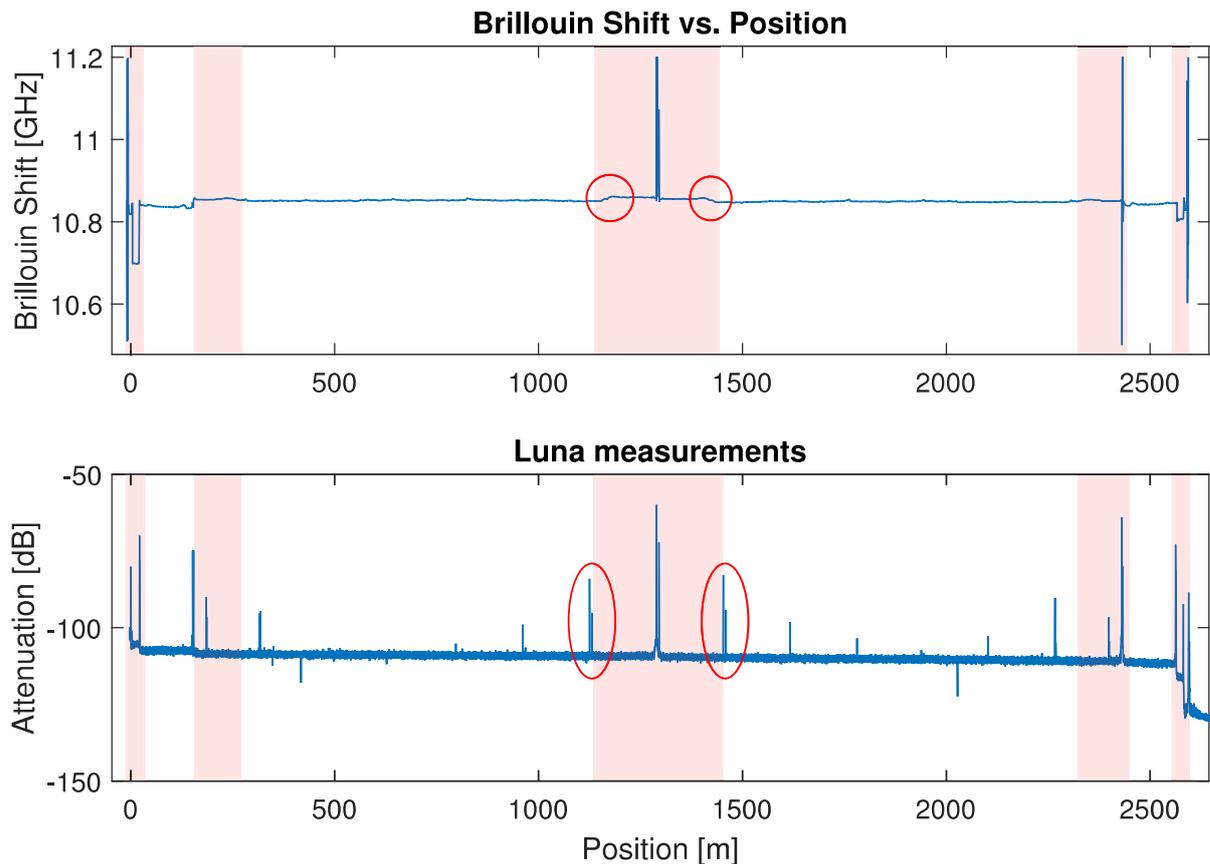


Abbildung 5.4: OTDR Messung der ZID-Teststrecke

Da nur die Steckverbindungen der SSMF in den Gebäuden klar erkenntlich sind, wurde mit dem Gerät LUNA OBR 4600, welches die Optische Frequenzbereichsreflektometrie (Optical frequency-domain reflectometry) (OFDR) verwendet, eine weitere Messung durchgeführt. Mithilfe der Dämpfung (die aus Reflexion und Distanz berechnet wurde, da sie nicht direkt messbar ist) wurden genauere Informationen über den Leitungsverlauf gewonnen. Durch die Reflexion können Stecker, Splices und andere Auffälligkeiten entlang der Leitung detektiert werden.

Der Umstand, dass nicht bekannt ist, wo Stecker bzw. Splices entlang der Faser auftreten, erschwerte die Analyse. Es kann nicht hundertprozentig gesagt werden, dass alle Peaks tatsächlich Stecker bzw. Splices sind oder ob es sich dabei um „Ghosts“ (Reflexionen zwischen Events und in Folge falscher Distanzinformationen) [11] handelt (siehe Abbildung 5.5).



**Abbildung 5.5:** Vergleich Luna und fTB Messungen der ZID-Teststrecke

Die grobe Einteilung von Gebäude- und Außenbereich stimmt in den Messungen von Luna und fTB überein. Peaks treten zum Beispiel jeweils beim Eintreffen bzw. beim Verlassen des Campus Alte Technik auf (roter Kreis). Die Gebäudebereiche sind rot hinterlegt. Auch das Ende der Leitung in der Lessingstraße 25 ist in beiden Plots klar ersichtlich.

## 5.3 Messungen mit fTB 2505

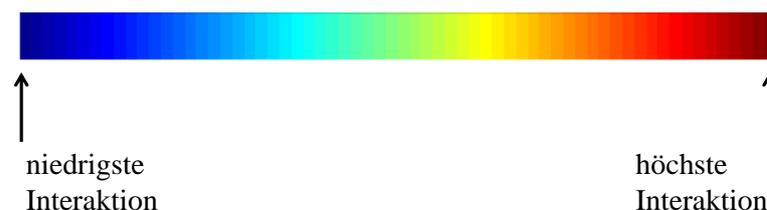
Die Messkampagnen, welche mit fTB 2505 von Anfang März bis Mai durchgeführt wurden, dauerten jeweils in etwa eine Woche. Die Messungen wurden dabei über die Monitoringsoftware FBM durchgeführt und wurden in einer Exceltabelle geplant (Variante 3 des Monitoringtools). Die räumliche Auflösung wurde mit 0,5 m festgelegt, wobei durch einen Distance Sampling Factor von 8 alle 5,2 cm ein Messwert zur Verfügung steht. Dies bedeutet pro Messung nicht ganz 50000 Messwerte regelmäßig auf die 2592 m der Faserstrecke verteilt. Da eine Messung etwas mehr als 1 Stunde dauert, wurde ein Messintervall von 1,5 Stunden gewählt, um genügend Zeit zwischen den Messungen zu haben. Alle 6 Stunden wurde zusätzlich zum BFS das BGS mit einer niedrigen räumlichen Auflösung von 1 m gemessen. In Tabelle 5.1 sind die genauen Einstellungen der Messepochen aufgelistet. Bei der Messepoche Ende April musste die räumliche Auflösung des BGS auf 2 m erhöht werden, da der Arbeitsspeicher des Notebooks ansonsten zu sehr ausgelastet war.

**Tabelle 5.1:** Messeinstellungen bei der ZID-Teststrecke

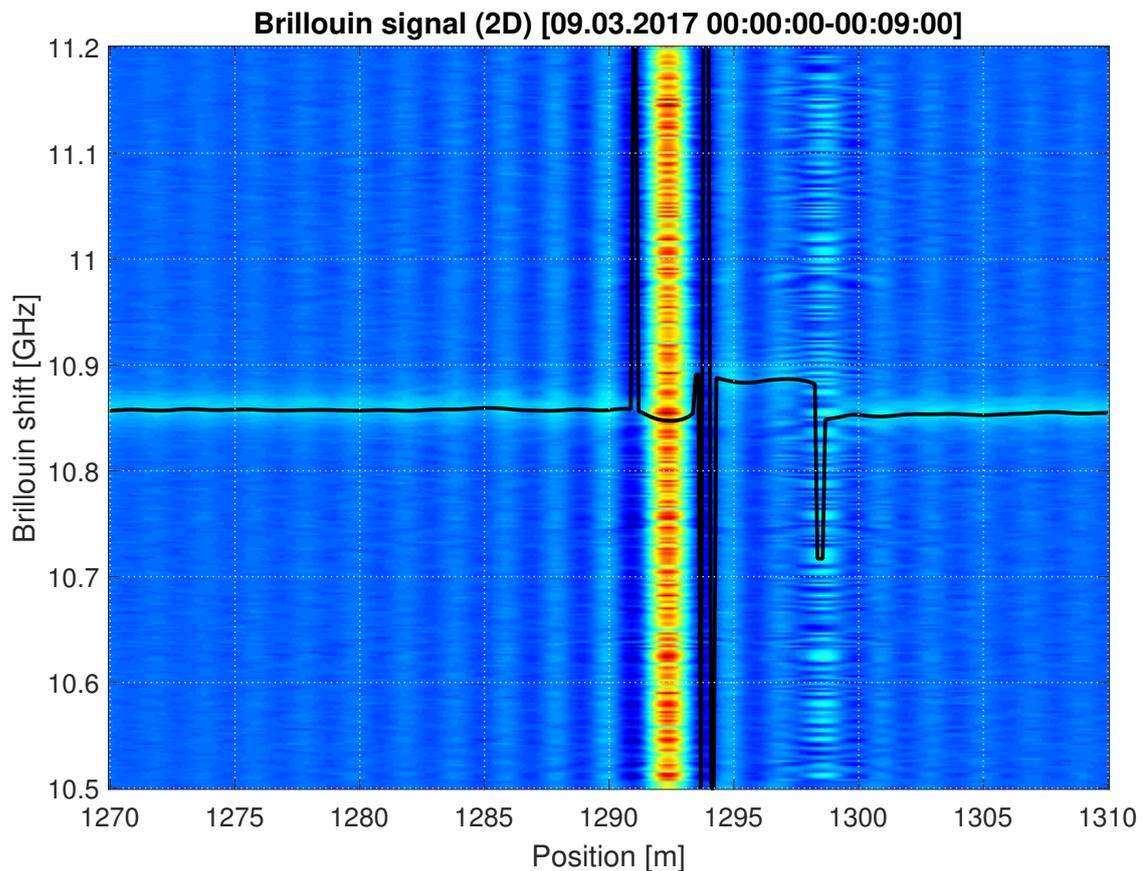
	Räumliche Auflösung [m]	Faserlänge [m]	Frequenz Start [GHz]	Frequenz Stop [GHz]	Frequenz Schritt [MHz]	Sampling Faktor
BFS	0,5	2592	10,5	11,2	1	8
BGS	1/2	2592	10,5	11,2	2	8

### 5.3.1 Brillouin Signal

In der Standardansicht des FBA wird der BFS gegenüber der Position geplottet. Dies kann verwendet werden, um eine Temperatur- bzw. Dehnungsanalyse des Monitoring-Systems durchzuführen. Das Brillouin Signal stellt die relative Intensität der Brillouin Interaktion da. Im Folgenden ist die Intensität in einem Balkendiagramm dargestellt. Eine Analyse lässt Aussagen über die Qualität und den Zustand der Glasfaser zu.



Schlechte Splices und beschädigte oder dreckige Stecker erzeugen eine hohe Fresnel-Reflexion und werden so im Brillouin Signal deutlich hervorgehoben. Diese Effekte sind ersichtlich, wenn hohe Reflexionen über das ganze Spektrum dargestellt werden. In der gemessenen Schleife treten solche Effekte zweimal auf. Einmal in der Lessingstraße 25 (siehe Abbildung 5.6) und am Rückweg in der Steyrergasse 30.

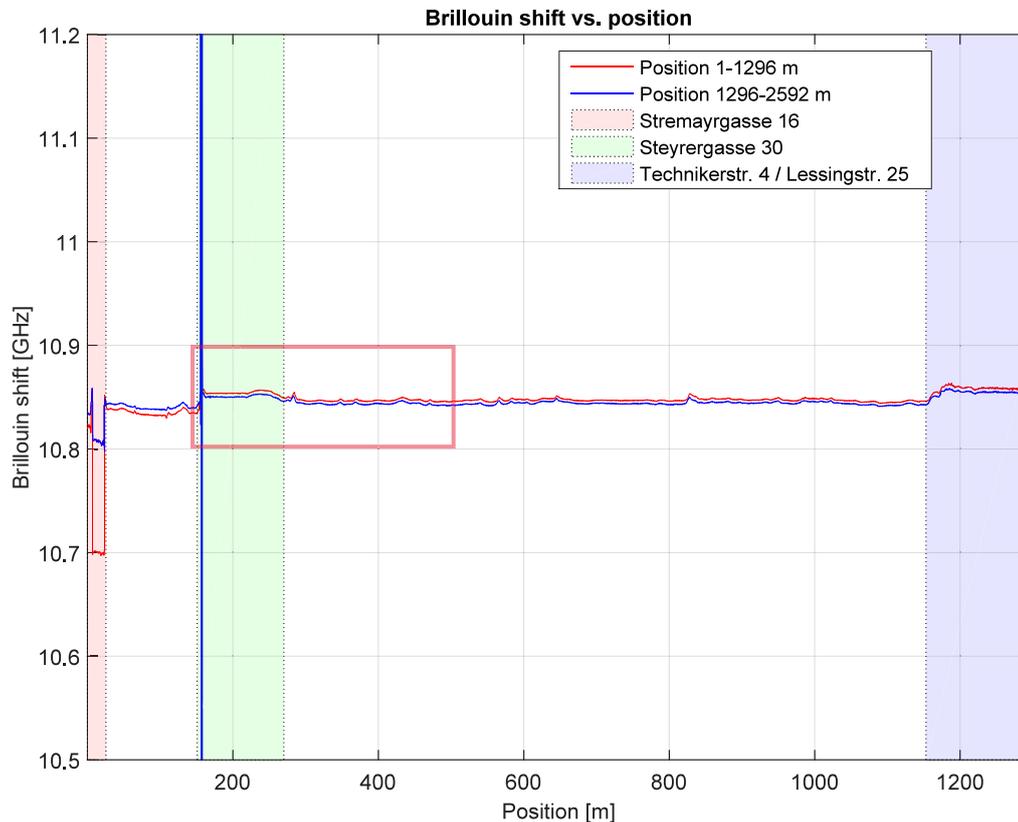


**Abbildung 5.6:** Brillouin Signal der ZID-Teststrecke (aufgespreiztes Spektrum bei Fasermeter 1293 und in geringerer Aufspreizung bei Fasermeter 1298 in der Lessingstraße 25)

Anhand des Brillouin Signals kann auch überprüft werden, ob die Einstellungen für den Brillouin Scanbereich passend getroffen wurden. Falls Lücken vorkommen, in denen keine Brillouin Interaktivität vorkommt, ist der Bereich auszudehnen (Frequency start/stop). Es sollte überdies immer eine Reserve (betreffend des Bereichs) einkalkuliert werden, vor allem, wenn hohe Temperaturunterschiede bzw. Dehnungen erwartet werden.

### 5.3.2 Brillouin-Frequenzverschiebung gegenüber der Position

Als erstes wurde der Hinweg mit dem Rückweg verglichen (siehe Abbildung 5.7). Dabei wurde die Hälfte der Länge andersherum geplottet.



**Abbildung 5.7:** BFS gegenüber der Position (Hin und rück gespiegelt), der Bereich im roten Fenster wird in Abbildung 5.10 genauer untersucht

Vergleicht man den Hinweg (rot) mit dem Rückweg (blau) sind zwei Auffälligkeiten festzustellen. Es ist deutlich zu sehen, dass die Bereiche Stremayrgasse/Steyrergasse und Steyrergasse/Lessingstraße unterschiedliche Niveaus aufweisen, was eventuell auf unterschiedliche Kabeleigenschaften (Alter, Typ...) zurückzuführen ist. Ansonsten sind Peaks und andere Merkmale an denselben Positionen. Lediglich die Patch Cords direkt beim Gerät weisen einen hohen Offset zueinander auf, was auf unterschiedliches Alter der Kabel zurückzuführen ist. Vom Temperaturunterschied erkennt man auch klar die Gebäude- (farblich hinterlegt) und Außenbereiche.

### 5.3.3 Zeitreihen der Messkampagnen

Im folgenden werden sowohl die Messkampagne im März als auch im April in einer Zeitreihe dargestellt (siehe Abbildung 5.8 und 5.9). Es ist jeweils eine Zeitreihe im Gebäude (Steyrergasse 30) und eine im Außenbereich dargestellt.

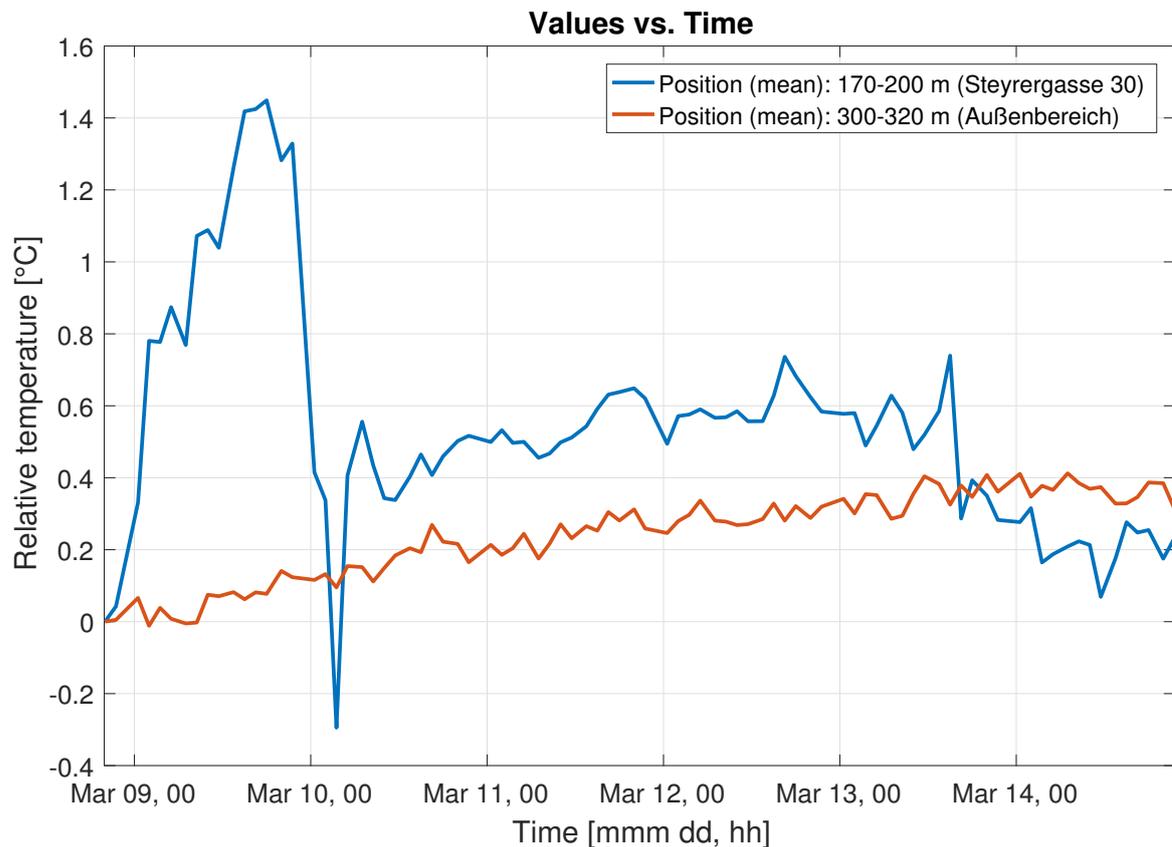
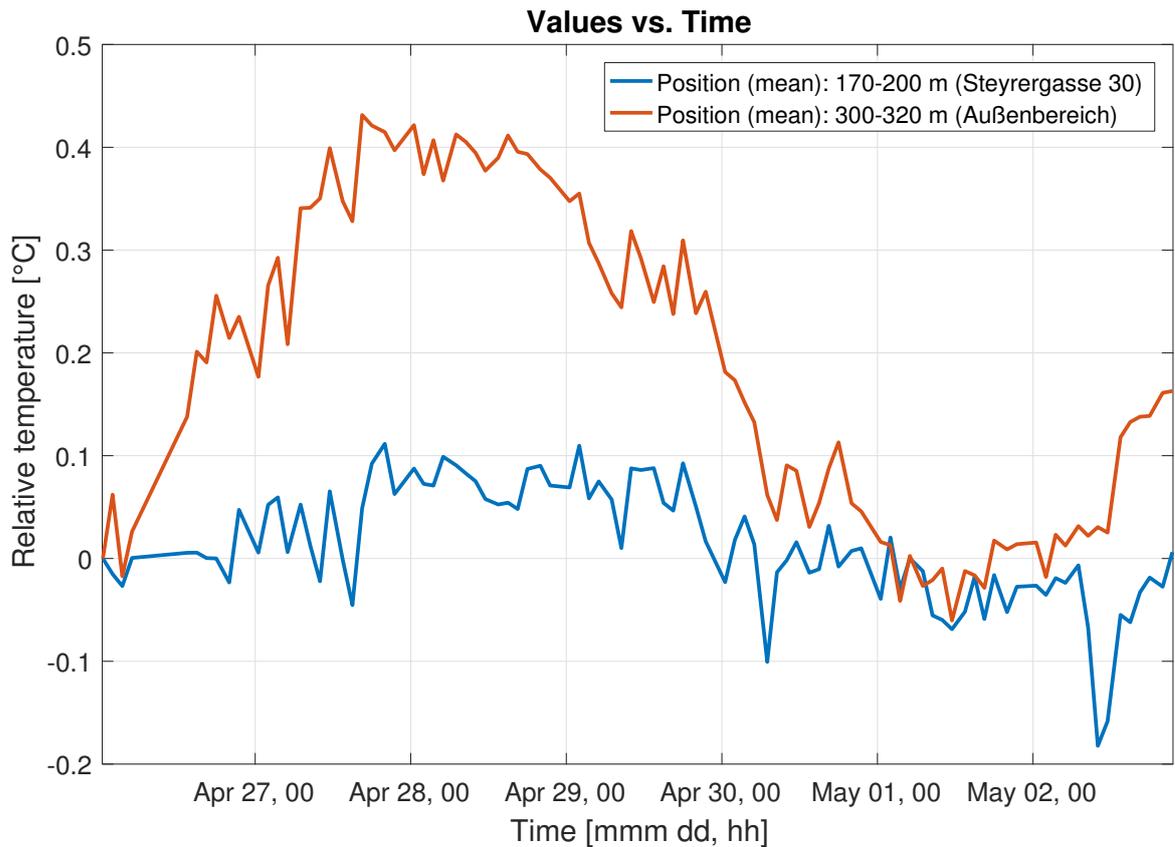


Abbildung 5.8: Zeitreihen der Messepoche März

Im Innenbereich stieg am 9. März die Temperatur an und ging am 10. März wieder zurück. Im Außenbereich ist ein leichter Trend der Temperatur ersichtlich, welcher zeitverzögert und gedämpft mit dem tatsächlichen Temperaturverlauf an der Erdoberfläche übereinstimmt. Diese wurden für den Ort Graz von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) bezogen.

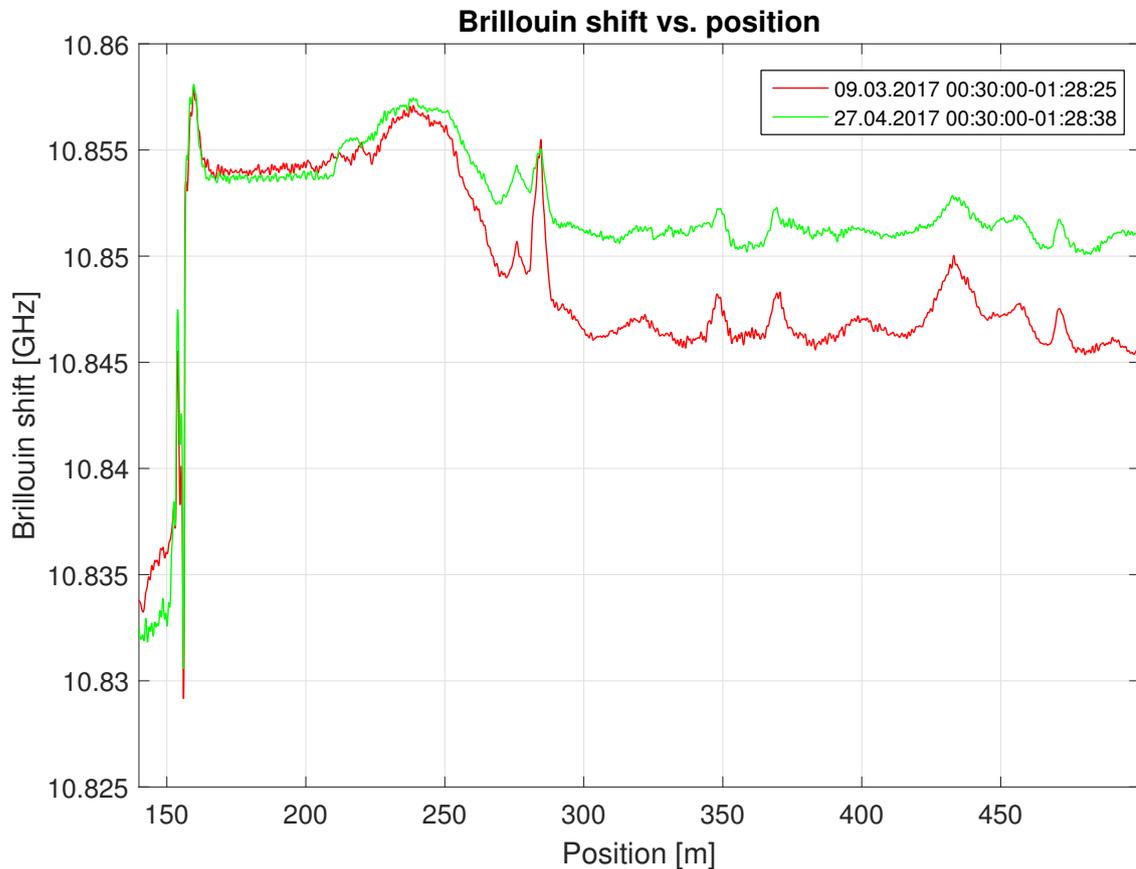


**Abbildung 5.9:** Zeitreihen der Messepoche April

Bei der Messepoche von Ende April bis Anfang Mai ist die Temperatur im Innenbereich relativ stabil und im Außenbereich ist wiederum eine Korrelation zur Temperatur der ZAMG ersichtlich. Diese stimmt natürlich nicht in absoluten Werten überein, da die Werte durch die Tiefe, in der das Kabel in der Erde vergraben ist, gedämpft und zeitverzögert sind.

### 5.3.4 Vergleich der Messepochen im März und im April

Vergleicht man die Messepoche im März mit der Messepoche Ende April, ist der Temperaturunterschied der Monate klar ersichtlich (siehe Abbildung 5.10).



**Abbildung 5.10:** Vergleich der Epochen März und April

Dargestellt ist der Bereich Steyrergasse 30 (Beginn bei 150 m) und danach der anschließende Bereich im Freien. Es ist klar ersichtlich, dass im Gebäude weniger Temperaturunterschied auftritt als im Außenbereich. Der BFS-Unterschied im Außenbereich beträgt im Schnitt 5 MHz zwischen den beiden Messepochen, was einem Temperaturunterschied von  $\sim 6\text{ °C}$  ( $1\text{ MHz} \approx 1,2\text{ °C}$ ) entspricht. Dies entspricht auch dem tatsächlichen Temperaturunterschied, der aus Temperaturabfragen des ZAMG hervorgeht. In Abbildung 5.11 sind die beiden Epochen relativ zueinander dargestellt. Im Innenbereich (160-250 m) liegt die Differenz lediglich unter 1 MHz. Hingegen ist ab 250 m der Temperaturunterschied zwischen den beiden Epochen des Außenbereichs deutlich ersichtlich. Bei 280 m führt der Heizraum in der Steyrergasse 17 die gleiche Temperatur bei beiden Epochen herbei.

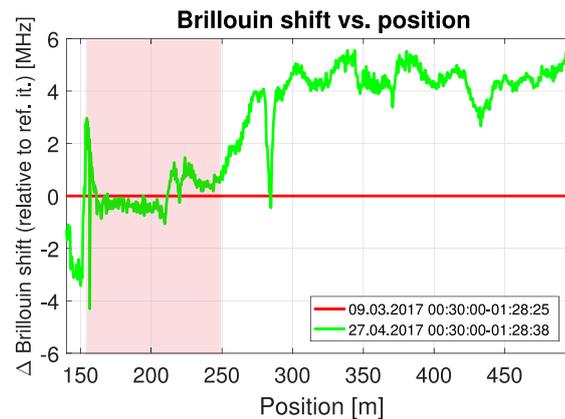


Abbildung 5.11: Vergleich der Epochen März und April (Differenz), Innenraum rot hinterlegt

Wenn man sich die Spektren der beiden Epochen ansieht, kommt auch der Temperaturunterschied zu Vorschein. Im Gebäude Styrgasse 30 (bei 200 Meter) ändert sich das Spektrum nur durch die Höhe, was auf eine unterschiedliche Dämpfung bei den beiden Messepochen schließen lässt (siehe Abbildung 5.12). Das Messinstrument wurde zwischen den Messepochen ab- und wieder angesteckt. Es findet jedoch keine Verschiebung nach links bzw. rechts statt. Im Vergleich dazu sieht es im Außenbereich bei 300 Meter anders aus. Hier findet neben der unterschiedlichen Rückstreuung auch eine Verschiebung nach rechts statt, was auf eine höhere Temperatur schließen lässt (vgl. Abbildung 2.10).

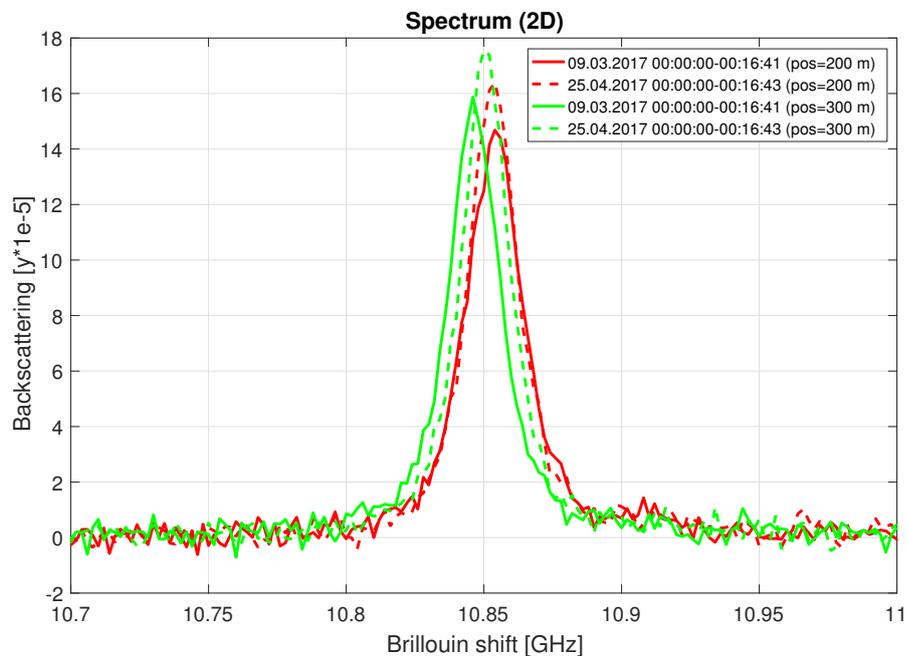


Abbildung 5.12: Vergleich der Epochen März und April (Spektrum)

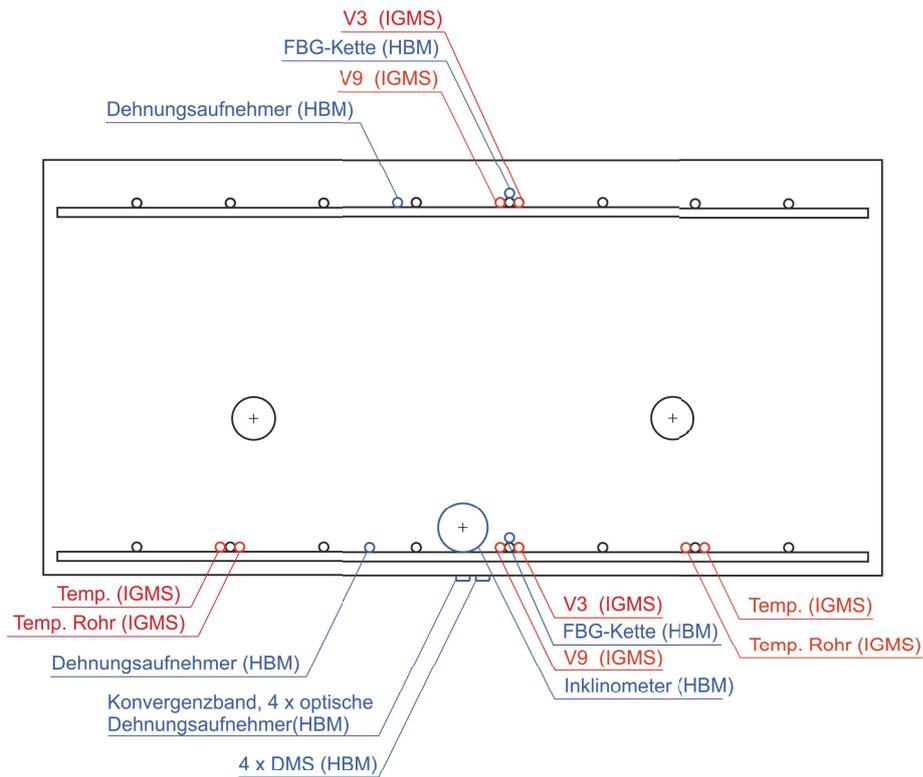
# Kapitel 6

## Betonbalkentests

In diesem Kapitel wird die dritte Messphase beschrieben. Im Rahmen eines FFG Projektes, welches von der ASFINAG und der ÖBB mitfinanziert wurde, wurde gemeinsam mit dem Institut für Felsmechanik und Tunnelbau der TU Graz (FMT) im Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz (LKI) ein Betonbalken mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet und überwacht. Zuerst erfolgten die Messungen während des Aushärtens des Balkens. Anschließend wurde ein Belastungstest durchgeführt, um beispielsweise einen Gebirgsdruck zu simulieren. Dies ist vor allem im Tunnelbau von Interesse, um eine weitere Messmethode der Verformungen mithilfe der im Spritzbeton eingebauten Glasfasern zu entwickeln.

### 6.1 Allgemeines

Bevor der Betonbalken am 7.Juli 2017 betoniert wurde, wurden sowohl vom IGMS, vom FMT als auch von der Firma HBM im LKI unterschiedliche Sensoren an den Bewehrungsgittern angebracht. Das Ausmaß des Balkens wurde mit  $600\text{ cm} \times 90\text{ cm} \times 46\text{ cm}$  angesetzt, um genügend Platz für Messstellen zu bekommen. Es wurden sowohl faseroptische Sensoren (verteilte und Faser-Bragg Gitter Kette), als auch ein Inklinometer im Betonbalken (siehe Abbildung 6.1) einbetoniert. Die Bewehrung bestand aus jeweils einer Lage Baustahlgitter AQ100 im oberen und unteren Bereich des Balkens (schwarze Kreise in untenstehender Abbildung). Im Zuge des Belastungstest wurden noch mehrere Dehnmessstreifen (DMS) und Dehnungsaufnehmer hinzugefügt.



**Abbildung 6.1:** Sensoren-Anordnung im Versuchsbalken (Quelle: FMT)

Die Sensoren des IGMS sind in obiger Grafik rot dargestellt. Jene des LKI bzw. des FMT wurden von der Firma HBM eingebaut und gemessen und sind in der Grafik blau eingefärbt. Die unterschiedlichen Sensoren des IGMS sind in Kapitel 6.2 näher erklärt. Die zwei Kreise in der Mitte des Balkens kennzeichnen die Position zweier Zugstangen, die für das Vorspannen des Balkens während des Belastungstests benötigt wurden.

Die Messungen wurden, wie bereits bei der ZID-Teststrecke, über die Messoption mit einer Exceltabelle konfiguriert. Als räumliche Auflösung wurden 0,5 m gewählt. Dies ergab alle 6,3 cm einen Messwert mit einem „Distance Sampling Factor“ von 8. Insgesamt wurden somit 4047 Messwerte auf einer Strecke von 255 m beim Aushärtevorgang gemessen. Alle 6 Stunden wurde zusätzlich zu den Brillouin-Frequenzen auch das BGS gemessen. Beim Belastungstest verringerte sich die Länge auf 90 m (nur kurze Zuleitungskabel) und somit auf 1428 Messwerte. Beim Belastungstest wurden die Messungen als Einzelmessungen ausgelöst und bei jeder Messung sowohl das Spektrum als auch der BFS gespeichert. Die genauen Messeinstellungen sind in Tabelle 6.1 zu finden. Das Aushärten des Betons wurde dabei mit den Messeinstellungen a) und die Belastung mit b) gemessen.

**Tabelle 6.1:** Messeinstellungen beim Versuchsbalken

	Räumliche Auflösung [m]	Faser- länge [m]	Frequenz Start [GHz]	Frequenz Stop [GHz]	Frequenz Schritt [MHz]	Sampling Faktor
a)	0,5	251	10,2	11,4	1	8
b)	0,5	90	10,2	11,4	1	8

## 6.2 Aushärtevorgang

Das Messgerät fTB 2505 stand während dem Aushärtevorgang in einem Container im LKI. Die Sensoren wurden in der Reihenfolge V9 unten, V3 unten, V3-A und Temp-A gemessen. Die Kabel V9 (BRUsens strain V9) und V3 (BRUsens strain V3) dienten dabei zur Messung von Dehnung und Temperatur. Der Sensor V3-A war ein V3 Sensor der in einem Hüllrohr eingebettet war und somit nur Temperaturen messen sollte. Der Sensor Temp-A (BRUsens temperature) ist ein Temperatursensor. Die Verbindung vom Gerät zum Balken und zurück erfolgte über ein gemeinsames Kabel (alle Fasern zusammengefasst, siehe Abbildung 6.3). In Tabelle 6.2 sind die Meterangaben der einzelnen Sensoren entlang der Faser angeführt.

**Tabelle 6.2:** Faserpositionen der Sensoren (Aushärten)

Kabel	von [m]	bis [m]
V9 unten	107,32	113,32
V3 unten	117,45	123,45
V3-A	127,31	133,31
Temp-A	137,53	143,53

Nach zirka einer Woche, am 13.Juli 2017, wurde die Schalung entfernt (siehe Abbildung 6.4). Es musste besonders darauf geachtet werden, dass die Kabel der einbetonierten Sensoren beim Ausschalen nicht beschädigt wurden. Am folgenden Tag wurde der Balken über die Zugstangen vorgespannt und auf einen anderen Standort gehoben. Die Aufbringung der Normalkraft erfolgte dabei mittels Hydraulikpumpe und betrug in etwa 400 kN (siehe Abbildung 6.2).

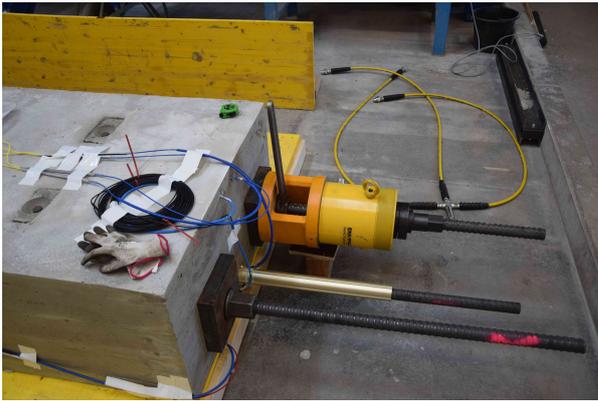


Abbildung 6.2: Hydraulikpumpe

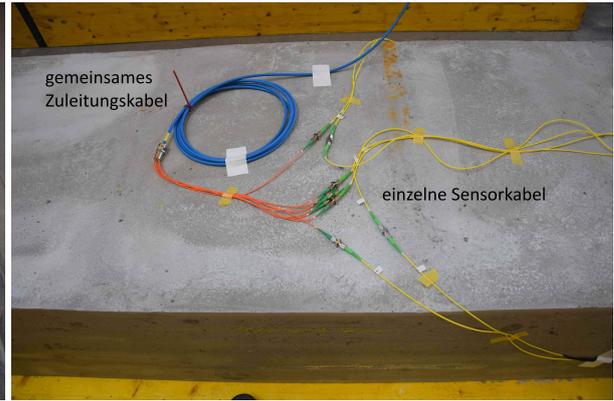


Abbildung 6.3: Sensorkabel

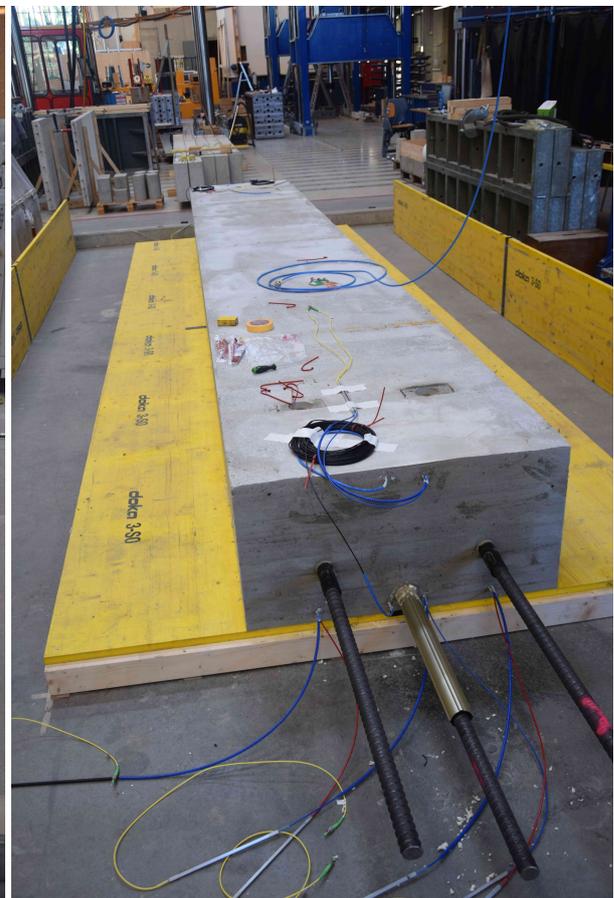


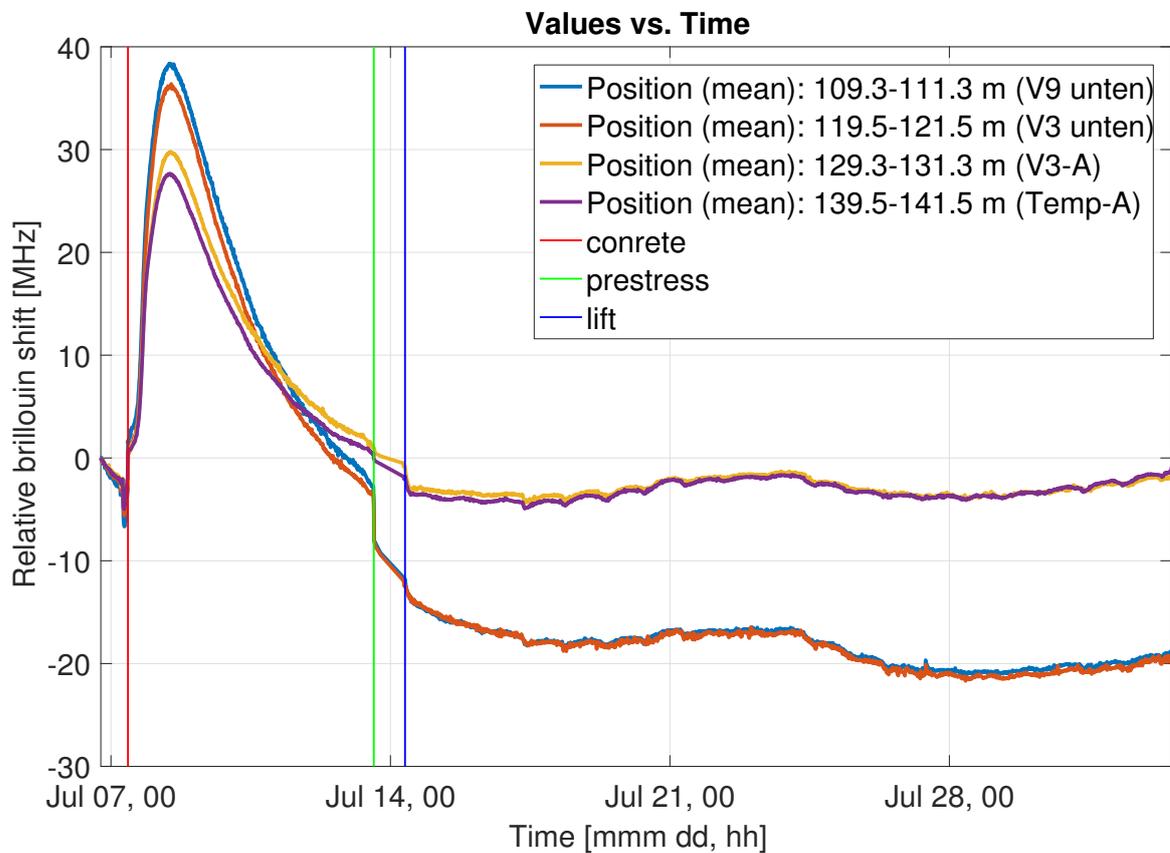
Abbildung 6.4: Betonbalken vor dem Umheben

## 6.2.1 Ergebnisse

Bei den Messungen während des Aushärtens ist vor allem eine Auswertung in einer Zeitreihe sinnvoll. Einzelne aufeinanderfolgende Messepochen unterscheiden sich nur wenig und machen deshalb eine genaue Analyse schwierig.

### 6.2.1.1 Zeitreihe des Betonbalkens

In Abbildung 6.5 sind alle vier gemessenen Sensoren über den Bereich von 2 m bis 4 m am Balken gemittelt in einer Zeitreihe dargestellt.



**Abbildung 6.5:** Zeitreihe: Aushärten des Betons (Position vs. Temperatur)

Eine erste Untersuchung auf Plausibilität der Ergebnisse lässt darauf schließen, dass die Daten der unterschiedlichen Temperatursensoren sowie die Ergebnisse der Sensoren, welche auf Temperatur und Dehnung sensitiv sind, zusammenpassen. Die Kurven von V9

unten und V3 unten nehmen zusätzlich zur Temperatur auch Dehnungen auf und haben somit einen höheren Peak. Wenn man den Offset der Sensoren V3 unten und V3-A (V3 Sensor im Hüllrohr) betrachtet, stellt dies den Dehnungseinfluss dar.

Das Vorspannen zum Umheben des Balkens ist in den Dehnungs-sensitiven Sensoren V9 unten und V3 unten klar ersichtlich (grüner vertikaler Strich). Der rote Strich stellt den Beginn des Betonieren und der blaue das Umheben des Balkens dar. Insgesamt kam es durch das Betonieren zu einer Temperaturänderung von etwa 33 °C (1 MHz = 1,2 °C).

### 6.2.1.2 Zeitreihe der Halle

Auch die Auswertung außerhalb des eigentlichen Untersuchungsobjektes, dem Balken, stellt einige interessante Ergebnisse zur Schau. In Abbildung 6.6 ist die Position 50-100 m (Glasfaser-Zuleitung vom Gerät zum Balken) in einer Zeitreihe dargestellt.

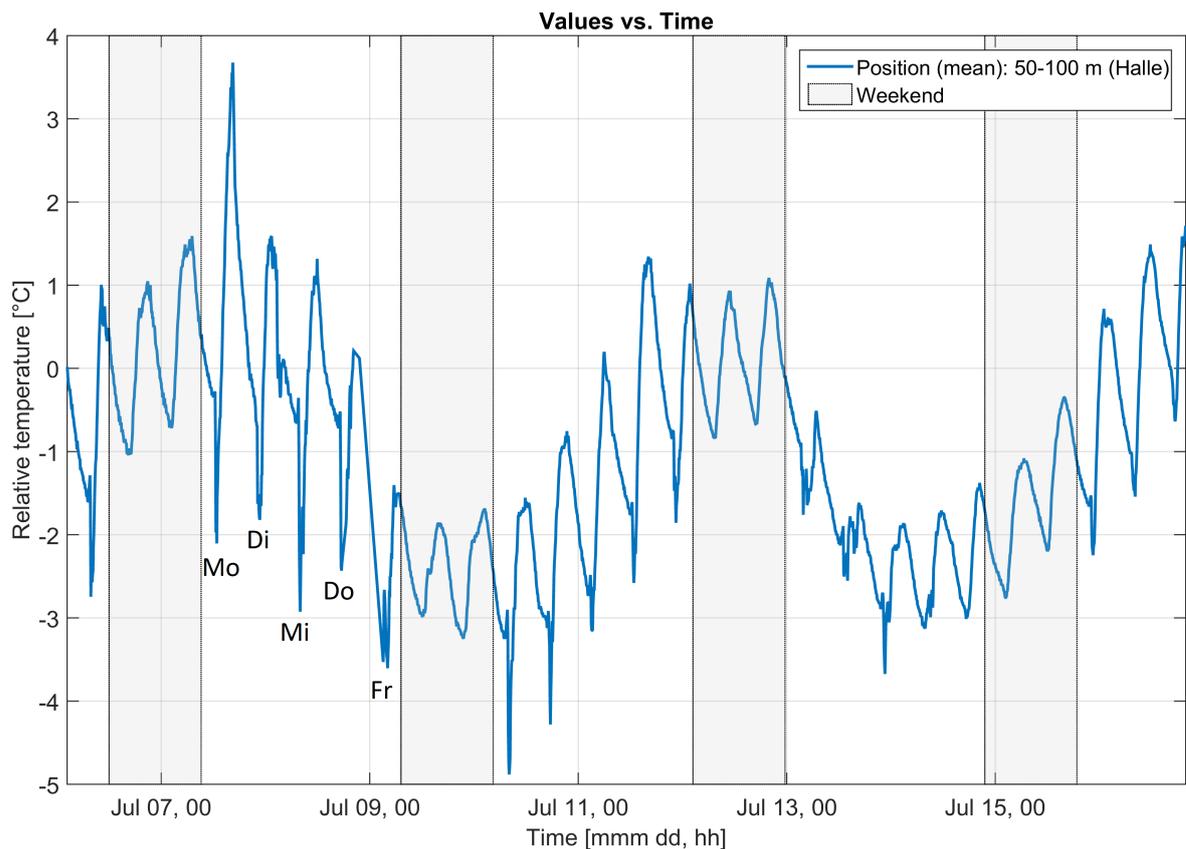


Abbildung 6.6: Zeitreihe: Halle (Position vs. Temperatur)

Als graue Flächen sind jeweils die Wochenenden während des Monitorings eingezeichnet. Dabei fällt auf, dass unter der Woche zwischen 7 und 8 Uhr die Messdaten einen Sprung nach unten machen. Dies entsteht dadurch, dass das große Tor zur Halle in der Früh geöffnet wurde und somit kühlere Luft in die Halle strömte (siehe Abbildung 6.9). Am Wochenende bleibt dieser Effekt durch das geschlossene Tor aus.

Ein Vergleich mit den Temperaturwerten des ZAMG zeigt, dass die Trends (Zu- bzw. Abnahme der Temperatur) übereinstimmen (siehe Abbildung 6.7 und 6.8).

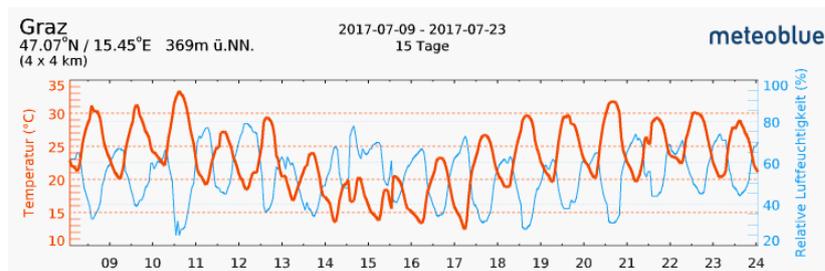


Abbildung 6.7: Temperaturverlauf ZAMG-Zeitraum 1 (Quelle: meteoblue)

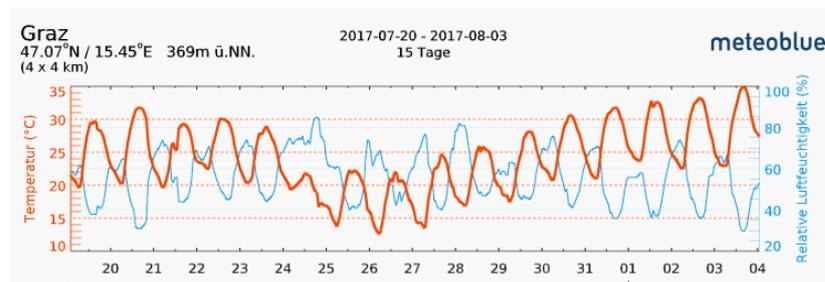


Abbildung 6.8: Temperaturverlauf ZAMG-Zeitraum 2 (Quelle: meteoblue)

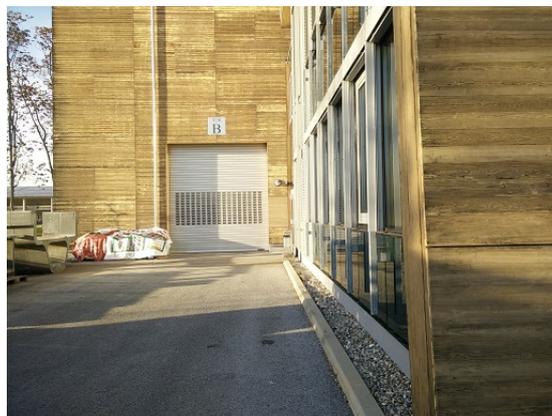


Abbildung 6.9: Geschlossenes Tor der Halle des LKI

## 6.3 Belastungstest

Der Belastungstest diente dazu, eine Auswahl und Optimierung der verwendeten Sensoren für Anwendungen außerhalb des Labors (z.B. im Tunnelbau) machen zu können.

### 6.3.1 Allgemeines

Der Belastungstest wurde am 3. und 4. August 2017 durchgeführt. Am ersten Tag wurde der Balken unter Einwirkung einer Normalkraft, welche über die Hydraulikpumpe auf die Zugstangen aufgebracht wurde (siehe Abbildung 6.2), und einer Vertikalkraft belastet. Die Belastung erfolgte dabei in einem niedrigen Rahmen (unter dem Rissmoment), um plastische Verformungen in diesem Zustand zu vermeiden. Die letzte Laststufe wurde über Nacht gehalten und am zweiten Tag wurde die Normalkraft abgesenkt sowie die Zugstangen aus dem Balken entfernt. Danach wurde nur mehr eine vertikale Last aufgebracht. Die vertikale Lasteinleitung erfolgte dabei über ein vier-Säulen-Prüfgerüst (siehe Abbildung 6.10) im Abstand von zwei Meter bei 2 m und 4 m. Um den Unterschied zwischen einer elastischen und platischen Verformung beobachten zu können, wurde am zweiten Tag ein Entlastungsschritt (Laststufe 14) durchgeführt.



Abbildung 6.10: Prüfgerüst

Am ersten Tag erfolgten 9 und am zweiten 6 Laststufen. Die ersten drei Laststufen setzten sich aus einer reinen Normalkraft zusammen und es wirkte keine vertikale Kraft auf den Balken. Danach wurde die Vertikalkraft gesteigert und bei Laststufe 7 wieder auf 5 kN abgesenkt. Danach erfolgte noch einmal eine Zunahme der Vertikalkraft und danach ein Absenken dieser auf 30 kN über die Nacht. Die maximale Normalkraft betrug 1600 kN und die maximale Vertikalkraft 70 kN (siehe Abbildung 6.11) am ersten Tag. Beim Anfahren auf die Laststufe 16 ging der Balken aufgrund zu großer Belastung zu Bruch. Die Vertikalkraft in untenstehender Abbildung bezieht sich immer auf einen Arm, deshalb ist die gesamte aufgebrachte Kraft immer doppelt so groß. Der Zustand I beschreibt eine elastische Deformation, es sollte keine plastische Verformung auftreten. Im Gegensatz dazu ist im Zustand II keine Normalkraft mehr vorhanden und es wird ab der Laststufe 12 die Risskraft erreicht, somit kann eine plastische Deformation auftreten.

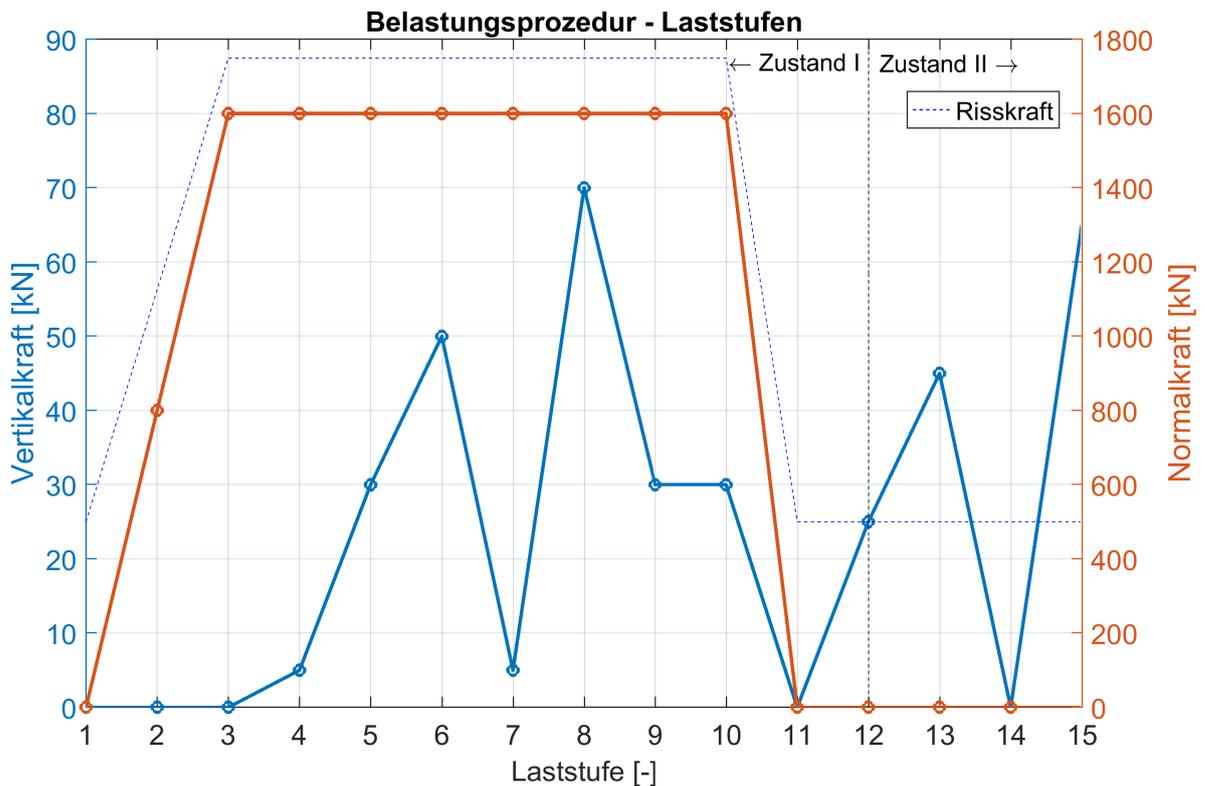


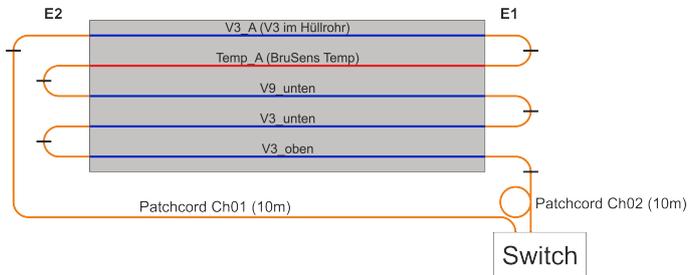
Abbildung 6.11: Laststufen

Die Sensoranordnung ist in Abbildung 6.12 zu sehen. Im Unterschied zum Aushärteprozess kam beim Belastungstest der Sensor V3 oben hinzu. Da die gleiche Schleife mit dem Messgerät Luna OBR 4600 gemessen wurde, wurde ein Switch eingesetzt, um zwischen

den beiden Geräten hin und her zu wechseln. Die genauen Fasermeter der Sensoren sind in Tabelle 6.3 angeführt.

**Tabelle 6.3:** Faserpositionen der Sensoren (Belastung)

Kabel	von [m]	bis [m]
V3-A	19,42	25,42
Temp-A	29,64	35,64
V9 unten	39,49	45,49
V3 unten	49,59	55,59
V3 oben	59,71	65,71



**Abbildung 6.12:** Sensoranordnung beim Belastungstest (Quelle: IGMS)

## 6.3.2 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse des Belastungstest angeführt.

### 6.3.2.1 Brillouin Verschiebung aller 5 Sensoren - absolut

In Abbildung 6.13 ist der BFS gegenüber der Position aller fünf Abschnitte dargestellt. Es sind dabei die Werte der Laststufen 1-9 angeführt. Durch das Aufbringen der Normalkraft von 1600 kN sind die Deformationen trotz einer maximalen Vertikalbelastung von 70 kN gering. Die beiden Sensoren V9 unten und V3 unten weisen dabei die größten Änderungen auf. Der Sensor V3-A ist ein V3 Sensor in einem Hüllrohr. Er ist somit vom Einfluss auftretender Dehnungen abgeschirmt. Der Abschnitt vom Sensor Temp-A weist sehr wenig Veränderung auf, da er ein reiner Temperatursensor ist und somit nicht dehnungsabhängig ist. Die Sensoren erfahren zuerst durch die Normalkraft, welche unterhalb der Schwerlinie aufgebracht wird, eine Stauchung. Danach kommt es beim Sensor V3 oben weiterhin zu einer Stauchung, da er weiter oben im Balken montiert ist. Die beiden unteren Sensoren weisen danach eine Dehnung auf und bewegen sich in die entgegengesetzte Richtung. Zwischen den einzelnen Abschnitten des Balkens ändert sich durch den Typ des Patch Chord (Verbindung zwischen den einzelnen Sensoren) der BFS.

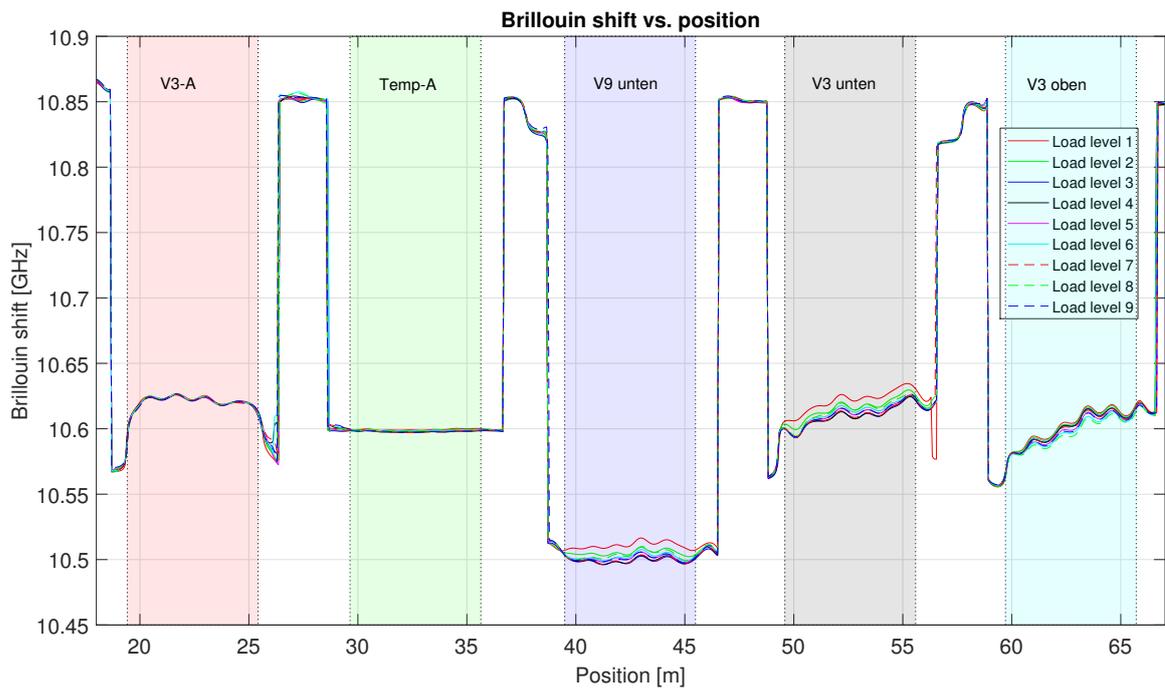


Abbildung 6.13: Erster Belastungstag (absolut)

Am zweiten Belastungstag wurden die Normalkraft und die Zugstangen entfernt und somit ab der Laststufe 12 (siehe Abbildung 6.11) der Rissmoment erreicht. Ab dieser Laststufe bildeten sich sichtbare Risse im Balken (siehe Abbildung 6.14) und die Auswirkungen sind deutlich in den Messungen erkennbar (siehe Abbildung 6.15).

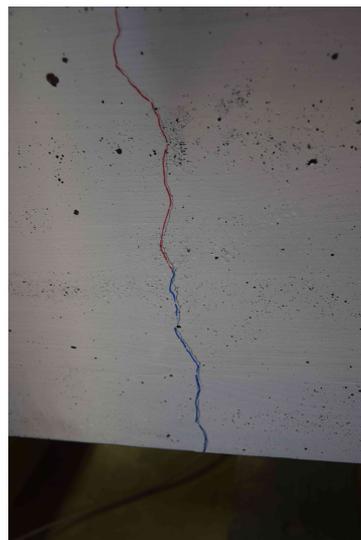


Abbildung 6.14: Riss im Betonbalken

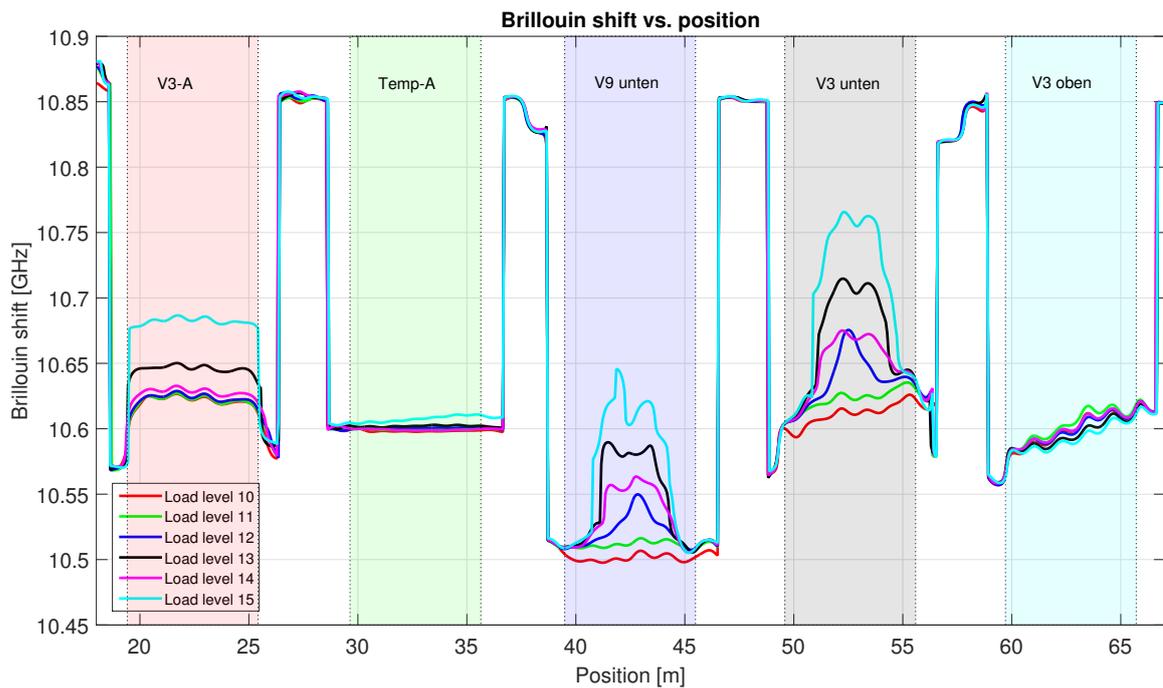


Abbildung 6.15: Zweiter Belastungstag (absolut)

Der Abschnitt des V3-A Sensors im Hüllrohr sollte normalerweise keine Dehnungen aufnehmen. Der Umstand, dass das Hüllrohr auf beiden Seiten ca. 5 cm vor dem Ende des Balkens endet, könnte dafür verantwortlich sein, dass trotzdem Dehnungen auftreten. Durch das zu kurze Hüllrohr gelangen Dehnungen auf die Faser und erzeugen Sprünge am Rand des Balkens. In der Mitte des Balkens treten, relativ gesehen, weniger Änderungen auf. Der Temperatursensor weist minimale Dehnungen bei höheren Laststufen auf. Dies könnte aufgrund der hohen Vertikallast sein. Der Sensor ist hauptsächlich vor Dehnungen in Längsrichtung geschützt, da die Faser in einem Gel liegt, jedoch nicht vor hohen Belastungen orthogonal zur Faserachse.

Betrachtet man die beiden Dehnungssensoren im unteren Bereich des Balkens, weisen diese deutliche Änderungen auf. Sehr gut kommt die plastische Verformung zum Vorschein, da bei Laststufe 14 (Entlastung auf 0 kN) die Deformation nicht komplett verschwindet.

### 6.3.2.2 Brillouin Verschiebung - relativ

In den folgenden drei Grafiken sind die Verformungen relativ dargestellt. Die Änderungen sind dabei wiederum in Brillouin Verschiebung angegeben, da in dieser Arbeit die Materialparameter der einzelnen Sensoren, welche für eine Umrechnung in Dehnungen erforderlich sind, nicht bestimmt wurden.

In Abbildung 6.16 sind alle Änderungen relativ zur ersten Laststufe dargestellt. Die größte Deformation (-13,9 MHz) tritt durch die hohe Normalkraft beim Sensor V9 unten bei Laststufe 3 auf. Danach kommt es durch die Vertikalkraft zwar zu einer Dehnung, diese macht jedoch nur die Stauchung der Normalkraft rückgängig und überschreitet somit nicht die Nullepoche. Alle Werte, die eine Abweichung von mehr als 150 MHz erreichen, sind in dieser Grafik herausgeschnitten (Patch Chords). Der Sensor V3 oben erfährt durch seine Position bedingt weniger Verformung. Um einen guten Vergleich durchführen zu können, wurde die gleiche Skalierung für Tag I und II verwendet. Eine vergrößerte Ansicht ist in Abbildung 6.18 zu finden.

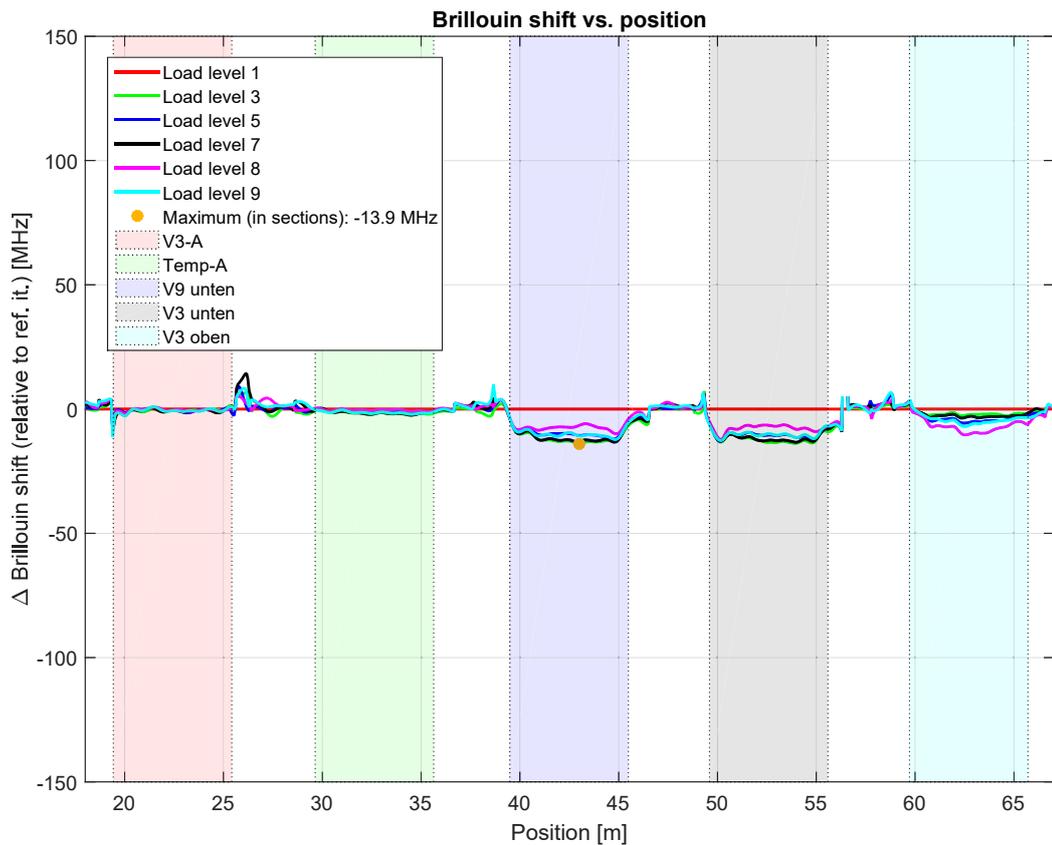


Abbildung 6.16: Erster Belastungstag (relativ)

Am zweiten Tag wurde als Referenzepoche die Laststufe 10 herangezogen. Diese Laststufe hatte eine Vertikalkraft von 30 kN und eine Normalkraft von 1600 kN. Danach wurde die Normalkraft abgelassen und die Vertikalkraft auf 65 kN erhöht (siehe Abbildung 6.17). Bei Anfahren auf eine weitere Laststufe ging der Balken schlussendlich zu Bruch.

Die maximale Dehnung von 149,4 MHz wird beim Sensor V3 unten bei Laststufe 15 erreicht. Der Rissmoment ist sehr gut bei der Entlastung (Laststufe 14) auf 0 kN ersichtlich. Die Deformation geht bei dieser Laststufe nicht mehr komplett zurück. Der obere V3 Sensor erlebt zuerst eine Dehnung beim Ablassen der Normalkraft, erfährt danach jedoch wiederum eine Stauchung. Der Temperatursensor Temp-A weist ebenfalls Dehnungen auf, was wahrscheinlich durch eine zu hohe Belastung hervorgerufen wird. Beim Sensor V3-A kommen die hohen Deformationen ziemlich sicher vom zu kurzen Rohr zustande.

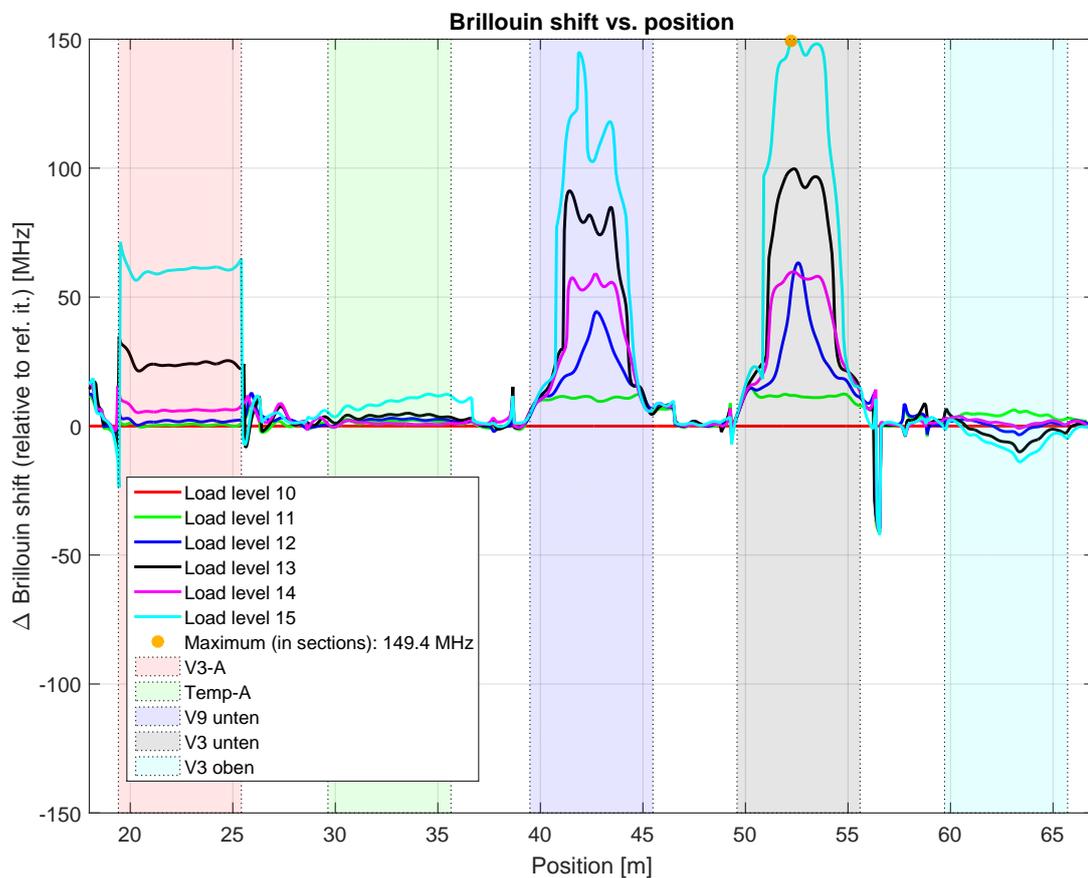
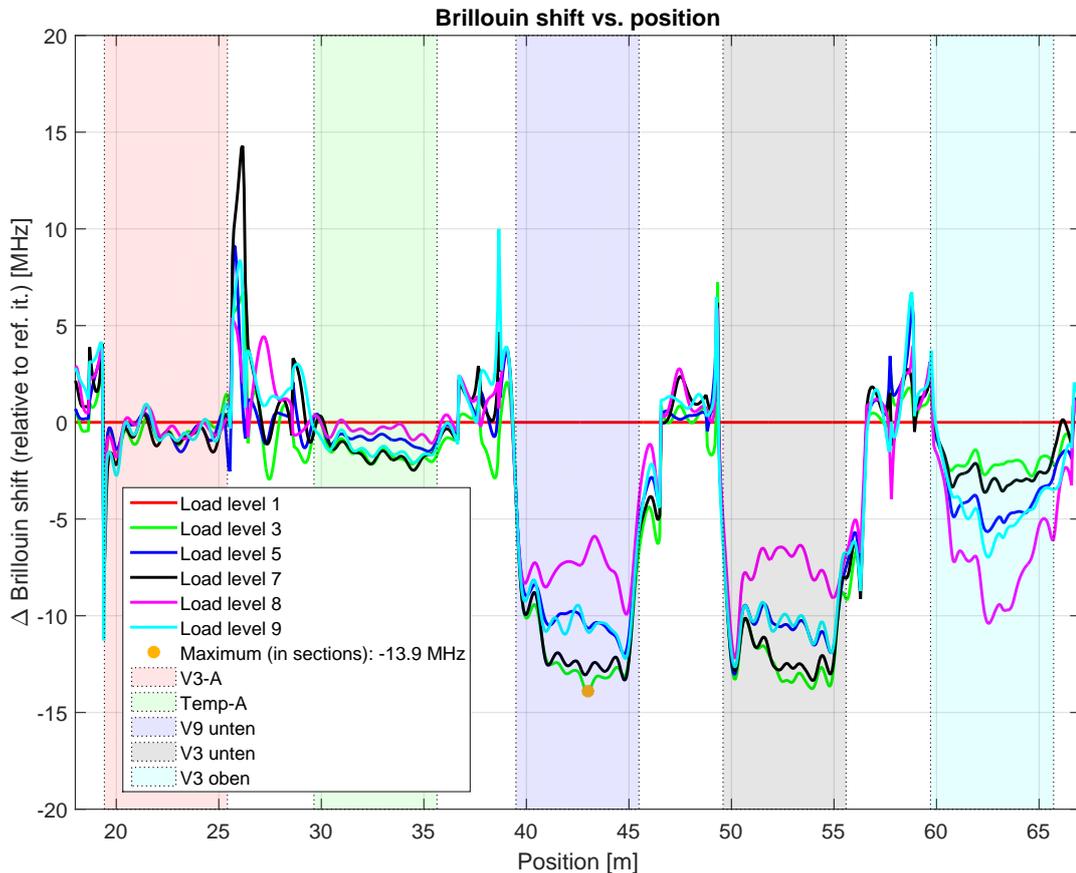


Abbildung 6.17: Zweiter Belastungstag (relativ)

In der folgenden Abbildung ist noch einmal gut der unterschiedliche Effekt der Stauchung/Dehnung der oberen bzw. unteren Sensoren ersichtlich. Der Sensor V3 oben erlebt mit der maximalen Vertikalkraft von 70 kN eine Stauchung, während die beiden unteren Sensoren V3 und V9 im Vergleich zur 3. Laststufe eine Dehnung erfahren.



**Abbildung 6.18:** Erster Belastungstag (vergrößert - relativ)

Die maximale Dehnung während des Belastungstests von 149,4 MHz ergibt in etwa  $3113 \mu\epsilon$  ( $48 \text{ MHz}$  entsprechen  $1000 \mu\epsilon$ ). Da dieser Wert weit unter der Grenze der Spezifikation des Herstellers von  $1 \%$  ( $=10000 \mu\epsilon$ ) liegt, kann von einer ordnungsgemäßen Messung ausgegangen werden.

### 6.3.2.3 Darstellung des Belastungstest in einer Zeitreihe

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Belastung in einer Zeitreihe geplottet. Dabei wird zu jedem Messzeitpunkt ein Abschnitt von 2 m in der Mitte des Balkens gemittelt dargestellt.

In Abbildung 6.19 sind die Verformungen relativ zur ersten Laststufe dargestellt. Dabei sieht man noch besser den gegenteiligen Effekt, von einem Sensor der oben bzw. unten im Betonbalken montiert wurde. Bei der Entlastung (Laststufe 6 auf 7) auf 5 kN erfahren der obere Dehnungssensor eine positive Dehnung und die beiden unteren eine Stauchung.

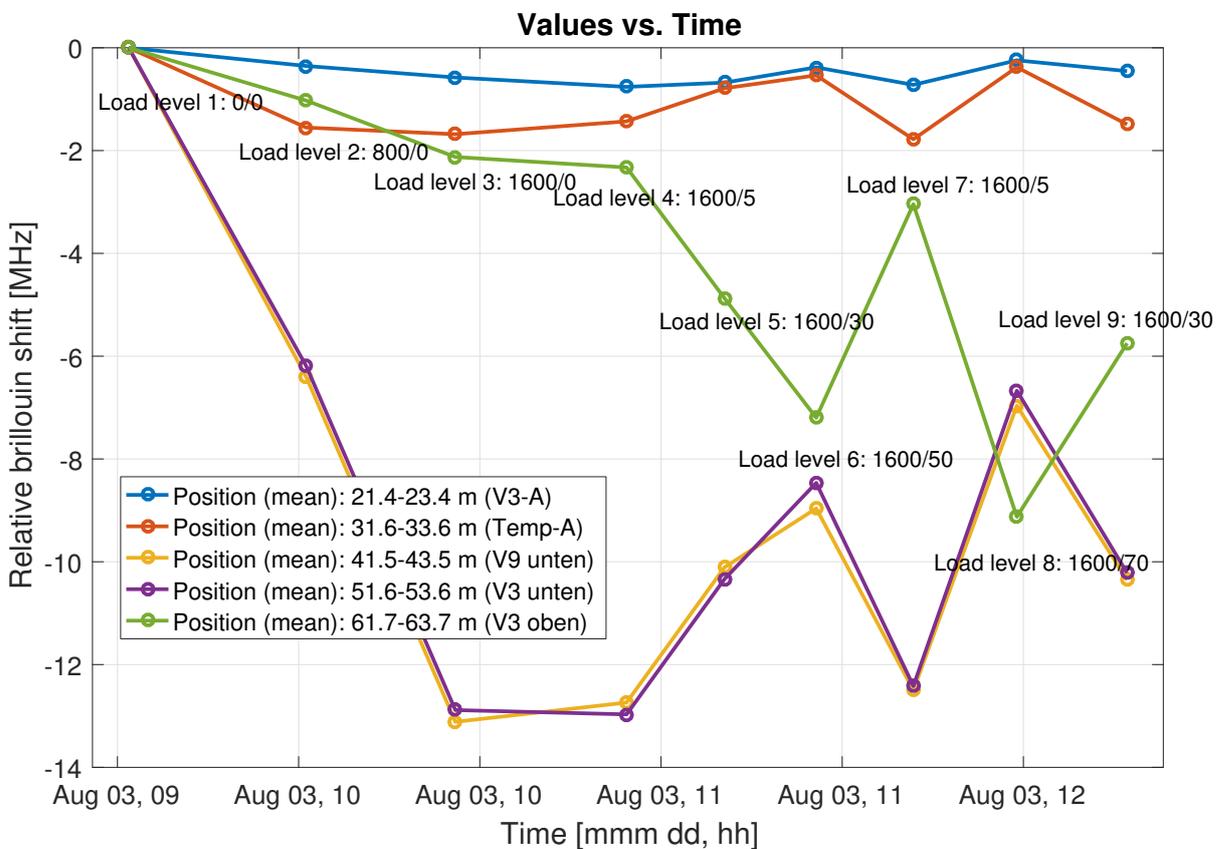


Abbildung 6.19: Zeitreihe Tag I

Am zweiten Tag treten durch die erhöhte Vertikalkraft und durch das Wegfallen der Normalkraft deutlich höhere Verformungen auf (siehe Abbildung 6.20). Wiederum ist die deutliche plastische Verformung bei Laststufe 14 ersichtlich. Die angewandte Kraft war bereits so stark, dass Risse auftraten und somit der Ausgangszustand nicht mehr erreicht wurde.

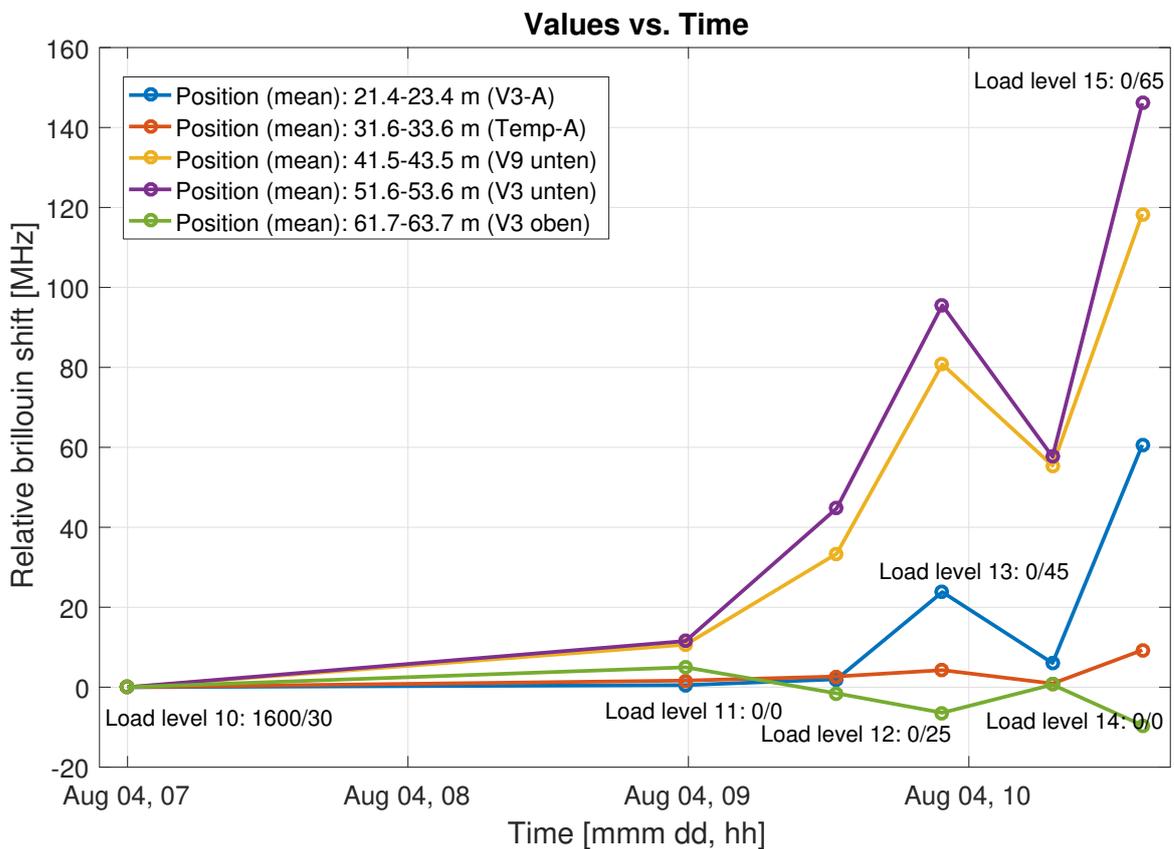


Abbildung 6.20: Zeitreihe Tag II

### 6.3.2.4 Verformung gegenüber der Vertikalkraft

#### Sensoren V3 unten, V9 unten und V3 oben

Im folgenden Abschnitt werden die Verformungen gegenüber der Vertikalkraft dargestellt. Diese Darstellung eignet sich am besten für die Aussage, ob bereits eine dauerhafte Verformung des Objektes stattgefunden hat oder nicht. Am ersten Versuchstag kommt es durch die Normalkraft nur zu einer elastischen Verformung und die Verformungen gehen bei den Entlastungsschritten wieder zurück (siehe Abbildung 6.21).

Weiters weisen die beiden unteren Sensoren die gleichen Verformungen auf und es kann somit gesagt werden, dass je nach Einsatzgebiet, beide Sensoren für die Dehnungsmessungen geeignet sind. Die beiden Kabel unterscheiden sich vor allem in der Dicke. Das V9 Kabel hat einen Durchmesser von 3,2 mm und das V3 Kabel einen Durchmesser von 7,2 mm.

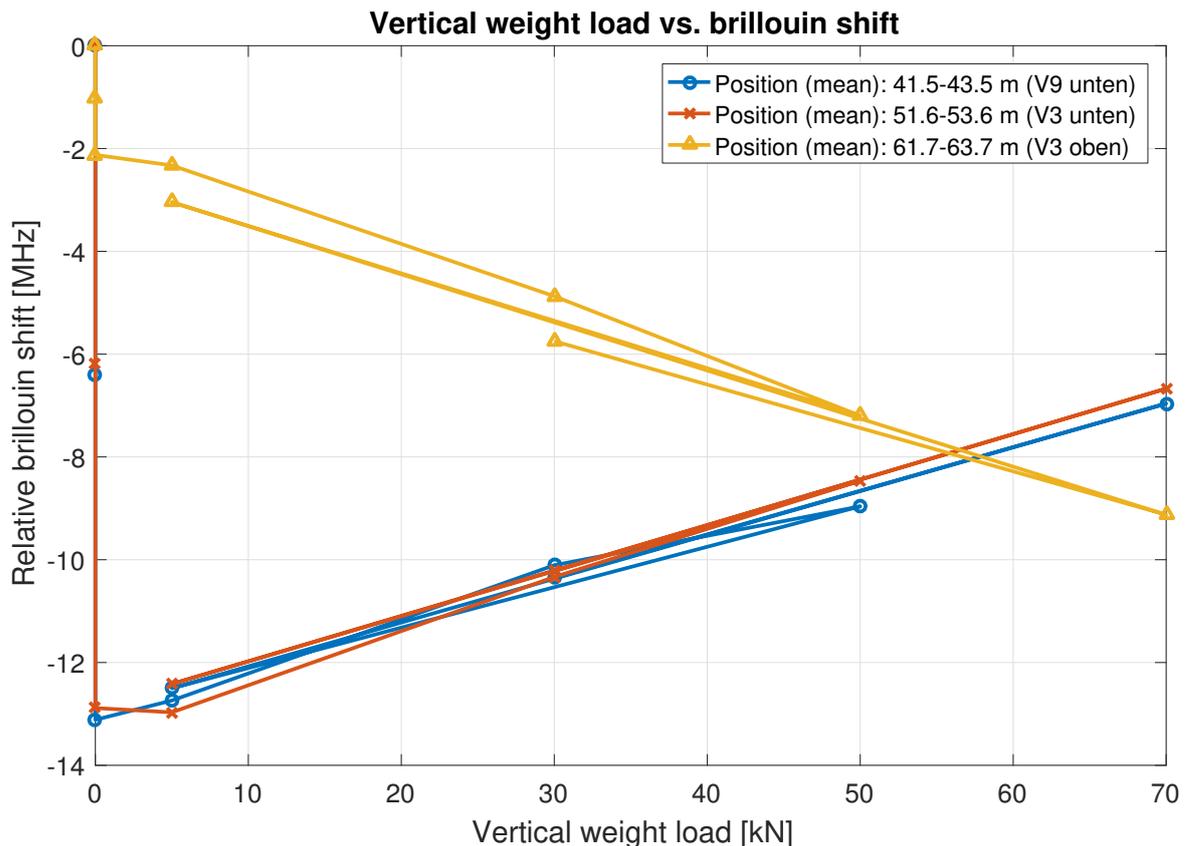
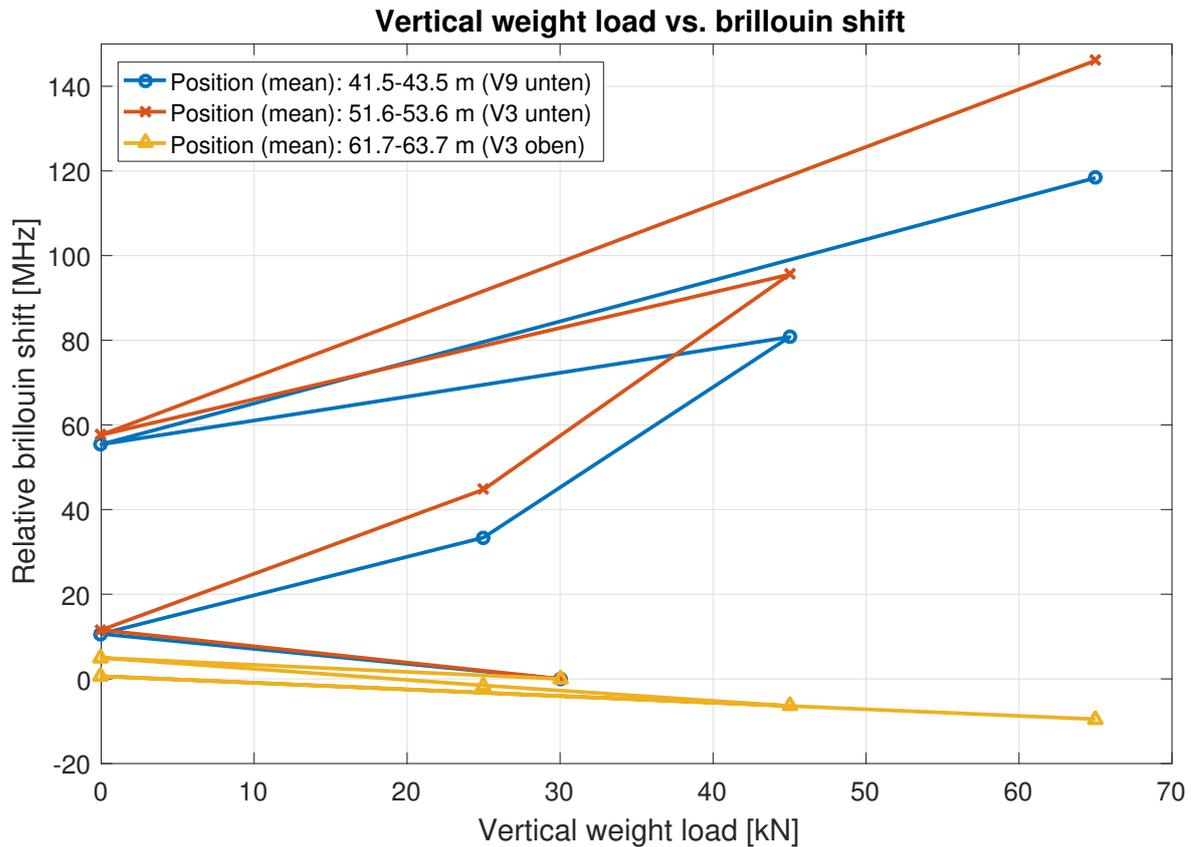


Abbildung 6.21: Verformung vs. Vertikalkraft (Tag I)

Am zweiten Tag ändert sich das Verhalten des Balkens durch das Ablassen der Normalkraft und es kommt zu einer dauerhaften Verformung (siehe Abbildung 6.22). Bei der Entlastungsstufe (Laststufe 14) auf 0 kN bleibt eine Dehnung von zirka 60 MHz erhalten und die Messung geht nicht auf die ursprünglichen 16 MHz bei einer Last von 0 kN zurück.

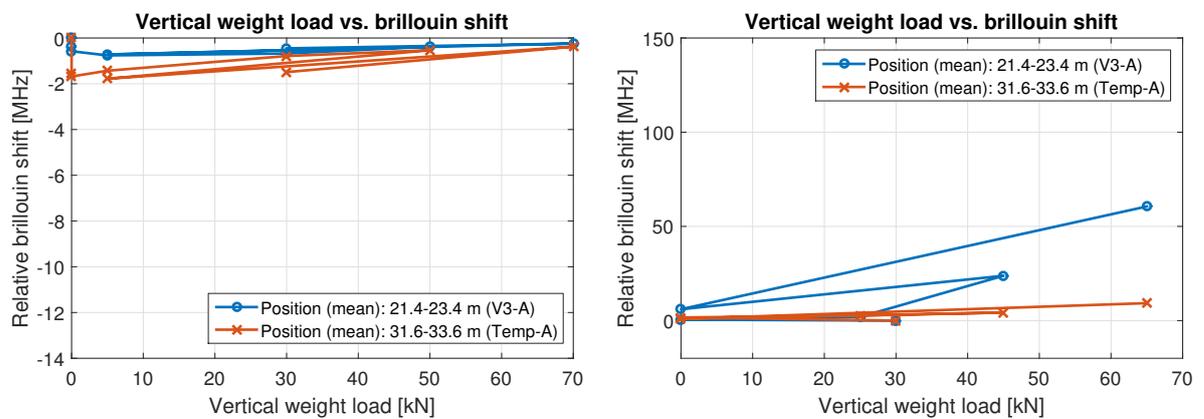


**Abbildung 6.22:** Verformung vs. Vertikalkraft (Tag II)

Die Sensoren V9 unten und V3 unten weisen im Vergleich zum ersten Belastungstag einen deutlichen Unterschied mit zunehmender Belastung auf. Dies kann eventuell auf eine Beschädigung der Glasfaser des Sensors V9 unten zurückzuführen sein. Die Ursache dafür wird in Kapitel 6.3.2.6 genauer untersucht.

**Sensoren V3-A unten und Temp-A**

In den Abbildungen 6.23 und 6.24 sind die Verformungen der Sensoren für die Temperaturmessung gegenüber der Belastung dargestellt. Am ersten Tag weist der Temperatursensor Temp-A durch die hohe Normalkraft eine Verschiebung auf, was wahrscheinlich auf die Höhe der einwirkenden Kraft zurückzuführen ist. Dies ist jedoch nicht problematisch, da außerhalb des Labors nicht 1600 kN auf den Sensor wirken werden. Am zweiten Belastungstag wirken die Kräfte auf den Sensor V3-A im Hüllrohr durch das verkürzte Rohr und es treten somit Verformungen von bis zu 60 MHz bei der letzten Laststufe auf.



**Abbildung 6.23:** Verformung vs. Vertikalkraft (Temp. Sensoren - Tag I) **Abbildung 6.24:** Verformung vs. Vertikalkraft (Temp. Sensoren - Tag II)

Da der Sensor Temp-A in diesem Messversuch bessere Ergebnisse geliefert hat, ist in zukünftigen Projekten seine Verwendung zur Temperaturkompensation vorgesehen. Weiters erleichtert der Einbau eines Kabels ohne Hüllrohr die Installation der Sensoren erheblich. In einem runden Profil wie zum Beispiel im Tunnelbau würde das Hüllrohr den Einbau erschweren.

### 6.3.2.5 Vergleich mit OFDR

Im folgenden Unterkapitel wird ein Vergleich der fTB Messungen mit denen des OFDR Messinstruments Luna OBR 4600 durchgeführt. In Abbildung 6.25 ist das rohe Luna Messsignal mit dem Ergebnis aus den fTB Messungen der Laststufen 10-15 dargestellt. Dabei fällt sofort die unterschiedliche Ortsauflösung der beiden Messgeräte auf. Die Luna Messungen liegen im Abstand von 1 cm und die Brillouin Messungen mit einer Auflösung von 50 cm (bzw. 6 cm durch Sampling) vor. Dies zeigt klar, dass Risse vom Luna detektiert werden, welche jedoch mit fTB Messungen nicht detektierbar sind. Für einen besseren Vergleich wird das Luna Signal in der weiteren Auswertung mit einem gleitenden Mittelwert (Tiefpassfilter) an das Brillouin Signal angepasst. Man muss jedoch immer in Erinnerung behalten, dass ein ganz genauer Vergleich der Messungen durch die unterschiedliche physikalische Ortsauflösung nicht möglich ist.

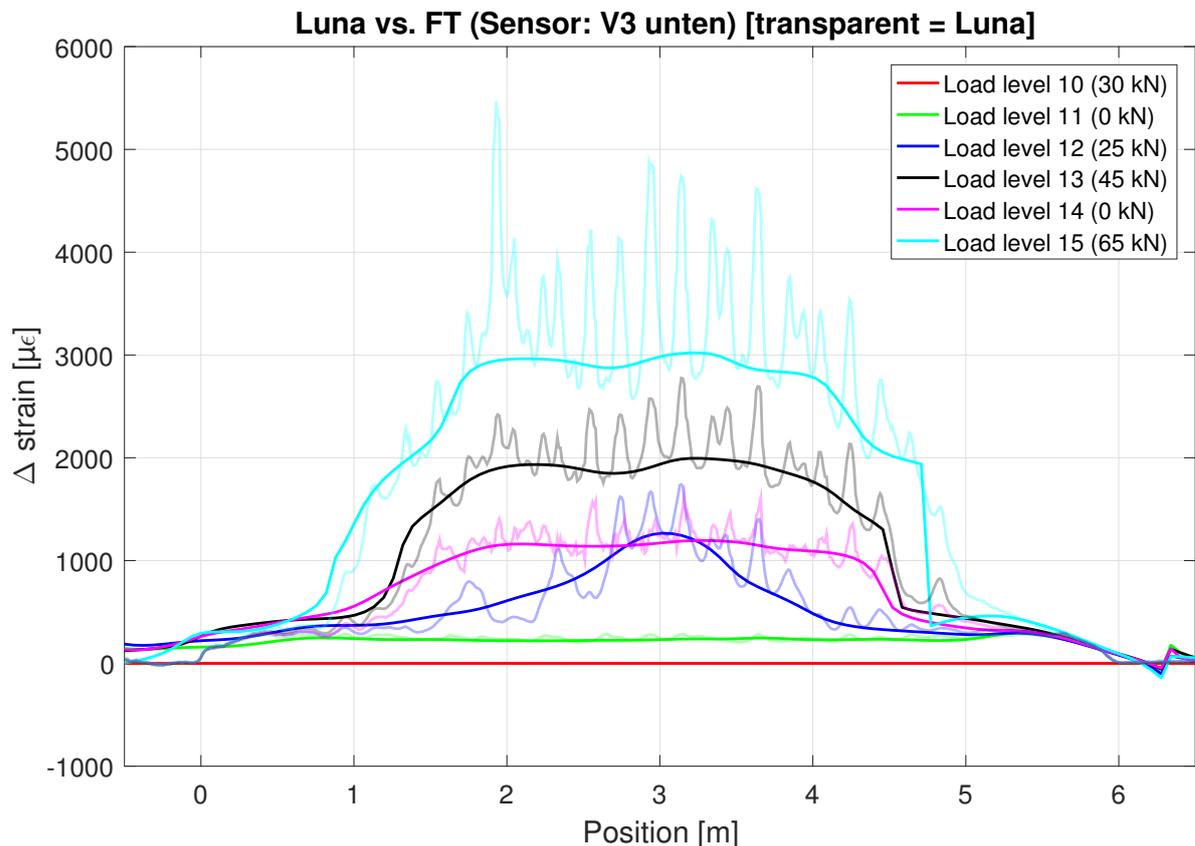


Abbildung 6.25: Luna vs. fT (rohes Signal)

Da die Werte der Luna Messungen in Dehnungen vorliegen, wurden auch die Brillouin Messungen in Dehnungen umgerechnet. Die Messungen beziehen sich jeweils auf die erste Epoche des Tages. Da die faserspezifischen Koeffizienten in dieser Masterarbeit nicht bestimmt wurden, kam der Werte für die Umrechnung aus der Literatur ( $48 \text{ MHz}/1000 \mu\epsilon$ ). Aus diesem Grund könnte es sein, dass sich die Werte mit den tatsächlichen Koeffizienten noch besser an die Luna Ergebnisse annähern würden.

### Sensor V9 unten

Die ersten fünf Laststufen des Belastungstests relativ zur ersten Epoche sind in Abbildung 6.26 dargestellt. Da die Messungen des Luna Messinstrumentes viel schneller gemessen wurden, werden 25 Messungen für eine Epoche gemittelt. Die maximalen Deformationen z.B. bei der zweiten Laststufe von  $140 \mu\epsilon$  sind bei beiden Geräten annähernd gleich. Betrachtet man jedoch die Messungen im Detail, sieht man größere Abweichungen zwischen den Messungen. Dies kann wiederum von der unterschiedlichen Auflösung stammen. Vor allem am Rand des Balkens stimmen die Ergebnisse nicht immer gut überein, da die Brillouin Messungen mit  $0,5 \text{ m}$  Auflösung die Deformationen nicht exakt erfassen können. Die Laststufen 6-9 weisen ähnliche Differenzen und Merkmale auf (siehe Abbildung 6.27).

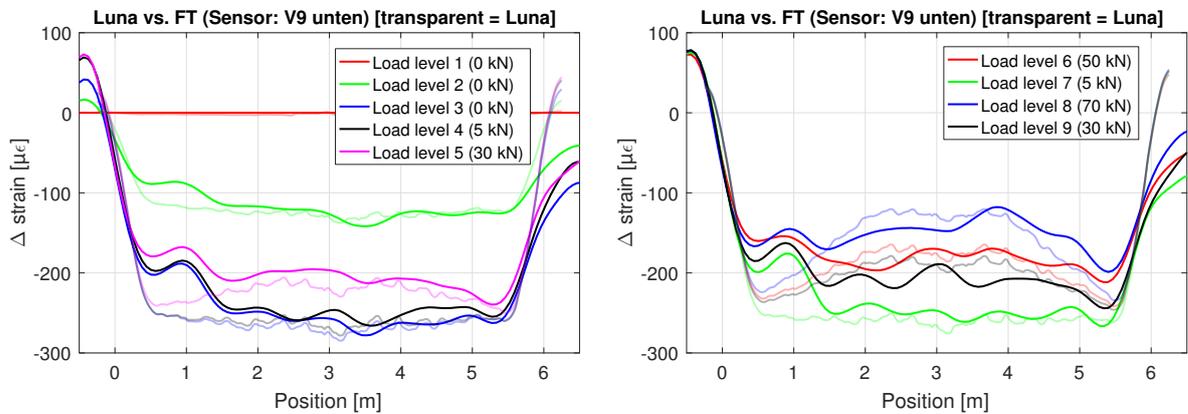
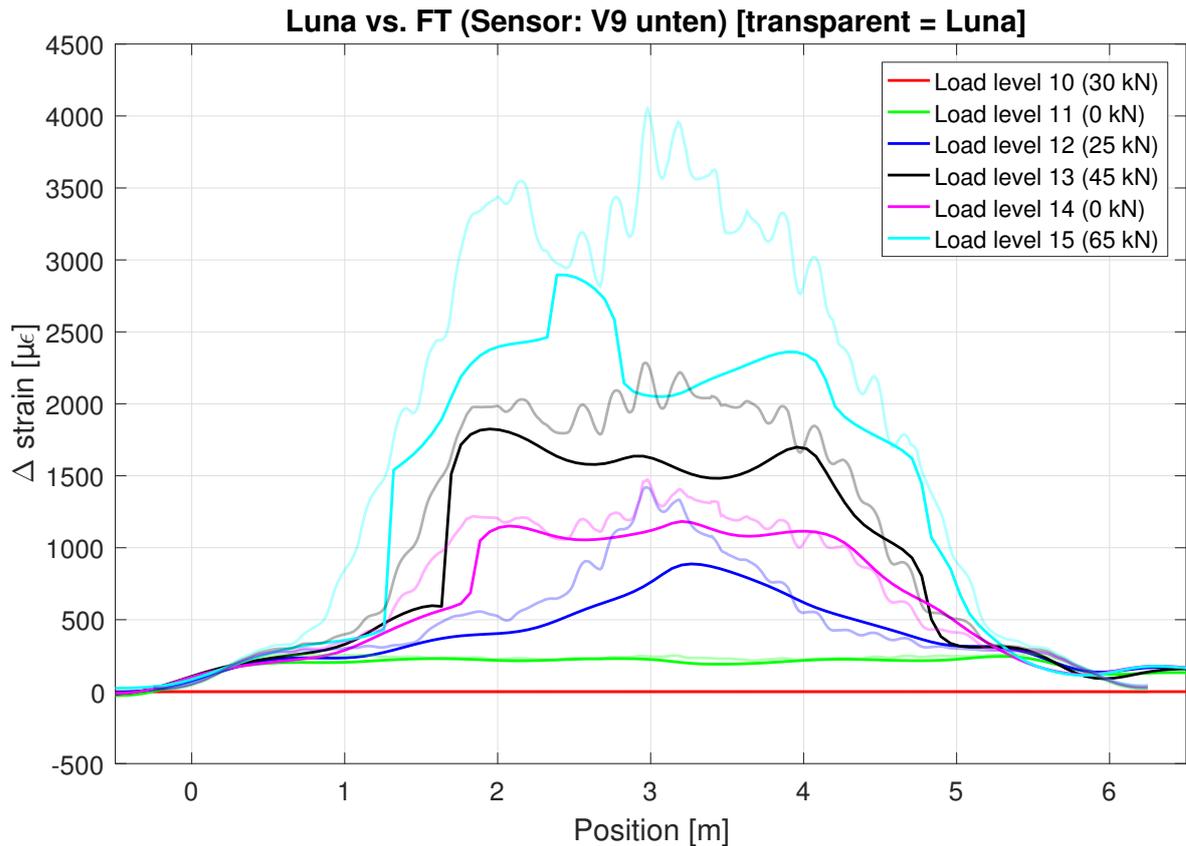


Abbildung 6.26: Luna vs. fT (V9 unten 1-5)    Abbildung 6.27: Luna vs. fT (V9 unten 6-9)

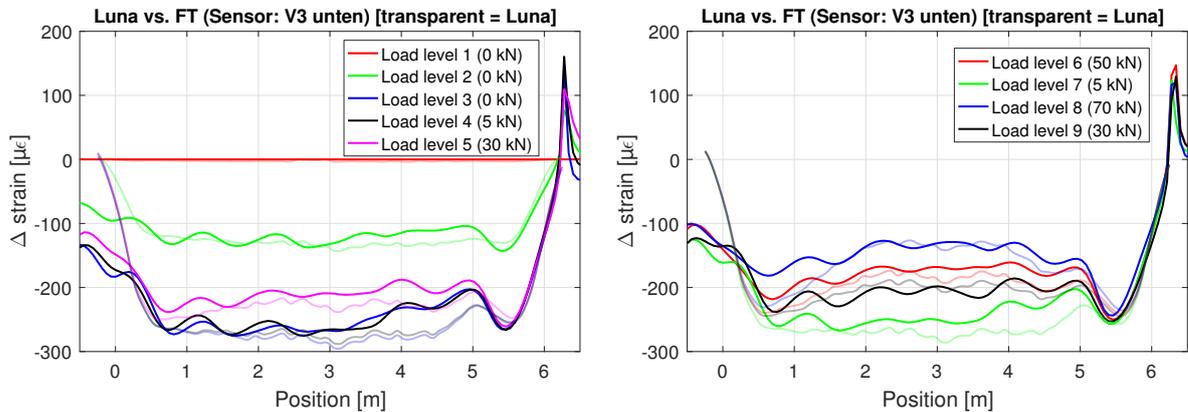
In Abbildung 6.28 sind die Laststufen des zweiten Tages zu sehen. Die maximalen Deformationen liegen bis zur Laststufe 15 in einem ähnlichen Bereich. Größere Abweichungen treten vor allem bei 3 m auf. Dies könnte möglicherweise auf eine Beschädigung der Faser an dieser Position zurückzuführen sein. Lediglich die Welligkeit, welche durch das Messverfahren hervorgerufen wird, kann für die abrupten Abweichungen nicht verantwortlich sein (vgl. Kapitel 4.4). Weitere Details dazu sind in Kapitel 6.3.2.6 zu lesen.



**Abbildung 6.28:** Luna vs. fT (V9 unten 10-15)

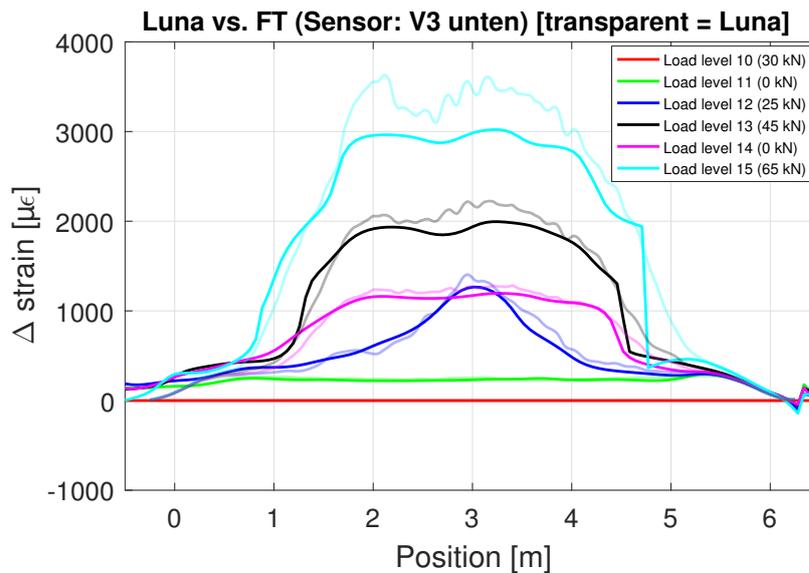
**Sensor V3 unten**

Die Laststufen des ersten Tages des Sensors V3 unten (siehe Abbildung 6.29 und 6.30) weisen wie beim Sensor V9 unten ähnliche Maximale wie die Luna Messungen auf. Die größten Abweichungen treten zwischen 4 und 5 m auf.



**Abbildung 6.29:** Luna vs. fT (V3 unten 1-5) **Abbildung 6.30:** Luna vs. fT (V3 unten 6-9)

In Abbildung 6.31 sieht man die Laststufen 10-15 für den Sensor V3 unten. Im Vergleich zum Sensor V9 unten passen die Ergebnisse viel besser zusammen. Ein Grund für die Zunahme der Differenzen zwischen Luna und fTB Messungen könnte möglicherweise die zunehmende Anzahl der Risse sein. Das Luna Messinstrument nimmt diese in die Messungen auf und somit kommt ein höherer Peak beim gleitenden Mittelwert zustande.



**Abbildung 6.31:** Luna vs. fT (V3 unten 10-15)

Um eine Entscheidung treffen zu können, welches Gerät besser für Deformationsmessungen geeignet ist, muss immer überlegt werden, wo genau gemessen wird. Im Labor eignet sich das Luna OBR 4600 besser für Messungen, da es eine höhere Genauigkeit (Ortsauflösung von 1 mm, fTB 2505 nur 20 cm) aufweist. Im Feldeinsatz wird man eher auf das fTB 2505 zurückgreifen, da es eine höhere Messreichweite von bis zu 50 km (OBR 4600 nur maximal 2 km) erlaubt und da es den BFS immer absolut aufzeichnet. Bei Luna Messungen kann es bei großen Deformationen schwierig werden, zwei Epochen miteinander zu verknüpfen, da eine Korrelation zur Vorepoche benötigt wird. Somit kann es passieren, dass man zwar eine Messung hat, diese aber nicht relativ mit ihrer Vorepoche vergleichen kann.

### 6.3.2.6 Untersuchung auf Besonderheiten

#### Sensor V9 unten

Beim Sensor V9 unten kommt es, im Vergleich zu Luna Messungen, vor allem in der Mitte des Balkens (bei 3 m) zu größeren Abweichungen (siehe Abbildung 6.28). Betrachtet man das Brillouin Signal am Tag vor dem Belastungstest und bei der Laststufe 0, hat sich das Spektrum in der Mitte verändert (siehe Abbildung 6.32, roter Rahmen). Dies kann infolge bei der Schätzung der Lorentz-Kurve zu Problemen führen. Es ist durch das Abflachen der Kurve (kein deutliches Maximum) nur mehr schwer möglich, eine genaue Kurve durch die Intensitäten zu schätzen.

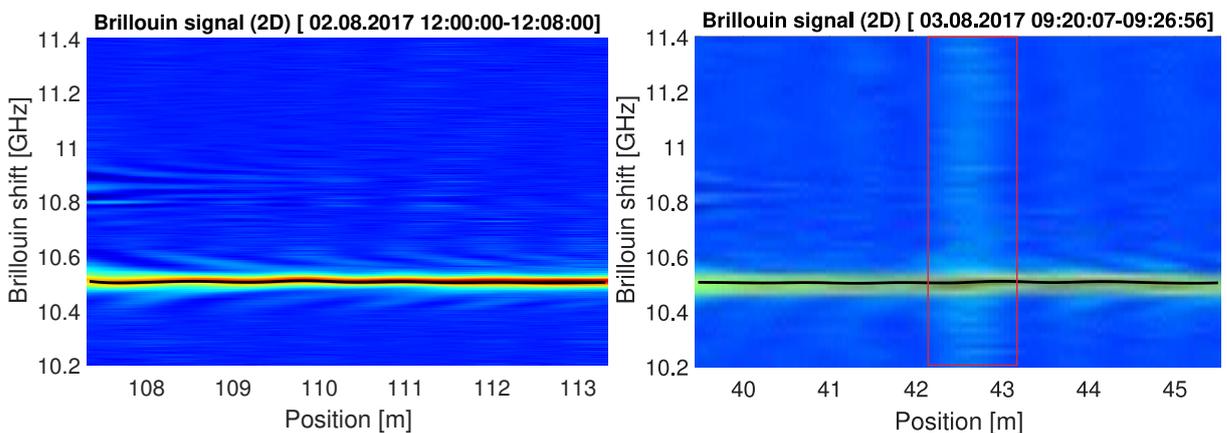


Abbildung 6.32: Brillouin Signal (V9 unten)

### Vergleich des BGS

Im folgenden Abschnitt wird das Spektrum der unterschiedlichen Sensoren zu bestimmten Laststufen verglichen. In Abbildung 6.33 sind die Spektren zu den Laststufen 1 und 15 dargestellt. Bei den Temperatur-Sensoren V3-A (22.4 m) und Temp-A (32.6 m) ändert sich die Intensität der Rückstreuung nur gering, es tritt lediglich eine Dehnung auf. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung des Spektrums nach rechts. Beim Sensor V9 unten (42.5 m) tritt neben der Dehnung auch eine starke Änderung der Intensität auf. Man kann schwer einen klaren Peak erkennen und infolge kann auch die Lorentz-Kurve nicht gut geschätzt werden. Der Sensor V3 unten (52.6 m) erfährt durch die starke Dehnung auch eine deutliche Verschiebung nach rechts. Auch hier hat es den Anschein, dass durch die hohe aufgebrachte Vertikalkraft die Intensität der Messungen leidet. Dieser Effekt wird noch genauer in diesem Unterkapitel untersucht. Der Sensor V3 oben (62.7 m) ändert sich durch seine Lage im oberen Bereich des Balkens nur wenig und auch die Intensität der Reflexion bleibt gleich über den Belastungsversuch.

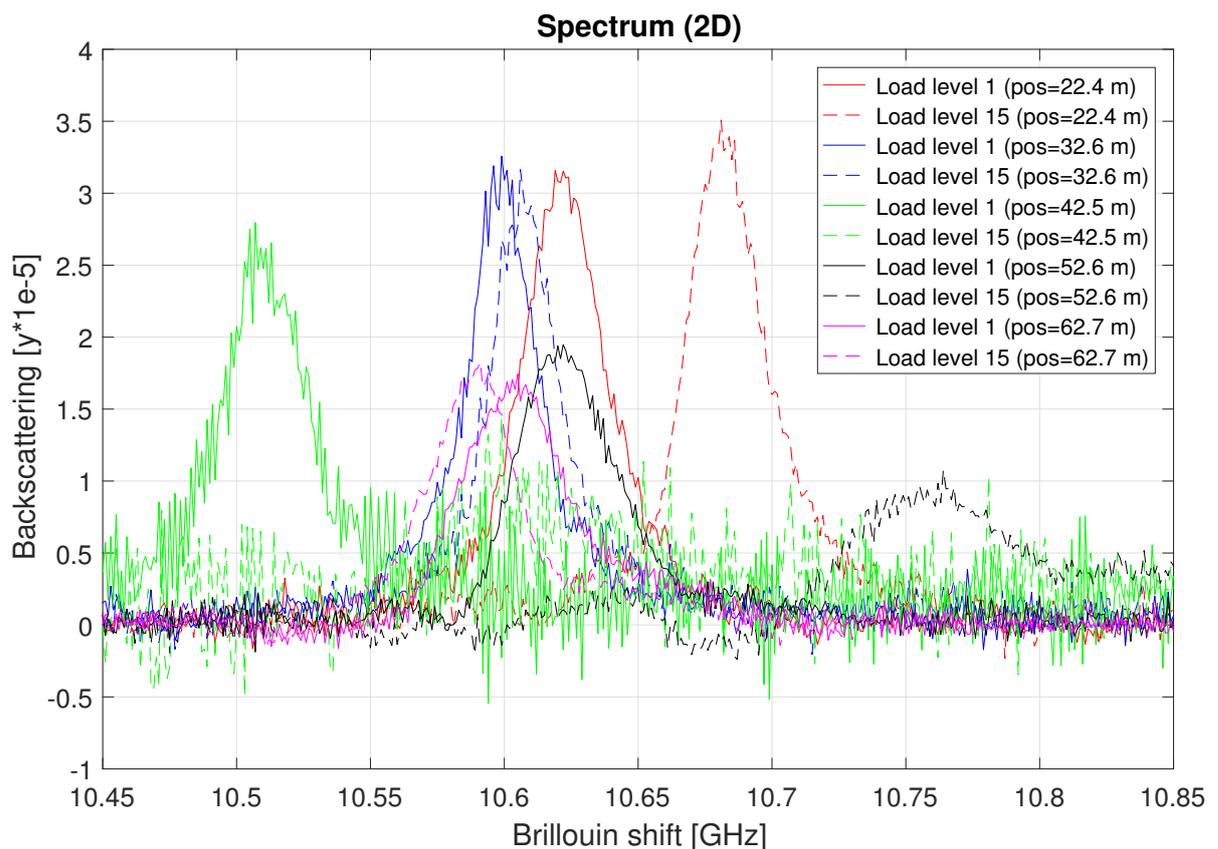


Abbildung 6.33: Spektrum aller Sensoren (Laststufe 1 und 15)

In den Abbildungen 6.34 und 6.35 sind die Spektren der Laststufen 1, 5, 9, 13 und 15 dargestellt. Vergleicht man die vier dargestellten Sensoren, ist vor allem das erhöhte Rauschen beim Sensor V9 unten (42.5 m) ersichtlich. Weiters fällt auf, dass umso mehr Dehnung die Sensoren erfahren, desto mehr wirkt sich dies negativ auf die Intensität der Rückstreuung aus. Bei den Sensoren V9 unten und V3 unten wird der Peak immer kleiner und das Schätzen des Maximums für den BFS wird schwieriger. Um zu überprüfen, ob das Rauschen den ganzen Bereich des Sensors V9 unten betrifft, wurden die Intensitäten auf der ganzen Faser überprüft (siehe Abbildung 6.36).

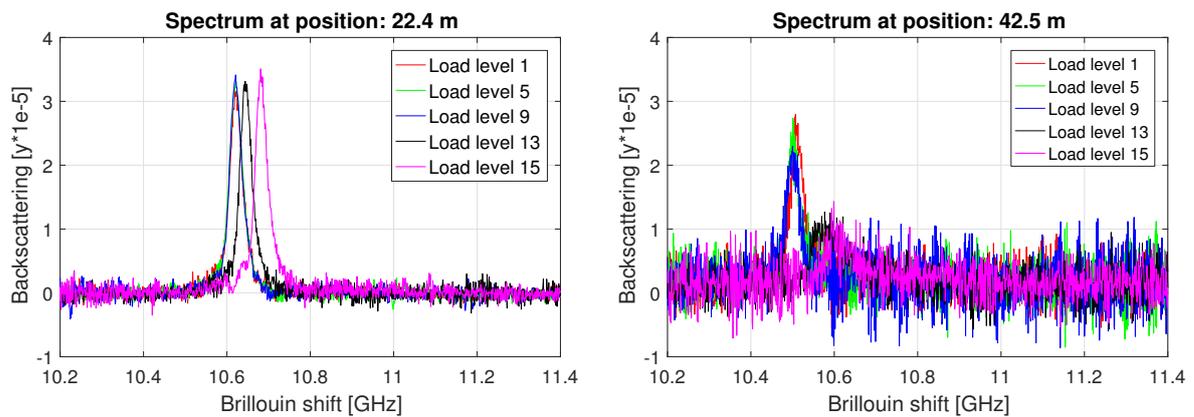


Abbildung 6.34: Vergleich der Spektren (links:V3-A, rechts: V9 unten)

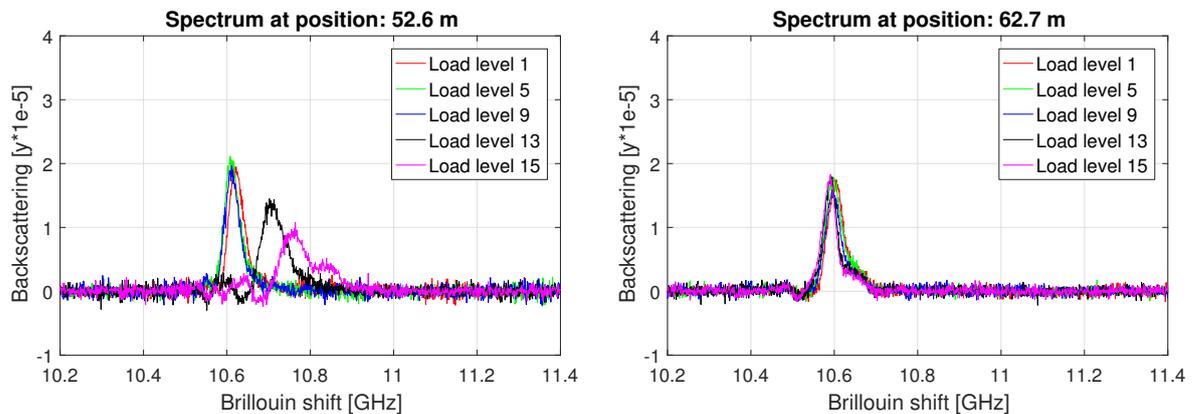
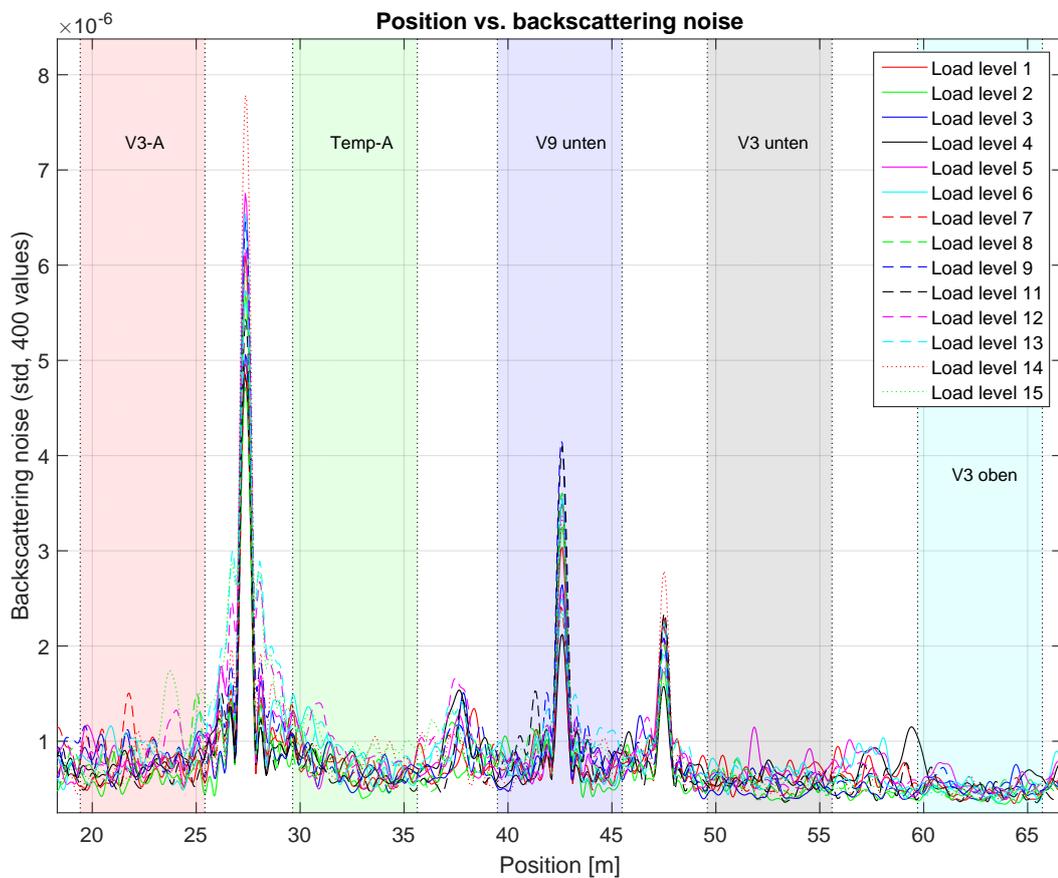


Abbildung 6.35: Vergleich der Spektren (links:V3 unten, rechts: V3 oben)

### Intensität der Rückstreuung

In Abbildung 6.36 sind die Standardabweichungen der letzten 400 Werte des Spektrums dargestellt. Dabei fällt auf, dass genau an der Position bei 42,5 m ein erhöhtes Rauschen auftritt. Das Kabel dürfte an dieser Position eine Beschädigung im Laufe des Belastungsversuches erfahren haben. Der restliche Bereich des Sensor V9 unten weist kein erhöhtes Rauschverhältnis auf. Ansonsten treten lediglich bei den Steckverbindungen hohe Standardabweichungen auf. Die Laststufe 10 ist nicht angeführt, da für sie keine Messung des Spektrums vorliegt.



**Abbildung 6.36:** Standardabweichung des letzten Bereichs im Spektrum

Um die Abhängigkeit der maximalen Rückstreuung von der aufgebracht Belastung zu untersuchen, sind die Intensitäten in Abbildung 6.37 zu sehen. Es kommt klar zum Vorschein, dass vor allem die Intensitäten der Sensoren V9 unten und V3 unten relativ zur ersten Belastungsstufe zurückgehen. Je mehr Belastung aufgebracht wird, umso weniger Intensität hat die Rückstreuung. Es wird also klar, dass eine sehr hohe Belastung, wie

in diesem Fall, negative Auswirkungen auf die Messung hat. Man muss aber berücksichtigen, dass bei normalen Monitoringprojekten keine solchen Belastungen auftreten und somit die Messungen nicht gefährdet werden. Das Problem ist in diesem Fall, dass die Intensitätskurve immer mehr abflacht und somit der BFS schwerer zu bestimmen ist.

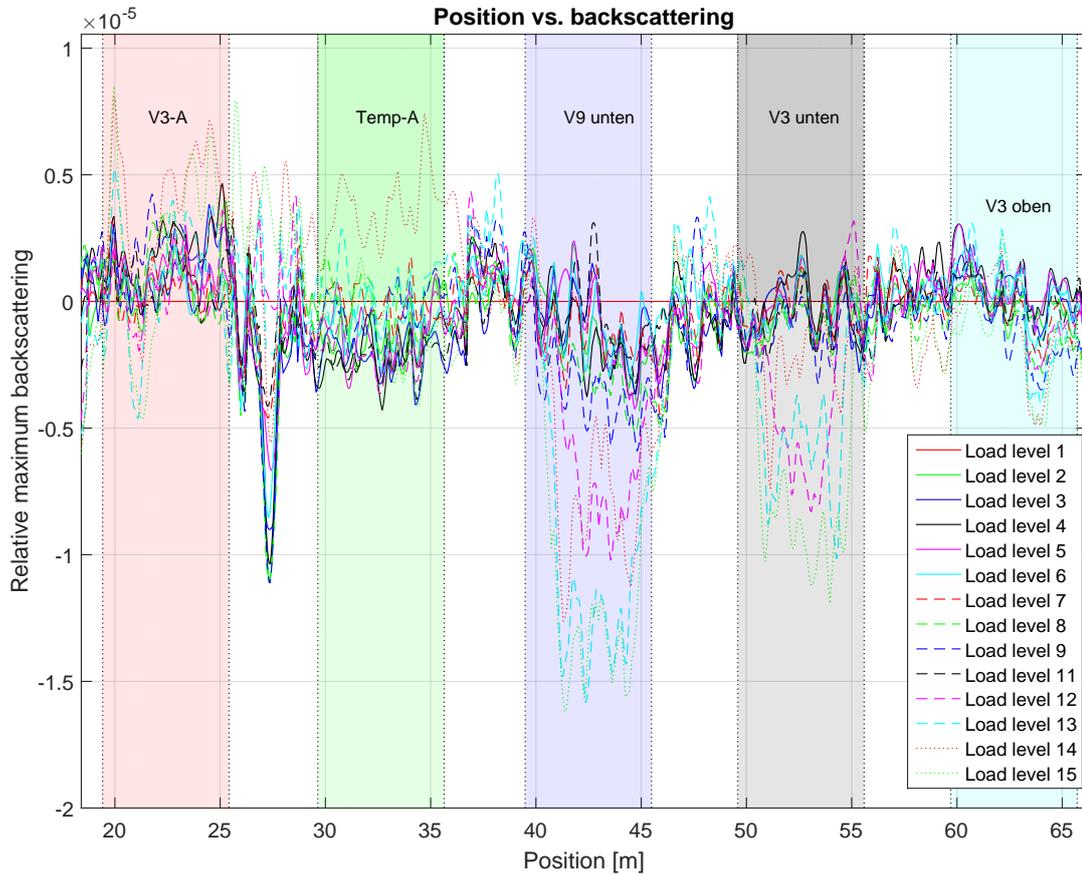
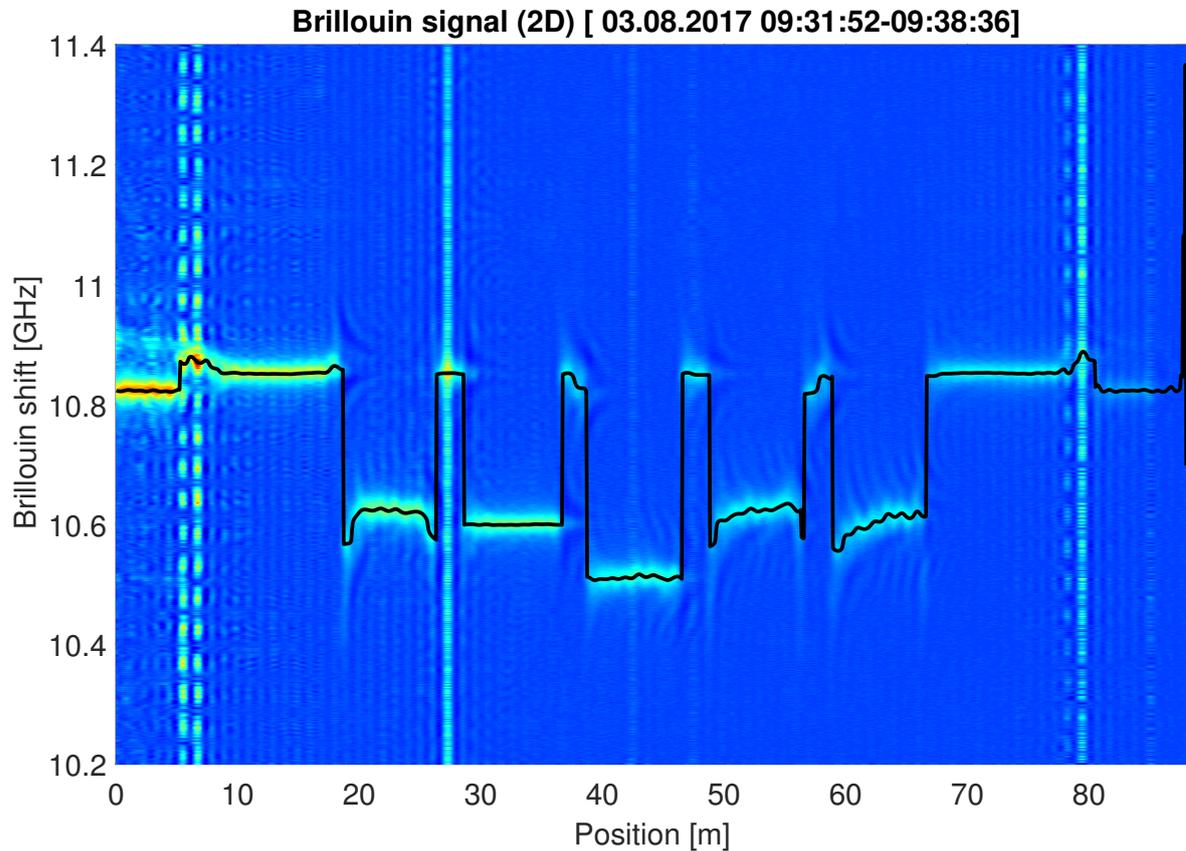


Abbildung 6.37: Maximale Rückstreuung

Ein sehr wichtiges Thema bei faseroptischen Überwachungsmessungen sind die Dämpfungen entlang der Faser. In Abbildung 6.38 ist das Brillouin Signa der gesamten Faser vor dem Belastungstest zu sehen. Durch verunreinigte Stecker wird das Signal stark rückgestreut und somit bleibt weniger Intensität für die weitere Faserstrecke. In weiterer Folge entsteht daraus ein abgeflachtes Spektrum und die Detektion des Maximums (BFS) gestaltet sich schwieriger. Es ist klar ersichtlich, dass der Bereich vom Switch (5-6 m) das Signal stark schwächt. Weiters kommt es durch einen verunreinigten Stecker nach dem Sensor V3-A zu einem weiteren Intensitätsverlust. Dies wird durch den hellen Strich über das gesamte Spektrum (28 m) ersichtlich. Da die Intensität auch durch starke

Dehnungen gedämpft wird, sollten somit bevor eine Hauptmessung startet alle Stecker, die im Brillouin Signal als dreckig detektiert werden, geputzt werden, um über einen längeren Zeitraum ohne Probleme messen zu können. Die Auswirkungen auf das Spektrum bei sehr geringer Intensität sind in Abbildung 6.34 beim Sensor V9 unten ersichtlich.



**Abbildung 6.38:** Brillouin Signal (alle Sensoren)

Die letzten Grafiken zeigen deutlich, wie wichtig neben der Analyse des BFS auch Untersuchungen der Dämpfung sowie der Rückreflexion sind. Es sollte somit bei einer Messkampagne in größeren Zeitabständen neben der Frequenzverschiebung auch das Spektrum mit gespeichert werden. Es gibt viel Auskunft darüber, ob man einem Messwert vertrauen darf oder ob man das Ergebnis aufgrund kurzfristig hoher Dämpfungen hinterfragen sollte.

Bevor man die Ergebnisse in Temperatur- und Dehnungsänderungen umrechnet, sollten zuerst das Spektrum und die maximalen Rückreflexionen entlang der Faser untersucht werden. Weisen diese keinerlei Auffälligkeiten auf, kann eine weitere Analyse der Messdaten erfolgen.

# Kapitel 7

## Resümee

Als Resümee dieser Masterarbeit kann gesagt werden, dass ein beliebiges Gebiet (z.B. Bauwerk oder Rutschhang), welches mit SSMF Glasfasern ausgestattet ist, vollautomatisiert überwacht werden kann. Die Messungen können als Indikatoren für weitere Maßnahmen herangezogen werden. Die in dieser Arbeit entwickelte Software FBM kann zu beliebigen Zeitpunkten mit unterschiedlichen Messeinstellungen Brillouin-Frequenzverschiebungen aufzeichnen. Wenn die Parameter der Glasfaser bekannt sind, kann im entwickelten Analysetool FBA die Frequenzverschiebung in Temperatur- und Dehnungsänderungen umgerechnet werden.

Bei bereits verlegten Glasfasern, wie z.B. bei Kommunikationsfasern für das Internet, kann die Ortszuordnung schwierig werden, wenn keine genauen Aufzeichnungen über die Verlegung der Kabel geführt wurden. Ohne Stecker bzw. sonstige Änderungen (z.B. anderer Kabeltyp) der Brillouinverschiebung ist eine genaue Zuordnung der Position schwierig. Abhilfe kann geschaffen werden, wenn Veränderungen künstlich herbeigeführt werden, z.B. wenn mit einem Föhn das Kabel erhitzt wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Zustand des Kabels. Die Messungen zeigten, dass verschmutzte Stecker größere Einflüsse auf die BFS haben können. Daher sollten alle Steckverbindungen einer Schleife vor einer neuen Messkampagne auf Sauberkeit untersucht werden. Verunreinigungen treten vor allem im Brillouin Signal durch eine Aufspreizung des Spektrums auf. Aus diesem Grund sollte neben der BFS auch immer die Rückstreuung des Signals analysiert werden. Dafür muss neben der Brillouin-Frequenzverschiebung auch die Intensität der Rückstreuung (pulse response) abgespeichert werden.

Bei der Neuverlegung von faseroptischen Kabeln zeigte sich, dass das Kabel V3 und ein Temperaturkabel (zur Temperaturkompensation) von BruSens gut für eine Überwachungsmessung geeignet sind.

# Literaturverzeichnis

- [1] Agrawal, G. P. (2013). *Nonlinear fiber optics*. Optics and Photonics. Elsevier Science, Burlington, 5th edition.
- [2] Bernini, R., Minardo, A., and Zeni, L. (2012). Distributed sensing at centimeter-scale spatial resolution by bofda: Measurements and signal processing. *IEEE Photonics Journal*, 4(1):48–56.
- [3] Engelbrecht, R. (2014). *Nichtlineare Faseroptik: Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. Springer Vieweg, Berlin.
- [4] Galindez-Jamioy, C. A. and López-Higuera, J. M. (2012). Brillouin distributed fiber sensors: An overview and applications. *Journal of Sensors*, 2012(10):1–17.
- [5] Horiguchi, T., Kurashima, T., and Tateda, M. (1989). Tensile strain dependence of brillouin frequency shift in silica optical fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1(5):107–108.
- [6] Horiguchi, T., Shimizu, K., Kurashima, T., Tateda, M., and Koyamada, Y. (1995). Development of a distributed sensing technique using brillouin scattering. *Journal of Lightwave Technology*, 13(7):1296–1302.
- [7] Measures, R. M. (2001). *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. Elsevier professional, s.l., 1. edition.
- [8] Niklès, M., Thévenaz, L., and Robert, P. A. (1996). Simple distributed fiber sensor based on brillouin gain spectrum analysis. *Optics Letters*, 21(10):138–141.
- [9] Nöther, N. (2010). *Distributed fiber sensors in river embankments: Advancing and implementing the Brillouin optical frequency domain analysis: Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2010*, volume 64 of *BAM-Dissertationsreihe*. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin.

- [10] Tateda, M., Horiguchi, T., Kurashima, T., and Ishihara, K. (1990). First measurement of strain distribution along field-installed optical fibers using brillouin spectroscopy. *Journal of Lightwave Technology*, 8(9):1269–1272.
- [11] The Fiber Optic Association Inc. (2008-2013). Optical time domain reflectometer (otdr).
- [12] Tur, M., Motil, A., Sovran, I., and Bergman, A. (2014). Recent progress in distributed brillouin scattering fiber sensors. In *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, pages 138–141. IEEE.
- [13] Werner Lienhart (2016). *Faseroptische Messysteme*. Vorlesungsskript.
- [14] Wosniok, A., Nöther, N., and Krebber, K. (2009). Distributed fibre optic sensor system for temperature and strain monitoring based on brillouin optical-fibre frequency-domain analysis. *Procedia Chemistry*, 1(1):397–400.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzip der Rückstreuung . . . . .	3
2.2	OTDR Signalverlauf . . . . .	4
2.3	Energielevel . . . . .	5
2.4	Intensitäten des rückgestreuten Lichts . . . . .	5
2.5	Brillouin-optische Zeitbereichsverfahren Reflektometer . . . . .	6
2.6	Brillouin-optische Zeitbereichsverfahren Analysator . . . . .	7
2.7	Zusammenhang: BFS und Spektrum . . . . .	7
2.8	Brillouin-optische Frequenzbereichsverfahren Analysator . . . . .	9
2.9	Abhängigkeit der Dehnung (längs) und dem BFS . . . . .	10
2.10	Abhängigkeit von Temperatur und dem BFS . . . . .	10
2.11	Spektrum ohne Riss (a) und mit Riss (b) . . . . .	11
2.12	Zusammenhang: Verformung und Spektrum der Brillouin Verschiebung . . . . .	11
3.1	Workflow der Monitoringsoftware . . . . .	13
3.2	Monitoring Konfiguration (FBM-GUI) . . . . .	14
3.3	Konfiguration der Messung (FBM-GUI) . . . . .	14
3.4	Konfiguration der Messzeiten (FBM-GUI) . . . . .	14
3.5	Analyse GUI (FBA) . . . . .	16
4.1	Messungen im Vertikalkomperator . . . . .	17
4.2	Relativer BFS . . . . .	18
4.3	Residuen von 5 Messungen bei 0,5 m Ortsauflösung und 0,1 MHz Frequenzschritt (Versuch I) . . . . .	19
4.4	Residuen von 5 Messungen bei 0,5 m Ortsauflösung und 0,1 MHz Frequenzschritt (Versuch II) . . . . .	19
4.5	Abweichungen vs. Iteration und Histogramm (Versuch I) . . . . .	20
4.6	Maximale Verbesserungen zu den Abweichungen vom Mittelwert und Standardabweichung . . . . .	20

4.7	Auswirkung eines verschmutzten und geputzten Steckers auf das Brillouin Signal . . . . .	22
4.8	Auswirkung verschmutzter Stecker auf den BFS . . . . .	23
4.9	Auswirkung verschmutzter Stecker auf die Intensität . . . . .	24
4.10	EDFA und BFS . . . . .	25
4.11	EDFA und Rückstreuung . . . . .	25
4.12	Auswirkung unterschiedlicher EDFA auf das Spektrum . . . . .	26
4.13	Unterschiedliche räumliche Auflösungen . . . . .	27
4.14	Auswirkung einer Ortsauflösung von 1 cm und 50 cm auf die Position . .	28
4.15	Wellenartiges Verhalten der Frequenzverschiebung . . . . .	28
5.1	Messgerät fTB 2505 im Rack . . . . .	30
5.2	ZID Teststrecke Leitungsverlauf . . . . .	31
5.3	Leitungskataster: Ecke Mandellstraße/Sparbersbachgasse . . . . .	31
5.4	OTDR Messung der ZID-Teststrecke . . . . .	32
5.5	Vergleich Luna und fTB Messungen der ZID-Teststrecke . . . . .	33
5.6	Brillouin Signal der ZID-Teststrecke (aufgespreiztes Spektrum) . . . . .	35
5.7	BFS gegenüber der Position (Hin und rück gespiegelt) . . . . .	36
5.8	Zeitreihen der Messepoche März . . . . .	37
5.9	Zeitreihen der Messepoche April . . . . .	38
5.10	Vergleich der Epochen März und April . . . . .	39
5.11	Vergleich der Epochen März und April (Differenz) . . . . .	40
5.12	Vergleich der Epochen März und April (Spektrum) . . . . .	40
6.1	Sensoren-Anordnung im Versuchsbalken . . . . .	42
6.2	Hydraulikpumpe . . . . .	44
6.3	Sensorkabel . . . . .	44
6.4	Betonbalken vor dem Umheben . . . . .	44
6.5	Zeitreihe: Aushärten des Betons (Position vs. Temperatur) . . . . .	45
6.6	Zeitreihe: Halle (Position vs. Temperatur) . . . . .	46
6.7	Temperaturverlauf ZAMG-Zeitraum 1 . . . . .	47
6.8	Temperaturverlauf ZAMG-Zeitraum 2 . . . . .	47
6.9	Geschlossenes Tor der Halle des LKI . . . . .	47
6.10	Prüfgerüst . . . . .	48
6.11	Laststufen . . . . .	49
6.12	Sensoranordnung beim Belastungstest . . . . .	50
6.13	Erster Belastungstag (absolut) . . . . .	51

6.14 Riss im Betonbalken . . . . .	51
6.15 Zweiter Belastungstag (absolut) . . . . .	52
6.16 Erster Belastungstag (relativ) . . . . .	53
6.17 Zweiter Belastungstag (relativ) . . . . .	54
6.18 Erster Belastungstag (vergrößert - relativ) . . . . .	55
6.19 Zeitreihe Tag I . . . . .	56
6.20 Zeitreihe Tag II . . . . .	57
6.21 Verformung vs. Vertikalkraft (Tag I) . . . . .	58
6.22 Verformung vs. Vertikalkraft (Tag II) . . . . .	59
6.23 Verformung vs. Vertikalkraft (Temp. Sensoren - Tag I) . . . . .	60
6.24 Verformung vs. Vertikalkraft (Temp. Sensoren - Tag II) . . . . .	60
6.25 Luna vs. fT (rohes Signal) . . . . .	61
6.26 Luna vs. fT (V9 unten 1-5) . . . . .	62
6.27 Luna vs. fT (V9 unten 6-9) . . . . .	62
6.28 Luna vs. fT (V9 unten 10-15) . . . . .	63
6.29 Luna vs. fT (V3 unten 1-5) . . . . .	64
6.30 Luna vs. fT (V3 unten 6-9) . . . . .	64
6.31 Luna vs. fT (V3 unten 10-15) . . . . .	64
6.32 Brillouin Signal (V9 unten) . . . . .	65
6.33 Spektrum aller Sensoren (Laststufe 1 und 15) . . . . .	66
6.34 Vergleich der Spektren (links:V3-A, rechts: V9 unten) . . . . .	67
6.35 Vergleich der Spektren (links:V3 unten, rechts: V3 oben) . . . . .	67
6.36 Standardabweichung des letzten Bereichs im Spektrum . . . . .	68
6.37 Maximale Rückstreuung . . . . .	69
6.38 Brillouin Signal (alle Sensoren) . . . . .	70

# Tabellenverzeichnis

4.1	Standardabweichung der Brillouin Frequenzverschiebung (Versuch I) . . .	21
4.2	Standardabweichung der Dehnungsänderung (Versuch I) . . . . .	21
4.3	Standardabweichung der Temperaturänderung (Versuch I) . . . . .	22
5.1	Messeinstellungen bei der ZID-Teststrecke . . . . .	34
6.1	Messeinstellungen beim Versuchsbalken . . . . .	43
6.2	Faserpositionen der Sensoren (Aushärten) . . . . .	43
6.3	Faserpositionen der Sensoren (Belastung) . . . . .	50

# Anhang A

## fTB 2505 Datenblatt

### fTB 2505 series

Performance, features and technical data			
Fiber type		Standard single-mode	
Optical connectors		E-2000 / APC	
Sensor configuration		loop	
Distance range (fiber loop)		50 km <sup>1)</sup>	
Spatial resolution	up to 2 km fiber	0.2 m <sup>2)</sup>	
	up to 25 km fiber	0.5 m	
	up to 50 km fiber <sup>1)</sup>	1.0 m	
Spatial accuracy		0.05 m	
Optical budget <sup>3)</sup>		> 20 dB	
Measurable parameters		Brillouin frequency shift, temperature, strain	
Accuracy and range		Accuracy	Range
	strain	< 2 $\mu\text{e}$	-3% to +3% <sup>4)</sup>
	temperature	< 0.1°C	-273 to +1000°C <sup>4)</sup>
	Brillouin freq. shift	< 100 kHz	10 – 13 GHz
Typical acquisition time <sup>5)</sup>	0.2 km fiber	20 seconds	
	2 km fiber	1 minute	
	10 km fiber	8 minutes	
	25 km fiber	25 minutes	
Communication interface		Ethernet	
Data export formats		binary, ASCII	
Measurement modes		Single measurements on demand; continuous monitoring Automatic detection of fiber length and attenuation	
Remote operation		Remote measurements, system diagnostics	
Operating temperature		5 - 40°C	
Dimensions	L x W x H	495 x 482 x 145 mm (19" rack case)	
Weight		13 kg	
Power consumption		60 W	
Laser class		1M	

<sup>1)</sup> Standard distance range is 25 km. Distance range enhancement to 50 km available upon request

<sup>2)</sup> Software resolution enhancement selectable in user interface

<sup>3)</sup> High optical losses along the sensing fiber may degrade the strain / temperature accuracy

<sup>4)</sup> Limited by optical fiber

<sup>5)</sup> Estimated for typical measurements. Measurement time will vary with resolution, accuracy and strain / temperature range



# Anhang B

## Datenblatt: BRUsens strain V3

### BRUsens Strain Sensing Cables

#### BRUsens strain V3

Fiber optic strain sensing cable, extra robust, with central metal tube, metallic armoring wires and structured PA outer sheath, one optical fiber, strain range up to 1% (10000  $\mu$ strain).

##### Description

- Compact design, good flexibility, small bending radius
- Metal tube, central, extra small, with one strain locked optical fiber, hermetically sealed
- Outer sheath, robust, abrasion resistant, halogen free, structured for better strain transfer
- High strain sensitivity
- Excellent rodent protection
- High chemical resistance
- Laterally watertight
- High tensile strength and crush resistance

##### Application

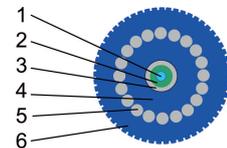
- Strain
- Soil movement
- Pipeline monitoring
- Structural monitoring
- Brillouin, FBG
- Outdoors, harsh environment, subsea
- Direct burial in soil, concrete

##### Remarks

- Standard fiber color code: 1 red, 2 green, 3 yellow, 4 blue, 5 white, 6 violet, 7 orange, 8 black
- For improved UV resistance, black cable sheath available upon request
- Deployment training upon request
- Standard cable marking with meter marks, special labeling of outer sheath upon request
- Other cable designs and temperature ranges upon request
- Accessories such as mounting brackets, loops, fan-outs, splice enclosures, connectors, patch-panels, repair- and field-termination-kits etc. are available
- Accessories such as anchors, mounting brackets, loops, fan-outs, splice enclosures, connectors, patch-panels, repair kits etc. are available
- Final test reports OTDR, BOTDA measurement available upon request

3\_50\_2\_002

LLK-BSST V3 7.2 mm



#### Technical data

Type	Max. no. of fibres units	Cable $\phi$ mm	Weight kg/km	Installation Max. tensile strength N	Typical Load at 1 % elongation N
1F	1	7.2	75	600	1600

Type	with tensile load Min. bending radius mm	without tensile load Min. bending radius mm	Max. crush resistance N/cm
1F	144 (20xD)	108 (15xD)	500

#### Optical fiber data (cabled) at 20°C

Fiber Type	Attenuation dB/km 1550 nm	Temperature sensitivity $df_B/dT$ Typical Brillouin parameters BOTDR or BOTDA at 1550 nm MHz/°C	Strain sensitivity $df_B/dT_\epsilon$ Typical Brillouin parameters BOTDR or BOTDA at 1550 nm MHz/°C	Centr. Brillouin Freq. Typical Brillouin parameters BOTDR or BOTDA at 1550 nm GHz
SMF	$\leq 0.5$	1.1	450	10.6

# Anhang C

## Datenblatt: BRUsens strain V9

### BRUsens Strain Sensing Cables

#### BRUsens strain V9

Fiber optic strain sensing cable, mini, flexible, armored with central metal tube, structured PA outer sheath, one optical fiber, strain range up to 1% (10000  $\mu$ strain).

##### Description

- Compact design, good flexibility, small bending radius
- Metal tube, central, extra small, with one strain locked optical fiber, hermetically sealed
- Outer sheath, robust, abrasion resistant, halogen free, structured for better strain transfer
- High chemical resistance
- Good rodent protection
- Laterally watertight
- High strain sensitivity
- Good tensile strength and crush resistance

##### Application

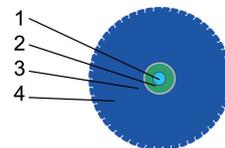
- Strain
- Soil movement
- Pipeline monitoring
- Structural monitoring
- Precision measurement and alarm systems
- Brillouin, FBG
- Outdoors, harsh environment, subsea
- Direct burial in soil, concrete

##### Remarks

- Standard fiber color code: 1 red, 2 green, 3 yellow, 4 blue, 5 white, 6 violet, 7 orange, 8 black
- For improved UV resistance, black cable sheath available upon request
- Deployment training upon request
- Standard cable marking with meter marks, special labeling of outer sheath upon request
- Other cable designs and temperature ranges upon request
- Accessories such as mounting brackets, loops, fan-outs, splice enclosures, connectors, patch-panels, repair- and field-termination-kits etc. are available
- Accessories such as anchors, mounting brackets, loops, fan-outs, splice enclosures, connectors, patch-panels, repair kits etc. are available
- Final test reports OTDR, BOTDA measurement available upon request

3\_50\_2\_005

LLK-BSST V9 3.2 mm



##### Technical data

Type	Max. no. of fibres units	Cable $\phi$ mm	Weight kg/km	Installation Max. tensile strength N	Typical Load at 1 % elongation N
1F	1	3.2	10.5	260	470

Type	with tensile load Min. bending radius mm	without tensile load Min. bending radius mm	Max. crush resistance N/cm
1F	64 (20xD)	48 (15xD)	250

##### Optical fiber data (cabled) at 20°C

Fiber Type	Attenuation dB/km 1550 nm	Temperature sensitivity $df_B/dT$ Typical Brillouin parameters BOTDR or BOTDA at 1550 nm MHz/°C	Strain sensitivity $df_B/dT\epsilon$ Typical Brillouin parameters BOTDR or BOTDA at 1550 nm MHz/°C	Centr. Brillouin Freq. Typical Brillouin parameters BOTDR or BOTDA at 1550 nm GHz
SMF	$\leq 0.5$	1.1	450	10.6

# Anhang D

## Datenblatt: BRUsens temperature

### BRUsens Temperature Sensing Cables

### BRUsens temperature 85°C

3\_50\_1\_001

Fiber optic temperature sensing cable, extra small, armored with stainless steel loose tube, stainless steel strength members and PA outer sheath, fast thermal response, for up to 8 fibers.

#### Application

- Temperature
- Communication cable for sensing
- Temperature compensation for Brillouin
- Raman, Brillouin, FBG etc.
- Outdoors, harsh environment
- Direct burial in soil or in conduits

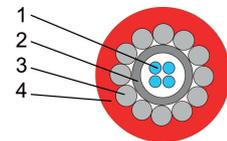
#### Description

- Compact design, low weight, high flexibility, small bending radius
- Loose tube, central, metal, gel filled, with up to 8 fibers, hermetically sealed, optimized fiber excess length
- Outer sheath, robust, abrasion resistant, halogen free
- High crush resistance
- High tensile strength
- Excellent rodent protection
- High chemical resistance
- Fast temperature response
- Easy deployment

#### Remarks

- Standard fiber color code: 1 red, 2 green, 3 yellow, 4 blue, 5 white, 6 violet, 7 orange, 8 black
- For improved UV resistance, black cable sheath available upon request
- Other cable designs available
- Accessories such as mounting brackets, loops, fan-outs, splice enclosures, connectors, patch-panels, repair kits etc. are available
- Deployment training upon request

LLK-BSTE 85°C 3.4 ...4.8 mm



#### Technical data at 20°C

Type	Max. no. of fibres units	Cable ø mm	Weight kg/km	Max. crush resist- ance N/cm	Installation Max. tensile strength N	Operation Max. tensile strength N
1F	1	3.4	18	1200	800	600
2F	2	3.8	26	600	1500	1000
4F	4	3.8	26	600	1500	1000
8F	8	4.8	46	800	3000	2000

Type	with tensile load Min. bending radius mm	without tensile load Min. bending radius mm	Hydrostatic pressure resistance x 100 kPa (bar)
1F...8F	20xD	15xD	300

#### Optical fiber data (cabled) at 20°C

Fiber Type	Attenuation dB/km 850 nm	Attenuation dB/km 1300 / 1310 nm	Attenuation dB/km 1550 nm	Modal Bandwidth MHz x km 850 nm	Modal Bandwidth MHz x km 1300 nm
MMF 50/125	≤3.0	≤1.0	NA	700	500
MMF 62.5/125	≤3.5	≤1.0	NA	200	500
SMF	NA	≤0.36	≤0.25	NA	NA