



Madeleine Winkler, BSc

Verteilte faseroptische Temperaturmessung: Genauigkeitsbudget und Anwendungen in der Geodäsie

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

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

In erster Linie möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich während meiner gesamten Studienzeit unterstützte und stets einen familiären Rückhalt bot. Ein ganz besonderer Dank ergeht dabei an meinen Freund Bernhard, der mir vor allem in besonders stressigen Zeiten stets den Rücken freigehalten und Energie gegeben hat und mich mit seinem unerschütterlichen Optimismus immer wieder aufs Neue ermutigt hat. Deshalb möchte ich auch meiner Familie und meinem Freund Bernhard diese Arbeit widmen.

Ein herzlicher Dank ergeht an meinen Betreuer Herrn Prof. Werner Lienhart. Trotz seines stressigen Universitätsalltags stand er mir bei Problemen und der Interpretation der Ergebnisse mit seiner jahrelangen Erfahrung stets mit Rat und Tat zur Seite. Auch möchte ich mich für die rasche Korrektur meiner Arbeit bedanken.

Ein weiterer herzlicher Dank ergeht auch an Herrn Dipl. Ing. Ferdinand Klug für seine fachliche und praktische Unterstützung bei der Durchführung der Laboruntersuchungen, der Messung der Kommunikationsleitung des Zentralen Informatikdienstes und der Interpretation der erzielten Ergebnisse. Vielen Dank auch für die Hilfe bei der Kontaktaufnahme mit dem Hersteller zur Reklamation des defekten Instruments.

Des weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Helmut Woschitz und Herrn Dipl. Ing. Christoph Monsberger für die Unterstützung durch ihr fachliches und praktisches Wissen bedanken.

Besonderen Dank auch an Ing. Rudolf Lummerstorfer und Ing. Dietmar Denkmaier für die Bereitstellung des Messequipments und die Hilfestellung bei den Laboruntersuchungen sowie der Abwicklung der Rücksendung des defekten Instruments zur Reparatur.

Abschließend möchte ich mich noch bei Herrn Dipl. Ing. Fabian Buchmayer für die Bereitstellung seiner Messdaten zum gemeinsam durchgeführten Betonbalkenprojekt und beim Zentralen Informatikdienst für die Zurverfügungstellung der Kommunikationsleitung bedanken.

Kurzfassung

Die Temperatur stellt die mit Abstand am meisten erfasste und bedeutendste physikalische Größe dar. Einerseits können Temperaturänderungen ein Indikator für die Änderung anderer physikalischer Parameter sein, andererseits ist die Temperatur auch eine beeinflussende Größe bei der Erfassung geometrischer Parameter, wie der Dehnung. Eine zuverlässige und lückenlose Temperaturerfassung ist daher unerlässlich. Dafür steht eine Vielzahl von Messverfahren, unter anderem das Verfahren der verteilten faseroptischen Temperaturmessung auf Basis der Raman-Rückstreuung, zur Verfügung. Dieses Messverfahren bietet vor allem den Vorteil einer kontinuierlichen Temperaturerfassung über das gesamte zu messende Objekt und erstmals auch im Inneren von Objekten. Dahingehend beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der erreichbaren Präzision und Genauigkeit sowie der Anwendbarkeit dieses Messverfahrens auf geodätische Problemstellungen, wie der Temperaturkompensation. Für die Untersuchungen wurde das auf der Raman-Rückstreuung basierende faseroptische Messsystem AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance der Firma AP Sensing verwendet. Mit dem AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance können laut Hersteller Absoluttemperaturprofile mit einer räumlichen Auflösung von 1 m über eine Reichweite von 12 km bei einer Präzision von 0.3 °C bestimmt werden. Hinsichtlich des tatsächlichen Präzisions- und Genauigkeitsbudgets wurden umfangreiche Systemuntersuchungen zu den einzustellenden Messparametern, wie der Messzeit, der räumlichen Auflösung und dem Samplingintervall, zu der effektiven Reichweite und dem Rauschverhalten bei zunehmender Distanz, Dämpfung und Temperatur der Messfaser durchgeführt. Zur Untersuchung der Anwendbarkeit in der Praxis fanden zum einen Messungen entlang einer herkömmlichen Kommunikationsschleife und zum anderen eine Überwachung des Aushärtvorgangs eines Betonbalkens mit anschließendem Belastungstest statt.

Abstract

The temperature is the most measured and most important physical parameter. Changes in temperature might be an indicator for changes in other physical parameters on the one hand, and an influencing factor on the acquisition of geometric parameters, such as strain. This requires a reliable and complete temperature detection, for which, amongst a large number of other measurement methods, the method of distributed temperature sensing based on Raman backscattering is available. This method offers the advantage of continuous temperature measurements of the entire measuring object and gives also temperature information on the inside of the object. Therefore the present thesis deals with the achievable precision and accuracy of the measurement system based on Raman backscattering and the applicability for geodetic problems, such as temperature compensation. The research is carried out using the Raman based measurement system AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance, produced by AP Sensing. According to the manufacturer the AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance is able to measure absolute temperature profiles with a spatial resolution of 1 m over a maximum distance of 12 km with a precision of 0.3 °C. To identify the actual precision and accuracy of the instrument, extensive system investigations on the measurement settings, such as measurement time, spatial resolution and sampling interval, on the effective range and the noise behaviour due to increasing distance, attenuation and temperature were executed. For investigations according to the practical applicability measurements along a conventional communication fibre performed and the hardening process of a concrete beam with a subsequent load test was monitored.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Symbolverzeichnis	XV
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Verteilte faseroptische Sensoren	2
1.2 Ziele und Gliederung der Arbeit	3
2 Überblick über die verteilte Faseroptik: Grundlagen und Instrumente	5
2.1 Grundlagen verteilter Faseroptik	5
2.1.1 Rayleigh-Streuung	6
2.1.2 Brillouin-Streuung	7
2.1.3 Raman-Streuung	10
2.2 Faseroptische Messsysteme	11
2.2.1 Optical Time Domain Reflectometer	11
2.2.2 Fibris Terre fTB 2025	12
2.2.3 AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance	13
3 Verteilte Glasfasersensorik auf Basis der Raman-Streuung	16
3.1 Historische Entwicklung	16
3.2 Physikalische Grundlagen	17
3.2.1 Placzek-Modell	17
3.2.2 Quantenelektronisches Modell	18
3.2.3 Kalibrierung differentieller Dämpfungseinflüsse	20
3.2.4 Gain und Offset-Kalibrierung	24

3.3	Herstellervergleich	25
3.4	Realisierte Projekte	27
3.4.1	Anwendung zur Branddetektion	27
3.4.2	Anwendung zur Leckageortung	29
4	Systemuntersuchung des AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance	34
4.1	Untersuchungsequipment	34
4.1.1	Verwendete Messfasern und Patchcords	34
4.1.2	Memmert Kühlbrutschrank	35
4.2	Software - DTS Configurator	35
4.2.1	Messeinstellungen	36
4.2.2	Sensoreinstellungen	37
4.2.3	Ergebnisse der Kalibrierung	40
4.3	Untersuchung der Systemeinstellungen und deren Auswirkung auf die Standardabweichung und Genauigkeit	41
4.3.1	Erreichbare Standardabweichung	42
4.3.2	Räumliche Auflösung und Messzeit	51
4.3.3	Single-Ended versus Dual-Ended Modus	53
4.3.4	Refraktionsindex	54
4.3.5	Samplingintervall	57
4.3.6	Start-Wert	58
4.4	Untersuchung der effektiven Reichweite	59
4.5	Untersuchung des Rauschverhaltens	62
4.5.1	Rauschverhalten bei zunehmender Distanz	62
4.5.2	Rauschverhalten bei zunehmender Dämpfung	67
4.5.3	Rauschverhalten bei zunehmender Temperatur	70
5	Messungen entlang einer realen LWL-Schleife des ZID an der TU Graz	75
5.1	Versuchsdurchführung	75
5.2	Auswertung und Ergebnisse	77
6	Instrumentierung und Messung eines Betonbalken	85
6.1	Instrumentierung des Betonbalkens	85

6.2	Langzeitbeobachtung des Aushärtevorgangs	88
6.2.1	Versuchsdurchführung	88
6.2.2	Auswertung und Ergebnisse	90
6.3	Belastungsversuche	100
6.3.1	Versuchsdurchführung	100
6.3.2	Auswertung und Ergebnisse	102
7	Resümee und Ausblick	104

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung der Rückstreuungskomponenten in optischen Fasern . . .	6
2.2	Schematische Darstellung des Messaufbaus mit separater Temperaturfaser	9
2.3	Schematische Darstellung des Messaufbaus mit loser Dehnungsfaser	9
2.4	Schematische Darstellung des Messaufbaus mittels Brillouin- und Raman-Messeinheit	9
2.5	OTDR-Dämpfungsprofil entlang einer Messfaser	11
2.6	Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Raman-DTS-Messsystems . .	14
2.7	Räumliche Auflösung eines Raman-DTS-Messsystems	14
3.1	Schematische Darstellung der Entstehung von Stokes- und Anti-Stokes-Rückstreuung	18
3.2	Schematische Darstellung der Neigung des Temperaturprofils verursacht durch differentielle Dämpfungen	21
3.3	Schematische Darstellung der Korrektur der Neigung der Temperaturmesskurve verursacht durch differentielle Dämpfungen	21
3.4	Schematische Darstellung eines Temperaturprofils beeinflusst durch lokale und differentielle Dämpfungen	22
3.5	Aufbau und Funktionsweise der Dual-ended Methode	23
3.6	Kompensation differentieller Dämpfungen durch Bildung des geometrischen Mittels	24
3.7	Schematische Darstellung des Gain-Faktors	25
3.8	Schematische Darstellung des Offsets	25
3.9	Response Screen der Brandmeldezentrale im Falle eines Brandszenarios	28
3.10	Temperatur im Januar und Juli eines 60 m hohen intakten Damms und eines Damms mit Leckage	30
3.11	Einbau der faseroptischen Sensoren bei der Sanierung des Mittleren Isarkanals 1996 und des Midlands Damms auf Mauritius sowie der Verlauf des faseroptischen Sensorkabel entlang des Merowe Damms am Nil	31
3.12	Temperatureffekte bei einer Pipeline Leckage	32

3.13	Schematische Darstellung des Ölreservoirs und Einbau des Sensorkabels	33
4.1	Kühlbrutschrank IPC 400 Memmert	35
4.2	Eingabe der Messeinstellungen im Konfigurationseditor	37
4.3	Ablauf der Kalibrierung der Sensoreinstellungen	37
4.4	Eingabe des Refraktionsindex und der Länge einer Sektion im Sensor Sektionseditor	38
4.5	Festlegen der Sensorlänge und ggf. Eingabe des Skalierungsfaktors im Sensor Ka- librierungsassistent	39
4.6	Festlegen zweier Temperaturbereiche zur Gain und Offset-Berechnung im Sensor Kalibrierungsassistent	39
4.7	Festlegen des Temperaturbereichs zur Berechnung der Attenuation Ratio und des Offsets im Sensor Kalibrierungsassistent	40
4.8	Sensoreinstellungen einer Gain und Offset-Kalibrierung und einer Offset-Kalibrierung	40
4.9	Stationarität stochastischer Signale über die Distanz	42
4.10	Standardabweichung von Single-Ended und Dual-Ended Messungen bei einer Mess- zeit von 60 s und einer räumlichen Auflösung von 2 m nach Kauf des Instruments im Vergleich zur Herstellerangabe	43
4.11	Standardabweichung von Single-Ended und Dual-Ended Messungen bei einer Mess- zeit von 60 s und einer räumlichen Auflösung von 2 m vor der Reinigung im Ver- gleich zur Standardabweichung nach dem Kauf und der Herstellerangabe	44
4.12	Steckerbilder von Kanal #1 und Kanal #2 vor und nach der Reinigung	45
4.13	Kalibrierungsmessungen von Kanal #1 und Kanal #2	46
4.14	Zoom der Temperatur- und Dämpfungskurve über die ersten 200 m der Faser für Kanal #1 und Kanal #2 zur Fehleranalyse dargestellt im DTS Configurator . . .	47
4.15	Standardabweichung der Fehleranalyse von Kanal #1 und #2	47
4.16	Steckerbilder von Kanal #1 und Kanal #2 vor und nach der Reparatur	48
4.17	Zoom der Temperatur- und Dämpfungskurve über die ersten 200 m der Faser für Kanal #1 und Kanal #2 im Rahmen des Eingangstests nach der Reparatur dargestellt im DTS Configurator	49
4.18	Standardabweichung von Single-Ended Messungen von Kanal #1 und Kanal #2 bei einer Messzeit von 60 s und einer räumlichen Auflösung von 2 m nach der Reparatur im Vergleich zur Herstellerangabe	49

4.19 Standardabweichung von Single-Ended Messungen von Kanal #1 unmittelbar nach dem Eingangstest im Vergleich zur im Rahmen des Eingangstest erreichten Standardabweichung	50
4.20 Steckerbilder von Kanal #1 nach der Reparatur und unmittelbar nach dem Eingangstest	50
4.21 Standardabweichung bei unterschiedlicher Messzeit und räumlicher Auflösung . .	52
4.22 Gegenüberstellung der Standardabweichungen bei einer Messeinstellung von 60 s und 1 m, einer Messeinstellung von 60 s und 2 m und der Mittelung der Messung mit 60 s und 1 m über 2 m	52
4.23 Gegenüberstellung der Standardabweichungen bei einer Messeinstellung von 60 s und 2 m, einer Messeinstellung von 600 s und 2 m und der Mittelung der Messung mit 60 s und 2 m über 600 s	53
4.24 Standardabweichung bei Messeinstellung Single-Ended und Dual-Ended	54
4.25 Vergleich zwischen dem gerundeten Refraktionsindex ($n = 1.47$) und nicht gerundeten ($n = 1.4682$) im Single-Ended und Dual-Ended Modus	56
4.26 Zoom des Faserendes des Vergleichs zwischen dem gerundeten Refraktionsindex ($n = 1.47$) und nicht gerundet ($n = 1.4682$) im Single-Ended und Dual-Ended Modus	56
4.27 Vergleich der Temperaturkurven und empirischen Standardabweichungen bei unterschiedlichen Samplingintervallen	58
4.28 Vergleich der Temperaturkurven und empirischen Standardabweichungen bei einem Startwert von 0 m und -50 m	59
4.29 Untersuchung der effektiven Reichweite	60
4.30 Untersuchung der effektiven Reichweite mit umgekehrter Faserzusammensetzung	61
4.31 Rauschverhalten bei einer Faserlänge von 2 km im Single-Ended und Dual-Ended Modus	63
4.32 Rauschverhalten bei einer Faserlänge von 4 km im Single-Ended und Dual-Ended Modus	64
4.33 Rauschverhalten bei einer Faserlänge von 10 km im Single-Ended und Dual-Ended Modus	65
4.34 Rauschverhalten unter Verwendung eines 5 dB Dämpfungsgliedes	68
4.35 Rauschverhalten bei Vorhandensein einer Steckverbindung bei 2 km	68
4.36 Teilausfälle bei 5 Wiederholungsmessungen mit einem 5 dB Dämpfungsglied . . .	69

4.37	Programmiertes Solltemperaturprofil und tatsächliches Temperaturprofil des Memmert Kühlbrutschrankes dargestellt in Celisius	70
4.38	Versuchsaufbau zur Untersuchung des Rauschens mit zunehmender Temperatur	71
4.39	Vergleich zwischen dem APS-Temperaturprofil und dem Temperaturprofil eines PT 100 Sensors	72
4.40	Darstellung der APS-Temperaturkurve gegenüber der PT 100-Temperaturkurve	73
4.41	Differenz zwischen der APS-Temperaturkurve und der PT 100-Temperaturkurve	73
5.1	Leitungsplan der LWL-Schleife des ZID	76
5.2	Leitungsverlauf der LWL-Schleife dargestellt in Google Earth	77
5.3	Grobe Einteilung des Verlaufs der LWL-Schleife	78
5.4	Signalverhalten von Kategorie 1	79
5.5	Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 1 entlang der LWL-Schleife	79
5.6	Signalverhalten von Kategorie 2	79
5.7	Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 2 entlang der LWL-Schleife	80
5.8	Signalverhalten von Kategorie 3	80
5.9	Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 3 entlang der LWL-Schleife	81
5.10	Signalverhalten von Kategorie 4	81
5.11	Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 4 entlang der LWL-Schleife	82
5.12	Signalverhalten von Kategorie 5	82
5.13	Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 5 entlang der LWL-Schleife	83
5.14	Übersicht der Zuordnung aller Kategorien entlang der LWL-Schleife	84
6.1	Einbau der Temperatur- und Dehnungssensoren an der unteren Bewehrungsschicht des Betonbalken	86
6.2	Stirnseitige Schalung mit durchgezogenen Sensorkabeln und Installation der Dehnungssensoren BRUsens V9 und BRUsens V3 an den obere Bewehrungseisen	87
6.3	Messquerschnitt der eingebauten Sensoren	87
6.4	Aufbau der Instrumente in der Messtation und die von der Messtation zu den Sensorkabeln am Betonbalken verlegte Zuleitung	88
6.5	Schematische Darstellung der Messschleife des APS und der Messschleife des FT	88
6.6	Ausschalen des Betonbalkens, Befestigung der Faserenden an der Oberfläche des Betonbalkens und auf zwei Stehelementen umgehobener Betonbalken	89

6.7	Temperaturverlauf der Sensoren BRUsens V9-oben, BRUsens V3-oben, BRUsens V3-B, BRUsens Temp-B über die Zeit	90
6.8	Gegenüberstellung der Temperatursensoren BRUsens V3-A, BRUsens V3-B, BRUsens Temp-A und BRUsens Temp-B	92
6.9	Gegenüberstellung der Dehnungssensoren BRUsens V9-unten, BRUsens V9-oben, BRUsens V3-oben und BRUsens V3-unten	93
6.10	Vorspannen des Betonbalkens für das anschließende Umheben	93
6.11	Gegenüberstellung des zu kompensierenden Signals des Dehnungssensors BRUsens V9-unten und der Temperatursignale der BRUsens V3-A, BRUsens V3-B, BRUsens Temp-A und BRUsens Temp-B Sensoren	94
6.12	Gegenüberstellung der Temperaturkompensation des BRUsens V9-unten Signals basierend auf der Raman- und der Brillouin-Rückstreuung	97
6.13	Differenz zwischen der Temperaturkompensation basierend auf der Raman- und der Brillouin-Rückstreuung in $\mu\epsilon$	98
6.14	Histogramme der Differenzen zwischen der Temperaturkompensation basierend auf der Raman- und der Brillouin-Rückstreuung	99
6.15	Betonbalken unter dem 4-Punkt-Prüfgerüst, die auf den Betonbalken ausgeübten Kräfte und die Messstation unmittelbar neben dem Betonbalken	100
6.16	Belastungsprofil für Zustand I und Zustand II	101
6.17	Messschleife des APS für den Belastungsversuch	101
6.18	Temperaturverlauf des Dehnungssensors BRUsens V9-oben und der Temperatursensoren BRUsens V3-B und BRUsens Temp-B während des Belastungsversuchs .	102
6.19	Anzeige eines Faserbruchs am Display des APS	102
6.20	Messsignal nach dem Faserriss dargestellt über die Länge der Messschleife	103

Tabellenverzeichnis

3.1	Herstellervergleich basierend auf SM und MM Instrumenten	26
3.2	Herstellervergleich von SM Instrumenten basierend auf der maximalen Reichweite	26
4.1	Messeinstellungen zur Untersuchung der erreichbaren Standardabweichung	43
4.2	Messeinstellungen des Testzykluses zur Fehleranalyse	46
4.3	Messeinstellungen des Eingangstests nach der Reparatur	48
4.4	Messeinstellungen der Untersuchung der räumlichen Auflösung und Messzeit . . .	51
4.5	Messeinstellungen der Untersuchung des Refraktionsindexes	55
4.6	Messeinstellungen der Untersuchung des Samplingintervalls	57
4.7	Messeinstellungen zur Untersuchung des Einflusses eines veränderten Start-Wertes	58
4.8	Messeinstellungen der Untersuchung der effektiven Reichweite	59
4.9	Messeinstellungen der Untersuchung des Rauschverhaltens mit zunehmender Distanz	63
4.10	Messeinstellungen der Untersuchung des Rauschverhaltens mit zunehmender Dämpfung	67
4.11	Messeinstellungen der Untersuchung des Rauschverhaltens mit zunehmender Temperatur	71
5.1	Messeinstellungen der Messung der LWL-Schleife des ZID	76
6.1	Messeinstellungen der Dauermessung zur Beobachtung des Aushärtvorgangs des Betonbalkens	89
6.2	Messeinstellungen des Belastungsversuches	101

Abkürzungsverzeichnis

APC	Angled Physical Contact
APS	AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance
BOFDA	Brillouin Optical Frequency Domain Analysis
BOTDA	Brillouin Optical Time Domain Analysis
BTZ	Bautechnikzentrum der TU Graz
DTS	Distributed Temperature Sensing
EC	European Connector
FC	Fibre Connector
FMT	Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, TU Graz
FT	Fibris Terre fTB 2025
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
IGMS	Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz
LHD	Linear Heat Detection
LWL	Lichtwellenleiter
MM	Multi-Mode
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
SBS	stimulierte Brillouin-Streuung
SHM	Structural Health Monitoring

SM	Single-Mode
SpBS	spontane Brillouin-Streuung
TUG	Technische Universität Graz
ZID	Zentraler Informatikdienst der TU Graz

Symbolverzeichnis

α	Polarisierbarkeit
α_{AS}	Faserdämpfung der Anti-Stokes-Welle
α_S	Faserdämpfung der Stokes-Welle
c	Lichtgeschwindigkeit im Medium
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
C_ϵ	Dehnungskoeffizient
C_T	Temperaturkoeffizient
$\Delta\epsilon$	Dehnungsänderung
Δf	Frequenzverschiebung zur Frequenz der Pumplichtwelle
Δf_b	Änderung des Brillouinfrequenzshifts
Δf_T	Änderung des Brillouinfrequenzshifts aufgrund von Temperaturänderungen
Δl	Längenänderung
$\Delta\lambda$	Wellenlängenverschiebung zur Wellenlänge der Pumplichtwelle
ΔT	Temperaturänderung
ϵ	Dehnung
ϵ_0	Dehnung in Bezug auf die Referenzbrillouinfrequenz
f_{AS}	Frequenz der Anti-Stokes-Welle
f_b	Brillouinfrequenzshift
f_{b0}	Referenzbrillouinfrequenz
f_P	Frequenz der Pumplichtwelle
f_S	Frequenz der Stokes-Welle
f_T	Brillouinfrequenzshift ausschließlich auf Temperaturänderungen basierend
f_{T_0}	Referenzbrillouinfrequenz ausschließlich auf Temperaturänderungen basierend
f_V	Frequenz der harmon. Vibrationsschwingung eines Glasmoleküls
h	Planck-Konstante

I	Intensität der Rayleigh-Rückstreuung
I_{AS}	Intensität der Anit-Stokes-Rückstreuung
I_P	Intensität der Pumplichtwelle
I_S	Intensität der Stokes-Rückstreuung
k	Boltzmann-Konstante
λ_{AS}	Wellenlänge der Anti-Stokes-Welle
λ_P	Wellenlänge der Pumplichtwelle
λ_S	Wellenlänge der Stokes-Welle
L	Basislänge
n_{Kern}	Refraktionsindex des Faserkerns
\bar{n}	durchschnittliche Anzahl thermisch angeregter Phononen
ν_a	Geschwindigkeit einer thermisch angeregten Schallwelle
N	Anzahl der Streuzentren
q	verallg. Koordinate der harmon. Vibrationsschwingung eines Glasmoleküls
q_0	Ruheabstand der harmon. Vibrationsschwingung eines Glasmoleküls
\hat{q}	Amplitude der harmon. Vibrationsschwingung eines Glasmoleküls
$R(z, T)$	Verhältnis von Anti-Stokes- und Stokes-Intensität
$R(T_{Ref})$	Referenzverhältnis von Anti-Stokes- und Stokes-Intensität
$s_{\Delta\epsilon}$	empirische Standardabweichung der Dehnungsänderung
$\sigma_{\Delta T}$	Standardabweichung der Temperaturänderung
σ_{f_b}	Standardabweichung des Brillouinfrequenzshifts
σ_R	Raman-Wirkungsquerschnitt für Siliziumglas
t	Zeit
$T(z)$	Absoluttemperatur an Position z
T_{Ref}	Referenztemperatur
Ω	Frequenz eines Phonons
z	Distanz vom Faserbeginn zum Streuzentrum

1 Einleitung und Motivation

Ob in der Telekommunikation, der Ölindustrie, beim Militär oder in der Medizin, Glasfasersensorik findet in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung. Vor allem aber im Bauwesen - speziell im Bereich des Structural Health Monitoring (SHM) zur Erkennung von Schäden und Ermüdungen an Baustrukturen, der Branddetektion in Gebäuden oder Tunneln, der Leckageortung von Pipelines oder zur Feststellung topographischer Veränderungen (z.B. Hangrutschungen) - kommt die faseroptische Sensorik aufgrund zahlreicher Vorteile im Vergleich zu traditionellen Sensoren immer häufiger zum Einsatz. Eine Auswahl spezifischer Eigenschaften und Vorteile faseroptischer Sensoren aus López-Higuera [2002] und Bernhard [2014] ist nachfolgend angeführt:

- Die Fertigung aus dielektrischem Material verleiht den faseroptischen Sensoren im Vergleich zu konventionellen Sensoren die Eigenschaft gegenüber elektromagnetischen, elektrischen und chemischen Einflüssen immun zu sein. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass lediglich die Lichtquelle und die Auswerteeinheit einer Spannungsversorgung bedürfen und diese, aufgrund der hervorragenden Ausbreitungseigenschaften der optischen Faser, weit vom Messobjekt entfernt sein können. Dies macht faseroptische Sensoren daher vor allem für Anwendungen in korrosiven, gefährlichen oder explosiven Gebieten ideal.
- Infolge der geringen Dämpfungen innerhalb des Faserkerns bietet sich zum einen die Möglichkeit, entlang der Faser eine Vielzahl von Sensoren anzubringen, die simultan gemessen werden, oder zum anderen die Faser selbst, im Sinne der verteilten faseroptischen Sensorik, als sensitives Messelement zu verwenden.
- Die geringe Größe und das geringe Gewicht ermöglichen einen einfachen Einbau der Sensorfasern am bzw. im Messobjekt (z.B. durch Einbetonieren). Damit können auch im Inneren des Messobjektes Messungen vorgenommen werden, ohne dass das Verhalten des Objektes auf äußere Einflüsse wesentlich beeinflusst wird.

- Sensitivität, Messbereich und Messauflösung sind im Vergleich zu konventionellen Sensoren wesentlich höher.
- Aufgrund ihres hohen Schmelzpunktes (ca. 2000 °C) halten Glasfasern extremen Temperaturen stand. Abhängig von der Beschichtung der Faser (Acrylate, Ormocer, Aluminium, Gold, etc.) beläuft sich der messbare Temperaturbereich auf minimal -270 °C bis maximal 700 °C.

Grundsätzlich wird in der Faseroptik zwischen Punktsensoren, quasi-verteilten Sensoren und verteilten Sensoren unterschieden. Im Zuge dieser Arbeit wird jedoch ausschließlich auf die verteilten faseroptischen Sensoren eingegangen.

1.1 Verteilte faseroptische Sensoren

Verteilte faseroptische Sensoren besitzen im Vergleich zu Punktsensoren und quasi-verteilten Sensoren die Eigenschaft, dass jede Position der Faser auf äußere Einflüsse sensitiv ist. Vereinfacht ausgedrückt, erhält man durch verteilte faseroptische Messungen eine lückenlose Reihe von Punktmessungen entlang der Faser mit einer entsprechenden räumlichen Auflösung. Die Faser kann demzufolge über ihre gesamte Länge als sensitives Element angesehen werden und durch eine einzige Messfaser können bis zu mehrere 10000 Messstellen realisiert werden.

Im Wesentlichen wird bei verteilten Sensoren zwischen Sensoren, die auf Dehnung und Temperatur, und Sensoren, die ausschließlich auf Temperatur sensitiv sind, unterschieden. Dabei wird der Temperatur in vielerlei Hinsicht großes Interesse beigemessen und es handelt sich um den am häufigsten gemessenen physikalischen Parameter. Auf der einen Seite können Temperaturänderungen oft ein Indikator für die Änderungen anderer physikalischer Parameter sein, auf der anderen Seite ist die Temperatur auch eine störende und beeinflussende Größe bei der Erfassung geometrischer Parameter, wie der Dehnung. Jede Änderung der Temperatur hat Auswirkungen auf den erfassten Dehnungswert, genauer auf die Länge des optischen Pfades, den das in die Faser eingekoppelte Licht zurücklegt, und kann, von rein durch mechanische Einflüsse entstandene Dehnungen, nicht unterschieden werden. Wirkt nämlich auf eine Messfaser kein mechanischer Einfluss, sondern ist diese nur einer Temperaturänderung ausgesetzt, erzeugt dies eine scheinbare Dehnung, da sowohl mechanische Dehnungen als auch Temperaturänderungen denselben Einfluss auf die Länge des optischen Pfades haben. Um eine temperaturbedingte scheinbare Dehnung von einer tatsächlichen mechanischen Dehnung zu unterscheiden, ist daher eine simultane Erfassung

der Temperatur notwendig. (vgl. Measures [2001] und Krohn et al. [2014])

Die verteilte Glasfasersensorik bietet hierbei gleich drei Messverfahren zur Erfassung von Dehnung und Temperatur. Zum einen die Rayleigh- und die Brillouin-Rückstreuung, welche sowohl gegenüber Temperatur- als auch Dehnungsänderungen variant sind, und zum anderen die Raman-Rückstreuung, welche ausschließlich gegenüber Temperaturänderungen sensitiv ist. Die Methode der Raman-Rückstreuung bietet gegenüber der Brillouin-Rückstreuung jedoch einen wesentlichen Vorteil. Während für eine reine Temperaturerfassung mittels der Brillouin-Rückstreuung neben einer vorgespannten Faser, welche auf Dehnungs- und Temperaturänderungen sensitiv ist, auch eine lose Faser, die ausschließlich auf Temperaturänderungen reagiert, notwendig ist, kann für die Temperaturerfassung mittels Raman-Rückstreuung die bereits zur Dehnungsmessung verwendete vorgespannte Faser genutzt werden (siehe Kapitel 2.1.2).

Neben der Temperaturkompensation findet die verteilte faseroptische Temperaturmessung auch in Bereichen der Branddetektion (z.B. in Gebäuden, Tunnel, etc.), der Leckageortung von Pipelines oder der Beobachtung des Aushärtvorgangs von Beton Anwendung (Kapitel 6), um nur einige der Anwendungsgebiete zu nennen.

1.2 Ziele und Gliederung der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist zum einen die Untersuchung des realen Präzisions- und Genauigkeitsbudgets der verteilten faseroptischen Temperaturmessung und zum anderen die Erforschung der Anwendbarkeit zur Lösung geodätischer und faseroptischer Problemstellungen unter Verwendung des auf der Raman-Rückstreuung basierenden AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance (APS). Dafür wurden, hinsichtlich der Auswirkungen der Systemeinstellungen auf die Messpräzision, Laboruntersuchungen durchgeführt sowie die Anwendbarkeit in der Praxis anhand zweier Feldexperimente getestet.

Ein kurzer Überblick über die Arten der verteilten faseroptischen Sensorik wird in Kapitel 2 gegeben. Neben der überblicksmäßigen Beschreibung des Messprinzips wird auch eine Auswahl von Messgeräten, die im Zuge dieser Arbeit Anwendung fanden, angeführt und deren Funktionsprinzip und Spezifikationen erläutert.

In Kapitel 3 wird umfassend auf die historische Entwicklung, die physikalischen Grundlagen, derzeit am Markt verfügbare Instrumente und aktuelle Einsatzgebiete der verteilten faseroptischen Temperaturerfassung basierend auf der Raman-Rückstreuung eingegangen.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit den umfangreichen Systemuntersuchungen des im Zuge der Arbeit verwendeten APS. Diese umfassen, neben der Untersuchung der Systemeinstellungen und deren Auswirkungen auf die Messpräzision, die Ermittlung der effektiven Reichweite des Messgerätes, die Untersuchung des Rauschverhaltens bei zunehmender Distanz, Dämpfung und Temperatur sowie die Untersuchung der Einflüsse von verschmutzten bzw. defekten Kanälen des Instruments.

Um die Anwendbarkeit der verteilten faseroptischen Temperaturmessung in der Praxis verifizieren zu können, wurden zwei Praxisanwendungen im Zuge der Arbeit durchgeführt, die in Kapitel 5 und 6 erläutert werden. Beim ersten Praxisversuch handelt es sich um die Messung entlang eines realen Lichtwellenleiters (LWL) des Zentralen Informatikdienstes (ZID) der Technischen Universität Graz (TUG), womit sich die Möglichkeit bot, das Verhalten bei der Messung entlang einer kommerziellen Kommunikationsfaser im Vergleich zu den herkömmlich verwendeten speziellen Messfasern zu untersuchen. Der zweite Praxisversuch fand am Bautechnikzentrum (BTZ) der TUG in Zusammenarbeit mit dem Institut für Felsmechanik und Tunnelbau (FMT) statt und gliederte sich in zwei Teilversuche. Zum einen wurde die Temperatur während des Betonier- und Aushärtevorgangs eines Betonbalkens erfasst, um die Möglichkeit einer Temperaturkompensation bei dehnungs- und temperaturabhängigen Messsystemen zu ermitteln, zum anderen wurde im Zuge eines Belastungsversuchs am Betonbalken die Temperaturmessung auf Basis der Raman-Rückstreuung auf Dehnungsunabhängigkeit geprüft.

2 Überblick über die verteilte Faseroptik: Grundlagen und Instrumente

2.1 Grundlagen verteilter Faseroptik

Wird ein monochromatischer Lichtstrahl, eine sog. Pumplichtwelle, mit der Frequenz f_P in den Kern einer Glasfaser eingekoppelt, ist dieser auf seinem Weg durch die Faser Dämpfungs- und Streuprozessen, wie der Rayleigh-, Brillouin- oder Raman-Streuung, unterworfen. Solche Dämpfungs- und Streuprozesse resultieren aus physikalischen Interaktionen der Lichtphotonen mit Inhomogenitäten oder Dichtefluktuationen des Faserkerns. Diese Inhomogenitäten bzw. Dichtefluktuationen entstehen zum einen im Zuge der Herstellung und zum anderen durch auf die Faser wirkende mechanische Belastung oder Temperatureinflüsse. Abhängig davon, ob das rückgestreute Licht eine Frequenzverschiebung Δf erfährt, wird im Grundlegenden zwischen inelastischen und elastischen Streuprozessen unterschieden. Bei elastischen Streuprozessen, wie der Rayleigh-Streuung, entspricht die Frequenz des rückgestreuten Lichtes jener der einfallenden Pumplichtwelle f_P . Im Gegensatz dazu ist bei inelastischen Streuprozessen die Frequenz der rückgestreuten Lichtwelle in Bezug auf die Pumplichtwelle verschoben. Die Verschiebung kann dabei sowohl zu kleineren Frequenzen $f_S = f_P - \Delta f$ bzw. längeren Wellenlängen $\lambda_S = \lambda_P + \Delta\lambda$ (Stokes-Komponente) als auch höheren Frequenzen $f_{AS} = f_P + \Delta f$ bzw. kürzeren Wellenlängen $\lambda_{AS} = \lambda_P - \Delta\lambda$ (Anti-Stokes-Komponente) auftreten. (vgl. Engelbrecht [2014], Krohn et al. [2014] und Kechavarzi et al. [2016])

Bedeutend ist, dass unabhängig davon mit welcher Wellenlänge Licht in eine optische Faser eingekoppelt wird, dieses allen oben genannten Streuprozessen (Rayleigh-, Brillouin- und Raman-Streuung) unterworfen ist, die sich schlussendlich zum in Abb. 2.1 dargestellten Rückstreuungsspektrum überlagern.

In den nachfolgenden Kapiteln wird nun ein Überblick über die physikalischen Grundlagen und Anwendungsbereiche der Rayleigh-, Brillouin-, und Raman-Streuung gegeben.

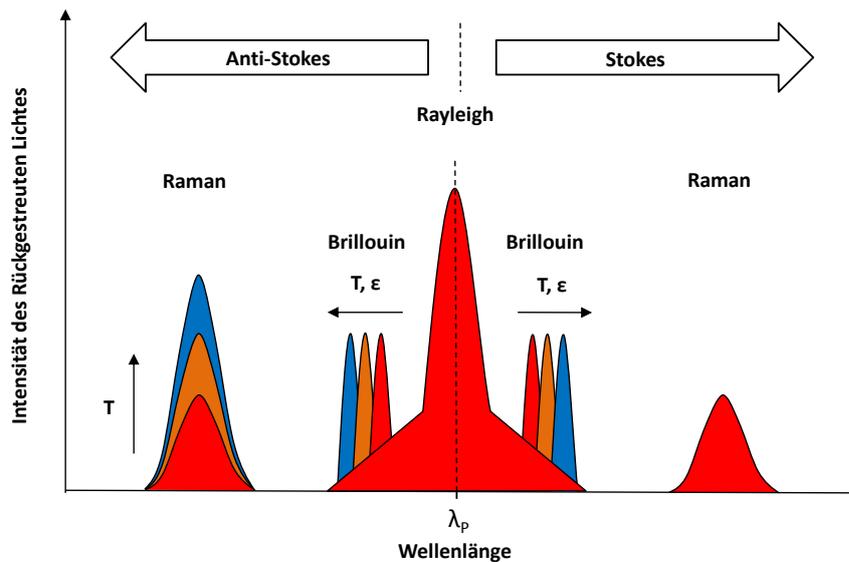


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Rückstreungskomponenten in optischen Fasern, wobei in rot, orange und blau Spektren bei unterschiedlichen Dehnungen und Temperaturen darstellen - maßstäblich nicht korrekt dargestellt (nach [Krohn et al., 2014, S.95])

2.1.1 Rayleigh-Streuung

Nach Thévenaz und Berghmans [2011] stellt die Rayleigh-Streuung mit 85% den Hauptanteil des rückgestreuten Lichtes dar und ist damit für einen großen Anteil des Signalverlustes verantwortlich, während nur etwa 15% auf die Raman- und Brillouin-Streuung zurückfallen. Auch hinsichtlich der Intensität ist die Rayleigh-Streuung gegenüber der Raman- bzw. Brillouin-Streuung um ein Vielfaches überlegen.

Rayleigh-Streuung entsteht, wenn Lichtphotonen der eingekoppelten Pumplichtwelle mit zufälligen Inhomogenitäten im Glasfaserkern, die mikroskopische Änderungen des Refraktionsindex zur Folge haben, kollidieren. Solche zufälligen Inhomogenitäten können Dichteveränderungen, Verunreinigungen, Fluktuation in der Zusammensetzung oder strukturelle Variationen sein, die im Zuge des Herstellungsprozesses der optischen Faser entstehen und in der Faser sozusagen "eingefroren" sind. Durch die Ortsgebundenheit der Streuzentren wird zwischen diesen und den Lichtphotonen bei einer Kollision keine Energie übertragen. Die Wellenlänge des rückgestreuten Lichtes entspricht daher jener der Pumplichtwelle. Eine Grundvoraussetzung für die Rayleigh-Streuung besteht darin, dass die Streuzentren (Inhomogenitäten) um etwa $1/10$ kleiner sind als die Wellenlänge der eingekoppelten Pumplichtwelle λ_p . Die Intensität des gestreuten Lichtes I ergibt sich durch die Rayleigh-Formel (entnommen aus [Krohn et al., 2014, S.89]), wobei I_p die Intensität der Pumplichtwelle, N die Anzahl der Streuzentren, α die Polarisierbarkeit und z den Abstand zum Streuzentrum darstellen.

$$I = I_P \frac{8\pi^4 N \alpha^2}{\lambda_P^4 z^2} (1 + \cos^2 \theta) \quad (2.1)$$

Durch die indirekte Proportionalität zu λ^4 nimmt die Intensität der Rayleigh-Streuung mit abnehmender Wellenlänge zu. Demzufolge werden kürzere Wellenlängen stärker gestreut als längere Wellenlängen. Bei einer Wellenlänge von 1550 nm beträgt der durch die Rayleigh-Streuung bedingte Signalverlust 0.15 dB/km, bei einer Wellenlänge von 1300 nm in etwa 0.3 dB/km (Werte entnommen aus Kechavarzi et al. [2016]).

Das Prinzip der Rayleigh-Rückstreuung wird z.B. in der Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) verwendet, um Dämpfungen und Verluste entlang einer Faser zu messen sowie Ort und Amplitude von Dämpfungen, die in Zusammenhang mit speziellen Ereignissen, wie Konnektoren, Spleißen oder Faserbrüchen, stehen, zu analysieren. (Kechavarzi et al. [2016])

2.1.2 Brillouin-Streuung

Bei der Brillouin-Streuung kann im Wesentlichen zwischen spontaner Brillouin-Streuung (spontaneous Brillouin scattering, SpBS) und stimulierter Brillouin-Streuung (stimulated Brillouin scattering, SBS) unterschieden werden (vgl. Engelbrecht [2014] und Kechavarzi et al. [2016]), wobei die im Folgenden angeführten Formeln und Werte ausschließlich Kechavarzi et al. [2016] entnommen wurden. Die SpBS entsteht wenn Lichtwellen an thermisch angeregten Schallwellen, die sich mit einer Geschwindigkeit ν_a durch den Faserkern ausbreiten und dadurch das Refraktionsindexprofil der Faser modulieren, gestreut werden. Die Frequenz bzw. die Wellenlänge des rückgestreuten Lichtes ist, abhängig von der Geschwindigkeit der Schallwelle ν_a , zur Frequenz der Pumplichtwelle f_P um f_b verschoben. Diese Verschiebung wird als sogenannter Brillouin-frequenzshift bezeichnet und ist proportional zur Geschwindigkeit der Schallwelle ν_a und dem Refraktionsindex des Faserkerns n_{Kern} .

$$f_b = \frac{2n\nu_a}{\lambda_P} \quad (2.2)$$

Abhängig von der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle (in oder gegen die Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle) resultieren für die Pumplichtwelle mit der Frequenz f_P eine Stokes-Streuung mit niedrigerer Frequenz $f_S = f_P - f_b$ und eine Anti-Stokes-Streuung mit höherer Frequenz $f_S = f_P + f_b$ als die Pumplichtfrequenz (siehe Abb. 2.1).

Ursache für Änderungen in der Schallwellengeschwindigkeit und demzufolge für den Brillouinfrequenzshift f_b sind geringe Dichteänderungen im Glasfaserkern, die auf von außen auf die Faser einwirkende Dehnungs- und Temperatureinflüsse zurückzuführen sind. Tritt eine longitudinale Dehnungsänderung $\Delta\epsilon = (\epsilon - \epsilon_0)$ der Faser auf, ändert sich der Brillouinfrequenzshift f_b linear mit der auftretenden Dehnungsänderung $\Delta\epsilon$.

$$\begin{aligned} f_b &= f_{b0} + C_\epsilon \Delta\epsilon \\ \Delta f_b &= C_\epsilon \Delta\epsilon \end{aligned} \tag{2.3}$$

Die Variable C_ϵ beschreibt dabei den Dehnungskoeffizienten, ϵ die gegenwärtig auftretende Dehnung und ϵ_0 die Dehnung bei der Referenzbrillouinfrequenz f_{b0} . Als Dehnung ϵ ist dabei die Längenänderung Δl über eine Basislänge L zu verstehen und kann daher sowohl ein positives als auch negatives Vorzeichen besitzen. Bei einer Wellenlänge von 1550 nm der eingekoppelten Pumplichtwelle, die üblicherweise als Referenzbrillouinfrequenz f_{b0} bezeichnet wird, ist die rückgestreute Frequenz um ca. 10-11 GHz zur Pumpwellenfrequenz f_P verschoben.

Unter nicht isothermen Bedingungen steht der Brillouinfrequenzshift nicht nur in linearer Proportionalität zu Dehnungsänderungen $\Delta\epsilon$, sondern ist auch linear abhängig von lokalen Temperaturänderungen ΔT .

$$\Delta f_b = C_\epsilon \Delta\epsilon + C_T \Delta T \tag{2.4}$$

Der Dehnungskoeffizient C_ϵ und der Temperaturkoeffizient C_T belaufen sich für standardmäßige Single-Mode (SM) Fasern auf ca. 500 MHz/% und ca. 1 MHz/°C. Neben einer Verschiebung in der Frequenz hat die Temperatur auch Einfluss auf die Bandbreite des rückgestreuten Lichtes.

Die Abhängigkeit des Brillouinfrequenzshifts von lokalen Dehnungs- und Temperaturänderungen macht es notwendig zwischen beiden Effekten zu unterscheiden, um eine zuverlässige Erfassung von auftretenden Dehnungen zu gewährleisten. Wie bereits in Kapitel 1 darauf hingewiesen, ist hierfür eine simultane Temperaturerfassung unerlässlich. In Anlehnung an Kechavarzi et al. [2016] bieten sich dafür im Grundlegenden drei Möglichkeiten:

1. Ein zur Dehnungsfaser benachbartes Temperaturkabel, in welchem die Faser lose geführt wird, sodass diese ausschließlich auf lokale Temperaturänderungen sensitiv ist. Der schematische Messaufbau dieser Methode ist in nachfolgender Abb. 2.2 dargestellt.



Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit separater Temperaturfaser

2. Ein Teil der Dehnungsfaser wird als lose Faser geführt und ist damit frei von Dehnungseinflüssen. Realisiert wird dies üblicherweise indem das letzte Stück der Faser in einem Hüllrohr lose geführt wird, oder dieses zu einigen Windungen aufgerollt wird. Abb. 2.3 zeigt eine schematische Darstellung dieser Methode.



Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit loser Dehnungsfaser

3. Erfassung der Temperatur mittels Distributed Temperature Sensing (DTS) basierend auf der Raman-Rückstreuung. Da die Raman-Rückstreuung ausschließlich auf Temperatur sensitiv ist und daher gegenüber Dehnungen invariant ist, bietet diese Methode den Vorteil, dass die Temperaturerfassung mit der Dehnungsfaser selbst erfolgen kann und kein zusätzliches Temperaturkabel notwendig ist. Ein Nachteil ist jedoch, dass für Brillouin-Messungen SM Fasern verwendet werden, für Raman-Messungen allerdings aufgrund ihres höheren Rückstreuungskoeffizienten vorzugsweise Multi-Mode (MM) Fasern zu verwenden sind (Näheres dazu in Kapitel 2.2.3). Die Realisierung erfolgt mittels eines optischen Schalters (Switch), wodurch abwechselnd mit der Brillouin- und Raman-Messeinheit Messungen entlang derselben Dehnungsfaser getätigt werden können (siehe Abb. 2.4).

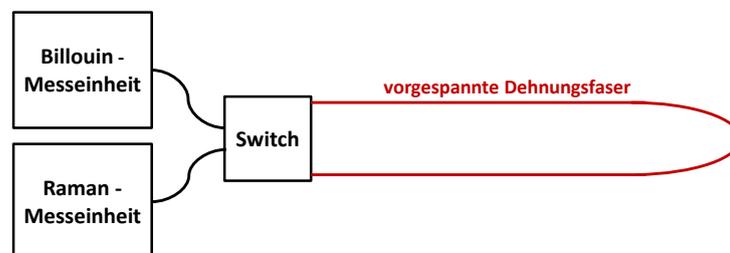


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Messaufbaus mittels Brillouin- und Raman-Messeinheit

Nur ein geringer Anteil des eingekoppelten Lichtes wird durch SpBS rückgestreut, sodass das rückgestreute Licht für faseroptische Messungen nicht immer ausreichend ist. Der Effekt der SpBS kann allerdings durch Stimulation künstlich verstärkt werden, indem neben der Pumplichtwelle ein zweites gegenläufiges, kontinuierliches optisches Wellensignal in die Faser eingekoppelt wird. Eine Stimulation tritt auf, wenn die Frequenzdifferenz der beiden eingekoppelten Lichtwellen dem Brillouinfrequenzshift entspricht (für nähere Ausführungen siehe Engelbrecht [2014]).

2.1.3 Raman-Streuung

Raman-Streuung tritt nach Measures [2001] und Krohn et al. [2014] auf, wenn sich ausbreitende Photonen mit thermisch angeregten Molekularschwingungen im Faserkern interagieren. Da es sich wie bei der Brillouin-Streuung um einen inelastischen Streuprozess handelt, resultieren eine Stokes-Komponente und eine Anti-Stokes-Komponente in einem breiten Band (im Bereich von einigen THz) um die Pumplichtwelle. Während die Stokes-Komponente gegenüber Temperaturänderungen des optischen Sensors nahezu invariant ist, ist bei der Anti-Stokes-Komponente bei auftretenden Temperaturänderungen eine Änderung der Intensität des rückgestreuten Lichts zu beobachten. Basis für die Berechnung eines Temperaturprofils entlang einer Messfaser bildet das Verhältnis der Stokes- und Anti-Stokes-Intensitäten I_S und I_{AS} in Abhängigkeit der Distanz z , wobei h die Planck-Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit im Faserkern, k die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur beschreiben. (Formel entnommen aus [Krohn et al., 2014, S.184])

$$R(z, T) = \frac{I_{AS}}{I_S} = \frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} e^{-(hc\Delta f/kT(z))} \quad (2.5)$$

Durch die Verhältnisbildung gelingt es äußere Störeinflüsse, wie Materialeigenschaften oder Fluktuationen des Inputlasers, zu kompensieren.

Neben den genannten Fehlereinflüssen treten allerdings auch wellenlängenabhängige Dämpfungseinflüsse, verursacht durch die unterschiedliche Dämpfung von Stokes- und Anti-Stokeslinien, aufgrund ihrer großen Wellenlängenunterschiede, auf, deren vollständige Kompensation durch die Verhältnisbildung nicht möglich ist. Um ein zuverlässiges Absoluttemperaturprofil der Messfaser zu bestimmen, ist daher eine Korrektur der wellenlängenabhängigen Fehlereinflüsse unumgänglich. Auf die verschiedenen Methoden der Kalibrierung wird in Kapitel 3.2.3 im Detail eingegangen.

2.2 Faseroptische Messsysteme

Das nachfolgende Kapitel gibt einen kurzen Überblick über drei Messsysteme, die auf den in Kapitel 2.1 beschriebenen Streuprozessen basieren. Die Wahl der Messsysteme beschränkt sich dabei auf jene, die für die ausgeführten Systemuntersuchungen und Praxisversuche benötigt wurden.

2.2.1 Optical Time Domain Reflectometer

Beim Optical Time Domain Reflectometer, welcher ebenfalls als OTDR bezeichnet wird, handelt es sich um ein auf der Rayleigh-Rückstreuung basierendes System zur Messung der räumlichen Verteilung von Verlusten entlang einer optischen Faserverbindung. OTDR im Sinne der Optical Time Domain Reflectometry bezeichnet allerdings in erster Linie das Funktionsprinzip des Messsystems (vgl. Thévenaz und Berghamns [2011] und Udd und Spillman [2011]). Dabei wird zum Zeitpunkt $t = 0$ ein optischer Puls mit einer Intensität I_P in die Faser eingekoppelt. Auf seinem Weg durch die Faser wird der Puls aufgrund der Rayleigh-Rückstreuung (siehe Kapitel 2.1.1) in alle Richtungen gestreut. Ein Teil des gestreuten Lichtpulses breitet sich durch den Faserkern zurück zur Quelle aus, wo die Änderung der Intensität relativ zum Inputimpuls als Funktion der Zeit mittels eines Photodetektors erfasst wird. Daraus ergibt sich schließlich ein Dämpfungsprofil entlang der gesamten Faser, wie in Abb.2.5 dargestellt.

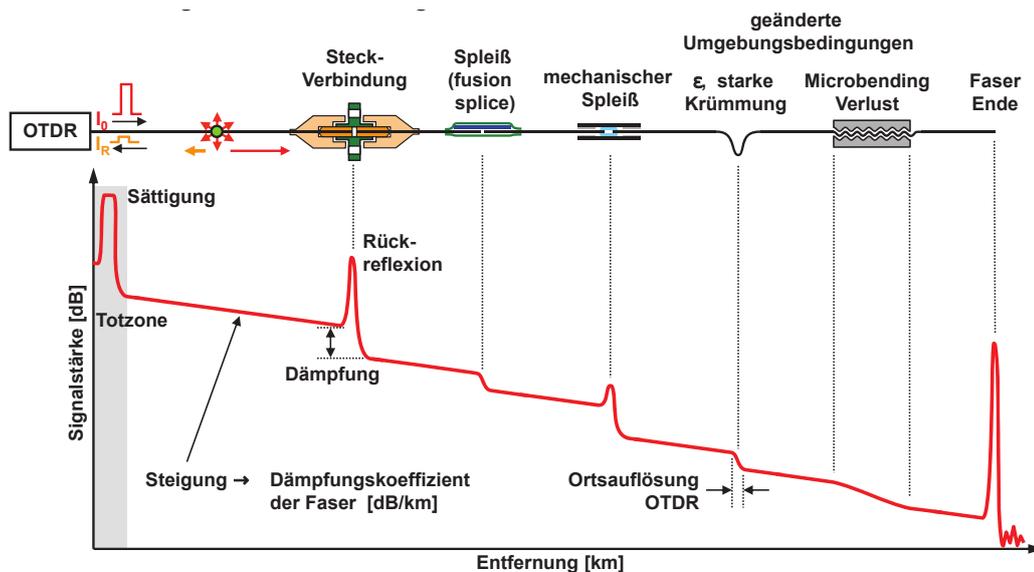


Abbildung 2.5: OTDR-Dämpfungsprofil entlang einer Messfaser (nach [Thévenaz und Berghamns, 2011, S.235] und [Udd und Spillman, 2011, S.280])

Handelt es sich um eine homogene Faser nimmt die rückgestreute Intensität mit zunehmender Distanz ab. Das Dämpfungsprofil entspricht in diesem Fall einer geraden Linie, deren Steigung den Dämpfungskoeffizienten in dB/km ausdrückt. Des Weiteren sind im Dämpfungsprofil auch Ereignisse hoher Dämpfung bzw. Reflektivität ersichtlich. Dabei kommt es durch reflektierende Ereignisse, wie Konnektoren, mechanische Spleiße oder dem Faserende, zu einer lokalen Erhöhung der Intensität des rückgestreuten Signals, während nicht-reflektierende Ereignisse, wie Fusionsspleiße oder Krümmungen der Faser, die lokale Dämpfung erhöhen und infolgedessen die Intensität des rückgestreuten Signals reduzieren. Die Lokalisierung solcher Ereignisse erfolgt auf Basis der Laufzeitmessung.

Das Verfahren der OTDR bietet zwei wesentliche Vorteile. Zum einen muss nur Zugang zu einer Seite der Faser gewährleistet sein und zum anderen kann die Messung nach der Installation der Faser vor Ort durchgeführt werden. Dadurch wird ermöglicht, die Faser auf etwaige Beschädigungen, die durch den Einbau entstanden sind, zu überprüfen.

Bei dem im Zuge der Arbeit verwendeten OTDR handelt es sich um ein *Noyes M200* Handheld OTDR der Firma AFL. Mittels des M200 OTDR können Dämpfungen mit einer Auflösung von 0.01 dB bei einer räumlichen Auflösung von 0.25 m auf ± 2 dB bestimmt werden. Der M200 OTDR ist sowohl für SM als auch MM Fasern geeignet, wobei davon die Reichweite und der Messbereich abhängen. Für SM Fasern beträgt die Reichweite 208 km und der Messbereich 26 dB. Durch MM Fasern wird die Reichweite auf 32 km und der Messbereich auf 22 dB beschränkt (Angaben wurden AFL [2011] entnommen).

2.2.2 Fibris Terre fTB 2025

Das Fibris Terre fTB 2025 (im Nachfolgenden als FT bezeichnet) stellt ein Messsystem basierend auf SBS (siehe Kapitel 2.1.2) dar. Dabei werden zwei zueinander gegenläufige Lichtwellen an den beiden Enden der Faser eingekoppelt. Treffen die beiden Lichtwellen aufeinander, erzeugt dies wortwörtlich ein Zittern der Faser, wodurch eine akustische Welle im Faserkern entsteht. Durch die Interaktion zwischen Lichtwelle und akustischer Welle, ist das rückgestreute Signal in Bezug auf die eingekoppelte Pumplichtwelle frequenzverschoben. Die Frequenzverschiebung des empfangenen Signals trägt dabei Informationen über die Geschwindigkeit der Schallwelle und demzufolge über die auf die Faser wirkenden Dehnungs- und Temperaturänderungen. (vgl. fibrisTerre Systems GmbH [2015])

Die Ortsdiskretisierung basiert auf dem sog. Frequenzmodulationsverfahren (Brillouin Optical Frequency Domain Analysis, BOFDA). Dabei erfolgt eine externe Modulation der Intensität der Pumplichtwelle, wodurch ab einem Ort z eine Übertragung der Pumpmodulation auf die Stokes-Welle entsteht. Je nach Ort z wird die Stokes-Welle dann mit einer anderen Phasenlage detektiert. Daneben gibt es noch das Pulslaufzeitverfahren (Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA), für welches auf weiterführende Literatur z.B. Engelbrecht [2014] verwiesen wird.

Das FT ist für Messungen mit dem Industriestandard entsprechenden SM Fasern, wie sie auch in der Telekommunikation verwendet werden, ausgelegt. Dehnungsänderungen können dabei mit einer Präzision von $< 2 \mu\epsilon$ und Temperaturänderungen mit einer Präzision von $< 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ erfasst werden. Die Reichweite beträgt bis zu 50 km (Angaben wurden von fibrisTerre Systems GmbH [2015] entnommen).

2.2.3 AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance

Das AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance (in der vorliegenden Arbeit als APS bezeichnet) realisiert ein verteiltes Temperaturmesssystem auf Basis der Raman-Rückstreuung. In Anlehnung an Krohn et al. [2014] und Bernhard [2014] zählt zur Grundausstattung eines DTS-Messsystems in erster Linie eine leistungsstarke Laserlichtquelle. Mittels eines Kopplers werden Lichtpulse hoher Intensität in den Kern des faseroptischen Sensors einkoppelt. Der zur Lichtquelle rückgestreute Teil der einfallenden Lichtwelle wird dort mittels des Kopplers zu speziellen optischen Filtern umgeleitet. Die optischen Filter selektieren die Stokes- und Anti-Stokes-Linien vom rückgestreuten Signal und leiten die selektierten Signale zu einem Paar Photodetektoren weiter, wo sie in elektrische Signale umgewandelt werden. Angesichts der geringen Intensität des rückgestreuten Signals müssen die Signale über eine große Anzahl von Einzelmessungen gemittelt werden, um eine ausreichende Signalstärke und infolgedessen ein adäquates Signal-Rausch-Verhältnis zu gewährleisten. Aus dem Verhältnis von Stokes und Anti-Stokes wird schließlich über Kalibrierparameter (Näheres dazu in Kapitel 3.2) die Absoluttemperatur $T(z)$ der Faser bestimmt und gegenüber der Distanz z grafisch dargestellt.

Die Ortsdiskretisierung basiert üblicherweise auf der Laufzeitmessung zwischen einfallendem Lichtsignal und Rückstreuungssignal, dem sog. OTDR-Prinzip, wobei die erreichbare räumliche Auflösung wesentlich durch die Länge des Anregungsimpulses bestimmt wird. Mit einer Pulslänge von 10 ns kann bspw. eine räumliche Auflösung von 1 m erreicht werden (vgl. Bernhard [2014]).

Die erreichbare Reichweite hängt im Wesentlichen von den Dämpfungs- und Dispersionseigenschaften der verwendeten Glasfaser ab. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Faserlänge die maximale Reichweite des Instrumentes nicht überschreiten darf, wie in Kapitel 4.4 experimentell bewiesen wird.

Nach Krohn et al. [2014] und Bernhard [2014] sind DTS-Messsysteme grundsätzlich für die Messung mit MM Fasern ausgelegt. Grund dafür ist der hohe Rückstreuungskoeffizient von MM Fasern, wodurch die Menge und damit auch die Intensität des rückgestreuten Lichtes erhöht wird. Als nachteilig erweist sich jedoch der hohe Dämpfungskoeffizient und die hohe Dispersion, infolgedessen der Lichtimpuls mit zunehmender Faserlänge sowohl abgeschwächt als auch verbreitert wird und damit die Reichweite dieser Systeme auf einige Kilometer begrenzt wird. Nach dem heutigen Stand sind mit dämpfungs- und dispersionsarmen MM Fasern allerdings bereits mit SM Fasern vergleichbare Reichweiten von bis zu 50 km möglich (Werte entnommen aus AP Sensing GmbH [2016a]).

Neben MM Instrumenten sind auf dem Markt auch Instrumente auf Basis von SM Fasern erhältlich. SM Fasern besitzen im Gegensatz zu MM Fasern den Vorteil eines deutlich geringeren Dämpfungskoeffizienten und einer geringeren Dispersion, wodurch Reichweiten bis zu 50 km ermöglicht werden (Werte entnommen aus AP Sensing GmbH [2016a]). Die erreichbare Präzision mit SM Fasern wird in Folge des geringeren Rückstreuungskoeffizienten im Vergleich zu MM Fasern jedoch um ein Vielfaches verschlechtert.

Die eingesetzte Variante des APS ist für die Temperaturerfassung mit SM Fasern bis zu einer Länge von 12 km ausgelegt. Die minimale räumliche Auflösung beträgt dabei 1 m und die Wiederholbarkeit 0.3 °C. Bei einer räumlichen Auflösung von 2 m und einer Messzeit von 600 s kann ein Temperaturprofil mit einer Auflösung von ca. 0.4 °C bestimmt werden (Angaben wurden AP Sensing GmbH [2014a] entnommen).

3 Verteilte Glasfasersensorik auf Basis der Raman-Streuung

3.1 Historische Entwicklung

Ein historischer Rückblick zur Raman-Streuung führt bis in das frühe 20. Jahrhundert zurück (vgl. Thyagarajan und Ghatak [2007] und Engelbrecht [2014]). Bereits 1923 wurde der Raman-Effekt von A. Smekal theoretisch vorhergesagt. Am 28.02.1928 gelang es C.V. Raman und K.S. Krishnan schließlich erstmals spontane Raman-Rückstreuung in Flüssigkeiten zu beobachten und bezeichneten diesen Effekt als "neues Streulicht". Noch im April desselben Jahres schrieb Raman eine Veröffentlichung mit dem Titel "A change of wavelength in light scattering". Obwohl K.S. Krishnan im Rahmen der Veröffentlichung neben Raman ebenfalls als Entdecker erwähnt wird, wird nur C.V. Raman als Autor angeführt und auch der entdeckte Effekt wird nur nach ihm benannt. Für seine Arbeit hinsichtlich der Streuung von Licht und der Entdeckung des nach ihm benannten Effektes, wurde C.V. Raman 1930 sogar der Nobelpreis verliehen.

Zur selben Zeit entdeckten auch G. Landsberg und L. Mandelstam aus Russland die Raman-Linien in Kristallen, veröffentlichten ihre Entdeckung jedoch zu spät.

In den frühen 1980er Jahren wurde die Raman-Streuung laut Krohn et al. [2014] dann zum ersten Mal für die Temperaturmessung empfohlen, als bewiesen wurde, dass die Intensität der Anti-Stokes Komponente gegenüber Temperaturänderungen stark sensitiv ist, während die Intensität der Stokes-Komponente nur geringfügig auf Temperaturänderungen reagiert.

Bereits 1985 wurde der erste Sensor zur verteilten Temperaturmessung basierend auf dem Raman-Effekt demonstriert, mit welchem eine Reichweite von 200 m und eine räumliche Auflösung von 3 m erzielt werden konnte.

In den nachfolgenden Jahren wurde die Technologie rund um die Raman-Rückstreuung immer weiter verbessert. Heutzutage kann mit Raman-Systemen eine räumliche Auflösung von 1 m bei Reichweiten von bis zu 50 km erreicht werden.

3.2 Physikalische Grundlagen

Während in Kapitel 2.1.3 nur ein kurzer Überblick über die Raman-Streuung gegeben wurde, wird in diesem Kapitel im Detail auf die physikalischen Grundlagen eingegangen. Wie bereits bekannt, entsteht Raman-Streuung durch Streuung von einfallenden Lichtphotonen an thermisch angeregten Molekülverbindungen (sog. optischen Phononen) im Faserkern. Zur Beschreibung dieses Vorgangs stehen nach Engelbrecht [2014] im Grundlegenden zwei Modelle zur Verfügung. Dies wäre zum einen das Placzek-Modell und zum anderen das quantenelektronische Modell.

3.2.1 Placzek-Modell

Im Rahmen des Placzek-Modells (vgl. Engelbrecht [2014]) erfolgt eine Intensitätsmodulation auf Basis einer Anpassung der Polarisierbarkeit durch die Vibrationsmodi. Betrachtet wird ein Molekül des Glasfaserkerns, welches eine harmonische Vibrationsschwingung mit Frequenz f_V und Amplitude \hat{q} um den Ruheabstand q_0 ausführt, wobei q eine verallgemeinerte Koordinate der Vibrationsschwingung darstellt. Diese Vibration hat eine zeitliche Modulation der Polarisierbarkeit α zur Folge, die in Form einer Taylor-Reihe linear angenähert werden kann.

$$\tilde{\alpha}(t) = \alpha_0 + \hat{q} \frac{\delta\alpha}{\delta q} \cos(2\pi f_V t) \quad (3.1)$$

Für die spontane Raman-Streuung ist dabei die Änderung der Polarisierbarkeit während der Vibration des Moleküls ausschlaggebend, wodurch sich für die Stokes-Intensität I_S und die Anti-Stokes-Intensität I_{AS} folgende Beziehungen ergeben, wobei f_S und f_{AS} die Frequenz der Stokes- und Anti-Stokes-Welle darstellen.

$$I_S = \tilde{I}_P \left(\frac{\delta\alpha}{\delta q} \right)^2 (2\pi f_S)^4 \hat{q}^2 \quad (3.2)$$

$$I_{AS} = \tilde{I}_P \left(\frac{\delta\alpha}{\delta q} \right)^2 (2\pi f_{AS})^4 \hat{q}^2 \quad (3.3)$$

Die Frequenzverschiebung zwischen der Pumplichtwelle und der Stokes-Welle bzw. Anti-Stokes-Welle entspricht dabei der Frequenz der Molekularschwingung f_V . Demzufolge wären laut dem Placzek-Modell beide Intensitäten gleich. Aus Versuchen ist jedoch bekannt, dass die Streuung in eine Stokes-Welle mit deutlich höherer Intensität erfolgt, als eine Streuung in die Anti-Stokes-Welle. Dieses Phänomen kann erklärt werden, indem die Raman-Streuung aus Sicht eines quantenelektronischen Modells betrachtet wird.

3.2.2 Quantenelektronisches Modell

Das quantenelektronische Modell basiert auf einer Interaktion zwischen eintretendem Photon und einem vibrierenden Glasmolekül, einem sog. optischen Phonon (vgl. Thévenaz und Berghamns [2011] und Krohn et al. [2014]). Kommt es zwischen einem Photon mit Frequenz f_P und einem Phonon mit der Frequenz Ω zur Interaktion, wird die Energie des Photons vom Molekül absorbiert und damit die Energie des Moleküls auf ein virtuelles Energielevel angehoben. Im Falle des Stokes-Streuprozesses wird nun ein Photon niedrigerer Frequenz $f_P - \Omega$ und ein Phonon mit der Frequenz Ω emittiert. Im Gegensatz dazu befindet sich beim Anti-Stokes-Streuprozess das Glasmolekül bereits auf einem höheren Ausgangsenergielevel. Des weiteren wird neben dem eintretenden Photon der Frequenz f_P auch ein Phonon der Frequenz Ω absorbiert. Emittiert wird schließlich ein Photon höherer Frequenz $f_P + \Omega$. Die Frequenzverschiebung Ω ist dabei charakteristisch für jedes Material und bezieht sich auf deren spezifischen Molekularschwingungsenergie. In Abb. 3.1 ist die Entstehung der Stokes- und Anti-Stokes-Streuung schematisch dargestellt.

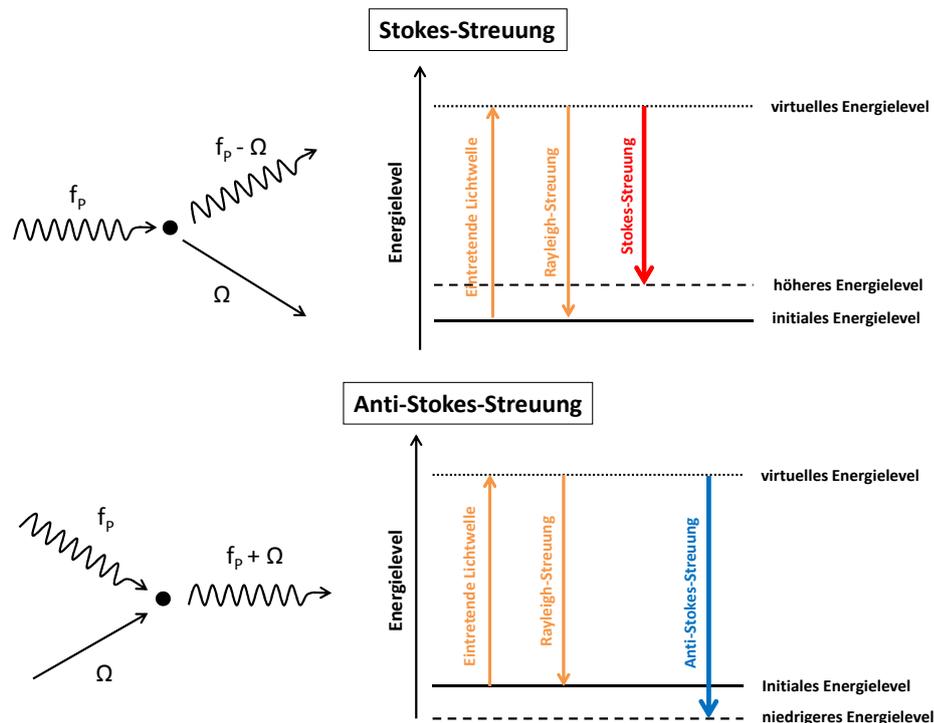


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Entstehung von Stokes- und Anti-Stokes-Rückstreuung (nach [Thévenaz und Berghamns, 2011, S.266] und [Krohn et al., 2014, S.88])

Die Intensität der rückgestreuten Stokes- bzw. Anti-Stokes-Emissionen hängt von der Übergangsrate ab, welche in direktem Zusammenhang mit der durchschnittlichen Anzahl an Phononen im Medium steht. Die Anzahl an Phononen wiederum variiert mit ihrer Frequenz und der Umgebungstemperatur. Die durchschnittliche Anzahl \bar{n} thermisch-aktivierter Phononen der Frequenz Ω und bei Temperatur T folgt dabei der Bose-Einstein-Verteilung und kann laut Thévenaz und Berghamns [2011] wie folgt ermittelt werden.

$$\bar{n} = \frac{1}{e^{\left(\frac{h\Omega}{kT}\right)} - 1} \quad (3.4)$$

Da die Wahrscheinlichkeit für ein Molekül auf niedrigerem Ausgangsenergielevel höher ist, als für ein Molekül auf höherem Ausgangsenergielevel, beträgt die Übergangsrate für eine Stokes-Emission $\bar{n} + 1$, während sie für die Anti-Stokes-Emission lediglich der durchschnittlichen Anzahl an Phononen \bar{n} entspricht. Demzufolge besitzt die Stokes-Streuung eine deutlich höhere Intensität als die Anti-Stokes-Komponente. Die Intensität für die Stokes-Komponente I_S bzw. die Anti-Stokes-Komponente I_{AS} können dabei wie folgt angeführt werden, wobei I_P die Intensität der Pumpwelle, σ_R den Raman-Wirkungsquerschnitt von Siliziumglas, λ_S die Wellenlänge der Stokes-Welle, λ_{AS} die Wellenlänge der Anti-Stokes-Welle und Δf die Frequenzverschiebung beschreibt. (Formeln entnommen aus Krohn et al. [2014])

$$I_S = \frac{I_P \bar{n} \sigma_R}{\lambda_S^4} \quad (3.5)$$

$$I_{AS} = \frac{I_P \bar{n} e^{\Delta f/kT} \sigma_R}{\lambda_{AS}^4} \quad (3.6)$$

Aufgrund der Absorption der Energie thermisch angeregter Phononen weist die Anti-Stokes-Komponente im Vergleich zur Stokes-Komponente eine Vielfach stärkere Temperatursensitivität auf. Das rückgestreute Intensitätsprofil des Anti-Stokes-Signals ist dabei nicht nur von Temperaturänderungen, sondern auch von externen Störeinflüssen, wie der Faserdämpfung, lokalen Dämpfungen durch Spleiße, Konnektoren oder Faserkrümmungen, Fluktuationen der Laserenergie, Einkoppelbedingungen oder Zusammensetzung der Faser, abhängig. Um daher tatsächliche Temperaturänderungen von den durch Dämpfungseinflüsse auftretende scheinbare Temperaturänderungen zu unterscheiden, muss das Anti-Stokes-Signal durch ein temperaturunabhängiges Signal, wie bspw. dem Raman-Stokes-Signal oder dem Rayleigh-Signal normalisiert werden (vgl. Hwang et al. [2010] und Soto et al. [2011]).

Die Normalisierung mittels des Raman-Stokes-Signals erfolgt laut nachfolgender Formel (entnommen aus [Krohn et al., 2014, S.184]).

$$R(z, T) = \frac{I_{AS}}{I_S} = \frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} e^{-\left(\frac{hc\Delta f}{kT(z)}\right)} \quad (3.7)$$

3.2.3 Kalibrierung differentieller Dämpfungseinflüsse

Durch die Verhältnisbildung werden zwar externe Störeinflüsse, wie Fluktuationen der Laserenergie, Einkoppelbedingungen und Einflüsse aufgrund der Materialeigenschaften eliminiert, die unterschiedliche Dämpfungen bei den unterschiedlichen Wellenlängen der Stokes- und Anti-Stokes-Linien (bis zu 200 nm bei einer Pumpwellenlänge von 1550 nm, entnommen aus [Santos und Farahi, 2015, S.476]) sind jedoch nach wie vor zu berücksichtigen. Verursacht werden die sog. wellenlängenabhängigen oder differentiellen Dämpfungen dadurch, dass zwei Wellen unterschiedlicher Wellenlänge auf ihrem Weg durch dieselbe Faser einerseits durch die Faser selbst, aber auch durch lokale Ereignisse (Konnektoren, Krümmungen, Spleiße, usw.) unterschiedliche Dämpfungen erfahren. Unter Berücksichtigung der differentiellen Dämpfungen ergibt sich das Verhältnis der Stokes- und Anti-Stokes-Intensität $R(z, T)$ wie folgt, wobei α_{AS} und α_S den Faserdämpfungskoeffizienten für die Anti-Stokes-Wellenlänge λ_{AS} und die Stokes-Wellenlänge λ_S darstellen. (Formel entnommen aus Soto et al. [2011]).

$$R(z, T) = \frac{I_{AS}}{I_S} = \frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} e^{-\left(\frac{hc\Delta f}{kT(z)}\right)} e^{-\int_0^z [\alpha_{AS}(\xi) - \alpha_S(\xi)] d\xi} \quad (3.8)$$

Differentielle Dämpfungen nehmen durch das Auftreten externer Störeinflüsse, wie Krümmung, Dehnung, Kompression, nuklearer Streuung oder chemischer Kontaminierung, zu und verursachen eine Neigung des Temperaturprofils. In Abb. 3.2 ist die Auswirkung der differentiellen Dämpfungen auf das Messergebnis schematisch dargestellt. Dabei stellt die schwarz gestrichelte Linie die tatsächliche Temperaturkurve einer unter konstanter Temperatur platzierten Faser dar. Die gemessenen Temperaturkurve (in rot dargestellt) weist dagegen einen scheinbaren linearen Anstieg der Temperatur mit zunehmender Distanz auf, dessen Ursache auf die differentiellen Dämpfungen zurückzuführen ist. (vgl. Fernandez et al. [2005], Hwang et al. [2010], Soto et al. [2011] und Santos und Farahi [2015])

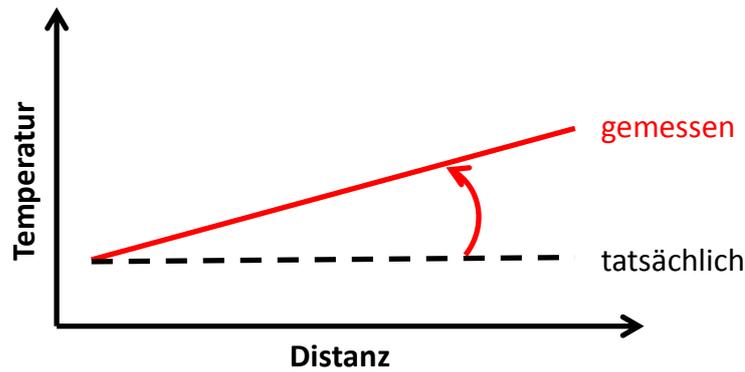


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Neigung des Temperaturprofils verursacht durch differentielle Dämpfungen (nach AP Sensing GmbH [2016b])

Um dahingehend ein zuverlässiges und korrektes Absoluttemperaturprofil der Faser bestimmen zu können, ist zunächst eine Kompensation der wellenlängenabhängigen Dämpfungseinflüsse zwingend erforderlich. Dafür stehen mehrere Methoden zur Verfügung, die nachfolgend erläutert werden.

Kalibrierung bei konstanter Temperatur

Unter der Annahme, dass das Sensorelement aus einer einzigen Faser besteht und damit eine einheitliche exponentielle Dämpfung entlang des gesamten Sensorelementes vorliegt, stellt dies die einfachste Möglichkeit zur Kalibrierung der differentiellen Dämpfungen dar. Dabei wird die Faser oder ein Teil der Faser unter einer konstanten und bekannten Temperatur T_1 platziert und eine Kalibrierungsmessung durchgeführt. Mittels der bekannten Temperatur entlang der Faser kann nun die Neigung der Kalibrierungsmesskurve, welche unter anderem als Attenuation Ratio bezeichnet wird, bestimmt und damit auf die tatsächliche Messkurve korrigiert werden (siehe Abb. 3.3).

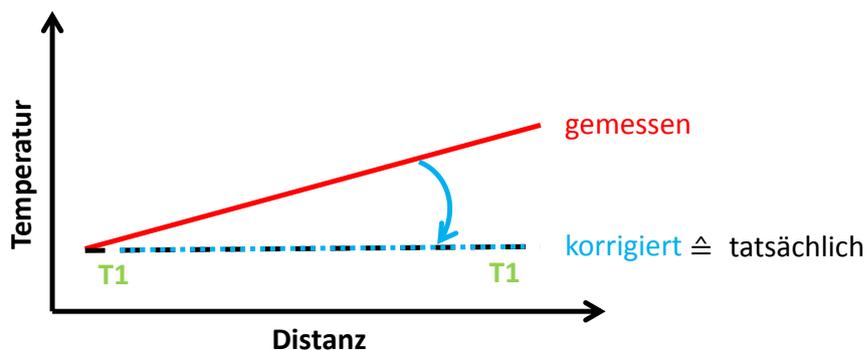


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Korrektur der Neigung der Temperaturmesskurve verursacht durch differentielle Dämpfungen (nach [AP Sensing GmbH, 2016b, S.12])

Besteht jedoch ein Sensor aus mehreren Sektionen, treten, ausgelöst durch Steckverbindungen oder verschiedene Fasereigenschaften der einzelnen Sektionen, scheinbare sprunghafte Temperaturanstiege auf. Der Dämpfungsverlauf über die gesamte Messfaser ist damit nicht mehr einheitlich exponentiell und eine Korrektur nach dem oben erläuterten Schema würde nicht auf die tatsächliche Temperaturmesskurve führen (siehe Abb.3.4).

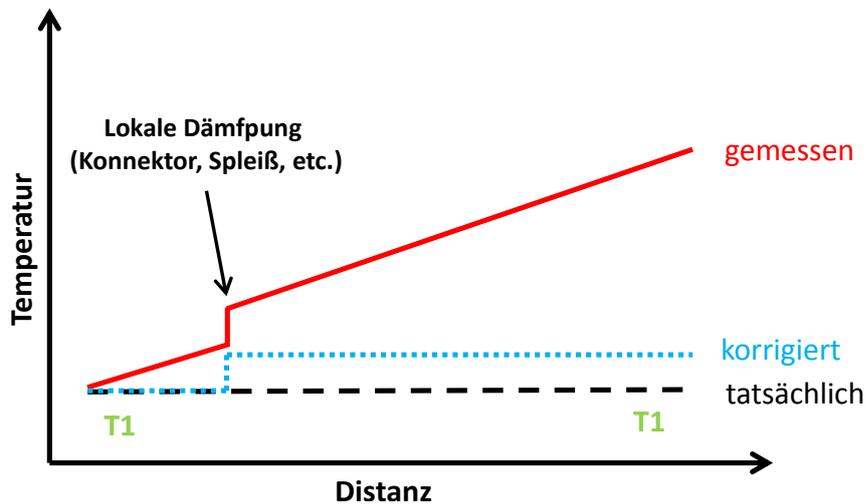


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung eines Temperaturprofils beeinflusst durch lokale und differentielle Dämpfungen

Sind die Positionen der lokalen Dämpfungsereignisse (Konnektoren, Spleiße, etc.) allerdings bekannt, besteht eine einfache Möglichkeit darin, die Sektionen separat zu kalibrieren. (vgl. AP Sensing GmbH [2016b])

Kalibrierung mittels Referenzverhältnis

Eine weitere Methode stellt, wie in Krohn et al. [2014] beschrieben, die Kalibrierung mittels einer Referenztemperaturkurve dar. Dabei wird entweder eine Referenzspule im Geräteinneren oder die Faser selbst unter konstanter Temperatur T_{Ref} platziert und eine Referenzmessung getätigt, deren Ergebnis das Rückstreuungsverhältnis $R(T_{Ref})$ ist. Aus dem Intensitätsverhältnis $R(T_{Ref})$ bei bekannter Temperatur T_{Ref} und dem unkalibrierten Verhältnis $R(z, T)$ kann nun jede Absoluttemperatur $T(z)$ entlang der Faser durch Umformung von Formel 3.7 bestimmt werden.

$$T(z) = \frac{1}{T_{Ref}} - \frac{k}{hcf} \ln \left[\frac{R(z, T)}{R(T_{Ref})} \right]^{-1} \quad (3.9)$$

Die Normalisierung durch ein Referenzintensitätsverhältnis bietet im Gegensatz zur zuvor beschriebenen Methode den Vorteil, dass eine Unterteilung der Faserverbindung bei lokalen

Dämpfungen durch Konnektoren oder Spleiße nicht erforderlich ist. Ändern sich jedoch die wellenlängenabhängigen Fehlereinflüssen mit der Zeit, sind einseitige Messungen trotz Anwendung der beiden vorab genannten Kalibriermethoden ungeeignet. Dass wellenlängenabhängige Dämpfungen zeitlich konstant sind, stellt jedoch eher eine Ausnahmen dar. In besonders wasserstoffreichen, feuchten oder heißen Gebieten, aber auch durch ionisierende Streuung in nuklearen Umgebungen bspw., nimmt die Faserdämpfung mit der Zeit zu. Infolgedessen ändert sich das Intensitätsverhältnis erwartungsgemäß im Laufe der Lebensdauer des Sensors und führt damit zu Fehlereinflüssen in der Temperaturbestimmung. Treten daher sich zeitlich ändernde wellenlängenabhängige Dämpfungen auf, ist eine einseitige Messung oder sog. Single-ended Methode nicht geeignet. Abhilfe schafft hier z.B. die Dual-ended Methode, die in nachfolgendem Kapitel erläutert wird (vgl. Soto et al. [2011]).

Automatische Kalibrierung mittels Dual-ended Methode (Schleifen-Konfiguration)

Bei der Dual-ended Methode oder auch Schleifen-Konfiguration (vgl. Fernandez et al. [2005] und Santos und Farahi [2015]) sind beide Faserenden mit dem DTS-Instrument verbunden. Mit Hilfe eines internen Switches erfolgt zunächst eine einseitige Messung von der ersten Seite der Faser und anschließend eine einseitige Messung von der zweiten Seite (siehe Abb. 3.5).

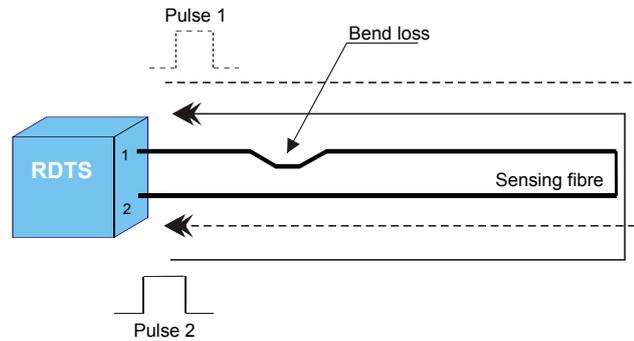


Abbildung 3.5: Aufbau und Funktionsweise einer Dual-ended Methode ([Fernandez et al., 2005, S.2])

Damit ergibt sich für jede Seite jeweils das Intensitätsverhältnis wie folgt. (Formeln entnommen aus Santos und Farahi [2015])

$$R(z, T) = \frac{I_{AS}(z)}{I_S(z)} = \frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} e^{-(hc\Delta f/kT(z))} e^{-\int_0^z [\alpha_{AS}(\xi) - \alpha_S(\xi)] d\xi} \quad (3.10)$$

$$\tilde{R}(z, T) = \frac{I_{AS}(L-z)}{I_S(L-z)} = \frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} e^{-(hc\Delta f/kT(z))} e^{-\int_0^{L-z} [\alpha_{AS}(\xi) - \alpha_S(\xi)] d\xi} \quad (3.11)$$

Aus den beiden Intensitätsverhältnissen $R(z, T)$ und $\tilde{R}(z, T)$ wird nun ein geometrisches Mittel berechnet. (Formel entnommen aus Santos und Farahi [2015])

$$R^{DE}(z, T) = \sqrt{R(z, T)\tilde{R}(z, T)} \quad (3.12)$$

Die sich mit der Zeit ändernden wellenlängenabhängigen Dämpfungen verursachen dadurch keine Neigung mehr, sondern einen über die gesamte Faserlänge konstanten Offset, wie Abb. 3.6 zeigt.

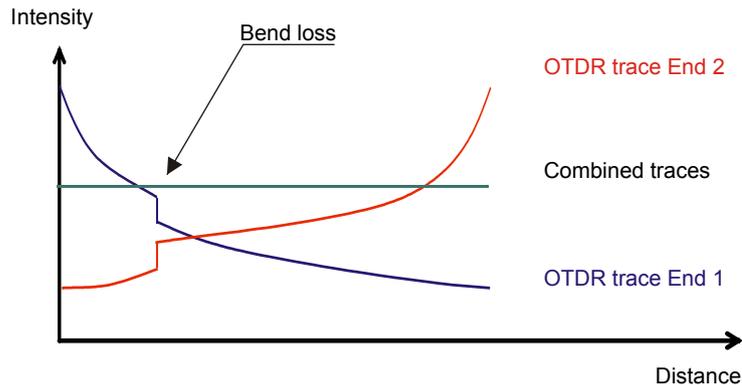


Abbildung 3.6: Kompensation differentieller Dämpfungen durch Bildung des geometrischen Mittels (nach [Fernandez et al., 2005, S.2])

Eine weitere Methode zur Korrektur differentieller Dämpfungen ist die Dual-Light-Source-Methode. Dabei werden von zwei separaten Lichtquellen Pumplichtwellen unterschiedlicher Wellenlängen ausgesendet, sodass die Wellenlängen des Anti-Stokes-Signals der ersten Quelle der Pumplichtwellenlänge der zweiten Quelle entspricht. Für weiterführende Informationen wird an dieser Stelle auf Santos und Farahi [2015] verwiesen.

3.2.4 Gain und Offset-Kalibrierung

Neben wellenlängenabhängigen Dämpfungen treten zwei weitere Fehlereinflüsse auf, die durch eine Verhältnisbildung nicht kompensiert werden können. Auf der einen Seite besteht die Möglichkeit, dass entlang einer Sensorfaser oder auch über die Zeit auftretende Temperaturunterschiede nicht korrekt ausgegeben werden. Ist bspw. ein Teil einer Sensorfaser einer höheren Temperatur ausgesetzt als ihr Rest, wird der gemessene Temperaturunterschied gegenüber dem tatsächlichen Temperaturunterschied verzerrt (siehe Abb. 3.7). Die Kalibrierung dieser Verzerrung erfolgt, indem ein Teil der Faser in einer Klimakammer auf eine Temperatur T_2 von z.B. 60 °C erhitzt wird, während der Rest der Faser bei einer konstanten Temperatur T_1 von 20 °C platziert wird. Da für beide Bereiche die tatsächliche Temperatur bekannt ist, kann der Skalierungsfaktor (Gain-Faktor) zur Korrektur der Verzerrung bestimmt werden. (vgl. AP Sensing GmbH [2016b])

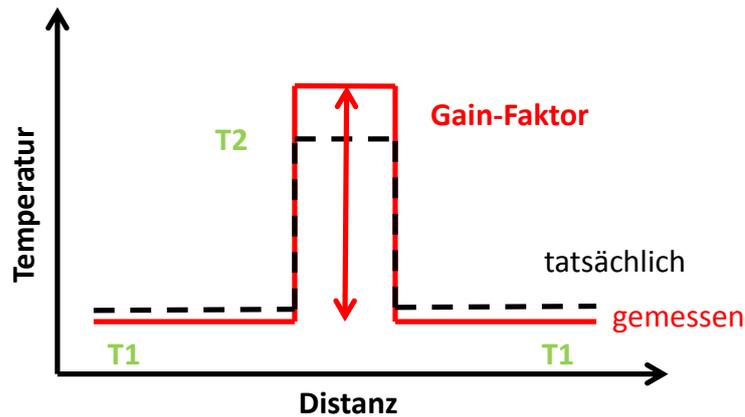


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des Gain-Faktors (nach [AP Sensing GmbH, 2016b, S.12])

Auf der anderen Seite kann ein konstanter Offset der gemessenen Temperaturkurve (in rot dargestellt) zur tatsächlichen Temperaturkurve (in schwarz dargestellt) bestehen, wie Abb. 3.8 zeigt.

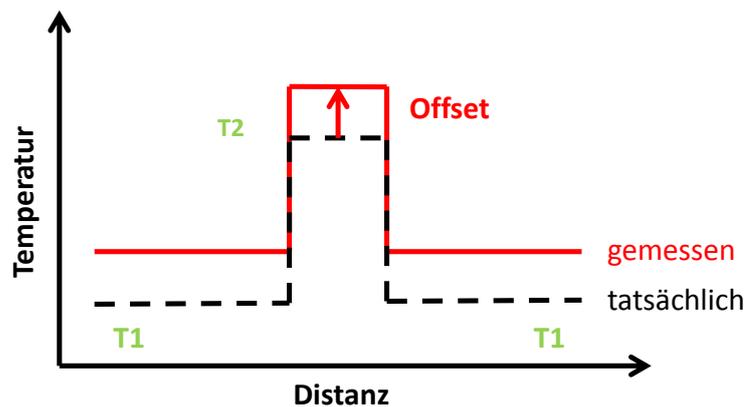


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Offsets (nach [AP Sensing GmbH, 2016b, S.12])

Zur Bestimmung des Offsets muss, analog zur Kalibrierung der Attenuation Ratio, lediglich ein Teil der Faser bei konstanter und bekannter Temperatur platziert werden. Die Ermittlung des Offsets kann daher im Zuge der Bestimmung der Attenuation Ratio erfolgen. (vgl. AP Sensing GmbH [2016b])

3.3 Herstellervergleich

Neben AP Sensing gibt es noch eine große Anzahl weiterer Hersteller von DTS-Messsystemen. Im Zuge dieses Kapitels wird bezugnehmend auf das Anwendungsgebiet der Temperaturkompensation von Brillouin-Messungen mittels Raman-DTS eine Auswahl von Herstellern, die den Kriterien entsprechen, verglichen. Eines dieser Kriterien stellt die Messung basierend auf SM Fasern dar.

Die nachfolgende Tabelle 3.1 zeigt dabei, dass alle der ausgewählten Hersteller sowohl auf SM als auch MM Fasern ausgelegte Instrumente herstellen.

Tabelle 3.1: Herstellervergleich basierend auf SM und MM Instrumenten

	AP Sensing (apsensing.com)	LIOS Technology (nktphotonics.com)	Silixa (silixa.com)	Sensornet (sensornet.co.uk)	Halliburton (halliburton.com)
Multimode	x	x	x	x	x
Singlemode	x	x	x	x	x

Ein weiteres Kriterium für die Temperaturkompensation von Brillouin-Messungen mittels Raman-DTS stellt die Reichweite dar. Brillouin-Systeme besitzen üblicherweise eine Standardreichweite von 25 km in Schleifen-Konfiguration, wobei eine Erhöhung auf bis zu 50 km möglich ist (vgl. fibrisTerre Systems GmbH [2015]). Der Herstellervergleich beschränkt sich daher auf die in nachfolgender Tabelle 3.2 angeführten Instrumente, die den Kriterien hinsichtlich der Temperaturkompensation (SM und Reichweite von 25 km bis 50 km) entsprechen. Das im Zuge der Arbeit verwendete Instrument APS genügt nicht den zuvor festgelegten Kriterien, da es lediglich eine maximale Reichweite von 12 km besitzt. Es wird jedoch zum Vergleich in der nachfolgenden Tabelle 3.2 angeführt.

Tabelle 3.2: Herstellervergleich von SM Instrumenten basierend auf der maximalen Reichweite (Angaben entnommen aus: AP Sensing GmbH [2016a], LIOS Technology GmbH [2017a], LIOS Technology GmbH [2017b], LIOS Technology GmbH [2017c], Sensornet [2016] und Silixa Ltd. [2015])

Hersteller	Modell	Reichweite	räumliche Auflösung	Temperaturauflösung
AP Sensing	Linear Pro Serie N4426A HP	12 km	1 m	0.4 °C
	Linear Power Series N4425A LD	30 km, 40 km, 50 km	2 m	> 0.6 °C
	Linear Pro Series N4426A LD	30 km, 40 km, 50 km	2 m	> 0.8 °C
LIOS Technology	EN.SURE300SM	30 km	1 m	< 1°C
	EN.SURE400SM	40 km	1 m	< 1°C
	PRE.VENT DTS OTS -, 300, 400 WELL.DONE DTS (SM)	30 km, 40 km 25 km, 30 km	< 1 m -	- < 0.08°C
Sensornet	Sentinel DTS-XR SM	30 km	2 m	< 0.05 °C
Silixa	ULTIMA™-DTS	35 km	1 m	0.03 °C

Abgesehen vom Hersteller Halliburton haben dabei alle in Tabelle 3.1 genannten Hersteller zumindest ein Instrument in ihrem Sortiment, welches sowohl für SM Fasern als auch Reichweiten von mehr als 25 km ausgelegt ist.

3.4 Realisierte Projekte

Die Zahl der Anwendungsbereiche hat sich in den letzten Jahre stark weiterentwickelt. Vor allem in der Industrie zur Branddetektion in Gebäuden, Tunneln oder im Untertagebau, zur Leckageortung bei Dämmen oder Pipelines und zur Überwachung von Energiekabeln ist eine permanente verteilte Temperaturerfassung unabdingbar. Daneben findet die DTS aufgrund ihrer Immunität gegenüber elektromagnetischer Strahlung auch Anwendung beim Monitoring nuklearer Infrastrukturen. Im Rahmen dieses Kapitels soll die vielseitige Einsetzbarkeit des DTS anhand ausgewählter Anwendungsfälle demonstriert werden.

3.4.1 Anwendung zur Branddetektion

Gegenwärtig spielt die automatische Branddetektion auf Basis der Linear Heat Detection (LHD) mittels DTS eine weitverbreitete Rolle. Zum Beispiel werden in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) 2001 klare Angaben zur automatischen Branddetektion in Tunneln vorgeschrieben.

Die LHD stellt eine Methode zur Detektion von Bränden entlang eines Sensorkabels dar. Entlang des Sensorkabels können dabei verschiedene physikalische Feuerzonen festgelegt werden, für welche in Abhängigkeit der Umgebungstemperaturen entsprechende Alarmtemperaturen festgelegt werden können. Damit können im Brandfall sowohl die Position als auch die Ausbreitungsrichtung des Feuers bestimmt und die Einsatzkräfte und Löschanlagen gezielt eingesetzt werden. Zum Zwecke der Branddetektion wird das Sensorkabel üblicherweise in einer Schleife verlegt. Damit kann auch im Falle einer Beschädigung der Faser, z.B. durch eine Explosion oder ein Feuer, die Faser von beiden Seiten bis zum Bruch gemessen und damit eine Branddetektion gewährleistet werden. (Chris Conway - Sensa [2004])

Nachfolgend werden zwei ausgewählte Fallbeispiele der Branddetektion in Tunneln und in Gebäuden näher erläutert.

Branddetektion der Britomart's Untergrundbahn in Neuseeland

Nach Chris Conway - Sensa [2004] wird DTS bereits in einer Vielzahl von Tunnelsicherheitssystemen integriert. Die Temperaturinformation wird dabei hauptsächlich zur Branddetektion und Brandfrüherkennung, aber auch zur Steuerung der Ventilation unter normalen Bedingungen und in Brandfällen, genutzt.

Bei der Britomart's Queen Street Station in Auckland, Neuseeland, handelt es sich um eines der Fallbeispiele, bei dem ein DTS-System zur Branddetektion zum Einsatz kommt. Die Britomart's Untergrundbahn besteht aus drei Plattformen und fünf Bahnlinien, die in etwa 40 Züge und 17.000 Passagiere pro Stunde bewältigen können. Das DTS-System erstreckt sich über alle Plattformen bis in die Tunnelsektionen, die auf die Station zuführen. Die faseroptischen Sensoren sind sowohl in der Station als auch in den anschließenden Tunneln jeweils über den Fahrspuren an der Decke befestigt und werden kontinuierlich mittels des DTS-Systems überwacht. Überschreitet die Temperatur in einem der 32 Temperaturzonen das festgelegte Limit, werden durch die Brandmeldezentrale die entsprechenden Löschmaßnahmen initiiert. Abb. 3.9 zeigt den Response Screen der Brandmeldezentrale im Falle eines Brandszenarios.

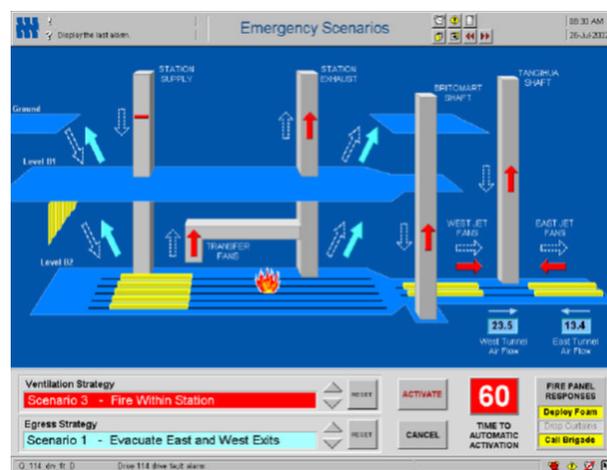


Abbildung 3.9: Response Screen der Brandmeldezentrale im Falle eines Brandszenarios (nach Chris Conway - Sensa [2004])

Die Festlegung der Alarmtemperaturen für jede Zone erfolgte zunächst durch Schätzungen der Umgebungstemperaturen auf Basis des Baukonzeptes. Bereits kurz nach Inbetriebnahme der Station zeigte sich jedoch, dass die vorhergesagten Umgebungstemperaturen abhängig davon, ob Dieselzugmaschinen oder elektrische Zugmaschinen fahren, und aufgrund saisonaler Temperaturschwankungen fluktuieren. Durch die Flexibilität des DTS-Systems konnten die Alarmlevel nach dem Einbau der Sensorkabel und Inbetriebnahme der Station angepasst werden.

Neben der Alarmtemperatur oder sog. Peaktemperatur zur Branddetektion kann für jede Zone auch eine Durchschnittstemperatur festgelegt werden. Die Durchschnittstemperaturfunktion wird üblicherweise bei U-Bahn Netzwerken, deren Lüftung auf einer sog. Push-Pull-Ventilation basierend auf der Bewegung des Zuges beruht, verwendet. Vom Kondensator abgegebene Wärme kann die stehende Luft auf über das festgelegte Temperaturlimit erhitzen, wodurch die Aktivierung einer Zwangsbelüftung zwingend erforderlich ist. Dadurch kann gewährleistet werden, dass

auch bei Stau oder Stromausfall die U-Bahn über einige Zeit im Tunnel stehen bleiben kann. Allerdings kann eine erhöhte Temperatur im Tunnel auch durch einen Brand bedingt sein. In diesem Fall wäre eine automatische Aktivierung der Belüftung fatal. Mittels des DTS-Systems kann zwischen den beiden Szenarien unterschieden werden, indem zum einen die auf die Peaktemperatur hinsichtlich der Branddetektion und zum anderen auf die Durchschnittstemperatur in Bezug auf die Steuerung der Lüftung überprüft wird.

Branddetektion in der Bäckerei “Der Mann“

Die Bäckerei “Der Mann“ im 23. Wiener Bezirk verfügt seit ihrer Errichtung über eine auf der Raman-Rückstreuung basierende FibroLaser-Anlage der Firma Siemens zur Brandfrüherkennung. Eine Lösung mittels DTS bietet dabei einige Vorteile. Zum einen ist das Messsystem gegenüber dem Mehlstaub und der Feuchtigkeit in der Bäckerei widerstandsfähig und zum anderen ist die Wartung des Sensorkabels relativ einfach, was in Anbetracht dessen, dass die Halle an ihrer höchsten Stelle 9 m hoch ist, von wesentlicher Bedeutung ist.

Das Fibro-Laser Sensorkabel führt mit einer Gesamtlänge von 1.4 km durch die gesamte Bäckerei und ist in unterschiedliche Schutzzonen unterteilt. Je nach Umgebungsbedingung (Kühlraum oder über Backöfen) werden für jede Schutzzone individuelle zulässige Temperaturhöchstwerte festgelegt. Damit ist im Alarmfall sofort ersichtlich, welche Schutzzonen betroffen sind. Die erfassten Informationen werden an eine Brandmeldezentrale weitergeleitet, welche im Brandfall dafür sorgt, dass die Lüftungsanlagen abgeschaltet, die Brandrauchentlüftung eingeschaltet und die Brandklappen geschlossen werden (Siemens AG Österreich [2007]).

3.4.2 Anwendung zur Leckageortung

Wie die Branddetektion ist auch die Leckageortung z.B. an Staudämmen, Pipelines, Öl- und Gasdepots oder Unterspeichern von großer Bedeutung. Leckagen können schwere gesundheitliche, umwelttechnische und auch wirtschaftliche Folgen haben, was eine umfangreiche Leckageortung unabdingbar macht.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Leckageortung am Beispiel von Dämmen und eines Öldepots näher beschrieben.

Leckage-Ortung an Dämmen

Die ersten Anfänge faseroptischer Temperaturmessung im Wasserbau wurden nach Aufleger et al. [2007] erstmals im Jahr 1996 in Zusammenarbeit zwischen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Wasserwirtschaft der TU München und der GTC Kappelmeyer durchgeführt und darauf aufbauend ein Messsystem zur Überwachung von Stauanlagen entwickelt. Seitdem wird die DTS weltweit in zahlreichen Projekten erfolgreich zur Leckageortung und Bestimmung der Temperaturverteilung eingesetzt. Durch Kenntnis der Temperaturverteilung in Dämmen und deren Untergrund ist es möglich bevorzugte Sickerwege zu erkennen. Zur Erkennung von Leckagen wird der Einfluss einer Durchströmung durch den Damm auf Wärmetransportvorgänge im Schüttmaterial genutzt. Grundsätzlich stehen dafür zwei Methoden zur Verfügung (vgl. Aufleger et al. [2007] und International Committee of Dam Surveillance).

Die sog. Gradientenmethode stellt eine passive Methode zur Erfassung von Sickerwasser dar. Dabei werden durch Sickerwasser bedingte Temperaturanomalien detektiert, die auf den Ort und mit Einschränkung auch auf die Intensität einer möglichen Leckage schließen lassen. Das Verhalten der Temperaturanomalien hängt dabei vom lokalen Klima und dem Charakter des Stausees ab. In der gemäßigten Zone z.B. tritt Sickerwasser im Winter als kaltes Wasser und im Sommer als warmes Wasser in den Damm ein. Abb. 3.10 zeigt die Temperatur, gemessen im Januar und im Juli, für einen 60 m hohen intakten Damm auf der linken Seite und einem Damm mit einem ca. 2 m hohen Leck auf der rechten Seite.

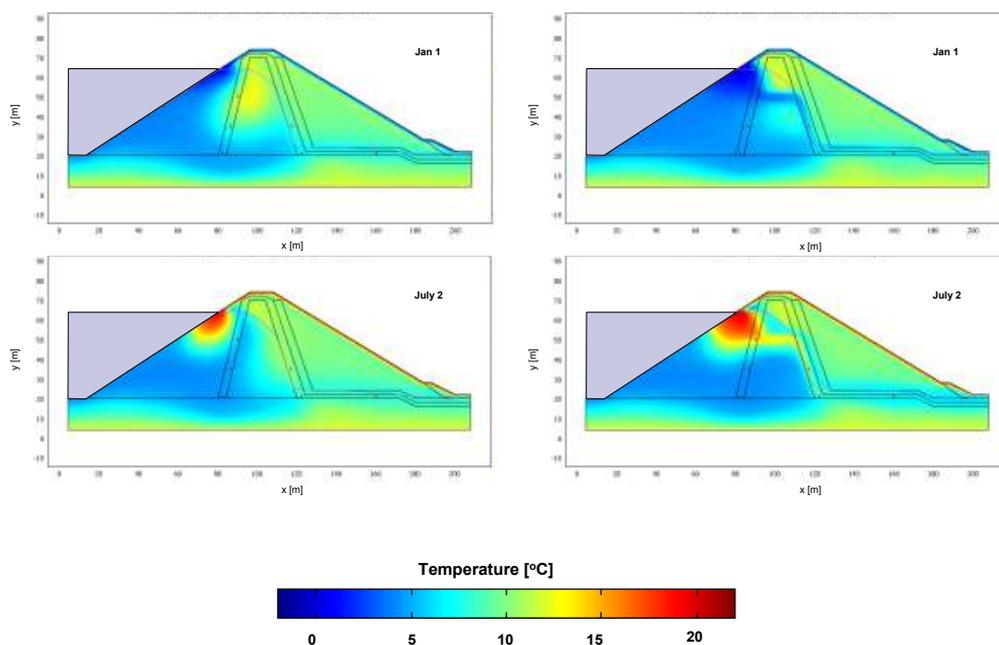


Abbildung 3.10: Temperatur im Januar und Juli eines 60 m hohen intakten Damms (links) und eines Damms mit Leckage (rechts) (nach International Committee of Dam Surveillance)

Zudem führen auch saisonale Variationen des Wasserspiegels im Stausee zu einer Änderung des Sickerwasserflusses. Um diese Methode anwenden zu können, bedarf es ausreichend großer Temperaturgradienten zwischen dem gestauten Wasser und dem Umgebungsmaterial des Sensorkabels.

Im Gegensatz zur Gradientenmethode handelt es sich bei der Aufheizmethode um eine aktive Methode, bei der die Sensorfaser temporär durch Anlegen einer elektrischen Spannung an die im Sensorkabel integrierter Kupferlitze erhitzt wird. Der Temperaturanstieg im Kabel wird dabei durch Wärmetransportmechanismen der Kabelumgebung bestimmt und kann ein Indiz dafür sein, ob sich der Sensor in einer feuchten, einer teilweise durchtränkten oder einer voll-durchtränkten Umgebung befindet. Des Weiteren erlaubt diese Methode Rückschlüsse auf das Vorhandensein von Sickerwasser. Diese Methode wird z.B. angewendet, wenn die Temperaturgradienten zwischen dem gestauten Wasser und der Kabelumgebung zu gering sind und damit eine Leckage-Detektion mittels der Gradientenmethode nicht möglich ist.

Eingesetzt wurde die faseroptische Methode zur Leckageortung bereits bei der Sanierung des Mittleren Isarkanals (1996), der Ohra-Talsperre in Thüringen, der Talsperre Bautzen in Sachsen, aber auch über die europäischen Grenzen hinaus beim Al Khadra Reservoir in Libyen, beim Midlands Damm auf Mauritius oder beim Merowe Damm am Nil (Sudan). Des Weiteren wird die Leckage-Ortung basierend auf Raman-DTS auch bei Staudammprojekten in der Türkei, Jordanien und Brasilien eingesetzt (Aufleger et al. [2007]).



Abbildung 3.11: Einbau der faseroptischen Sensoren bei der Sanierung des Mittleren Isarkanals 1996 (links) und des Midlands Damms auf Mauritius (rechts) sowie der Verlauf des faseroptischen Sensorkabel entlang des Merowe Damms am Nil (Mitte) (nach Aufleger et al. [2007])

Leckage-Ortung am Rizhao Port Öldepot

Die Überwachung von Öl- oder Gasdepots und Transportpipelines ist angesichts der schweren Unfälle verursacht durch Leckagen, die in der Vergangenheit passierten, unbedingt notwendig. Im Jahr 2013 zum Beispiel kam es in Qingdao, China, zu einer schweren Explosion eines Pipelinelecks, bei der 62 Menschen ums Leben kamen und 136 verletzt wurden. Zudem wurden

einige Kilometer Straße und tausende Gebäude zerstört und eine enorme Menge Rohöl floss ins Meer. Zu den ökonomischen Verlusten kam es damit auch zu erheblichen Umweltschäden, deren Beseitigung einige Jahrzehnte dauern wird (Zhu et al. [2015]).

Die Ortung von Leckagen basiert nach Vogel et al. [2011] auf örtlich begrenzten Temperaturanomalien, die durch das austretende Gas oder Öl verursacht werden. Abhängig davon, um welches Transportgut es sich handelt, werden unterschiedliche physikalische Effekte ausgenutzt (siehe Abb. 3.12).

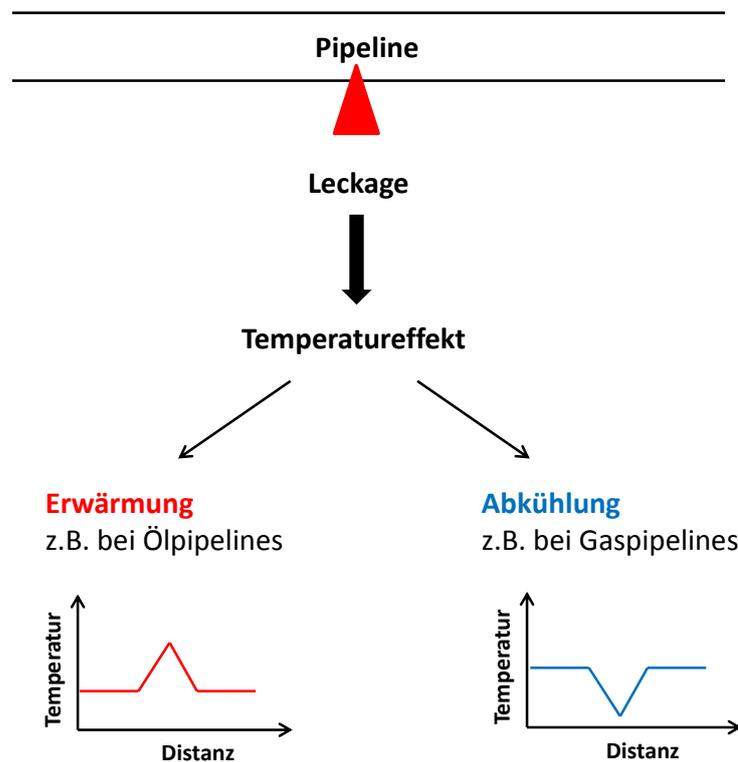


Abbildung 3.12: Temperatureffekte im Falle einer Pipeline Leckage (nach Vogel et al. [2011])

Vom Transportgut und dem erwarteten Temperatureffekt hängt auch die Lage und Position des Sensorkabels zur Pipeline ab, sodass auch im ungünstigsten Fall eine Leckageortung möglich ist.

Ein Anwendungsfall stellt das Rizhao Port Öldepot dar (vgl. Zhu et al. [2015]). Dabei handelt es sich um eine Öllagerstätte mit insgesamt 12 Öllagertanks und zahlreichen Kilometern Pipeline für den Transport des Rohöls. Zum Transport durch die Pipeline muss das Öl üblicherweise erhitzt und unter Druck gesetzt werden. Um dahingehend Unfälle aufgrund abnormaler Temperaturen im Vorhinein zu verhindern und die Erhitzungsenergie zu kontrollieren, wurden zwei neue Reservoirs und deren Transportpipelines der Rizhao Port Oil Company mit einem Raman-Temperaturmonitoringsystem ausgestattet.

Reservoir #1 besteht aus 8 Öllagertanks und Reservoir #2 aus 4 Öllagertanks, deren Temperatur mittels eines Raman-DTS-Instruments mit vier Kanälen in Echtzeit erfasst wird. Zur Überwachung der Temperaturverteilung wurden sowohl die Öllagertanks als auch die Transportpipelines mit Glasfasersensoren ausgestattet. Bei den Pipelines wurde das Sensorkabel im oberen Teil zwischen Außenhülle und Isolationsschicht angebracht. Dabei ist es besonders wichtig während des Einbaus der Fasern einen gewissen Spielraum zu behalten, sodass eine Beschädigung dieser aufgrund der thermischen Ausdehnung des Rohres verhindert werden kann. Um die Wärmeübertragung zwischen Pipeline und Sensorkabel zu gewährleisten, wurde zur Befestigung ein Aluminium-Klebeband verwendet. Abb. 3.13 zeigt eine schematische Darstellung der überwachten Reservoirs (links) sowie den Einbau der Sensorkabel (rechts).

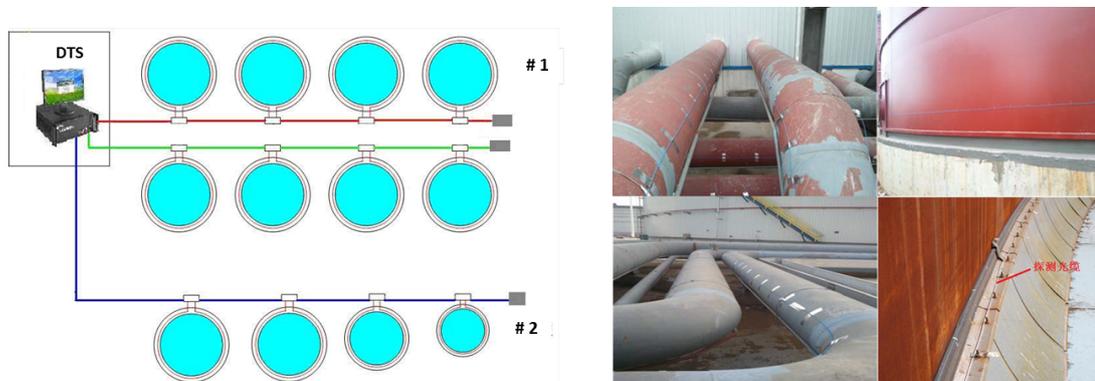


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung des Ölreservoirs (links) und Einbau des Sensorkabels (rechts) (nach Zhu et al. [2015])

Insgesamt wurden faseroptische Sensorkabel von 30 km Länge verlegt, die das Reservoir mit einer räumlichen Auflösung von 2 m überwachen sollen.

Die Leckage-Ortung erfolgt nach dem Prinzip der LHD. Überschreitet das Öl jene Temperatur, mit welcher es üblicherweise ausgeliefert wird, wird vom DTS-System ein Alarm ausgelöst und an die Brandmeldezentrale übermittelt. Diese leitet schließlich eine automatische Feuerbe-seitigung ein.

Durch die Überwachung der Temperatur ist es auch möglich bis zu 20% der Energie zur Erhitzung bzw. Kühlung des Öls einzusparen.

4 Systemuntersuchung des AP Sensing Linear Pro Series N4426A High Performance

Umfangreiche Systemuntersuchungen sind für die Anwendung von faseroptischen Messsystemen in der Praxis unabdingbar. Insbesondere Messpräzision, Genauigkeit und Rauschverhalten bei unterschiedlichen Geräteeinstellungen sowie das Verhalten unter Praxisbedingungen liegen dabei im Fokus. Im Zuge dieses Kapitels wird umfassend auf die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Systemuntersuchung des APS eingegangen. Neben der erreichbaren Messpräzision, Genauigkeit und den Auswirkungen der Geräteeinstellungen auf diese werden auch die effektive Reichweite des Instruments sowie der Einfluss von Faserlänge, Dämpfungen und Temperatur auf das Rauschverhalten untersucht.

4.1 Untersuchungsequipment

Um hinsichtlich der Systemuntersuchung des APS zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, werden vom Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TUG neben einem klimatisierten Messlabor auch adäquates Messequipment zur Verfügung gestellt. Nachfolgend wird auf die im Zuge der Untersuchungen verwendeten Messutensilien kurz eingegangen.

4.1.1 Verwendete Messfasern und Patchcords

Für die Laboruntersuchungen wurden Glasfasern unterschiedlicher Länge verwendet. Es handelt sich dabei um auf eine Faserspule aufgewickelte blanke SM Fasern, die an beiden Enden mit einem E2000/Angled Physical Contact (APC) Stecker ausgestattet sind. Bezogen wurden die Faserspulen von der Firma PH Palden GmbH.

Für die Verbindung der Faserspule mit dem APS wurden Patchcords mit 2 m und 5 m Länge der Firma Pengg Kabel GmbH verwendet. Die 2 m langen Patchcords verfügen dabei an beiden Enden über einen E2000/APC8° Stecker. Bei den Patchcords mit 5 m Länge handelt es sich um

Hybridkabel von E2000/APC8° auf Fibre Connector (FC)/APC8°.

4.1.2 Memmert Kühlbrutschrank

Zuverlässige Untersuchungen hinsichtlich des Rauschverhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen, erfordern die Erhitzung bzw. Abkühlung der Faser in Form eines Temperaturprofils. Hierfür steht im Messlabor ein Kühlbrutschrank IPC 400 der Firma Memmert GmbH + Co.KG zur Verfügung (siehe Abb. 4.1).



Abbildung 4.1: Kühlbrutschrank IPC 400 Memmert

Mit einem Innenraumvolumen von 53 Liter, einem Arbeitsbereich von 0 °C bis 60 °C und einer Präzision von 0.1 °C bietet sich mit Hilfe des Kühlbrutschrankes die Möglichkeit ein vollautomatisches Temperaturprofil zur Untersuchung des Rauschverhaltens des Messgeräts bei unterschiedlichen Temperaturniveaus des Sensors zu programmieren. Die Steuerung und die Aufzeichnung der Temperatur erfolgt mittels der vom Hersteller bereitgestellten Software Celcius.

4.2 Software - DTS Configurator

Die Ansteuerung des APS erfolgt mit Hilfe der vom Hersteller AP Sensing mitgelieferten Software DTS Configurator. Über den Konfigurationseditor der Software werden zum einen die Messeinstellungen (Messzeit, räumliche Auflösung, Samplingintervall, etc.) und zum anderen die Sensoreinstellungen (Skalierungsfaktor, Attenuation Ratio, Gain-Faktor, Offset, etc.) im Rahmen einer Sensorkalibrierung festgelegt.

4.2.1 Messeinstellungen

Um eine Messung starten zu können, muss vorab eine neue Konfiguration erstellt werden, in welcher neben den Sensorkalibrierparametern die nachfolgend beschriebenen Parameter festgelegt werden (vgl. AP Sensing GmbH [2014b]):

- **Start und Stop:** Darunter wird die Startposition bzw. Endposition des Messergebnisses verstanden. Der Stop-Wert wird im Zuge der Sensorkalibrierung (siehe Kapitel 4.2.2) bestimmt.
- **Länge:** Beschreibt die Länge der Messfaser und errechnet sich aus der Differenz zwischen Stopp-Wert und Start-Wert.
- **Messzeit:** Dabei handelt es sich um den Zeitraum zwischen zwei Messungen bzw. um jene Zeitspanne bis eine Messkurve ausgegeben wird.
- **Dazwischenliegende Aktualisierungszeit:** Während des Messvorgangs werden kontinuierlich im Abstand der dazwischenliegenden Aktualisierungszeit Zwischenmesskurven ausgegeben. Diese weisen eine geringere Temperaturauflösung auf und werden auch nicht gespeichert. Sie dienen lediglich zur visuellen Überprüfung auf eventuell auftretende Messfehler während des Messvorganges.
- **Aktualisierungszeit:** Spezifiziert wie oft ein Zwischenergebnis vom Gerät kalkuliert und abgespeichert werden soll.
- **Abfrageintervall (Samplingintervall):** Stellt, wie Abb. 2.7 in Kapitel 2.2.3 zeigt, den räumlichen Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messabfragen des gemessenen Temperaturprofils dar.
- **Räumliche Auflösung:** siehe Kapitel 2.2.3.

Die nachfolgende Abb. 4.2 zeigt das Eingabefenster für die Messeinstellungen.

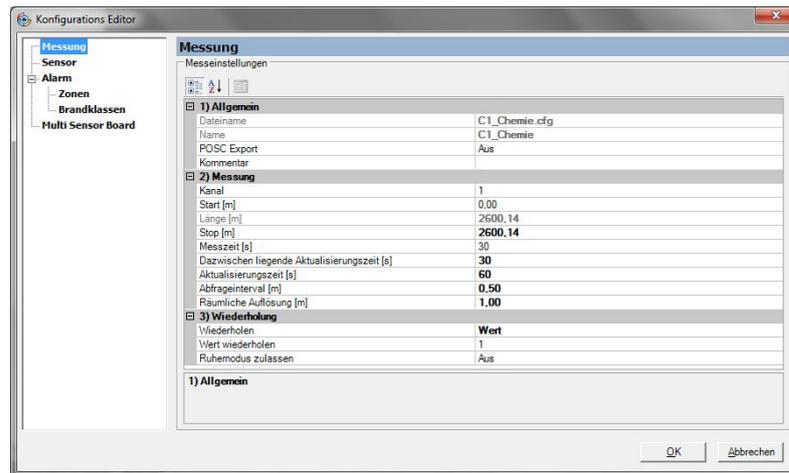


Abbildung 4.2: Eingabe der Messeinstellungen im Konfigurationseditor

4.2.2 Sensoreinstellungen

Im Rahmen der Sensoreinstellungen besteht die Möglichkeit das Sensorelement entweder im Ganzen zu kalibrieren oder dieses bei bekannten Konnektoren oder Spleißen in Sektionen zu unterteilen und jede Sektion separat zu kalibrieren. Im Folgenden wird jedoch ausschließlich auf die Kalibrierung des Sensorelements im Ganzen eingegangen.

Der Ablauf der Kalibrierung der Sensoreinstellungen besteht im Grundlegenden aus fünf Schritten, die in nachfolgender Abb. 4.3 dargestellt sind.

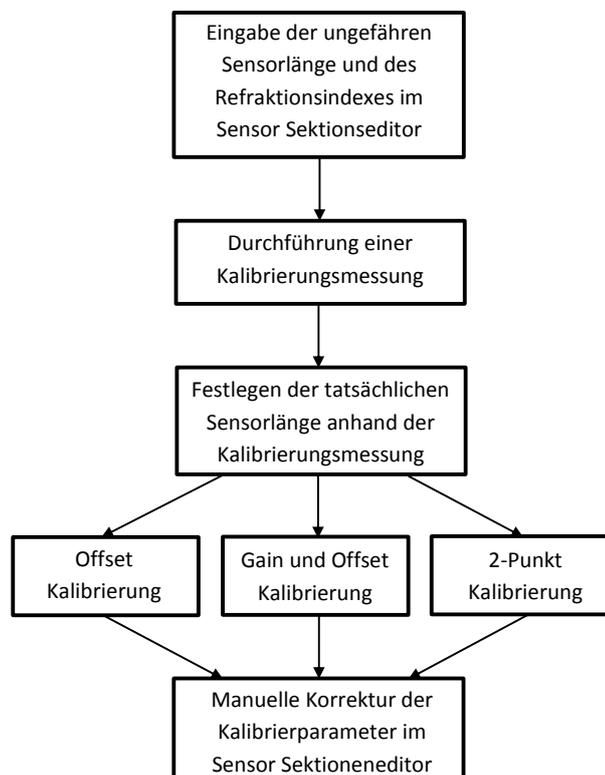


Abbildung 4.3: Ablauf der Kalibrierung der Sensoreinstellungen

Für eine besser Nachvollziehbarkeit werden die einzelnen Schritte in weiterer Folge anhand eines Beispiels genauer erläutert. Sämtliche Screenshots stammen dabei von selbst durchgeführten Messungen.

Im ersten Schritt erfolgt die Eingabe der Sensorlänge im Feld *Länge* des Sensor Sektionse-
ditors. Eine ungefähre Angabe der Sensorlänge ist dabei ausreichend, da diese lediglich für die
Darstellung der Kalibrierungsmessung von Bedeutung ist. In der Darstellung der Kalibrierungs-
messung muss nämlich das tatsächliche Sensorende ersichtlich sein, sodass die exakte Bestimmung
der Sensorlänge anhand der Kalibrierungsmessung erfolgen kann. Bei bekannter Sensorlänge soll-
te daher als Eingabewert eine etwas längere Sensorlänge angegeben werden. Für den Fall, dass
die Sensorlänge nicht bekannt ist, ist die maximale Reichweite des Instruments, welche für das
hier verwendete APS 12 km beträgt, anzugeben. Des Weiteren wird der Refraktionsindex, der
das Verhältnis zwischen den Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Vakuum und im Medium be-
schreibt, angegeben, welcher ebenfalls für die korrekte Bestimmung der Faser eine große Rolle
spielt (Näheres dazu in Kapitel 4.3.4). Abb. 4.4 zeigt in grün eingerahmt die Eingabefelder für
die ungefähre Sensorlänge und den Refraktionsindex im Sensor Sektionse-
ditor. Die in rot einge-
rahmten Parameter werden im Zuge der anschließenden Kalibrierung bestimmt.

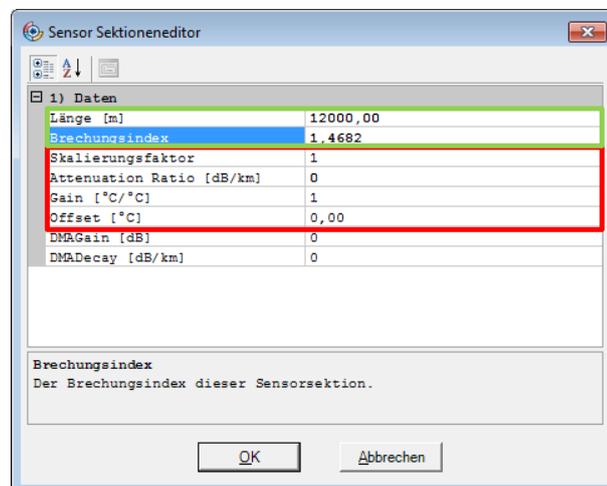


Abbildung 4.4: Eingabe des Refraktionsindex und der Länge einer Sektion im Sensor Sektionse-
ditor

Im nächsten Schritt wird eine Kalibrierungsmessung mit denen im Vorfeld festgelegten Mess-
einstellungen und Sensoreinstellungen durchgeführt, anhand derer in weiterer Folge die Sensor-
länge durch Verschieben des Cursors an das Faserende bestimmt wird (siehe Abb. 4.5). Das
Faserende äußert sich dabei durch den abrupten Abfall der Temperaturkurve auf den absoluten
Nullpunkt von ca. -273°C.

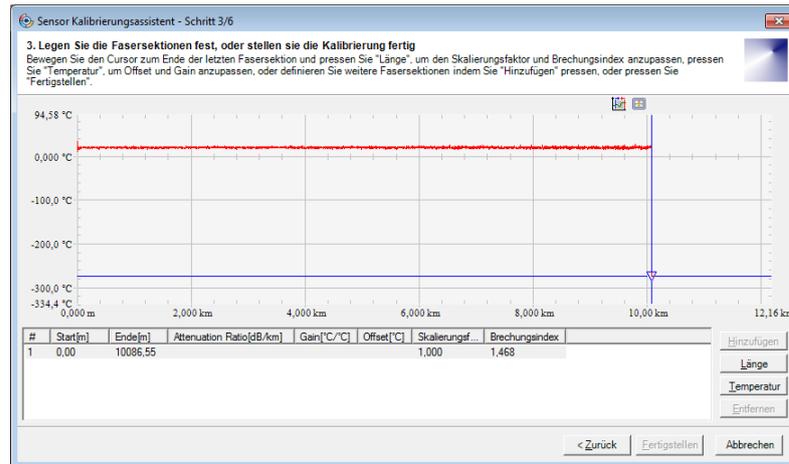


Abbildung 4.5: Festlegen der Sensorlänge und ggf. Eingabe des Skalierungsfaktors im Sensor Kalibrierungsassistent

Für den Fall, dass die Faser entlang der Messstrecke nicht gerade, sondern gewunden verläuft und damit die Positionen entlang des Sensors mit jenen entlang der Messstrecke nicht übereinstimmen, kann ein Skalierungsfaktor angegeben werden. Ist die Faser gerade verlegt, besitzt dieser den Wert 1.

Für die anschließende Sensorkalibrierung stehen in Abhängigkeit davon, ob im Single-ended oder Dual-ended Modus gemessen wird, bzw. ob der Sensor entlang seiner gesamten Länge zugänglich ist, drei Kalibrierungsmethoden zur Verfügung (vgl. AP Sensing GmbH [2007]):

- 1. Gain und Offset-Kalibrierung:** Die Gain und Offset-Kalibrierung wird vom Hersteller grundsätzlich für Dual-Ended Messungen empfohlen. Zur Gain und Offset-Berechnung werden anhand der Kalibrierungsmessung zwei Temperaturbereiche festgelegt und für diese die tatsächliche Absoluttemperatur angegeben (siehe Abb. 4.6).

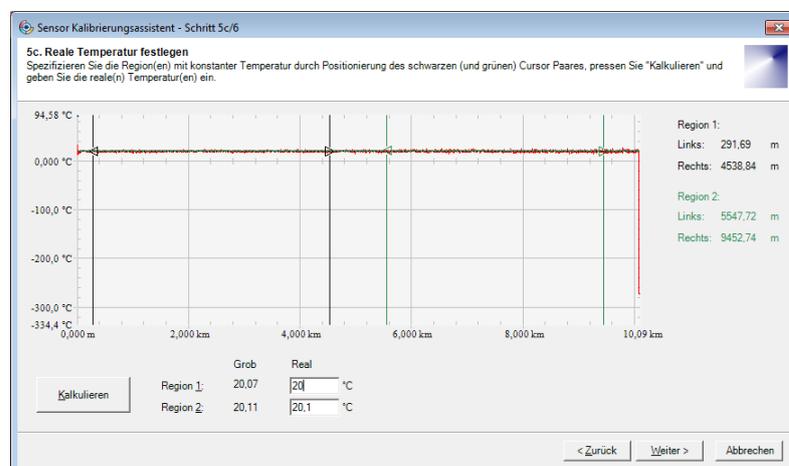


Abbildung 4.6: Festlegen zweier Temperaturbereiche zur Gain und Offset-Berechnung im Sensor Kalibrierungsassistent

- 2. Offset-Kalibrierung:** Die Offset-Kalibrierung wird laut Hersteller für Single-Ended Messungen empfohlen. Dabei wird anhand der Kalibrierungsmessung ein Temperaturbereich festgelegt und daraus die Attenuation Ratio berechnet (siehe Abb. 4.7 links). Für die Berechnung des Offsets wird in weiterer Folge für den zuvor gewählten Temperaturbereich die tatsächliche Absoluttemperatur angegeben (siehe Abb. 4.7 rechts).

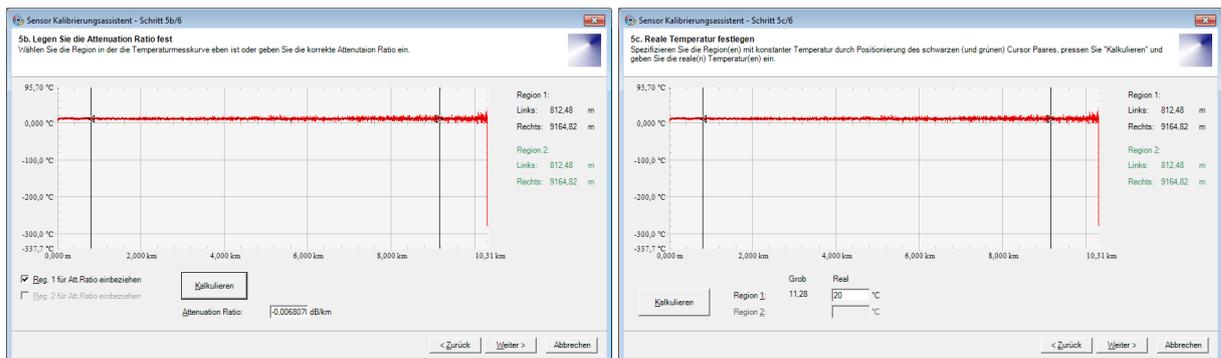


Abbildung 4.7: Festlegen des Temperaturbereichs zur Berechnung des Attenuation Ratio (links) und des Offsets (rechts) im Sensor Kalibrierungsassistent

- 3. Zwei-Punkt-Kalibrierung:** Diese Kalibriermethode kommt zum Einsatz, wenn der Sensor bereits installiert ist und die Temperatur nur an zwei Punkten bekannt ist. Der Gain-Parameter wird hier mit 1 fixiert. Da diese Methode jedoch im Zuge der Untersuchungen nicht zur Anwendung kam, wird für weiterführende Informationen auf AP Sensing GmbH [2007] verwiesen.

4.2.3 Ergebnisse der Kalibrierung

Die nachfolgende Abb. 4.8 zeigt nun das Ergebnis der Kalibrierparameter einer Gain und Offset-Kalibrierung (links) und einer Offset-Kalibrierung (rechts).

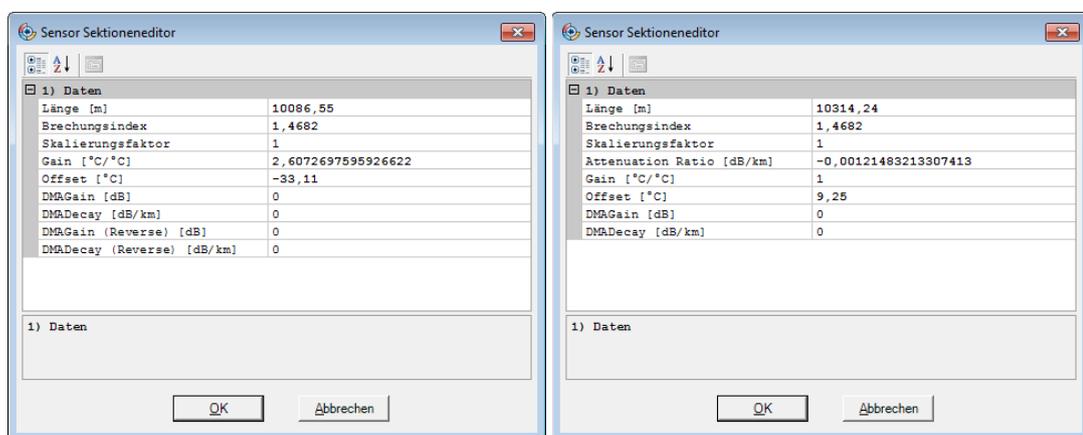


Abbildung 4.8: Sensoreinstellungen einer Gain und Offset-Kalibrierung (links) und einer Offset-Kalibrierung (rechts)

Die zu Beginn angegebene Sensorlänge wurde bei beiden Kalibriervorgängen durch die anhand der Kalibrierungsmessung bestimmten tatsächlichen Sensorlänge ersetzt. Die Differenz von ca. 230 m der Sensorlänge der Gain und Offset-Kalibrierung (links) im Vergleich zur Sensorlänge der Offset-Kalibrierung (rechts) lässt sich auf die Messeinstellung Single-Ended oder Dual-Ended zurückführen. Sind nämlich beide Enden der Messfaser am Gerät angeschlossen, wird im Single-Ended Modus die geräteinterne Faserspule von ca. 230 m mitgemessen, während im Dual-Ended Modus diese nicht mitgemessen wird.

Des Weiteren wurden je nach Kalibriermethode die entsprechenden Kalibrierparameter bestimmt. Für die Gain und Offset-Kalibrierung handelt es sich dabei um den Gain-Faktor und den Offset, während im Zuge der Offset-Kalibrierung die Attenuation Ratio und der Offset bestimmt wurden. Im Gegensatz zur Gain und Offset-Kalibrierung wird bei der Offset-Kalibrierung der Gain-Faktor nicht bestimmt, da dafür zwei Temperaturbereiche benötigt werden, jedoch im Zuge der Offset-Kalibrierung nur ein Bereich festgelegt wird, und besitzt daher den Wert 1.

Nach der durchgeführten Kalibrierung besteht die Möglichkeit die Sensoreinstellungen im Sensor Sektionseditor nochmals manuell anzupassen.

4.3 Untersuchung der Systemeinstellungen und deren Auswirkung auf die Standardabweichung und Genauigkeit

Grundsätzlich werden vom APS die Absoluttemperatur und die Dämpfung entlang einer Messfaser ausgegeben, wobei in erster Linie die Absoluttemperatur von Bedeutung ist. Daraus können zum einen der empirische Mittelwert und die empirische Standardabweichung über eine repräsentative Anzahl von Wiederholungsmessungen für jede Position entlang der Faser sowie die Abweichung der Messwerte zum Mittelwert und zum anderen der Mittelwert und die Standardabweichung über die Faserlänge bestimmt werden.

Die Standardabweichung über eine repräsentative Anzahl von Wiederholungsmessungen wird laut AP Sensing GmbH [2016a] als Wiederholbarkeit bezeichnet und beschreibt die Variation der gemessenen Temperatur T_k über eine ausreichende Anzahl an Mehrfachmessungen k unter konstanten Bedingungen für jede Position i der Faser.

Die Standardabweichung über die Distanz oder Temperaturentauung gibt Auskunft über die Variation der Temperaturmessungen über die gesamte Messdistanz. Genauer spezifiziert die Temperaturentauung die Variation der gemessenen Temperatur über i Punkte entlang der

Messdistanz, welche unter konstanter Temperatur gehalten wird.

Im Zuge dieser Arbeit ist unter der Bezeichnung Standardabweichung ausschließlich die Wiederholbarkeit zu verstehen. Auf die Temperaturentauflösung wird nicht näher eingegangen, da ohnehin die Standardabweichung in allen Abbildungen über die gesamte Messdistanz dargestellt wird.

Der empirische Mittelwert und die empirische Standardabweichung über eine repräsentative Anzahl von Wiederholungsmessungen geben Auskunft über die Stationarität des vorliegenden Signals, wobei die Stationarität in diesem Fall nicht wie üblich auf die Zeit, sondern auf die Distanz bezogen wird. In der Regel unterscheidet man vier Arten stochastischer Signale, die in nachfolgender Abb. 4.9 dargestellt sind (Profos und Pfeifer [1994]).

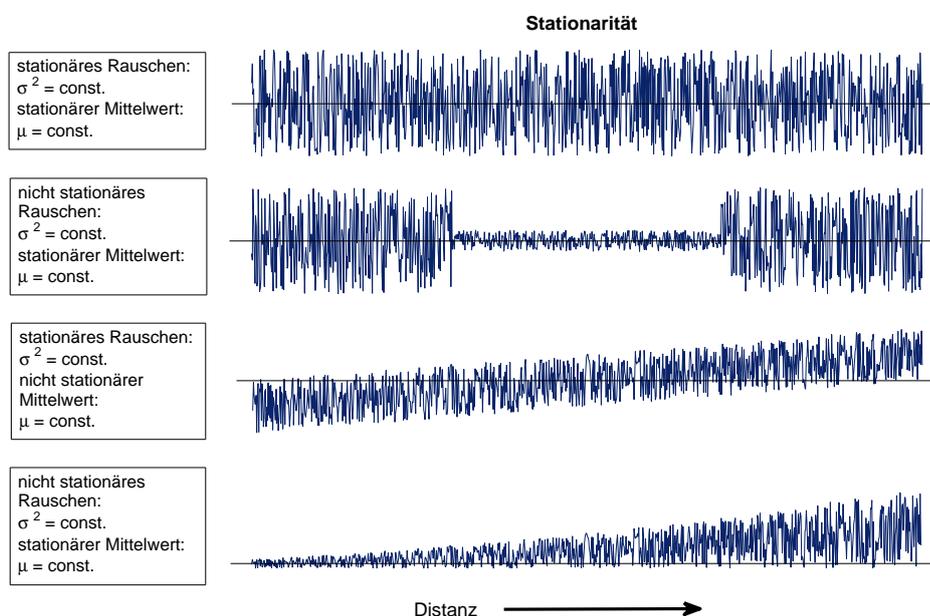


Abbildung 4.9: Stationarität stochastischer Signale über die Distanz

Die Standardabweichung hängt dabei von mehreren Faktoren - u.a. der Messzeit, der räumlichen Auflösung, der Messeinstellung Single Ended oder Dual Ended, dem Samplingintervall und dem Refraktionsindex - ab. Um die Einflüsse der genannten Faktoren zu untersuchen, wurden umfangreiche Systemuntersuchungen im Labor des IGMS durchgeführt, die in den nachfolgenden Kapiteln erläutert werden.

4.3.1 Erreichbare Standardabweichung

Nach der Anschaffung des APS galt es in erster Linie einen Überblick darüber zu erlangen, welche Messwerte vom Instrument ausgegeben werden und ob die vom Hersteller angegebenen Spezifikationen zu erreichen sind.

Um dahingehend annähernd vergleichbare Ergebnisse zu erlangen, wird eine Faserrolle mit einer Länge von 10 km verwendet und sowohl im Single-Ended Modus als auch im Dual-Ended Modus jeweils 10 Wiederholungsmessungen mit den in Tabelle 4.1 angeführten Messeinstellungen durchgeführt.

Tabelle 4.1: Messeinstellungen zur Untersuchung der erreichbaren Standardabweichung

	Anzahl der Messungen	Single-/ Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Samplingintervall
#1	10	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.5 m
#2	10	Dual-Ended	10 km	60 s	2 m	0.5 m

In Abb. 4.10 ist die empirische Standardabweichung aus den 10 Wiederholungsmessungen gegenüber der Standardabweichung laut Hersteller zum einen für Single-Ended Messungen (links) und zum anderen für Dual-Ended Messungen (rechts) abgebildet. Zudem wurde zum besseren Vergleich mit der Herstellerangabe ein gleitender Mittelwert über jeweils 50 Messwerte (entspricht 100 m) der empirischen Standardabweichung gebildet und dargestellt.

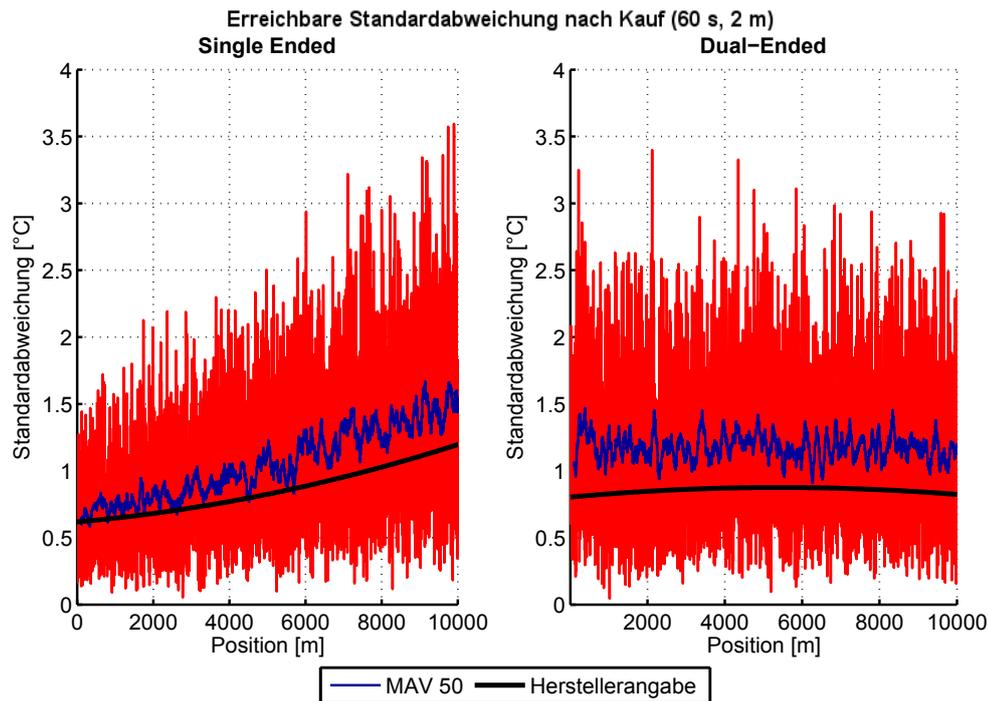


Abbildung 4.10: Standardabweichung von Single-Ended (links) und Dual-Ended Messungen (rechts) bei einer Messzeit von 60 s und einer räumlichen Auflösung von 2 m nach Kauf des Instruments im Vergleich zur Herstellerangabe

Dabei zeigt sich, dass die Standardabweichung der Single-Ended Messungen nicht stationär ist, während die Dual-Ended Messungen eine annähernd stationäre Standardabweichung aufweisen. Zudem stellt sich heraus, dass die empirische Standardabweichung in beiden Fällen von der Herstellerangabe abweicht. Betrachtet man das gleitende Mittel über die empirische

Standardabweichung der Single-Ended Messungen ist zu beobachten, dass dieses am Faserbeginn mit der Herstellerangabe von 0.6°C auf ca. 0.1°C überstimmt, jedoch mit zunehmender Distanz immer stärker von der Herstellerangabe abweicht. Am Faserende bei 10 km differiert das gleitende Mittel von der Herstellerspezifikation um etwa 0.4°C . Das gleitende Mittel der Dual-Ended Messungen dagegen zeigt einen über die gesamte Faserlänge konstanten Offset von ca. 0.4°C .

Eine Abweichung der ermittelten Standardabweichung von der Herstellerangabe ist dabei durchaus zu erwarten. In Anbetracht dessen, dass die Faserlänge mit 10 km kürzer ist als jene, auf die die Herstellerangabe spezifiziert ist, hätte dies allerdings eine bessere empirische Standardabweichung vermuten lassen. Grund für die verschlechterte empirische Standardabweichung könnten daher die Dämpfung der beiden Ausgänge des APS sein. Während die Herstellerangaben für einen Verlust von 0.2 dB gelten, beträgt die tatsächliche Dämpfung der Ausgänge 0.5 dB.

Im Laufe der weiteren Labor- und Feldversuche verschlechterte sich die Standardabweichung des Instrumentes jedoch zunehmend, wie Abb. 4.11 zeigt.

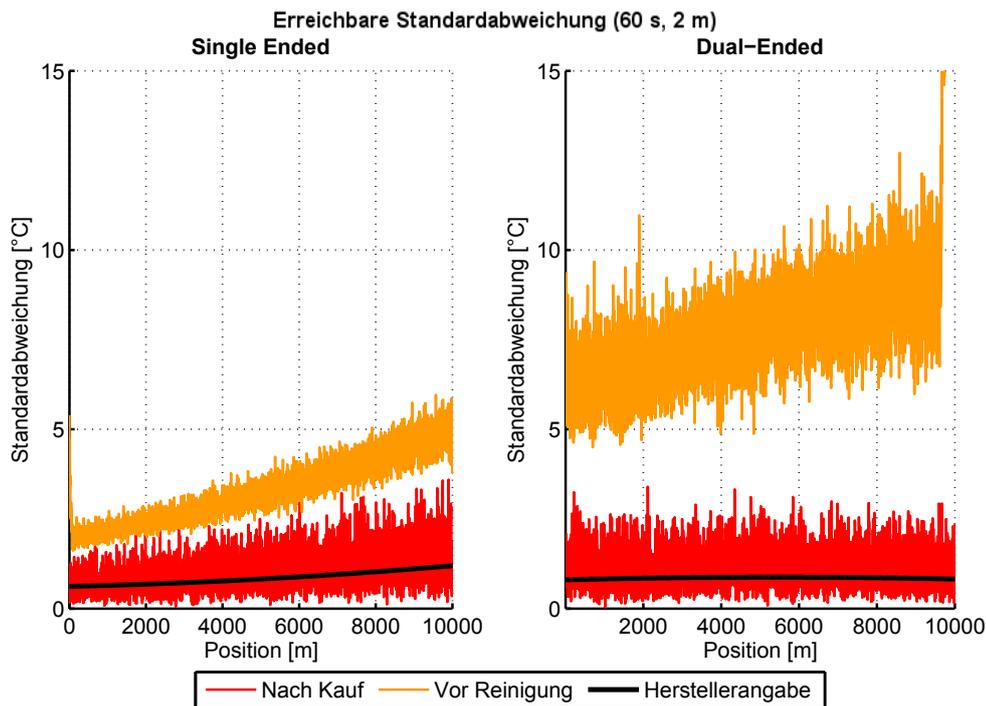


Abbildung 4.11: Standardabweichung von Single-Ended (links) und Dual-Ended Messungen (rechts) bei einer Messzeit von 60 s und einer räumlichen Auflösung von 2 m vor der Reinigung im Vergleich zur Standardabweichung nach dem Kauf und der Herstellerangabe

Die empirische Standardabweichung der Single-Ended Messungen weicht dabei im Mittel am Faserbeginn um ca. 1.3°C und am Faserende um etwa 3.2°C im Vergleich zur Standardabweichung unmittelbar nach dem Kauf ab und weist damit auch einen erheblich stärkeren Trend mit zunehmender Distanz auf. Bei den Dual-Ended Messungen ist neben einer enormen

Abweichung zur Standardabweichung nach der Anschaffung auch ein, laut Herstellerangabe, nicht zu erwartender Anstieg der empirischen Standardabweichung mit zunehmender Distanz zu beobachten, womit die Standardabweichung nicht mehr stationär ist. Die Abweichung beträgt dabei am Faserbeginn in etwa 5.4 °C und beläuft sich gegen Faserende auf bis zu ca. 8.1 °C. Zudem ist ersichtlich, dass das Signal schon etwa 300 m vor dem tatsächlichen Faserende endet.

Um dieser enormen Verschlechterung der Standardabweichung sowohl bei einseitigen als auch zweiseitigen Messungen auf den Grund zu gehen, wurden zunächst die beiden Ausgänge des APS wie auch die Konnektoren der verwendeten Patchcords mit einer Steckerkamera kontrolliert. Während die Konnektoren der Patchcords keine Auffälligkeiten zeigten, wiesen Kanal #1 und Kanal #2 des Instruments starke Verschmutzungen (in grün dargestellt) auf. Des Weiteren wurden neben den Verschmutzungen auch Absplitterungen (in rot dargestellt) am Übergang zwischen Glasfasermantel und Beschichtung vermutet, die sich nach einer Reinigung und anschließender Kontrolle mittels der Steckerkamera bestätigten (siehe Abb. 4.12).

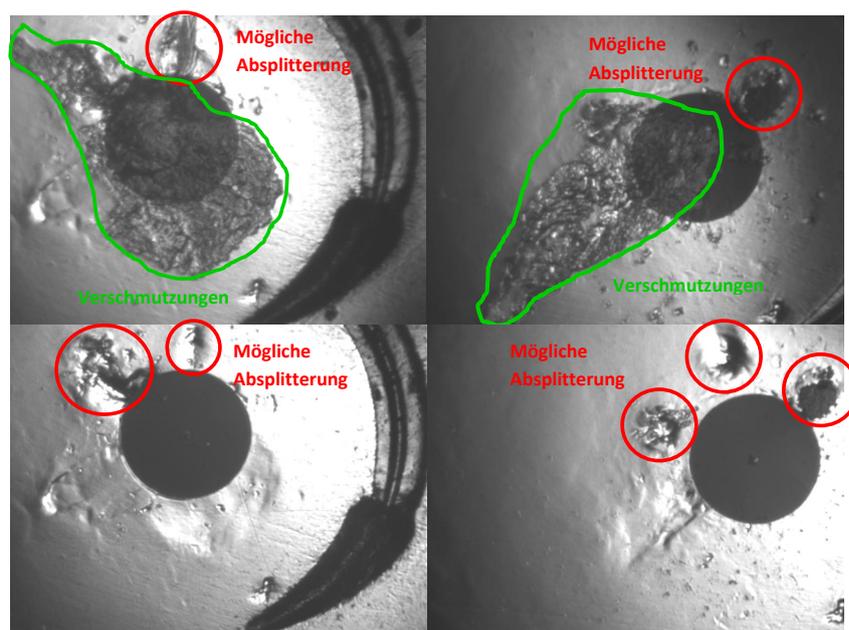


Abbildung 4.12: Steckerbilder von Kanal #1 (oben links) und Kanal #2 (oben rechts) vor der Reinigung und Steckerbilder von Kanal #1 (unten links) und Kanal #2 (unten rechts) nach der Reinigung

Um auf etwaige Auswirkung der vermuteten Absplitterungen auf Messungen zu schließen, wurde ein Testmesszyklus durchgeführt. Dieser bestand daraus, zunächst 5 Messungen von Kanal #1 zu messen, anschließend auf Kanal #2 umzustecken und 5 Messungen von Kanal #2 durchzuführen. Dieser Ablauf wurde dreimal wiederholt, um sicher zu gehen, dass es durch das Umstecken zu keiner Veränderung im Signal kommt.

Die Messeinstellungen können nachfolgender Tabelle 4.2 entnommen werden.

Tabelle 4.2: Messeinstellungen des Testzykluses zur Fehleranalyse

	Anzahl der Messungen	Single-/ Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Samplingintervall	Anmerkung
#1	5	Single-Ended	10 km	30 s	1 m	0.25 m	Kanal #1
#2	5	Single-Ended	10 km	30 s	1 m	0.25 m	Kanal #2

Da anhand der Steckerbilder nicht eindeutig ersichtlich ist, inwieweit einer der beiden Kanäle für eine zuverlässige Kalibrierung möglicherweise unbrauchbar ist, wurden vor der Kalibrierung von beiden Kanälen Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Der Vergleich der beiden Kalibrierungsmesskurven (siehe Abb. 4.13) zeigte dabei eindeutig, dass eine Kalibrierung nur von Kanal #1 möglich ist, da Kanal #2 neben einem absoluten Temperaturoffset auch ein erheblich höheres Rauschen aufweist. Zudem ist am Beginn der Messfaser, über einen Bereich von ca. 100 m ein Peak bis ca. 300 °C ersichtlich, obwohl auch in diesem Bereich die reale Temperatur nur ca. 20 °C betrug.

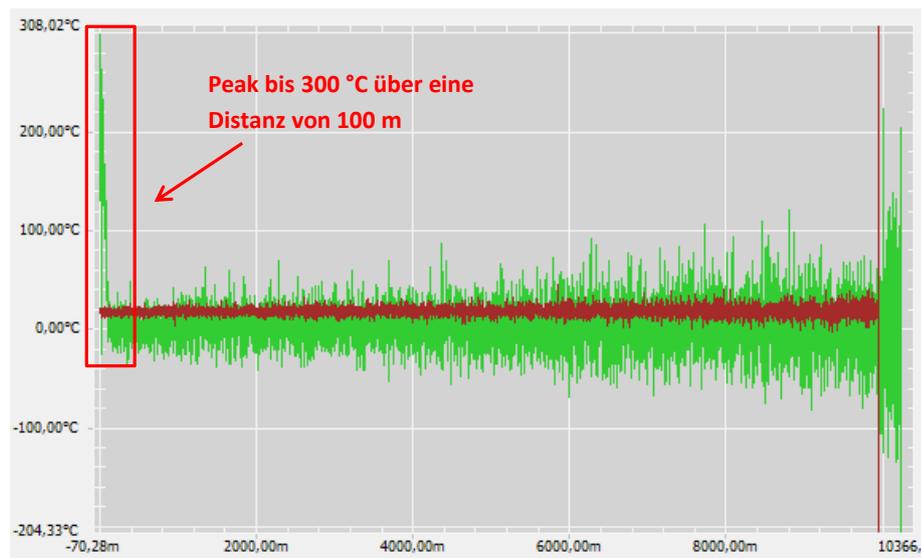


Abbildung 4.13: Kalibrierungsmessungen von Kanal #1 (rot) und Kanal #2 (grün)

Bereits die Ansicht der Messungen des anschließend durchgeführten Messzykluses in der Umgebung des DTS Configurators (siehe Abb. 4.14) verdeutlicht, dass Kanal #2 beschädigt ist und damit sowohl für Single-Ended als auch für Dual-Ended Messungen unbrauchbar ist. Im Bereich der ersten 100 m zeigt die Temperaturkurve von Kanal #2 (Abb. 4.14 oben) deutliche Unregelmäßigkeiten mit Temperaturen von bis zu 200 °C. Die Ursache dafür ergibt sich aus der Betrachtung der Dämpfungskurve von Kanal #2 (Abb. 4.14 unten), die zum einen Unregelmäßigkeiten am Faserbeginn und zum anderen im Vergleich zu Kanal #1 eine 8-fach höhere Dämpfung aufweist.

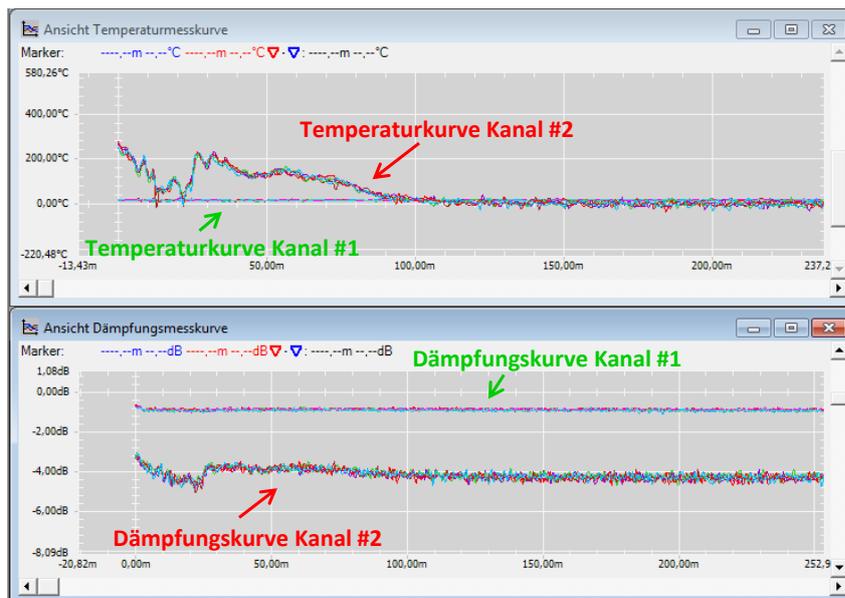


Abbildung 4.14: Zoom der Temperatur- (oben) und Dämpfungskurve (unten) über die ersten 200 m der Faser für Kanal #1 und Kanal #2 zur Fehleranalyse dargestellt im DTS Configurator

Auch ein Vergleich der Standardabweichung von Kanal #1 und Kanal #2 mit der Herstellerangabe in Abb. 4.15 bestätigt, dass mit Kanal #2 und damit auch keine sinnvollen Dual-Ended Messungen mehr möglich sind. Während die Standardabweichung von Kanal #1 nach der Reinigung, wie nach dem Kauf des Instruments, wieder im Bereich der Herstellerangabe liegt, ist die Standardabweichung von Kanal #2 mit ca. 7.2 °C im Mittel um das 4.5-fache schlechter.

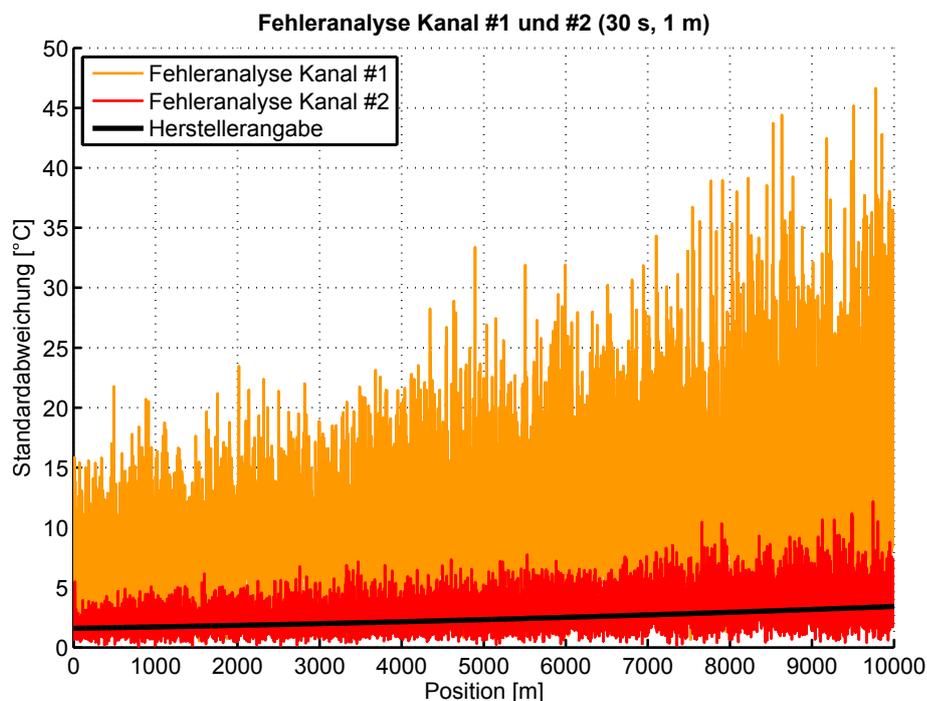


Abbildung 4.15: Standardabweichung der Fehleranalyse von Kanal #1 und #2

In Anbetracht der erzielten Ergebnisse wurde daher beschlossen das Instrument zur Reparatur zum Hersteller AP Sensing einzuschicken. Im Zuge der Reparatur wurde der Anschluss von Kanal #2 getauscht, wie auch die Kontrolle durch die Steckerkamera in Abb. 4.16 zeigt. Kanal #1 wurde für gut befunden und daher nicht ausgetauscht. Des Weiteren wurde eine Kalibrierung des Instruments sowie eine Aktualisierung der Firmware durchgeführt.

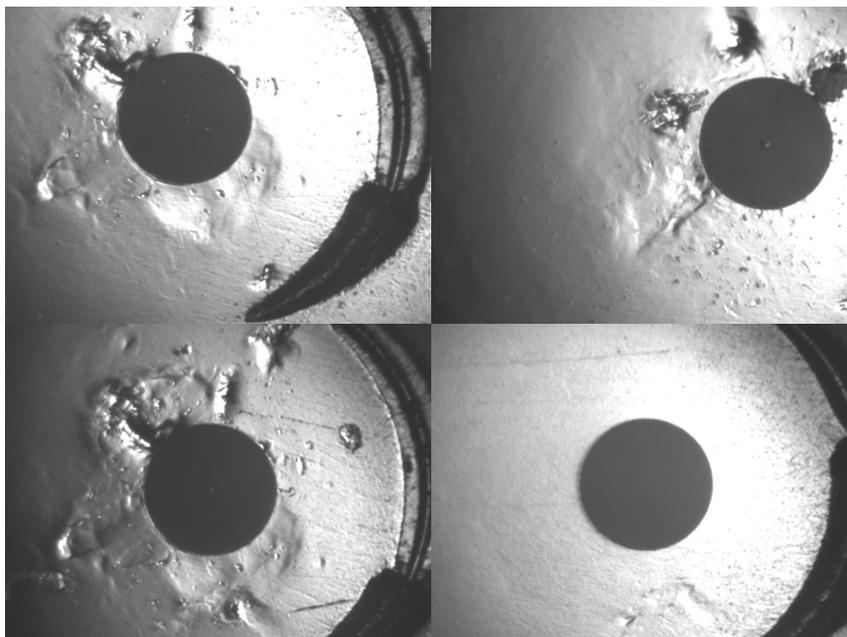


Abbildung 4.16: Steckerbilder von Kanal #1 (oben links) und Kanal #2 (oben rechts) vor der Reparatur und Steckerbilder von Kanal #1 (unten links) und Kanal #2 (unten rechts) nach der Reparatur

Zur Überprüfung der Standardabweichung beider Ausgänge nach der Reparatur wurde ein Eingangstest mit den Messeinstellungen aus Tabelle 4.3, in Form desselben Zyklus wie im Rahmen der Fehleranalyse, durchgeführt. Auch hier erfolgte die Kalibrierung über Kanal #1.

Tabelle 4.3: Messeinstellungen des Eingangstests nach der Reparatur

	Anzahl der Messungen	Single-/ Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Sampling-intervall
Kanal #1	5	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.25 m
Kanal #2	5	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.25 m

Eine erste Sichtung der Messergebnisse mittels des DTS Configurators (siehe Abb. 4.17) zeigte, dass die Messergebnisse von Kanal #1 und Kanal #2 keine Unregelmäßigkeiten mehr aufweisen. Lediglich ein geringer Offset zwischen den beiden Temperaturmesskurven ist zu sehen, welcher auf die unterschiedlichen Dämpfungen der beiden Kanäle zurückzuführen ist. Kanal #1 besitzt nach wie vor eine Dämpfung von ca. 0.7 dB, Kanal #2 aufgrund des Tausches eine Dämpfung von 0.4 dB.

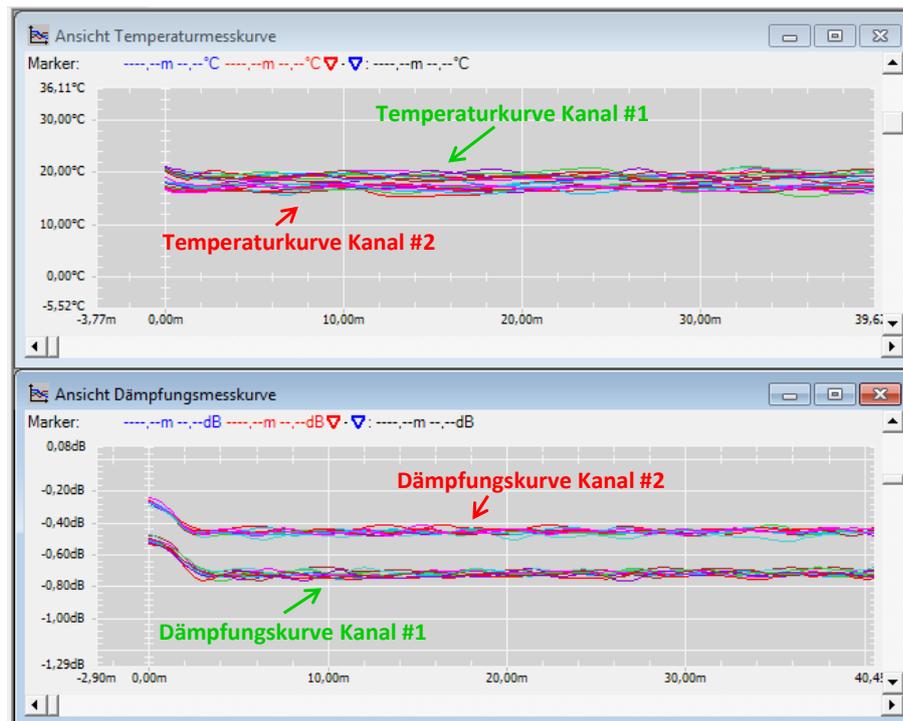


Abbildung 4.17: Zoom der Temperatur- (oben) und Dämpfungskurve (unten) über die ersten 200 m der Faser für Kanal #1 und Kanal #2 im Rahmen des Eingangstests nach der Reparatur dargestellt im DTS Configurator

Hinsichtlich der empirischen Standardabweichung besteht für Kanal #1 dabei die Vermutung, dass sich diese gegenüber vor der Reparatur nicht geändert hat, während für Kanal #2 erwartet wird, dass dessen empirische Standardabweichung wieder der Herstellerangabe entspricht.

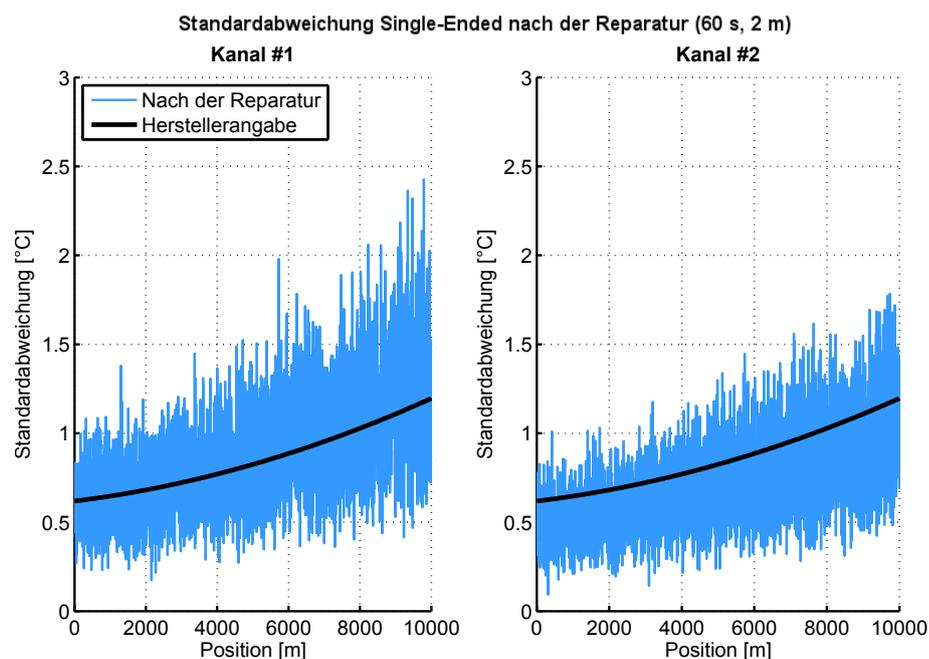


Abbildung 4.18: Standardabweichung von Single-Ended Messungen von Kanal #1 (links) und Kanal #2 (rechts) bei einer Messzeit von 60 s und einer räumlichen Auflösung von 2 m nach der Reparatur im Vergleich zur Herstellerangabe

Wie obige Abb. 4.18 allerdings verdeutlicht, entspricht die empirische Standardabweichung von Kanal #1 (links) wider Erwarten exakt der Herstellerangabe und Kanal #2 (rechts) weist sogar eine um ca. 0.2 °C geringfügig bessere empirische Standardabweichung auf. Dies lässt sich auf die Instrumentenkalibrierung, die im Zuge der Reparatur durchgeführt wurde, zurückführen.

In Folge weiterer Messungen unmittelbar nach dem Eingangstest, verschlechterte sich jedoch die empirische Standardabweichung von Kanal #1 wieder zusehends, wie die nachfolgende Abb. 4.19 zeigt.

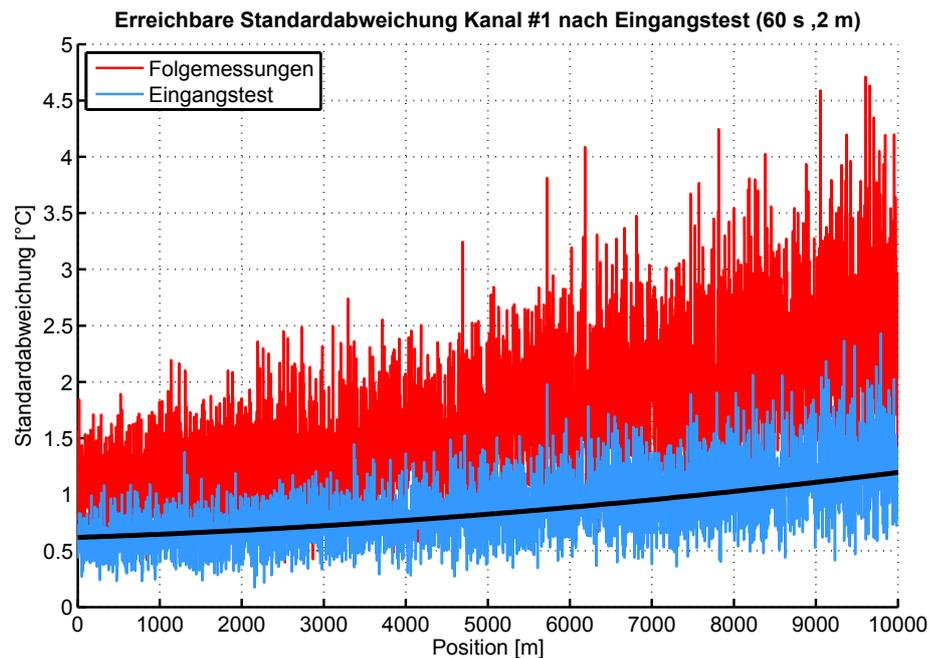


Abbildung 4.19: Standardabweichung von Single-Ended Messungen von Kanal #1 unmittelbar nach dem Eingangstest im Vergleich zur im Rahmen des Eingangstest erreichten Standardabweichung

Daraufhin wurde Kanal #1 gereinigt und nochmals mit der Steckerkamera kontrolliert (siehe Abb. 4.20). Es erwies sich dabei, dass sich die Absplitterungen bei Kanal #1, welcher im Zuge der Reparatur nicht ausgetauscht wurde, verstärkt haben.

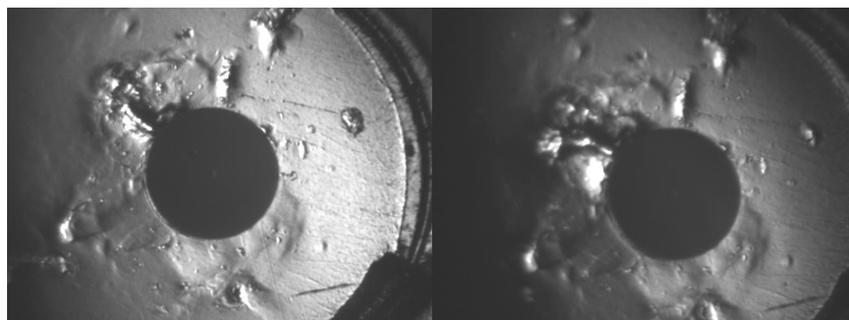


Abbildung 4.20: Steckerbilder von Kanal #1 nach der Reparatur (links) und unmittelbar nach dem Eingangstest (rechts)

Dahingehend sind zuverlässige und präzise Messungen mit Kanal #1 und in weitere Folge auch zuverlässige und präzise Dual-Ended Messungen nicht mehr möglich.

In der Zwischenzeit wurde auch der defekte Kanal #1 im Zuge einer zweiten Reparatur vom Hersteller getauscht und es ist nun sowohl mit Kanal #1 als auch mit Kanal #2 die Herstellerangabe wieder erreichbar. Die Reparatur wurde allerdings erst nach Abschluss der Arbeit fertig gestellt, weshalb im Folgenden nicht mehr darauf eingegangen wird.

Angesichts der sich ständig ändernden empirischen Standardabweichung, wurde in den nachfolgenden Kapiteln, bei den meisten Versuchen auf ein Vergleich der ermittelten Standardabweichung mit der Herstellerangabe verzichtet.

4.3.2 Räumliche Auflösung und Messzeit

Um die Abhängigkeit der Standardabweichung von der Einstellung der räumlichen Auflösung und der Messzeit zu untersuchen, wurden im Single-Ended Modus jeweils 10 Wiederholungsmessungen mit den in Tabelle 4.4 gelisteten Messeinstellungen ausgeführt.

Tabelle 4.4: Messeinstellungen der Untersuchung der räumlichen Auflösung und Messzeit

	Anzahl der Messungen	Single-/ Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Samplingintervall
#1	10	Single-Ended	10 km	60 s	1 m	0.25 m
#2	10	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.25 m
#3	10	Single-Ended	10 km	600 s	2 m	0.25 m

Abb. 4.21 stellt die empirische Standardabweichung über 10 Wiederholungsmessungen für die getroffenen Einstellungen dar. Es zeigt sich dabei, dass die Standardabweichung in erster Linie von der Messzeit und der räumlichen Auflösung abhängt. Je länger die Messzeit und je geringer die räumliche Auflösung desto besser wird die Standardabweichung. Mit abnehmender Messzeit und höherer räumlicher Auflösung verschlechtert sich die Standardabweichung demzufolge.

In weiterer Folge stellte sich daher auch die Frage, ob auch durch eine Mittelung über die Messzeit bzw. über die räumliche Auflösung dieselbe Standardabweichung erreicht werden kann, wie bei einer Änderung derselben Parameter in den Messeinstellungen.

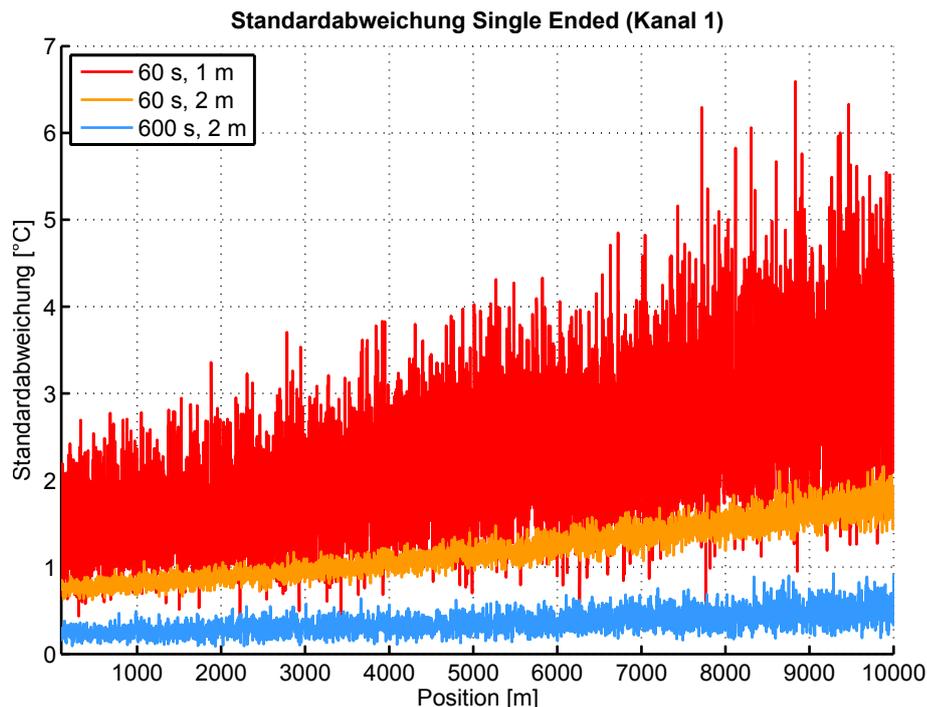


Abbildung 4.21: Standardabweichung bei unterschiedlicher Messzeit und räumlicher Auflösung

Dafür wurde zunächst eine Single-Ended Messung mit einer Messzeit von 60 s und einer räumlichen Auflösung von 1 m über 2 m gemittelt. Abb. 4.22, zeigt eine Gegenüberstellung der empirischen Standardabweichung bei 60 s und 1 m (links), 60 s und 2 m (Mitte) und der Mittelung der Messung mit 60 s und 1 m über 2 m (rechts). Dabei ist ersichtlich, dass mit einer Mittelung über die räumliche Auflösung nicht dieselbe Standardabweichung einer Messung, bei welcher die räumliche Auflösung eingestellt wurde, erreicht werden kann. Grund dafür ist die unterschiedliche Pulslänge, die in Abhängigkeit der räumlichen Auflösung ausgesendet wird.

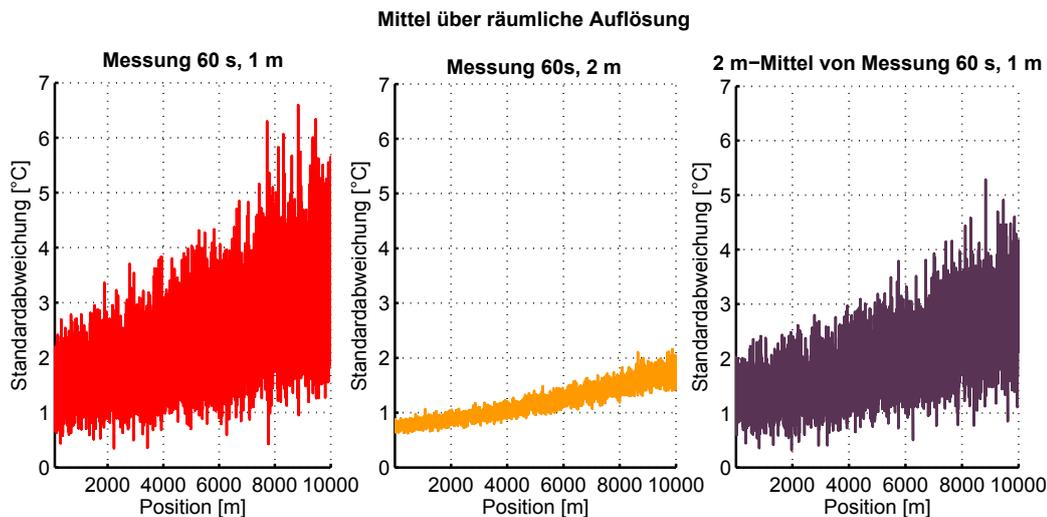


Abbildung 4.22: Gegenüberstellung der Standardabweichungen über jeweils 10 Wiederholungsmessungen bei einer Messeinstellung von 60 s und 1 m (links), einer Messeinstellung von 60 s und 2 m (Mitte) und der Mittelung der Messung mit 60 s und 1 m über 2 m (rechts)

Die Mittelung über eine Messzeit von 600 s wurde realisiert, indem 10 Wiederholungsmessung mit einer Messzeit von 60 s und einer räumlichen Auflösung von 2 m gemittelt wurden. Eine Gegenüberstellung der empirischen Standardabweichung bei 60 s und 2 m (links), 600 s und 2 m (Mitte) und der Mittelung von 10 Messungen mit 60 s und 2 m in Abb. 4.23 zeigt, dass durch eine Mittelung über die Messzeit diesselbe Standardabweichung wie bei tatsächlich eingestellter Messzeit erreicht werden kann. Die Standardabweichung lässt sich damit durch eine Mittelung über die Messzeit, oder anders ausgedrückt, durch eine Mittelung von n Messungen um \sqrt{n} verbessern. Daraus ergibt sich der Beweis, dass das Gerät auf dieselbe Art und Weise agiert und innerhalb der vorgegebenen Messzeit eine entsprechende Anzahl von Mehrfachmessungen tätigt, die anschließend gemittelt werden.

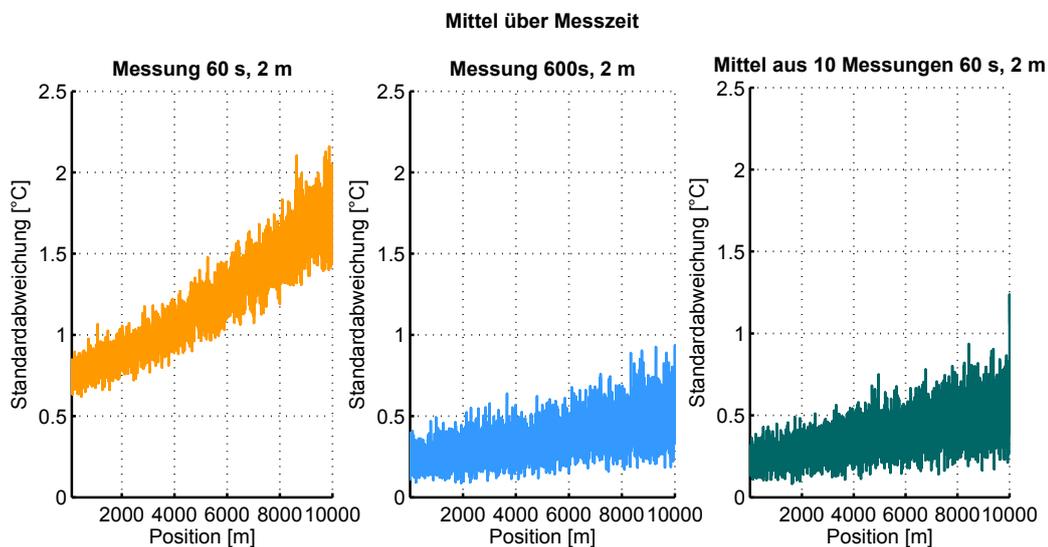


Abbildung 4.23: Gegenüberstellung der Standardabweichungen über jeweils 10 Wiederholungsmessungen bei einer Messeinstellung von 60 s und 2 m (links), einer Messeinstellung von 600 s und 2 m (Mitte) und der Mittelung der Messung mit 60 s und 2 m über 600 s (rechts)

4.3.3 Single-Ended versus Dual-Ended Modus

Neben der Messzeit und der räumlichen Auflösung beeinflusst auch die Messeinstellung Single-Ended oder Dual-Ended die Standardabweichung der getätigten Messung. Während sich bei Single-Ended Messungen die Standardabweichung mit zunehmender Distanz verschlechtert, verschlechtert sich diese bei Dual-Ended-Messung bis zur Hälfte der Messdistanz und verbessert sich bis zum Ende der Messdistanz wiederum bis zum Ausgangswert bei Länge 0 km.

Aus Sicht der Signalanalyse handelt es sich bei Single-Ended Messungen daher um ein nicht stationäres Rauschen, während es für Dual-Ended Messungen annähernd stationär ist. Dies konnte auch in den praktischen Messungen verifiziert werden (siehe Abb. 4.24).

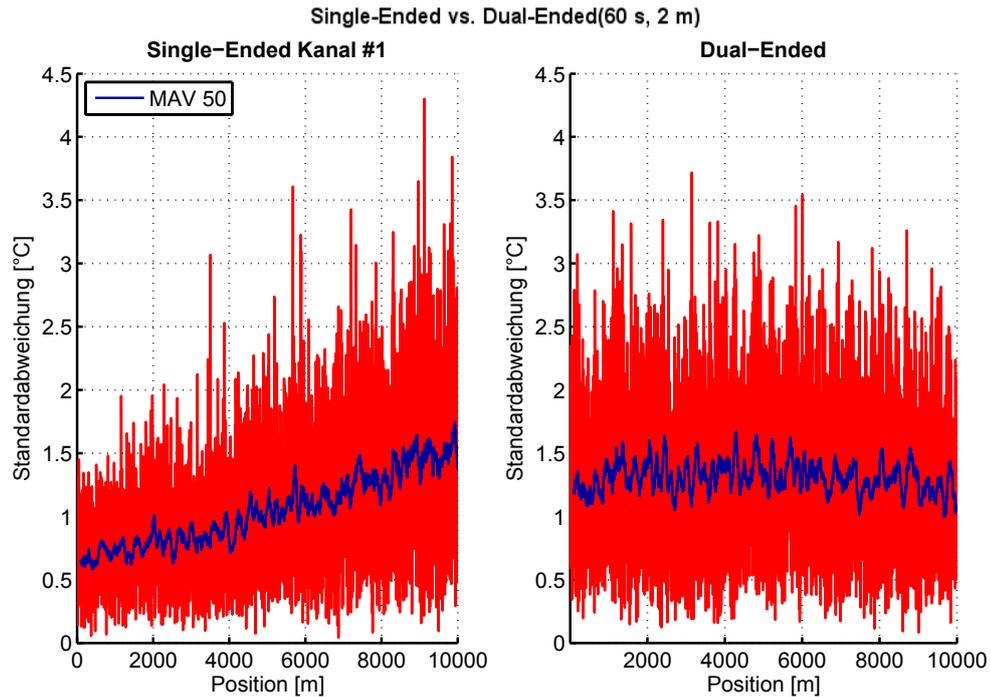


Abbildung 4.24: Standardabweichung für Messeinstellung Single-Ended (links) und Dual-Ended (rechts)

4.3.4 Refraktionsindex

Refraktion tritt laut Kechavarzi et al. [2016] immer dann auf, wenn Licht beim Übergang zwischen zwei Medien mit unterschiedlicher Dichte seine Geschwindigkeit ändert. Je größer der Dichteunterschied, desto größer ist die Differenz der Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit auch die Refraktion. Neben der Dichte hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit auch von der Wellenlänge des eingekoppelten Lichtstrahls ab. Je kürzer die Wellenlänge des eingekoppelten Lichtstrahls, desto langsamer bewegt sich dieser durch das Medium und erfährt daher eine größere Refraktion.

Der Refraktionsindex ist ein Maß für die Dichte eines Mediums. Er beschreibt das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten eines Lichtes im Vakuum c_0 und in einem Medium c und ist daher charakteristisch für jedes Medium. Aufgrund der indirekten Proportionalität nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Refraktionsindex ab und in weiterer Folge mit abnehmendem Refraktionsindex zu. (vgl. Kechavarzi et al. [2016])

$$n = c_0/c \quad (4.1)$$

In Bezug auf die faseroptische Sensorik basierend auf der Raman-Rückstreuung ist die korrekte Angabe des Refraktionsindex des Glasfaserkerns von großer Bedeutung.

Der Refraktionsindex gibt indirekt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der eingekoppelten Lichtwelle im Kern der Faser an, welche zum einen für die Umrechnung des Intensitätsverhältnisses in eine Temperaturkurve (siehe Kapitel 2.1.3), für die Bestimmung der Faserlänge auf Basis der Laufzeitmessung und in Folge dessen für die Positionsdiskretisierung bekannt sein muss. Wird der Refraktionsindex für eine Faser falsch angenommen, wird zum einen das gemessene Intensitätsverhältnis nicht korrekt umgerechnet und die Temperaturkurve erfährt einen Offset, zum anderen ist die bestimmte Faserlänge gegenüber der tatsächlichen Faserlänge entweder zu kurz oder zu lang und damit auch die Positionsdiskretisierung fehlerhaft.

Bei der Messung mittels des APS erfolgt die Eingabe des Refraktionsindex im Zuge der Kalibrierung des Sensorelements (siehe Kapitel 4.2.2). Da der Refraktionsindex nach der Eingabe immer auf zwei Nachkommastellen gerundet angezeigt wird, stellte sich die Frage, ob für die Messungen der tatsächlich angegebene oder der gerundete Wert herangezogen wird. Um dies zu überprüfen wurden auf der einen Seite mit dem exakten Wert von 1,4682 und auf der anderen Seite mit dem gerundeten Wert von 1,47 jeweils 10 einseitige und zweiseitige Messungen durchgeführt. Die Kalibrierung erfolgte dabei jeweils ausschließlich mit dem exakten Refraktionsindex von 1,4682. Anschließend wurde lediglich der Refraktionsindex durch den gerundeten Wert ersetzt und wiederum jeweils 10 Messungen durchgeführt. Die übrigen Messeinstellungen können Tabelle 4.5 entnommen werden.

Tabelle 4.5: Messeinstellungen der Untersuchung des Refraktionsindex

	Anzahl der Messungen	Single-/Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Samplingintervall	Refraktionsindex
#1	10	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.25 m	nicht gerundet
#2	10	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.25 m	gerundet
#3	10	Dual-Ended	10 km	60 s	2 m	0.25 m	gerundet
#4	10	Dual-Ended	10 km	60 s	2 m	0.25 m	nicht gerundet

In Abb. 4.25 ist die Absoluttemperatur aus einem Mittel von 10 Wiederholungsmessungen und die empirische Standardabweichung sowohl im Single-Ended (links) als auch Dual-Ended Modus (rechts) für die Messung mit nicht gerundetem und gerundetem Refraktionsindex dargestellt. Die beiden Absoluttemperaturkurven zeigen dabei keinen Offset zueinander und auch die Standardabweichungen weisen keine Beeinflussung durch die unterschiedliche Wahl des Refraktionsindex auf.

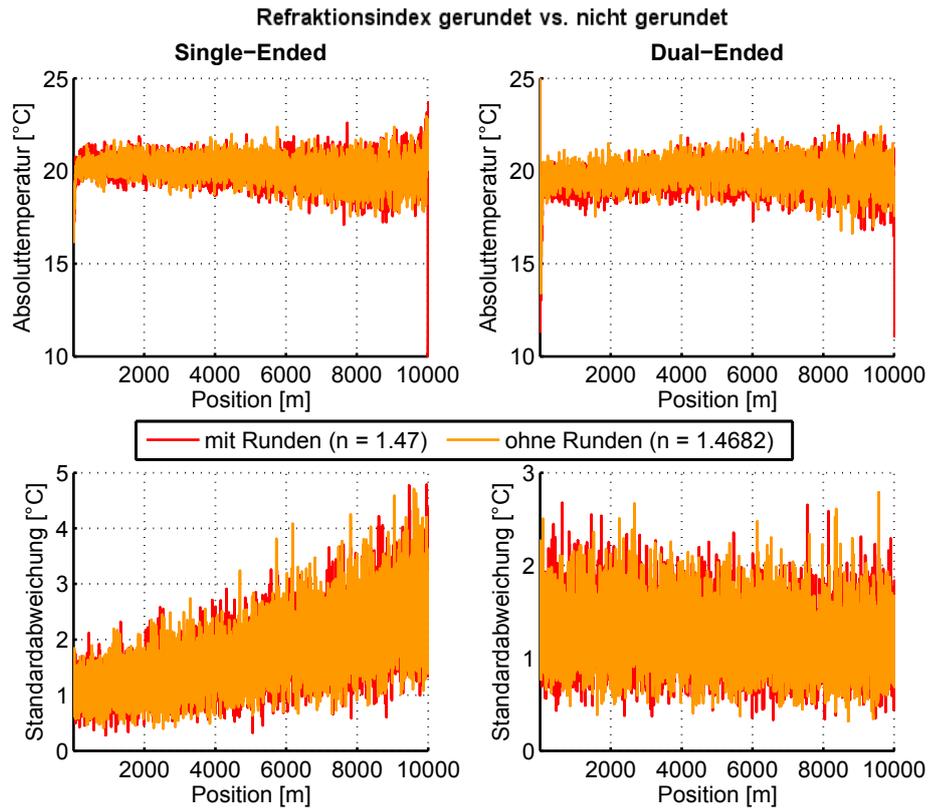


Abbildung 4.25: Vergleich zwischen dem gerundeten Refraktionsindex ($n = 1.47$) und nicht gerundeten ($n = 1.4682$) im Single-Ended (links) und Dual-Ended Modus (rechts)

Betrachtet man jedoch einen Zoom des Faserendes (siehe Abb. 4.26), ist zu sehen, dass sowohl bei der Single-Ended als auch bei der Dual-Ended Einstellung die Faserlänge jener Messung mit gerundetem Refraktionsindex um 12 m kürzer ist. Theoretisch gesehen beträgt die Differenz zwischen dem Refraktionsindex von 1.47 und 1.4682 jedoch 0.18 %, woraus für eine Faserlänge von ca. 10 km ein Längenoffset von ca. 18 m resultieren müsste. Für die Differenz von 6 m zwischen dem theoretischen und tatsächlichen Längenoffset liegt derzeit keine Erklärung vor.

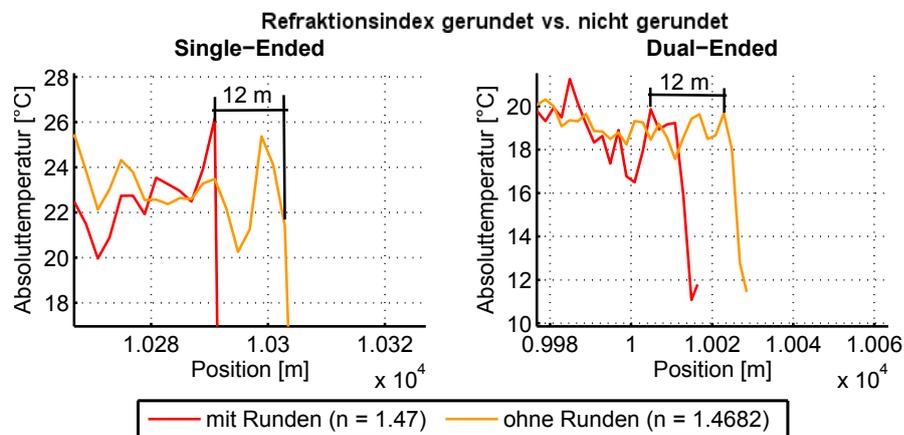


Abbildung 4.26: Zoom des Faserendes des Vergleichs zwischen dem gerundeten Refraktionsindex ($n = 1.47$) und nicht gerundet ($n = 1.4682$) im Single-Ended (links) und Dual-Ended Modus (rechts)

4.3.5 Samplingintervall

Wie die Messzeit und die räumliche Auflösung wird auch das Samplingintervall im Zuge der Messeinstellungen festgelegt. Das Samplingintervall stellt den Abstand zwischen zwei Samplingpunkten entlang der gemessenen Temperaturkurve dar (siehe Kapitel 4.2.1). Kurz gesagt, liegen, bei einer räumlichen Auflösung von 1 m und einem Samplingintervall von z.B. 0.5 m, 2 Samplingpunkte innerhalb der räumlichen Auflösung (siehe Abb. 4.3.2). Als minimaler Wert kann laut Hersteller 0.25 m angenommen werden. Nach oben hin ist der Wert des Samplingintervalls auf die festgelegte räumliche Auflösung beschränkt. Um Temperatursprünge jedoch zuverlässig erfassen zu können, sollte die Wahl des Samplingintervalls in der Regel nach dem Abtasttheorem (vgl. [Oppenheim und Willsky, 1992, S.435ff]) erfolgen.

$$\text{Samplingintervall} < \text{räumliche Auflösung}/2 \quad (4.2)$$

Um den Einfluss des Samplingintervalls auf die Standardabweichung zu untersuchen, wurde eine Reihe von Messungen mit variierendem Samplingintervall durchgeführt. Die übrigen Messeinstellungen, wie auch die Kalibrierparameter blieben während des gesamten Versuchs konstant und können der nachfolgenden Tabelle 4.6 entnommen werden.

Tabelle 4.6: Messeinstellungen der Untersuchung des Samplingintervalls

	Anzahl der Messungen	Single-/Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Samplingintervall
#1	10	Dual-Ended	10 km	30 s	2 m	0.25 m
#2	10	Dual-Ended	10 km	30 s	2 m	0.5 m
#3	10	Dual-Ended	10 km	30 s	2 m	0.75 m
#4	10	Dual-Ended	10 km	30 s	2 m	1 m
#5	10	Dual-Ended	10 km	30 s	2 m	1.25 m
#6	10	Dual-Ended	10 km	30 s	2 m	1.5 m
#7	10	Dual-Ended	10 km	30 s	2 m	1.75 m
#8	10	Dual-Ended	10 km	30 s	2 m	2 m

In der nachfolgenden Abb. 4.27 ist die Absoluttemperatur als Mittel über 10 Wiederholungsmessungen (oben) und die empirische Standardabweichung (unten) für die in Tabelle 4.6 angeführten Samplingintervalle dargestellt. Dabei kann weder auf eine Abhängigkeit der Abweichung der Messwerte vom Mittelwert noch der Standardabweichung von der Wahl des Samplingintervalls geschlossen werden. Dies ist in diesem Fall jedoch zu erwarten, da die Temperatur entlang der gesamten Faserlänge konstant ist. Wie es sich allerdings für den Fall, dass eine Temperatursprung entlang der Faser auftritt, verhält, gilt es noch zu untersuchen.

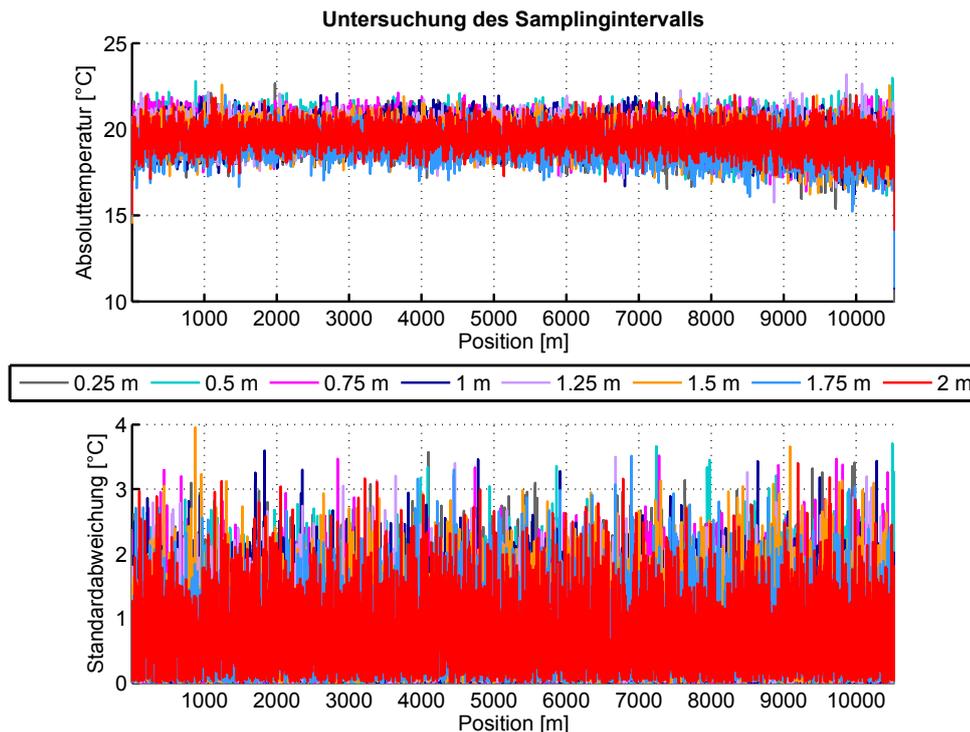


Abbildung 4.27: Vergleich der Temperaturkurven (oben) und empirischen Standardabweichungen (unten) bei unterschiedlichen Samplingintervallen

4.3.6 Start-Wert

Der Start-Wert beschreibt, wie in Kapitel 4.2.1 erläutert, die Startposition der ausgegebenen Temperaturkurve. Wird der Start-Wert mit 0 m angegeben, entspricht die Startposition dem Ausgangspunkt am Instrument. Setzt man bspw. einen Start-Wert von -50 m, wird die Startposition in das Innere des Instrumentes verlegt und damit 50 m der internen Faserspule mitgemessen. Um zu untersuchen, ob die Änderung der Start-Wertes einen Einfluss hat, wurden einseitige Messungen zum einen mit einem Start-Wert von 0 m und zum anderen mit einem Start-Wert von -50 m durchgeführt. Die Messeinstellungen können Tabelle 4.7 entnommen werden.

Tabelle 4.7: Messeinstellungen zur Untersuchung des Einflusses eines veränderten Start-Wertes

	Anzahl der Messungen	Single-/Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Samplingintervall	Anmerkung
#1	10	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.25 m	Start 0 m
#2	10	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.25 m	Start - 50 m

In Abb. 4.28 sind die Absoluttemperatur als Mittel über 10 Wiederholungsmessungen (oben) und die empirische Standardabweichung (unten) entlang der Faser bei einem Start-Wert von 0 m und -50 m dargestellt. Eine Änderung des Start-Wertes beeinflusst dabei weder die Abweichung der Messwerte vom Mittelwert entlang der Faserlänge noch die Standardabweichung.

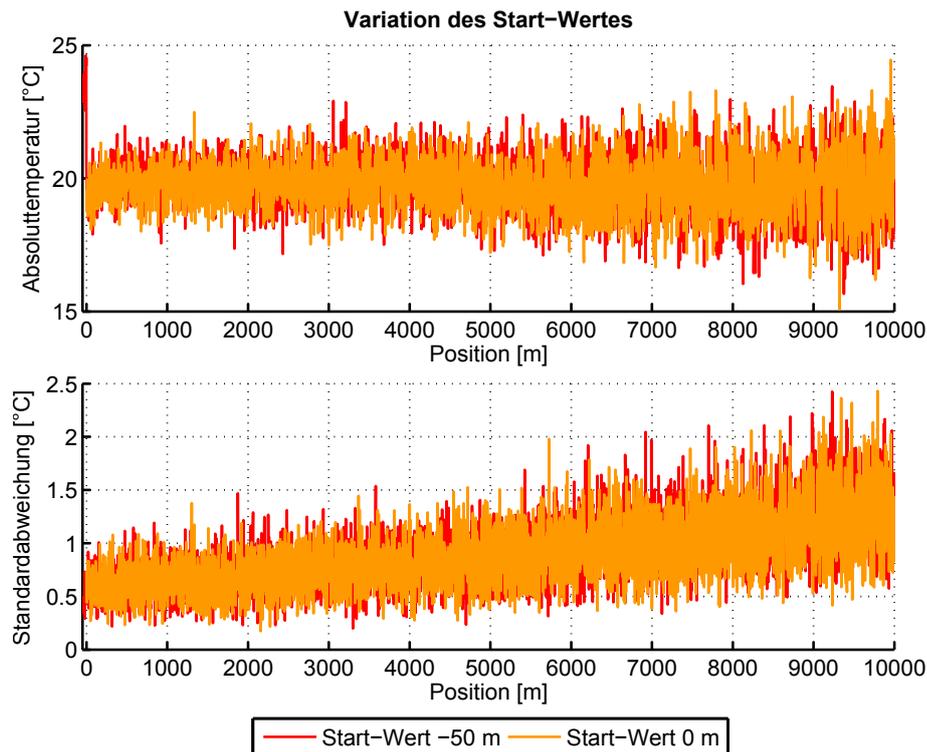


Abbildung 4.28: Vergleich der Temperaturkurven (oben) und empirischen Standardabweichungen (unten) bei einem Startwert von 0 m und -50 m

4.4 Untersuchung der effektiven Reichweite

Laut Herstellerangabe ist das APS für eine Reichweite von 12 km konzipiert. In einigen Anwendungsbereichen sind jedoch bereits faseroptische Sensorkabel zum Zweck der Dehnungsmessung verlegt, deren Länge üblicherweise 12 km deutlich überschreiten. Damit stellte sich die Frage, bis zu welcher Faserlänge eine Messung möglich ist und welche Rückstreuungseffekte dabei auftreten.

Zur Untersuchung der effektiven Reichweite und der auftretenden Rückstreuungseffekte wurden Messungen mit faseroptischen Sensoren von 12 km, 14 km, 16 km und 20.5 km Länge durchgeführt. Die Messeinstellungen, mit welchen die Messungen durchgeführt wurden, sind in nachfolgender Tabelle 4.8 angeführt.

Tabelle 4.8: Messeinstellungen der Untersuchung der effektiven Reichweite

	Single-/ Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Sampling- intervall
#1	Single-Ended	12 km	60 s	2 m	0.5 m
#2	Single-Ended	14 km	60 s	2 m	0.5 m
#3	Single-Ended	16 km	60 s	2 m	0.5 m
#4	Single-Ended	20 km	60 s	2 m	0.5 m

Für die Messungen standen Faserspulen mit 2 km, 4 km, 10 km und 10.5 km zur Verfügung. Um die entsprechende Längen zu realisieren, wurden die Faserspulen daher wie folgt zusammengeslossen:

12 km entspricht 10 km + 2 km

14 km entspricht 10 km + 4 km

16 km entspricht 10 km + 4 km + 2 km

20.5 km entspricht 10 km + 10.5 km

In. Abb. 4.29 sind jeweils die Absoluttemperaturen über die Messdistanzen von 12 km (links oben), 14 km (rechts oben), 16 km (links unten) und 20 km (rechts unten) dargestellt.

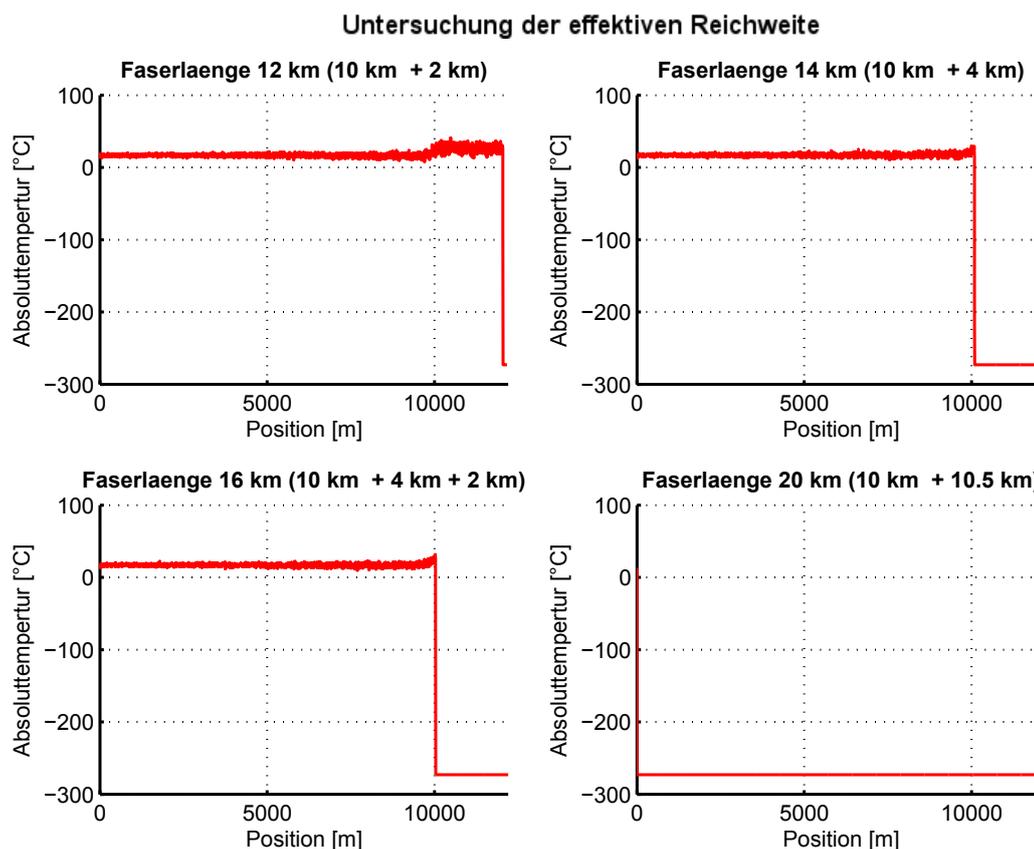


Abbildung 4.29: Untersuchung der effektiven Reichweite

Es zeigt sich dabei, dass eine Messung bis zur maximalen Messdistanz von 12 km ohne Probleme möglich ist. Überschreitet die Messdistanz die maximale messbare Distanz um 2 km oder 4 km erfolgt die Messung nur noch bis zur ersten Steckverbindung bei 10 km. Demzufolge bestand die Vermutung, dass das vom 4 km bzw. 6 km Faserstück rückreflektierte Signal zu schwach ist, um die Steckverbindung auf seinem Rückweg zum Instrument erneut zu passieren. Im Gegensatz dazu ist bei der Faserverbindung mit 20.5 km Länge, obwohl sich auch hier die Steckverbindung

bei 10 km innerhalb der maximalen Reichweite befindet, keine Messung mehr möglich, wobei der Grund dafür derzeit nicht bekannt ist.

Um die Vermutung zu bestätigen, dass das rückgestreute Signal zu schwach ist, um die Steckverbindung zu passieren, wurde der Zusammenschluss der Faserrollen, wie nachfolgend angeführt, in einem zweiten Messexperiment umgedreht.

12 km entspricht 2 km + 10 km

14 km entspricht 4 km + 10 km

16 km entspricht 2 km + 4 km + 10 km

20.5 km entspricht 10.5 km + 10 km

Bei der 20.5 km langen Faserverbindung, wurde zudem zunächst nur über die erste Faserspule von 10.5 km Länge kalibriert und erst für die Messung die zweite Faserspule von 10 km dazugeschlossen.

Abb. 4.30 zeigt die Absoluttemperaturkurven beim umgekehrten Zusammenschluss der Faserrollen.

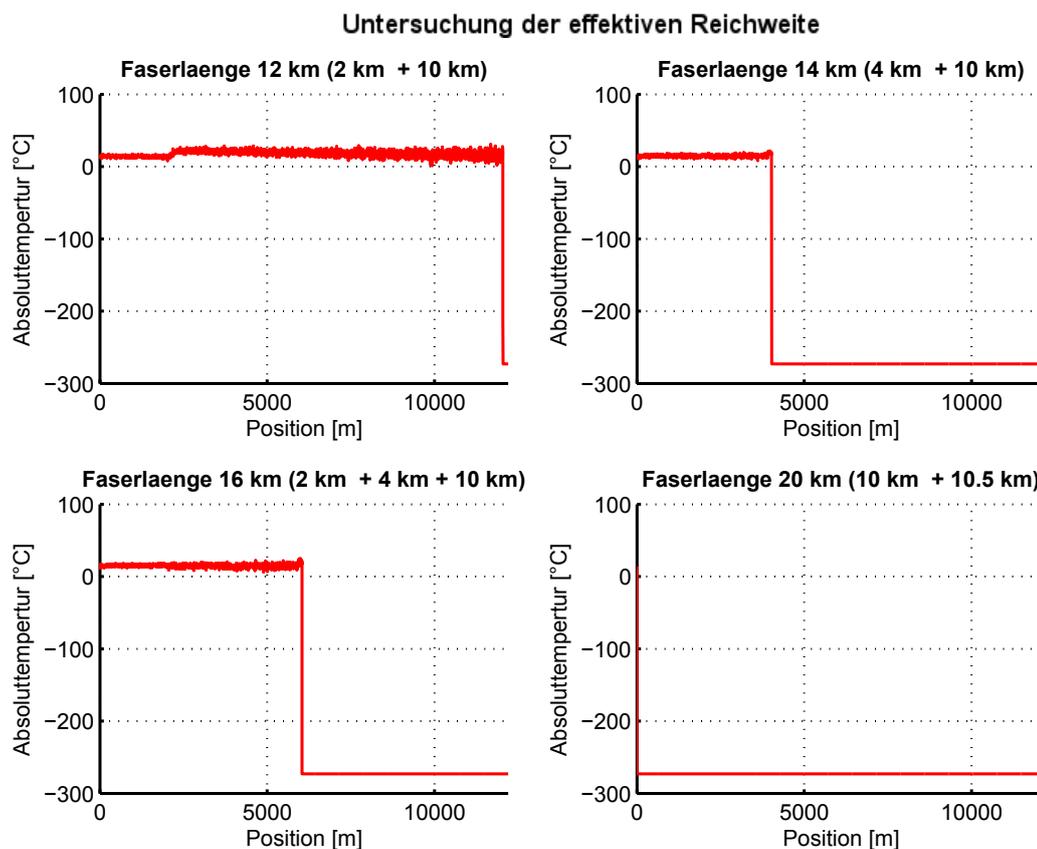


Abbildung 4.30: Untersuchung der effektiven Reichweite mit umgekehrter Faserzusammensetzung

Durch das Umdrehen des Zusammenschlusses der Faserverbindungen konnte die Vermutung bestätigt werden. Denn auch hier reicht die Messkurve bei den Faserverbindungen von 14 km und 16 km Länge jeweils bis zur ersten sich noch innerhalb der Messdistanz befindlichen Steckverbindung. Wie zuvor zeigt sich auch hier, dass bei einer Faserlänge von 20.5 km trotz der Kalibrierung auf lediglich 10.5 km keine Messung mehr möglich ist.

Grundsätzlich kann es jedoch bei Fasern, die die maximale Reichweite überschreiten, auch ohne das Vorhandensein von Steckverbindungen zu Problemen kommen, da der nächste Laserpuls bereits ausgesendet wird, bevor der rückreflektierte Puls am Detektor angelangt ist. Damit kommt es zur Überlagerung des rückreflektierten Pulses mit dem ausgesendeten Puls und demzufolge zu einer Verfälschung des Messergebnisses.

Des Weiteren stellte sich im Rahmen der Messungen heraus, dass das Instrument über eine interne Distanzbeschränkung von 12200 m verfügt. Dies bedeutet, dass der Stop-Wert (siehe 4.2.1) maximal auf den genannten Wert von 12200 m festgelegt werden kann.

4.5 Untersuchung des Rauschverhaltens

Das Rauschverhalten faseroptischer Signale wird durch vielerlei Faktoren beeinflusst. In den nachfolgenden Kapitel 4.5.1 bis 4.5.3 werden die Auswirkungen von zunehmender Messdistanz, Dämpfung und Temperatur auf das Rauschverhalten erläutert.

4.5.1 Rauschverhalten bei zunehmender Distanz

Bereits die Betrachtung der Standardabweichung in Kapitel 4.3.1 zeigt, dass die Distanz, insbesondere bei Single-Ended aber auch bei Dual-Ended Messungen, einen erheblichen Einfluss auf die Standardabweichung hat. Es lässt sich dabei vermuten, dass bei Single-Ended Messungen die Abweichung der Messwerte vom Mittelwert trichterförmig mit zunehmender Distanz zunimmt, während bei Dual-Ended Messungen die Abweichung der Messwerte vom Mittelwert wie auch die Standardabweichung bis zur halben Messdistanz zu und in weiterer Folge bis zum Faserende hin wieder abnimmt.

In Kapitel 4.4 wurde bereits auf das Verhalten bei Faserlängen, die über die maximale Reichweite des Instruments hinausgehen, eingegangen. Oftmals liegen in der Praxis jedoch auch Faserverbindungen vor, die um ein Vielfaches kürzer sind als die maximale Reichweite von 12 km, für welche auch die Herstellerangaben spezifiziert sind. Damit ergibt sich die Frage, wie sich Faserverbindungen mit einer Länge kürzer als 12 km auf das Rauschverhalten und auf die Abweichung

der Messwerte vom Mittelwert auswirken. Um dies zu beantworten, wurden Messungen mit drei unterschiedlich langen Faserspulen (2 km, 4 km und 10 km) vorgenommen. Die Messeinstellungen der durchgeführten Messungen sind Tabelle 4.9 zu entnehmen.

Tabelle 4.9: Messeinstellungen der Untersuchung des Rauschverhaltens mit zunehmender Distanz

	Anzahl der Messungen	Single-/Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit Auflösung	räumliche Intervall	Sampling-
#1	10	Single-Ended	2 km	60 s	2 m	0.5 m
#2	10	Single-Ended	4 km	60 s	2 m	0.5 m
#3	10	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.5 m
#4	10	Dual-Ended	2 km	60 s	2 m	0.5 m
#5	10	Dual-Ended	4 km	60 s	2 m	0.5 m
#6	10	Dual-Ended	10 km	60 s	2 m	0.5 m

In Abb. 4.31 ist die Temperaturdifferenz relativ zum Mittelwert über 10 Wiederholungsmessung und die empirische Standardabweichung für eine Faserlänge von 2 km im Single-Ended Modus (links) und Dual-Ended Modus (rechts) dargestellt. Zum besseren Vergleich mit der Herstellerangabe ist zudem das gleitende Mittel der empirischen Standardabweichung über 50 Werte (entspricht 100 m) abgebildet.

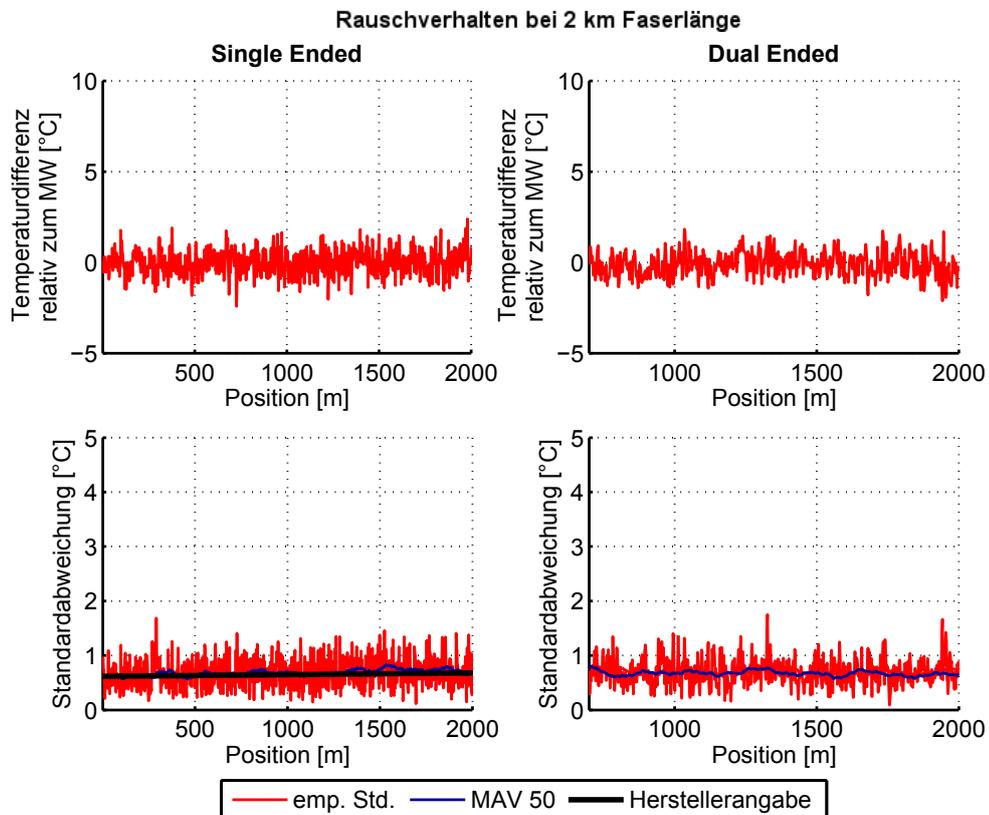


Abbildung 4.31: Rauschverhalten bei einer Faserlänge von 2 km im Single-Ended (links) und Dual-Ended Modus (rechts)

Es zeigt sich dabei, dass im Falle der Single-Ended Messungen die Standardabweichung linear mit der Distanz von ca. $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ansteigt. Ein Vergleich des gleitenden Mittels der Standardabweichung (in dunkelblau dargestellt) mit der Herstellerangabe (in schwarz dargestellt) liefert eine annähernd exakte Übereinstimmung. Die Messdaten selbst weisen eine Abweichung zum empirischen Mittelwert von ca. $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf, wobei der Mittelwert über die Faserlänge stationär ist.

Die empirische Standardabweichung der Dual-Ended Messungen bleibt mit ca. $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ über die gesamte Länge konstant und weist damit, wie erwartet, ein stationäres Verhalten auf. Analog zu den Single-Ended Messungen ist auch der Mittelwert stationär und die Abweichung der Messwerte vom Mittelwert beträgt ca. $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Auf einen Vergleich mit der Herstellerangabe wird hier verzichtet, da die Herstellerangabe auf eine Länge von 12 km spezifiziert ist.

Wird die Faserlänge von 2 km auf 4 km verdoppelt (siehe Abb. 4.32), ist bereits ein trichterförmiger Anstieg der Abweichung der Messwerte vom empirischen Mittelwert über 10 Wiederholungsmessungen von ca. $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ am Faserbeginn bis zu $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ am Faserende im Single-Ended Modus ersichtlich, wobei der Mittelwert nach wie vor stationär ist.

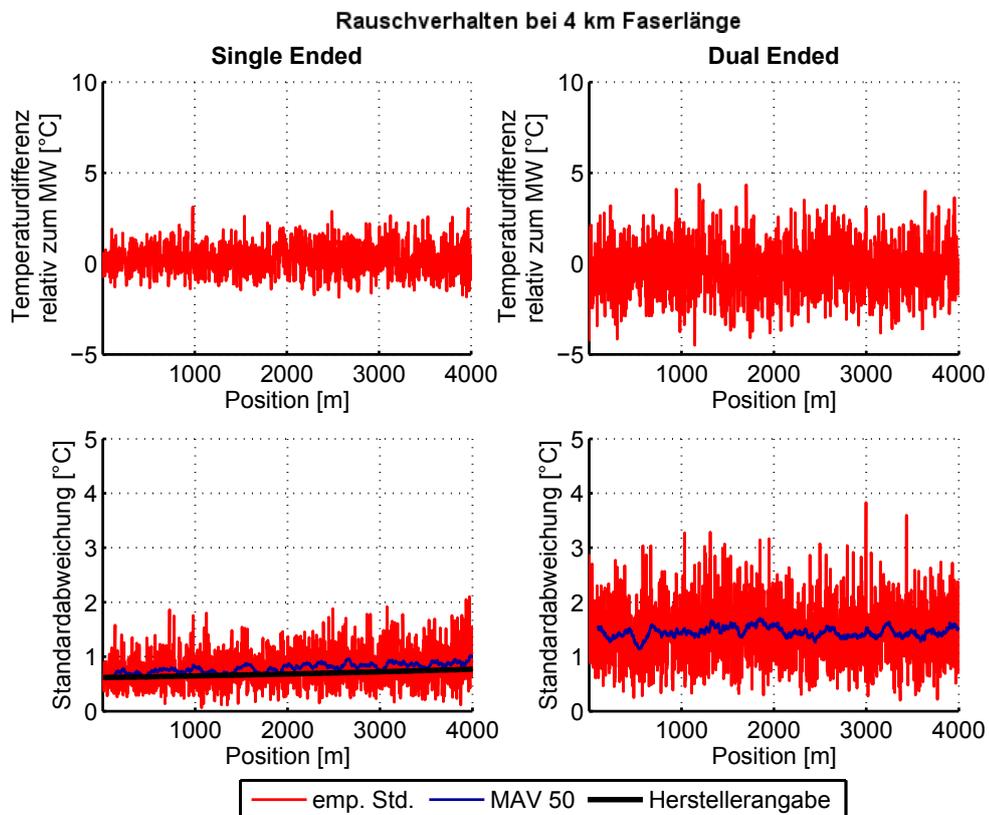


Abbildung 4.32: Rauschverhalten bei einer Faserlänge von 4 km im Single-Ended (links) und Dual-Ended Modus (rechts)

Die empirische Standardabweichung weist wiederum einen linearen Anstieg von 0.6 °C auf 1.0 °C auf. Der Vergleich des gleitenden Mittels der empirischen Standardabweichung (in blau dargestellt) zur Herstellerangabe (in schwarz dargestellt) zeigt hier, dass die Standardabweichung über die gesamte Länge ca. um 0.1 °C über der Herstellerangabe liegt.

Die Dual-Ended Messungen dagegen weisen auch hier keine Abhängigkeit mit zunehmender Distanz auf. Die Abweichung der Messwerte vom empirischen Mittelwert beträgt dabei ca. ± 3.0 °C und ist damit doppelt so hoch wie bei einer Faserlänge von 2 km. Dies lässt sich durch die empirische Standardabweichung der Dual-Ended Messungen erklären, welche mit ca. 1.5°C ebenfalls doppelt so hoch ist. Hinsichtlich des stochastischen Verhaltens ist ersichtlich, dass sowohl das Verhalten des Mittelwertes als auch der Standardabweichung über die Faserlänge stationär ist. Wie zuvor wird auch hier bei der Dual-Ended Messung auf den Vergleich mit der Herstellerangabe verzichtet.

Bei einer Faserlänge von 10 km ist die trichterförmige Zunahme der Abweichung der Messwerte zum empirischen Mittelwert über 10 Wiederholungsmessungen, der nach wie vor stationär ist, von ca. ± 1.5 °C auf ca. ± 3.5 °C mit wachsender Distanz im Single-Ended Modus deutlich sichtbar (siehe Abb. 4.33).

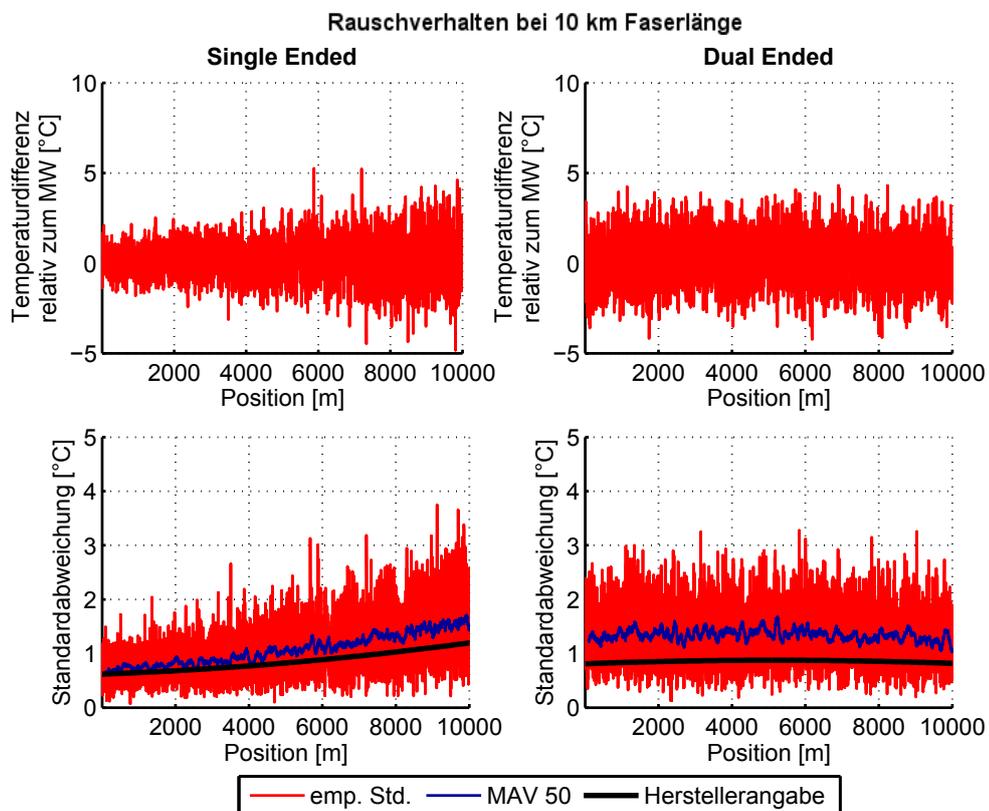


Abbildung 4.33: Rauschverhalten bei einer Faserlänge von 10 km im Single-Ended (links) und Dual-Ended Modus (rechts)

Demzufolge zeigt die Standardabweichung mit ca. 0.6 °C am Faserbeginn auf ca. 1.7 °C am Faserende einen sichtlichen nicht mehr linearen Anstieg an. Der Vergleich zwischen dem gleitenden Mittel der empirischen Standardabweichung (in dunkelblau dargestellt) und der Standardabweichung des Herstellers (in schwarz dargestellt) weist hier eine Besonderheit auf. Während die beiden Zeitreihen am Faserbeginn noch übereinstimmen, differieren sie am Faserende um ca. 0.5 °C. Damit besteht kein konstanter Offset zwischen mittlerer Standardabweichung und Herstellerangabe, wie dies bei der 4 km langen Faserrolle der Fall war, sondern ein Trend zum Faserende hin.

Im Gegensatz zu den beiden Messexperimenten zuvor, zeigt sich hier auch bei den Dual-Ended Messungen eine Abhängigkeit der Standardabweichung von der Messdistanz. Die Standardabweichung nimmt dabei bis zur Hälfte der Messdistanz leicht zu und anschließend bis zum Faserende hin wieder auf den Anfangswert ab, womit die Anfangsvermutung bestätigt werden kann. Da die Faserlänge gegenüber der maximalen Reichweite in diesem Fall nur geringfügig differiert, wird hier ein Vergleich zwischen dem gleitenden Mittel der empirischen Standardabweichung und der Herstellerangabe vorgenommen. Das gleitende Mittel der empirischen Standardabweichung ist dabei im Vergleich zur Herstellerangabe um ca. 0.5 °C schlechter, was sich wiederum durch die höheren Dämpfungen der Kanäle des APS begründen lässt (siehe Kapitel 4.3.1). Die Abweichung der Messwerte vom empirischen Mittelwert sind hingegen mit ca. 2 °C und 7 °C über die gesamte Faserlänge konstant, wobei auch hier der Mittelwert über die Faserlänge stationär ist.

Vergleicht man nochmals die drei durchgeführten Messexperimente kann daraus geschlossen werden, dass sowohl bei Single-Ended als auch Dual-Ended Messungen die Abweichung der Messwerte vom Mittelwert mit zunehmender Faserlänge zunimmt. Der Mittelwert ist dabei für alle drei Faserlängen sowohl im Single-Ended Modus als auch im Dual-Ended Modus stationär. Bei Betrachtung der Standardabweichung dagegen stellt sich heraus, dass je eher die Faserlänge der maximalen Reichweite von 12 km entspricht, desto deutlicher zeigt sich das vom Hersteller angegebene typische Verhalten einer nicht stationären Standardabweichung bei Single-Ended Messungen und einer annähernd stationären Standardabweichung bei Dual-Ended Messungen.

4.5.2 Rauschverhalten bei zunehmender Dämpfung

Entlang eines Sensors auftretende Dämpfungen können durch vielerlei Ursachen hervorgerufen werden und ohne Berücksichtigung zur erheblichen Verschlechterung der Messergebnisse führen, wie im Folgenden verdeutlicht wird.

Im Grundlegenden treten in der Praxis zwei Fälle auf. Zum einen können bereits bestehende Glasfaserverbindungen zur Messung verwendet werden und zum anderen kann der Sensor vor Ort neu installiert werden. Ist eine Glasfaserverbindung bereits vorhanden, besteht oftmals das Problem, dass mögliche Steckverbindungen wie auch deren Positionen nicht bekannt sind und damit keine Unterteilung in Sektionen möglich ist. Handelt es sich um eine Neuinstallation, wird der Sensor in der Regel im Labor vorbereitet und kalibriert. Durch den Einbau kann der Sensor jedoch Dämpfungen erfahren, die ohne erneute Kalibrierung unberücksichtigt bleiben. Neben den bereits genannten Ursachen können Dämpfungen auch durch Alterungseffekte der Glasfaser hervorgerufen werden. Wird nach einigen Jahren die Faserverbindung wieder gemessen, ohne dass dabei der Sensor neu kalibriert wird, bleiben die Dämpfungen dabei unberücksichtigt. Daher stellt sich nun die Frage, ob solch unberücksichtigte Dämpfungen nur einen Einfluss auf das Rauschen oder auch einen Absolutoffset der Messung zur Folge haben.

Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, wurden hierfür zunächst 10 Single-Ended Wiederholungsmessungen mittels einer 10 km Faserspule durchgeführt, wobei die Kalibrierung über die gesamte Faserlänge durchgeführt wurde. Anschließend wurde das Verbindungspatchcord durch ein Patchcord, in welches ein 5 dB Dämpfungsglied integriert ist, ersetzt und ohne erneute Kalibrierung wiederum 10 Single-Ended Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die Messeinstellungen für die getätigten Messungen können nachfolgender Tabelle 4.10 entnommen werden.

Tabelle 4.10: Messeinstellungen der Untersuchung des Rauschverhaltens mit zunehmender Dämpfung

	Anzahl der Messungen	Single-/Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Samplingintervall	Anmerkung
#1	10	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.5 m	0 dB Dämpfung
#2	10	Single-Ended	10 km	60 s	2 m	0.5 m	5 dB Dämpfung

Die in Abb. 4.34 dargestellte Absoluttemperatur als Mittel über 10 Wiederholungsmessungen (oben) und die empirische Standardabweichung (unten) zeigen, dass unter Verwendung des 5 dB Dämpfungsgliedes die Abweichung der Messwerte vom Mittelwert wie auch die Standardabweichung um das 12-fache ansteigen. Während bei der Referenzmessung ohne Dämpfungsglied die Abweichung der Messwerte vom empirischen Mittelwert ca. ± 2.5 °C und die empirische Standardabweichung am Faserbeginn 0.8 °C betragen, wachsen durch das Dämpfungsglied die Abweichung

zum empirischen Mittelwert auf ca. ± 30 °C, am Faserende sogar auf bis zu ± 50 °C, und die empirische Standardabweichung am Faserbeginn auf ca. 10 °C an. Ein Offset zwischen den beiden Messkurve tritt wider Erwarten jedoch nicht auf.

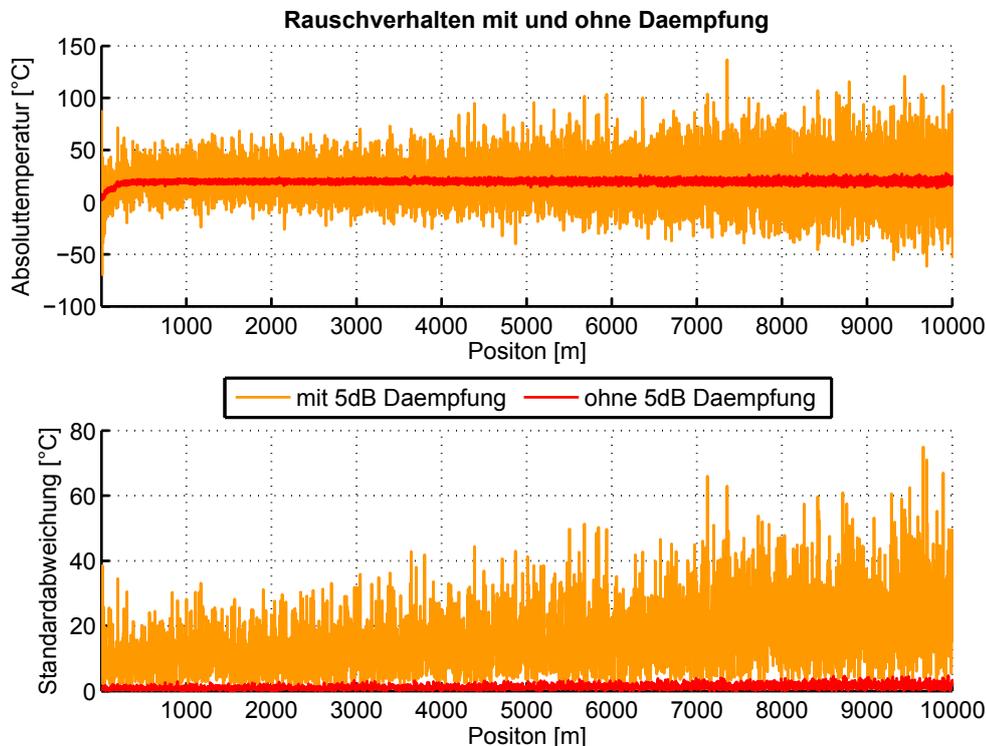


Abbildung 4.34: Rauschverhalten unter Verwendung eines 5 dB Dämpfungsgliedes

Setzt sich eine Faserverbindung jedoch aus mehreren einzelnen Sektionen zusammen und wird über die gesamte Faserlänge, ohne Berücksichtigung der Dämpfungen der Konnektoren oder Spleiße, kalibriert, tritt jeweils am Faserübergang ein Offset sowie eine Zunahme des Messrauschens der nachfolgenden Messfaser auf, wie in Abb. 4.35 anhand der Untersuchung der Reichweite für 12 km aus Abb. 4.30 nochmals beispielhaft dargestellt wird.

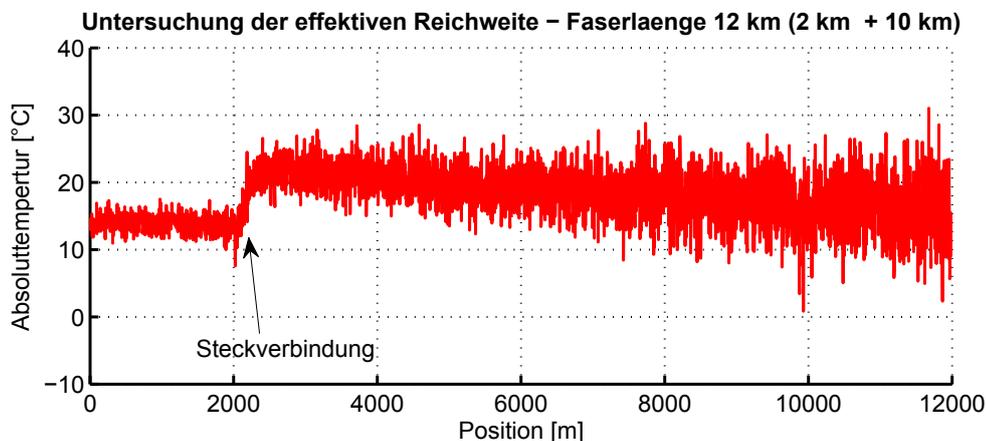


Abbildung 4.35: Rauschverhalten bei Vorhandensein einer Steckverbindung bei 2 km

Auch bei einem Vergleich von Messungen von Kanal #1 und Kanal #2 des APS zeigt sich aufgrund der unterschiedlichen Dämpfungen der beiden Kanäle ein Offset zwischen den Temperaturkurven. Zudem weist die Temperaturkurve jenes Kanals mit höherer Dämpfung, in diesem Fall Kanal #1, ein höheres Messrauschen auf (siehe Kapitel 4.3.1).

Demzufolge sollten, wenn es möglich ist Steckverbindungen und Spleiße zu lokalisieren, die einzelnen Fasersektionen in jedem Fall separat kalibriert werden. Zudem sollte vor jeder Messung eine erneute Sensorkalibrierung durchgeführt werden, da ansonsten Dämpfungen, die z.B. durch äußere Einwirkungen, Beschädigungen oder Alterungseffekte der Faser auftreten, das Rauschen und die Standardabweichung um ein Vielfaches verschlechtern.

Des Weiteren stellte sich die Frage welchen Dämpfungsränge das APS besitzt. Dafür wurden Messungen mit verschiedenen Dämpfungsgliedern von 5 dB, 10 dB, 15 dB und 20 dB ausgeführt.

Wie nachfolgende Abb. 4.36 zeigt, waren bei der Messung unter Verwendung des 5 dB Dämpfungsglied nur drei der fünf getätigten Messungen erfolgreich. Bei zwei Messungen sank das Signal gleich zu Beginn auf den absoluten Nullpunkt ab. Grund dafür könnte eine starke Rückreflexion des Signals durch das Dämpfungsglied sein, wodurch der Detektor des Instrumentes überspricht. Während beim 5 dB Dämpfungsglied noch drei von fünf Messungen erfolgreich waren, waren mit den höheren Dämpfungsgliedern keine erfolgreichen Messungen mehr möglich, weshalb auf eine Erläuterung der Messungen mit den höheren Dämpfungsgliedern verzichtet wurde.

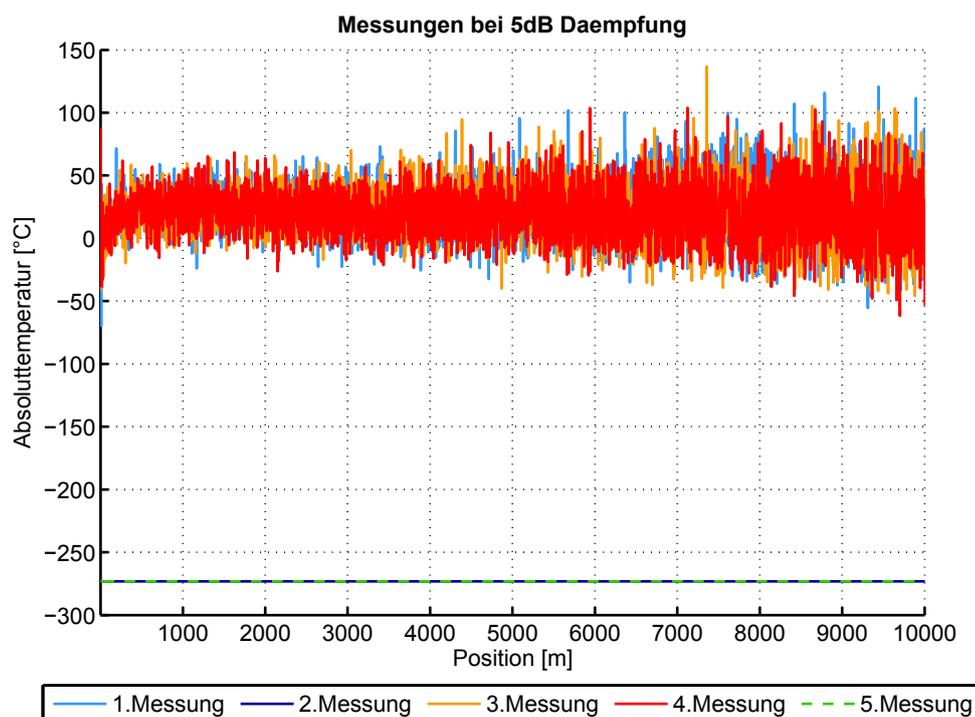


Abbildung 4.36: Teilausfälle bei 5 Wiederholungsmessungen mit einem 5 dB Dämpfungsglied - Messung 1, 3, und 4 waren erfolgreich, Messungen 2 und 5 waren fehlerhaft

4.5.3 Rauschverhalten bei zunehmender Temperatur

Bei Feldeinsätzen ist die Sensorfaser in der Regel unterschiedlichsten Temperaturen ausgesetzt. Im Zuge dieses Kapitels soll der Einfluss der unterschiedlichen Temperaturstufen auf das Messrauschen, aber auch das Verhalten der gemessenen Absoluttemperatur bei einem Anstieg und anschließenden Abfall der Temperatur und in weiterer Folge die Absolutgenauigkeit des APS erläutert werden.

Zu diesem Zweck wurde eine 10 km Faserspule im Memmert Kühlbrutschrank im Rahmen eines Temperaturprofils zunächst auf 0 °C abgekühlt, dann in Temperaturschritten von 5 °C auf 40 °C erhitzt und anschließend wieder in 5 °C Temperaturschritten auf 0 °C abgekühlt. Um eine vollständige Akklimatisierung der Faser zu gewährleisten wurde die Dauer der Erhitzungsphase mit einer Stunde festgelegt und die Temperaturstufen jeweils für eine halbe Stunde gehalten.

Das Temperaturprofil wurde mittels der Ansteuerungssoftware Celsius des Kühlbrutschrankes programmiert und gesteuert. Abb. 4.37 zeigt das programmiert Solltemperaturprofil und das tatsächliche Temperaturprofil, welches von den internen Temperatursensoren des Kühlbrutschrankes aufgezeichnet wurde.

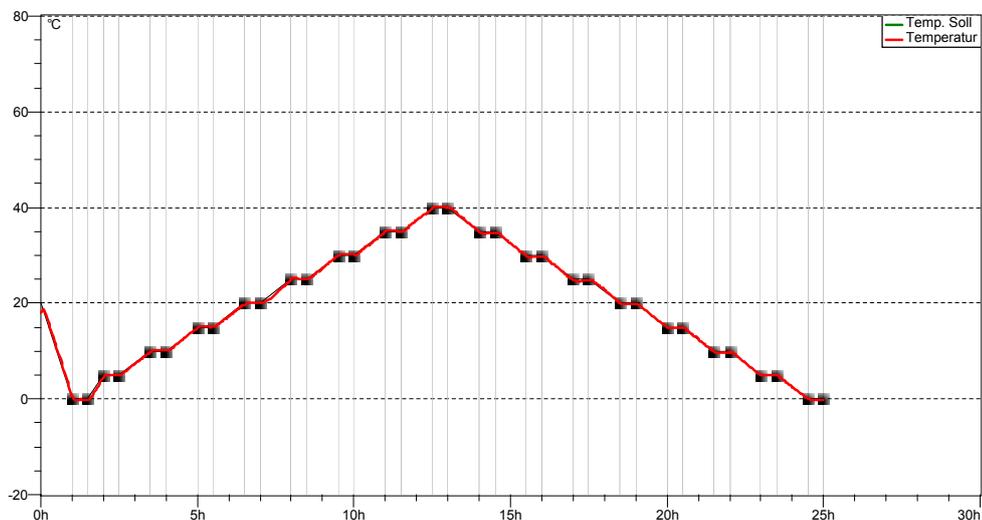


Abbildung 4.37: Programmieretes Solltemperaturprofil und tatsächliches Temperaturprofil des Memmert Kühlbrutschrankes dargestellt in Celsius

Zusätzlich zu den Aufzeichnungen der internen Temperatursensoren wurde die Absoluttemperatur im Klimaschrank mit drei PT 100 Sensoren erfasst, die mittels eines Spider 8 mit einer Messrate von 10 Hz aufgezeichnet wurden. Der Versuchsaufbau mit der Faserspule und den drei PT 100 Sensoren in der Klimakammer (rechts), sowie des Spider 8 zur Aufzeichnung der Temperaturmessungen der PT 100 Sensoren (links) ist in Abb. 4.38 zu sehen.

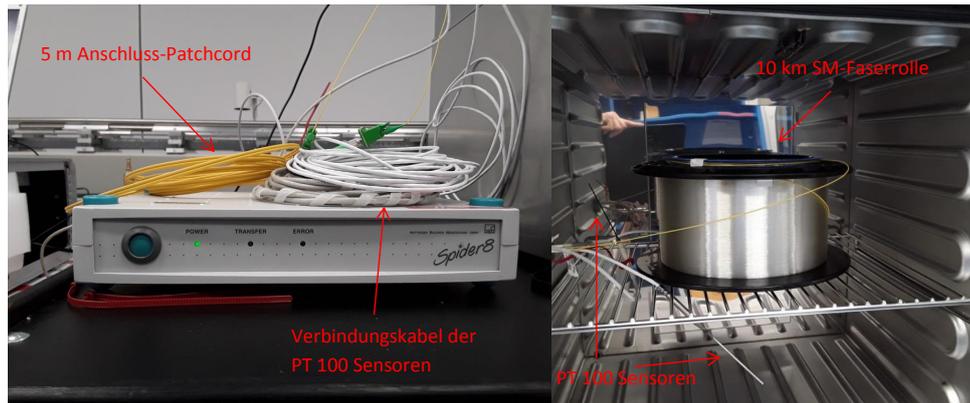


Abbildung 4.38: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Rauschens mit zunehmender Temperatur (links der Spider 8 zur Aufzeichnung der Temperaturdaten der PT 100 Sensoren und rechts die Faserrolle und die PT 100 Sensoren im Kühlbrutschrank)

Die Messungen mittels des APS wurden mit den in Tabelle 4.11 angeführten Messeinstellungen durchgeführt. Die Messzeit wurde in diesem Fall auf 30 s reduziert, um damit auch die Dauer der Messung erheblich zu verkürzen.

Tabelle 4.11: Messeinstellungen der Untersuchung des Rauschverhaltens mit zunehmender Temperatur

	Single-/ Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Sampling- intervall
#1	Single-Ended	10 km	30 s	2 m	0.25 m

Der Vergleich der mittels des APS gemessenen Temperatur mit dem Temperaturprofil einer der drei PT 100 Sensoren in Abb. 4.39 zeigt, dass die Temperaturstufen aufgrund des starken Messrauschens anhand der Rohdaten des APS nicht zu identifizieren sind. Selbst durch eine gleitende Mittelwertbildung über 20 Werte (entspricht 10 Minuten) sind die Temperaturschritte nur schwer zu erkennen. Zudem besteht zwischen dem gleitenden Mittel der APS-Messkurve und der PT 100-Messkurve zum einen am Anfang des Temperaturprofils, zwischen den Temperaturschritten 0 °C und 30 °C, ein Offset von rund 1 °C und zum anderen am Ende Profils, zwischen 20 °C und 0 °C, ein Offset von ebenfalls etwa 0.5 °C. In den übrigen Bereichen stimmt die APS-Temperaturkurve mit jener des PT 100 Sensors überein.

Diese Temperaturunterschiede könnten auf der einen Seite einen Gain-Faktor vermuten lassen, der sich mit zunehmender Temperatur annähernd relativiert und erst bei abfallender Temperatur in abgeschwächter Form wieder auftritt. Da es sich bei den getätigten Messungen um Single-Ended Messungen handelt, wurde lediglich eine Offset-Kalibrierung durchgeführt und damit der Gain-Faktor nicht kalibriert. Auf der anderen Seite könnten die Differenzen auch auf eine zu kurze Akklimatisierung der Faserspule zurückzuführen sein.

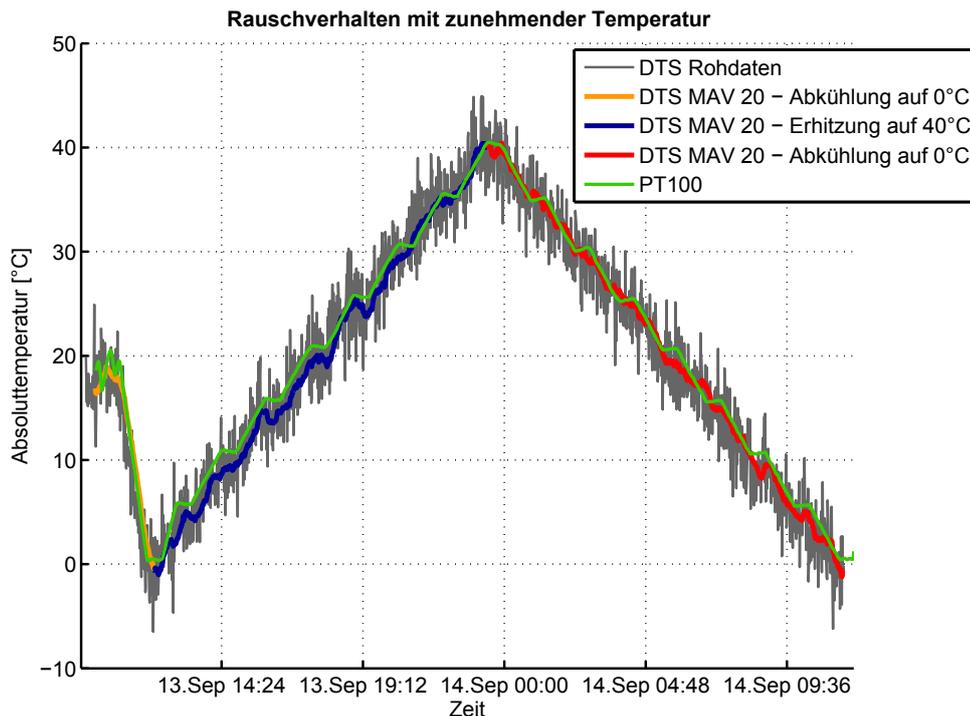


Abbildung 4.39: Vergleich zwischen dem APS-Temperaturprofil und dem Temperaturprofil eines PT 100 Sensors

Um die Vermutung eines auftretenden Gain-Faktors bzw. einer zu kurzen Akklimatisierungszeit zu bestätigen, bedarf es allerdings noch weiteren Untersuchungen. Eine Zunahme des Rauschens bei steigender Temperatur ist nicht ersichtlich.

Eine Darstellung der APS-Temperaturkurve auf der Ordinatenachse und der PT 100-Messkurve auf der Abszissenachse zeigt, dass die Gegenüberstellung der Messwerte eine Gerade mit einer Steigung von annähernd 1 aufweist. Das Absoluttemperaturprofil, welches mittels des APS gemessen wurde stimmt daher annähernd mit jenem der PT 100 Sensoren überein.

Bei Betrachtung des gleitenden Mittelwertes ist eine Hysterese zwischen dem Anstieg der Temperatur von 0 °C auf 40 °C (in blau dargestellt) und dem Abfall von 40 °C und 0° C (in rot dargestellt) ersichtlich. Die gemessene Temperatur während des Temperaturanstiegs liegt dabei geringfügig über jener des Temperaturrückgangs. Die Kurve der Abkühlung der Faserspule von Raumtemperatur auf 0 °C (in orange dargestellt) zeigt eine deutlich stärkere Abweichung zur Kurve des Temperaturabstiegs und liegt sogar über jener des Temperaturabfalls von 40°C auf 0°C. Eine nicht ausreichende Akklimatisierung der Faserspule ist daher wahrscheinlich, kann jedoch nicht vollständig bestätigt werden.

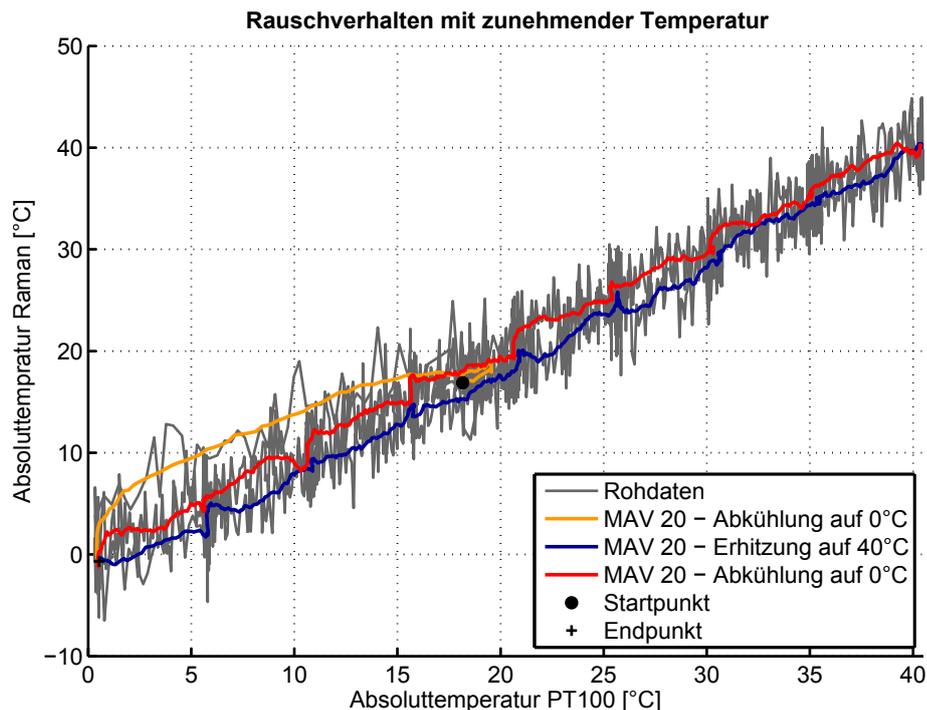


Abbildung 4.40: Darstellung der APS-Temperaturkurve gegenüber der PT 100-Temperaturkurve

Die Betrachtung der Differenz zwischen dem APS- und dem PT 100-Temperaturprofil in Abb. 4.41 verdeutlicht die Abweichungen zwischen der Abkühlung von Raumtemperatur auf 0°C, dem Temperaturanstieg von 0°C auf 40°C und dem Temperaturabfall von 40°C auf 0°C nochmals.

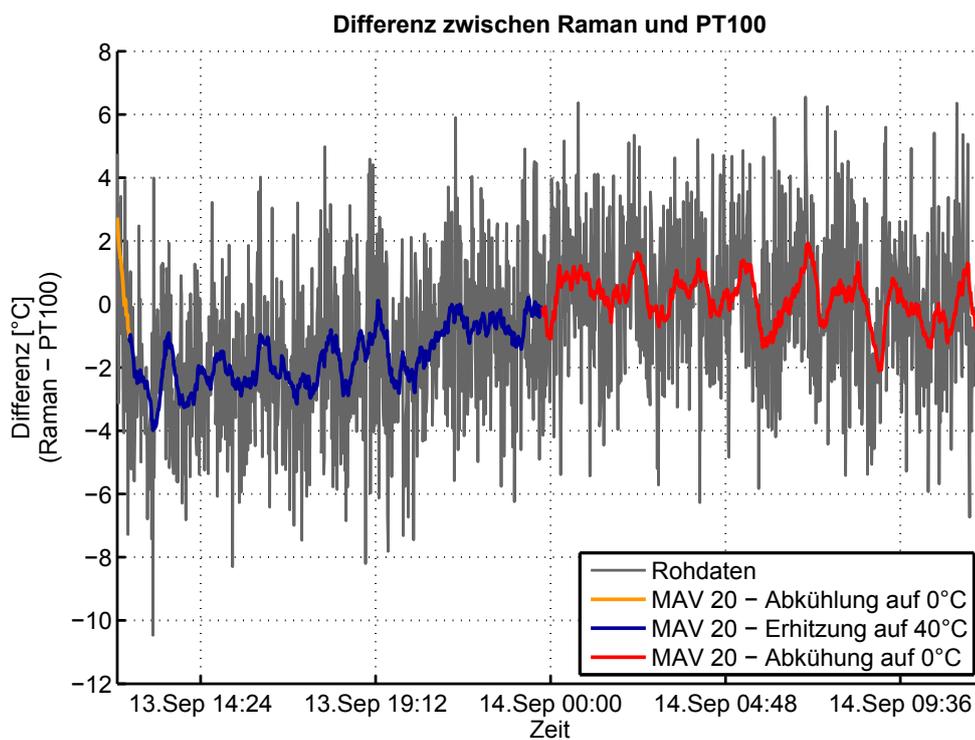


Abbildung 4.41: Differenz zwischen der APS-Temperaturkurve und der PT 100-Temperaturkurve

Im Bereich des Temperaturanstiegs zwischen 0 °C und 40°C ist die Temperatur des Raman-Messung im Mittel um ca. 1 °C niedriger, nimmt jedoch mit zunehmender Temperatur gegen 0 °C hin ab. Für den Bereich des Temperaturabfalls beträgt die Differenz im Bereich zwischen 40 °C und 20 °C annähernd 0 °C und steigt auch im Bereich von 20 °C auf 0 °C lediglich auf 0.5 °C an. Der Bereich der Abkühlung von Raumtemperatur auf 0°C weicht sogar bis zu ca. 3°C gegenüber dem Temperaturprofil des PT 100 ab.

Ob die Ursache für die auftretenden Abweichungen ein nicht kalibrierter Gain-Faktor oder eine zu kurze Akklimatisierungszeit darstellt, kann zu diesem Zeit allerdings nicht gesagt werden, dafür bedarf es noch weiterführenden Untersuchungen.

5 Messungen entlang einer realen LWL-Schleife des ZID an der TU Graz

Bei einem Lichtwellenleiter (LWL) handelt es sich üblicherweise um eine SM Faser, die zum Zweck der Datenübertragung und Kommunikation über lange Distanzen verwendet wird. Wichtig dabei ist, dass diese Fasern besonders dämpfungsarm sind, um einen geringen Datenverlust zu gewährleisten.

Da in den meisten baulichen Infrastrukturen bereits LWL zur Datenübertragung vorhanden sind, stellt sich die Frage, ob diese Kommunikationsfasern auch für Temperaturmessungen basierend auf der Raman-Rückstreuung geeignet sind. Dies würde den Vorteil bringen, dass bereits vorhandene Glasfasern als Sensorelemente für Messungen verwendet werden könnten und damit eine Installation neuer Messfasern nicht nötig wäre. Zudem sollte untersucht werden, ob eine Lokalisierung des Verlaufs der Kommunikationsleitung (u.a. Eintritt der Leitung in ein Gebäude bzw. Austritt aus einem Gebäude oder Kabelschächte) möglich ist.

Zu diesem Zweck wurde vom ZID der TUG ein nicht benötigter LWL eines Multifaserkabels zwischen dem Campus der Neuen Technik und dem Campus der Alten Technik für Testmessungen zur Verfügung gestellt.

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt eine genaue Erläuterung der Versuchsdurchführung sowie der erreichten Ergebnisse.

5.1 Versuchsdurchführung

Der zur Verfügung gestellte LWL verläuft in Form einer Schleife über eine Länge von ca. 2.4 km, beginnend im Serverraum der Streymayergasse 16, durch das Gebäude der Steyrergasse 30, entlang der Petersgasse und Mandellstraße bis in das Gebäude der Alten Technik in der Lessingstraße 25 und auf demselben Weg wieder zurück. Vom ZID wurde eine grobe Darstellung des Leitungsverlaufs zur Verfügung gestellt (siehe Abb. 5.1).

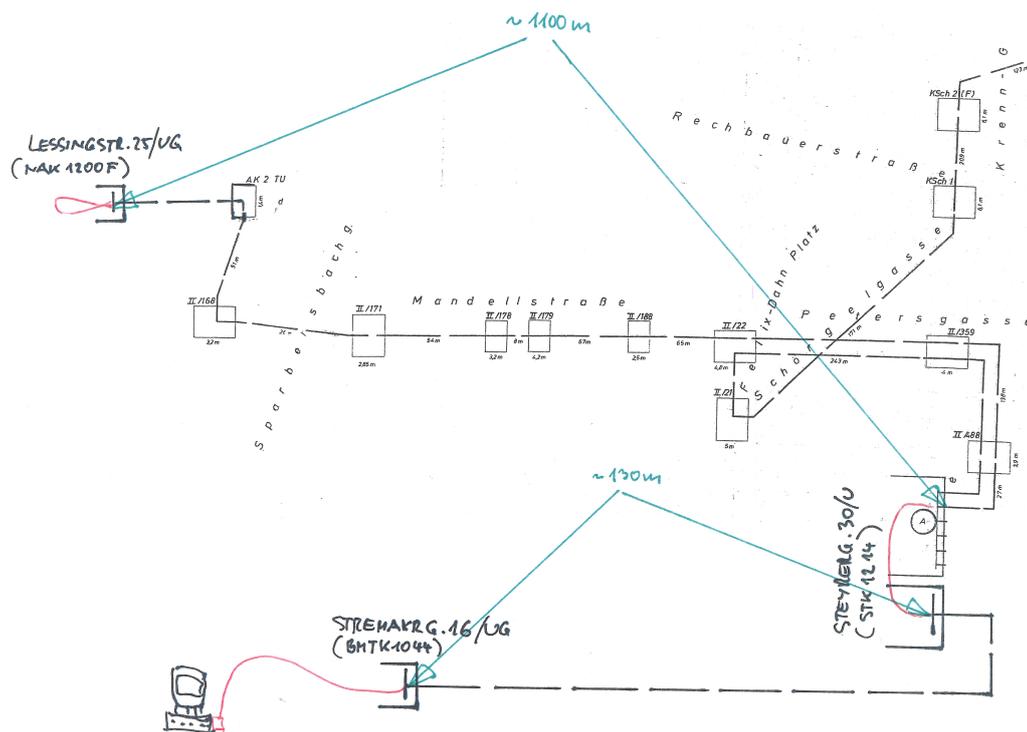


Abbildung 5.1: Leitungsplan der LWL-Schleife des ZID

Da sich nach ersten Messungen mittels des FT und auch des APS im Vergleich zu Abb. 5.1 des ZID Unterschiede in den Leitungslängen zeigten, fand eine Begehung der Leitung statt. Auf Basis dieser Begehung und eines Netzerhebungsplanes von A1 wurde der Verlauf inkl. aller Kabelschächte in Google Earth eingezeichnet (siehe Abb. 5.2). Doch auch laut des neuen Leitungsplanes stimmten die Leitungslängen im Vergleich zu den Messungen nicht überein. Grund dafür sind vermutlich Überlängen in den Serverräumen und Kabelschächten, deren Längen nicht dokumentiert und demzufolge auch nicht bekannt sind.

Für die Messungen war das APS im Serverraum in der Stremayergasse 16 platziert und beide Enden der Kommunikationsschleife an das Instrument angeschlossen. Gemessen wurden insgesamt drei Epochen mit jeweils unterschiedlichen Messeinstellungen (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Messeinstellungen der Messung der LWL-Schleife des ZID

Datum	Single-/Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Samplingintervall
17.03.2017 - 29.03.2017	Dual-Ended	2.4 km	30 s	1 m	0.5 m
30.03.2017 - 03.04.2017	Dual-Ended	2.4 km	300 s	1 m	0.5 m
07.04.2017 - 13.04.2017	Dual-Ended	2.4 km	600 s	2 m	0.5 m

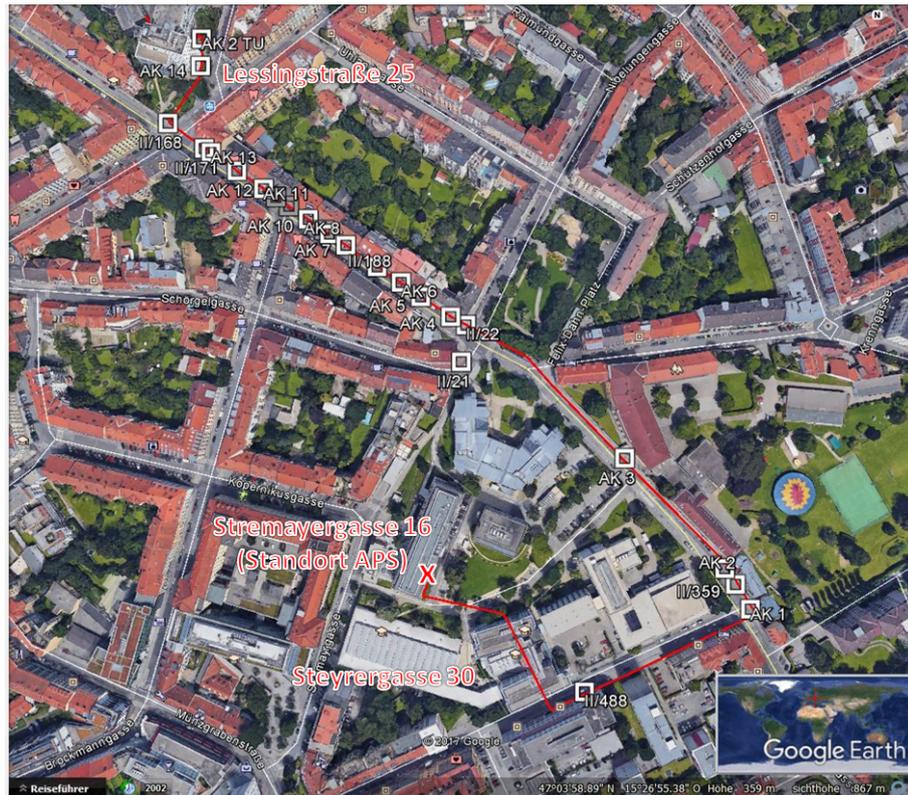


Abbildung 5.2: Leitungsverlauf der LWL-Schleife dargestellt in Google Earth - weiße Quadrate stellen Kabelschächte dar [nach Buchmayer [2017]]

5.2 Auswertung und Ergebnisse

Eine Darstellung des Raman-Temperatursignals über die gesamte LWL-Schleife in Abb. 5.3 zeigt, dass aufgrund des starken Messrauschens der Verlauf der LWL-Schleife nur im Groben in fünf Bereiche eingeteilt werden kann. Zunächst verläuft der LWL über eine Länge von ca. 67 m im Gebäude der Stremmayergasse 16, beginnend im Serverraum (roter Bereich). Das Absinken der Temperatur um ca. 1 °C lässt darauf schließen, dass der LWL das Gebäude an dieser Stelle verlässt und unterirdisch über eine Länge von ca. 64 m bis zum Gebäude der Steyrergasse 30 verläuft (blauer Bereich). Dort tritt dieser in das Gebäude der Steyrergasse 30 ein (oranger Bereich), wie anhand der Erhöhung der Temperatur um wiederum ca. 1 °C zu erkennen ist. Die Faser verläuft über eine Distanz von ca. 149 m im Gebäude und verlässt dieses anschließend. Zwischen der Steyrergasse 30 und der Lessingstraße 25 ist der LWL über eine Länge von ca. 863 m unterirdisch verlegt (beiger Bereich). Dies lässt sich auch anhand der Temperatur, welche in diesem Bereich um ca. 1 °C bis 2 °C abfällt, abzeichnen. In der Lessingstraße 25, wo ca. 141 m des LWL installiert sind, tritt dieser wieder ins Gebäude ein, wodurch die Temperatur wiederum um ca. 1 °C ansteigt (grüner Bereich). Schließlich verläuft die Leitung auf demselben Weg wieder zurück zur Stremmayergasse 16.

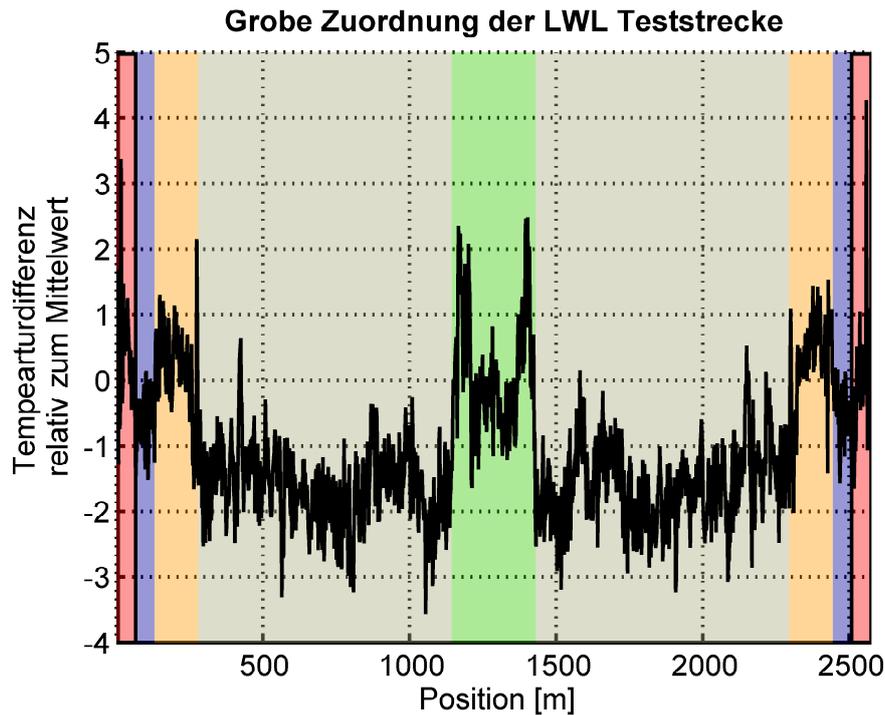


Abbildung 5.3: Grobe Einteilung des Verlaufs der LWL-Schleife (rot: Stremayergasse 16, blau: Übergang von Stremayergasse 16 auf Steyrergasse 30, orange: Steyrergasse 30, beige: Übergang von Steyrergasse 30 auf Lessingstraße 25, grün: Lessingstraße 25)

Eine exakte Zuordnung der Übergänge zwischen unterirdischen Bereichen und den Gebäudebereichen oder auch der Kabelschächte, in denen ein Temperaturunterschied zum Rest der Temperaturkurve bestehen sollte, kann aufgrund des hohen Messrauschens nicht erfolgen. Ein weiterer Grund ist auch die Mittelung über eine räumliche Auflösung von 2 m, wodurch die Temperaturunterschiede im Bereich der Übergänge und Schächte verschmieren.

Daraufhin erfolgte eine Analyse des zeitlichen Verlaufs jeder Position entlang der LWL-Schleife. Dabei zeigt sich, dass die Signale an einigen Position ein ähnliches Verhalten aufweisen und dahingehend eine Einteilung der Positionen auf Basis des Signalverhaltens über die Zeit möglich ist. Die Einteilung erfolgte in 5 Klassen, die im Nachfolgenden erläutert werden, wobei aus jeder Kategorie nur eine repräsentative Zeitreihe dargestellt wird. Für die Zuordnung zur LWL-Schleife wurde in den nachfolgenden Abbildungen dabei der Hinweg und Rückweg der Schleife übereinander gelegt.

Die Temperatursignale aus Kategorie 1 (siehe Abb. 5.4) weisen ein annähernd konstantes Verhalten über die Zeit auf, welches jedoch von mehreren abrupten Temperaturabfällen um ca. 4°C, die durchwegs über einen Zeitraum von 24 Stunden andauern, unterbrochen wird. Neben den plötzlichen Temperaturabfällen treten auch abrupte Temperaturanstiege von ca. 2 °C bis 3 °C auf, wobei auch diese in der Regel über einen Zeitraum von 24 Stunden anhalten.

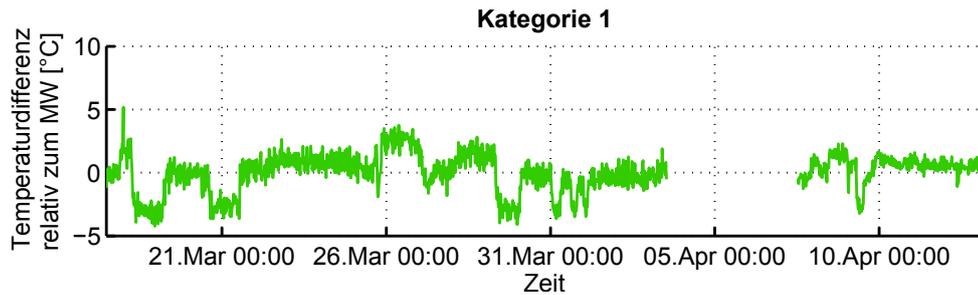


Abbildung 5.4: Signalverhalten von Kategorie 1

Zugeordnet werden kann das Verhalten dieser Kategorie ausschließlich der ersten Hälfte des Bereichs Steyrergasse 30 (siehe Abb. 5.5 oranger Bereich). Dahingehend könnte dieses Verhalten möglicherweise mit einer offen stehenden Türe im Bereich des Übergangs des LWL auf das Gebäude Steyrergasse 30 oder Ähnlichem in Verbindung stehen. Die genaue Ursache konnte zur Zeit jedoch noch nicht geklärt werden.

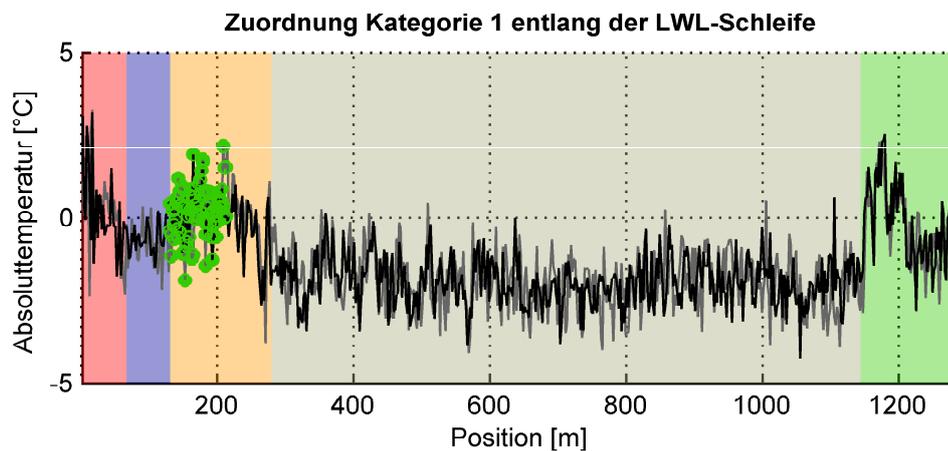


Abbildung 5.5: Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 1 entlang der LWL-Schleife - Hinweg und Rückweg der Schleife sind dabei übereinander geplottet

Kategorie 2 wird durch ein sprunghaftes Signalverhalten charakterisiert und ist in Abb. 5.6 dargestellt. Die Sprünge treten dabei einerseits bei der Umstellung der Messzeit von 30 s auf 300 s am 30.03. und andererseits bei der dritten Messepoche von 07.04. bis 13.04. auf.

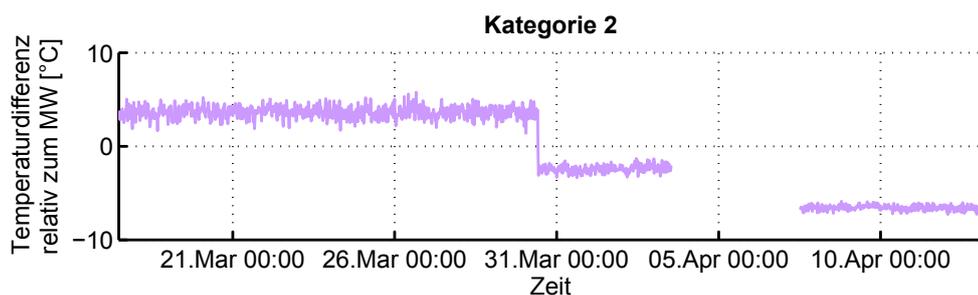


Abbildung 5.6: Signalverhalten von Kategorie 2

In Bezug auf die Zuordnung entlang der LWL-Schleife tritt das sprunghafte Verhalten ausschließlich am Beginn der Messschleife in der Stremayergasse 16 (roter Bereich) und im Umkehrbereich der Messschleife in der Lessingstraße 25 (grüner Bereich) auf, wie Abb. 5.7. Der Grund für dieses Verhalten ist derzeit allerdings noch unbekannt.

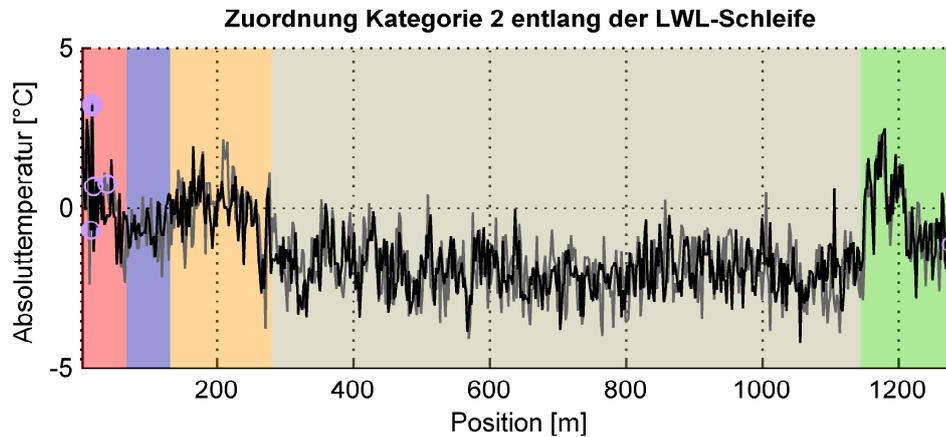


Abbildung 5.7: Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 2 entlang der LWL-Schleife - Hinweg und Rückweg der Schleife sind dabei übereinander geplottet

Die Temperatursignale aus Kategorie 3 weisen bis auf einige geringe Unregelmäßigkeiten ein annähernd konstantes Verhalten über die gesamte Messzeit auf (siehe Abb. 5.8). Zudem ist sogar eine Verringerung der Abweichung der Messwerte zum Mittelwert aufgrund der Umstellung der Messzeit von 30 s auf 300 s am 31.03. erkennbar.

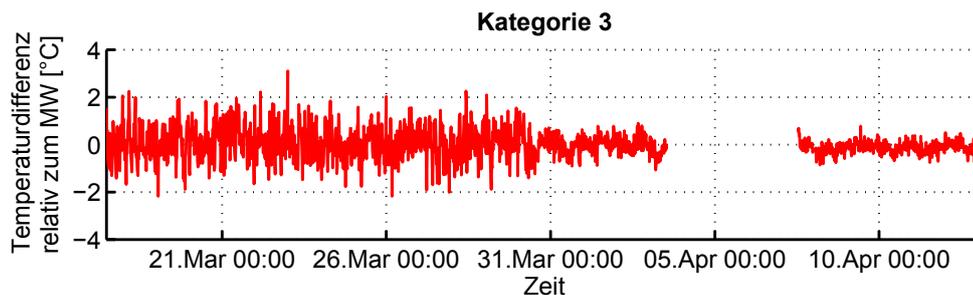


Abbildung 5.8: Signalverhalten von Kategorie 3

Das konstante Temperaturverhalten würde vermuten lassen, dass sich der LWL im Inneren eines Gebäude verläuft, wo eine annähernd konstante Temperatur herrscht, wie im Folgenden auch bestätigt wird. Laut Abb. 5.9 tritt das konstante Temperaturverhalten zum einen im Bereich des Gebäudes Stremayergasse 16 (roter Bereich) und zum anderen jeweils in der zweiten Hälfte des Bereichs des Gebäudes Steyrergasse 30 (oranger Bereich) und Lessingstraße 25 (grüner Bereich) auf. Im Abschnitt der ersten 15 m, in welchem die Temperatur im Vergleich zum

restlichen Gebäude der Stremayergasse 16 (roter Bereich) höher ist, befindet sich der LWL sogar im klimatisierten Serverraum der Stremayergasse 16.

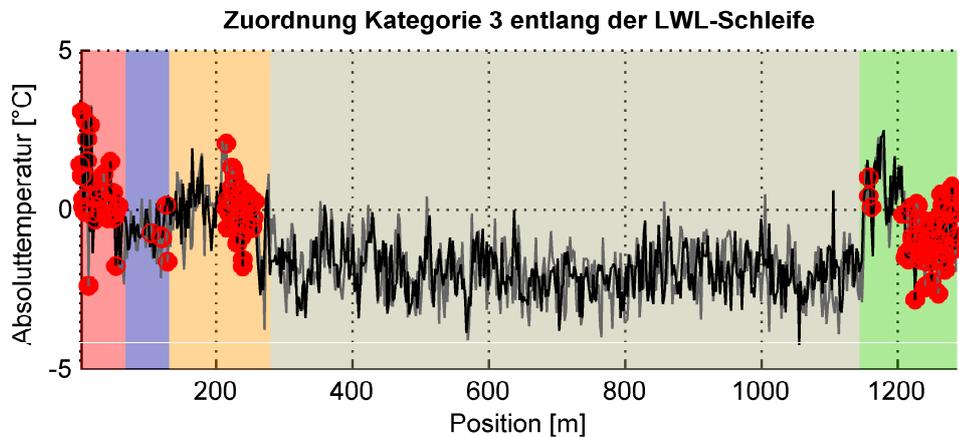


Abbildung 5.9: Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 3 entlang der LWL-Schleife - Hinweg und Rückweg der Schleife sind dabei übereinander geplottet

Das in Abb. 5.10 dargestellte Temperatursignal von Kategorie 4 zeigt einen annähernd linearen Anstieg der Temperatur im Verlauf der Zeit, der sich durch die tatsächliche Erwärmung der Lufttemperatur begründen lässt.

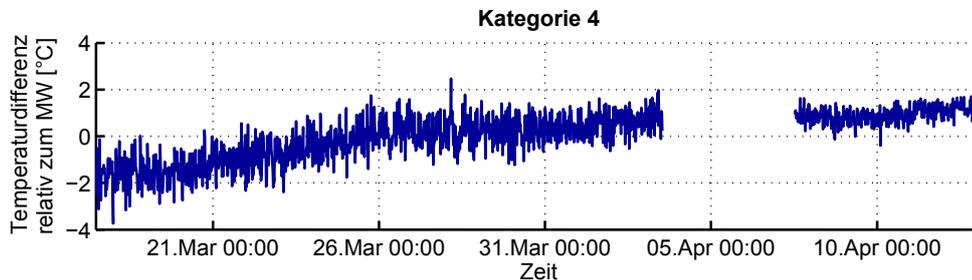


Abbildung 5.10: Signalverhalten von Kategorie 4

Daraus lässt sich schließen, dass das linear ansteigende Temperaturverhalten hauptsächlich in jenen Bereichen auftritt, in welchen die Faser unterirdisch verläuft und damit auch indirekt den langperiodischen Änderungen der Lufttemperatur ausgesetzt ist. Abb. 5.11 bestätigt diese Schlussfolgerung. Sowohl der Freistreckenbereich zwischen dem Gebäude der Stremayergasse 16 und dem Gebäude der Steyrergasse 30 (blauer Bereich) als auch der Freistreckenbereich zwischen dem Gebäude der Steyrergasse 30 und dem Gebäude der Lessingstraße 25 (beiger Bereich), in welchem das Multifaserkabel nach Informationen des ZID unter der Erde verlegt ist, kann Kategorie 4 zugeordnet werden.

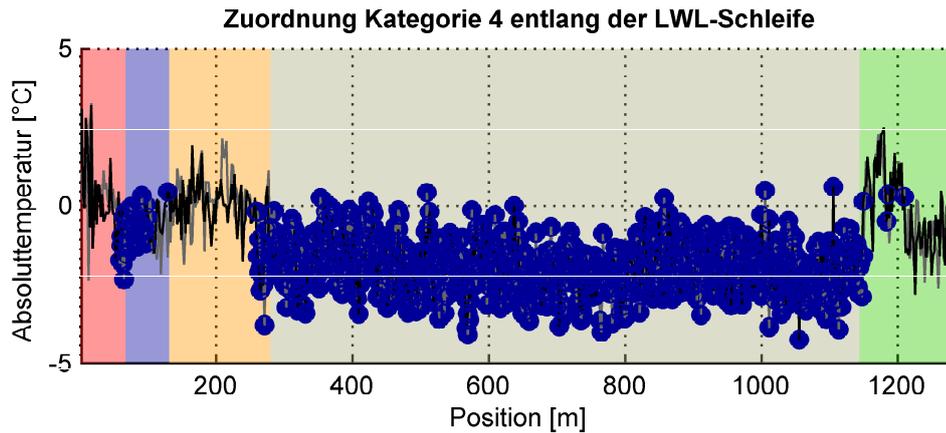


Abbildung 5.11: Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 4 entlang der LWL-Schleife - Hinweg und Rückweg der Schleife sind dabei übereinander geplottet

Das Temperatursignal der letzten Kategorie (Kategorie 5) ist durch ein an manchen Positionen mehr und an manchen Positionen weniger ausgeprägtes zyklisches Verhalten mit einer Periode von ca. 24 Stunden charakterisiert. In Abb. 5.12 ist zur Ersichtlichmachung ein Signal mit einem deutlich ausgeprägten zyklischen Verhalten dargestellt.

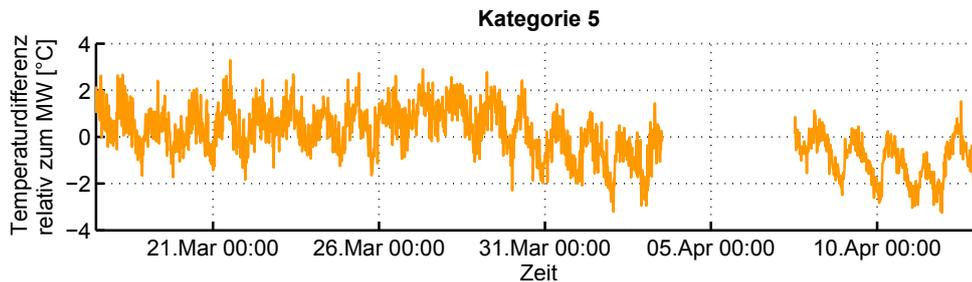


Abbildung 5.12: Signalverhalten von Kategorie 5

Dieses Verhalten tritt, laut Abb. 5.13, hauptsächlich im Übergangsbereich zwischen den Gebäuden und in einigen Bereichen, in welchen die Faser unterirdisch verläuft, auf. Am Übergangsbereich der Stremayergasse 16 (roter Bereich) auf die Freistrecke (blauer Bereich) weitete sich das zyklische Verhalten sogar bis auf die zweite Hälfte des Gebäudebereiches, am Übergang zwischen der Freistrecke (blauer Bereich) und dem Gebäude Steyrergasse 30 (oranger Bereich) bis auf die zweite Hälfte der Freistrecke und am Übergangsbereich zwischen der Freistrecke (beiger Bereich) und dem Gebäude Lessingstraße 25 (grüner Bereich) auf die erste Hälfte des Gebäudebereiches Lessingstraße 25 aus. In diesen Bereichen, vor allem aber in den Übergangsbereichen zwischen Gebäude und Freistrecke, ist der LWL vermutlich dem Tageszyklus der Temperatur ausgesetzt, der sich im Signal widerspiegelt. Zudem tritt das Verhalten auch an einigen Positionen im Bereich zwischen Steyrergasse 30 und Lessingstraße 25 (beiger Bereich) auf.

Hier könnten sich möglicherweise Kabelschächte befinden, in welchen der LWL den täglichen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist.

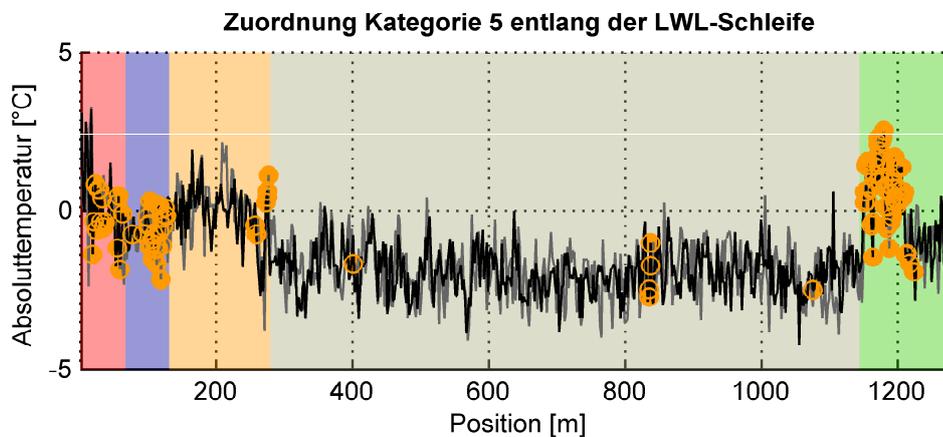


Abbildung 5.13: Zuordnung des Signalverhaltens von Kategorie 5 entlang der LWL-Schleife - Hinweg und Rückweg der Schleife sind dabei übereinander geplottet

Im Nachfolgenden sind alle Kategorien und ihr typisches zeitliches Verhalten nochmals im Überblick angeführt:

Kategorie 1: annähernd konstantes Verhalten unterbrochen von Temperaturanstiegen und Temperaturabfällen um mehrere °C

Kategorie 2: sprunghaftes Verhalten

Kategorie 3: annähernd konstantes Verhalten

Kategorie 4: linear ansteigendes Verhalten

Kategorie 5: zyklisches Verhalten

In Abb. 5.14 sind nun alle fünf Kategorien den Positionen entlang der LWL-Schleife zugeordnet, wobei auch hier Hinweg und Rückweg der Schleife übereinander gelegt sind:

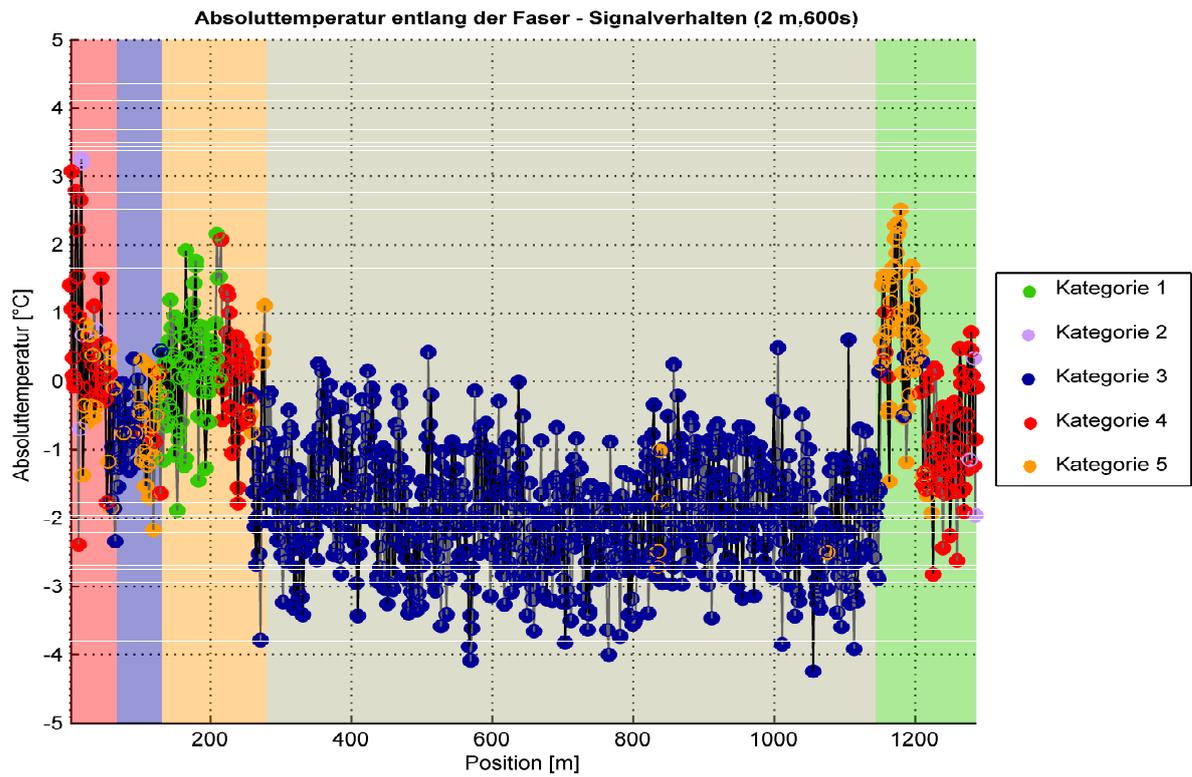


Abbildung 5.14: Übersicht der Zuordnung aller Kategorien entlang der LWL-Schleife - Hinweg und Rückweg der Schleife sind dabei übereinander geplottet

6 Instrumentierung und Messung eines Betonbalkens

Am BTZ der TUG wurde gemeinsam mit dem FMT ein 4-Punkt-Biegeversuch zur Auswahl und Optimierung der Sensorik zur Gebirgsdruckerfassung sowie Verifikation der Funktionstauglichkeit durchgeführt. Im Rahmen dieses Versuchs kam unter anderem auch faseroptische Messtechnik zur Erfassung der Temperatur und Dehnung im Inneren des Betonbalkens zum Einsatz.

Aus Sicht der faseroptischen Sensorik besteht in diesem Fall besonderes Interesse an einer möglichen Überwachung des Aushärtvorgangs des Betons anhand der Temperaturentwicklung im Inneren des Betonbalkens. Aber auch daran, ob die Messungen der Dehnungssensoren basierend auf der Raman-Rückstreuung tatsächlich dehnungsunabhängig sind und in weiterer Folge eine Temperaturkompensation der Brillouin-Messungen möglich ist.

Der Versuch bestand zum einen aus der Beobachtung des Aushärtvorgangs des Betonbalkens und zum anderen aus einem Belastungsversuch, wie in den nachfolgenden Kapiteln erläutert wird.

6.1 Instrumentierung des Betonbalkens

Zur Erfassung von Dehnungs- und Temperaturänderungen im Inneren des Betonbalkens wurden an den oberen und unteren Bewehrungseisen faseroptische Temperatur- und Dehnungssensoren angebracht. Als Sensoren wurden das BRUsens temperature 85 °C, das BRUsens strain V9 und das BRUsens strain V3 Sensorkabel verwendet. Wesentlich dabei ist, dass die Temperatursensoren ausschließlich temperatursensitiv sind, während die Dehnungssensoren dehnungs- und temperatursensitiv sind. Der Unterschied zwischen den beiden Dehnungssensorkabel besteht im Aufbau der Schutzhülle. Das BRUsens strain V9 Kabel besitzt im Gegensatz zum BRUsens strain V3 Kabel neben der Außenhülle aus Kunststoff eine Drahtbewehrung im Innern. Diese bietet zwar einen zusätzlichen Schutz der Faser, hat jedoch den Nachteil, dass die Faser dadurch träger auf Dehnungs- oder Temperaturänderungen reagiert.

Mit dem Einbau der Sensorkabel wurde an der unteren Schicht der Bewehrungsseisen begonnen. Zur Erfassung der Temperatur wurden neben zwei BRUsens temperature 85 °C Sensorkabel auch zwei BRUsens strain V3 Sensorkabel installiert. Das BRUsens strain V3 Kabel wurde dabei in ein schwarzes Hüllrohr eingebettet, um zu gewährleisten, dass das gemessene Signal ausschließlich temperaturabhängig ist. Für die Dehnungserfassung wurden ein BRUsens strain V9 und ein BRUsens strain V3 Sensorkabel installiert. Abb. 6.1 zeigt den Einbau der Sensorkabel an der unteren Bewehrungsschicht.

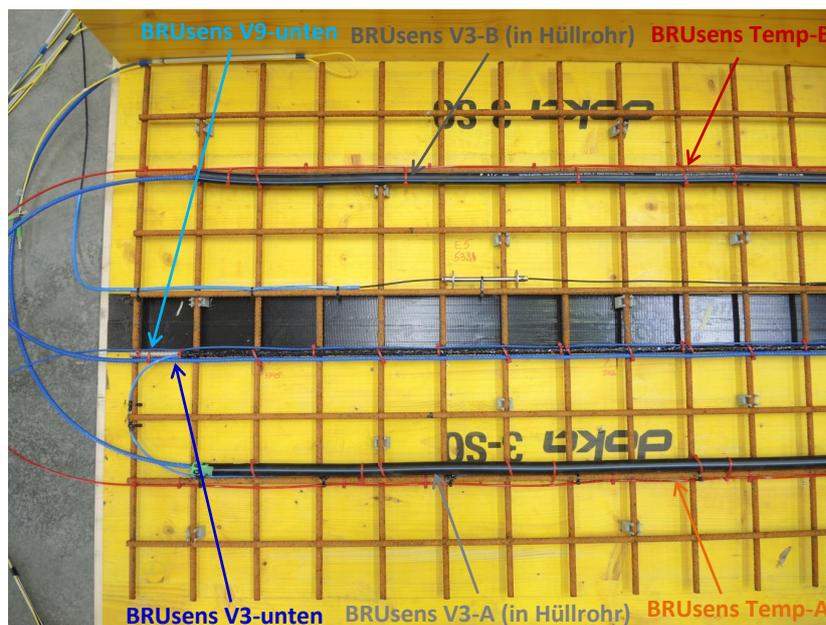


Abbildung 6.1: Einbau der Temperatur- und Dehnungssensoren an der unteren Bewehrungsschicht des Betonbalken

In weiterer Folge werden in Abhängigkeit ihrer Einbauposition die Temperatursensoren des Typs BRUsens temperature 85 °C als BRUsens Temp-A bzw. Temp-B, die Temperatursensoren des Typs BRUsens strain V3 im Hüllrohr als BRUsens V3-A (in Hüllrohr) bzw. V3-B (in Hüllrohr), der Dehnungssensor des Typs BRUsens strain V9 als BRUsens V9-unten und der Dehnungssensor des Typs BRUsens strain V3 als BRUsens V3-unten bezeichnet.

Nach der Installation der Sensorkabel an der unteren Bewehrungsschicht wurde die Schalung durch den Einbau der drei noch fehlenden Seiten komplettiert. Die beiden Stirnseiten wurden dabei mit Bohrlöchern versehen, durch welche die mit Konnektoren versehenen Enden der Sensorkabel durchgezogen wurden, um diese zu einem späteren Zeitpunkt miteinander verbinden und an das Zuleitungskabel anschließen zu können. Anschließend wurde die obere Bewehrungsschicht mit einem BRUsens strain V9 und einem BRUsens strain V3 Kabel für Dehnungsmessungen ausgestattet, wobei in weiterer Folge Ersterer als BRUsens V9-oben und Letzterer als

BRUsens V3-oben bezeichnet wird. In Abb. 6.2 sind die stirnseitige Schalung mit durch die Öffnungen durchgezogener Sensorkabel (links und Mitte) und die Installation der Dehnungssensoren an den oberen Bewehrungsseisen (rechts) abgebildet.



Abbildung 6.2: Stirnseitige Schalung mit durchgezogenen Sensorkabeln (links und Mitte) und Installation der Dehnungssensoren BRUsens V9 und BRUsens V3 an den obere Bewehrungsseisen (rechts)

Eine Gesamtübersicht aller eingebauten Sensoren ist in Abb. 6.3 gegeben. Neben den verteilten faseroptischen Sensoren wurden noch weitere Sensoren der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) installiert, auf welche jedoch in weiterer Folge nicht eingegangen wird.

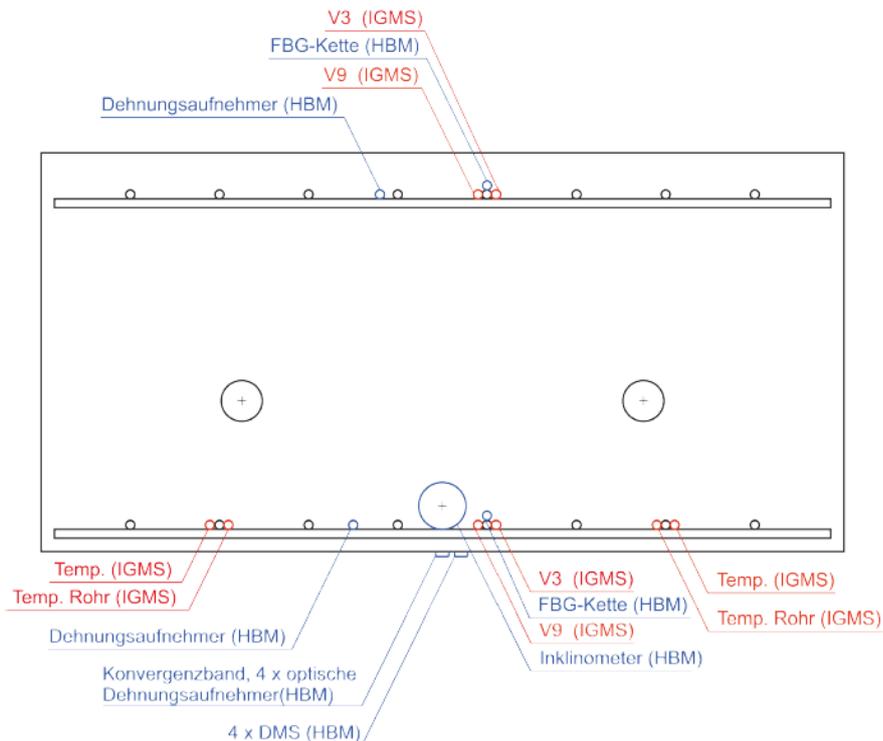


Abbildung 6.3: Messquerschnitt der eingebauten Sensoren

6.2 Langzeitbeobachtung des Aushärtevorgangs

6.2.1 Versuchsdurchführung

Für die Erfassung der Dehnungs- und Temperaturänderungen in Folge der Aushärtung des Betons wurde zum einen das APS und zum anderen das FT eingesetzt. Die Messstation wurde in einem abgeschlossenen Bereich im BTZ untergebracht und über eine 100 m lange Zuleitungsfaser mit den Sensoren im Betonbalken verbunden, wie aus Abb. 6.4 ersichtlich.

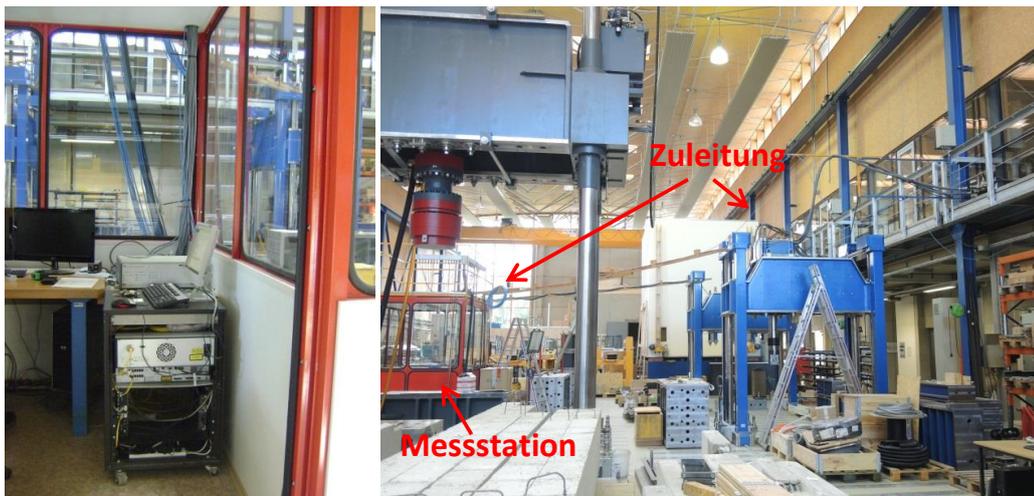


Abbildung 6.4: Aufbau der Instrumente in der Messtation (links) und die von der Messtation zu den Sensorkabeln am Betonbalken verlegte Zuleitung (rechts)

Aus den eingebauten faseroptischen Sensorkabeln wurden zwei separate Messschleifen, jeweils bestehend aus zwei Temperatursensoren und zwei Dehnungssensoren, zusammengeschlossen. Die Konfiguration der beiden Messschleifen kann der nachfolgenden Abb. 6.5 entnommen werden. Die Messschleife in der linken Abbildung wurde dabei mittels des APS und jene in der rechten Abbildung mittels des FT gemessen.

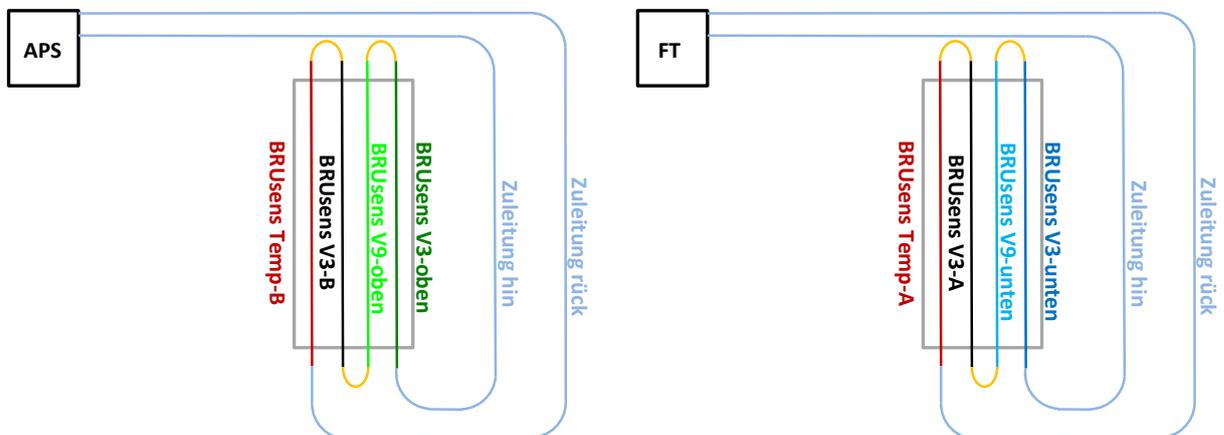


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Messschleife des APS (links) und der Messschleife des FT (rechts)

Die Messungen beider Instrumente wurden jeweils am Tag vor dem Betonieren des Balkens gestartet. Die Messeinstellungen des APS können nachfolgender Tabelle 6.1 entnommen werden.

Tabelle 6.1: Messeinstellungen der Dauermessung zur Beobachtung des Aushärtevorgangs des Betonbalkens

Datum	Single-/ Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Sampling- intervall
06.07.2017 - 01.08.2017	Dual-Ended	250 m	450 s	1 m	0.25 m

Nachdem der Beton weitestgehend ausgehärtet war, wurde mit dem Ausschalen begonnen. Dafür wurden die faseroptischen Sensorkabel von der Zuleitung getrennt, um diese durch die Aussparungen in den Stirnseiten der Schalung hindurchziehen zu können. Für das geplante Umheben des Balkens am darauffolgenden Tag wurden die Faserenden zudem mittels Klebebänder an der Oberseite des Balkens befestigt und anschließend wieder mit der Zuleitung verbunden. Der Betonbalken selbst wurde für das Umheben horizontal vorgespannt, um eine eventuelle Rissbildung aufgrund des Eigengewichtes zu vermeiden. Am darauffolgenden Tag erfolgte das Umheben des Betonbalkens, wofür die faseroptischen Sensoren abermals von der Zuleitung abgeschlossen wurden. Abb. 6.6 zeigt das Ausschalen des Betonbalkens (links), das Ankleben der Fasern auf dem Betonbalken für das anschließende Umheben (Mitte) und den auf zwei Stehelemente umgehobenen Betonbalken (rechts).



Abbildung 6.6: Ausschalen des Betonbalkens (links), Befestigung der Faserenden an der Oberfläche des Betonbalken (Mitte) und auf zwei Stehelemente umgehobener Betonbalken (rechts)

Für den anschließenden Belastungsversuch (siehe Kapitel 6.3) wurde der Balken unter das 4-Punkt Prüfgerüst gehoben. In diesem Fall wurden die Fasern nicht von der Zuleitung getrennt. Mit den Vorbereitung für die Belastungsversuche wurde die Dauermessung nach etwa 4 Wochen schließlich beendet.

6.2.2 Auswertung und Ergebnisse

Im Rahmen der Auswertung wurde zunächst der zeitliche Verlauf der Temperatur relativ zur ersten Messung für die jeweils mittlere Position der vier mittels des APS gemessenen Sensoren analysiert, welche in Abb. 6.7 dargestellt sind.

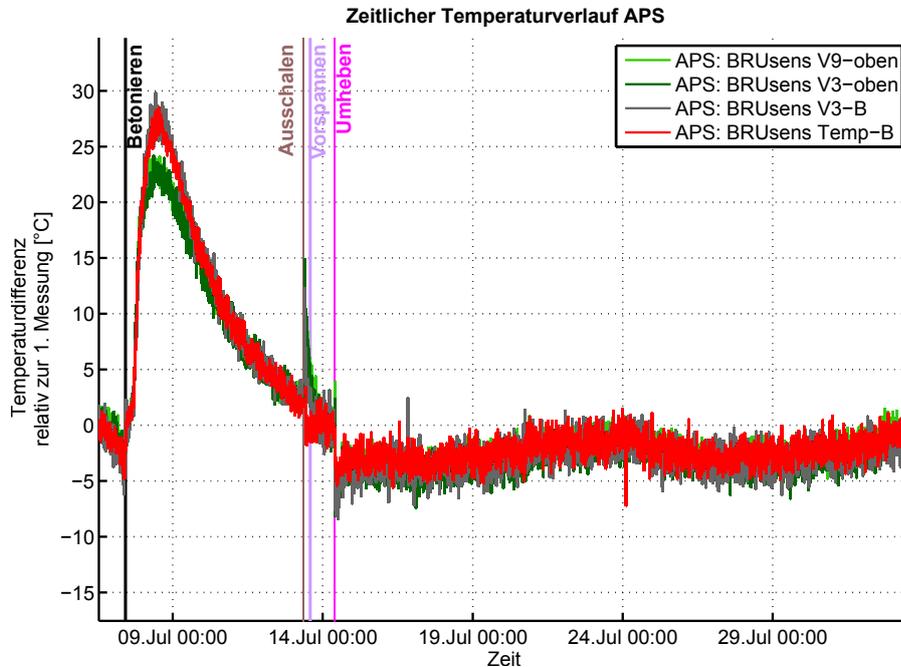


Abbildung 6.7: Temperaturverlauf der Sensoren BRUsens V9-oben, BRUsens V3-oben, BRUsens V3-B, BRUsens Temp-B über die Zeit

Alle Sensoren zeigen einen erheblichen Temperaturanstieg aufgrund der chemischen Reaktion im Beton, wobei innerhalb der ersten 24 Stunden nach dem Betonieren die maximale Temperatur erreicht ist. Die Sensoren BRUsens Temp-B und BRUsens V3-B (im Hüllrohr) an den unteren Bewehrungsseisen weisen eine Temperaturerhöhung von 27 °C auf, die Sensoren BRUsens V3-oben und BRUsens V9-oben an den oberen Bewehrungsseisen eine Temperaturerhöhung von lediglich 22 °C. Dies hängt damit zusammen, dass der Betonbalken nach oben hin geöffnet ist und damit die Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Im Bereich der unteren beiden Sensoren kann die Wärme dagegen nur schlecht entweichen. Anhand der Abkühlung kann auf den Aushärtungsgrad des Betons geschlossen werden. Nach ca. 7 Tagen wird die Ausgangstemperatur wieder erreicht, womit die Aushärtung des Betons abgeschlossen ist.

Des Weiteren ist auffällig, dass jeweils nach dem Wiederanschießen der Messschleife an die Zuleitung, d.h. nach dem Ausschalen und nach dem Umheben, ein Temperatursprung von mehreren °C in den Signalen aller vier Sensoren zu sehen ist, der sich über einen Zeitraum von etwa drei Stunden wieder der eigentlichen Temperaturkurve annähert. Die Ursache für dieses Verhalten ist

derzeit noch nicht bekannt und bedarf daher weiteren Untersuchungen, die jedoch im Rahmen der Arbeit nicht mehr möglich waren.

In weiterer Folge sollte ein Vergleich zwischen den APS- und FT-Messungen gezogen werden. Dafür wurden in einem ersten Schritt die Messungen des FT, welche in der Einheit GHz vorliegen, in Temperaturen umgerechnet. Die Temperaturkoeffizienten zur Umrechnung der FT-Messungen der Temperatursensoren BRUsens V3-A (im Hüllrohr) und BRUsens Temp-A wurden im Zuge eines Ausgleichs nach kleinsten Quadraten basierend auf den Temperaturen der BRUsens V3-B (im Hüllrohr) und BRUsens Temp-B Sensoren (gemessen mittels APS) berechnet. Daraus resultierte sowohl für die BRUsens strain V3 Sensoren im Hüllrohr als auch für die BRUsens temperature 85 °C Sensoren ein Wert von 1.11 MHz/°C.

Für die Umrechnung der Messungen der Dehnungssensoren BRUsens V9-oben und BRUsens V3-oben in Temperaturen war eine Schätzung des Temperaturkoeffizienten nicht möglich, da zwischen den Dehnungssensoren an den oberen Bewehrungseisen BRUsens V9-oben und BRUsens V3-oben (gemessen mittels APS) und den Dehnungssensoren an den unteren Bewehrungseisen BRUsens V9-unten und BRUsens V3-unten (gemessen mittels FT), wie Abb. 6.7 bereits gezeigt hat, ein Temperaturoffset besteht. Die Umrechnung der Messungen der Dehnungssensoren BRUsens V9-unten und BRUsens V3-oben erfolgte daher mit dem aus [Measures, 2001, S.316] bekannten Wert von 1.21 MHz/°C.

Eine Gegenüberstellung der Messungen der Temperatursensoren einerseits gemessen mittels des APS und andererseits gemessen mittels des FT in Abb. 6.8 zeigt dabei, dass die Temperaturkurven der mittels des FT gemessenen Temperatursensoren BRUsens V3-A (im Hüllrohr) und BRUsens Temp-A an ihrem Maximum wie auch im weiteren Verlauf der Abkühlung lediglich um ca. 0.5 °C bzw. 2 °C zu den APS-Temperaturkurven differieren. Im Zuge der Aufwärmphase nach dem Betoniervorgang und nach dem Umheben des Balkens stimmen die vier Signale annähernd exakt überein. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Temperaturkurve des BRUsens V3-A (im Hüllrohr) gegenüber jener des BRUsens Temp-A Sensors ab dem Maximum und im Zuge der Abkühlungsphase um ca. 1 °C erhöht ist. Nach dem Umheben verringert sich die Differenz auf rund 0.5 °C.

Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Hüllrohr, in welchem der BRUsens V3-A eingebettet ist, nicht mit der Schalung abschließt, sondern einige Zentimeter davor endet (siehe Abb. 6.1). Dadurch entsteht eine direkte Verbindung zwischen dem Sensor und dem Beton, wodurch sich während des Aushärtvorgangs eine Dehnung auf die Sensorfaser auswirkt. Auch beim BRUsens

V3-B Sensor ist das Hüllrohr im Vergleich zum Sensorkabel zu kurz und es entsteht ebenfalls eine Verbindung zwischen Beton und Sensorkabel. In diesem Fall zeigt sich jedoch keine Auswirkung auf das Signal, da die Raman-Rückstreuung gegenüber Dehnungsänderungen invariant ist, wie in weiterer Folge bewiesen wird.

Zudem ist ersichtlich, dass das Rauschen der APS-Messkurven um ein Vielfaches höher ist als jenes der FT-Messkurven. Dies ist jedoch zu erwarten, da laut Hersteller die mittlere Standardabweichung des APS mit ca. 0.6°C (bei einer Messzeit von 450 s und einer räumlichen Auflösung von 1 m) um etwa ein 6-faches höher ist als jene des FT, welche für die Temperaturerfassung ca. 0.1°C beträgt.

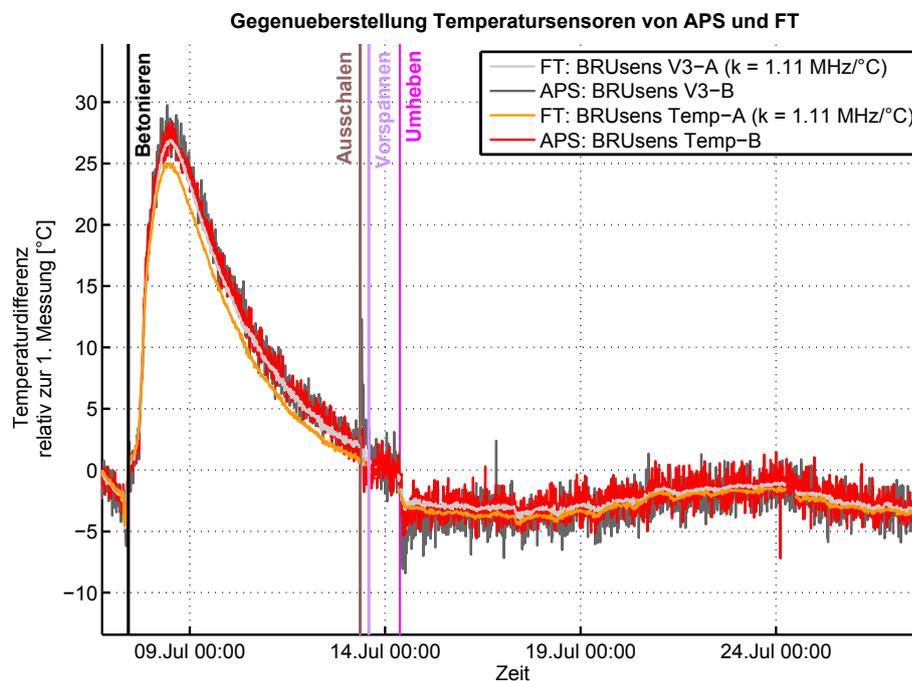


Abbildung 6.8: Gegenüberstellung der Temperatursensoren BRUsens V3-A, BRUsens V3-B, BRUsens Temp-A und BRUsens Temp-B

Abb. 6.9 zeigt eine Gegenüberstellung der in Temperaturen umgerechneten Messkurven der mittels des FT erfassten Dehnungssensoren BRUsens V9-unten und BRUsens V3-unten und die Messkurven der mittels des APS erfassten Dehnungssensoren BRUsens V9-oben und BRUsens V3-oben. Zunächst einmal ist ersichtlich, dass die Temperaturmaxima der vom FT erfassten Dehnungssensoren um bis zu 7°C höher liegt als jenes der vom APS erfassten Dehnungssensoren. Grund dafür sind die in Folge des Aushärtens des Betons auf die Fasern wirkenden Dehnungen, welche durch das Verfahren der Brillouin-Rückstreuung miterfasst werden (siehe Kapitel 2.1.2). Im weiteren Aushärteverlauf kühlt der Beton langsam aus, wie die Messkurven der vier abgebildeten Dehnungssensoren zeigen. Die Messkurven des FT sinken dabei sogar unter die

Messkurven des APS, da der Beton während des Aushärtens nicht nur auskühlt, sondern auch zu schrumpfen beginnt und damit eine negative Dehnung auf die Sensoren wirkt. Vor allem nach dem Umheben differieren die Messungen des FT von jenen des APS um ca.12 °C.

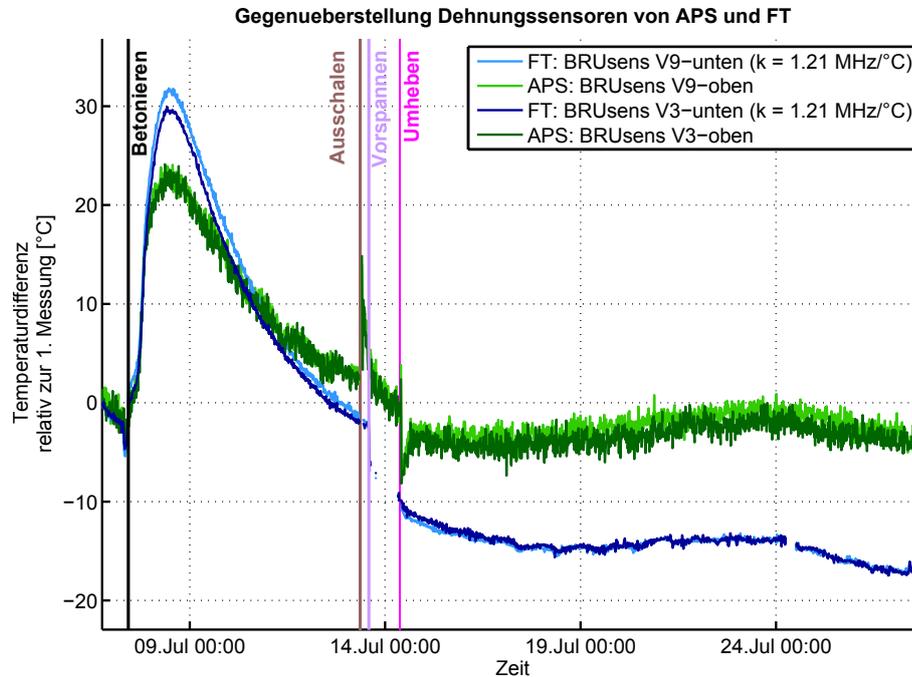


Abbildung 6.9: Gegenüberstellung der Dehnungssensoren BRUsens V9-unten, BRUsens V9-oben, BRUsens V3-oben und BRUsens V3-unten

Dies lässt sich durch eine negativ auftretende Dehnung aufgrund des Vorspannens des Betonbalken erklären. Beim Vorspannen (siehe Abb. 6.10) werden die in den Betonbalken eingeführten Zugstangen mittels hydraulischer Pumpen gespannt, wodurch der Betonbalken selbst und damit auch die Messfasern zusammengedrückt werden.



Abbildung 6.10: Vorspannen des Betonbalkens für das anschließende Umheben

Obwohl es sich bei den mittels APS gemessenen Sensoren BRUsens V9-oben und BRUsens V3-oben ebenfalls um Dehnungssensoren handelt, zeigen die Messkurven keine Auswirkungen der auftretenden Dehnungen, wodurch die Dehnungsinsensitivität der Raman-Rückstreuung bewiesen ist.

In Folge dessen stellte sich die Frage nach einer Temperaturkompensation des Brillouin-Signals mittels des Raman-Signals. Es bietet sich damit vor allem der Vorteil, dass für beide Messverfahren ein und dieselbe Messfaser verwendet werden kann, wodurch sich zum einen die Installation eines separaten Temperatursensors neben dem Dehnungssensor erübrigen würde und zum anderen die tatsächliche Temperatur über die gesamte Länge des Dehnungssensors bekannt wäre.

Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, erfolgte eine Temperaturkompensation der Messungen des BRUsens V9-unten Dehnungssensors einerseits auf Basis von Brillouin-Messungen entlang der Temperaturkabel BRUsens V3-A (im Hüllrohr) und BRUsens Temp-A und andererseits auf Basis von Raman-Messungen entlang der Temperaturkabel BRUsens V3-B (im Hüllrohr) und BRUsens Temp-B, die in Abb. 6.11 nochmals gegenübergestellt sind.

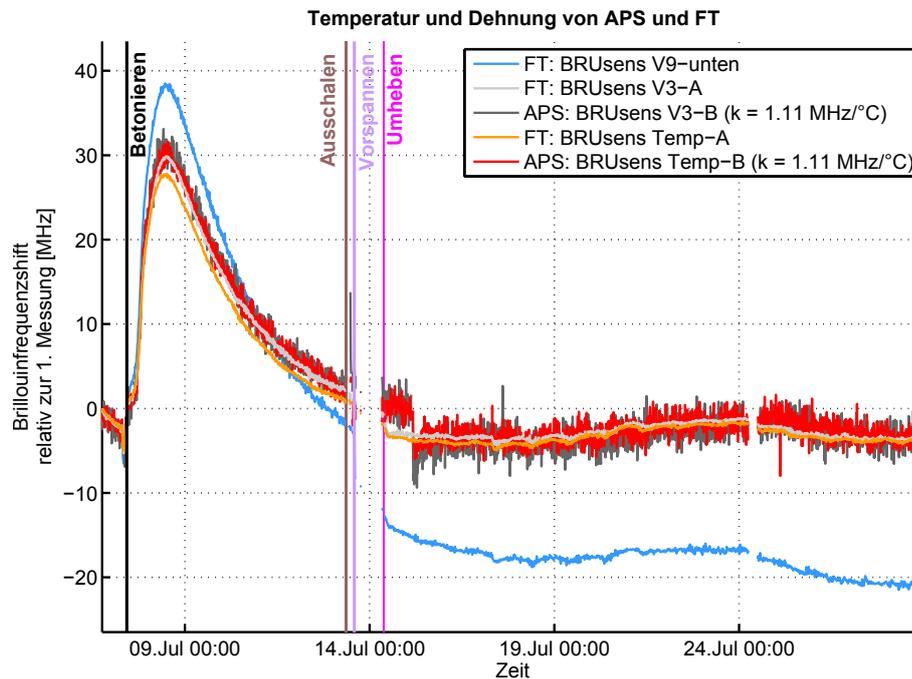


Abbildung 6.11: Gegenüberstellung des zu kompensierenden Signals des Dehnungssensors BRUsens V9-unten und der Temperatursignale der BRUsens V3-A, BRUsens V3-B, BRUsens Temp-A und BRUsens Temp-B Sensoren

Für eine zuverlässige Temperaturkompensation ist dabei von äußerster Wichtigkeit, dass die Temperatursensoren sich in unmittelbarer Nähe des zu kompensierenden Dehnungssensors befinden, um annähernd gleiche Umgebungsbedingungen zu gewährleisten. Im vorliegenden Fall sind alle Sensoren, die für die Kompensation zum Einsatz kommen, an den unteren Bewehrungsseisen

angebracht und demzufolge annähernd homogenen Umgebungsbedingungen ausgesetzt.

Die Temperaturkompensation basiert auf der linearen Änderung des Brillouinfrequenzshifts Δf_b mit der Änderung der Dehnung $\Delta\epsilon$ und der Temperatur ΔT der Faser, welche bereits in Kapitel 2.1.2 erläutert wurde und nachfolgend nochmals angeführt ist.

$$\Delta f_b = C_\epsilon \Delta\epsilon + C_T \Delta T \quad (6.1)$$

Ausgehend von diesem linearen Zusammenhang ergibt sich die Temperaturkompensation basierend auf Brillouin-Temperaturmessungen und Raman-Temperaturmessungen wie folgt.

$$\Delta\epsilon_{Brillouin} = \frac{(\Delta f_b - C_T \Delta T_{Brillouin})}{C_\epsilon} \quad (6.2)$$

$$\Delta\epsilon_{Raman} = \frac{(\Delta f_b - C_T \Delta T_{Raman})}{C_\epsilon} \quad (6.3)$$

Die Änderung des Brillouinfrequenzshifts Δf_b wird dabei durch Referenzierung aller Messungen auf die erste Messung bestimmt. Die Temperaturänderungen $\Delta T_{Brillouin}$ resultieren indirekt aus den mittels des FT gemessenen Brillouinfrequenzshifts entlang der Temperatursensoren, wobei auch hier die Änderungen des Brillouinfrequenzshifts $\Delta f_{T_{Brillouin}}$ relativ zur ersten Messung bestimmt wurden.

$$\Delta T_{Brillouin} = \frac{\Delta f_{T_{Brillouin}}}{C_T} \quad (6.4)$$

Dadurch kann die Temperaturkompensation mittels Brillouin-Temperaturmessungen auf nachfolgende Formel vereinfacht werden.

$$\Delta\epsilon_{Brillouin} = \frac{\Delta f_b - \Delta f_{T_{Brillouin}}}{C_\epsilon} = \frac{(f_b - f_{b_0}) - (f_T - f_{T_0})}{C_\epsilon} \quad (6.5)$$

Im Gegensatz zu den Messwerten des FT, bei welchen es sich um Frequenzen handelt, liegen die Messwerte des APS in der Einheit °C vor. Die Temperaturänderungen ΔT_{Raman} können daher direkt aus den Raman-Messungen durch Referenzierung auf die erste Messung bestimmt werden. Als Temperaturkoeffizient C_T wird der im Zuge des Ausgleichs berechnete Wert von 1.11 MHz/°C herangezogen.

Für die Umrechnung in $\mu\epsilon$ wurde für beide Ansätze ein Dehnungskoeffizient C_ϵ von 479 MHz/% herangezogen, welcher im Zuge von Laboruntersuchungen für das BRUsens strain V9 Kabel bestimmt wurde.

Hinsichtlich der zu erreichenden Standardabweichung der Temperaturkompensation mittels Brillouin-Temperaturmessungen und Raman-Temperaturmessungen lässt sich diese zunächst theoretisch über den Ansatz der Varianzfortpflanzung für beide Ansätze wie folgt abschätzen.

$$s_{\Delta\epsilon_{Brillouin}} = \frac{2\sigma_{f_b}}{C_\epsilon} \cdot 10^4 \quad (6.6)$$

$$s_{\Delta\epsilon_{Raman}} = \frac{\sqrt{2\sigma_{f_b}^2 + 2C_T\sigma_{T_{Raman}}^2}}{C_\epsilon} \cdot 10^4 \quad (6.7)$$

Die Standardabweichungen der in die Varianzfortpflanzung einfließenden Parameter wurden den jeweiligen Datenblättern der Hersteller entnommen und lauten wie folgt: $\sigma_{f_b} = 0.1 MHz$ (entnommen aus fibrisTerre Systems GmbH [2015]) und $\sigma_{T_{Raman}} = 0.6 \text{ }^\circ C$ (entnommen aus AP Sensing GmbH [2014a]). Für den Dehnungskoeffizienten und den Temperaturkoeffizienten werden die bereits im Zuge der Temperaturkompensation verwendeten Werte $C_\epsilon = 479 MHz/\%$ und $C_T = 1.11 MHz/^\circ C$ herangezogen.

In Folge der Varianzfortpflanzung unter Verwendung der genannten Werte ergibt sich damit für die Temperaturkompensation auf Basis der Brillouin-Rückstreuung eine theoretisch erreichbare Standardabweichung von $4.18 \mu\epsilon$. Im Vergleich dazu beträgt die theoretisch erreichbare Standardabweichung für die Temperaturkompensation basierend auf der Raman-Rückstreuung $18.9 \mu\epsilon$, die angesichts des höheren Messrauschens der APS-Messungen gegenüber den FT-Messungen wie zu erwarten um ein Vielfaches schlechter ist.

Abb. 6.12 zeigt eine Gegenüberstellung der Temperaturkompensation des BRUsens V9-unten Signals basierend auf den Raman-Messungen und den Brillouin-Messungen. Es zeigt sich dabei dass die Temperaturkompensation mittels Raman-Messungen mit jener basierend auf den Brillouin-Messungen annähernd exakt übereinstimmt. Lediglich im Bereich des Temperaturmaximums differiert die Kurve des BRUsens Temp-A Sensors um ca. $55 \mu\epsilon$ und jeweils im Zeitraum von ca. drei Stunden nach dem Wiederanschließen der Messfasern an die Zuleitung, in welchen die Messungen des APS aus noch unerklärlichen Gründen einen Temperaturpeak von mehreren $^\circ C$ aufweisen, weichen die Kurven des APS um ca. $100 MHz$ bis $200 MHz$ von jenen des FT ab.

Ein deutlicher Unterschied zeigt sich auch hinsichtlich des Rauschens. Das vielfach höhere Rauschen des APS-Signals ($\pm 0.6 \text{ }^\circ C$) im Vergleich zum FT-Signal ($\pm 0.1 \text{ }^\circ C$) wirkt sich erheblich auf die Temperaturkompensation aus.

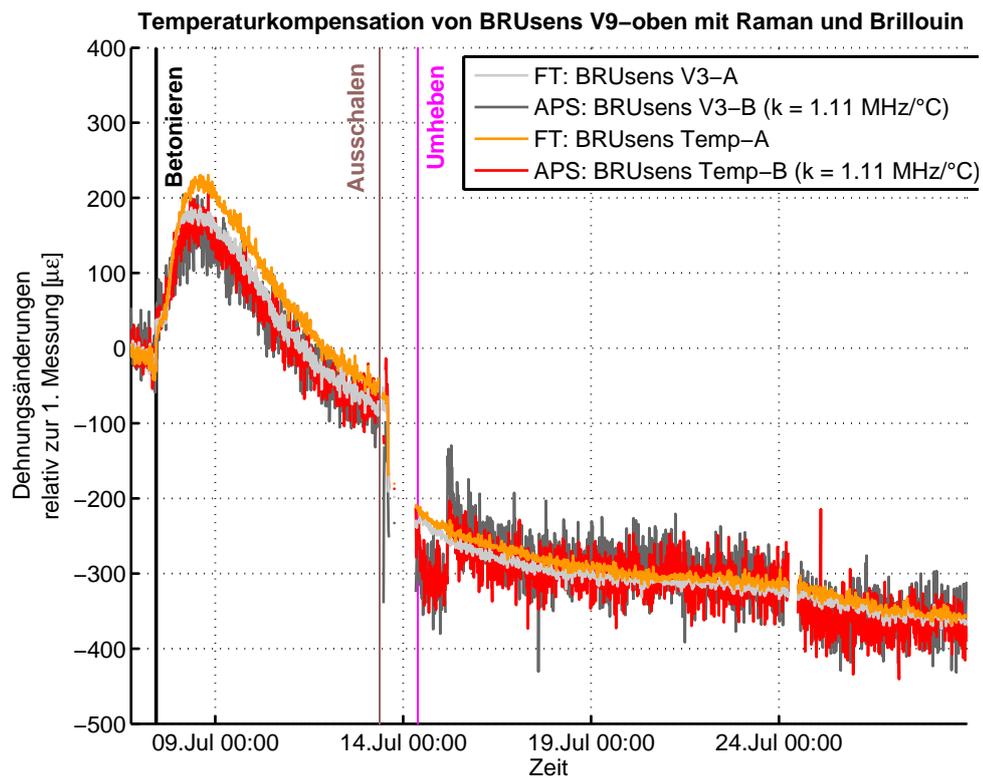


Abbildung 6.12: Gegenüberstellung der Temperaturkompensation des BRUsens V9-unten Signals basierend auf der Raman-Rückstreuung (BRUsens V3-B und BRUsens Temp-B) und auf der Brillouin-Rückstreuung (BRUsens V3-A und BRUsens Temp-A)

Tatsächlich wurde für die Temperaturkompensation basierend auf der Brillouin-Rückstreuung für den BRUsens V3-A Sensor eine Standardabweichung von $\pm 4.5 \mu\epsilon$ und für den BRUsens Temp-A eine Standardabweichung $\pm 3.9 \mu\epsilon$ erreicht. Die tatsächlich erreichbare Standardabweichung für die Temperaturkompensation auf Basis der Raman-Rückstreuung beträgt dagegen für den BRUsens V3-B Sensor $\pm 25.2 \mu\epsilon$ und für den BRUsens Temp-B Sensor $\pm 16.9 \mu\epsilon$. Sowohl für die Temperaturkompensation basierend auf Brillouin-Messungen als auch auf Raman-Messungen ist die tatsächliche Standardabweichung damit für die BRUsens strain V3 Sensoren im Hüllrohr (BRUsens V3-A und BRUsens V3-B) nur geringfügig schlechter und für die BRUsens temperature 85°C Sensoren (BRUsens Temp-A und BRUsens Temp-B) sogar besser als die prädierte Standardabweichung. Grund dafür ist die aufgrund der dünneren Beschichtung bessere Temperatursensitivität des BRUsens temperature 85°C Kabels gegenüber dem BRUsens strain V3 Kabel. Berechnet wurde die tatsächliche Standardabweichung dabei über die letzten 100 Messwerte der Zeitreihe, da in diesem Bereich der Beton fast vollständig erhärtet ist und damit keine Dehnungen mehr erwartet werden.

Betrachtet man die Differenz zum einen zwischen der Temperaturkompensation basierend auf den Messungen des BRUsens V3-A und BRUsens V3-B und zum anderen basierend auf den Messungen des BRUsens Temp-A und BRUsens Temp-B bewegt sich diese im Bereich von ca. $\pm 100 \mu\epsilon$, wie in Abb. 6.13 dargestellt.

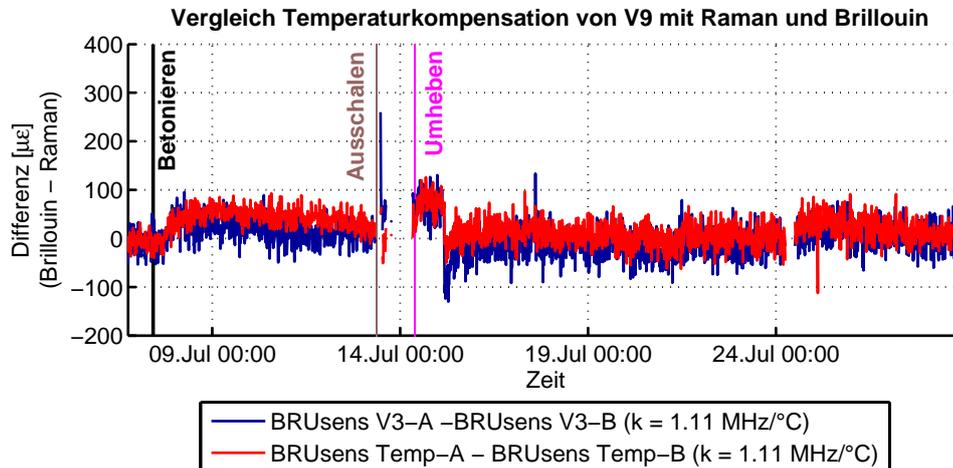


Abbildung 6.13: Differenz zwischen der Temperaturkompensation basierend auf der Raman- und der Brillouin-Rückstreuung in $\mu\epsilon$

Dabei zeigen sich auch hier die Abweichungen, die im Zeitraum nach dem Ausschalen und dem Umheben des Betobalkens aufgrund des unerklärlichen Verhaltens nach dem erneuten Anschließen, nochmals deutlich. Im Zeitraum vor dem Betonieren liegt die Differenz annähernd exakt bei Null, wie es im Falle von normalverteilten Differenzen zu erwarten ist. Die Differenzen nach dem Betonieren und nach dem Umheben des Betonbalken weisen dagegen eine geringe Abweichung von Null auf, was auf einen systematischen Einfluss schließen lässt.

Dies zeigt sich auch bei einer Analyse der Differenzen im Zeitraum von 16.07. bis zum 24.07. in Form eines Histogramms (siehe Abb. 6.14). Dabei ist ersichtlich, dass die Differenzen in dem analysierten Bereich annähernd normalverteilt sind, jedoch der Mittelwert von Null, wie es bei einer Standardnormalverteilung erwartet wird, um ca. $13 \mu\epsilon$ (für V3-A - V3-B) und ca. $7 \mu\epsilon$ (für Temp-A - Temp-B) abweicht. Damit bestätigt sich das Vorhandensein eines systematischen Signalanteils in den Differenzen. Dieser systematische Signalanteil könnte daher rühren, dass durch das Einbetonieren möglicherweise unvorhergesehene Dehnungen auf die Temperaturfasern einwirken, welche das rückgestreute Brillouin-Signal und damit das zur Kompensation erforderliche reine Brillouin-Temperatursignal beeinflussen. Um dies zu beweisen sind jedoch weiterführende Untersuchungen nötig.

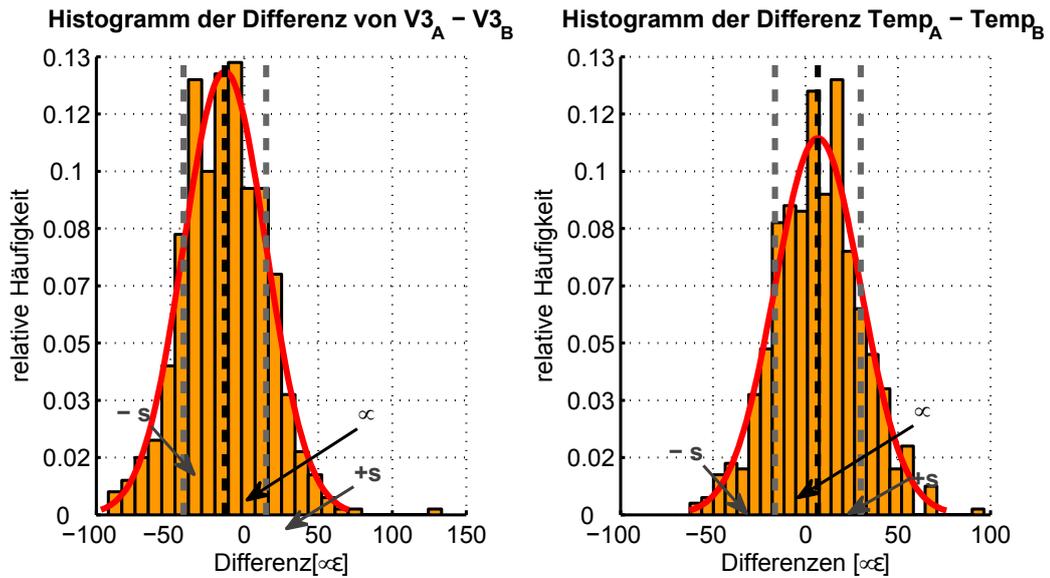


Abbildung 6.14: Histogramme der Differenzen zwischen der Temperaturkompensation basierend auf der Raman- und der Brillouin-Rückstreuung

Vergleicht man die Standardabweichung (wiederum über die letzten 100 Messungen) der Differenzen der BRUsens V3-A und BRUsens V3-B Sensoren und der BRUsens Temp-A und BRUsens Temp-B Sensoren, welche ca. $26.9 \mu\epsilon$ und ca. $18.5 \mu\epsilon$ betragen, mit der über Varianzfortpflanzung ermittelten theoretischen Standardabweichung von etwa $19.3 \mu\epsilon$, ist wie zu erwarten die Standardabweichung der BRUsens V3 Sensoren (im Hüllrohr) nur geringfügig schlechter und jene der BRUsens Temp Sensoren sogar besser. Dies lässt sich wiederum auf vermutlich auf den BRUsens V3-B und BRUsens V3-A Sensor wirkende Dehnung, wie zuvor bereits erläutert, zurückführen.

Angesichts dessen kann schlussgefolgert werden, dass eine Kompensation basierend auf den Temperaturmessungen mittels des APS möglich ist, jedoch wie zu erwarten die Standardabweichung, aufgrund des vielfach höheren Rauschens, im Vergleich zur Kompensation basierend auf Temperaturmessungen mittels des FT deutlich verschlechtert wird. Als Vorteil der Temperaturkompensation basierend auf der Raman-Rückstreuung erweist sich jedoch die vollkommene Insensitivität gegenüber Dehnungen, wodurch dahingehend systematische Einflüsse ausgeschlossen werden können.

6.3 Belastungsversuche

6.3.1 Versuchsdurchführung

Noch während der Dauermessung zur Beobachtung des Aushärtvorgangs wurde der Betonbalken für die folgenden Belastungsversuche unter das 4-Punkt Prüfgerüst gehoben. Mittels des Prüfgerüsts wurde an vier Punkten eine Vertikalkraft aufgebracht. Zudem wurde der Betonbalken mittels der hydraulischen Pumpen vorgespannt. Die Kraft, mit welcher der Balken vorgespannt wird, wird als Normalkraft bezeichnet. Die Position des APS wurde von der Messstation in die Nähe des 4-Punkt Prüfgerüsts verlegt und das Zuleitungskabel durch ein 10 m langes Patchcord ersetzt. Abb. 6.15 zeigt den Betonbalken unter dem 4-Punkt-Prüfgerüst (links), die auf den Betonbalken ausgeübten Kräfte (Mitte) und die unmittelbar neben den Betonbalken verlagerte Messtation (rechts).



Abbildung 6.15: Betonbalken unter dem 4-Punkt-Prüfgerüst (links), die auf den Betonbalken ausgeübten Kräfte (Mitte) und die Messstation unmittelbar neben dem Betonbalken (rechts)

Im Rahmen des Belastungsversuchs wurden insgesamt 15 Belastungsstufen über einen Zeitraum von 2 Tagen auf den Betonbalken aufgebracht (siehe Abb. 6.16).

Der Versuch gliedert sich dabei in zwei Belastungszustände. Beim ersten Belastungszustand I an Tag 1 erfolgten Belastungen und Entlastungen ohne dass plastische Verformungen des Betonbalkens auftreten, wobei die letzte Belastungsstufe im Zustand I über Nacht gehalten wurde. Durch Zustand II an Tag 2 sollten die plastischen und elastischen Verformungen des Betonbalkens untersucht werden, wofür durch die Entfernung der hydraulischen Pumpen und der Zugstangen die Normalkraft (Vorspannung) vollständig weggenommen wurde. In Zustand II erfolgte die Belastung bis zum Bruch des Betonbalkens. (vgl. Henzinger [2017])

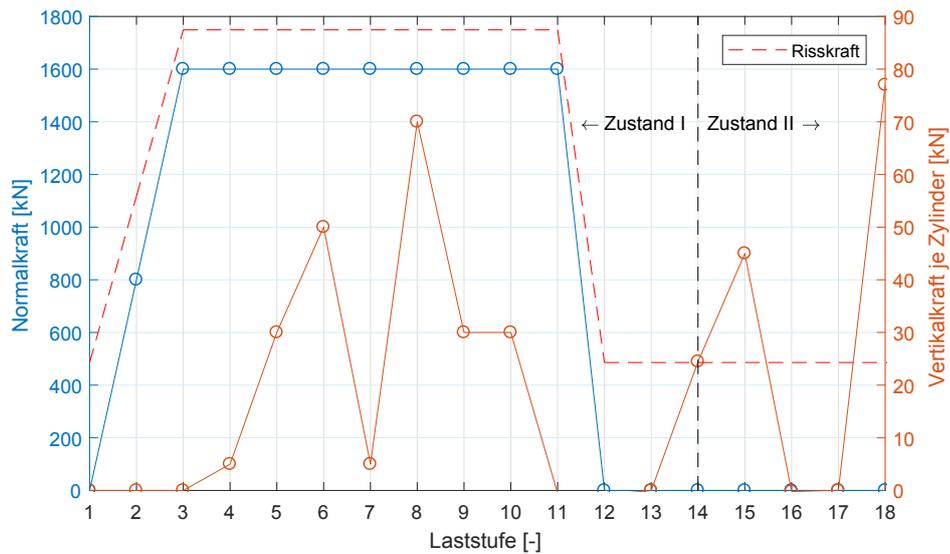


Abbildung 6.16: Belastungsprofil für Zustand I und Zustand II (nach Henzinger [2017])

Für den Belastungsversuch wurden die Messschleifen des APS und des FT neu konfiguriert. Die Messschleife des APS ist nun mehr aus dem Dehnungssensor BRUsens V9-oben und den beiden Temperatursensoren BRUsens Temp-B und BRUsens V3-B (im Hüllrohr) und ist in Abb. 6.17 dargestellt.

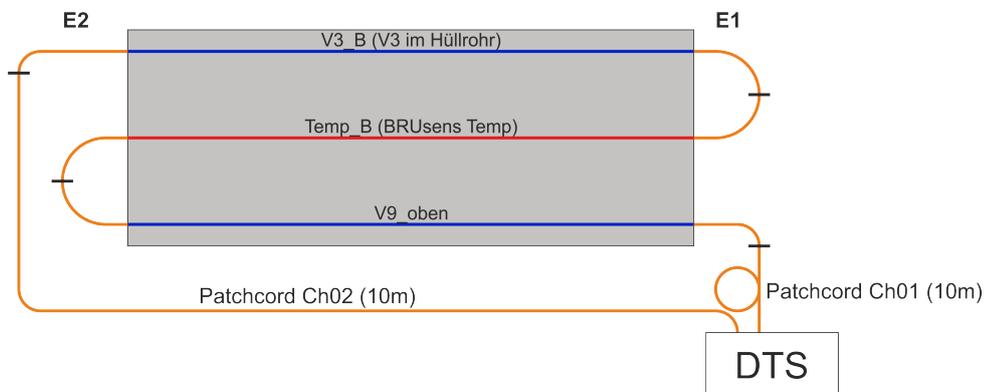


Abbildung 6.17: Messschleife des APS für den Belastungsversuch

Die Messungen mittels des APS wurden an Tag 1 des Belastungsversuches gestartet und endeten nach dem Bruch des Balkens an Tag 2. Die verwendeten Messeinstellungen können Tabelle 6.2 entnommen werden.

Tabelle 6.2: Messeinstellungen des Belastungsversuches

Datum	Single-/ Dual-Ended	Messdistanz	Messzeit	räumliche Auflösung	Sampling- intervall
03.08.2017 - 04.08.2017	Dual-Ended	54 m	60 s	1 m	0.25 m

6.3.2 Auswertung und Ergebnisse

In Abb. 6.18 ist der zeitliche Verlauf der Sensoren BRUsens V9-oben, BRUsens Temp-B und BRUsens V3-B (im Hüllrohr) über die gesamte Messzeit dargestellt. Es zeigt sich dabei, dass sich die starke Belastung des Betonbalkens weder in den Messkurven der Temperatursensoren BRUsens V3-B (im Hüllrohr) und BRUsens Temp-B noch in der Messkurve des Dehnungssensor V9-oben abzeichnet. Damit kann darauf geschlossen werden, dass das Verfahren auf Basis der Raman-Rückstreuung dehnungsunabhängig ist.

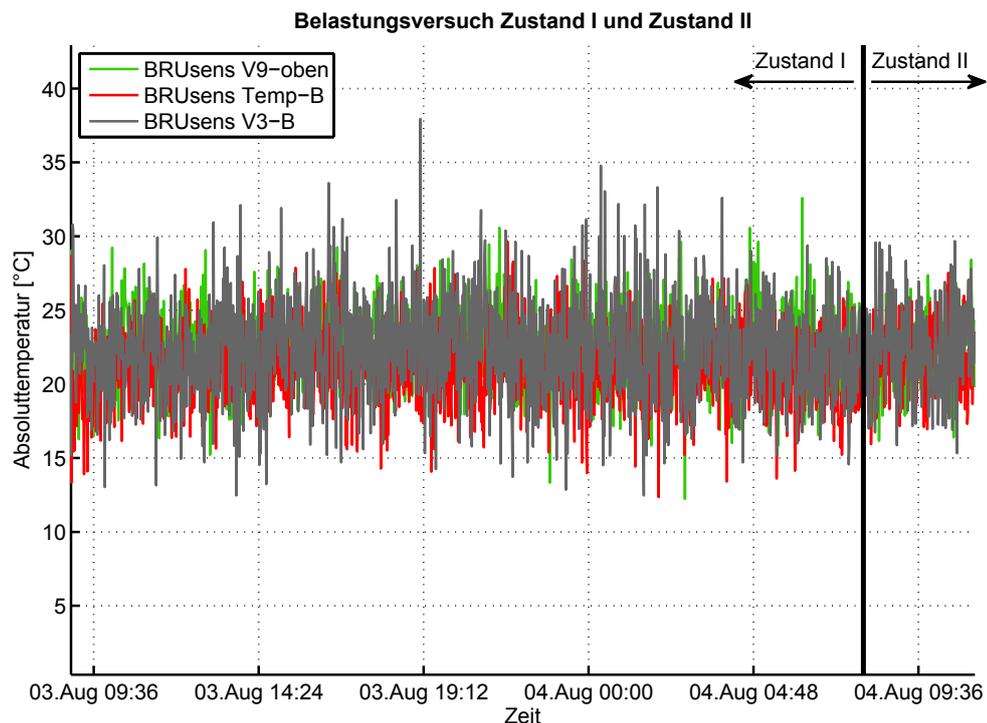


Abbildung 6.18: Temperaturverlauf des Dehnungssensors BRUsens V9-oben und der Temperatursensoren BRUsens V3-B und BRUsens Temp-B während des Belastungsversuchs

Im Rahmen von Zustand II des Belastungsversuchs erfolgte die Lastaufbringung bis zum Bruch des Betonbalkens. Der Bruch erfolgte dabei abrupt, wodurch auch die Temperaturfaser BRUsens Temp-B riss, wie die Anzeige am Display des APS zeigte (siehe Abb. 6.19).

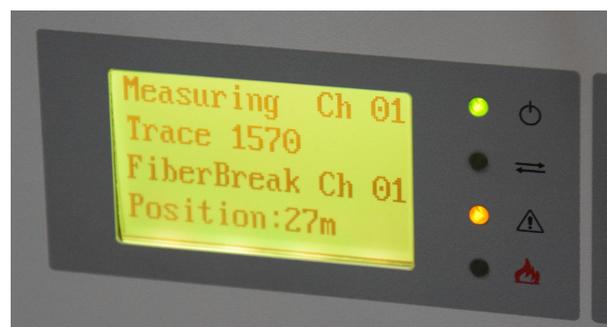


Abbildung 6.19: Anzeige eines Faserbruchs am Display des APS

In Abb. 6.20 ist das Messsignal nach dem Faserriss über die Länge der Messschleife dargestellt. Da im Dual-Ended Modus, d.h. von beiden Seiten der Messschleife, gemessen wurde, ist von beiden Seiten bis zum Riss eine intakte Messkurve vorhanden. Wider Erwarten zeigt sich jedoch im Bereich des Faserrisses lediglich ein deutlich erhöhter Temperaturpeak. Bei einem Faserriss wäre allerdings, aufgrund der Rückreflexionen an den beiden durch den Riss entstandenen Faserrändern, ein abrupter Temperaturabfall auf den absoluten Nullpunkt zu erwarten gewesen. Ob es sich daher tatsächlich um einen Faserriss oder lediglich um einen unmittelbar bevorstehenden Faserriss handelt, konnte derzeit nicht geklärt werden.

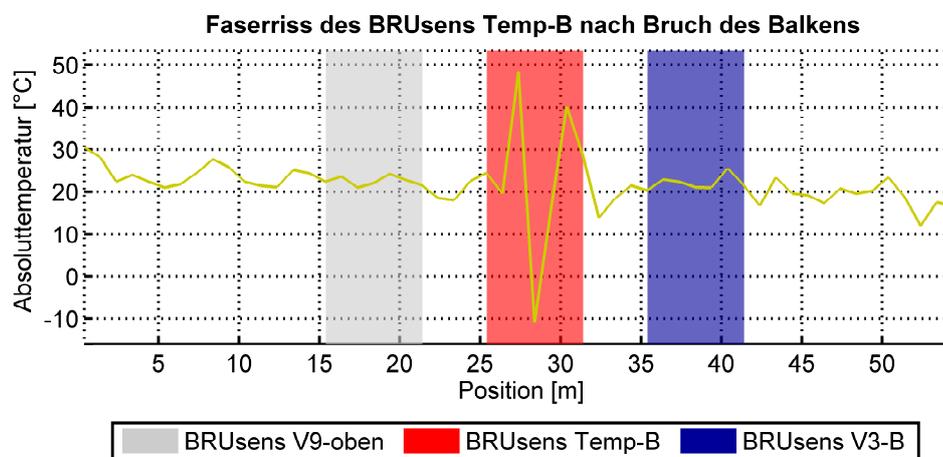


Abbildung 6.20: Messsignal nach dem Faserriss dargestellt über die Länge der Messschleife

7 Resümee und Ausblick

Eine lückenlose und zuverlässige Temperaturerfassung ist vor allem für geodätische Bereiche unerlässlich. Zum einen kann die Temperatur Ursache für auftretende Deformationen an Objekten sein und zum anderen ist sie bei der Erfassung von geometrischen Parametern, wie der Dehnung eine störende Einflussgröße, die es in diesem Fall zu kompensieren gilt. In diesem Zusammenhang wurde die Methode der faseroptischen Temperaturerfassung auf Basis der Raman-Rückstreuung im Rahmen der vorliegenden Arbeit hinsichtlich der erreichbaren Präzision und Genauigkeit und die Anwendbarkeit in der Praxis untersucht.

Als Messinstrument diente dazu das AP Sensing Linear Pro Series N4426A (APS) der Firma AP Sensing. Mit dem APS können laut Hersteller Absoluttemperaturprofile über eine maximale Reichweite von 12 km mit einer räumlichen Auflösung von 1 m bestimmt werden, wobei für eine zuverlässigen Bestimmung der Absoluttemperatur im Vorfeld eine Kalibrierung unbedingt notwendig ist. Ausgelegt ist das Instrument für die Messung mit Single-Mode Fasern, wie sie bspw. in der Kommunikationstechnik oder bei Rayleigh- und Brillouin-Messsystemen verwendet werden. Des weiteren können sowohl einseitige (Single-Ended) als auch zweiseitige (Dual-Ended) Messungen durchgeführt werden. Dies bietet vor allem den Vorteil, dass nicht zwingend eine geschlossene Messschleife vorhanden sein muss, wodurch es auch möglich ist trotz eines Faserbruchs mittels einer Dual-Ended Messung von beiden Seiten jeweils bis zum Faserbruch messen zu können. Die Standardabweichung des APS wird laut Hersteller durch zwei Parameter, einerseits der Wiederholbarkeit und andererseits der Temperaturauflösung, spezifiziert. Während die Wiederholbarkeit die Variation der gemessenen Temperatur einer ausreichenden Anzahl von Wiederholungsmessungen unter konstanten Umgebungsbedingungen für jede Position entlang der Faser beschreibt, wird durch die Temperaturauflösung die Variation der gemessenen Temperatur über die Distanz bei konstanten Umgebungsbedingungen beschrieben. Grundsätzlich ist die Standardabweichung von der Einstellung Single-Ended oder Dual-Ended, der Messzeit und der räumlichen Auflösung abhängig. Laut Hersteller ist bei einer Messzeit von 600 s und einer räumlichen Auflösung von 2 m eine Wiederholbarkeit von 0.3 °C erreichbar.

Bei der Eingangsuntersuchung nach dem Kauf Instruments erwies sich jedoch, dass die vom Hersteller angegebene Standardabweichung für Single-Ended Messungen um ca. 0.2 °C und für Dual-Ended Messungen um 0.4 °C schlechter ist. Im weiteren Verlauf der durchgeführten Messexperimente verschlechterte sich die Standardabweichung zusehends. Zu einem späteren Zeitpunkt stellte sich schließlich heraus, dass beide Anschlusskanäle des APS neben starken Verschmutzungen, die durch eine Reinigung entfernt werden konnten, auch Absplitterungen am Übergang vom Glasfasermantel auf die Beschichtung aufwiesen. Eine anschließende Fehleranalyse zeigte, dass Messungen von Kanal #1 trotz der Absplitterungen keine Beeinträchtigungen aufwiesen, Kanal #2 für Messungen jedoch unbrauchbar war und damit auch keine Dual-Ended Messungen mehr möglich waren. Daraufhin wurde das Instrument zur Reparatur zum Hersteller eingeschickt, im Zuge derer Kanal #2 ausgetauscht und eine Instrumentenkalibrierung durchgeführt wurde. Kanal #1 wurde für gut befunden und daher nicht getauscht. Nach der Reparatur entsprachen die Standardabweichungen für Single-Ended Messungen, sowohl von Kanal #1 als auch Kanal #2, und für Dual-Ended Messungen wieder der Herstellerangabe. Einige Messzyklen später verschlechterte sich jedoch die Standardabweichung diesmal von Kanal #1 zusehends, woraufhin das Instrument erneut eingeschickt wurde. Die Fertigstellung der Reparatur von Kanal #1 erfolgte erst nach dem Abschluss aller Systemuntersuchungen. Ein Eingangstest hat allerdings gezeigt, dass nun die Herstellerspezifikationen wieder erreichbar sind.

Im Rahmen der weiteren Systemuntersuchungen wurden die Auswirkungen der Mess- und Sensoreinstellungen (räumliche Auflösung, Messzeit, Single-Ended/Dual-Ended, Refraktionsindex, Samplingintervall und Startposition der Messung) auf die Standardabweichung der Messungen analysiert. Dabei erwies sich, dass die räumliche Auflösung und die Messzeit den größten Einfluss auf die Standardabweichung haben. Je länger die Messzeit und je geringer die räumliche Auflösung desto besser wird die Standardabweichung. Mit abnehmender Messzeit und höherer räumlicher Auflösung verschlechtert sich die Standardabweichung. Während durch eine Mittelung der räumlichen Auflösung keine Verbesserung der Standardabweichung resultiert, kann durch eine Mittelung über die Messzeit (Mittelung über n Wiederholungsmessungen) die Standardabweichung um \sqrt{n} verbessert werden.

Die Einstellung Single-Ended bzw. Dual-Ended hat insofern einen Einfluss auf die Standardabweichung, als dass bei einseitigen Messungen die Standardabweichung mit zunehmender Distanz zunimmt, bei zweiseitigen Messungen diese dagegen über die Distanz annähernd konstant bleibt.

Der Refraktionsindex hat in erster Linie auf die Berechnung der Faserlänge und damit auf die Positionsdiskretisierung eine Auswirkung. Bei einem Refraktionsindexfehler von 0.18% resultiert für eine 10 km Faserrolle bereits ein theoretischer Fehler in der Bestimmung der Faserlänge von ca. 18 m. Tatsächlich betrug der Fehler lediglich 12 m. Der Grund für die Differenz ist derzeit jedoch noch nicht bekannt.

Die Untersuchung hinsichtlich der Variation des Samplingintervalls und der Startposition von 0 m auf -50 m zeigten keinen Einfluss auf die Standardabweichung der Messungen.

Die maximale Reichweite des APS ist durch eine gerätinterne Einstellung auf 12200 m beschränkt. Bei Überschreitung um bis zu 4 km der maximalen Reichweite reicht die Messung lediglich bis zur letzten Steckverbindung, die sich noch innerhalb der maximalen Reichweite befindet. Überschreitet die Faserlänge 20 km ist gar keine Messung mehr möglich und die Absoluttemperaturkurve sinkt bereits am Faserbeginn auf den absoluten Nullpunkt ab.

In weiterer Folge erfolgte eine Untersuchung des Rauschverhalten aufgrund zunehmender Distanz, Dämpfung und Temperatur. Hinsichtlich der Untersuchung des Rauschverhaltens bei zunehmender Distanz stellte sich heraus, dass bei einer Distanz von 2 km bzw. 4 km sowohl bei Single-Ended als auch Dual-Ended Messungen das Messrauschen über die Distanz konstant ist. Erst bei einer Faserlänge von 10 km zeigt sich das typische Verhalten einer Zunahme der Standardabweichung über die Distanz bei Single-Ended Messungen und einer annähernd konstanten Standardabweichung über die Distanz bei Dual-Ended Messungen.

Bei der Analyse des Dämpfungseinflusses zeigte sich, dass durch eine auftretende Dämpfung von 5 dB die Standardabweichung um das 12-fache ansteigt. Demzufolge sollte vor jeder Messung eine erneute Sensorkalibrierung durchgeführt werden, da ansonsten Dämpfungen, die z.B. durch äußere Einwirkungen, Beschädigungen oder Alterungseffekte der Faser auftreten, die Standardabweichung um ein Vielfaches verschlechtern. Zudem sollten auch, wenn es möglich ist Steckerverbindungen und Spleiße zu lokalisieren, die einzelnen Fasersektionen in jedem Fall separat kalibriert werden. Des weiteren stellte sich heraus, dass bereits bei einer Dämpfung von 5 dB erste Ausfälle auftraten. Von fünf getätigten Messungen waren lediglich drei erfolgreich. In Folge dessen ist darauf zu achten, dass die Gesamtdämpfung 4 dB nicht überschreitet.

Im Rahmen des Temperaturzykluses zur Untersuchung des Rauschverhaltens bei unterschiedlicher Temperatur stellte sich heraus, dass eine Variation der Temperatur keinen Einfluss auf das Messrauschen hat. Jedoch ist eine Abweichung der Absoluttemperatur zwischen dem Temperaturanstieg und dem Temperaturabfall zu beobachten. Die Erforschung der Ursache bedarf

allerdings noch weitere Untersuchungen. Hinsichtlich der Genauigkeit der Absoluttemperatur kann im Vergleich zu einem PT 100 Sensor gesagt werden, dass diese im Bereich von ca. 1 °C liegt.

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit der Temperaturmessung auf Basis der Raman-Rückstreuung in der Praxis wurden zum einen Messungen entlang einer herkömmlichen Kommunikationsleitung des ZID der TUG und zum anderen eine Dauermessung zur Beobachtung des Aushärtevorgangs eines Betonbalkens mit anschließendem Belastungstest in Zusammenarbeit mit dem FMT durchgeführt.

Der erste Praxisversuch zeigte, dass eine Messung entlang einer herkömmlichen Kommunikationsleitung, welche in der Regel dämpfungsärmer als die typischen Messfasern ist, ohne Probleme möglich ist. Aus dem Temperaturprofil entlang der Kommunikationsleitung konnte aufgrund des hohen Messrauschens allerdings nur grob auf den Verlauf dieser geschlossen werden.

Im Rahmen des Betonbalkenversuchs konnte gezeigt werden, dass anhand der Temperaturmessung während des Aushärtevorgangs auf den Aushärtegrad des Betonbalkens geschlossen werden kann. Jeweils nach dem Wiederanschießen der Messfasern an das Instrument tritt allerdings ein Temperatursprung von mehreren °C im Temperatursignal auf, der sich über einen Zeitraum von etwa drei Stunden wieder der eigentlichen Temperaturkurve annähert. Die Ursache für dieses Verhalten ist derzeit noch nicht bekannt und bedarf daher weiterführender Untersuchungen. Zudem konnte auch die Dehnungsunabhängigkeit der Raman-Rückstreuung anhand des Belastungsversuches bestätigt werden. In Folge des Beweises der Dehnungsunabhängigkeit wurde eine Temperaturkompensation der parallel getätigten Dehnungsmessungen auf Basis der Brillouin-Rückstreuung mittels der APS-Temperaturmessungen durchgeführt. Es erwies sich dabei, dass die Temperaturkompensation basierend auf den APS-Temperaturmessung mit einer Standardabweichung von ca. 21 $\mu\epsilon$ möglich ist.

Literaturverzeichnis

AFL. *Datasheet: Noyes M200 Hand-held OTDR*. 2011.

AP Sensing GmbH. *e_ Training two for DTS, Version 1.0*. 2007.

AP Sensing GmbH. *Datasheet: Linear Pro Series N4426A High Performance Singlemode*. 2014a.

AP Sensing GmbH. *AP Sensing DTS Configurator Benutzerhandbuch*. Aufl. 2.0, 83 S., 2014b.

AP Sensing GmbH. *Linear Power Series N4415A, N4425A; Linear Pro Series N4416A, N4426A User's Guide*. Aufl. 5, 63 S., 2016a.

AP Sensing GmbH. *DTS Quick and Easy Course*. Aufl. 5, 23 S., 2016b.

M. Aufleger, J. Dornstädter, T. Strobl, M. Conrad, S. Perzlmaier, und M. Goltz. *10 Jahre verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau*. In: WasserWirtschaft - Fachzeitschrift für Wasser und Umwelttechnik, Ausgabe 10/2007, S. 57 - 59, 2007.

F. Bernhard. *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*. Springer-Verlag, in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Berlin Heidelberg, Deutschland, Aufl. 2, 1591 S., 2014. ISBN 978-3-642-24505-0.

F. Buchmayer. *Automatisierte Dehnungsüberwachung basierend auf vorhandenen faseroptischen Kommunikationsleitungen*. Masterarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, 89 S., 2017.

Chris Conway - Sensa. *Fibre Optic Linear Heat Detection applied to Tunnels*. Tunnel Safety and Ventilation – 2nd International Conference, Graz, S. 82 - 92, 2004.

R. Engelbrecht. *Nichtlineare Faseroptik: Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. Springer-Verlag, in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Berlin Heidelberg, Deutschland, Aufl. 1, 528 S., 2014. ISBN 978-3-642-40968-4.

- A. F. Fernandez, P. Rodeghiero, B. Brichard, F. Berghmans, A. H. Hartog, P. Hughes, K. Williams, und A. P. Leach. *Radiation-tolerant Raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures*. In: IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume 52, Issue 6, S. 2689 - 2694, 2005.
- fibrisTerre Systems GmbH. *Datasheet: fTB 2505*. 2015.
- R. Henzinger. *FOS Gebirgsdruck: Faseroptisch unterstützte Messmethoden zur Beobachtung von Gebirgsdruck*. Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz, 34 S., 2017.
- D. Hwang, D. Yoon, I. Kwon, D. Seo, und Y. Chung. *Novel auto-correction method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-Stokes Raman scattering*. In: Optics Express, Volume 18, Issue 10, S. 9747 - 9754, 2010.
- International Committee of Dam Surveillance. *Dam Surveillance Guide Bulletin 158*.
- C. Kechavarzi, K. Soga, N. De Battista, L. Pelecanos, M. Z. E. B. Elshafie, und R. J. Mair. *Distributed Fibre Optic Strain Sensing for Monitoring Civil Infrastructure: A practical guide*. ICE Publishing, Westminster, London, England, 246 S., 2016. ISBN 978-0-7277-6055-5.
- D. Krohn, T. McDougall, und A. Mendez. *Fiber optic sensors: fundamentals and applications*. SPIE Press, Bellingham, Washington, USA, Aufl. 4, 315 S., 2014. ISBN 978-1-628-41180-5.
- LIOS Technology GmbH. *LIOS Datasheet: EN.SURE OTS4*. vom 18.08.2017 edition, 2017a.
- LIOS Technology GmbH. *LIOS Datasheet: PRE.VENT DTS*. vom 18.08.2017 edition, 2017b.
- LIOS Technology GmbH. *LIOS Datasheet WELL.DONE DSM*. vom 18.08.2017 edition, 2017c.
- J. M. López-Higuera. *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England. 795 S., 2002. ISBN 978-0-471-82053-6.
- R. M. Measures. *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. Academic Press, San Diego, Californien, USA [u.a.], 716 S., 2001. ISBN 978-0-12-487-430-5.
- A. Oppenheim und A. Willsky. *Signale und Systeme - Lehrbuch*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Deutschland [u.a.], Aufl. 2, 721 S., 1992. ISBN 3-527-28433-8.
- P. Profos und T. Pfeifer. *Handbuch der industriellen Meßtechnik*. R. Oldenburg Verlag GmbH, 1994. ISBN 3-486-22592-8.

- J. Santos und F. Farahi. *Handbook of Optical Sensors*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, Florida, USA [u.a], Aufl. 20140910, 699 S., 2015. ISBN 978-1-4398-6685-6.
- Sensornet. *Sentinel DTSTM - Datasheet: DTS-XR Single Mode*. 2016.
- Siemens AG Österreich. *Cooler Lösungen für heiße Themen*. In: Brandschutzjahrbuch, Ausgabe 2006/2007, S. 78 - 80, 2007.
- Silixa Ltd. *UltimaTM-DTS Datasheet*. 2015.
- M. A. Soto, A. Signorini, T. Nannipieri, S. Faralli, und G. Bolognini. *High-Performance Raman-Based Distributed Fiber-Optic Sensing Under a Loop Scheme Using Anti-Stokes Light Only*. In: IEEE Photonics Technology Letters, Volume 23, Issue 9, S. 534 - 536, 2011.
- L. Thévenaz und F. Berghmans. *Advanced fiber optics: concepts and technology*. EPFL Press [u. a.], Lausanne, Schweiz, Aufl. 1, 393 S., 2011. ISBN 978-2-940222-43-8.
- K. Thyagarajan und A. Ghatak. *Fiber Optic Essentials*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, Aufl. 1, 242 S., 2007. ISBN 978-0-470-09742-7.
- E. Udd und W. B. J. Spillman. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, Aufl. 2, 498 S., 2011. ISBN 978-1-118-01409-7.
- B. Vogel, S. Großwig, und A. Senze. *Die verteilte faseroptische Temperatursensorik Allgemeine Grundlagen und Beispiele für die Anwendung in der Praxis*. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten Ausgabe 7/2011, S. 264 - 271, 2011.
- S. Zhu, H. Ge, J. Pan, H. Zhu, und J. Wang. *Application Research of Distributed Optical Fiber Raman Temperature Sensor in the Security of Oil Depot*. In: Optoelectronics Global Conference (OGC), Shenzhen, China, 2015.