



Christoph Monsberger, BSc

Verteilte faseroptische Dehnungsmessung mit dem hochauflösenden Luna OBR 4600

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

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

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Andrea und Herbert sowie meinen Großeltern Erika und Norbert, die mich in meiner studentischen Laufbahn finanziell unterstützt und mir immer einen familiären Rückhalt geboten haben. Ohne diese Hilfe wäre mein Leben in den vergangenen Jahren wesentlich mühsamer verlaufen, weshalb ich besonders ihnen diese Arbeit widmen möchte.

Ein herzliches Dankeschön gebührt auch meiner Freundin Yvonne, welche mir jederzeit eine große moralische Stütze war und mich insbesondere gegen Ende immer wieder aufs Neue motivierte. Außerdem konnte sie mir durch ihr Fachwissen im Bauingenieurwesen zahlreiche Aspekte geotechnischer Anwendungen veranschaulichen und leistete somit einen wesentlichen Beitrag zur Entstehung dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich herzlichst bei meinem Betreuer Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart bedanken, der sich trotz seines oft stressigen Universitätsalltags immer die Zeit nahm, um mir bei Problemen weiterzuhelfen und mir die Interpretation meiner durchgeführten Untersuchungen durch seine jahrelange Erfahrung zu erleichtern.

Ein weiterer Dank gilt meinen Kollegen am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme. Dabei möchte ich mich insbesondere bei Dr. Helmut Woschitz, Dipl.-Ing. Ferdinand Klug und Dipl.-Ing. Florian Moser bedanken, die mir immer wieder durch ihr fachliches Wissen im Bereich der Faseroptik weiterhelfen und somit etliche zusätzliche Arbeitsstunden ersparen konnten. Vielen Dank auch an Ing. Rudolf Lummerstorfer und Dietmar Denkmaier für die diversen Hilfestellungen im Zuge der Untersuchungen im Labor sowie die Anfertigung der Adapter zur Überprüfung der Membran.

Abschließend noch einen herzlichen Dank an Frau Mag. Silke Groß für die orthographische und rechtschreibliche Verbesserung der vorliegenden Arbeit sowie an Frau Katharina Polacek für die Korrektur des Abstracts.

Kurzfassung

Im Rahmen der Überwachung der strukturellen Eigenschaften von Objekten bieten faseroptische Messsysteme eine wesentliche Erweiterung zur bestehenden Sensorik der Messtechnik. Insbesondere kann deren Potential im kontinuierlichen Monitoring von Bauwerken, dem sogenannten Structural Health Monitoring, genutzt werden, um Gefahren schneller erkennen und rechtzeitig notwendige Maßnahmen treffen zu können. Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der detaillierten Untersuchung des hochauflösenden Optical Backscatter Reflectometer 4600 des Herstellers Luna Technologies, USA. Dieses verteilte faseroptische Messinstrument operiert auf Basis der Rayleigh-Streuung und kann eine Bestimmung von Dehnungen sowie Temperaturänderungen mit einer Ortsauflösung von bis zu einem Millimeter durchführen. Ausgehend von einer Analyse des zugehörigen Messprinzips, welches auf der klassischen Optical Time Domain Reflectometry basiert, werden die Eigenschaften des Systems in ausführlichen Laboruntersuchungen überprüft, woraus wesentliche Kenngrößen des Instruments wie der maximale Messbereich oder die Präzision und auch das Temperaturverhalten resultieren. Als Sensoren dienen hier sowohl blanke Glasfasern mit unterschiedlichen Beschichtungen als auch vorgefertigte Sensorkabel, von welchen jeweils die Sensorkennlinie bestimmt wird. Die Umsetzung der Erkenntnisse der Systemüberprüfungen erfolgt in zwei unterschiedlichen Einsatzbereichen, um das breite Anwendungspotential faseroptischer Messsysteme demonstrieren zu können. In einer geotechnischen Überwachungsmessung erfolgt die Bestimmung der Deformationen eines Rammpfahls im Zuge von Belastungsversuchen unter Verwendung eines Sensorkabels. Demgegenüber wird die Instrumentierung einer dünnhäutigen Oberfläche aus Kunststoff mittels einer Bare Fiber durchgeführt und die auftretenden Dehnungen verteilt entlang des Objekts erfasst.

Abstract

Fiber-optical measurement systems are a significant extension to existing sensor technologies within the scope of structural monitoring. Their potential can be used especially in permanent Structural Health Monitoring to realize high risks and take all appropriate arrangements. The present master thesis has a focus on detailed investigations of the high-resolution Optical Backscatter Reflectometer 4600 produced by Luna Technologies, USA. This distributed fiber-optical instrument uses Rayleigh scattering to detect strain and temperature changes with a spatial resolution up to one millimeter. The associated measurement principle, which is based on the classical Optical Time Domain Reflectometry, is analysed and used to test the system characteristics in laboratory studies. The results of these studies provide essential parameters of the instrument, such as precision or temperature behaviour. Therefore, bare fibers with different coatings and prefabricated sensing cables are used as sensors and their respective sensor characteristic curve is calculated. The knowledge of the system reviews is implemented in two different fields of application to demonstrate the general potential of fiber-optical measurement systems. In the course of geotechnical monitoring a sensor cable is used to measure the deformation of a driven pile during load tests. In contrast a thin plastic surface is instrumented with a bare fiber to record the occurring strain along an object.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	x
Symbolverzeichnis	xi
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Vor- und Nachteile von faseroptischen Messsystemen	1
1.2 Ziele und Gliederung der Arbeit	3
2 Faseroptische Messsysteme: Grundlagen und Messverfahren	4
2.1 Grundlagen der Glasfasersensorik	4
2.1.1 Aufbau der Glasfaser	4
2.1.2 Ausbreitung des Lichts entlang der Faser	6
2.1.3 Eigenschaften von Glasfasern	7
2.1.4 Faseroptische Komponenten	10
2.2 Überblick über faseroptische Messverfahren	14
2.2.1 Interferometrische Sensoren	14
2.2.2 Quasi-verteilte Sensoren	16
2.2.3 Verteilte Sensoren	17
3 Realisierte Projekte unter Einsatz von faseroptischen Messsystemen	19
3.1 Überwachung von Tunneltübbingen	19
3.1.1 Projekt MONICO - Monitoring in Erdbebenregionen	19
3.1.2 Magnetbasierte Montage faseroptischer Messsysteme	22
3.2 Geotechnische Überwachungsmessungen	26
3.2.1 Rutschhangmonitoring und Lokalisierung von Gleitflächen	26
3.2.2 Deformationsmessungen im Zuge der Errichtung von Bauprojekten	28
3.2.3 Prüfung faseroptischer Sensoren und Spezialanwendungen	29
3.3 Resümee und Ausblick	31
4 Verteilte faseroptische Messsysteme basierend auf der Rayleigh-Streuung	32
4.1 Physikalische Grundlagen	32
4.2 Optical Time Domain Reflectometry	35
4.3 LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600	37
4.3.1 Polarisationsseffekte in optischen Fasern	37
4.3.2 Swept-Wavelength Interferometer	39
4.3.3 Prinzip des verteilten Messsystems	42

4.3.4	Analyse der OTDR-Funktionalität	44
4.3.5	Software	49
5	Softwareentwicklung und Systemuntersuchungen	52
5.1	Softwareoptimierung	52
5.2	Untersuchungsbedingungen	55
5.2.1	Kalibrieranlage für faseroptische Sensoren	55
5.2.2	Kühlbrutschrank und Klimaschrank	56
5.3	Messbereich	57
5.4	Messpräzision	60
5.5	Ortsauflösung	63
5.6	Temperaturverhalten	65
5.7	Sensing-Koeffizienten	66
5.7.1	Dehnung	67
5.7.2	Temperatur	71
5.8	Extended Range Mode	75
6	Untersuchung der Dehnungen dünnhäutiger Oberflächen	79
6.1	Untersuchung der Membran	79
6.2	Analyse geeigneter faseroptischer Sensoren	81
6.3	Untersuchung möglicher Klebstoffe	83
6.4	Verbindung des faseroptischen Sensors mit dünnhäutiger Oberfläche	84
7	Faseroptische Instrumentierung und Messung eines duktilen Ramppfahls	89
7.1	Verwendetes Instrumentarium und Installationsvorgang	89
7.2	Versuchsdurchführung	91
7.3	Auswertung und Ergebnisse	92
8	Conclusio	98
8.1	Erfahrungswerte und Erkenntnisse	98
8.2	Resümee und Ausblick	99
	Literaturverzeichnis	101

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Grundlegender Aufbau der Single-Mode Glasfaser	4
Abb. 2.2:	Beispiele für Arten von Sensorkabeln	5
Abb. 2.3:	Schematische Darstellung der Ausbreitung des optischen Signals bei $n_1 > n_2$	7
Abb. 2.4:	Dämpfungen des optischen Signals in Abhängigkeit der Wellenlänge	8
Abb. 2.5:	Schematische Darstellung eines faseroptischen Messsystems	10
Abb. 2.6:	Faseroptische Komponenten zur Signalübertragung	12
Abb. 2.7:	Kontakt der Glasfaserkerne	13
Abb. 2.8:	Klassifizierung faseroptischer Messtechnologien	14
Abb. 2.9:	Messprinzip des doppelten Michelson-Interferometers	15
Abb. 2.10:	Funktionsweise von Fiber Bragg Gratings	16
Abb. 2.11:	Schematische Darstellung der Streuungskomponenten in optischen Fasern - Intensität, Frequenzbreite und Position nicht maßstäblich dargestellt	17
Abb. 3.1:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus	20
Abb. 3.2:	Finaler Testaufbau des Tunneltübbing	21
Abb. 3.3:	Ausgewertetes Signal von FBG bzw. Brillouin Sensoren	21
Abb. 3.4:	Versuchsaufbau des Kurzzeitzugtests	23
Abb. 3.5:	Faserkennlinie des Kurzzeitversuchs	23
Abb. 3.6:	Schematische Darstellung des Langzeitversuchs	24
Abb. 3.7:	Vergleich der Strain-Werte des BOTDA-Systems über einen Zeitraum von 24 Stunden	24
Abb. 3.8:	Deformation der Nahtstelle des Kronensegments	25
Abb. 3.9:	Rutschhang, St. Moritz	27
Abb. 3.10:	Belastungsversuch, Grenchenberg	28
Abb. 3.11:	Überprüfung von Geotextilien	29
Abb. 3.12:	SACAC Betonbehälter zur Lagerung von radioaktivem Abfall	30
Abb. 4.1:	Definition der Leistungen des optischen Signals und der Rayleigh-Rückstreuung	33
Abb. 4.2:	Ausbreitung und Rückstreuung eines Lichtpulses	34
Abb. 4.3:	Typisches Signal einer OTDR-Messung mit Verlusten entlang der Faser	35
Abb. 4.4:	Definition von Dämpfung und Rückreflexion infolge eines Events	36
Abb. 4.5:	Polarisationszustand des Lichts mit gleicher Amplitude	38
Abb. 4.6:	Schematische Darstellung des Messprinzips der Swept-Wavelength Interfero- meter	39
Abb. 4.7:	Polarisationszustand des OBR-Signals im Ortsbereich	41
Abb. 4.8:	Schematische Darstellung des Berechnungsablaufs einer OBR-Messung	42
Abb. 4.9:	OBR-Signal im Frequenzbereich	43
Abb. 4.10:	Kreuzkorrelation der OBR-Signale im Frequenzbereich	44
Abb. 4.11:	Rückgestreutes Signal einer OBR-Messung	45

Abb. 4.12: Mittelwert und Standardabweichung von 100 OBR-Messung - Sensorkabel auf konstantem Strain-Level	46
Abb. 4.13: Verteilung der Residuen des Datenpunktes # 2247 im Verhältnis zur Normalverteilung	47
Abb. 4.14: Analyse der Totzone	48
Abb. 4.15: Analyse der Ortsauflösung	49
Abb. 4.16: Benutzeroberfläche der Software LUNA OBR v3.10.1	50
Abb. 5.1: Schematische Darstellung des Ablaufs einer OBR-Messung mittels der implementierten MATLAB-Methoden	52
Abb. 5.2: Kalibrieranlage für faseroptische Sensoren	56
Abb. 5.3: Instrumentarium zur Untersuchung des Temperaturverhaltens faseroptischer Messsysteme	57
Abb. 5.4: Strain von Referenzinterferometer im Verhältnis zur Strain-Messung des LUNA OBR 4600 mit unterschiedlichen Ausgangsleistungen des Signals	58
Abb. 5.5: Strain von Referenzinterferometer im Verhältnis zur Strain-Messung des LUNA OBR 4600 mit unterschiedlichen Wellenlängenbereichen des ausgehenden Signals	59
Abb. 5.6: Grundrauschen von 100 Strain-Messungen	60
Abb. 5.7: Standardabweichung von 100 Strain-Messungen im Verhältnis zur aufgetragenen Dehnung	61
Abb. 5.8: Standardabweichung von 100 Strain-Messungen im Verhältnis zur Anzahl der Referenzepochen bei einer aufgetragenen Dehnung von ungefähr 1 %	63
Abb. 5.9: Vergleich unterschiedlicher Ortsauflösungen im Sensing-Modus ($\Delta s = 1$ cm)	63
Abb. 5.10: Vergleich unterschiedlicher Integrationsbreiten im Sensing-Modus ($\Delta z = 1$ mm)	64
Abb. 5.11: Vorgespanntes Sensorkabel BRUsens Strain V4	65
Abb. 5.12: Temperaturverhalten des LUNA OBR 4600 - Instrument im Klimaschrank, Sensorkabel auf konstantem Strain-Level	66
Abb. 5.13: Stufenprofil zur Kalibrierung der faseroptischen Sensoren bezüglich des Dehnungsverhaltens	67
Abb. 5.14: Residuen der linearen Kennlinie einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung im Verhältnis zur Referenzmessung des Interferometers	68
Abb. 5.15: Residuen der linearen Kennlinie einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung im Verhältnis zur Referenzmessung des Interferometers reduziert um den Offset	69
Abb. 5.16: Residuen der geschätzten Kennlinien einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung im Verhältnis zur Referenzmessung des Interferometers reduziert um den Offset	70
Abb. 5.17: Stufenprofil zur Kalibrierung der faseroptischen Sensoren bezüglich des Temperaturverhaltens	71
Abb. 5.18: Residuen der linearen Kennlinie einer Bare Fiber mit Acrylat-Beschichtung im Verhältnis zur Referenztemperatur	72
Abb. 5.19: Residuen der linearen Kennlinie einer Bare Fiber mit Acrylat-Beschichtung im Verhältnis zur Referenztemperatur reduziert um den Offset	73
Abb. 5.20: Gemittelte Residuen der geschätzten Kennlinie unterschiedlicher Fasertypen im Verhältnis zur Referenzmessung des Interferometers reduziert um den Offset	74
Abb. 5.21: Vergleich der unterschiedlichen Messmodi des LUNA OBR 4600	76
Abb. 5.22: Auswirkungen von Vibrationen und Verdrehungen auf die erfassten Dehnungen	77
Abb. 5.23: Polarisation des OBR-Signals in unterschiedlichen Zuständen des Sensorkabels	78
Abb. 5.24: Differenzen in den Polarisationszuständen des OBR-Signals im Verhältnis zur Referenzmessung	78

Abb. 6.1:	Untersuchung der Membran mittels faseroptischer Kalibrieranlage	79
Abb. 6.2:	Dehnung der Membran im Verhältnis zur resultierenden Kraft	80
Abb. 6.3:	Untersuchung der Bruchdehnung ausgewählter blanker Glasfasern	81
Abb. 6.4:	Dehnung einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung im Verhältnis zur resultierenden Kraft	82
Abb. 6.5:	Darstellung der Verklebung von zwei Membran-Flächen	83
Abb. 6.6:	Dehnung der verklebten Membran im Verhältnis zur resultierenden Kraft . . .	84
Abb. 6.7:	Darstellung der partiellen Verklebung zwischen Membran und Bare Fiber . . .	85
Abb. 6.8:	Erfasste Strain-Werte der partiellen Verklebung von Bare Fiber und Membran	86
Abb. 6.9:	Darstellung der flächenhaften Verklebung zwischen Membran und Bare Fiber	87
Abb. 6.10:	Erfasste Strain-Werte der flächenhaften Verklebung von Bare Fiber und Membran	87
Abb. 6.11:	Dehnung der verklebten Oberfläche (Bare Fiber und Membran) im Verhältnis zur resultierenden Kraft	88
Abb. 7.1:	Instrumentierung des Rammpfahls	89
Abb. 7.2:	Installation des Rammpfahls und der faseroptischen Sensoren	90
Abb. 7.3:	Rammpfahlversuch, Kraftverlauf Fa. Keller	91
Abb. 7.4:	Aufbau und verwendete Sensoren im Zuge des Rammpfahlversuchs	92
Abb. 7.5:	Vergleich zwischen faseroptischen Messdaten und Kraftverlauf der Fa. Keller .	93
Abb. 7.6:	Primär-Versuch: Faseroptischer Dehnungsverlauf ausgewählter Messepochen dargestellt in Abhängigkeit der Tiefe	94
Abb. 7.7:	Sekundär-Versuch: Faseroptischer Dehnungsverlauf ausgewählter Messepochen dargestellt in Abhängigkeit der Tiefe	95
Abb. 7.8:	Zusammenhang zwischen Dehnung und aufgetragener Kraft	96
Abb. 7.9:	Vergleich zwischen dem Integral über die faseroptischen Messdaten und der erfassten Verschiebung der Fa. Keller	97

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Spezifikationen ausgewählter blanker Single-Mode (SM) Glasfasern	5
Tab. 2.2:	Funktionaler Temperaturbereich ausgewählter faseroptischer Sensoren	10
Tab. 2.3:	Spezifikationen ausgewählter verteilter faseroptischer Messsysteme	18
Tab. 3.1:	Spezifikationen der verwendeten verteilten faseroptischen Messsysteme	22
Tab. 4.1:	Mittlere, maximale und minimale Standardabweichungen der Amplitude in Abhängigkeit der Ortsauflösung - Sensorkabel auf konstantem Strain-Level	47
Tab. 5.1:	Implementierte MATLAB-Methoden zur Gewährleistung der Grundfunktionalität	53
Tab. 5.2:	Implementierte MATLAB-Methoden zur Messdurchführung und Definition messspezifischer Parameter	54
Tab. 5.3:	Implementierte MATLAB-Methoden zur Auswertung und Definition berechnungsspezifischer Parameter	55
Tab. 5.4:	Zeitdauer für Messung und Berechnung des LUNA OBR 4600 im Verhältnis zum Sweep-Bereich der Tunable Laser Source	59
Tab. 5.5:	Polynom-Koeffizienten zur Angabe der Messpräzision	62
Tab. 5.6:	Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren geschätzt für das Auftreten von Dehnungen und Verkürzungen	68
Tab. 5.7:	Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren, nur geschätzt für das Auftreten von Dehnungen	70
Tab. 5.8:	Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren, nur geschätzt für das Auftreten von Verkürzungen	71
Tab. 5.9:	Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren geschätzt für das Auftreten von Erwärmung und Abkühlung	73
Tab. 5.10:	Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren, nur geschätzt für das Auftreten von Erwärmung	74
Tab. 5.11:	Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren, nur geschätzt für das Auftreten von Abkühlung	75
Tab. 6.1:	Untersuchte Klebstoffe zur Verbindung des faseroptischen Sensors mit der Membran	83

Abkürzungsverzeichnis

APC	Angled Physical Contact
BOTDA	Brillouin Optical Time Domain Analysis
BOTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometry
DLL	Dynamic Link Library
DUT	Device Under Test
FBG	Fiber Bragg Grating
FUT	Fiber Under Test
IGMS	Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LD	Laser Diode
LED	Light-Emitting Diode
MATLAB	Matrix Laboratory
OBR	Optical Backscatter Reflectometer
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
PBS	Polarization Beam Splitter
PC	Physical Contact
PCO	Polarization Controller
PVC	Polyvinylchlorid
SDK	Software Development Kit
SHM	Structural Health Monitoring
SM	Single-Mode
SOFO	Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques
SWI	Swept-Wavelength Interferometer
TLS	Tunable Laser Source
USB	Universal Serial Bus

Symbolverzeichnis

A	Querschnittsfläche
a_i	Koeffizienten der Linearkombination
α_s	Streuungskoeffizient der Rayleigh-Streuung
B_c	Anteil der in Richtung des Lichtpulses reflektierten Rayleigh-Streuung
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Medium
c_g	Gruppengeschwindigkeit des Lichtpulses
d	Durchmesser
$\Delta\epsilon$	Straindifferenz
Δf	Frequenzbereich
Δl	Längenänderung
$\Delta\lambda$	Wellenlängenbereich
Δn	periodische Änderung des Brechungsindex
$\Delta\nu$	relativer Frequenzshift
$\Delta\Phi$	Phasendifferenz
Δs	Integrationsbreite
ΔT	Temperaturänderung
δt	Time of Delay
Δz	Ortsauflösung
\vec{E}	Vektoren der elektromagnetischen Feldstärke
$\vec{E}_{Ref/Mess}$	Vektoren der elektromagnetischen Feldstärke von Referenz- bzw. Messarm
EM	Elastizitätsmodul
e_{Max}	maximale Abweichung
e_{Mittel}	mittlere Abweichung
ϵ	Dehnung

F	Kraft
F_B	Bruchkraft
f	Frequenz
f_0	Zentrale Frequenz
$g_{S/P}(\delta t)$	frequenzabhängige Signalerfassung der polarisationsabhängigen Detektoren
γ_c	kritischer Winkel
K_ϵ	Strain-Koeffizient
K_T	Temperatur-Koeffizient
l	Länge
l_{Sensor}	Länge des faseroptischen Sensors
λ	Wellenlänge
λ_0	Zentrale Wellenlänge
Λ_G	Fiber Bragg Grating-Periode
λ_G	reflektierte Wellenlänge des Fiber Bragg Gratings
$\lambda_{s/e}$	Start- bzw. Endwellenlänge eines Wellenlängenbereichs
N	Anzahl von Messungen
n	Brechungsindex
n_{Kern}	Brechungsindex des Glasfaserkerns
n_{Mantel}	Brechungsindex des Glasfasermantels
NA	numerische Apertur
P	Leistung
P_0	Leistung des ausgehenden Signals
$P_B(z)$	Leistung der Rückstreuung des Signals der Position z am Messinstrument
$P_b(z)$	Leistung der Rückstreuung des Signals an der Position z
$P_i(z)$	Leistung des Signals an der Position z
P_{in}	Leistung des eingehenden Signals
P_{Ref}	Leistung des Referenzsignals
Φ	Phase
ρ	Amplitude

σ	Fehler bzw. Standardabweichung
$S(z)$	OTDR-Signalstärke der Position z
T	Temperatur
t	Zeit bzw. Zeitdauer
τ	Dauer des emittierten Lichtpulses
$\hat{T}_{S/P}$	Projektionsoperatoren der orthogonalen Polarisationszustände
W	Breite des emittierten Lichtpulses
z	Position entlang der Glasfaser
ζ	Spannung
ζ_B	Bruchspannung

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

Veraltete und überlastete Infrastruktur, erhöhte Aktivitäten im Bauwesen sowie Risiken durch Bewegungen der Erdoberfläche und der unteren Gesteinsschichten erfordern Systeme zur permanenten Überwachung der strukturellen Eigenschaften von Objekten. Das Potential faseroptischer Sensoren kann in diesem Zusammenhang genutzt werden, um Gefahren schneller erkennen und somit rechtzeitig notwendige Maßnahmen treffen zu können. Neben dem klassischen Monitoring von Ingenieurbauten und geotechnischen Objekten finden faseroptische Sensoren auch Verwendung in Fachgebieten, welche üblicherweise nicht mit dem Bauingenieurwesen oder der Geodäsie verknüpft werden. Insbesondere sind dabei die Automobil- und Luftfahrtindustrie sowie Anwendungen im Bereich der Medizin und Energiegewinnung zu nennen.

Hauptsächlich wird der verstärkte Einsatz der faseroptischen Sensorik jedoch durch die rasanten Entwicklungen im Bereich der Telekommunikation und Nachrichtentechnik ermöglicht. Im Vergleich zu den hier immer noch bestehenden Kupferkabelnetzwerken bietet die Glasfasertechnologie wesentlich geringere Dämpfungen und höhere Übertragungsbandbreiten. Dadurch können größere Reichweiten erzielt und der Informationsgehalt des optischen Signals gesteigert werden. Aus diesen kontinuierlichen Weiterentwicklungen ergeben sich ebenfalls diverse Fortschritte in der Sensorik und infolgedessen immer mehr Anwendungsgebiete für faseroptische Messsysteme.

1.1 Vor- und Nachteile von faseroptischen Messsystemen

Auf Grund des Einsatzes der Glasfaser als sensitives Element und dem optischen Signal als Informationsträger ergeben sich zahlreiche Vorteile, aber auch gewisse Nachteile gegenüber konventionellen Methoden der Messtechnik. Diese positiven und negativen Eigenschaften der Messtechnologie sind im Anwendungsfall zu beachten, um ein optimales Ergebnis bereitstellen zu können. Im Folgenden können nach [López-Higuera 2002, S. 9 f.] ausgewählte Vorteile faseroptischer Messsysteme gegenüber traditionellen Sensoren angegeben werden:

- (a) Infolge der geringen Dämpfungen innerhalb des Faserkerns können lange Ausbreitungswege des optischen Signals gewährleistet werden. Dabei besteht die Möglichkeit, viele faseroptische Sensoren entlang einer einzelnen Glasfaser zu installieren oder diese selbst als Sensor durch die Anwendung verteilter Messverfahren zu nutzen.
- (b) Die Sensitivität, der Messbereich sowie die Auflösung faseroptischer Sensoren ist im Verhältnis zu vielen traditionellen Messverfahren wesentlich höher, wodurch bestimmte Reaktionen eines Messobjektes überhaupt erst erfasst werden können.
- (c) Im Rahmen des Einsatzes faseroptischer Messsysteme ist eine Spannungsversorgung lediglich für die Lichtquelle und Auswerteeinheit notwendig. Die Ausbreitung des opti-

schen Signals entlang der Faser kann somit angesichts ihrer sowohl elektrischen als auch chemischen Passivität in explosions- und feuergefährdeten Gebieten erfolgen, wobei das Messgerät auf Grund der großen Leitungslängen weit vom Messobjekt entfernt sein kann.

- (d) Grundsätzlich kann die optische Faser als dielektrisches Medium gesehen werden. Derartige Substanzen zeichnen sich durch ihr elektrisch schwach- bzw. nichtleitendes Verhalten aus. Somit sind faseroptische Messsysteme, anders als die meisten konventionelle Sensoren, elektromagnetisch immun und bedürfen keines zusätzlichen Schutzes gegenüber elektromagnetischer Strahlung.
- (e) Die Begrenzung des Temperaturbereichs optischer Fasern ergibt sich meist durch ihre Beschichtung bzw. Umhüllung aus Kunststoff. Der Schmelzpunkt der Glasfaser ist dabei wesentlich höher und liegt bei ungefähr 2000 °C, siehe Abschnitt 2.1.1. Durch Spezialbeschichtungen aus Aluminium oder Gold können somit Messungen auch unter extremen Temperaturen durchgeführt werden.
- (f) Das sensitive Element faseroptischer Messsysteme zeichnet sich besonders durch seine kleine Größe, sein geringes Gewicht sowie seine hohe Flexibilität aus. Insbesondere durch den Einsatz blanker Glasfasern kann daher eine bessere Anpassung des Sensors sowie eine geringe Beeinflussung des Messobjekts erreicht werden.
- (g) In vielen Anwendungsfällen ist eine direkte Verbindung des Messobjekts mit dem Sensor notwendig, um das Übergehen der Deformationen gewährleisten zu können. Dabei bietet die Verwendung von Glasfasern als sensibles Element die Möglichkeit der direkten Integration des Sensors z.B. durch Einbetonieren, wodurch eine Messung innerhalb des Objekts durchführbar ist.

Im Gegensatz dazu können laut [López-Higuera 2002, S. 10] auch zwei fundamentale Nachteile der Messtechnologie angeführt werden:

- (a) Die Sensitivität faseroptischer Sensoren ist keinesfalls ausnahmslos auf eine Einflussgröße beschränkt. Beispielsweise muss bei der Erfassung von Dehnungen eines Messobjekts zusätzlich eine Kompensation der Strain-Werte bezüglich der Temperatur durchgeführt werden, um eine zuverlässige Bestimmung gewährleisten und grobe Messfehler vermeiden zu können.
- (b) Die Kosten für faseroptische Sensorsysteme sind heutzutage oft größer als jene konventioneller Technologien. Dies beruht auf dem derzeit noch relativ kleinen Markt, wodurch Instrumente meist nur in geringen Stückzahlen produziert werden.

Die Aufzählungen zeigen, dass sämtliche Details bei der Auswahl des Sensorsystems berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren ermöglichen die ständig neuen Entwicklungen in der Telekommunikation und Nachrichtentechnik, wie z.B. Kunststoff-Fasern (Polymer Optical Fiber), zusätzliche Fortschritte im Bereich faseroptischer Messsysteme. Diese sollten ebenfalls im Entscheidungsprozess Beachtung finden.

1.2 Ziele und Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat die detaillierte Untersuchung eines Optical Backscatter Reflectometers (OBR) des Herstellers Luna Technologies zum Ziel. Der LUNA OBR 4600 führt hochauflösende verteilte faseroptische Dehnungs- und Temperaturmessungen basierend auf der Rayleigh-Streuung durch, wobei allerdings nur eine geringe Anzahl an Publikationen bezüglich der Charakteristiken des Messinstruments existiert. Deshalb mussten diverse Eigenschaften des OBRs in individuellen Untersuchungen überprüft werden, um die fehlenden Erfahrungswerte aufzuarbeiten und ein zuverlässiges faseroptisches Gesamtsystem in nachfolgenden Anwendungen bereitstellen zu können.

Zum besseren Verständnis der Technologie und zur Nachvollziehbarkeit später gezeigter Einsatzbereiche werden in Kapitel 2 zunächst allgemeine Grundlagen der Glasfasersensorik erläutert. Außerdem soll eine Klassifizierung sämtlicher faseroptischer Messverfahren einen Überblick über das breite Anwendungspotential bieten.

Nachfolgend wird in Kapitel 3 eine Studie von Projekten dargelegt, welche sich mit dem Einsatz von faseroptischen Messsystemen im Rahmen der Errichtung und Erhaltung von Ingenieurbauten bzw. geotechnischen Überwachungen beschäftigen. Dadurch sollen aktuelle Anwendungsbereiche und Laboruntersuchungen faseroptischer Sensoren in der Ingenieurgeodäsie bzw. Geotechnik veranschaulicht und potentielle zukünftige Einsatzgebiete identifiziert werden.

Kapitel 4 behandelt detailliert die theoretischen Grundlagen verteilter faseroptischer Messsysteme basierend auf der Rayleigh-Streuung. Ausgehend vom Prinzip der Optical Time Domain Reflectometry (OTDR), welches die Erfassung von Intensitätsverlusten entlang des Ausbreitungsweges des optischen Signals ermöglicht, wird dabei das Messverfahren des LUNA OBR 4600 beschrieben sowie allgemeine Qualitätsparameter der OTDR-Funktionalität des Instruments verifiziert.

Zur effektiven Nutzung eines faseroptischen Messsystems sind ausführliche Laboruntersuchungen und Kalibrierungen der Sensoren bzw. Instrumente notwendig, weshalb sich Kapitel 5 mit den Überprüfungen des Sensing-Verhaltens des LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600 beschäftigt. Zusätzlich erfolgt eine Dokumentation diverser durchgeführter Optimierungen der Herstellersoftware.

Abschließend sind in den Kapiteln 6 und 7 zwei Anwendungen dokumentiert, die im Zuge dieser Diplomarbeit realisiert wurden. Die Durchführung dieser Projekte erfolgte dabei in zwei konträren Einsatzgebieten. Auf der einen Seite sollen die Untersuchungen der Dehnungen einer dünnhäutigen Oberfläche unter dem Einsatz einer blanken Glasfaser die hohe Flexibilität sowie das breite Anwendungspotential der Faseroptik verdeutlichen. Andererseits kann durch die Instrumentierung und Messung eines duktilen Ramppfahls mittels eines vorgefertigten Sensor-kabels gezeigt werden, dass eine Verbesserung konventioneller Messmethoden in der Geotechnik durch den Einsatz faseroptischer Messverfahren möglich ist.

Kapitel 2

Faseroptische Messsysteme: Grundlagen und Messverfahren

2.1 Grundlagen der Glasfasersensorik

Auf Grund der Vielzahl von faseroptischen Sensoren am Markt ist eine umfassende Analyse unerlässlich, um das Messkonzept optimal auf den Anwendungsfall abstimmen zu können. Zum besseren Verständnis der Technologie und zur Nachvollziehbarkeit später gezeigter Anwendungsstudien werden nachfolgend die Grundlagen der Glasfasersensorik erläutert und verschiedene faseroptische Komponenten aufgezeigt. Dabei wird gezielt auf Inhalte eingegangen, welche im wesentlichen Zusammenhang mit faseroptischen Messsystemen stehen. Allgemeine Komponenten der Telekommunikation und Nachrichtentechnik werden hierbei vernachlässigt.

2.1.1 Aufbau der Glasfaser

Die grundlegende Konstruktion der Glasfaser, welche in Abb. 2.1 dargestellt ist, kann in die drei Elemente Kern (core), Mantel (cladding) und Beschichtung (coating) unterteilt werden, wobei der Kern meist aus reinem Glas (SiO_2) mit einem Brechungsindex n_{Kern} von ca. 1.461 besteht. Leichte Unreinheiten im Glas des Mantels ergeben einen minimal unterschiedlichen Brechungsindex im Vergleich zum Mantel ($n_{\text{Mantel}} \approx 1.460$) und ermöglichen, auf Grund der Totalreflexion im Faserkern, die Ausbreitung des optischen Signals, siehe Abschnitt 2.1.2. Die Beschichtung, standardmäßig hergestellt aus Kunststoff (PVC, Acrylat, etc.), dient zum Schutz vor äußerer Beschädigung von Kern und Mantel und sorgt damit für eine gewisse Elastizität der Faser. Zur Anwendung im Bereich der Sensorik sind weiters die festen Verbindungen zwischen Kern und Mantel sowie zwischen Mantel und Beschichtung von großer Bedeutung, welche den Übergang der Dehnungen auf den Kern gewährleisten.

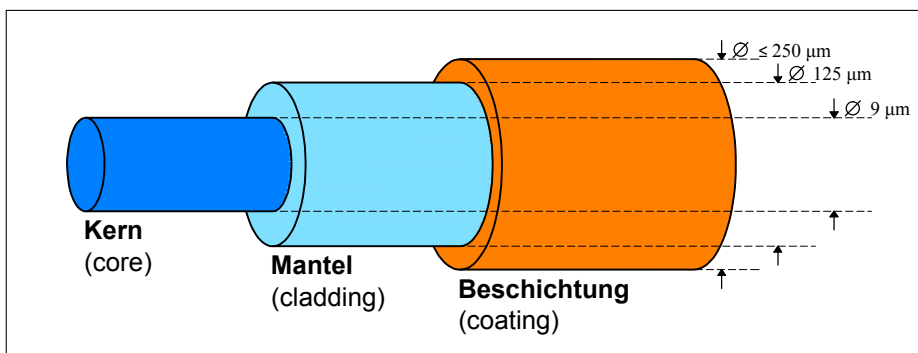


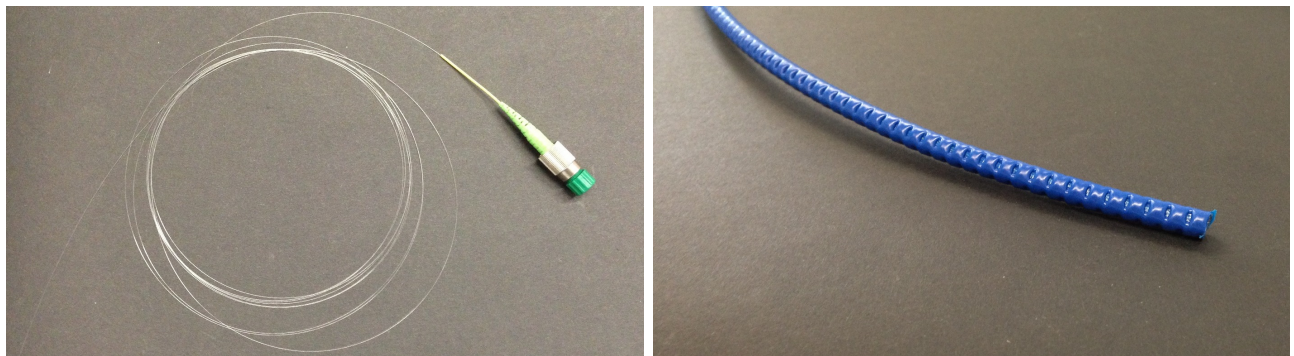
Abb. 2.1: Grundlegender Aufbau der Single-Mode Glasfaser (nach [Al-Azzawi 2007, S. 5] und [Thévanez und Berghmans 2011, S. 2])

Herstellung

Die Produktion von SiO₂-basierten Glasfasern kann im Wesentlichen in zwei Schritte unterteilt werden, siehe z.B. [López-Higuera 2002, S. 75 ff.]. Im ersten Schritt wird eine Faservorform (Preform) der Faser mit zylindrischen Profil hergestellt, die bereits die Struktur von Kern und Mantel aufweist. Des Weiteren besteht ebenfalls schon der minimale Unterschied zwischen den Brechungsindizes der beiden Elemente, welcher die Ausbreitung des Lichts ermöglicht. Die Dimensionen der Preform können mit zirka einem Meter Länge und einigen Zentimetern Durchmesser angegeben werden. Durch Erhitzung der Preform auf den Schmelzpunkt von ungefähr 2000 °C entsteht die nötige Viskosität, um im zweiten Schritt das Ausziehen am sogenannten Ziehturm auf die endgültige Form der Faser gewährleisten zu können. Im Rahmen dieses Prozesses bleibt das geometrische Verhältnis zwischen Kern und Mantel unverändert. Nach dem Aushärten der Faser erfolgt zum Abschluss des Produktionsprozesses das Aufbringen der Beschichtung.

Arten von Sensoren

Auf Grund des breiten Anwendungspotentials der Glasfasersensorik stellt der Markt eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren zur Verfügung, wobei grundlegend zwischen der blanken Glasfaser (Bare Fiber) und dem vorgefertigten, robusten Sensorkabeln unterschieden werden kann.



(a) Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung

(b) Sensorkabel BRUsens strain V3

Abb. 2.2: Beispiele für Arten von Sensorkabeln

Die wesentlichen Vorzüge der blanken Glasfaser (siehe Abb. 2.2a) liegen in ihrem geringen Eigengewicht und ihrer geringen Dimension. Sie bietet somit in bestimmten Einsatzbereichen, die eine hohe Flexibilität der Sensorik erfordern, eine gute Lösung zur Erfassung der auftretenden Deformationen und Temperaturunterschiede. Das Material der Beschichtung kann als Klassifizierungsmerkmal der Bare Fiber betrachtet werden. Je nach Beschichtung der blanken Faser ergibt sich, wie in Tab. 2.1 gezeigt, ihre ungefähre Dimension.

Tab. 2.1: Spezifikationen ausgewählter blanker Single-Mode (SM) Glasfasern; Angaben entnommen aus: [Corning Inc. 2015], [Fibercore Inc. 2015] und [FBGS Technologies GmbH 2015]

Hersteller	Sensor	Beschichtung	Durchmesser [μm]
Corning	SMF-28	Acrylat	245
FBGS Technologies	DTG-B3A4	Ormocer	195
Fibercore	SM 980	Polyimide	155

Im Gegensatz zur sensiblen Bare Fiber erweisen sich vorgefertigte Sensorkabeln als robustere Alternative in rauen Installationsumgebungen, siehe Abb. 2.2b. Diese besitzen neben der Beschichtung eine zusätzliche Umhüllung aus Kunststoff und/oder Metall und bieten somit einen optimalen Schutz der Glasfaser, z.B. im Rahmen von Anwendungen in der Geotechnik. Analog zum Übergang von Kern auf Mantel bzw. Mantel auf Beschichtung ist eine feste Verbindung zwischen Faser und umgebenden Material erforderlich, um den Übergang der Deformationen auf das sensitive Element gewährleisten zu können.

2.1.2 Ausbreitung des Lichts entlang der Faser

Zur Erfassung der Veränderungen des Faserkerns entlang der gesamten Glasfaser muss eine Ausbreitung des Lichts innerhalb des Glases gewährleistet werden. Dabei ist die richtige Wahl des Eintrittswinkels des optischen Signals in die Faser erforderlich, um eine Totalreflexion entlang der Grenzfläche zwischen Faserkern und Mantel zu erreichen. Die Beschichtung sowie sonstige Umhüllungen des Coatings haben im Rahmen der grundsätzlichen Funktionalität des Lichtwellenleiters keine Bedeutung.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in einem Medium wird im Allgemeinen über den Brechungsindex angegeben, welcher das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum c_0 und jener im Medium c darstellt.

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (2.1)$$

Die Brechung bzw. die Reflexion des Lichts an einer Grenzfläche kann nach dem Brechungsgesetz von Snellius über das Verhältnis der Brechungsindizes der beiden Medien zu Einfallswinkel und Austrittswinkel des optischen Signals (γ_1 und γ_2) definiert werden. (Formel entnommen aus: [Thyagarajan und Ghatak 2007, S. 5])

$$n_1 \sin(\gamma_1) = n_2 \sin(\gamma_2) = \text{const.} \quad (2.2)$$

Durch Umformung ergibt sich der kritische Winkel γ_c , welcher die Reflexion des Lichts an der Grenzfläche sicherstellt.

$$\sin(\gamma_c) = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

Aus diesem Zusammenhang können vereinfacht, wie in Abb. 2.3 gezeigt, drei mögliche Szenarien des Verhaltens optischer Strahlen beim Auftritt auf eine Grenzfläche abgeleitet werden:

- **Brechung:**
Die Unterschreitung des Grenzwinkels durch den Einfallswinkel bewirkt eine Brechung des optischen Signals an der Grenzfläche. Dadurch erfolgt der Übergang des Signals auf das äußere Medium.
- **Ausbreitung entlang der Grenzfläche:**
Die Übereinstimmung von Grenz- und Einfallswinkel hat eine Ausbreitung des Lichts entlang der Grenzfläche zur Folge. Dabei findet zwar kein Übergang in das äußere Medium statt, jedoch wird die gewünschte Ausbreitung des Signals im Faserkern nicht erreicht.
- **Totalreflexion:**
Die Totalreflexion des optischen Signals an der Grenzfläche kann durch das Überschreiten des Grenzwinkels realisiert werden. Dementsprechend verbleibt das Licht im Kern und eine Ausbreitung entlang der Glasfaser kann gewährleistet werden.

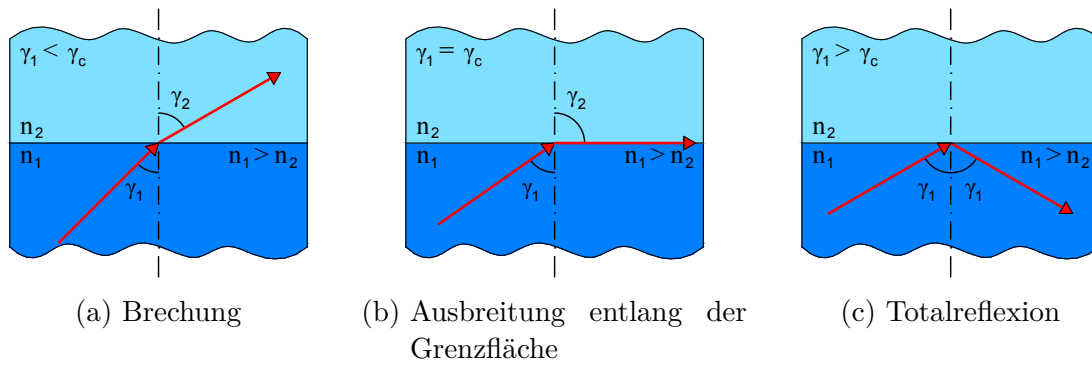


Abb. 2.3: Schematische Darstellung der Ausbreitung des optischen Signals bei $n_1 > n_2$ (nach [Thyagarajan und Ghatak 2007, S. 12])

Eine weitere wesentliche Kenngröße im Bereich der Optik stellt der Akzeptanzwinkel dar. Dieser kennzeichnet jenen Winkelbereich, innerhalb dessen Licht in die Faser eingekoppelt wird. Die berechenbare Messgröße des Akzeptanzwinkels repräsentiert die numerische Apertur (NA), welche aus den Brechungsindizes von Kern und Mantel bestimmt werden kann. Sie ist jedoch immer von der Wellenlänge und der Intensität des optischen Signals abhängig.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.4)$$

Aus dem Zusammenhang zwischen numerischer Apertur und dem Brechungsindex des Faserkerns kann wiederum der kritische Winkel γ_c und somit eine Assoziation mit der Totalreflexion innerhalb der Faser abgeleitet werden.

$$\sin(\gamma_c) = \frac{NA}{n_1} \quad (2.5)$$

Je nach Durchmesser und numerischer Apertur der Faser sowie Wellenlänge des optischen Signals besitzen faseroptische Sensoren eine unterschiedliche Anzahl ausbreitungsfähiger Signale, sogenannte Moden. Eine hohe Anzahl von Moden ist vor allem im Bereich der Kommunikationstechnik von Bedeutung, um eine größere Menge von Information innerhalb einer Faser transportieren zu können. Im Rahmen messtechnischer Aufgaben besteht das Interesse, eine Aufweitung des Spektrums und somit ungleiche Laufzeiten des Signals zu verhindern, weshalb hauptsächlich Single-Mode Fasern verwendet werden.

2.1.3 Eigenschaften von Glasfasern

Zur Analyse und Interpretation der Einsatzfähigkeit faseroptischer Sensoren dienen zahlreiche Kennwerte der Literatur. Die Eigenschaften von Dehnungs- und Temperaturverhalten der Faser sind dabei von der Zusammensetzung des Glases abhängig.

Dämpfungen

Allgemein gilt, dass Licht entlang des Ausbreitungsweges innerhalb eines Mediums an Intensität verliert. In der Glasfasersensorik entstehen solche Verluste einerseits durch Effekte innerhalb der Faser, andererseits durch äußere Einflüsse. Aus diesem Grund ist eine optimale Abstimmung des optischen Signals und der faseroptischen Komponenten auf die auftretenden Dämpfungen notwendig, um ein zuverlässiges Messsystem bereitstellen zu können.

Die Dämpfungen im Inneren des Faserkerns können vereinfacht in Absorption und Streuung unterteilt werden. Die Absorption des Lichts entsteht grundsätzlich durch Verunreinigungen des Glases in Form von Eisen, Kupfer oder sonstigen Elementen. Die Menge der absorbierten Energie ist dabei abhängig vom Material der Faser sowie der Wellenlänge des Signals, siehe Abb. 2.4. Im Allgemeinen führt dies zu einer annähernd linearen Abnahme der Intensität mit der Distanz. Ist die Größe der Partikel der Unreinheiten des Glases annähernd gleich der Wellenlänge des Lichts, werden die Anteile der Energie nicht absorbiert, sondern in verschiedene Richtungen abgelenkt. In diesem Fall handelt es sich um eine Streuung des Lichts, welche die fundamentale Basis für verteilte faseroptische Messsysteme darstellt.

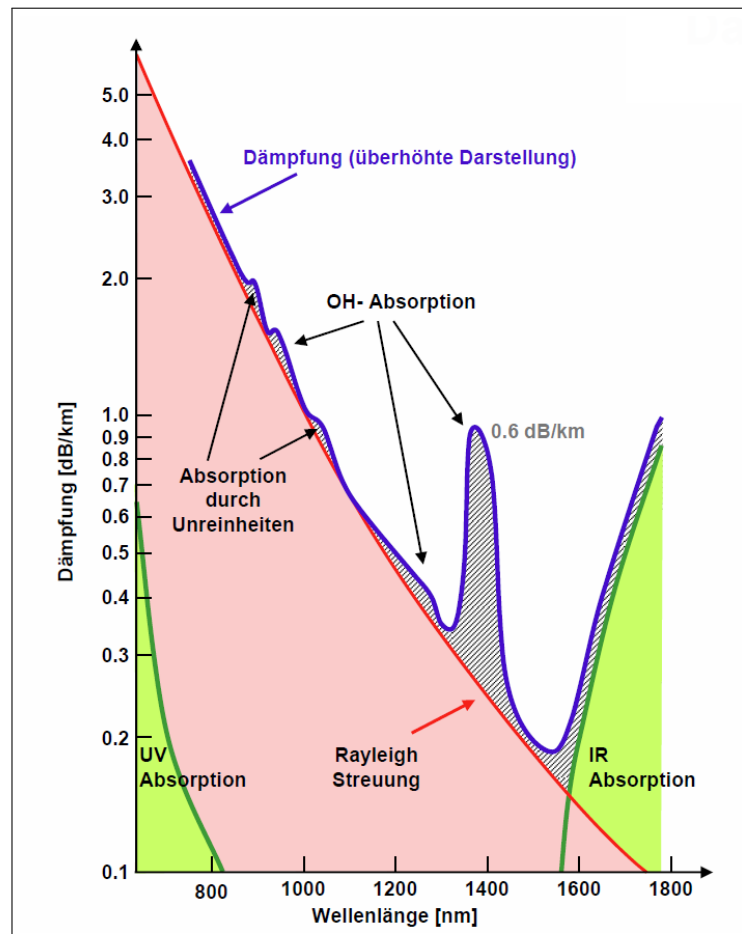


Abb. 2.4: Dämpfungen des optischen Signals in Abhängigkeit der Wellenlänge (nach [Hecht 2002, S. 101])

Die Angabe der Intensitätsverluste erfolgt üblicherweise in Dezibel [dB]. Dabei wird das Verhältnis zwischen ausgehender (P_0) und eingehender Leistung (P_B) des Signals in Bezug zur Sensorlänge betrachtet. (Formel entnommen aus: [Al-Azzawi 2007, S. 64])

$$Verlust [dB/km] = \frac{10 \log_{10} \left(\frac{P_0}{P_B} \right)}{l_{Sensor}} \quad (2.6)$$

Die Darstellung der Dämpfungen in Abhängigkeit der Wellenlänge in Abb. 2.4 zeigt zwei Kommunikationsfenster (1310 und 1550 nm) im nahen Infrarotbereich. Diese eignen sich zur Ausbreitung optischer Signale unter geringem Leistungsverlust und werden deshalb in der Glasfasersensorik verwendet. Beispielsweise folgt aus einer Dämpfung von ungefähr 0.2 dB/km im

Wellenlängenbereich von 1550 nm ein Intensitätsverlust des Signals von 5 % auf einem Ausbreitungsweg von einem Kilometer.

Zusätzlich zu internen Dämpfungen durch Absorption und Streuung beeinflussen externe, mechanische Faktoren den Ausbreitungsweg des Lichts. Insbesondere Krümmungen des Faserkabels (sogenannte Bendings) bewirken eine teilweise Brechung an der Grenzfläche von Faserkern und Mantel und führen somit zu einem Intensitätsverlust. Hersteller geben daher meist einen minimalen Biegeradius des Sensorkabels vor, um einen Bruch des Sensorkabels bzw. massive Signalabschwächungen zu vermeiden. Des Weiteren verursachen auch Verbindungen zwischen Glasfasern in Form von Steckern und Spleißen einen Leistungsverlust, siehe Abschnitt 2.1.4.

Bruchdehnung und Bruchspannung

Die Eigenschaften bezüglich des Dehnungsverhaltens von faseroptischen Sensoren sind auf Grund erst entstehender Normen nicht standardisiert geregelt. Deshalb bedient man sich Gesetzen der technischen Mechanik, um einen Zusammenhang zwischen Dehnung, Spannung und Kraft ableiten zu können. Sämtliche nachfolgende Formeln entstammen aus [Gross et al. 2014, S. 1 ff.].

Das Hooksche Gesetz beschreibt das elastische Verhalten eines festen Körpers. Dabei wird die Spannung eines Objekts ζ durch das Elastizitätsmodul EM und die auftretende Dehnung ϵ beschrieben. Das übliche E-Modul einer blanken SiO_2 -Glasfaser kann nach [Wallenberger und Bingham 2010, S. 211] mit 86.9 GPa angegeben werden.

$$\zeta [Pa] = EM\epsilon \quad (2.7)$$

Weiters können auftretende Spannungen auf eine Fläche durch die einwirkenden Kräfte F und die Querschnittsfläche A definiert werden. Die maximale Spannung, welche den Bruch eines Körpers zufolge hat, wird als Bruchspannung ζ_B bezeichnet und resultiert aus dem Aufbringen der Bruchkraft F_B .

$$\zeta_B [Pa] = \frac{F_B}{A} \quad (2.8)$$

Die Bruchdehnung eines Objekts kann durch die Umformung des Hookschen Gesetzes abgeleitet werden. Grundsätzlich kann Dehnung als dimensionslose Größe gesehen werden, die eine Längenänderung Δl im Verhältnis zur Länge des Objekts l angibt. In der Faseroptik wird häufig die Bezeichnung Microstrain $\mu\epsilon$ verwendet, wobei die Deformation eines Objekts in $\mu\text{m}/\text{m}$ angegeben wird.

$$\epsilon_B \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right] = \frac{\zeta_B}{EM} \left[\frac{Pa}{MPa} \right] \quad (2.9)$$

Die meisten Hersteller führen nach der Produktion Zugtests der Glasfaser mit 0.7 GPa durch, siehe z.B. [Brugg Kabel AG 2013; Corning Inc. 2015; FBGS Technologies GmbH 2015]. Dadurch kann üblicherweise eine Mindestdehnung von 1 % ($\hat{=} 10000 \mu\epsilon$) garantiert werden. Jedoch kann die theoretische Bruchspannung einer blanken SiO_2 -Glasfaser laut [Wallenberger und Bingham 2010, S. 211] mit 4.89 GPa angegeben werden, woraus eine wesentlich höhere Bruchdehnung im Bereich von bis zu 6 % resultiert. Diese konnte in den durchgeführten Laboruntersuchungen verifiziert werden, siehe Kapitel 5 und 6.

Temperaturen

Im Rahmen des Herstellungsprozesses der Faser (siehe Abschnitt 2.1) zeigt sich eine Schmelztemperatur des Glases von ungefähr 2000 °C. Somit ist die Einschränkung des erfassbaren Temperaturbereichs nicht durch Mantel und Kern, sondern durch deren Beschichtung gegeben. In Tab. 2.2 sind die funktionalen Temperaturbereiche von faseroptischen Sensoren unterschiedlicher Hersteller angeführt. Dabei ist ersichtlich, dass blanke Glasfasern mit Standardbeschichtungen aus Kunststoff Messungen in einem Einsatzgebiet mit Temperaturen von bis zu 300 °C ermöglichen. Zum Einsatz der Sensoren unter extremen Temperaturen dienen Spezialbeschichtungen aus Gold oder Aluminium. Der Arbeitsbereich fertiger Sensorkabeln wird meist durch die Temperatureigenschaften ihrer Umhüllung aus Kunststoff begrenzt.

Tab. 2.2: Funktionaler Temperaturbereich ausgewählter faseroptischer Sensoren; Angaben entnommen aus: [Corning Inc. 2015], [Fibercore Inc. 2015], [FBGS Technologies GmbH 2015], [Fiberguide Industries 2015] und [Brugg Kabel AG 2013]

Hersteller	Sensor	Beschichtung	Temperaturbereich
Corning	SMF-28	Acrylat	-60°C bis +85°C
FBGS Technologies	DTG-B3A4	Ormocer	-180°C bis +200°C
Fibercore	SM 980	Polyimide	-55°C bis +300°C
Fiberguide	ASI9.0/125/175A	Aluminium	-269°C bis +400°C
Fiberguide	ASI9.0/125/155G	Gold	-269°C bis +700°C
Brugg Kabel	BRUsens strain V1	Kunststoff	-30°C bis +70°C

2.1.4 Faseroptische Komponenten

Die Realisierung eines faseroptischen Gesamtsystems erfordert die Kooperation zahlreicher Komponenten in einer bestimmten Abfolge, wobei eine grundlegende Unterteilung in Messgerät, Signalübertragung und Sensor vorgenommen werden kann. Abb. 2.5 zeigt einen schematischen Aufbau des Messsystems, welcher als Fundament für unterschiedliche faseroptischen Technologien gesehen werden kann, siehe Abschnitt 2.2.

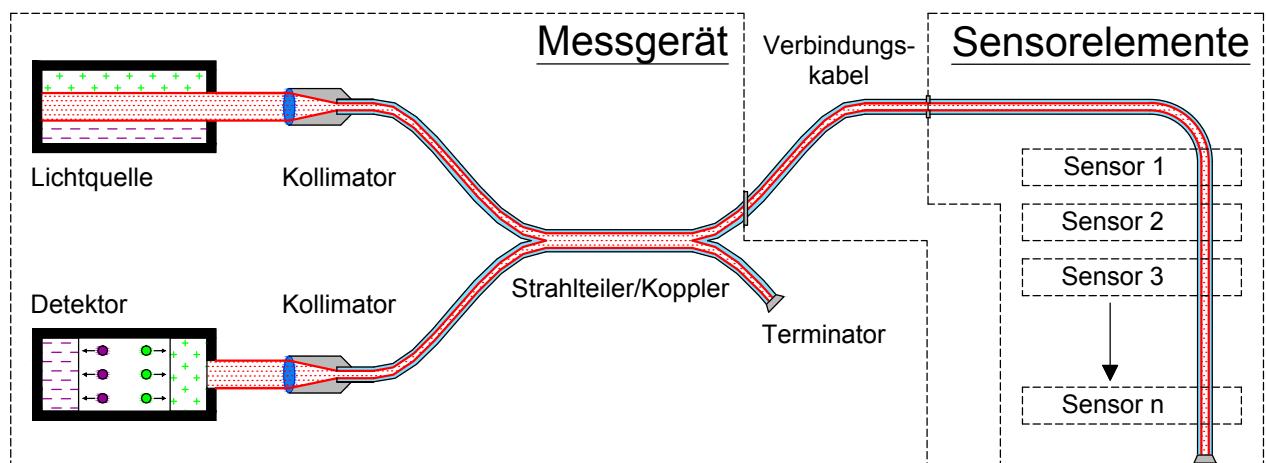


Abb. 2.5: Schematische Darstellung eines faseroptischen Messsystems (nach [Al-Azzawi 2007, S. 125])

Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten überblicksmäßig und vereinfacht erörtert. Weiterführende Informationen sind [Naumann et al. 2014, S. 179 ff.], [Al-Azzawi 2007, S. 119 ff.], [López-Higuera 2002, S. 125 ff.] und [Hayes 2011, S. 81 ff.] zu entnehmen.

Lichtquelle

Das Verhalten der Lichtquelle eines faseroptischen Messsystems kann durch die klassische Halbleiterdiode beschrieben werden. Diese besteht aus einer positiven (p-Schicht) und einer negativen Halbleiterschicht (n-Schicht), welche sich an einer Grenzschicht berühren. Dabei ist aus den allgemeinen Gesetzen der Physik bekannt, dass sich positiv und negativ geladene Teilchen abstoßen. Durch das Anbringen einer elektrischen Spannung in Durchlassrichtung (d.h. Anode an die p-Schicht und Kathode an die n-Schicht) entsteht ein Elektronenfluss von der negativen in die positive Halbleiterschicht. Auf diese Weise werden Elektronen und Löcher in der Grenzschicht rekombiniert und als Photonen abgestrahlt.

Je nach der Materialstruktur der Grenzschicht kann eine Einteilung der Lichtquellen in Laserdiode (LD) und Leuchtdiode (LED) vorgenommen werden, wobei sich diese durch die Kohärenzzeit und somit auch durch die Frequenzbreite des emittierten Lichts unterscheiden. Die Kohärenzzeit beschreibt die Dauer des Emissionsvorgangs der Diode. Dadurch ergibt sich ein maximaler zeitlicher Versatz zweier Signale, die aus der selben Lichtquelle emittiert, aufgespalten und wiedervereinigt werden, unter dem Interferenzerscheinungen detektiert werden können. Daraus resultiert die größtmögliche Deformation, welche durch das interferometrische Prinzip erfasst werden kann. Die Laserdiode emittiert dabei eine nahezu kontinuierliche Lichtwelle mit einer hohen Ausgangsleistung und konstanter Amplitude, wodurch eine hohe Kohärenz entsteht. Im Gegensatz dazu weist das Signal einer LED ein niedrig-kohärentes Intensitätsfeld auf, wodurch sich ein breiteres Frequenzband ergibt. Diese unterschiedlichen Vorteile der beiden Technologien werden je nach faseroptischen Messverfahren genutzt.

Kollimator

Der faseroptische Kollimator dient als Instrument zur Ein- und Auskopplung des Lichts und fungiert somit als Bindeglied zwischen Laserquelle, Glasfaser und Auswerteeinheit. Der Strahl der Laserdiode wird dabei durch Anwendung einer Kollimationslinse gebündelt und in die Faser eingekoppelt. Demzufolge ist gewährleistet, dass das optische Signal unter richtigem Akzeptanzwinkel in den Kern übergeht und sich auf Grund der Totalreflexion entlang der Faser ausbreitet. Am Ende des Ausbreitungsweges wird eine weitere Kollimationslinse eingesetzt, welche eine kontrollierte Auskoppelung des Lichts garantiert und die Signalerfassung am Detektor ermöglicht.

Strahlteiler und Koppler

In der Glasfasersensorik ist die Aufteilung bzw. Kombination von optischen Signalen unvermeidbar, um sowohl die Emission des Lichts als auch die Auswertung des rückgestreuten Signals im eigentlichen Messgerät zu ermöglichen, siehe Abb. 2.5. Zur Gewährleistung einer bi-direktionalen Kommunikation dienen der Strahlteiler (beam splitter) sowie der Koppler (coupler). Diese Funktion kann beispielsweise durch zwei verbundene Glasfaserkerne übernommen werden, welche das Licht aufteilen und wiedervereinigen. Deshalb wird in der Literatur meist nur die Bezeichnung des Kopplers für diese faseroptische Komponente verwendet. Die Verteilung der Intensitäten auf die beiden Fasern ist dabei abhängig vom Koppelverhältnis,

welches durch die Länge des Kopplers angepasst werden kann.

Im Falle einer Aufteilung des ausgesandten Lichtpulses durch den Koppler darf keine Möglichkeit der Reflexion am Faserende bestehen, um eine Beeinflussung der Lichtquelle und der Auswerteeinheit zu vermeiden. Dazu dienen sogenannte Terminatoren, welche eine Absorption des Signals bewerkstelligen. Im praktischen Fall kann eine ungewollte Rückstreuung z.B. durch den Bruch der Faser $\neq 90^\circ$ oder das Auftragen eines Klebstoffes verhindert werden.

Detektor

Der Vorgang der Signalerfassung eines faseroptischen Messsystems erfolgt durch die Verwendung einer Photodiode. Je nach Messverfahren wird auch ein sogenannter Spectral Analyzer eingesetzt, welcher an dieser Stelle nicht näher erläutert wird.

Der Aufbau der Photodiode besteht, analog zur Lichtquelle, aus einer positiven und einer negativen Halbleiterschicht. Die n-Schicht kann zusätzlich in die Raumladungszone und Randschicht unterteilt werden. Fällt Licht mit hoher Energie auf die p-Schicht ein, so entstehen Ladungspaare in der Raumladungszone, welche entsprechend ihrer Polarisation in die Randschichten der Halbleiter abtransportiert werden. Die generierten Ladungen müssen durch eine Spannungsquelle ausgeglichen werden, wobei diese Änderung der elektrischen Stromstärke proportional zur Lichtintensität ist und gemessen werden kann.

Verbindung zwischen Messgerät und faseroptischen Sensor

Üblicherweise erfolgt die Überbrückung des Weges zwischen Messgerät und faseroptischen Sensor mittels vorgefertigter Sensorkabeln, welche als Patchcords (Abb. 2.6a) bezeichnet werden. Diese kennzeichnen sich durch Konnektoren an beiden Faserenden und werden als temporäres Verbindungsstück zwischen den faseroptischen Komponenten eingesetzt. Im Gegensatz dazu weist das sogenannte Pigtail (Abb. 2.6b) nur einen Konnektor auf. Somit eignet es sich zur Herstellung einer dauerhaften Verbindung mit einer anderen Glasfaser durch einen Spleiß.

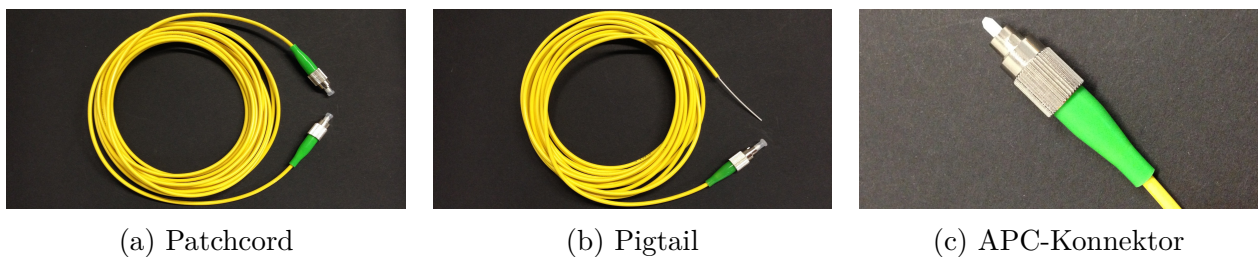
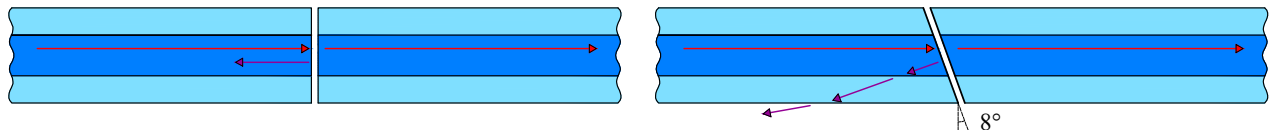


Abb. 2.6: Faseroptische Komponenten zur Signalübertragung

Konnektoren, welche in der Literatur auch noch als Stecker und Steckverbindungen bezeichnet werden, dienen zur parallelen und zentrischen Ausrichtung der beiden Faserkerne, um geringe Intensitätsverluste (typisch: $0.2 \text{ dB} \hat{=} 5 \%$) des optischen Signals zu erreichen. Als zentrales Element des Konnektors kann die Ferrule gesehen werden, welche meist aus Keramik besteht und die Führung der Glasfaser gewährleistet. (Siehe Abb. 2.6c)

Prinzipiell wird dabei, wie in Abb. 2.7 gezeigt, zwischen zwei Typen des Kontaktes der Glasfaserkerne unterschieden. PC-Konnektoren (Physical Contact) besitzen einen orthogonalen Abschluss des Kerns. Aus diesem Grund entstehen parallele Rückreflexionen, die eine Störung des

Sensorsignals und eine Minderung der Signalleistung zur Folge haben. Demgegenüber weisen APC-Konnektoren (Angled Physical Contact) ein geneigtes Faserende von üblicherweise 8° auf, wodurch Großteile der Reflexion des optischen Signals vom Kern in den Mantel übergehen und eine Beeinflussung des Nutzsignals vermieden werden kann. Aus diesem Grund werden APC-Konnektoren heutzutage standardmäßig bei faseroptischen Messsystemen eingesetzt.



(a) Physical Contact

(b) Angled Physical Contact

Abb. 2.7: Kontakt der Glasfaserkerne (nach [Hayes 2011, S. 84 ff.])

Als Bindeglied zwischen zwei Konnektoren wird ein Adapter verwendet, welcher als Mating Sleeve bezeichnet wird. Dieser ist letztendlich für eine parallele und zentrische Ausrichtung der beiden Ferrulen verantwortlich und sorgt somit für geringe Dämpfungen des optischen Signals.

Faseroptischer Sensor

Als finales Element der Komponentenabfolge des faseroptischen Gesamtsystems kann das sensitive Element in Form des faseroptischen Sensors gesehen werden. Auf Grund der unterschiedlichen Messverfahren erfolgt eine Einteilung in punktuelle, quasi-verteilte und verteilte Sensoren. Diese sind detailliert in Abschnitt 2.2 beschrieben.

2.2 Überblick über faseroptische Messverfahren

Das breite Anwendungspotential von faseroptischen Sensoren in der Geotechnik, im Structural Health Monitoring (SHM) und anderen Bereichen führte zur Entwicklung zahlreicher Messverfahren. In der Sensorik wird dabei eine Einteilung der Messtechnologien in drei Kategorien vorgenommen, siehe Abb. 2.8. Diese unterscheiden sich einerseits durch ihr unterschiedliches Messprinzip und andererseits durch die eingesetzten Sensoren.

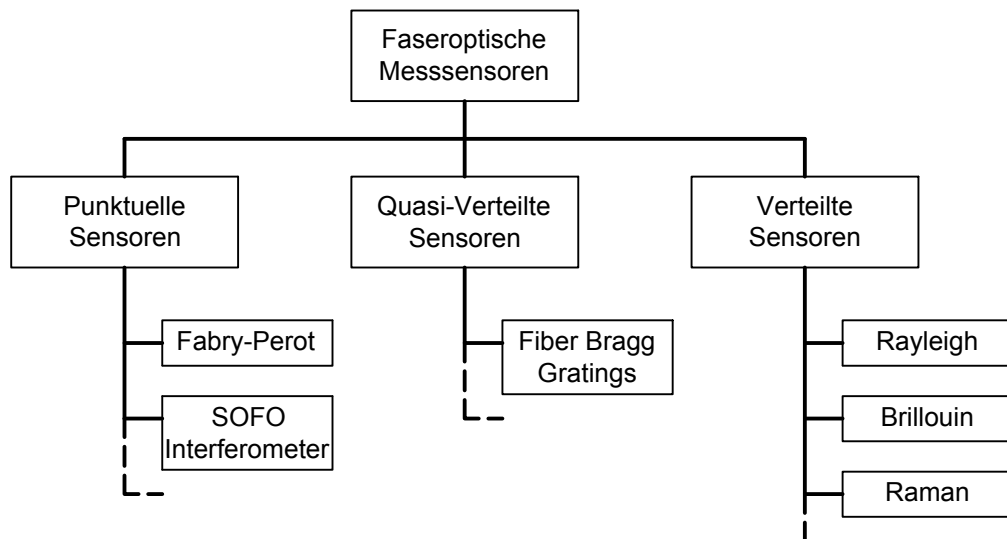


Abb. 2.8: Klassifizierung faseroptischer Messtechnologien

Punktuelle und quasi-verteilte Messverfahren wie SOFO-Interferometer oder Fiber Bragg Gratings verwenden eine gezielte Manipulation der Glasfaser in Form von Spiegeln bzw. Bragg-Gittern, um eine Reflexion des Signals an einer bestimmten Position zu bewirken. Standardmäßig sind solche Sensoren vorgefertigt und können durch Ankersysteme mit dem Messobjekt verbunden werden. Im Gegensatz dazu nutzen verteilte faseroptische Messsysteme die natürliche Rückstreuung an Partikeln innerhalb der Faser, womit der Kern selbst als sensitives Element gesehen werden kann. Dabei können externe Beeinflussungen wie z.B. FBG innerhalb des Sensorkabels durch die Anpassung des Wellenlängenbereichs des emittierten Spektrums umgangen werden. Dadurch ist auch eine Messung derartiger Sensoren mit verteilte Glasfasersensorik durchführbar.

Dieser Abschnitt soll die grundlegende Funktionsweise der Messtechnologien veranschaulichen. Ausführliche, detaillierte Beschreibungen zu den einzelnen Messverfahren sind den jeweiligen Quellenangaben zu entnehmen.

2.2.1 Interferometrische Sensoren

Das grundlegende Messprinzip interferometrischer Sensoren beruht auf der Aufteilung und Wiedervereinigung eines optischen Signals. Dazu wird das gespaltene Signal von zwei unterschiedlichen Spiegeln reflektiert und nach der Wiedervereinigung auf Interferenzerscheinungen untersucht. Im Rahmen der Sensorik kann dadurch eine relative Verschiebung Δl zwischen einer Referenz- und einer Messposition abgeleitet werden.

Unter Anwendung dieses Basisprinzips tritt die Problematik auf, dass Interferenzen nur innerhalb der Hälfte der Kohärenzlänge der Lichtquelle entstehen. Des Weiteren führt eine Strahlunterbrechung zu einem Verlust des Referenzpunktes, wodurch eine Bestimmung der Längenänderung nicht gewährleistet werden kann.

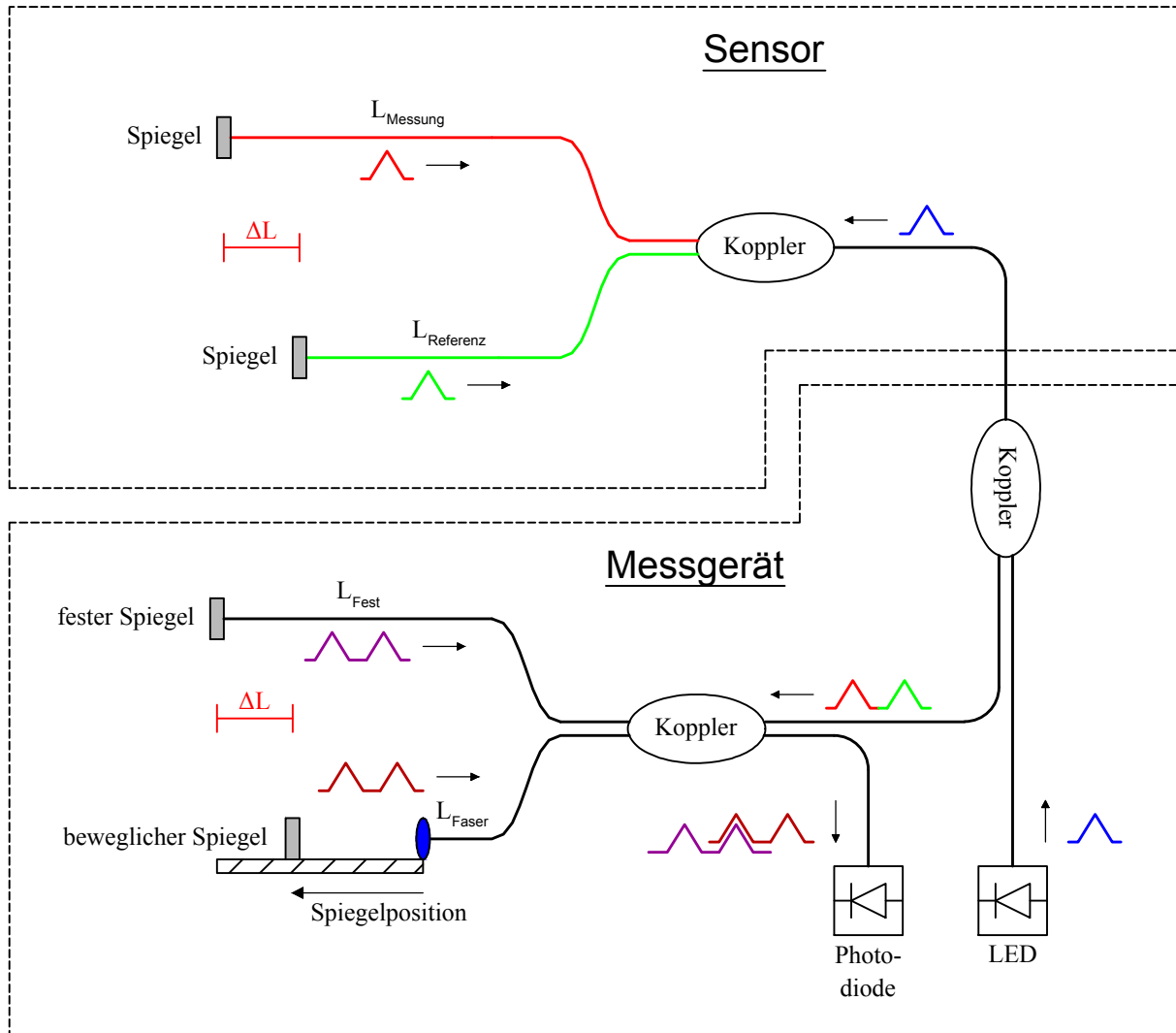


Abb. 2.9: Messprinzip des doppelten Michelson-Interferometers (nach [Udd und Spillman 2011, S. 234])

Zur Bereitstellung eines dauerhaften Messsystems wird deshalb die Doppelkonfiguration eines Interferometers verwendet, welches als Michelson-Interferometer in Tandemkonfiguration bezeichnet wird. Dieses ist schematisch in Abb. 2.9 dargestellt und kennzeichnet sich durch die Untergliederung in Mess- und Auswertinterferometer. Dabei wird ein interferenzfähiges Wellenpaket von der Lichtquelle emittiert und durch einen Strahlteiler auf den Messarm und die Referenzfaser aufgespalten. Infolge der Verschiebung Δl weist das wiedervereinigte Signal keine Interferenzerscheinungen auf.

Deshalb erfolgt der Übergang auf ein zweites Interferometer, welches aus einem festen und einem beweglichen Spiegel besteht. Nach der Teilung des nicht interferenzfähigen Wellenpakets

des Sensors wird der dynamische Spiegel entsprechend versetzt, sodass die Verschiebung innerhalb der halben Kohärenzlänge des optischen Signals liegt und von der Photodiode verarbeitet werden kann. Die Summe von ausgewertetem Versatz und der Verschiebung des beweglichen Spiegels ergibt schließlich die gesuchte Dehnung des Messarmes.

Als Realisierung des doppelten Michelson Interferometers kann das SOFO System der Firma Smartec gesehen werden, welches, unabhängig von Kohärenzlänge und Signalunterbrechungen, die Längenänderung zwischen Referenz- und Messfaser bestimmen kann. [Smartec SA 2015]

2.2.2 Quasi-verteilte Sensoren

Die quasi-verteilte Glasfasersensorik wird durch den Einsatz von FBG-Sensoren (Fiber Bragg Gratings) durchgeführt. Diese sind auf einem bestimmten Bereich der Faser platziert und bewirken eine Teilreflexion des ankommenden optischen Signals. Das Gitter weist dabei eine periodische Änderung des Brechungsindex Δn ($= n_G - n$) im Verhältnis zum Kern auf, wobei der Abstand zwischen den Elementen als Grating-Periode Λ_G bezeichnet wird.

Die Herstellung von Fiber Bragg Gratings erfolgt z.B. durch die Entfernung des Coatings und einer UV-Belichtung der Glasfaser, welche die Gitterstruktur erzeugt. Diese Methode ermöglicht lange Belichtungszeiten und dadurch stark reflektierende FBG. Des Weiteren kann die Fabrikation auch im Zuge des Produktionsprozesses der Faser am Ziehturm durchgeführt werden. Im Gegensatz zu Standard-FBG entsteht dabei keine Schwächung der Faser durch die Entfernung des Coatings. Allerdings ist die Zeitdauer der Belichtung begrenzt, woraus eine geringere Reflektivität des Gitters folgt.

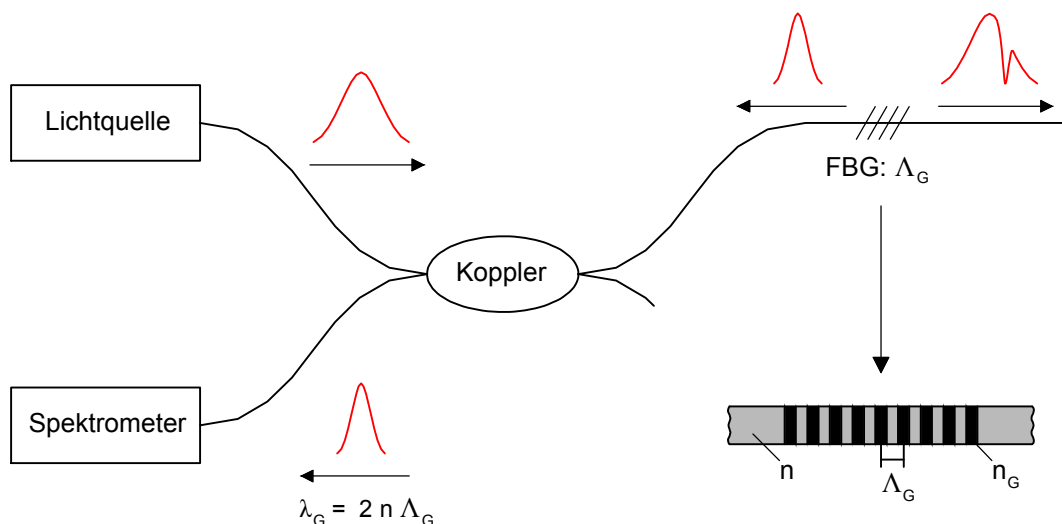


Abb. 2.10: Funktionsweise von Fiber Bragg Gratings (nach [Othonos und Kalli 1999, S. 308])

Das grundlegende Messprinzip der quasi-verteilten faseroptischen Technologie beruht auf der Reflexion von einzelnen Wellenlängen des ausgesendeten optischen Spektrum, siehe Abb. 2.10. Dazu emittiert die Lichtquelle ein Breitbandsignal, das vom Fiber Bragg Grating auf einer bestimmten Wellenlänge reflektiert wird. Die übrigen Anteile des Spektrums werden transmittiert und breiten sich weiter entlang der Glasfaser aus, wodurch der Einsatz mehrerer FBGs und die Realisierung eines quasi-verteilten Messsystem möglich ist.

Der Zusammenhang zwischen der reflektierten Wellenlänge λ_G und dem Brechungsindex n ist dabei über die Grating-Periode Λ_G gegeben. (Formel entnommen aus: [Othonos und Kalli 1999, S. 96])

$$\lambda_G = 2n\Lambda_G \quad (2.10)$$

Im Zuge einer Deformation der Glasfaser im Bereich des Fiber Bragg Gratings tritt eine Änderung des Abstands der Gitterstruktur auf. Daraus resultiert eine Abweichung der Wellenlänge des reflektierten Signals zum Ausgangszustand, die mittels optischen Spektrometers analysiert werden kann.

Der Übergang von der erfassten Wellenlängenänderung auf die gesuchte Dehnung bzw. Temperaturänderung ist abhängig vom Brechungsindex des Faserkerns und der Wellenlänge des FBG. Dadurch ergeben sich je nach Glasfaser unterschiedliche numerische Werte zur Umrechnung, welche durch eine Kalibrierung des Messsystems bestimmt werden müssen. Nach [Othonos und Kalli 1999, S. 99] kann ein Richtwert für eine SiO₂-basierte Glasfaser bei einer Wellenlänge von 1550 nm und einem Brechungsindex von 1.482 mit 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ bzw. 13.7 pm/ $^\circ\text{C}$ angegeben werden.

2.2.3 Verteilte Sensoren

Dämpfungen entlang des Ausbreitungsweges entstehen unter anderem durch Verunreinigungen des Glasfaserkerns. Diese Inhomogenitäten führen zur Rückstreuung des optischen Signals an einzelnen Partikeln, die verteilte faseroptische Messtechnologien zur Bestimmung von Deformationen der Faser nutzen. Dabei ist die Rayleigh-Streuung mit etwa 85 % die Hauptkomponente. Die restlichen 15 % resultieren aus Brillouin- und Raman-Streuung. (Angaben entnommen aus: [Thévenaz und Berghmans 2011, S. 217])

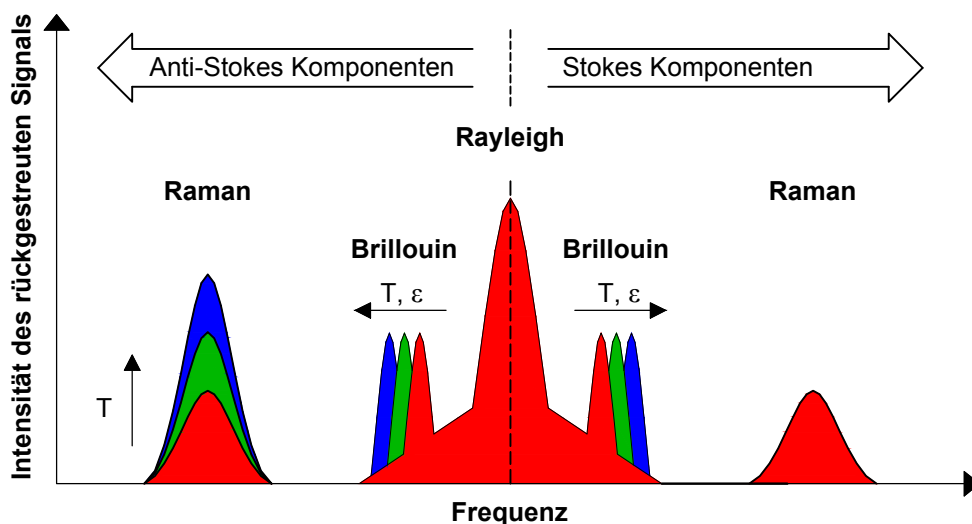


Abb. 2.11: Schematische Darstellung der Streuungskomponenten in optischen Fasern - Intensität, Frequenzbreite und Position nicht maßstäblich dargestellt (nach [Glišić und Inaudi 2007, S. 27])

Abb. 2.11 zeigt schematisch das Spektrum des gestreuten Lichts. Dabei ist ersichtlich, dass sämtliche Streuungskomponenten eine konträre spektrale Charakteristik aufweisen, weshalb eine differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen Streuungsanteile möglich ist. Unter Verwendung der Raman- bzw. der Brillouin-Technologie entsteht eine sogenannte nicht-lineare Rückstreuung des emittierten Signals, die infolge einer Veränderung der Faser zu einer Frequenzverschiebung bzw. Intensitätsänderung in den Stokes- und Anti-Stokes Komponenten führt. Dabei ist unter Anwendung von Raman-Systemen nur die Messung von Temperaturunterschieden möglich. (Details siehe [López-Higuera 2002, S. 289 ff.]) Verteilte faseroptische Messsysteme basierend auf der Rayleigh-Streuung bedienen sich hauptsächlich der Charakteristik der linearen Rückstreuung, wobei das rückgestreute Signal in Abhängigkeit der Zeit betrachtet und analysiert wird. Durch Vergleich der Rückstreuung mit einer Referenzmessung können Informationen in Bezug auf Dehnungen bzw. lokale Temperaturunterschiede abgeleitet werden, siehe Kapitel 4.

Die existierenden Systeme zur Dehnungsmessung können auf Grund ihrer Funktionalität in zwei Kategorien unterteilt werden. Instrumente basierend auf der Reflektometrie nutzen rein den Response des rückgestreuten Lichts, um sogenannte Events entlang des Ausbreitungsweges des optischen Signals ableiten zu können. Im Gegensatz dazu verwenden Analyzer-Systeme eine Schleifenkonfiguration, wobei das Sensorkabel an beiden Enden zur Messeinheit zurückgeführt wird. Dabei wird auf der einen Seite ein Lichtpuls ausgesandt, welcher durch die Unreinheiten des Glasfaserkerns rückgestreut wird. Eine Realisierung dieses Lichtpulses kann entweder im Zeitbereich (OTDR) oder durch seine spektralen Anteile im Frequenzbereich (OFDR) erfolgen. Auf der Gegenseite erfolgt die Einkopplung einer kontinuierlichen Pumpwelle, die zu einer Verstärkung des Nutzsignals führt, wodurch größere Reichweiten erzielt werden können.

Tab. 2.3: Spezifikationen ausgewählter verteilter faseroptischer Messsysteme; Angaben entnommen aus: [Luna Innovations Inc. 2014a] und [fibrisTerre GmbH 2015]

Instrument	Technologie	Präzision	Messbereich	Ortsauflösung	Reichweite
Luna OBR 4600	Rayleigh-OTDR	1 $\mu\epsilon$	k.A.	0.01 m	70 m
fibrisTerre B 2505	Brillouin-OFDA	< 2 $\mu\epsilon$	$\pm 30000 \mu\epsilon$	0.50 m	25 km

Die Anwendung von Brillouin-Systemen beruht meist auf der Analyzer-Konfiguration, um die kurzen Reichweiten auf Grund ihrer geringen Streuanteile steigern zu können. Rayleigh-basierte Systeme verwenden hingegen im Allgemeinen das Prinzip der Reflektometrie. In Tab.2.3 sind die Herstellerspezifikationen zweier Messgeräte unterschiedlicher Technologien aufgeführt. Es ist zu sehen, dass neben den Unterschieden bezüglich der Reichweite auch differente Ortsauflösungen auftreten. Diese beschreibt den kleinsten Abstand zwischen zwei Streubereichen, welcher vom Instrument aufgelöst werden kann, und ist über die Dauer des Lichtpulses τ und die Ausbreitungsgeschwindigkeit c definiert. (Formel entnommen aus: [Thévanez und Berghmans 2011, S. 236])

$$\Delta z = \frac{\tau}{2} c \quad (2.11)$$

Aus einer Reduktion der Pulsdauer folgt entsprechend eine Verminderung der Energie des Lichtpulses. Daher tritt ein kleineres detektierbares Nutzsignal auf und führt somit zu einer kürzeren Reichweite des Messinstruments.

Kapitel 3

Realisierte Projekte unter Einsatz von faseroptischen Messsystemen

Dieses Kapitel erläutert Anwendungen bzw. Projekte, welche sich mit dem Einsatz von faseroptischen Messsystemen im Rahmen der Errichtung und Erhaltung von Ingenieurbauten bzw. geotechnischen Überwachungen beschäftigen. Diese Recherche soll die aktuellen Anwendungsbereiche und Laboruntersuchungen von faseroptischen Sensoren in der Ingenieurgeodäsie bzw. Geotechnik veranschaulichen, und somit offene Fragen für zukünftige Projekte identifizieren.

3.1 Überwachung von Tunneltübbingen

In den letzten Jahren zeigen sich auf der ganzen Welt erhöhte Aktivitäten im Tunnelbau, wobei diese neue Faktoren in puncto Erhaltung und Sicherheit mit sich bringen. Neben den immer längeren und breiteren Tunnelröhren bestehen die Hauptprobleme Untertage oft in den geologischen Bedingungen. Daher ist die genaue und vor allem rechtzeitige Bewertung des Gesundheitszustands der Tunnelröhre bzw. -sektion notwendig, um im Falle von Gefahrensituationen sofortige Maßnahmen treffen zu können. Weiters führen immer mehr errichtete Tunnelkilometer unter besiedelten Gebieten, was das zusätzliche Beachten von Sicherheitsstandards erfordert. Faseroptische Messverfahren bieten die Möglichkeit, Deformationen des Tunnelausbaus in Echtzeit festzustellen und somit einen Übergang von den Sensoren auf das Structural Health Monitoring zu gewährleisten. [Amditis 2011]

Die folgenden Abschnitte erläutern Projekte, welche die Überwachung von Tunnelsektionen durch Einsatz von faseroptischen Messsystemen gewährleisten. Dabei wird vor allem auf die Montage und die Befestigung der faseroptischen Messsensoren im bzw. am Tunneltübbing eingegangen, welche gegebenenfalls für zukünftige Anwendungen genutzt werden können.

3.1.1 Projekt MONICO - Monitoring in Erdbebenregionen

Die Gewährleistung hoher Sicherheitsstandards und die Senkung der hohen Erhaltungskosten von Tunneltübbingen sind wesentlicher Bestandteil in der Planung von Tunnelröhren. Besonders in Erdbebenregionen spielen diese Aspekte eine zentrale Rolle im Tunnelbau, weshalb das Projekt MONICO durch die europäische Kommission ins Leben gerufen wurde. Klassische Sensoren wie Messuhren oder Extensometer wurden dabei durch faseroptische Komponenten ersetzt, um die besonderen Einflüsse auf die Tunneltübbinge durch mögliche Erdbeben in Echtzeit untersuchen zu können. Die ausgewerteten Daten der Testmessungen in Form von Deformationen bzw. Verformungen sollen eine Grundlage zur Planung des Structural Health Monitoring von Tunnelröhren in Erdbebenregionen bieten.

Die Realisierung erfolgte durch ein Konsortium verschiedener Partner (siehe [The MONICO Project 2015]), wobei die Angaben zu dieser Projektstudie [Loupos et al. 2013] entnommen wurden.

Ein wesentlicher Aspekt des Projekts war der Einbau und die Kombination zweier verschiedener faseroptischer Messverfahren, weshalb sowohl quasi-verteilte Systeme (FBG) als auch verteilte Systeme (BOTDR) eingesetzt wurden. Die Fiber Bragg Gratings wurden im Rahmen der Testmessungen am Bewehrungsstahl des Tunneltübbings befestigt und einbetoniert, wobei die Dehnungsmessungen dieser Sensoren zur Ermittlung der Kompressions- bzw. Expansionskräfte des Betons dienten. Des Weiteren wurden FBG-Sensoren extern mit Ankern an den Tunneltübbing angebracht. Als zweites Messverfahren wurde ein BOTDR-System (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) eingesetzt. Solche Messsysteme besitzen eine typische Reichweite von einigen Kilometern, eine Sampling Rate von ungefähr 1 Hertz und eine Ortsauflösung von < 1 Meter. Im Rahmen des Projekts MONICO wurde jedoch eine dynamische Messung mit mehr als 10 Hz sowie eine Ortsauflösung von < 40 cm benötigt. Dazu wurde auf große Reichweiten verzichtet und somit die typische Messrate erhöht. Weiters wurde die Messfaser jeweils an zwei ausgewählten Messpunkten auf Metallscharnieren mit zylindrischem Profil ($d = 3$ cm) aufgerollt, um eine Steigerung der Ortsauflösung zu erzielen.

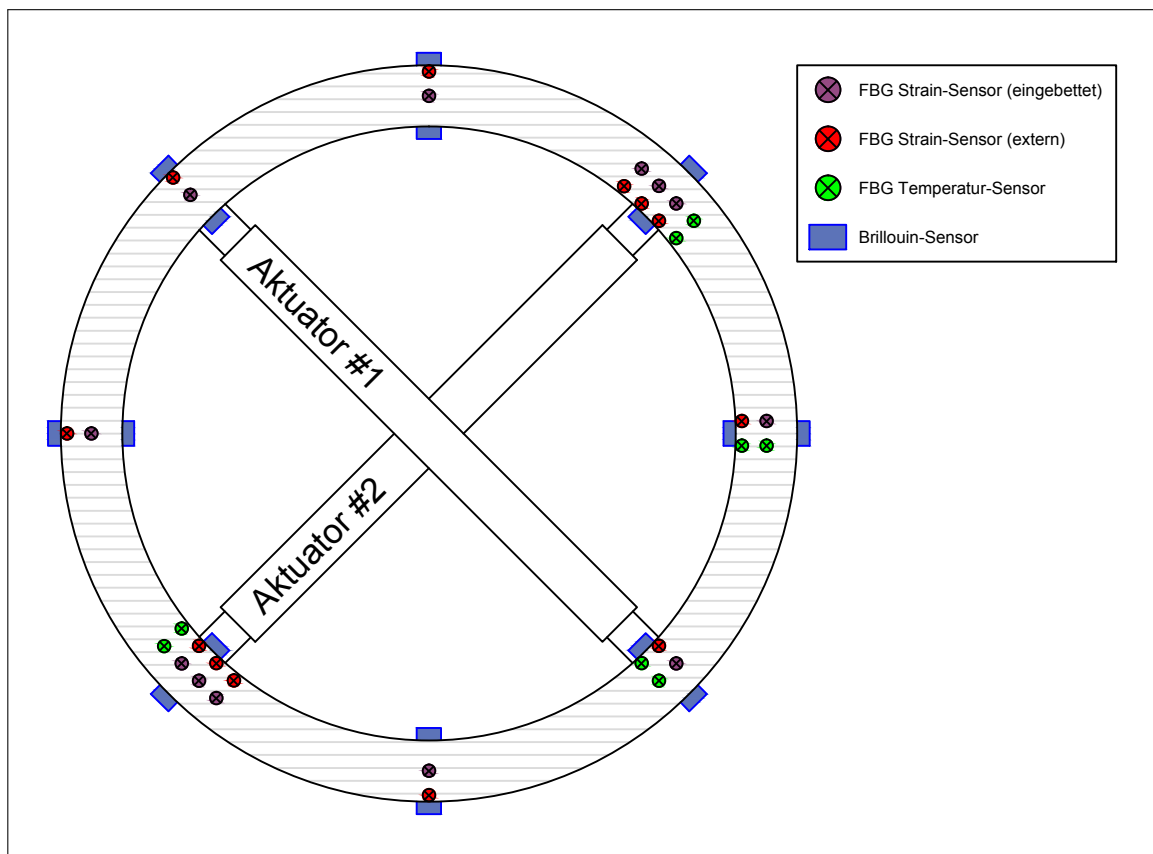


Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (nach [Loupos et al. 2013] und [Orfanoudakis 2011])

Zur Evaluierung des Gesamtkonzepts wurde zum Projektabschluss ein finaler Testversuch durchgeführt. Als Testobjekt stand dabei ein Tunnelsegment mit einem Außendurchmesser von 483 cm sowie einer Wanddicke von 20 cm zur Verfügung. Der Einbau der Sensoren erfolgte regelmäßig entlang des Tunneltübbings, wobei insgesamt 8 ausgewählte Punkte mit faseroptischen

Sensoren beider Technologien (32 FBG- und 16 BOTDR-Sensoren) ausgestattet wurden. Zur Simulation realitätsnaher Bewegungen wurden zwei vertikal angeordnete Aktuatoren verwendet, welche die auftretenden Kräfte eines Standarderdbebens reproduzierten. Der schematische Aufbau des Versuchs ist in Abb. 3.1 ersichtlich.

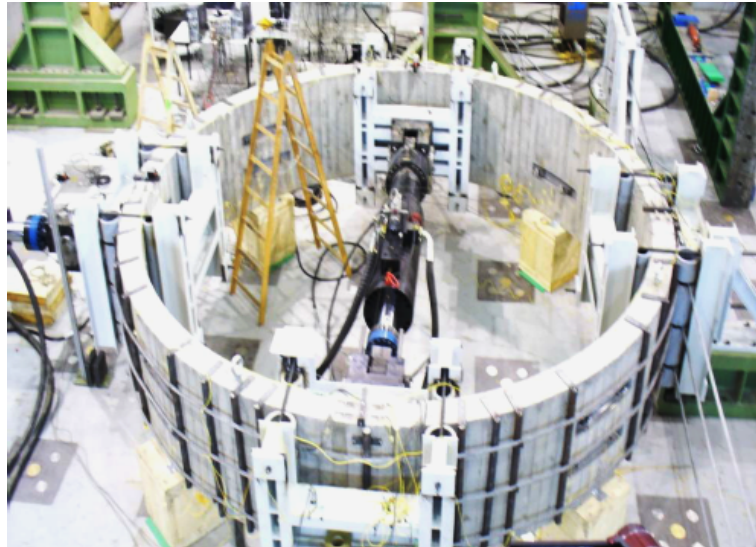


Abb. 3.2: Finaler Testaufbau des Tunneltübbing (aus [Orfanoudakis 2011])

Die ausgewerteten Signale beider Messsysteme für die Messsektion 8 sind in Abb. 3.3 dargestellt. Dabei wurde explizit ein Punkt am Tunneltübbing gewählt, welcher im direkten Kontakt mit einem der beiden Aktuatoren steht, um die unmittelbare Übertragung der Deformationen auf die Sensoren zu gewährleisten. Die Darstellung zeigt 6 Zyklen, wobei das Aufbringen der Lasten dynamisch gesteigert wurde. Nach Überschreitung der Druckfestigkeit des Betons nach ungefähr 7500 Sekunden kann ein zufälliges Verhalten der Sensoren beobachtet werden. Die Resultate zeigen, dass eine gute Korrelation zwischen den beiden faseroptischen Messsystemen besteht. Jedoch weist das Signal der Brillouin-Technologie vor allem in den höheren Strain-Bereichen ein wesentlich höheres Rauschen auf, wobei dieses Verhalten durch die allgemein höhere Auflösung der FBG-Sensoren zu erklären ist.

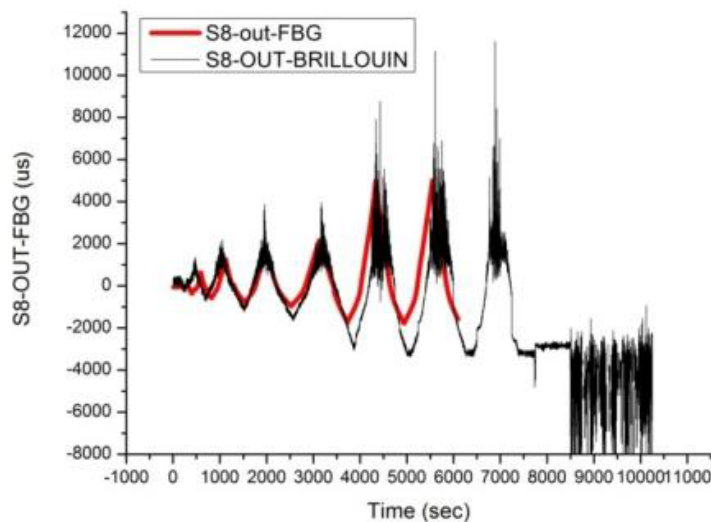


Abb. 3.3: Ausgewertetes Signal von FBG bzw. Brillouin Sensoren (aus [Loupos et al. 2013])

3.1.2 Magnetbasierte Montage faseroptischer Messsysteme

Im Zuge der Erweiterung bestehender öffentlicher Transportnetzwerke Untertage besteht vor allem in urbanen Gebieten die Notwendigkeit, das bereits existierende Tunnelnetz im unmittelbaren Baubereich zu überwachen. Die Untersuchungen des vorliegenden Projekts, durchgeführt vom Imperial College London, der ETH Zürich und der Marmota Engineering AG, beschäftigen sich mit der magnetbasierten Fixierung von faseroptischen Sensorkabeln auf Gusseisensegmenten in bereits bestehenden Tunnelröhren. Die gewonnenen Erkenntnisse der Laboruntersuchungen wurden danach im Rahmen der Erweiterung des Londoner U-Bahnnetzes (Crossrail Line – Central London) umgesetzt. Sämtliche nachfolgende Informationen zu diesem Projekt entstammen [Fischli et al. 2013].

Die Messungen der auftretenden Dehnungen wurden in den Laboruntersuchungen mittels unterschiedlichen verteilten faseroptischen Messsystemen durchgeführt. Die typischen Spezifikationen der eingesetzten Technologien sind Tab. 3.1 zu entnehmen.

Tab. 3.1: Spezifikationen der verwendeten verteilten faseroptischen Messsysteme; Angaben entnommen aus: [Fischli et al. 2013]

Technologie	maximale Reichweite	Ortsauflösung	Auflösung Strain
BOTDA	30 km	1 m	2 $\mu\epsilon$
Rayleigh Backscatter	70 m	1 mm	1 $\mu\epsilon$

Zur Detektion von Öffnungen der Schweißstellen zwischen zwei Flanschen wird grundsätzlich eine sehr hohe Ortsauflösung im Sub-Zentimeter Bereich benötigt, weshalb in den Überprüfungen der Fixierung eine faseroptische Technologie basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung verwendet wurde. Um auch größere Reichweiten bewerkstelligen zu können, wurde außerdem ein BOTDA-System (Brillouin Optical Time Domain Analysis) getestet. Des Weiteren muss die Befestigung des Faserkabels entlang der Tunnelröhre schnell und zuverlässig erfolgen, um den regelmäßig auftretenden U-Bahnverkehr nicht zu behindern. Zusätzliche Probleme ergeben sich einerseits durch die Steifigkeit des Gusseisensegments, wodurch nur Deformationen auftreten, welche minimal größer sind als die Messauflösung vorhandener faseroptischer Messgeräte. Andererseits muss das faseroptische Kabel auch einen gewissen Schutz gegenüber der rauen, unebenen Oberfläche und der starken Magnetwirkung der Fixierung bieten, um das Auftreten von Bruchstellen zu vermeiden.

Die Prüfung der Montagesysteme wurde grundsätzlich in Kurz- und Langzeituntersuchungen untergliedert, um aussagekräftige Ergebnisse über das Gesamtsystem ableiten zu können. Zur Analyse der Basischarakteristiken einer einzelnen gedehnten Sektion diente ein Kurzzeitzugtest, welcher die maximale Dehnung der Faser vor einem Nachgeben der Magnetfixierung bzw. einem Rutschen der Faser unter dem Magneten feststellen sollte und somit die Bestimmung des Messbereiches ermöglichte. Die Messung erfolgte mittels eines faseroptischen Messsystems basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung, welches auf Grund der hohen Ortsauflösung (Tab. 3.1) in der Lage ist, auch Effekte in unmittelbarer Umgebung der Magnetfixierungen festzustellen. Zur Umsetzung wurde eine Prüfanlage mit Schrittmotor verwendet, die auf Grund der hohen Genauigkeit und Auflösung als Referenz zum faseroptischen Messsystem eingesetzt wurde. Außerdem war es durch die Durchführung sehr kleiner Dehnungsänderungen der Anlage möglich, Rückschlüsse auf die Genauigkeit des faseroptischen Messsystems zu ziehen. Die Befestigung der Faser erfolgte einerseits starr mittels Anker, andererseits mit Hilfe der Magnetfixierung in

einem Abstand von 2 m auf einer beweglichen Trägerplattform, siehe Abb. 3.4.

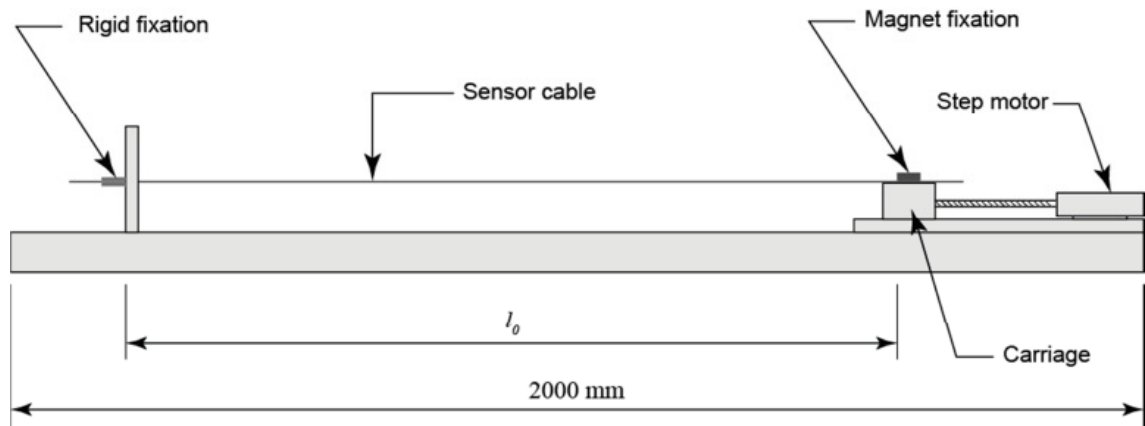


Abb. 3.4: Versuchsaufbau des Kurzzeitzugtests (aus [Fischli et al. 2013])

Die Aufbringung der Dehnung von 1 % ($\cong 10000 \mu\epsilon$) auf das untersuchte Sensorkabel erfolgte unter Einsatz der Trägerplattform und des Schrittmotors mit einer Schrittweite von 0.1 %, wobei diese ab 0.4 % halbiert wurde. Die Faser wurde dabei an der Stelle der Magnetwirkung durch Verwendung eines Klebebandes geschützt, um die Entstehung von Mikrorissen zu vermeiden. Die Resultate sind in Abb. 3.5 dargestellt, wobei ein lineares Verhalten der Messwerte zu den aufgetragenen Dehnungen zu sehen ist. Mögliche Ursachen für die Abweichungen zu einem Linearitätsfaktor von 1 könnten die Einflüsse des Tapes bzw. ein leichtes Nachgeben des Schrittmotors sein. Jedoch kann die Existenz von Hysteresen des Sensors auf Grund der fehlenden Durchführung bzw. Veröffentlichung von zyklischen Messdaten nicht beurteilt werden.

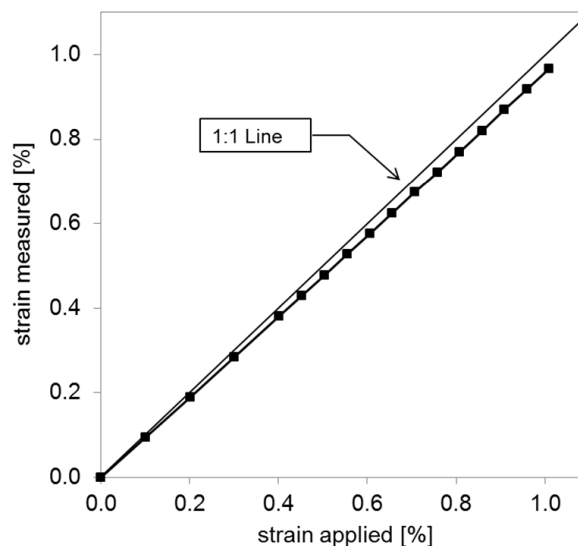
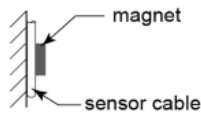


Abb. 3.5: Faserkennlinie des Kurzzeitversuchs (aus [Fischli et al. 2013])

In den Langzeituntersuchungen sollten Effekte bzw. Interaktionen zwischen unterschiedlich vorgespannten, benachbarten Sektionen festgestellt werden. Dazu wurden entlang einer Stahlträgerfläche zwei verschiedene Arten von Magnetfixierungen in zwei unterschiedlichen Untersuchungssystemen montiert, welche schematisch in Abb. 3.6 dargestellt sind. Der Versuch erstreckte sich über mehrere Wochen, wobei eine Auslesung des aktuellen Strains entlang der Faser alle 4 Stunden mittels eines BOTDA-Systems erfolgte.

System A



System B

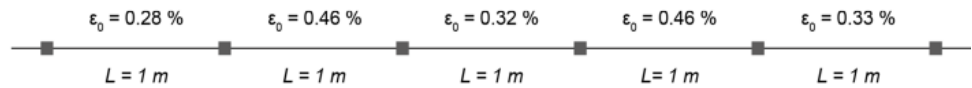
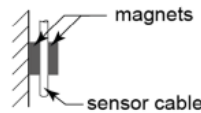


Abb. 3.6: Schematische Darstellung des Langzeitversuchs (aus [Fischli et al. 2013])

Die ausgelesenen Strain-Werte über die ersten 24 Stunden des Langzeitversuchs in Referenz auf die erste gemessene Epoche sind in Abb. 3.7 ersichtlich. Die einzelnen, unterschiedlich gedehnten Abschnitte sind dabei mit nicht durchgezogenen Linien dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass an Übergängen mit großen Dehnungsänderungen ($> 0.1\%$) Verschmelzungen auftreten und der Strain zwischen benachbarten Sektionen transferiert wird, insbesondere an den Grenzen zu den Außenabschnitten des Montagesystems, welche sich in einem ungespannten Zustand befinden.

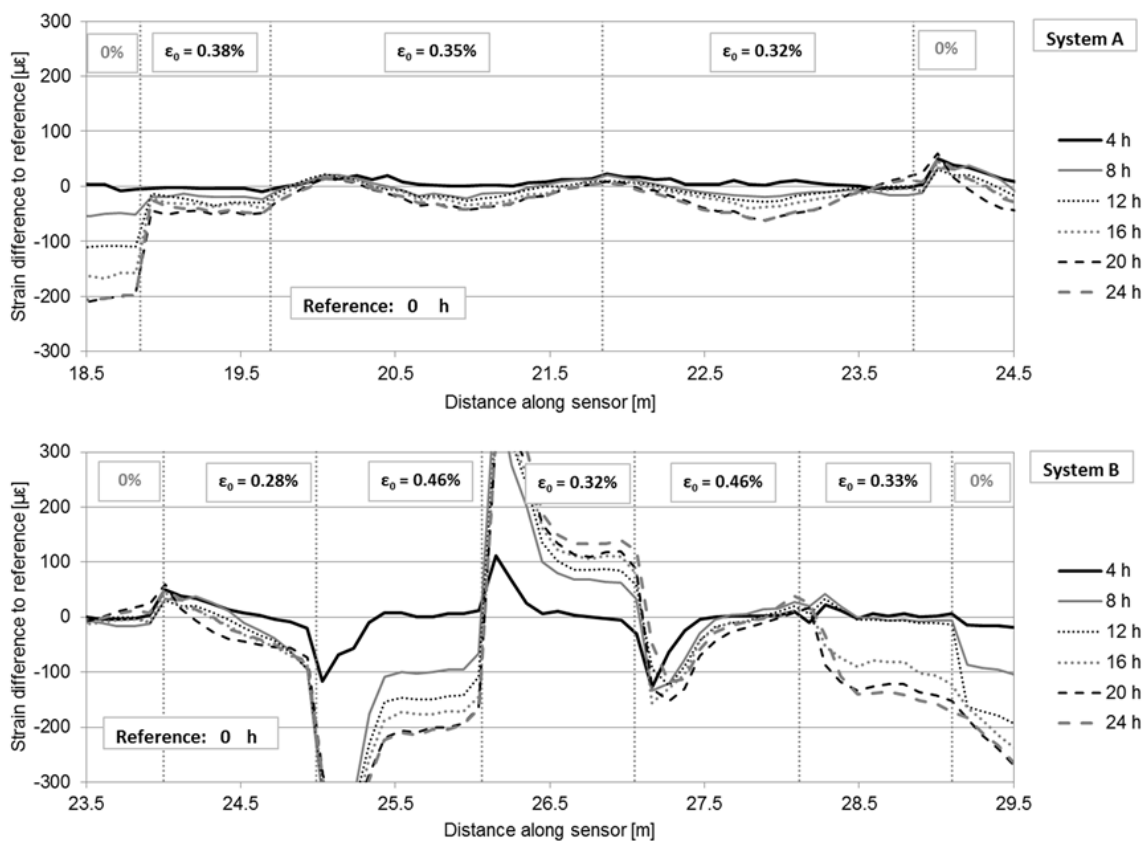


Abb. 3.7: Vergleich der Strain-Werte des BOTDA-Systems über einen Zeitraum von 24 Stunden (aus [Fischli et al. 2013])

In weiterer Folge wurden die Differenzen über einen längeren Zeitraum von 144 Stunden betrachtet. Dabei zeigte sich, dass System A nach dieser Zeitspanne einen konstanten Zustand erreicht. System B jedoch weist weiterhin Verschmelzungen zwischen den benachbarten Sektoren auf. Aus diesem Grund entschieden sich die Autoren dieser Studie für die Verwendung des Gesamtsystems A im weiteren Projektverlauf. Anzumerken ist weiters, dass die unterschiedlichen Längen der vorgespannten Abschnitte keinen bzw. geringen Einfluss auf die Stabilität des Strain-Levels haben.

Als Abschluss der Laboruntersuchungen wurde ein ringförmiger Proband mit einem Durchmesser von 2337 mm bestehend aus 7 Segmenten mit faseroptischen Sensoren ausgestattet, wobei die Fixierung mittels System A erfolgte. Dabei wurde das Sensorkabel jeweils zwischen den Übergängen von zwei Flanschen befestigt, um die Öffnungen unter Belastung messen zu können. Zur Realisierung unterschiedlicher Vorspannungen der Faser erfolgte zusätzlich eine Fixierung innerhalb der Segmente in einem Abstand von 174 mm. Ziel der Anwendung war der Test des Fixierungssystems unter Stress sowie die Separation der unterschiedlich gedehnten Abschnitte. Dazu wurde das Objekt insgesamt dreimal an der Krone gehoben und der entstehende Einfluss auf die benachbarten Sektionen untersucht. Die Resultate veranschaulichen, dass der Übergang zwischen dem Kronensegment und dem anschließenden Teilstück deutlich unterschieden werden kann, solange der entstehende Strain nicht zum Rutschen der Faser unter dem Magneten führt. Des Weiteren kann der separat vorgespannte Abschnitt in der Krone eindeutig von jenem Strain abgegrenzt werden, welcher durch die Nahtstellen entsteht.

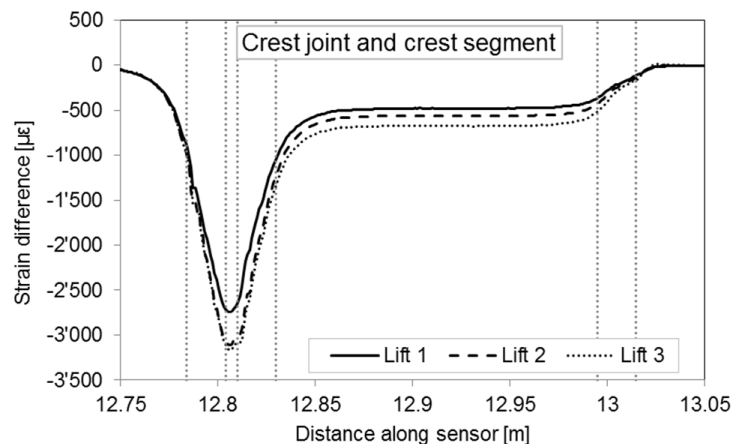


Abb. 3.8: Deformation der Nahtstelle des Kronensegments (aus [Fischli et al. 2013])

Die durchgeführten Laboruntersuchungen zeigten, dass das gesamte Montagesystem eine aussichtsreiche Lösung zum Monitoring von Gusseisensegmenten in bereits bestehenden Tunnelröhren bieten kann, weshalb ein Einsatz im Rahmen der Erweiterung des Londoner U-Bahnnetzes erfolgte. Dabei wurde der bestehende Central Line Tunnel überwacht, um die Auswirkungen des Tunnelvortriebs identifizieren zu können. Die Instrumentierung erfolgte über eine Strecke über 70 m entlang der Achse im Firstbereich eines Tunnels, wobei wiederum die entstehenden Öffnungen zwischen den Flanschen untersucht wurden. Des Weiteren bewerkstelligte eine Ausstattung von zwei Gusseisensegmenten die Erfassung von Querschnittsveränderungen, welche aus Spannungsänderungen im Boden folgen könnten. Während der Unterfahrung der Tunnelbohrmaschinen Ende 2012 konnten über einen Zeitraum von 2 Wochen kontinuierliche Deformationsmessungen durchgeführt werden, wobei sowohl Deformationen in der Tunnelachse als auch im Querschnitt erfasst wurden. [Marmota Engineering AG 2013a]

3.2 Geotechnische Überwachungsmessungen

Im Zuge der Überwachung jeglicher Bewegungen der Erdoberfläche sowie des Boden- und Gesteinsuntergrunds in Verbindung mit Risiken für den Menschen und dessen Infrastruktur ist der Einsatz geotechnischer Sensoren unerlässlich. Angesichts der unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten ergibt sich eine Vielzahl von Sensoren, welche zur Lokalisierung und Quantifizierung der Deformationen eingesetzt werden kann. Die Effizienz des Messdesigns und die Wahl der richtigen Sensorik in Kombination mit geotechnischem Fachwissen erweisen sich dabei als notwendig, um eine zuverlässige Überwachungslösung bereitstellen zu können.

Der Instrumentierung mit faseroptischen Sensoren bietet die Möglichkeit, Informationen über das gesamte Messobjekt abzuleiten, was im Vergleich zu konventionellen Messmethoden wie z.B. Inklinometern eine höhere Flexibilität ermöglicht. Durch die direkte Verbindung der Glasfaser mit dem Zielobjekt können Bewegungen schneller identifiziert und somit die Sicherheit gewährleistet werden. Das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) überwacht beispielsweise seit mehr als 10 Jahren den Rutschhang Gradenbach, wobei neben der Durchführung geodätischer und geotechnischer Messungen ebenfalls faseroptische Punktsensoren (SOFO) eingesetzt werden. Nähere Informationen können u.a. [Brückl et al. 2013] entnommen werden.

Die nachfolgenden Projekte wurden von der Schweizer Firma Marmota Engineering AG durchgeführt, welche sich auf faseroptische Überwachungslösungen in der Geotechnik spezialisiert hat. Dieser Überblick soll projektspezifische Instrumentierungen sowie das Tätigkeitsfeld der Glasfasersensorik in der Geotechnik veranschaulichen und die Vorteile gegenüber traditioneller Messverfahren aufzeigen.

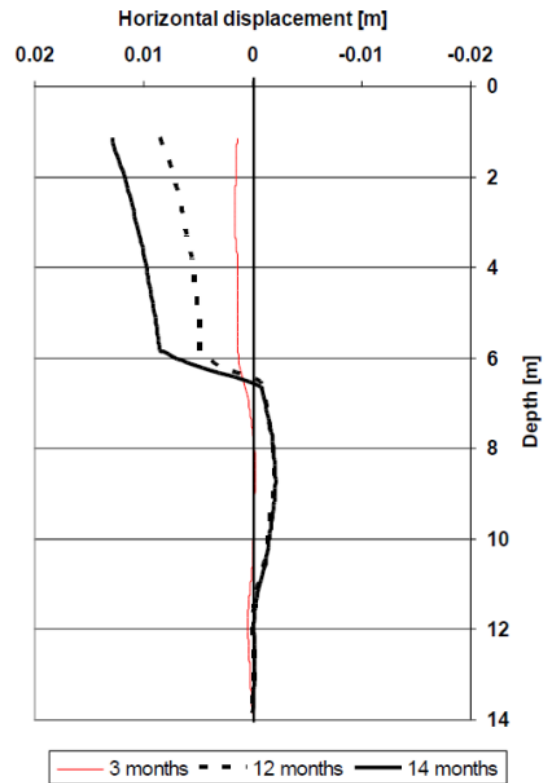
3.2.1 Rutschhangmonitoring und Lokalisierung von Gleitflächen

Die Analyse der Stabilität von Rutschhängen sowie die Lokalisierung von Gleitflächen sind typische Aufgabenbereiche in der Geotechnik. Klassische Hangüberwachungen werden mittels geodätischen Messungen gewährleistet und durch geotechnische Sensoren wie z.B. Inklinometer ergänzt. Der zusätzliche Einsatz von faseroptischen Messsystemen bietet auf Grund der hohen Auflösung eine effektive Möglichkeit, Gleitflächen in relativ kurzer Zeit zu erkennen und dadurch Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Die Berghänge rund um St. Moritz im Bündnerland (Schweiz) werden trotz ihrer Instabilität intensiv als Baufläche genutzt. Als Überwachungslösung werden daher klassische geodätische Messverfahren in Kombination mit Inklinometermessungen eingesetzt. Zur genauen Detektion der Rutschhänge sowie deren Gleitflächen und Tiefen wurden mehrere Projekte unter dem Einsatz von faseroptischen Messverfahren durchgeführt, um einerseits die Stabilität der Hänge bereits vor der Errichtung neuer Bauwerke beurteilen und andererseits Maßnahmen während bzw. nach der Bauphase treffen zu können. Zur genauen unteren Begrenzung des Laret-Rutschhangs wurde ein Wanderweg über 80 m mit einem Glasfasersensor in einer Tiefe von 40 cm ausgestattet, siehe Abb. 3.9a. Dabei wurde neben zweier Sensorkabeln zur Erfassung der Expansion eine weitere, von der Dehnung isolierte Glasfaser zur Temperaturkompensation eingebettet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Gleitflächen durch den Einsatz verteilter faseroptischer Messsysteme wesentlich schneller erfassen lassen als mit konventionellen Messmethoden. Des Weiteren waren saisonale Schwankungen zu erkennen, die mit den Daten der Inklinometer in unmittelbarer Umgebung verglichen werden konnten.



(a) Laret-Rutschhang



(b) Horizontale Verschiebungen

Abb. 3.9: Rutschhang, St. Moritz (aus [Marmota Engineering AG 2011a], [Marmota Engineering AG 2012a])

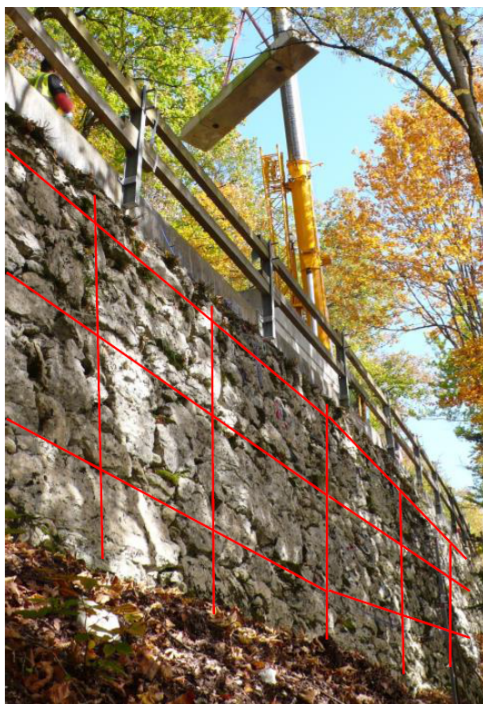
Die Bestimmung der Tiefe und die Ausdehnung von Gleitflächen wird traditionell mit Hilfe von in Bohrlöchern angebrachten Sensoren, wie z.B. Inklinometern, gewährleistet. Auf Grund der hohen Auflösung bietet die Montage faseroptischer Sensorkabeln in Inklinometerrohren die Möglichkeit, Dehnungsänderungen rascher zu erfassen und somit die Position der Gleitfläche schneller abzuleiten. Deshalb wurden in St. Moritz zusätzlich zur Überwachungslösung des Laret-Rutschhangs vorgespannte Glasfasern in Inklinometerrohren befestigt, wobei das Bohrloch danach mit Zementbeton gefüllt wurde, um die Übertragung der Dehnungen auf den Sensor zu gewährleisten. Die Darstellung der Auswertungen der horizontalen Verschiebungen in Abb. 3.9b zeigt, dass die Gleitfläche schnell identifiziert und deren Bewegung über mehrere Monate abgeleitet werden kann. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Oberflächenbewegung unter Annahme eines festen Bodenpunktes zu bestimmen. [Marmota Engineering AG 2011a]

Im Zuge der Errichtung von Bauwerken, welche durch rutschende Hänge gefährdet sein können, erweist es sich oft als Vorteil, das zu überwachende Objekt direkt mit Sensoren auszustatten, um die entstehenden Deformationen durch die auftretenden Verschiebungen des Hanges unmittelbar erfassen zu können. In den Bündner Alpen erfolgte im Rahmen des Baus eines neuen Wasserkraftwerks die Verlegung einer Druckwasserleitung, welche über sehr steile, an einigen Stellen kriechende Hänge verläuft. Zur genauen Lokalisierung der Kriechzonen und Überwachung der Leitung wurden dabei über eine Länge von 1000 m Glasfaserkabeln anliegend an das Wasserrohr in der Künette miteingebettet, wobei das Monitoring seit 2012 kontinuierlich durchgeführt wird. [Marmota Engineering AG 2013b]

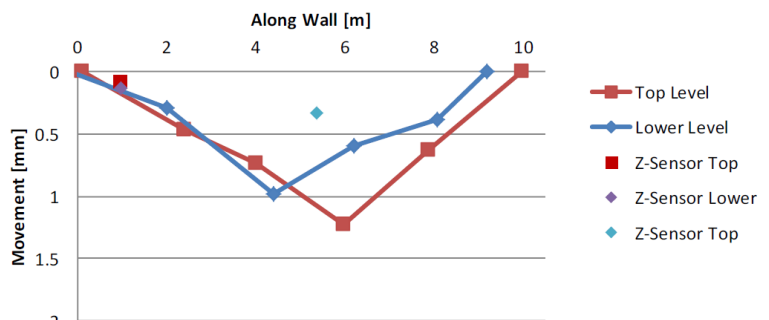
3.2.2 Deformationsmessungen im Zuge der Errichtung von Bauprojekten

Zur erfolgreichen Durchführung sensitiver Bauprojekte besteht die Notwendigkeit den umliegenden Untergrund durch geotechnische Messungen zu überwachen, um die Sicherheit aller betroffener Objekte zu gewährleisten. Zur Beobachtung von Boden- und Gesteinsstrukturen eignen sich verteilte faseroptische Messsysteme, welche eine kontinuierliche Messung entlang des gesamten Sensorkabels durchführen können und somit eine zuverlässige Detektion von Bewegungen und Setzungen des Baugrundes ermöglichen.

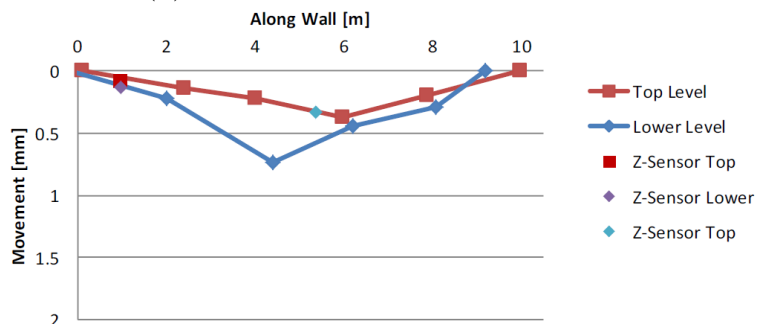
Im Rahmen des Westlink Projekts in Zürich Altstetten sollte ein Hochhaus errichtet werden. Das geplante Fundament befand sich dabei nur rund 15 m über einer Hauptwasserleitung Zürichs, weshalb ein System zur Überwachung von Setzungen in der Bauphase benötigt wurde, um die Sicherheit des Leitungsverlaufs garantieren zu können. Nachdem die Zugänglichkeit nach der Betonierung der Fundamentplatte nicht mehr gegeben war, wurden vorab 8 Bohrlöcher mit einer Tiefe von 15 bis 18 m mit faseroptischen Sensoren ausgerüstet, wobei die Sensorkabeln über Messschächte nach außen geführt wurden. Die periodischen Messungen wurden verteilt über die gesamte Länge der Sensoren durchgeführt, wodurch eine Sicherstellung der Wasserleitung über die volle Projektdauer gewährleistet werden konnte. [Marmota Engineering AG 2013c]



(a) Installierte Glasfasersensoren



(b) Bewegungen der Blocksteinmauer



(c) Kalibrierte Querausdehnung

Abb. 3.10: Belastungsversuch, Grenchenberg (aus [Iten 2014] und [Marmota Engineering AG 2011b]))

Die Errichtung von Bauwerken mit großen Ausmaßen erfordert nicht nur einen stabilen Baugrund, sondern ebenfalls eine belastbare Infrastruktur. Im Zuge des Baus von Windenergieanlagen am Grenchenberg im Schweizer Jura-Gebirge sollte eine bestehende Bergstraße als Schwerttransportweg genutzt werden. Vorab sollten durch den Einsatz faseroptischer Messsysteme jene Stellen entlang des Straßenverlaufs ermittelt werden, welche diesen Lasten standhalten können bzw. welche gezielt angepasst und verstärkt werden müssen. Die Begrenzung des Straßendecks

ist abschnittsweise durch eine Blocksteinmauer gegeben, welche im Zuge eines starken lokalen Belastungsversuchs durch kontinuierliche Deformationsmessungen überwacht werden sollte. Zu diesem Zweck wurde die Begrenzungsmauer an mehreren Stellen mit faseroptischen Sensorkabeln in Rasterform ausgestattet, siehe Abb. 3.10a. Als kritische Bewegungsrichtung des Objekts erweist sich allerdings die Querausdehnung in einem Winkel von 85° bis 95° zum Straßenverlauf, weshalb zusätzliche Sensoren (Z-Sensoren) orthogonal zum installierten Raster montiert wurden, um eine Kalibrierung der erfassten Deformationen zu gewährleisten.

Die Bewegungen der Blocksteinmauer sowie die punktweise verteilten Kalibrierungssensoren sind in Abb. 3.10b dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass in beiden gezeigten Sensorketten Dehnungen der Blocksteinmauer sowohl in Längs- als auch in Querrichtung auftreten, aus welchen Abweichungen zu den orthogonal installierten Glasfaserkabeln resultieren. Die durchgeführte Kalibrierung der Messwerte, gezeigt in Abb. 3.10c, bildet die Grundlage zur Beurteilung des Gesundheitszustandes des Objekts unter Belastung, welche entscheidungsgebend für etwaige Modifikationen der Bergstraße in den untersuchten Abschnitten ist. [Marmota Engineering AG 2011b]

3.2.3 Prüfung faseroptischer Sensoren und Spezialanwendungen

Angesichts der geringen Erfahrungswerte, der erst entstehenden internationalen Normen und der Vielzahl an faseroptischen Produkten sind detaillierte Laboruntersuchungen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Messsystems vor dem Einsatz in der Praxis erforderlich. Neben der Prüfung des Dehnungs- bzw. Temperaturverhaltens der einzelnen Sensoren stehen außerdem Überwachungslösungen für Spezialanwendungen im Vordergrund, welche einen individuellen Messaufbau erfordern.



(a) Installierte faseroptische Sensoren

(b) Simulierte Scherzone

Abb. 3.11: Überprüfung von Geotextilien (aus [Marmota Engineering AG 2012b])

Im Zuge der Überwachung von Scherzonen und Setzungen erfolgt häufig der Einsatz von faseroptischen Messsensoren, welche in Geotextilien eingebettet sind. Der Vorteil dieser Systeme besteht darin, dass eine zusätzliche Verankerung der Glasfasern mit dem Messobjekt nicht erforderlich ist und eine aufwendige Installation vermieden werden kann. Im vorliegenden Projekt

erfolgte die Untersuchung der Tauglichkeit eines mit FBG-Sensoren ausgestatteten Textils in Gewebeform der Firma TenCate Geosynthetics.

Im Rahmen der Überprüfungen wurde eine in zwei Abschnitte unterteilte, 9 m lange Holzbox als Testobjekt verwendet, in welcher das zu untersuchende Geotextil und ein zusätzlicher Referenzsensor eingebettet wurden. Die Simulation einer Scherzone erfolgte, wie in Abb. 3.11b dargestellt, durch Verschiebung der beiden Boxhälften relativ zueinander, wobei die Dehnungen einerseits mittels der FBG-Sensoren innerhalb des Textils und andererseits verteilt entlang des Referenzsensors kontinuierlich erfasst wurden. Durch den Vergleich der ausgewerteten Messdaten zu den davon unabhängig gemessenen Verschiebungen des Versuchsobjekts konnte gezeigt werden, dass die Einsatzfähigkeit des Geotextils gegeben ist. [Marmota Engineering AG 2012b]



(a) Sensorkabel, Außenseite

(b) Temperaturmessung

Abb. 3.12: SACAC Betonbehälter zur Lagerung von radioaktivem Abfall (aus [Marmota Engineering AG 2011c])

In einem weiteren Projekt wurde ein Betonbehälter zur Lagerung von radioaktivem Abfall der Firma SACAC untersucht, welcher auf Grund der kontinuierlichen Wärmeproduktion des Atom- mülls unter ständiger thermischer Belastung steht. Die temperaturbedingten Ausdehnungen des Behälters wurden durch faseroptische Messsensoren erfasst, wobei die Instrumentierung entlang der Außenseite in halber Höhe sowie an der Oberseite des Objekts erfolgte, siehe Abb. 3.12a und 3.12b. Zur Messung der auftretenden Temperaturen innerhalb des Behälters wurden separate Temperatursensoren verwendet.

Zur Simulation der späteren Belastungen wurde der Behälter mit Beton gefüllt und somit die gewünschte Abwärme in einem Temperaturbereich von 70°C produziert. Die Messungen erfolgten periodisch alle 30 Minuten über einen Zeitraum von einer Woche und ermöglichten eine Analyse der Beständigkeit des Lagerbehälters. [Marmota Engineering AG 2011c]

3.3 Resümee und Ausblick

Die Vielzahl an durchgeführten Projekten unter Einsatz von faseroptischen Messsystemen zeigt das breite Anwendungspotential, welches diese Technologie mit sich bringt. Im Gegensatz zu den meisten traditionellen geotechnischen Sensoren ist eine Zugänglichkeit unter Verwendung der Glasfasersensorik nach der Installation nicht mehr notwendig. Aus diesem Grund können Sensoren auch an Stellen innerhalb des Messobjekts montiert werden. Durch die Steigerung der Auflösung und die Position der sensitiven Elemente an der Struktur des Objekts besteht die Möglichkeit, Deformationen rascher zu erfassen. Daraus können während der Bau- bzw. Betriebsphase Informationen über den strukturellen Zustand des Objekts und des umliegenden Untergrundes abgeleitet werden.

Neben der Messung von Deformationen entlang eines Objekts konnte durch den Einsatz einer Rasterinstallation im Rahmen des Belastungsversuchs der Bergstraße Grenchenberg gezeigt werden, dass eine flächenhafte Überwachung mittels verteilter faseroptischer Messverfahren realisierbar ist. Die Kombination mit weiteren, orthogonal angebrachten Sensoren ermöglichte außerdem eine dreidimensionale Erfassung der Bewegungen.

Des Weiteren legt die Anwendungsstudie dar, dass die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Zielobjekte sowie die häufig rauen Installationsbedingungen sichere Montagesysteme erfordern, um die Beständigkeit der Glasfasern zu gewährleisten. In den Versuchen zur Fixierung faseroptischer Sensoren mittels magnetbasierter Befestigungssysteme wurde deshalb Klebeband verwendet, welches einen zusätzlichen Schutz des Sensorkabels vor der starken Magnetwirkung bot. Jedoch zeigte sich im Zuge der Überprüfungen, dass dadurch die Linearität der Kennlinie des Sensors beeinflusst wird.

Folglich sind ausführliche Laboruntersuchungen und Kalibrierungen der Sensoren und Instrumente eine Grundvoraussetzung, um eine effektive Nutzung des faseroptischen Gesamtsystems zu ermöglichen. Kenntnisse über das Verhalten der einzelnen Komponenten z.B. bezüglich Linearität und Messrauschen sind erforderlich, damit die Interpretation des Ergebnisses gewährleistet werden kann. In der untersuchten Literatur konnten dazu wenige Informationen gesammelt werden.

Der Einsatz der blanken Glasfaser sorgt auf Grund ihrer Flexibilität für eine bessere Anpassung an das Messobjekt. Jedoch ist ihre Bruchempfindlichkeit im Gegensatz zum vorgefertigten Sensorkabel wesentlich höher, wodurch eine Verwendung in rauen Umgebungsbedingungen behindert wird. In Anwendungsbereichen außerhalb des klassischen geotechnischen Tätigkeitsfeldes stellt sie hingegen eine geeignete Alternative dar. Ein Beispiel würde die Verbindung der Glasfaser mit einer dünnhäutigen Oberfläche darstellen, wodurch die Verformungen kontinuierlich erfasst werden könnten. Jedoch sind Dokumentationen derartiger Projekte bis dato kaum vorhanden.

Kapitel 4

Verteilte faseroptische Messsysteme basierend auf der Rayleigh-Streuung

Infolge der Ausbreitung optischer Signale resultieren Intensitätsverluste auf Grund von Interaktionen des Lichts mit einzelnen Partikeln innerhalb eines Mediums. In Glas können diese vereinfacht in Absorption und Streuung unterteilt werden, siehe Abschnitt 2.1.3. Die Streuung des optischen Signals tritt dann auf, wenn die Größe der Partikel annähernd gleich der Wellenlänge ist, woraus eine Ablenkung des Lichts in verschiedene Richtungen folgt. Verteilte faseroptische Messsysteme nützen die rückgestreuten Anteile des Signals, um Informationen bezüglich Dehnung und Temperaturänderungen verteilt über die gesamte Glasfaser ableiten zu können.

Im Rahmen dieses Kapitels wird ausgehend von den physikalischen Grundlagen das Prinzip der Optical Time Domain Reflectometry basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung erläutert. Sämtliche Informationen, Formeln und numerische Angaben sind dabei [Thévanez und Bergmans 2011, S. 207 ff.] entnommen. Die OTDR-Technologie ermöglicht die Erfassung von Intensitätsverlusten entlang des Ausbreitungsweges des optischen Signals. Des Weiteren kann die Detektion von Längenänderungen bzw. Temperaturunterschieden relativ zu einer Referenzmessung durch Anwendung von Korrelationsmethoden durchgeführt werden. Eine Realisierung eines solchen Systems stellt das faseroptische Messinstrument LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600 dar. Dieses soll einerseits anhand des Grundprinzips der OTDR analysiert werden, um die allgemeine Qualitätsparameter des Instruments verifizieren zu können. Andererseits soll der Übergang auf das verteilte faseroptische System durch Erläuterungen bezüglich Messprinzip und Software gewährleistet werden.

4.1 Physikalische Grundlagen

In optischen Fasern wird die Rayleigh-Streuung als Hauptkomponente des Intensitätsverlusts für optische Signale mit einer Wellenlänge bis 1600 nm gesehen. Der Gesamtverlust kann dabei in linearer Approximation mit rund 0.2 dB/km ($\lambda=1550$ nm) angegeben werden, wobei ungefähr 85 % dieser Dämpfungen durch die Rayleigh-Rückstreuung verursacht werden. Dieser Abschnitt beschreibt die Ausbreitung eines Lichtpulses entlang des Faserkerns, die auftretenden Dämpfungen und die daraus resultierende Rückstreuung des optischen Signals, wobei punktuelle Verluste, welche unter anderem durch Konnektoren oder Spleiße entstehen können, vorerst vernachlässigt werden.

Die Analyse eines optischen Signals bezüglich der auftretenden Dämpfungen erfordert zunächst, wie in Abb. 4.1 dargestellt, die Definition der Signalleistungen (Power) in Abhängigkeit der Position z entlang der Glasfaser. Dabei kann die Power eines Lichtpulses an der Stelle des Eintritts

in die optische Faser als P_0 definiert werden. Je nach der Länge des Ausbreitungsweges verringert sich diese auf Grund der auftretenden Dämpfungen und wird in Abhängigkeit der Position mit $P_i(z)$ angegeben. Betrachtet man die Leistung des rückgestreuten Signals muss die Position der Rückstreuung berücksichtigt werden. Dabei kann eine Angabe der Leistung entweder am Ort der Rückstreuung z in Form von $P_b(z)$ oder an der Position der Erfassung durch das Messinstrument als $P_B(z)$ erfolgen.

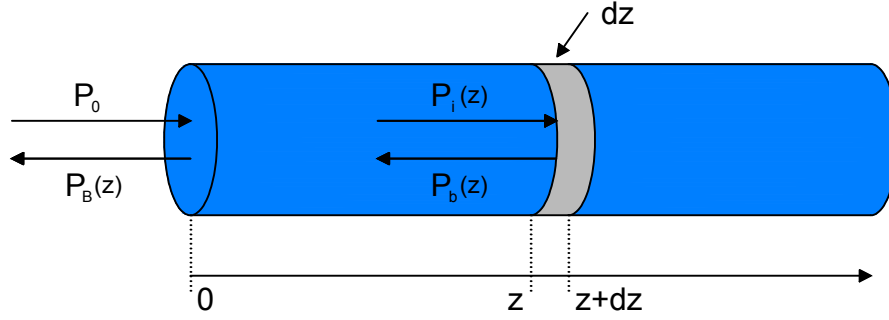


Abb. 4.1: Definition der Leistungen des optischen Signals und der Rayleigh-Rückstreuung (nach [Thévenaz und Berghmans 2011, S. 218])

Zum besseren Verständnis wird zunächst ein differentiell kleiner, rechteckiger Lichtpuls mit einer Breite dz betrachtet, siehe Abb. 4.1. Der differentielle Anteil der Rayleigh-Rückstreuung dP_b an der Position z kann in Abhängigkeit der Wellenlänge λ angegeben werden.

$$dP_b(z) = P_i(z)B_c(\lambda, z)\alpha_S(\lambda, z)dz \quad (4.1)$$

Dabei repräsentiert α_S den Streukoeffizienten der Rayleigh-Streuung, welcher die Ablenkung des Lichts in sämtliche Richtungen angibt. Im Gegensatz dazu charakterisiert B_c nur jenen Anteil der Rayleigh-Streuung, der in Richtung des ankommenden Lichtpulses reflektiert und vom Messinstrument am Faserende erfasst werden kann.

Der totale Dämpfungskoeffizient α stellt den gesamten Intensitätsverlust des optischen Signals (0.2 dB/km bei $\lambda=1550$ nm) innerhalb der Glasfaser dar. Unter Annahme eines linearen Dämpfungsverlaufs kann somit die Leistung eines Lichtpulses an der Position z mit $P_i(z) = P_0e^{-\alpha z}$ definiert werden, wobei dieser Zusammenhang ebenso für die Rückstreuung gilt, woraus sich der differentielle Anteil der erfassbaren Rayleigh-Rückstreuung am Ort der Messeinheit $P_B(z)$ ergibt.

$$dP_B(z) = P_0B_c(\lambda, z)\alpha_S(\lambda, z)e^{-2\alpha z}dz \quad (4.2)$$

Die Zeitdauer t , welche der Lichtpuls zum Erreichen von z benötigt, kann über den Zusammenhang mit der Gruppengeschwindigkeit des Pulses c_g durch $z = c_g t$ bestimmt werden. Dadurch lässt sich die Formel 4.2 in Abhängigkeit der Ausbreitungsdauer t sowie der differentiellen Pulsdauer dt darstellen.

$$dP_B(t') = P_0B_c(\lambda, c_g t)\alpha_S(\lambda, c_g t)e^{-2\alpha c_g t}c_g dt \quad (4.3)$$

Auf Grund von Hin- und Rückweg (siehe Abb. 4.2a) wird dabei die Leistung der Rayleigh-Rückstreuung am Zeitpunkt $t' = 2t$ betrachtet.

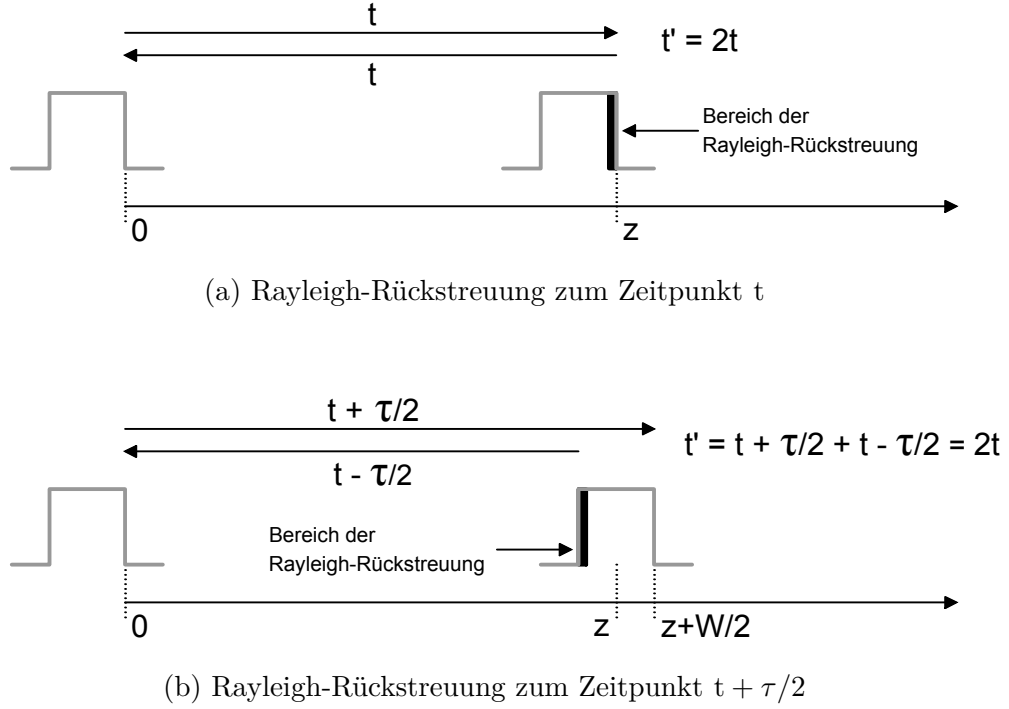


Abb. 4.2: Definition der Ausbreitung und Rückstreuung eines Lichtpulses (nach [Thévenaz und Berghmans 2011, S. 219])

Gewährleistet man nun den Übergang vom differentiellen Puls auf einen endlichen Puls mit der Dauer τ kann die Pulslänge mit $W = c_g \tau$ definiert werden. Unter Betrachtung von Abb. 4.2a ist zu sehen, dass ein Puls am Zeitpunkt t eine Rayleigh-Rückstreuung bewirkt, welche am Messinstrument mit t' detektiert wird. Bewegt sich der Lichtpuls um ein Intervall $\frac{\tau}{2}$ weiter, folgt eine Rückstreuung an der hinteren Flanke des Pulses, die ebenfalls zum Zeitpunkt t' zur Erfassung ankommt, siehe Abb. 4.2b. Da sämtliche andere rückgestreute Signale außerhalb der räumlichen Auflösung des Pulses liegen, ergibt sich daraus ein Integrationsbereich zwischen t und $t + \frac{\tau}{2}$, in welchem die Rayleigh-Rückstreuung der Position z beurteilt werden muss.

$$P_B(t') = \int_t^{t+\frac{\tau}{2}} P_0 B_c(\lambda, c_g t) \alpha_S(\lambda, c_g t) e^{-2\alpha c_g t} c_g dt \quad (4.4)$$

Aus der Integration folgt die Leistung des rückgestreuten Lichtpulses in Abhängigkeit der Ausbreitungsdauer. Dabei erfolgt die Annahme, dass der Streukoeffizient α_S und die rückgestreuten Anteile B_c der Rayleigh-Streuung innerhalb des Pulses konstant bleiben.

$$P_B(t') = P_0 B_c(\lambda, c_g t) \alpha_S(\lambda, c_g t) c_g \frac{\tau}{2} e^{-2\alpha c_g t} \quad (4.5)$$

Das Ergebnis der Integration kann abschließend durch die Zusammenhänge $z = c_g t$ bzw. $W = c_g \tau$ abhängig von der Position z angegeben werden.

$$P_B(z) = P_0 B_c(\lambda, z) \alpha_S(\lambda, z) \frac{W}{2} e^{-2\alpha z} \quad (4.6)$$

4.2 Optical Time Domain Reflectometry

Das Prinzip der Optical Time Domain Reflectometry basierend auf der Rayleigh-Streuung stellt eine weit verbreitete Methode zur Bestimmung der Charakteristiken eines optischen Netzwerkes dar. Dabei werden neben den homogenen Dämpfungen entlang des Ausbreitungsweges des Signals auch punktuelle Verluste betrachtet, welche durch faseroptische Komponenten (z.B. Konnektoren, Spleiße) oder externe mechanische Einflüsse (z.B. Krümmungen) verursacht werden. Dadurch wird die Beurteilung des Gesundheitszustandes eines faseroptischen Sensorkabels ermöglicht.

Das Messverfahren der OTDR beruht auf den physikalischen Grundlagen der Rayleigh-Streuung (siehe Abschnitt 4.1), wobei die reflektierten Anteile eines emittierten Lichtpulses über die Zeit betrachtet werden. Durch den Übergang von der Zeit auf die Position z kann die Intensität $S(z)$ der OTDR-Messung in Abhängigkeit von der Signalleistung der Rückstreuung $P_B(z)$ definiert werden.

$$S(z) = 5 \log \frac{P_0 B_c(\lambda, z) \alpha_S(\lambda, z) \frac{W}{2} e^{-2\alpha z}}{P_{Ref}} = 5 \log \frac{P_B(z)}{P_{Ref}} \quad (4.7)$$

Die Leistung des Referenzsignals P_{Ref} stellt dabei eine interne Größe des OTDR-Instruments dar, welcher mit dem rückgestreuten Signal verglichen wird. Die Eigenschaften dieses Referenzsignals in Bezug auf das Messgerät LUNA OBR 4600 werden in Abschnitt 4.3.2 veranschaulicht.

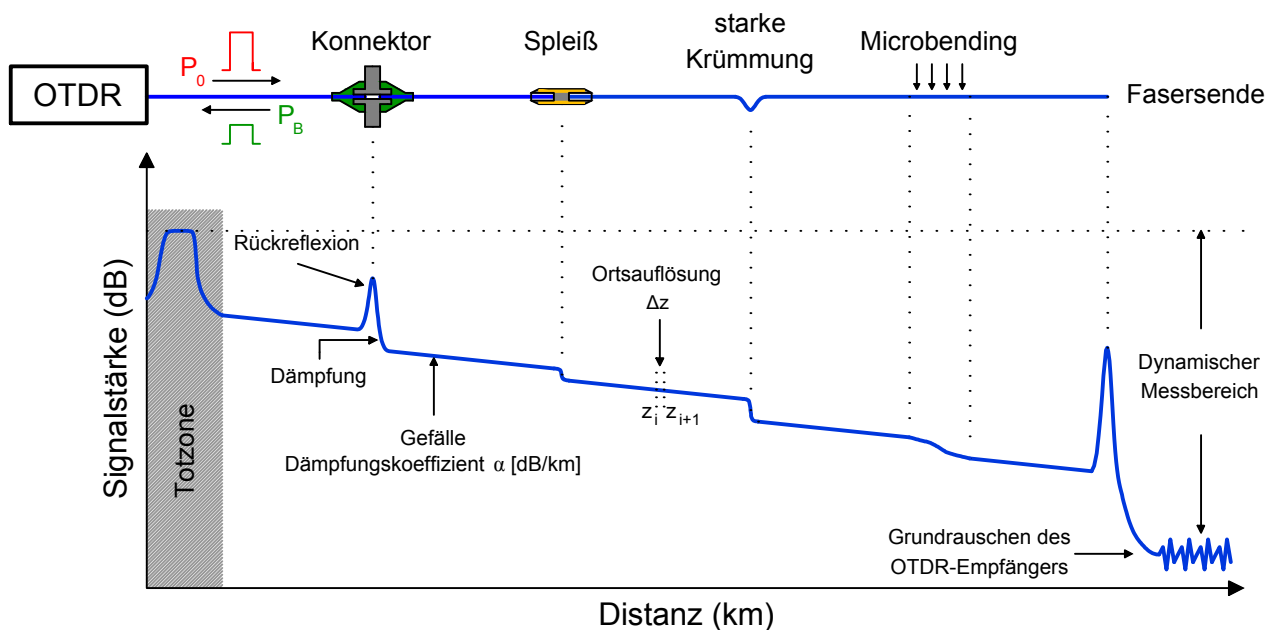


Abb. 4.3: Typisches Signal einer OTDR-Messung mit Verlusten entlang der Faser (nach [Thévenez und Berghmans 2011, S. 235] und [Udd und Spillman 2011, S. 280])

In Abb.4.3 ist ein typisches Rückstreusignal einer OTDR-Messung dargestellt. Dabei sind diverse Kennzeichen der OTDR-Technologie sowie Informationen bezüglich der Verluste des Signals zu erkennen, welche nachfolgend erläutert werden.

Totzone

Am Beginn und Ende des OTDR-Signals, folglich an jenen Stellen wo der Lichtpuls in die Faser ein- bzw. ausgekoppelt wird, treten starke Rückreflexionen des Signals auf Grund der sogenannten Fresnel-Reflexion auf. Daraus resultiert im Anfangsbereich eine Übersättigung des Detektors, die keine zuverlässige Messung des rückgestreuten Signals gewährleistet. Die Distanz zwischen dem Eintritt des Lichtpulses in die Glasfaser und jener Position, an welcher das Signal wieder normales Rückstreuungsniveau (üblicherweise $\leq 0.5\text{dB}$) erreicht, wird deshalb als Totzone bezeichnet. Der Reflexionspeak am Faserende ermöglicht hingegen die Bestimmung der absoluten Länge der Glasfaser.

Dynamischer Messbereich

Der dynamische Messbereich stellt den maximalen Verlust dar, welcher vom OTDR-Empfänger erfasst werden kann und ist abhängig von der Power des ausgesendeten Pulses P_0 . Dabei gilt, dass eine Erhöhung der Leistung des Lichtpulses zu einem größeren dynamischen Messbereich führt. Gleichzeitig folgt aus einer Verstärkung des Pulses jedoch ein höheres Grundrauschen, wobei dieses durch eine Mittelbildung des Signals verringert werden kann. Herstellerangaben bezüglich des dynamischen Messbereichs erfolgen daher meist in Abhängigkeit vom Signal-Rausch-Verhältnis.

Intensitätsverluste

Intensitätsverluste entlang des Ausbreitungsweges des Lichtpulses repräsentieren das typische Signal einer OTDR-Messung. Dabei kann grundlegend zwischen homogenen Dämpfungen und punktuellen Verlusten auf Grund von Ereignissen (Events) unterschieden werden.

Der Dämpfungskoeffizient α charakterisiert die Gesamtheit der Intensitätsverluste des optischen Signals, welche durch Streuungskomponenten innerhalb der Glasfaser ausgelöst werden. In der Darstellung einer OTDR-Messung kann dieser aus dem Gefälle der Signalstärke abgeleitet werden, weshalb üblicherweise eine numerische Angabe in dB/km erfolgt.

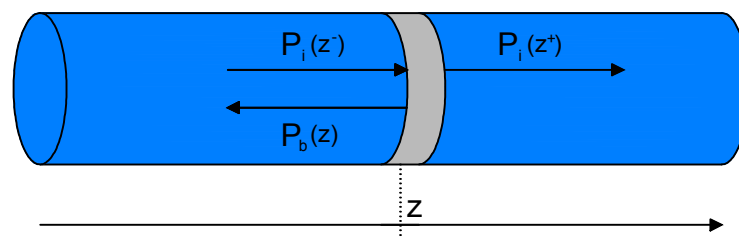


Abb. 4.4: Definition von Dämpfung und Rückreflexion infolge eines Events (nach [Thévenaz und Berghmans 2011, S. 237])

Im Gegensatz zu homogenen Dämpfungen zeigen sich Events als Verluste in Form von punktuellen Dämpfungen (IL=Insertion Loss) und Rückreflexionen (RL=Return Loss) des optischen Signals, wodurch eine Lokalisierung ermöglicht wird. Des Weiteren verursachen unterschiedliche Events teilweise differente Charakteristiken des OTDR-Signals, die eine Beurteilung des Typs der faseroptischen Komponente erlauben. Betrachtet man z.B. das typische Verhalten eines Spleißes an der Position z , verursacht dieser nur eine Dämpfung des Signals. Diese beschreibt

den Intensitätsverlust eines ankommenden Pulses $P_i(z^-)$ im Verhältnis zum sich weiter ausbreiteten Puls $P_i(z^+)$, siehe Abb. 4.4. Auf Grund von Hin- und Rückweg weist das detektierte Signal am Messgerät einen Verlust von $2IL$ auf, weshalb entgegen Formel 4.7 der Faktor 10 angewendet wird. Daher kann direkt aus der Differenz zwischen den OTDR-Signalstärken an den Positionen z^- und z^+ die Dämpfung des Signals bestimmt werden.

$$IL(z) = 10 \log \frac{P_i(z^-)}{P_i(z^+)} = S(z^-) - S(z^+) \quad (4.8)$$

Anders als Spleiße bewirken z.B. Konnektoren neben einer Dämpfung auch eine Rückreflexion des optischen Signals, wobei diese als Return Loss in Abhängigkeit der Power des ankommenden Pulses $P_i(z^-)$ und des rückgestreuten Signals $P_b(z)$ angegeben wird.

$$RL(z) = 10 \log \frac{P_i(z^-)}{P_b(z)} \quad (4.9)$$

Ortsauflösung

Der minimale Abstand zwischen zwei Streubereichen, welche vom Messinstrument separiert und detektiert werden können, wird als Ortsauflösung bezeichnet und ist über die physikalische Breite des Lichtpulses W definiert.

$$\Delta z \geq \frac{W}{2} \quad (4.10)$$

Eine Reduzierung der Pulsdauer τ bewirkt dabei auf Grund des Zusammenhangs $W = c_g \tau$ eine geringere Pulsbreite, woraus eine höhere Ortsauflösung folgt. Aus der kürzeren Dauer des Pulses ergibt sich eine Verminderung der emittierten Energie, die kürzere dynamische Messbereiche und Reichweiten bewirkt. Daher sind je nach Problemstellung diese einzelnen Parameter aufeinander abzustimmen, um ein optimales Messsystem bereitstellen zu können.

4.3 LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600

Der LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600 realisiert ein verteiltes faseroptisches Messsystem basierend auf der Rayleigh-Streuung. Dabei wird das Prinzip des Swept-Wavelength Interferometers (SWI) genutzt, um Polarisierungseffekte entlang des Ausbreitungsweges des Signals zu erfassen. Neben der Analyse der Eigenschaften des OBR-Signals auf Basis der OTDR im Ortsbereich kann eine Betrachtung im Frequenzbereich durch Anwendung der Fourier-Transformation erfolgen. Dies ermöglicht die Detektion von auftretenden Frequenzshifts zu einer Referenzmessung, welche schließlich eine Veränderung der Glasfaser in Form von Dehnung bzw. Temperaturänderung repräsentieren.

4.3.1 Polarisierungseffekte in optischen Fasern

Nach [Naumann et al. 2014, S. 467 ff.] kann der Polarisationszustand des Lichts, wie in Abb. 4.5 dargestellt, durch das räumliche Verhalten der Vektoren des elektrischen und magnetischen Feldes beschrieben werden. Diese definieren die sogenannte Polarisierungsebene, die orthogonal zur Ausbreitungsrichtung des optischen Signals steht und zu einem Zeitpunkt t in Abhängigkeit der optischen Frequenz f durch die Vektoren der Feldstärken $\vec{E}_x(f, t)$ und $\vec{E}_y(f, t)$ dargestellt werden kann.

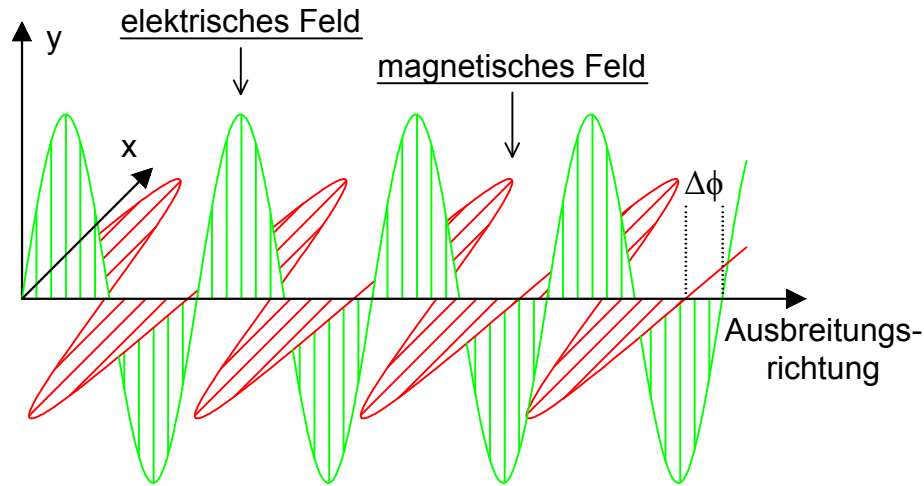


Abb. 4.5: Polarisationszustand des Lichts mit gleicher Amplitude (nach [Hering et al. 2012, S. 579])

In einem kartesischen Koordinatensystem, in dem sich das Licht in z-Richtung ausbreitet, kann eine Angabe der Vektoren durch die komplexe Repräsentation der x- und y-Komponente des elektrischen Feldes erfolgen. (Formeln entnommen aus: [Naumann et al. 2014, S. 469])

$$\bar{E}_x(f, t) = \rho_x e^{i(ft + \Phi_x)} \quad (4.11)$$

$$\bar{E}_y(f, t) = \rho_y e^{i(ft + \Phi_y)} \quad (4.12)$$

Der Polarisationszustand eines optischen Signals mit der Frequenz f kann somit zu einem Zeitpunkt t durch die Amplituden ρ_x und ρ_y sowie die Phasendifferenz $\Delta\Phi = \Phi_y - \Phi_x$ definiert werden.

In der Glasfasersensorik werden hauptsächlich Single-Mode Fasern eingesetzt, um ungleiche Laufzeiten des Signals zu verhindern. In diesen kann sich nur eine transversale Mode ausbreiten, die zwei Polarisationsmoden des Lichts bewirkt. Existiert eine perfekte kreisförmige Symmetrie des Faserkerns, degenerieren sich diese Polarisationsmoden orthogonal und die Intensität des Signals, betrachtet im Querschnitt der Faser, lässt sich in Form eines Gauß-Profiles charakterisieren. Jedoch bestehen solche idealisierten Bedingungen in der Praxis nicht, woraus sich eine leicht elliptische Form des Querschnitts der Glasfaser ergibt. Dadurch entsteht eine Unregelmäßigkeit des Brechungsindex innerhalb des Kerns, welche unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Polarisationsmoden bewirkt. Diese Effekte werden als sogenannte Doppelbrechungen (Birefringences) des Lichts bezeichnet, welche zu einer Veränderung der Polarisationszustände führen.

Dabei entstehen Birefringences nicht nur durch die natürliche Beschaffenheit des Glasfaserkerns, sondern auch durch externe Einflüsse auf das Sensorkabel, wie z.B. Konnektoren oder Spleiße. Das Auftreten von Dehnungen bzw. lokalen Temperaturunterschieden führt grundsätzlich zu einer Asymmetrie des Kerns, da dieser durch die Einflüsse einerseits gedehnt und andererseits komprimiert wird. Auf Grund des konstanten Verhaltens der natürlichen Birefringences können somit Unterschiede der Polarisationszustände im Verhältnis zu einer Referenzmessung bestimmt und Informationen bezüglich Dehnungen und lokalen Temperaturänderungen abgeleitet werden.

Des Weiteren beeinflussen Doppelbrechungen infolge von Verdrehungen bzw. Vibrationen des Sensorkabels die Polarisation des Lichts. Diese Effekte führen zu zirkulierenden Polarisationszuständen, wodurch eine Manipulation des Nutzsignals erfolgt. Eine Separation der gewünschten Birefringences ausgelöst durch Dehnung bzw. Änderungen der Temperatur ist dadurch kaum möglich, siehe Abschnitt 5.8.

4.3.2 Swept-Wavelength Interferometer

Im Gegensatz zur klassischen Methode der OTDR repräsentiert das Messprinzip des Swept-Wavelength Interferometers eine verteilte Messung der Rayleigh-Rückstreuung auf Basis der Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) und beruht auf der Detektion von Interferenzerscheinungen einer kohärenten Lichtquelle. Nach [Luna Innovations Inc. 2006] kann als wesentlicher Vorteil dieses Messverfahrens die Steigerung der Ortsauflösung bis zu $20 \mu\text{m}$ gesehen werden. Des Weiteren ist, verglichen mit anderen Systemen basierend auf der OFDR-Technologie, nicht nur eine Messung von Rückreflexionen sondern auch eine Erfassung von Dämpfungen möglich.

Das Prinzip des OBRs beruht dabei nach [Kreger et al. 2009] auf der Messung des komplexen Responses der orthogonalen Polarisationszustände bestehend aus Amplituden- und Phaseninformation, siehe Abschnitt 4.3.1. Dadurch kann neben der Analyse im Spektralbereich auch eine Betrachtung des Signals im Ortsbereich durch Anwendung einer inversen Fouriertransformation durchgeführt werden. Das klassische OTDR-Signal entspricht dabei der Amplitude des gemessenen Signals im Ortsbereich.

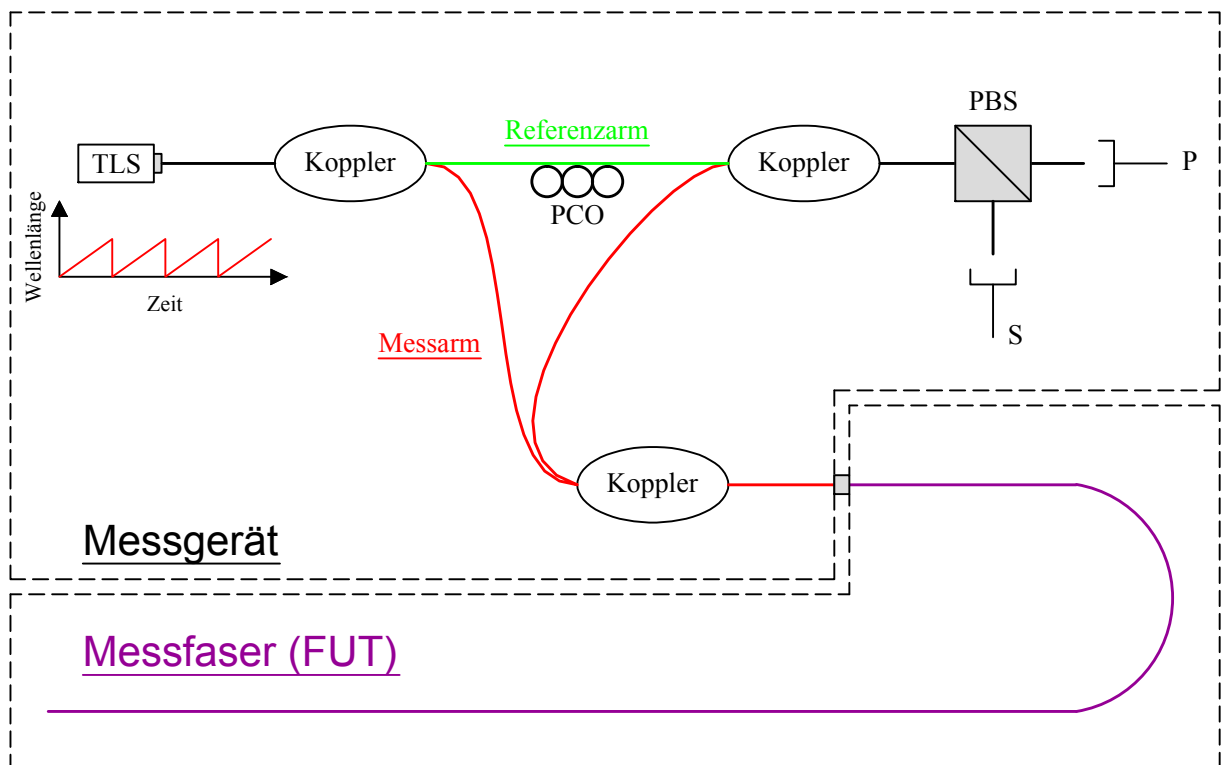


Abb. 4.6: Schematische Darstellung des Messprinzips der Swept-Wavelength Interferometry (nach [Soller et al. 2005] und [Froggatt et al. 2006])

Das Messprinzip des Swept-Wavelength Interferometers ist in Abb. 4.5 dargestellt. Dabei wird anstatt eines OTDR-Pulsgenerators eine Tunable Laser Source (TLS) eingesetzt, welche die Wellenlänge und damit die Frequenz eines emittierten Signals innerhalb eines vorgegeben Bereichs kontrolliert steuern kann. Als Kennzeichen der TLS können die zentrierte Wellenlänge λ_0 und der abgetastete Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ gesehen werden. In gleicher Weise ist eine Definition in Form des Frequenzbandes durch das Zentrum f_0 und die Bandbreite Δf möglich.

Das Licht wird linear im vorgesehenen Wellenlängenbereich emittiert und danach durch einen Koppler in einen Referenz- und einen Messarm aufgeteilt. Der Referenzarm verläuft dabei innerhalb des Messinstruments, wobei eine gleichmäßige Polarisierung des Lichts durch Anwendung eines Polarization Controllers (PCO) gewährleistet wird. Das Signal des Messarms breitet sich entlang der Fiber Under Test (FUT) aus. Die maximal messbare Länge der Messfaser ist dabei abhängig von der Breite des Wellenlängenbereichs $\Delta\lambda$. Die reflektierten Anteile der FUT werden durch einen weiteren Koppler mit dem Signal des Referenzarms innerhalb des Instruments wiedervereinigt. Schließlich wird ein Polarization Beam Splitter (PBS) verwendet, um das Licht bezüglich der beiden orthogonalen Polarisationszustände aufzuteilen. Die Interferenzerscheinungen zwischen Referenz- und Messsignal werden danach von den Detektoren S und P bezüglich ihrer Polarisierung in Abhängigkeit der Frequenz erfasst.

Die aktuelle Frequenz des emittierten Signals der Tunable Laser Source zum Zeitpunkt t kann durch den Zusammenhang $f(t) = f_0 + \Delta f t + \sigma(t)$ beschrieben werden, wobei $\sigma(t)$ den Steuerungsfehler der TLS charakterisiert. [Soller et al. 2005] Betrachtet man die rückgestreuten Anteile des Messsignals, weisen diese einen Zeitunterschied δt (Time of Delay) zum erfassten Signal des Referenzarms auf. Daher können die Interferenzerscheinungen an den Detektoren S und P in Abhängigkeit von δt angegeben werden.

Die Amplitude und die Phase eines komplexen Responses eines Ereignisses entlang des Ausbreitungsweges werden dabei durch ρ bzw. Φ repräsentiert. \bar{E}_{Mess} und \bar{E}_{Ref} stellen die erfassten Vektoren der elektrischen Feldstärken von Mess- sowie Referenzarm dar, auf welche die Projektionsoperatoren der orthogonalen Polarisationszustände \hat{T}_S und \hat{T}_P angewandt werden. Des Weiteren beschreiben $g_S(\delta t)$ und $g_P(\delta t)$ die frequenzabhängige Signalerfassung der beiden Detektoren. (Formeln entnommen aus: [Soller et al. 2005])

$$\bar{E}_S(t) = 2\rho g_S(\delta t) \left[\left(\hat{T}_S \bar{E}_{Mess} \right) \cdot \left(\hat{T}_S \bar{E}_{Ref} \right) \right] \cos(f_0 \delta t + \Delta f \delta t t + \sigma(t - \delta t) \delta t + \Phi) \quad (4.13)$$

$$\bar{E}_P(t) = 2\rho g_P(\delta t) \left[\left(\hat{T}_P \bar{E}_{Mess} \right) \cdot \left(\hat{T}_P \bar{E}_{Ref} \right) \right] \cos(f_0 \delta t + \Delta f \delta t t + \sigma(t - \delta t) \delta t + \Phi) \quad (4.14)$$

Unter Betrachtung der Formeln 4.13 und 4.14 ist ersichtlich, dass die Interferenzerscheinungen in Abhängigkeit des Zeitpunkts t erfasst werden. Dieser kennzeichnet jedoch nicht den Zeitpunkt der Erfassung sondern die aktuelle Frequenz des emittierten Signals ($f = f(t)$). Daraus resultiert, dass die Erfassung der reflektierten Anteile im Spektralbereich durchgeführt wird, wobei der Übergang in den Ortsbereich durch die Anwendung einer inversen Fourier-Transformation (Fouriersynthese) gewährleistet werden kann.

Zur besseren Verständlichkeit wurde eine OBR-Messung mit dem LUNA OBR 4600 durchgeführt und die Normen der Vektoren der Polarisationszustände des Signals, die als Amplituden bezeichnet werden, in Abb. 4.7 dargestellt. Diese wurden mittels der Fouriersynthese in

den Ortsbereich übergeführt und sind somit in Abhängigkeit des Time of Delays δt bzw. der Position z ($z = \delta t c$) gegeben.

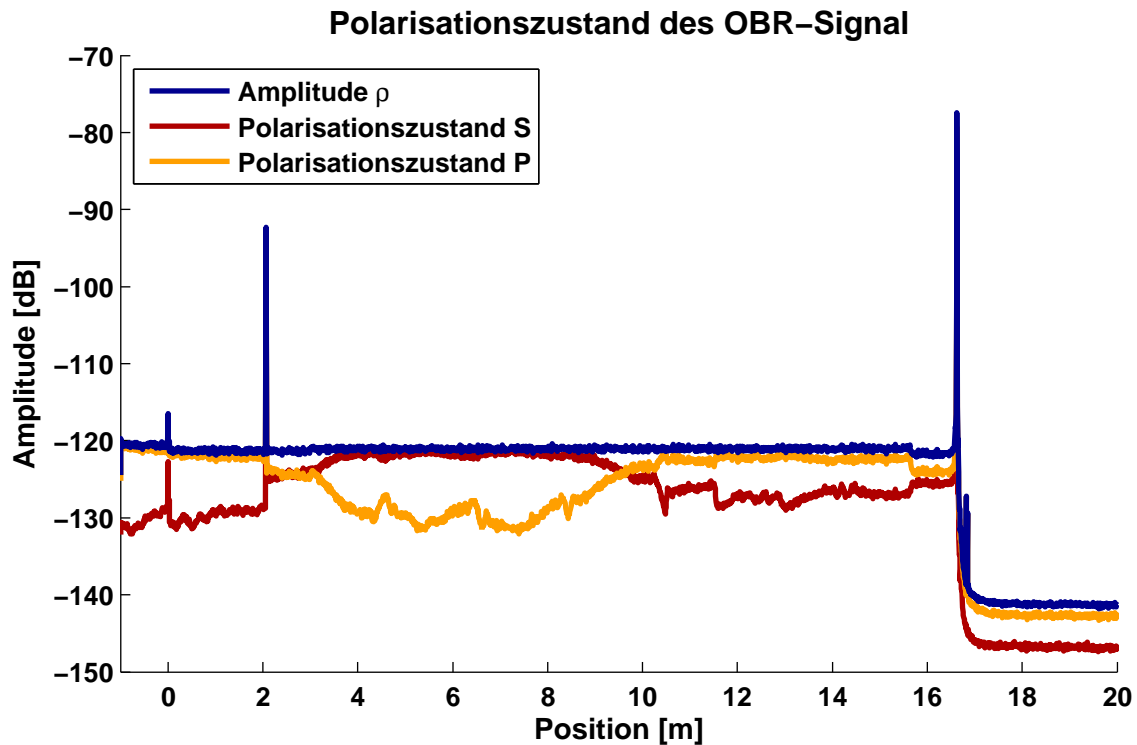


Abb. 4.7: Polarisationszustand des OBR-Signals im Ortsbereich

Die totale Reflektivität des gemessenen Signals an der Position z folgt aus der Norm der quadratischen Vektorsumme der beiden Polarisationszustände und entspricht der Amplitude $\rho(z)$. (Formel entnommen aus: [Soller et al. 2005])

$$\rho(z) = \sqrt{|\overline{E}_S(z)|^2 + |\overline{E}_P(z)|^2} \quad (4.15)$$

Diese entspricht der blauen Darstellung in Abb. 4.7 und kann als klassisches Signal der OTDR im Ortsbereich gesehen werden.

4.3.3 Prinzip des verteilten Messsystems

Die Grundlage für das verteilte faseroptische Messprinzip des LUNA OBR 4600 bilden, wie in [Soller et al. 2005] beschrieben, die Polarisationszustände des OBR-Signals. Dabei wird das Auftreten von Doppelbrechungen auf Grund externer Einflüsse genutzt (siehe Abschnitt 4.3.1), welche zu einer Veränderung der Polarisation des Lichts führen. Im Verhältnis zu einer Referenzmessung, die zuvor unter bekannten Bedingungen durchgeführt wurde, ergeben sich somit Differenzen in den Polarisationszuständen, aus denen Informationen in Form von Dehnungen bzw. lokalen Temperaturänderungen abgeleitet werden können.

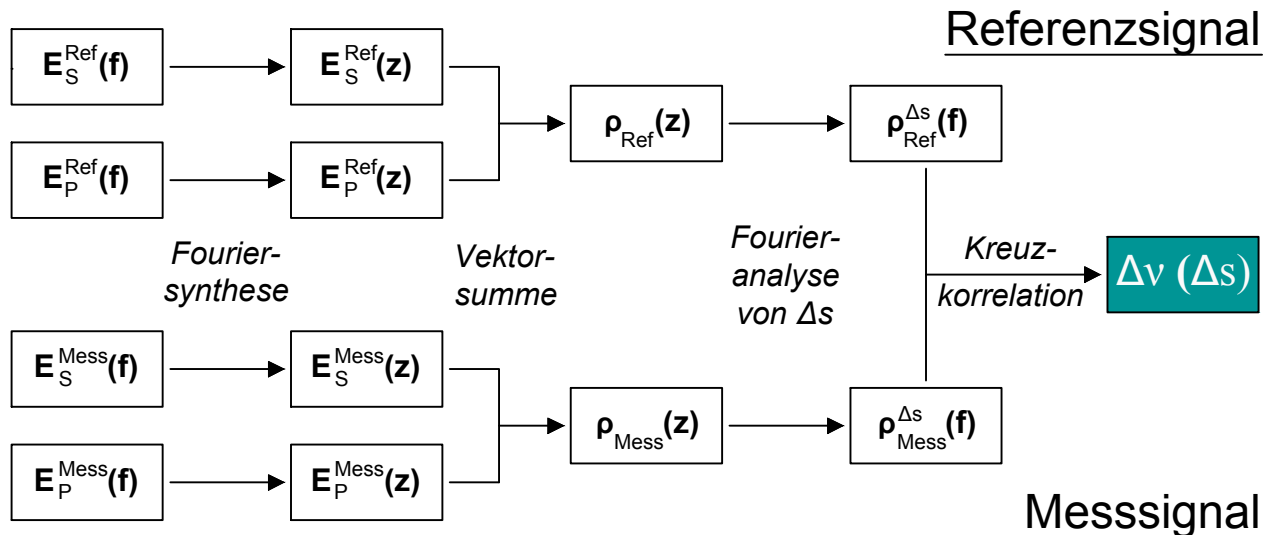
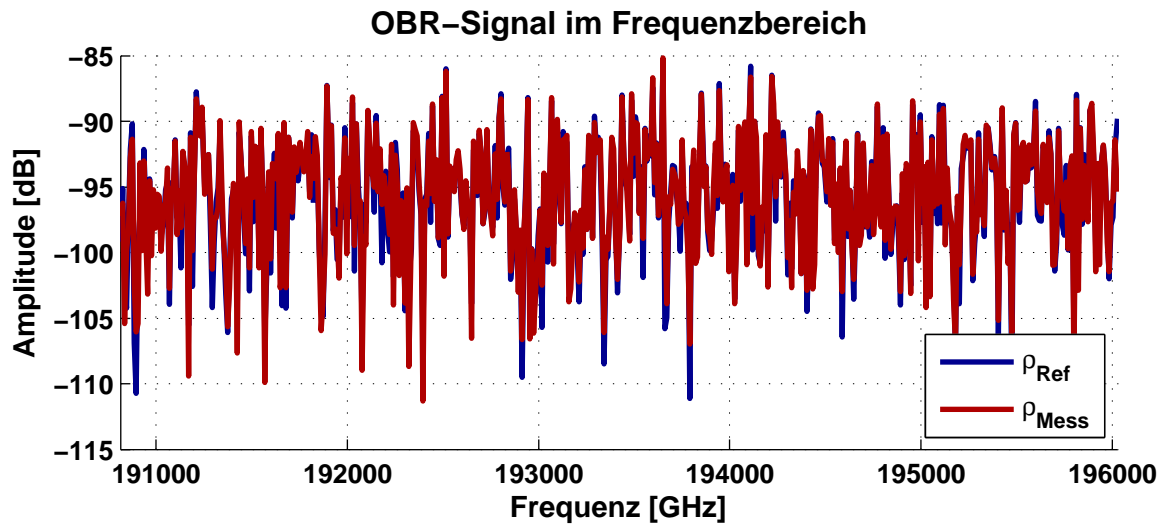


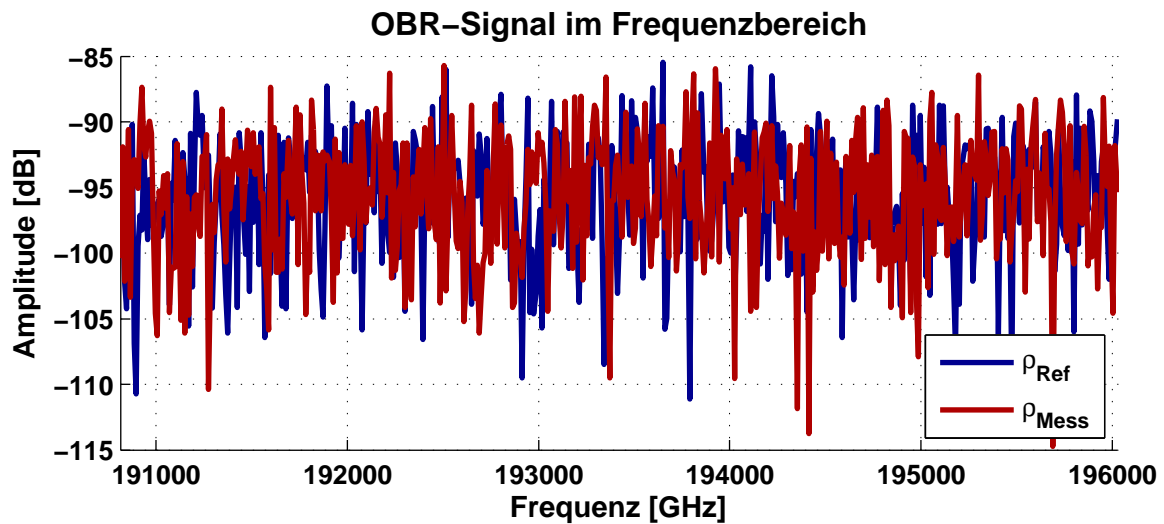
Abb. 4.8: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufs einer OBR-Messung

In Abb. 4.8 ist der schematische Ablauf der Auswertung einer Messung des LUNA OBR 4600 dargestellt. Wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert, kann der gemessene Response $\bar{E}_{S/P}(f)$ der beiden Detektoren im Frequenzbereich durch die Anwendung einer Fouriersynthese in den Ortsbereich übergeführt werden. Die totale Reflektivität des Signals, in Form der Amplitude $\rho(z)$, wird aus der quadratischen Vektorsumme der transformierten Anteile beider Detektoren bestimmt, wobei diese als klassische Repräsentation der Optical Time Domain Reflectometry gesehen werden kann.

Zur Realisierung des verteilten Messprinzips wird die Amplitude im Ortsbereich in äquidistante Abschnitte Δs eingeteilt, welche später die Integrationsbreite des verteilten Messsystems repräsentieren. Dadurch entsteht eine endliche Anzahl von Intervallen der Fiber Under Test, welchen sowohl eine Signatur des Mess- als auch des Referenzsignals zugeordnet werden kann. Die zugehörigen Polarisationszustände dieser Signaturen können unter Anwendung einer Fourier-Transformation (Fourieranalyse) für jeden einzelnen Abschnitt in den Spektralbereich transformiert werden. Analog zur Betrachtung im Ortsbereich ergibt sich aus deren quadratischer Vektorsumme das polarisationsunabhängige Spektrum $\rho(f)$ der OBR-Messung, welches für ein Intervall Δs in Abb. 4.9 zu sehen ist.



(a) Sensorkabel auf konstantem Strain-Level



(b) Sensorkabel auf unterschiedlichen Strain-Leveln

Abb. 4.9: OBR-Signal im Frequenzbereich

Abb. 4.9a zeigt die Spektren von Mess- und Referenzsignal einer Wiederholungsmessung für ein Intervall mit einer Länge Δs von einem Zentimeter. Auf Grund des konstanten Strain-Levels zwischen den Messepochen ist ein ähnliches Verhalten im Frequenzbereich zu beobachten. Im Gegensatz dazu zeigen sich Verschiebungen in den Spektren der beiden Signale in Abb. 4.9b, welche infolge der Dehnungen des Sensorkabels im Verhältnis zur Referenzmessung entstanden sind. Diese können durch die Anwendung einer Kreuzkorrelation zwischen den beiden Spektren bestimmt werden, siehe Abb. 4.10.

Im Falle der Wiederholungsmessung ist dabei eine relative Frequenzverschiebung nahe 0 GHz zu sehen, die im Bereich der Messpräzision des Instruments liegt. Die Kreuzkorrelation zwischen Referenzsignal und Signal des gedehnten Sensorkabels weist hingegen einen relativen Frequenzshift $\Delta\nu$ auf. Folglich entspricht dieser den Veränderungen des Sensorkabels in diesem Intervall im Verhältnis zur Referenzmessung. Berechnet man nun für jeden Abschnitt der Fiber Under Test eine separate Kreuzkorrelation, ergibt sich eine verteilte Bestimmung von Frequenzverschiebungen über die gesamte Glasfaser.

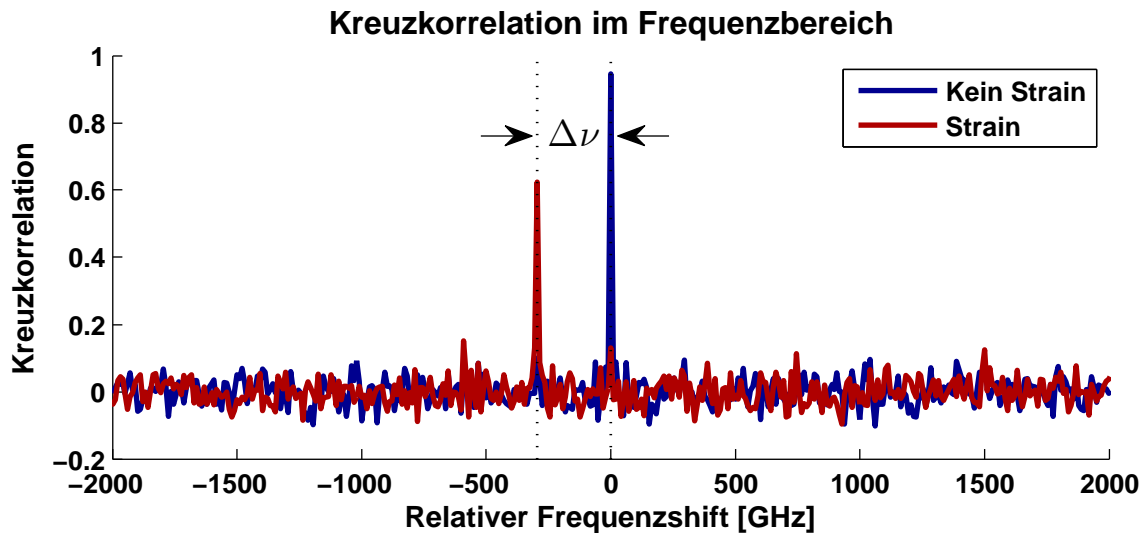


Abb. 4.10: Kreuzkorrelation der OBR-Signale im Frequenzbereich

Diese Vorgehensweise kann mit der kontinuierlichen Bewegung eines Fiber Bragg Gratings mit der Länge Δs über die Glasfaser verglichen werden. Im Rahmen der FBG-Technologie wird die Änderung der Gitterstruktur infolge eines auftretenden Strains genutzt, wodurch eine Abweichung der Wellenlänge $\Delta\lambda$ des reflektierten Signals im Bezug zur Wellenlänge λ des Ausgangszustandes auftritt, siehe Abschnitt 2.2.2. Analog dazu ergibt sich durch die Anwendung der Kreuzkorrelation zwischen Mess- und Referenzsignal ein relativer Frequenzshift $\Delta\nu$ im Verhältnis zur zentrierten Frequenz f_0 des emittierten Spektrums.

Der Übergang vom relativen Frequenzshift auf die gesuchte Dehnung ϵ bzw. Temperaturänderung ΔT kann vereinfacht durch eine Linearkombination angegeben werden. (Formel entnommen aus: [Soller et al. 2005])

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\nu}{f_0} = K_T\Delta T + K_\epsilon\epsilon \quad (4.16)$$

Der Temperatur-Koeffizient K_T und der Strain-Koeffizient K_ϵ sind dabei von der Beschaffenheit des Glasfaserkerns (Gruppenbrechungsindex, thermischer Ausdehnungskoeffizient, etc.) abhängig, wodurch sich je nach Fasertyp unterschiedliche Werte zur Umrechnung ergeben. Im Zuge der Laboruntersuchungen des LUNA OBR 4600 wurde die Kalibrierung von diversen Single-Mode Fasern durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und die daraus resultierenden Koeffizienten sind Abschnitt 5.7 zu entnehmen.

4.3.4 Analyse der OTDR-Funktionalität

Auf Grund der Tatsache, dass das OTDR-Signal die Grundlage für das verteilte faseroptische Messsystem des LUNA OBR 4600 bietet, ist eine Analyse dieser Basisfunktionalität des Instruments notwendig.

Dazu werden die typischen Kennzeichen einer OTDR, welche in Abschnitt 4.2 beschrieben sind, auf Basis durchgeführter Messungen betrachtet, um Eigenschaften des Systems ableiten zu können. Die gewonnen Erkenntnisse sollen danach im Rahmen der Laboruntersuchungen des verteilten faseroptischen Messsystem (siehe Kapitel 5) zur richtigen Interpretation der gemessenen Frequenzshifts genutzt werden.

Amplitude

In Abb. 4.11 ist das rückgestreute Signal einer OBR-Messung mit einer Ortsauflösung von 6 mm zu sehen. Der betrachtete Sensor setzt sich ausgehend vom Messinstrument aus einem Patchcord, einem Sensorkabel und einem Pigtail zusammen, welche durch faseroptische Komponenten miteinander verbunden sind. Der Dämpfungskoeffizient α , der durch das Gefälle des OTDR-Signals charakterisiert wird, ist auf Grund der geringen Länge des Gesamtsensors visuell nicht zu erkennen.

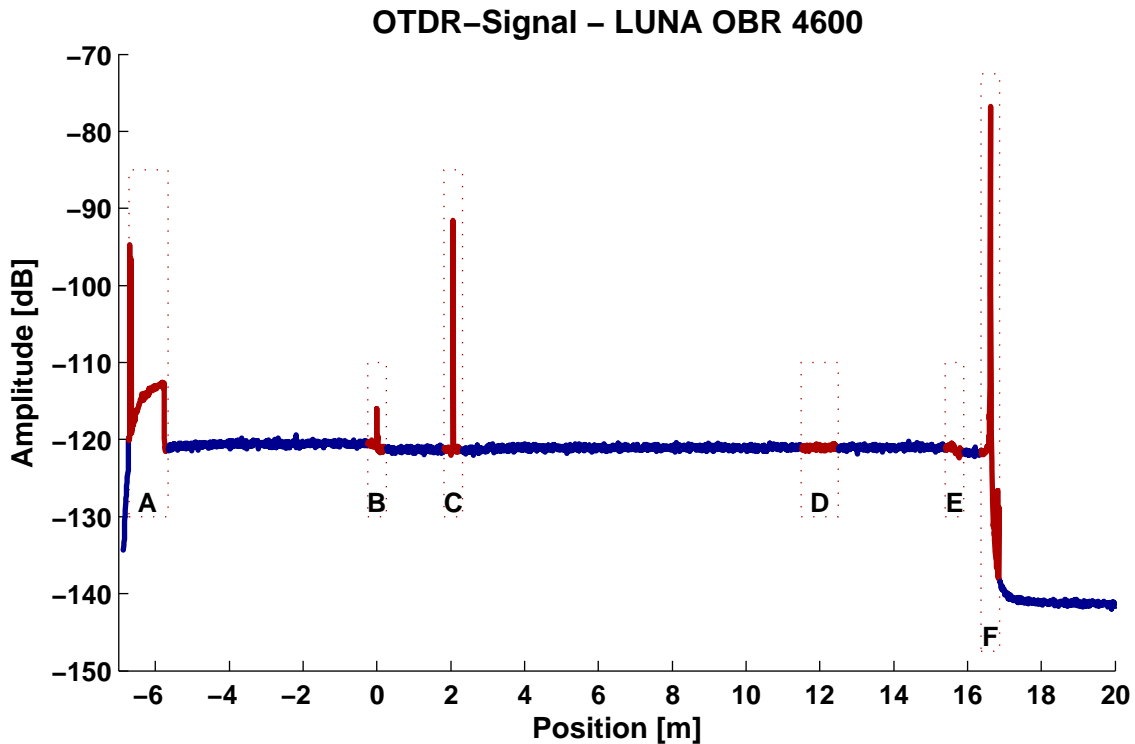


Abb. 4.11: Rückgestreutes Signal einer OBR-Messung

Die typischen Merkmale und auftretenden Verluste des gemessenen OTDR-Signals sind farblich gekennzeichnet und werden nachfolgend erläutert:

- (A) Im Anfangsbereich des OTDR-Signals zeigt sich die Totzone des Messinstruments, die durch die Einkopplung des Lichts in die Faser entsteht.
- (B) Aus dem Übergang des Lichts vom Messgerät auf das Patchcord entsteht ein Peak auf Grund der Rückreflexion des optischen Signals, wobei im Gegensatz zur Verbindung zweier Konnektoren im Bereich C eine geringere Höhe des Reflexionspeaks zu beobachten ist. Dieses Verhalten erklärt sich vermutlich anhand der Tatsache, dass leichte Unreinheiten der Ferrulen im Bereich C vorliegen, welche zu einer Störung des Nutzsignals führen.
- (C) Der Verknüpfung von Patchcord und Sensorkabel erfolgte durch eine Steckverbindung, weshalb sich sowohl eine Rückreflexion von etwa -30 dB als auch eine Dämpfung des Signals von 0.1 dB zeigen. Im Vergleich zu üblichen Werten der Literatur (siehe Abschnitt 2.1.4) erweisen sich diese als sehr gering.
- (D) In diesem Bereich wurde das Sensorkabel auf einer Länge von 1 m auf einem konstanten Strain-Level gehalten, um Untersuchungen der Amplitude unter gleichmäßigen Verhältnissen gewährleisten zu können.

- (E) Der Einsatz eines Fusionsspleißes gewährleistete den Übergang des optischen Signals vom Sensorkabel auf das anschließende Pigtail. Die entstehende Dämpfung von 0.7 dB durch den Spleiß ist dabei wesentlich höher als typische Angaben der Literatur (0.0-0.15 dB [Hayes 2011, S. 99]).
- (F) Die Fresnel-Reflexion am Ende der OTDR entsteht durch den Austritt des Lichts aus der Glasfaser. Dadurch ist eine Bestimmung der Gesamtseniorlänge von etwa 16.6 m möglich.

Wie schon erwähnt, wurde das Sensorkabel im Bereich D auf einem konstanten Strain-Level gehalten, um stabile Bedingungen für die Untersuchung der Präzision der Amplitude zu realisieren. Dazu wurden 100 OBR-Messungen durchgeführt und die Veränderungen der Amplitude über die Zeit beobachtet, um das Grundrauschen des Instruments analysieren zu können. Die Mittelwerte sowie die zugehörigen Standardabweichungen der OTDR dieser Messreihe sind mit einer Ortsauflösung von 0.5 mm in Abb. 4.12 dargestellt.

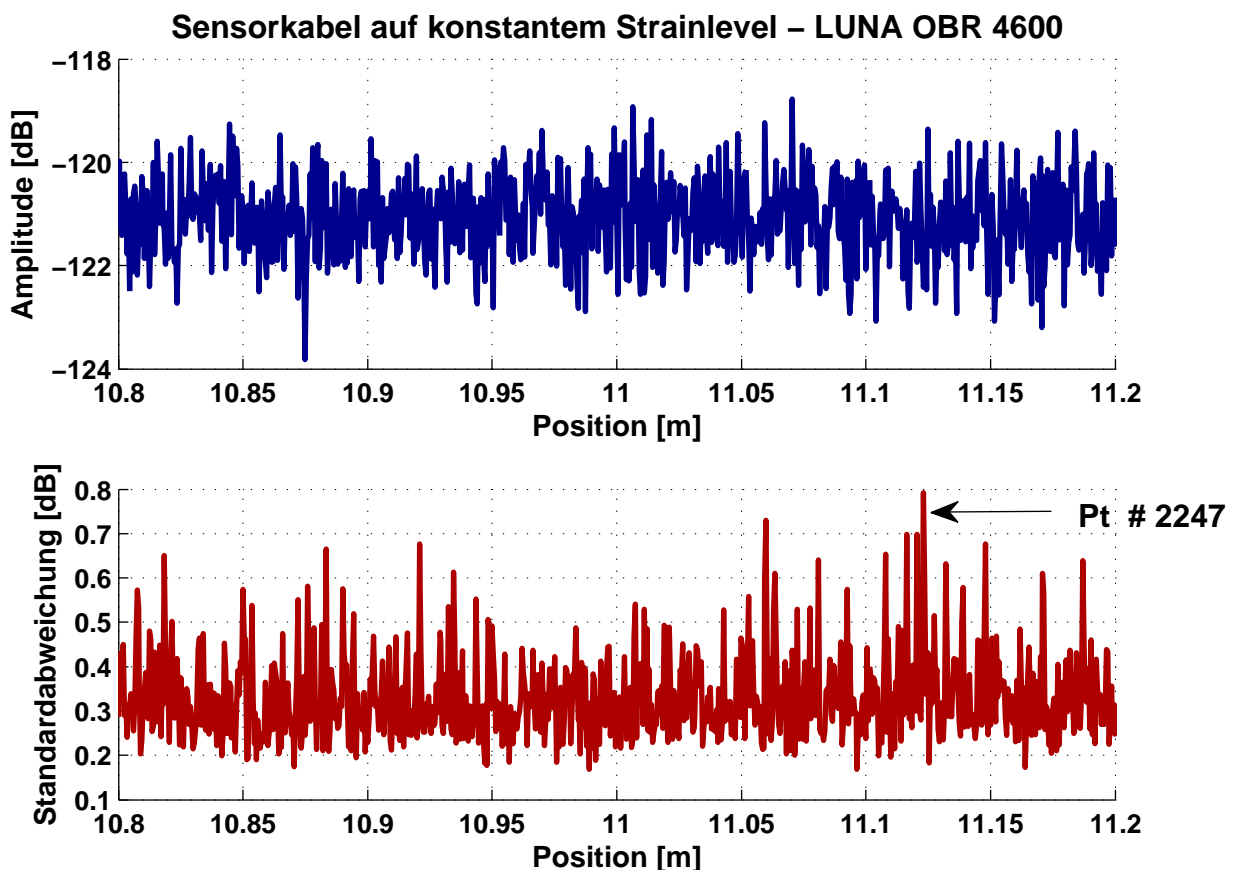


Abb. 4.12: Mittelwert und Standardabweichung von 100 OBR-Messung - Sensorkabel auf konstantem Strain-Level

Es ist ersichtlich, dass die Mittelwerte der Amplituden keine Regelmäßigkeit im betrachteten Bereich aufweisen, wobei die Spannweite mit ungefähr 5 dB angegeben werden kann. Die gemittelte Standardabweichung der einzelnen Messstellen liegt bei 0.33 dB. Der Hersteller gibt für die Erfassung der Verluste eine wiederholbare Genauigkeit des Instruments von 0.1 dB [Luna Innovations Inc. 2014a] an. Jedoch erfolgt diese Angabe in Bezug auf eine Integrationsbreite von 0.5 m, in welcher die mittlere Dämpfung des Signals bestimmt wird. Daher wurden die

mittleren, maximalen sowie minimalen Standardabweichungen der Messreihe in Abhängigkeit unterschiedlicher Ortsauflösungen Δz berechnet, die in Tab. 4.1 angeführt sind.

Tab. 4.1: Mittlere, maximale und minimale Standardabweichungen der Amplitude in Abhängigkeit der Ortsauflösung - Sensorkabel auf konstantem Strain-Level

Δz [μm]	$\bar{\sigma}_{\rho(z)}$ [dB]	$\min(\sigma_{\rho(z)})$ [dB]	$\max(\sigma_{\rho(z)})$ [dB]
19	4.41	2.57	7.48
100	1.32	0.59	4.23
500	0.33	0.17	0.79
1000	0.19	0.11	0.37
5000	0.05	0.03	0.07

Es zeigt sich, dass die Präzision der Amplitude von der Ortsauflösung des Messinstruments abhängig ist. Die Herstellerangabe kann dabei bereits bei einer Integrationsbreite von 5 mm ($\cong 5000 \mu\text{m}$) erreicht werden. Allerdings ist zu beachten, dass dieser Versuch unter optimalen Bedingungen durchgeführt wurde. Im betrachteten Bereich herrschten keine Beeinflussungen der Faser durch faseroptische Verbindungskomponenten wie z.B. Konnektoren oder Spleiße vor, welche zu künstlichen Unregelmäßigkeiten der Polarisationszustände innerhalb des Glasfaserkerns führen. Die Basisanwendung der OTDR hat jedoch genau die Erfassung dieser Charakteristiken des optischen Netzwerks und die dadurch entstehenden Dämpfungen zum Ziel, wobei die detaillierte punktuelle Auflösung eine untergeordnete Rolle spielt und größere Integrationsbreiten toleriert werden.

Das Prinzip des verteilten Messsystems des LUNA OBR 4600 beruht auf der Transformation eines Intervalls der OTDR-Amplitude in den Frequenzbereich und der Bestimmung der Frequenzverschiebung im Verhältnis zu einer Referenzmessung. Folglich muss eine regelmäßige Verteilung der Messdaten einer Einzelposition vorliegen, wenn sich das Sensorkabel auf einem konstanten Strain-Level befindet. Abb. 4.13 veranschaulicht die Verteilung der Residuen des Datenpunktes #2247, welcher die maximale Standardabweichung der durchgeführten Messreihe (siehe Abb.4.12) aufweist.

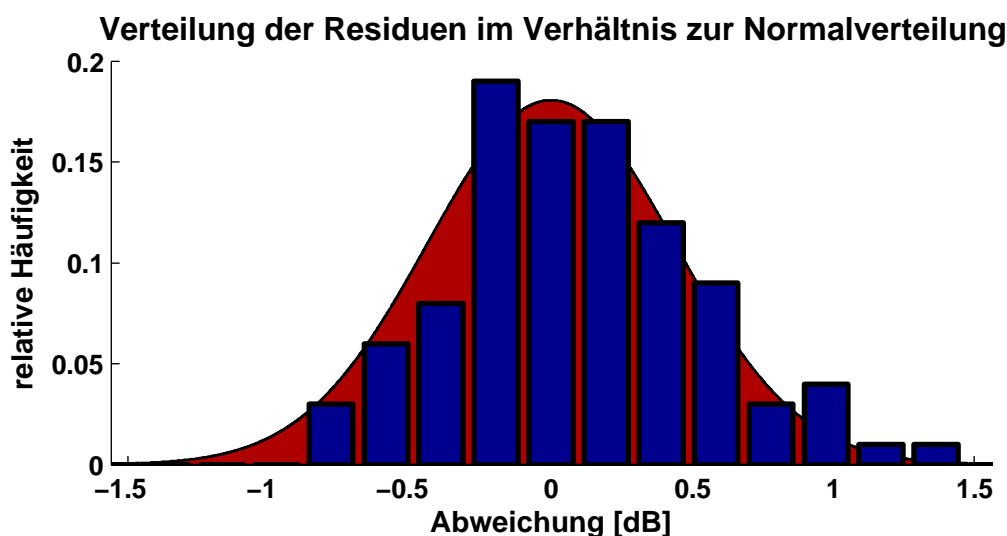


Abb. 4.13: Verteilung der Residuen des Datenpunktes # 2247 im Verhältnis zur Normalverteilung

Dabei ist zu erkennen, dass die Verteilung der Residuen des Datenpunktes einer leicht links-schiefen Normalverteilung entspricht, wobei die Restabweichungen vermutlich auf Grund der relativ kleinen Stichprobe von 100 Messungen auftreten.

Totzone

Die Totzone beschreibt den Anfangsbereich des OTDR-Signals, in welchem eine starke Rückreflexion (Fresnel-Reflexion) auf Grund der Einkoppelung des Lichts in die Faser auftritt. Dadurch entsteht eine Übersättigung des Detektors, die keine zuverlässige Bestimmung der rückgestreuten Anteile dieser Zone ermöglicht.

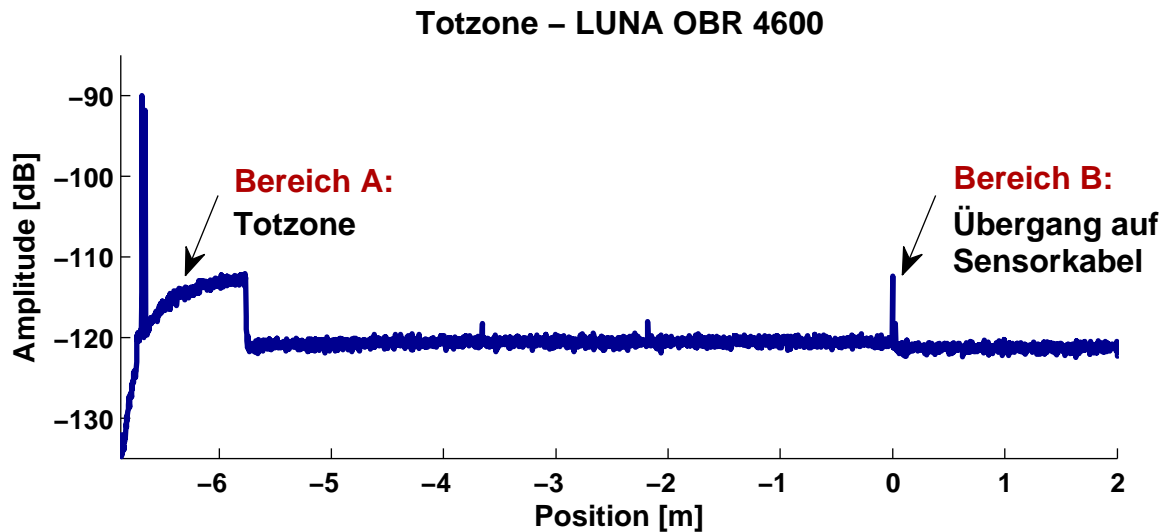


Abb. 4.14: Analyse der Totzone

Abb. 4.14 zeigt den Anfang des gemessenen OTDR-Signals (Bereich A und B) aus Abb. 4.11. Dabei ist ersichtlich, dass der Ausbreitungsweg des Lichts bereits lange genug innerhalb des Messinstruments geführt wird, wodurch die Fresnel-Reflexion intern auftritt. Der Übergang vom Messgerät auf das faseroptische Sensorkabel zeigt sich im OBR-Signal nur als eine klassische Verbindung zweier Konnektoren. Daher kann, im Gegensatz zu klassischen Messgeräten basierend auf der OTDR-Technologie, behauptet werden, dass der LUNA OBR 4600 ohne Totzone operiert, weshalb eine Bestimmung von Dehnungen bzw. Temperaturänderungen schon unmittelbar nach dem Übergang auf das Sensorkabel durchführbar ist.

Ortsauflösung

Der minimale Abstand zwischen zwei Streubereichen, welche von einem Messinstrument separiert und detektiert werden können, wird als Ortsauflösung Δz bezeichnet. Das Auflösungsvermögen des LUNA OBR 4600 kann über die spektralen Eigenschaften des emittierten Signals angegeben werden, welche den Kenngrößen der Tunable Laser Source entsprechen. (Formel entnommen aus: [Soller et al. 2005])

$$\Delta z = \frac{\lambda_s \lambda_e}{2n\Delta\lambda} \quad (4.17)$$

Dabei stellen λ_s und λ_e die Start- und Endwellenlänge des abgetasteten Wellenlängenbereichs $\Delta\lambda$ dar. n entspricht dem Gruppenbrechungsindex der gesamten Faser.

In Abb. 4.15 ist der Bereich C aus Abb. 4.11 in der vollen Ortsauflösung des Instruments dargestellt. Dieser zeigt die Verbindung zweier Konnektoren, wobei der Scan mit dem größtmöglichen Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ von etwa 43 nm und einer zentrierten Wellenlänge λ_0 von 1550 nm durchgeführt wurde. Daraus resultiert ein Abstand zwischen den Punkten des OTDR-Signals von ungefähr 19 μm .

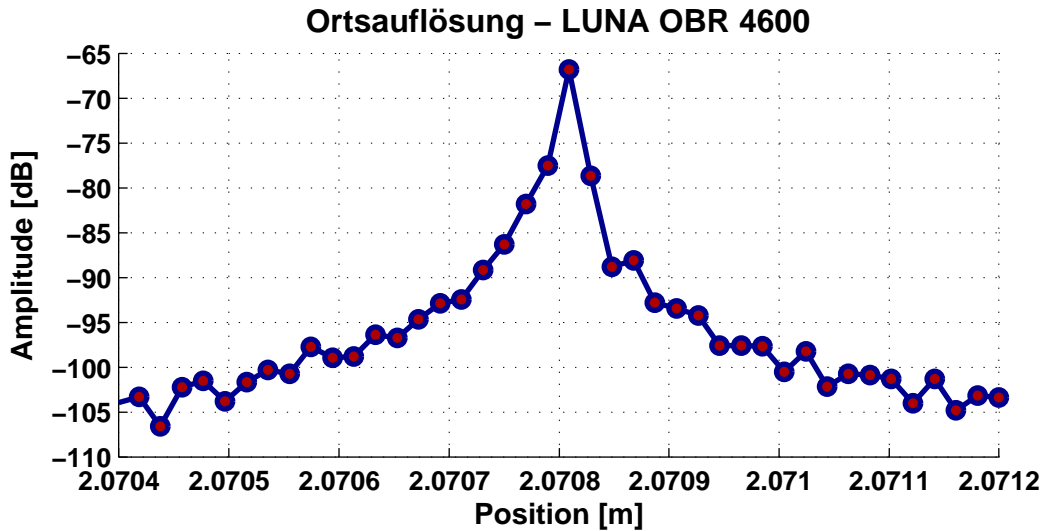


Abb. 4.15: Analyse der Ortsauflösung

Die Umsetzung des verteilten faseroptischen Messsystems des LUNA OBR 4600 erfolgt in Form der Berechnung des spektralen Frequenzshifts eines Intervalls Δs zwischen Mess- und Referenzsignal, siehe Abschnitt 4.3.3. Dabei ergibt sich die Anzahl der Punkte der OTDR, welche im Bereich Δs liegen, einerseits aus der Länge des Segments und andererseits aus der Ortsauflösung des OBR. Je mehr Punkte für die Fourier-Transformation in Frequenzbereich zur Verfügung stehen, desto höher ist die spektrale Auflösung. Daher kann die Auflösung des OTDR-Signals im Ortsbereich und somit auch die Breite des abgetasteten Wellenlängenbereichs $\Delta\lambda$ als Qualitätsparameter des verteilten Systems gesehen werden.

4.3.5 Software

Neben der Hardware in Form des Instruments LUNA OBR 4600 wird eine zuverlässige Software benötigt, um ein funktionales faseroptisches Gesamtmesssystem bereitstellen zu können. Dieser Abschnitt zeigt überblicksmäßig den Aufbau sowie die Funktionsweise der OBR v3.10.1, welche standardmäßig vom Hersteller bereitgestellt wird. Des Weiteren werden aufgetretene Probleme sowie fehlende Softwarekomponenten erläutert. Detaillierte Informationen in Bezug auf die Originalsoftware sind [Luna Innovations Inc. 2014b] zu entnehmen.

Aufbau

Die Benutzeroberfläche der Software OBR v3.10.1, dargestellt in Abb. 4.16, ist in drei wesentliche Bestandteile untergliedert. Dabei können mess- und berechnungsspezifische Parameter in den linken Fenstern System Control und Data Processing definiert und sämtliche anzeigebezogene Einstellungen unter Display Options sowie in den Darstellungsfenstern vorgenommen werden. Die System Status Bar zeigt Systemzustände an, die Kalibrierung, Laser oder Laserleistung betreffen.

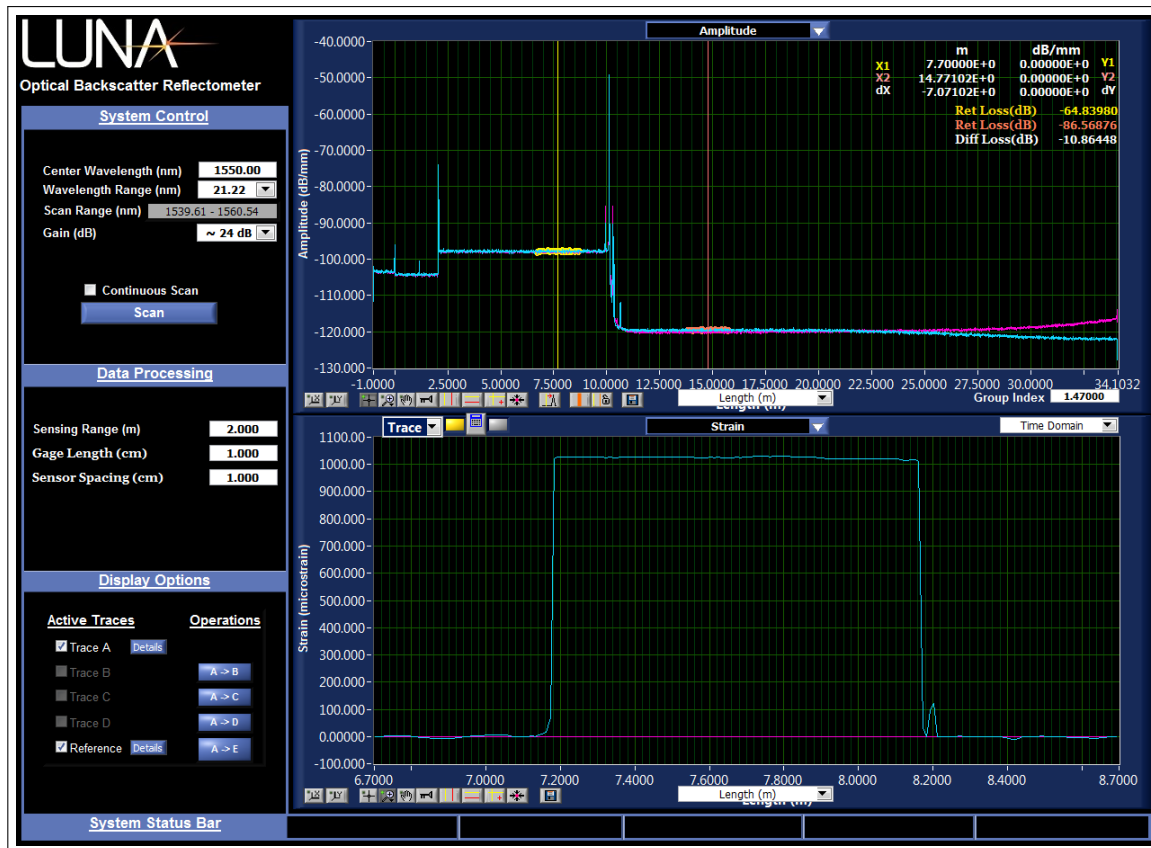


Abb. 4.16: Benutzeroberfläche der Software LUNA OBR v3.10.1

Funktionsweise

Die eigentliche Messung kann unter Angabe der Messparameter λ_0 , $\Delta\lambda$ sowie der Intensität des ausgehenden Signals (Gain [dB]) durchgeführt werden, wobei unterschiedliche Messmodi angewendet werden können. Neben der normalen Reichweite von 30 bzw. 70 m bietet der OBR auch einen sogenannten Extended Range Mode, unter welchem eine Messung von bis zu 2 km erfolgen kann. Der Wellenlängenbereich ist dabei je nach Reichweite beschränkt, um Interferenzerscheinungen zwischen Referenz- und Messsignal detektieren zu können, siehe Abschnitt 4.3.2. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass die Abtastung der Faser nur in einem kleinen Bereich durch einen sogenannten Spot Scan durchgeführt wird, wodurch eine wesentliche Reduktion der Messdauer erfolgt.

Das Ergebnis einer durchgeführten Messung wird im oberen Darstellungsfenster in Form des klassischen OTDR-Signals angezeigt. Zur Berechnung des Frequenzshifts im Verhältnis zu einer vorher getätigten Referenzmessung müssen zunächst die Berechnungsparameter definiert werden. Diese setzen sich aus der Gauge Length ($\hat{=}\Delta s$), dem Sensor Spacing ($\hat{=}\Delta z$), der Gesamtlänge des betrachteten Bereichs (Sensor Length) sowie dessen Position auf dem OTDR-Signal zusammen. Dadurch wird eine Berechnung der Frequenzverschiebung für jedes einzelne Intervall Δs innerhalb der beobachteten Länge ermöglicht, welche im unteren Anzeigefenster dargestellt wird.

Die Sicherung der Messdaten kann entweder als Textdokument oder im software-eigenen OBR-Format erfolgen. Dieses hat den wesentlichen Vorteil, dass die Daten zu einem späteren Zeitpunkt in die Software geladen und eine Postprocessing-Auswertung der Messungen durchgeführt werden kann. Dadurch wird ebenfalls eine Verwendung als zukünftige Referenzmessung ermöglicht.

Aufgetretene Probleme und fehlende Softwarekomponenten

Laut [Luna Innovations Inc. 2014b] sollte der Laser des Instruments im Rahmen des Startvorgangs der Software automatisch aktiviert werden. Jedoch wurde in den Untersuchungen des Gesamtsystems festgestellt, dass häufig Probleme im Bereich des Lasers auftraten. Die angezeigten Fehlermeldungen der Software konnten dabei nicht ausreichend interpretiert werden. Es besteht die Vermutung, dass der Laser eine gewisse Akklimatisierungszeit benötigt, um eine zuverlässige Messung durchführen zu können. Dahingehend wurden keine Meldungen in der System Status Bar, wie z.B. Laser Not Ready [Luna Innovations Inc. 2014b, S.203], wahrgenommen.

Als wesentliches Problem der Software erweist sich, dass die automatische Sicherung einer kontinuierlichen Messung lediglich im Spot Scan Modus durchgeführt werden kann. Im Bereich geotechnischer Anwendungen ist jedoch das Öfteren eine kontinuierliche Überwachung von Strukturen und Objekten erforderlich. Eine Sicherung der gewonnenen Messdaten im software-eigenen OBR-Format ist dabei auf Grund einer eventuellen Postprocessing-Auswertung bzw. der möglichen Verwendung als zukünftige Referenzmessung unerlässlich. Der Hersteller stellt zur Programmierung eigener Routinen ein Software Development Kit (SDK) zur Verfügung. Dieses wurde im Zuge der Untersuchungen des Messinstruments genutzt, um fehlende Softwarekomponenten zu ergänzen und die Messsoftware zu optimieren, siehe Abschnitt 5.1.

Kapitel 5

Softwareentwicklung und Systemuntersuchungen

Ausführliche Laboruntersuchungen und Kalibrierungen der Sensoren bzw. Instrumente sind Grundvoraussetzung für die effektive Nutzung eines faseroptischen Messsystems. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Untersuchungen des LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600 in Bezug auf dessen Sensing-Verhalten, wobei als Sensoren sowohl blanke Glasfasern mit unterschiedlichen Beschichtungen als auch vorgefertigte Sensorkabeln verwendet wurden.

5.1 Softwareoptimierung

Im Rahmen der Untersuchungen der standardmäßigen Herstellersoftware LUNA OBR v3.10.1 zeigten sich Probleme mit fehlenden Softwarekomponenten. Daher wurde eine Optimierung durch die Erstellung eigener Routinen zur Messung bzw. Berechnung durchgeführt, um ein zuverlässiges Gesamtsystem in diversen Anwendungsbereichen bereitstellen zu können.

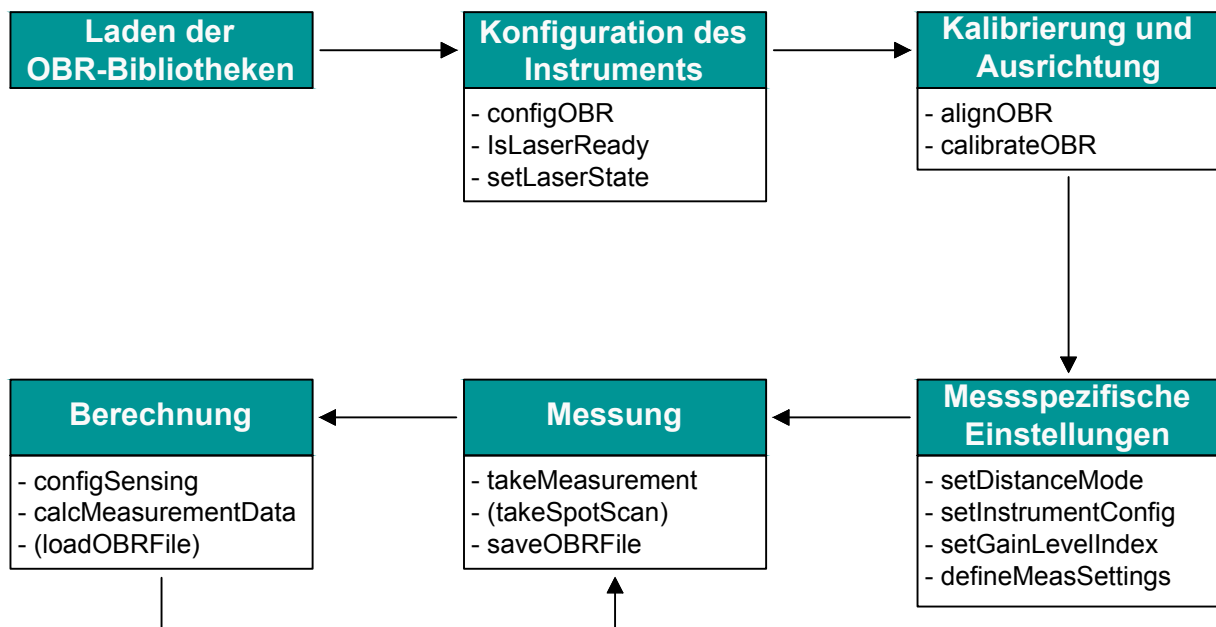


Abb. 5.1: Schematische Darstellung des Ablaufs einer OBR-Messung mittels der implementierten MATLAB-Methoden

Die Implementierung erfolgte als Kommandozeilenprogramm in der Programmierumgebung MATLAB (Matrix Laboratory), welche am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme häufig zur Erstellung von Mess- bzw. Auswerterroutinen genutzt wird. Dadurch kann die Kompatibilität zur Software von anderen faseroptischen Komponenten, wie z.B. einem optischen Schalter, gewährleistet werden. Abb. 5.1 zeigt den schematischen Ablauf einer OBR-Messung durch Einsatz der implementierten MATLAB-Methoden. Zusätzlich wurde ein Programm zur automatisierten Auswertung mehrerer bestehender Messfiles im OBR-Format erstellt.

Als Grundlage diente der Software Development Kit, welcher in Form von Dynamic Link Libraries (DLL) vom Hersteller bereitgestellt wurde. Diese Bibliotheken können durch Anwendung von Standardbefehlen in MATLAB geladen werden. Jedoch ist zu beachten, dass die DLLs lediglich im 32-bit-Format zur Verfügung stehen und die programmierten Routinen somit nur in einer MATLAB-Version ausgeführt werden können, die ebenfalls eine 32-bit-Architektur aufweist. Im Gegensatz dazu liegen die USB(Universal Serial Bus)-Gerätetreiber des Instruments LUNA OBR 4600 nur im 64-bit-Format vor, wodurch die Verwendung eines 64-bit-Betriebssystem gefordert ist, um die Funktionalität sicherzustellen. Die nachfolgend dokumentierten Methoden wurden daher mittels MATLAB R2009b (32-bit) auf Windows 7 (64-bit) erstellt und getestet.

Tab. 5.1: Implementierte MATLAB-Methoden zur Gewährleistung der Grundfunktionalität

Kategorie	MATLAB-Methoden
Initialisierung	configOBR.m initialisiert das Instrument und liefert die Anzahl der maximal verfügbaren Messspuren.
Datenmanagement	copyTrace.m kopiert die Messdaten auf eine andere Spur, um diese als Referenzmessung verwenden oder temporär speichern zu können. loadOBRFile.m ermöglicht das Laden von Messdaten in die DLL, welche zuvor im software-eigenen OBR-Format gespeichert wurden. saveOBRFile.m sichert gemessene Daten im softwareeigenen OBR-Format.
Kalibrierung und Ausrichtung	alignOBR.m führt eine Ausrichtung der internen Optik des Instruments durch. calibrateOBR.m gewährleistet die Kalibrierung des Instruments auf einen anzugebenden Wellenlängenbereich unter Verwendung des Referenzspiegels. getCalInfo.m liefert Informationen bezüglich der aktuell gespeicherten Kalibrierungswerte.
Lasereinstellungen	getLaserState.m gibt den aktuellen Status des Instrumentenlasers zurück. IsLaserReady.m zeigt an, ob der Instrumentenlaser akklimatisiert und zur Verwendung bereit ist. setLaserState.m aktiviert bzw. deaktiviert den Instrumentenlaser.

Nach der Integration der Bibliotheken kann die Initialisierung des Instruments, die Einstellung von mess- bzw. berechnungsspezifischen Parametern sowie die eigentliche Messung und Auswertung durchgeführt werden. Die Steuerung der Funktionalität des LUNA OBR 4600 wird dabei durch einzelne Methoden gewährleistet, welche in Tab. 5.1, Tab. 5.2 und Tab. 5.3 jeweils mit kurzen Funktionsbeschreibungen angeführt sind. Diese Auflistungen umfassen sämtliche programmierte Methoden, wobei eine Einteilung in die Kategorien Grundfunktionalität, Messung und Auswertung vorgenommen wurde.

Tab. 5.2: Implementierte MATLAB-Methoden zur Messdurchführung und Definition messspezifischer Parameter

Kategorie	MATLAB-Methoden
Messung	<p>takeMeasurement.m führt Messung über die gesamte definierte Reichweite des Instruments durch und speichert diese temporär auf der angegebenen Messspur.</p> <p>takeSpotScan.m führt einen Spot Scan um die definierte Position entlang der Glasfaser durch und speichert diesen temporär auf der angegebenen Messspur.</p>
Sweep-Bereich	<p>defineMeasSettings.m legt die zentrierte Wellenlänge sowie den Wellenlängenbereich der Tunable Laser Source fest.</p>
Signalleistung	<p>getGainLevelIndex.m gibt die definierte Signalleistung zurück.</p> <p>getGainLevels.m liefert einen Vektor mit allen verfügbaren Signalleistungen des Instruments.</p> <p>setGainLevelIndex.m redefiniert die Signalleistung des ausgehenden Signals.</p>
Reichweite	<p>getInstrumentConfig.m gibt die aktuell definierte Reichweite des Instruments sowie die Ortsauflösung des OTDR-Signals zurück.</p> <p>getLengthParameters.m liefert einen Vektor mit allen verfügbaren Ortsauflösungen des OTDR-Signals in Bezug auf die definierte Reichweite des Instruments.</p> <p>getLengthRanges.m liefert einen Vektor mit allen verfügbaren Reichweiten des Instruments.</p> <p>setDistanceMode.m ermöglicht den Wechsel zwischen Normal und Extended Range Mode.</p> <p>setDUTLength.m legt den Bereich des Device Under Test (DUT) im Extended Range Mode fest.</p> <p>setInstrumentConfig.m redefiniert die Reichweite des Instruments und die Ortsauflösung des OTDR-Signals.</p>

Tab. 5.3: Implementierte MATLAB-Methoden zur Auswertung und Definition berechnungsspezifischer Parameter

Kategorie	MATLAB-Methoden
Berechnung	calcMeasurementData.m führt die Auswertung der Messung auf einer angegebenen Spur durch und liefert die berechneten Messdaten in Abhängigkeit der Position entlang der Glasfaser.
Mess-Parameter	getMeasParameters.m liefert die Metadaten zu einer durchgeführten Messung wie z.B. die Messzeit, den Sweep-Bereich oder die Signalleistung.
Sensing-Parameter	<p>configSensing.m ermöglicht die Festlegung der Sensing-Parameter in Form der Integrationsbreite, der Ortsauflösung und der Gesamtlänge des betrachteten Bereichs.</p> <p>getGroupIndex.m liefert den aktuell festgelegten Gruppenbrechungsindex, welche zur Berechnung herangezogen wird.</p> <p>setGroupIndex.m redefiniert den Gruppenbrechungsindex.</p>

5.2 Untersuchungsbedingungen

Die hohe Auflösung und Präzision faseroptischer Messsysteme erfordert ein ebenso präzises Instrumentarium, welches eine zuverlässige Kalibrierung der Sensoren ermöglicht. Deshalb bietet das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme ein umfangreiches Equipment zur Untersuchung der Eigenschaften faseroptischer Systeme, um eine effektive Nutzung des Gesamtsystems im Messeinsatz gewährleisten zu können.

5.2.1 Kalibrieranlage für faseroptische Sensoren

Zur Bestimmung und Kalibrierung des Dehnungsverhaltens faseroptischer Sensoren steht im Labor des IGMS eine Kalibrieranlage zur Verfügung. Diese wurde im Zuge einer Diplomarbeit am Institut entwickelt und wird nachfolgend überblicksmäßig erläutert. Nähere Informationen können [Presl 2009] entnommen werden.

Der Aufbau der Kalibrieranlage, dargestellt in Abb. 5.2, gliedert sich in die Interferometer- sowie die Zugeinheit, die auf den Schienen des IGMS-Horizontalkomparators temporär montiert und frei verschiebbar sind. Der faseroptische Sensor ist dabei auf beiden Einheiten befestigt. Die Zugeinheit kann relativ zur Interferometereinheit vollautomatisch bewegt werden, woraus Längenänderungen bzw. Dehnungen des Sensors resultieren. Dadurch kann z.B. ein Stufenprofil zur Kalibrierung generiert und die Kennlinie eines Sensors bestimmt werden. Die maximale Sensorlänge ist lediglich durch die Größe des Horizontalkomparators begrenzt, wodurch ein Kalibrierbereich von bis zu 30 m zur Verfügung steht.

Zur Bestimmung eines Referenzwerts zu dem, zu kalibrierenden faseroptischen Messsystem wird ein Michelson-Interferometer eingesetzt. Dessen Reflektor ist an der Zugeinheit der Kalibrieranlage befestigt, wodurch die aufgebrachten Dehnungen in Form von Längenänderungen hochpräzise gemessen werden können. Jedoch ist die Position von Interferometer bzw. Reflektor vertikal um 7 cm zur jeweiligen Befestigung des faseroptischen Sensors versetzt. Kräfte,

die im Dehnungsvorgang entstehen, führen somit zu Neigungen von Interferometer und Reflektor, welche durch Neigungssensoren korrigiert werden. Zur Kontrolle externer meteorologischer Einflüsse sind Temperatursensoren an beiden Einheiten installiert. Zusätzlich zur Messung der Längenänderungen werden außerdem die entstehenden Zugkräfte in der Zugeinheit durch den Einsatz eines Kraftaufnehmers erfasst.

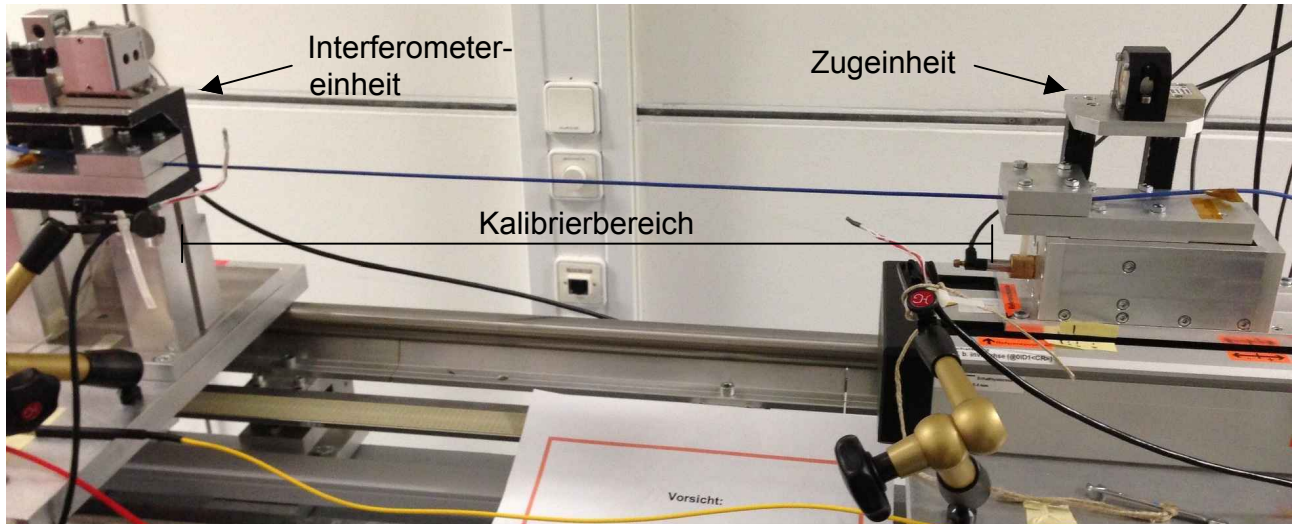


Abb. 5.2: Kalibrieranlage für faseroptische Sensoren

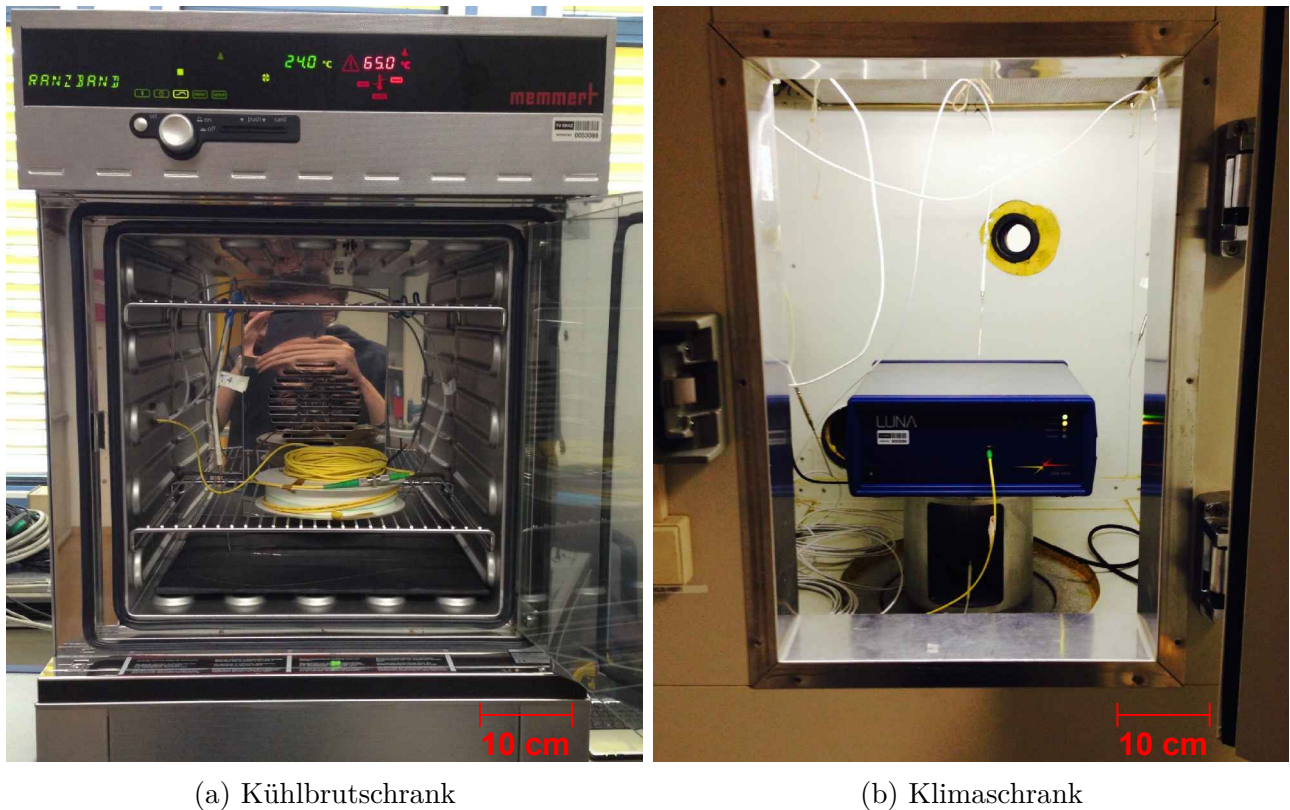
Zur Fixierung der unterschiedlichen faseroptischen Sensortypen stehen diverse Befestigungssysteme zur Verfügung. Vorgefertigte Sensoren für punktweise sowie quasi-verteilte Messverfahren werden dabei durch den Einsatz von Ankersystemen montiert. Zur Untersuchung von Sensorkabeln sowie blanken Glasfasern werden speziell gefertigte Klemmbacken und pneumatische Klemmsysteme verwendet.

5.2.2 Kühlbrutschrank und Klimaschrank

Der Einsatz faseroptischer Messsysteme zur Dehnungsmessung erfordert die Kompensation eventuell auftretender Temperatureffekte, um eine Verfälschung des Ergebnisses durch Temperaturunterschiede zu vermeiden und eine zuverlässige Bestimmung der Dehnungen zu gewährleisten.

Im IGMS-Labor stehen zur Untersuchung des Temperaturverhaltens von Sensoren der Kühlbrutschrank ICP 400 der Firma Memmert zur Verfügung, welcher in Abb. 5.3a dargestellt ist. Dieser bietet ein Innenraumvolumen von etwa 53 Litern und kann in einem Arbeitsbereich von 0 bis 60 °C vollautomatisch programmiert werden. Die Steuerung bzw. Aufzeichnung der Temperaturwerte erfolgt dabei mittels PT100-Sensoren der Klasse A, wobei der Hersteller des Kühlbrutschrankes eine Präzision der Temperatur von 0.1 °C anführt. [Memmert GmbH 2007]

Durch die vollautomatische Steuerung kann analog zur Kalibrieranlage für faseroptische Sensoren ein Stufenprofil erstellt und eine Kalibrierung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus durchgeführt werden, woraus die Kennlinie des Sensors bezüglich Temperaturänderungen resultiert. Diese kann im Einsatz des faseroptischen Gesamtsystems zur Korrektur der Dehnungswerte verwendet werden.



(a) Kühlbrutschrank

(b) Klimaschrank

Abb. 5.3: Instrumentarium zur Untersuchung des Temperaturverhaltens faseroptischer Messsysteme

Auf Grund des begrenzten Innenraums ist eine Untersuchung von Instrumenten sowie größeren Sensoren mittels des Kühlbrutschrankes nicht möglich. Deshalb bietet das IGMS-Labor zusätzlich einen fest installierten Klimaschrank (siehe Abb. 5.3b), welcher ein Volumen von etwa 575 Litern aufweist. Der Arbeitsbereich ist dabei geodätischen Instrumenten im Feldeinsatz angepasst und liegt zwischen -20 und 40 °C. Im Gegensatz zum Kühlbrutschrank muss jedoch eine Änderung der Temperatur manuell durchgeführt werden, weshalb eine Realisierung von Stufenprofilen zur Untersuchung von Sensoren nur mit erhöhtem Aufwand umsetzbar ist. Allerdings bietet der Klimaschrank eine gute Möglichkeit, um den potentiellen Temperaturbereich im Rahmen eines Messeinsatzes simulieren und eventuell auftretende Temperatureffekte des Messinstrumentes analysieren zu können.

5.3 Messbereich

Zur Analyse des Sensing-Verhaltens des verteilten faseroptischen Messinstrumentes LUNA OBR 4600 wurde zunächst die maximale, direkt erfassbare Frequenzverschiebung im Verhältnis zu einer beliebigen Referenzmessung untersucht und evaluiert. Die Untersuchungen umfassten ebenfalls messtechnische Einstellungen in Form des abgetasteten Wellenlängenbereichs der Tunable Laser Source und der Stärke des ausgehenden Signals, da diese im direkten Zusammenhang mit den maximal detektierbaren Dehnungen bzw. Temperaturänderungen gesehen werden können, siehe Abschnitt 4.3.2. Der resultierende Messbereich und die zugehörigen Messparameter, insbesondere jene der Dehnungsmessung, sollten danach als Kenngrößen für weiterführende Untersuchungen dienen.

Prinzipiell kann die Leistung des ausgehenden Signals (Gain [dB]) als wesentlicher Parameter eines verteilten faseroptischen Messsystems gesehen werden. Einerseits nimmt die Intensität des Lichts infolge von Dämpfungen und Rückreflexionen innerhalb des Glasfaserkerns ab und die rückgestreuten Anteile weisen sehr geringe Signalstärken auf. Andererseits führen starke Krümmungen (z.B. an Klemmpunkten) bei einer hohen Signalintensität zu einer Beeinflussung des Nutzsignals. Somit muss die Ausgangsleistung explizit an die geplante Anwendung angepasst werden, um eine zuverlässige Erfassung der Rückstreuung am Detektor gewährleisten zu können.

Der OBR 4600 bietet die Wahl zwischen fünf unterschiedlichen Ausgangsleistungen des Signals, die im Rahmen der Untersuchungen des maximalen Messbereichs getestet wurden. Als Sensor diente eine blanke Glasfaser mit Polyimide-Beschichtung, welche mittels der faseroptischen Kalibrieranlage schrittweise auf $15000 \mu\epsilon$ gedehnt werden konnte, wobei auf jedem unterschiedlichen Strain-Level mehrere Messungen je Gain durchgeführt wurden.

Vergleich der unterschiedlichen Signalausgangsleistungen

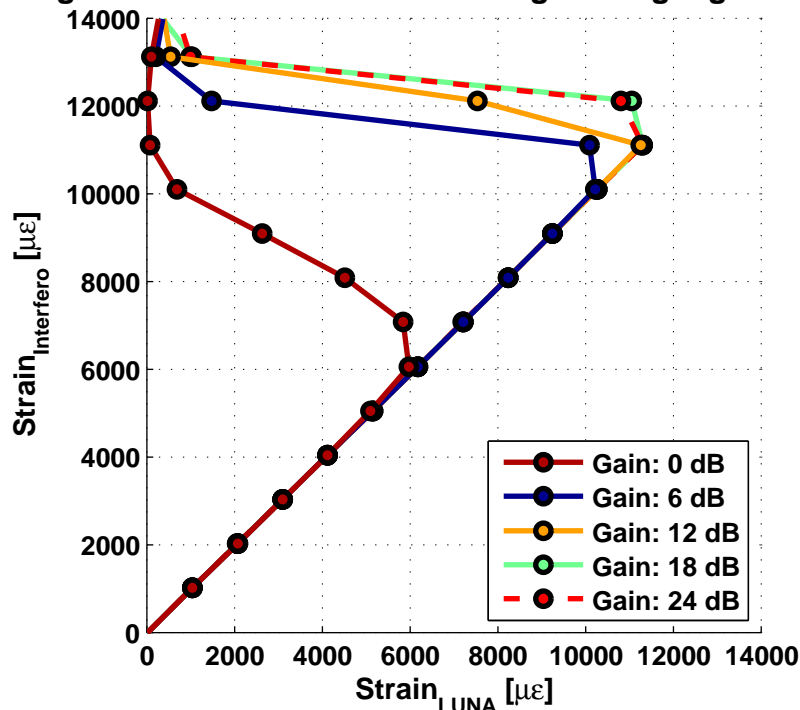


Abb. 5.4: Strain von Referenzinterferometer im Verhältnis zur Strain-Messung des LUNA OBR 4600 mit unterschiedlichen Ausgangsleistungen des Signals

In Abb. 5.4 sind die erfassten Strain-Werte des faseroptischen Messinstruments im Verhältnis zum Referenzinterferometer der Kalibrieranlage dargestellt. Unter Betrachtung dieser Darstellung ist ersichtlich, dass eine zuverlässige Bestimmung der Dehnung des Sensors nur bis $11000 \mu\epsilon$ gewährleistet werden kann. Des Weiteren ist eine wesentlich stabilere Strain-Berechnung bei einer höheren Eingangsleistung des optischen Signals zu beobachten. Dabei ist jedoch anzumerken, dass dieser Versuch unter Laborbedingungen durchgeführt wurde, womit stärkere Krümmungen des Sensorkabels, welche im Allgemeinen zu einer Beeinflussung des Nutzsignals führen, vermieden werden konnten.

Der abgetastete Wellenlängenbereich der Tunable Laser Source (Sweep-Bereich) stellt die zweite messspezifische Einstellung des OBR 4600 dar. Dieser beschreibt jenen Bereich des optischen

Spektrums, in welchem der Laser das ausgehende Signal emittiert. Dabei ergibt sich aus einem breiteren Sweep-Bereich eine höhere Frequenzverschiebung zur Referenzmessung, welche durch die Kreuzkorrelation aufgelöst werden kann. Nach [Luna Innovations Inc. 2014a] kann dieser Zusammenhang analog zur Bestimmung der Dehnung eines Fiber Bragg Gratings mit ungefähr $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ angegeben werden, woraus zum Beispiel für einen Sweep-Bereich von 5.23 nm ein Messbereich von ungefähr $\pm 2200 \mu\epsilon$ resultiert. Als Nachteil der Verbreiterung des Wellenlängenbereichs kann allerdings die Verlängerung der Messzeit gesehen werden, siehe Tab. 5.4.

Tab. 5.4: Zeitdauer für Messung und Berechnung des LUNA OBR 4600 im Verhältnis zum Sweep-Bereich der Tunable Laser Source

Sweep-Bereich [nm]	Messzeit [s]
1.31	1.8
2.62	1.8
5.23	2.0
10.47	3.0
20.97	4.5
41.87	8.6

Analog zur Untersuchung der unterschiedlichen Signalleistungen erfolgte eine Überprüfung sämtlicher zur Verfügung stehender Sweep-Bereiche des OBRs auf der faseroptischen Kalibrieranlage, wobei die Dehnung des Sensors wiederum schrittweise gesteigert wurde. Die Gegenüberstellung der ausgelesenen Strain-Werte von Referenzinterferometer und faseroptischen Messinstrument in Abb. 5.5 zeigt die Abhängigkeit zwischen dem maximalen Messbereich und dem Sweep-Bereich. Es ist zu sehen, dass die Dehnung nur dann aufgelöst werden kann, wenn

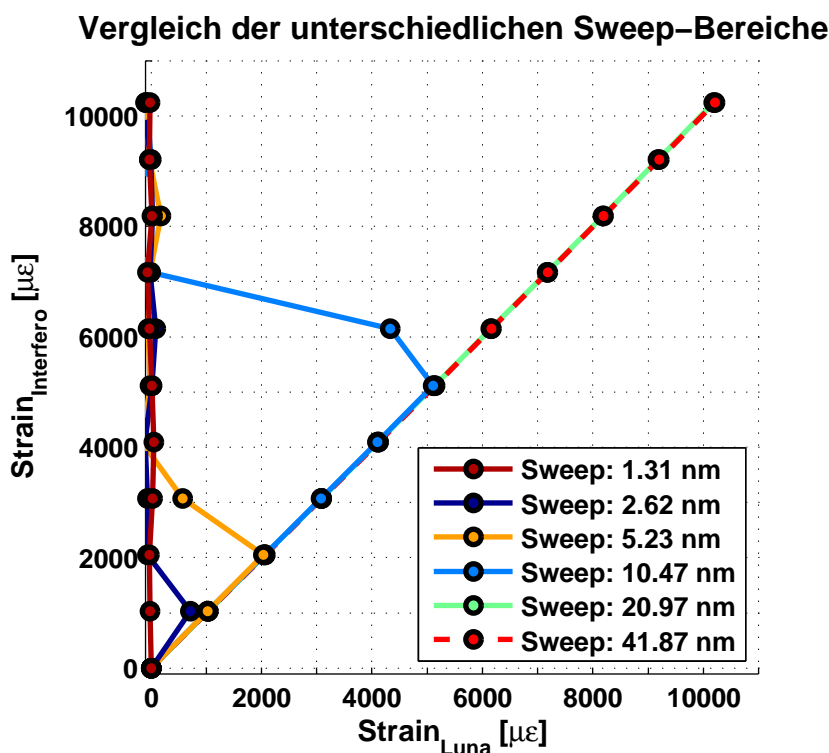


Abb. 5.5: Strain von Referenzinterferometer im Verhältnis zur Strain-Messung des LUNA OBR 4600 mit unterschiedlichen Wellenlängenbereichen des ausgehenden Signals

das ausgehende Signal in einem ausreichend breiten Sweep emittiert wurde. Beispielsweise zeigt die Messung mit einem Wellenlängenbereich von 5.23 nm, dass die Bestimmung des Strains lediglich bis zu einer aufgebrauchten Dehnung von 2000 $\mu\epsilon$ möglich ist. Somit kann der Näherungswert für die Approximation des Messbereichs mit ungefähr 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ bestätigt werden.

Im Rahmen der Überprüfungen wurden mit der maximalen Ausgangsleistung des Signals von 24 dB sowie dem größtmöglichen Sweep-Bereich von 41.87 nm die besten Ergebnisse erzielt, weshalb diese Einstellungen für den weiteren Verlauf der Laboruntersuchungen gewählt wurden.

5.4 Messpräzision

Im Allgemeinen charakterisiert die Messpräzision die wiederholbare Genauigkeit einer Messung und stellt somit einen wesentlichen Qualitätsparameter in messtechnischen Anwendungen dar. Die Herstellerangabe des OBR 4600 bezieht sich jedoch lediglich auf das Auflösungsvermögen (resolution) des relativen Frequenzshifts auf Basis einer beliebigen Referenzmessung. Nach [Luna Innovations Inc. 2014a] kann dieses bei einer Ortsauflösung von einem Zentimeter für die Erfassung des Strains mit $\pm 1.0 \mu\epsilon$ sowie für die Temperatur mit $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ angegeben werden.

Auf Grund der fehlenden Angabe der Präzision des Messverfahrens erfolgte eine Untersuchung des Instruments in Bezug auf die Präzision der Dehnungsmessung. Diese sollte außerdem die numerischen Werte des Herstellers für das Auflösungsvermögen verifizieren. Als Sensoren wurden blanke Glasfasern mit Ormocer- bzw. Polyimide-Beschichtung sowie ein vorgefertigtes Sensor-kabel (Brugg Kabel V1) verwendet, welche durch den Einsatz der faseroptischen Kalibrieranlage auf einem konstanten Strain-Level gehalten werden konnten. Dabei wurden jeweils 100 Messungen je Sensor mit dem OBR durchgeführt.

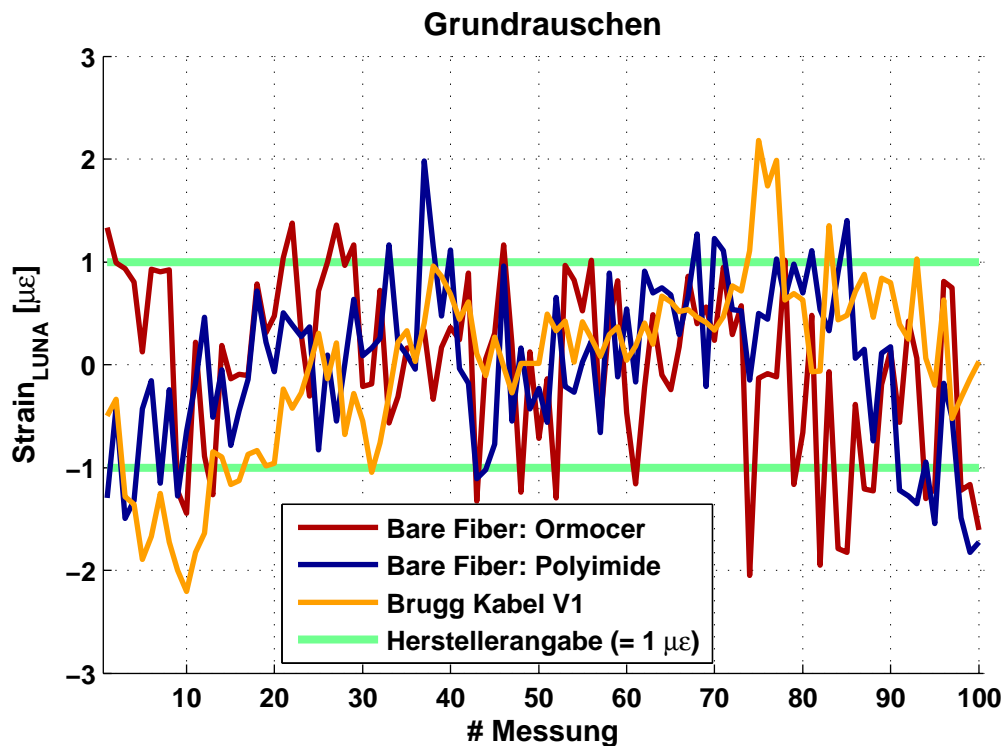


Abb. 5.6: Grundrauschen von 100 Strain-Messungen

Abb. 5.6 zeigt das Grundrauschen der ausgewählten faseroptischen Sensoren über 100 Strain-Messungen, wobei diese jeweils um ihren Mittelwert reduziert wurden. Zusätzlich ist die Herstellerangabe für das Auflösungsvermögen ($= \pm 1.0 \mu\epsilon$) dargestellt. Es ist zu sehen, dass sich die erfassten Messdaten in der Mehrzahl innerhalb des Intervalls $\pm 1.0 \mu\epsilon$ befinden, wodurch die jeweiligen Standardabweichungen unterhalb des angegebenen Auflösungsvermögens in einem Bereich zwischen 0.5 und $1.0 \mu\epsilon$ liegen. Unter der Annahme, dass der numerische Wert des Herstellers für das Auflösungsvermögen ebenfalls die Präzision des Instruments repräsentiert, müssen im Falle normalverteilter Messdaten 68.3 % aller Strain-Werte innerhalb der Grenzen $\pm 1.0 \mu\epsilon$ liegen. Eine Analyse zeigt, dass sich mehr als 75 % aller Werte bei allen drei Messreihen innerhalb dieses Intervalls befinden, weshalb eine Angabe der Präzision mit $1.0 \mu\epsilon$ als zulässig erscheint.

Im Rahmen der Untersuchungen des Grundrauschens wurden lediglich faseroptische Sensoren betrachtet, welche auf einem konstanten Strain-Level gehalten wurden. Eine Interpretation des Verhaltens der Messpräzision im Falle auftretender Dehnungen ist dadurch nicht gewährleistet. Deshalb erfolgte die Durchführung eines weiteren Versuchs, wobei der Response der Sensoren auf unterschiedlichen Strain-Leveln untersucht wurde. Ausgehend von einem konstanten Strain konnte die Dehnung mittels der faseroptischen Kalibrieranlage kontinuierlich mit einer Schrittweite von 0.1% ($= 1000 \mu\epsilon$) auf 1.0% gesteigert werden, woraus ein Stufenprofil resultierte. Je Stufe wurden dabei wiederum 100 Wiederholungsmessungen mit dem OBR durchgeführt.

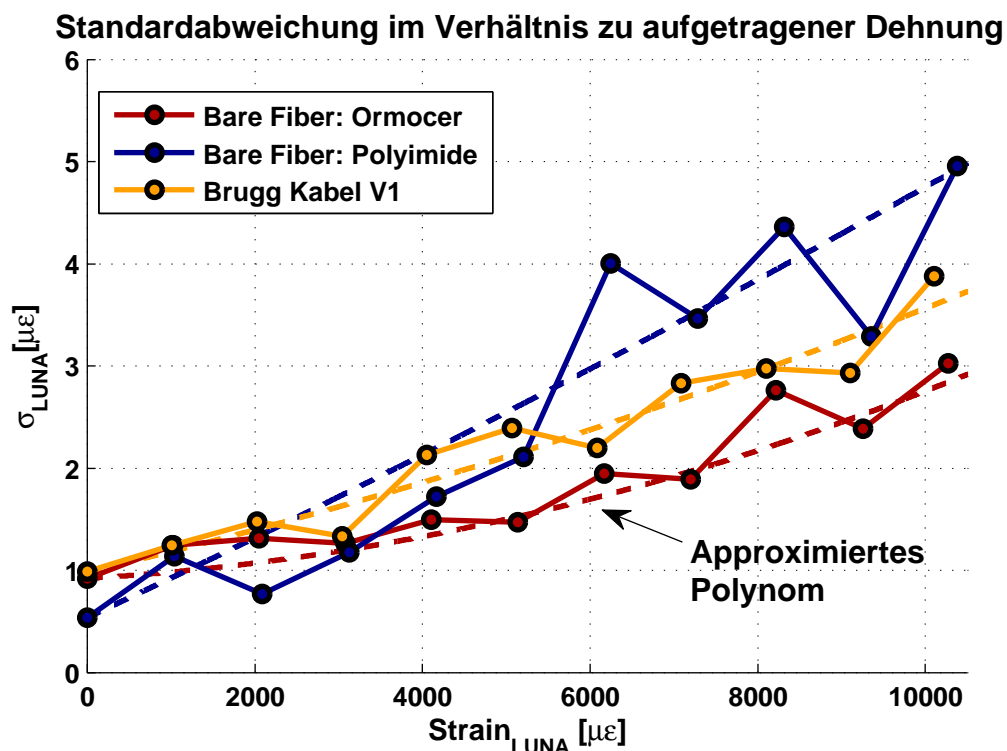


Abb. 5.7: Standardabweichung von 100 Strain-Messungen im Verhältnis zur aufgetragenen Dehnung

In Abb. 5.7 sind die Resultate in Form der Standardabweichungen je Stufe im Verhältnis zur aufgetragenen Dehnung dargestellt. Diese zeigen, dass sich die Präzision der Strain-Messung proportional zur Zunahme der Dehnung erhöht und Unterschiede in den ausgewählten Sensortypen auftreten. Das Verhalten erklärt sich anhand der Tatsache, dass die exakte Bestim-

mung der Kreuzkorrelation zwischen aktueller Epoche und Referenzmessung mit zunehmender Straindifferenz $\Delta\epsilon$ beeinträchtigt wird. Somit ist die Messpräzision des OBR 4600 einerseits vom bestimmten Dehnungswert und andererseits vom verwendeten faseroptischen Sensor abhängig. Angesichts dieser Faktoren wurde aus den Standardabweichungen der Messdaten ein quadratisches Polynom in Abhängigkeit des Strains geschätzt, um eine zuverlässige Angabe der Präzision für jeden untersuchten Sensor gewährleisten zu können.

$$\sigma_{\Delta\epsilon} = a_0 + a_1 \Delta\epsilon + a_2 \Delta\epsilon^2 \quad (5.1)$$

Die Koeffizienten der approximierten Polynome sind in Tab. 5.5 aufgelistet. Diese werden in weiterer Folge zur Bestimmung der Sensing-Koeffizienten in Abschnitt 5.7 verwendet.

Tab. 5.5: Polynom-Koeffizienten zur Angabe der Messpräzision

Faseroptischer Sensor	\mathbf{a}_0 [$\mu\epsilon$]	\mathbf{a}_1 []	\mathbf{a}_2 [$\frac{1}{\mu\epsilon}$]
Bare Fiber:Ormocer	0.9	$0.3 \cdot 10^{-3}$	$0.6 \cdot 10^{-6}$
Bare Fiber: Polyimide	0.5	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$0.2 \cdot 10^{-6}$
Brugg Kabel V1	1.0	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$0.3 \cdot 10^{-6}$

Ein weiterer Einfluss auf die Berechnung des Strain-Werts und somit auf die Präzision des Messverfahrens besteht durch die Wahl der Referenzepochen. Die Bestimmung des aktuellen Dehnungswerts $\Delta\epsilon$ kann in beliebig viele Epochen aufgeteilt werden, wobei die jeweilige Vorepoche als Referenzmessung verwendet wird und das Ergebnis aus der Summe aller berechneten Strain-Werte resultiert. Nach statistischen Grundlagen kann die zugehörige Varianz im Falle normalverteilter Daten durch eine Multiplikation der Varianz der Einzelmessung mit der Anzahl der Messungen N ermittelt werden.

$$\Delta\epsilon = \sum_{i=1}^N \Delta\epsilon_i \quad (5.2)$$

$$\sigma_{\Delta\epsilon}^2 = N \sigma_{\Delta\epsilon_i}^2 \quad (5.3)$$

Zur Verifizierung dieses Zusammenhangs wurden jene 100 OBR-Messungen, welche auf einem Strain-Level von 1.0 % durchgeführt wurden, in unterschiedlichen Kombinationen von Referenzepochen berechnet und die zugehörigen Standardabweichungen in Abhängigkeit der Anzahl der Referenzepochen bestimmt.

Die Ergebnisse in Abb. 5.8 zeigen die Verläufe der Standardabweichungen sämtlicher untersuchter Sensoren. Diese folgen jedoch nicht dem Varianzfortpflanzungsgesetz der Summation, wobei sich dieses Verhalten anhand der Tatsache erklären lässt, dass die Messpräzision von der Größe des aufgetragenen Strains abhängig ist. Die besten Resultate werden demnach bei einer Dehnung von 1 % unter Anwendung von zwei bis vier Referenzepochen erzielt. Die Variante mit der jeweils geringsten Standardabweichung wurde zur Berechnung der Messdaten im Rahmen der Bestimmung der Sensing-Koeffizienten in Abschnitt 5.7.1 verwendet.

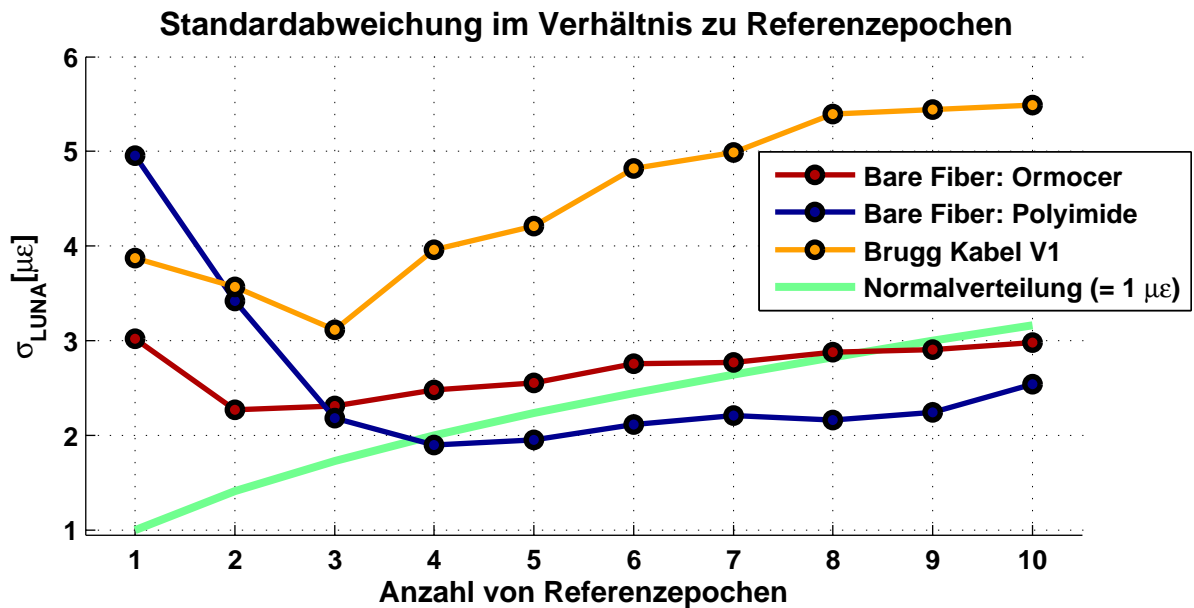


Abb. 5.8: Standardabweichung von 100 Strain-Messungen im Verhältnis zur Anzahl der Referenzepochen bei einer aufgetragenen Dehnung von ungefähr 1 %

5.5 Ortsauflösung

Ein weiteres Kennzeichen jedes verteilten faseroptischen Messsystems repräsentiert die Ortsauflösung. Diese beschreibt den kleinsten Abstand zwischen zwei Streubereichen, welcher vom Messinstrument aufgelöst und detektiert werden kann. Im Berechnungsablauf des LUNA OBR 4600 muss zwischen der Integrationsbreite und der Ortsauflösung des berechneten Signals unterschieden werden. Dabei charakterisiert die Integrationsbreite Δs jenen Bereich der Amplitude im Ortsbereich, welcher zur Berechnung der relativen Frequenzverschiebung zwischen Mess- und Referenzsignal herangezogen wird. Im Gegensatz dazu stellt die Ortsauflösung Δz lediglich den Abstand zwischen den Intervallen Δs dar, siehe Abschnitt 4.3.3.

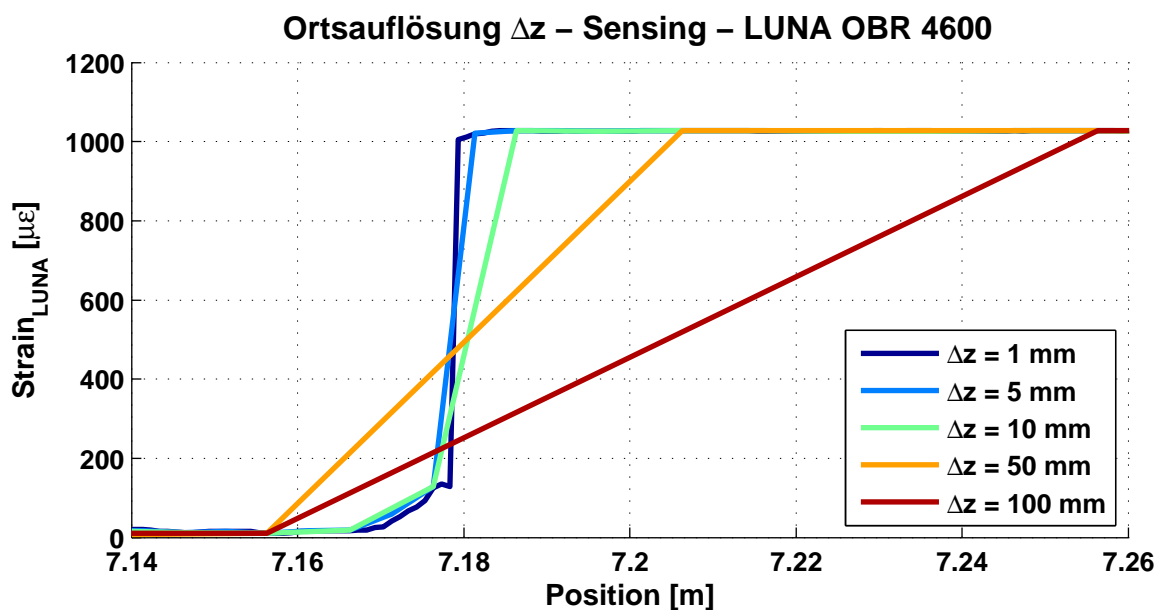


Abb. 5.9: Vergleich unterschiedlicher Ortsauflösungen im Sensing-Modus ($\Delta s = 1$ cm)

Im Vergleich zu anderen verteilten faseroptischen Systemen kann unter Einsatz des OBR-Messverfahrens eine extrem hohe Ortsauflösung bis in den Millimeter-Bereich erreicht werden, wodurch auch eine Überwachung des Dehnungsverlaufs der Glasfaser an Kanten und Strukturen möglich ist. Aus diesem Grund wurde mittels der faseroptischen Kalibrieranlage ein sprunghafter Übergang einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung auf ein höheres Strain-Level simuliert und die Berechnung in unterschiedlichen Ortsauflösungen des Signals durchgeführt, siehe Abb. 5.9.

In der Darstellung ist ersichtlich, dass die erfassten Messdaten den Sprung im Dehnungsverlauf je nach Ortsauflösung wiedergeben. Vor allem bei einer Ortsauflösung von mehr als 10 mm kann eine Verschmierung des sprunghaften Übergangs und somit eine Glättung des Kantenverlaufs beobachtet werden. Die genaue Auflösung des Sprungs ist erst ab einem räumlichen Abstand $\Delta z \leq 10$ mm zu erkennen. Insbesondere die dunkelblaue Darstellung ($\Delta z = 1$ mm) zeigt die extrem hohe Ortsauflösung des OBR 4600, wobei der unregelmäßige Dehnungsverlauf im Bereich von 7.16 bis 7.20 m (siehe Abb. 5.10) die Wirkung der pneumatischen Klemmung der Kalibrieranlage aufzeigt und Rückschlüsse auf die Druckverteilung innerhalb des Adapters zulässt. Die folgenden Untersuchungen bezüglich der Integrationsbreite Δz erfolgte deshalb in dieser Ortsauflösung des Signals.

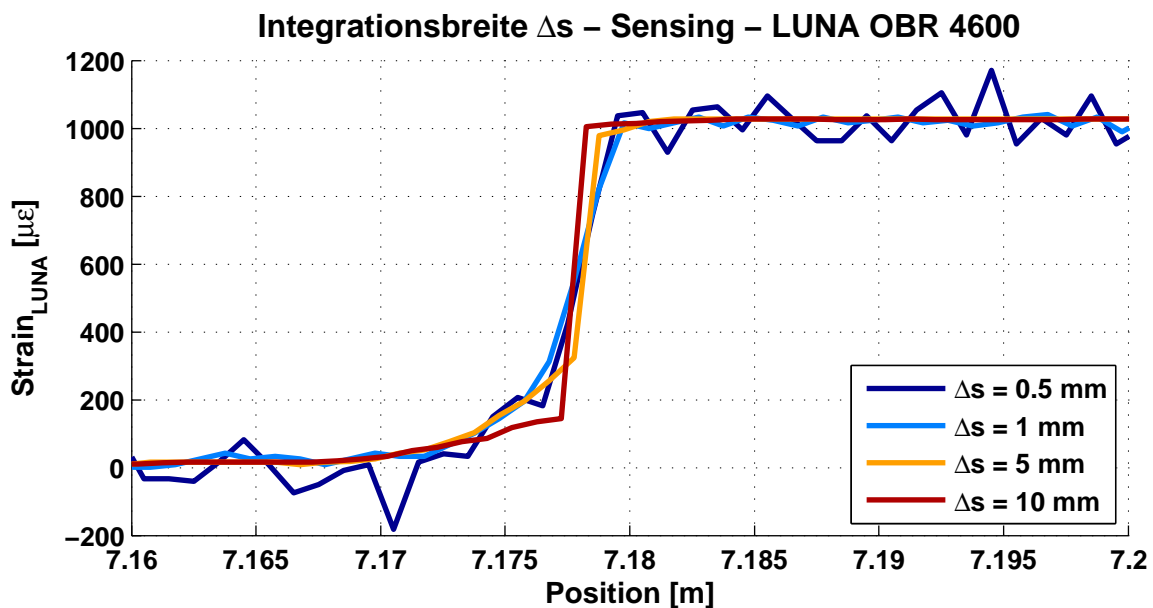


Abb. 5.10: Vergleich unterschiedlicher Integrationsbreiten im Sensing-Modus ($\Delta z = 1$ mm)

Abb. 5.10 zeigt das OBR-Signal mit einer Ortsauflösung von 1 mm im Bereich der pneumatischen Klemmung. Zur Berechnung der Messdaten wurden unterschiedliche Integrationsbreiten verwendet, wobei eine Glättung des Strain-Verlaufs bei einer Erhöhung von Δs zu beobachten ist. Diese lässt sich anhand der Tatsache erklären, dass ein größerer Integrationsbereich zu einer höheren Anzahl an Datenpunkten der Amplitude führt, welche zur Transformation in den Frequenzbereich und somit zur Berechnung des Frequenzshifts verwendet werden. Dieses Verhalten kann mit einem Moving Average Filter verglichen werden, der den gleitenden Mittelwert über eine Datenreihe bildet und somit höherfrequente Anteile entfernt. Unterschreitet die Integrationsbreite die Ortsauflösung, sind Unregelmäßigkeiten im Dehnungsverlauf infolge der geringen Anzahl an Punkten zur Fourier-Transformation zu beobachten. Deshalb ist eine Abstimmung zwischen diesen beiden Berechnungsparametern unerlässlich.

5.6 Temperaturverhalten

Im Rahmen messtechnischer Aufgaben ist eine Akklimatisierung des Messinstruments an die Umgebungstemperatur unerlässlich, um grobe Messfehler vermeiden und ein zuverlässiges Ergebnis gewährleisten zu können. Die Zeitdauer der Akklimatisierung ist dabei je nach Messinstrument unterschiedlich. Der Hersteller Luna Technologies gibt jedoch keine gesonderten Spezifikationen im Bezug auf das Temperaturverhalten des OBR 4600 an.

Deshalb wurde das Messinstrument im Klimaschrank des IGMS-Labors positioniert und eine Untersuchung bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen durchgeführt. Der Versuchsablauf sah eine Absenkung der Temperatur von 20 auf 10 °C sowie eine Erhöhung von 10 auf 30 °C vor, womit auch der operationale Einsatzbereich des OBR 4600 zwischen +10 und +35 °C (siehe [Luna Innovations Inc. 2014b, S. 213]) nahezu ausgeschöpft wurde. Jede Stufe nach einer Temperaturänderung sollte mindestens über einen Zeitraum von 15 Stunden untersucht werden, um ein Übergehen der Temperaturen auf das Instrument zu gewährleisten. Die Erfassung der Temperaturen innerhalb des Klimaschranks erfolgte dabei durch den Einsatz von PT100-Sensoren.



Abb. 5.11: Vorgespanntes Sensorkabel BRUsens Strain V4

Auf Grund der längeren Untersuchungsdauer wurde als sensibles Element ein Sensorkabel (BRUsens Strain V4) verwendet, welches durch spezielle Ankerplatten dauerhaft im vorgespannten Zustand am Fundament des IGMS-Horizontalkomperators installiert ist, siehe Abb. 5.11. Analog zu vorhergehenden Überprüfungen auf der Kalibrieranlage erfolgte somit die Durchführung des Versuchs mittels eines faseroptischen Sensors auf konstantem Strain-Level, wobei eine Stabilität gegenüber externer Beeinflussungen garantiert werden konnte.

Abb. 5.12 zeigt das Temperaturverhalten des LUNA OBR 4600 in Form der erfassten Strain-Werte des Sensorkabels. Zusätzlich ist das Temperaturprofil innerhalb des Klimaschranks durch einen Farbverlauf dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine Änderung der Umgebungstemperatur eine Instabilität in der Zeitreihe der Strain-Werte bewirkt. Diese kann im Rahmen der Abkühlung von 10 °C über einen Zeitraum von ungefähr 30 Minuten sowie im Rahmen der Erwärmung von 20 °C über einen Zeitraum von etwa 50 Minuten beobachtet werden. Somit ergibt sich eine Akklimatisierungsdauer von 2.5 bis 3 Minuten pro °C, in welcher keine Messungen mit dem OBR durchgeführt werden sollten. Dabei ist anzumerken, dass diese mit der üblichen Akklimatisierungsdauer einer Totalstation (z.B. Leica TS 15, siehe [Leica Geosystems AG 2011, S. 79]) vergleichbar ist.

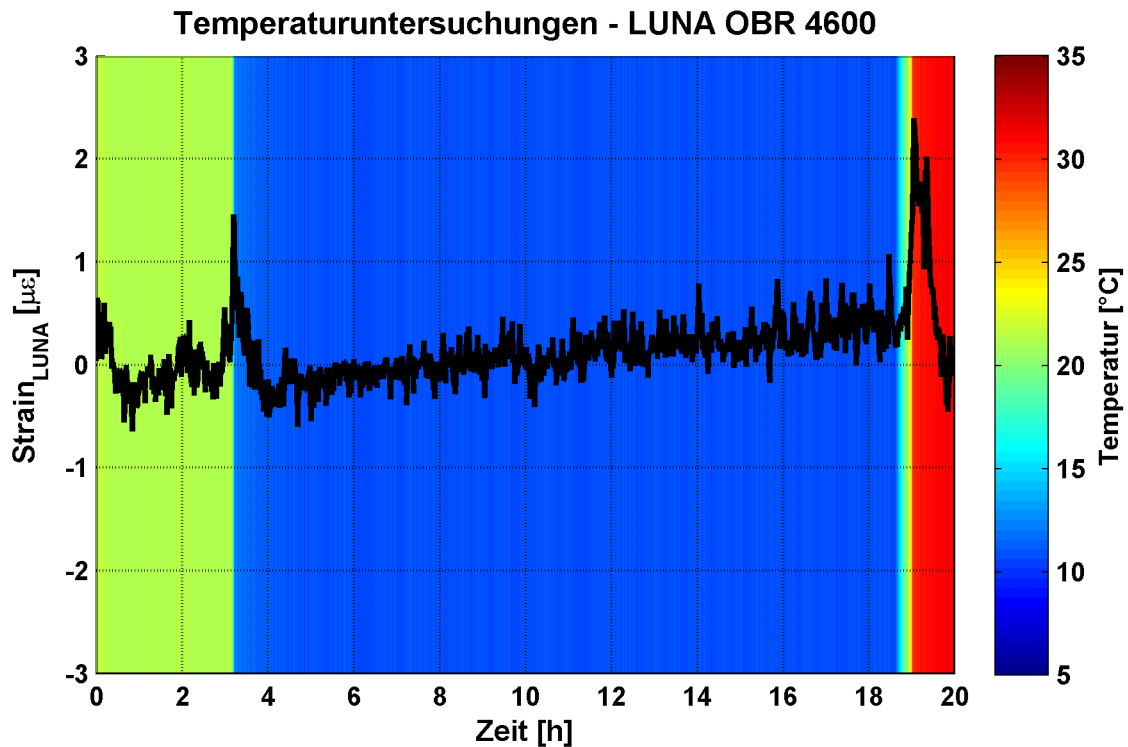


Abb. 5.12: Temperaturverhalten des LUNA OBR 4600 - Instrument im Klimaschrank, Sensor-kabel auf konstantem Strain-Level

Im Gegensatz zum geplanten Versuchsablauf sind die Ergebnisse bei einer Temperatur von 30 °C nicht über einen Zeitraum von mehr als 15 Stunden dargestellt, da diese auf Grund der großen Temperaturdifferenz im Zuge des Sprungs von 10 auf 30 °C nicht mehr aufgelöst werden konnten. Dieses Verhalten tritt infolge einer fehlenden Kalibrierung des Messinstruments auf, welche nach [Luna Innovations Inc. 2014b, S. 35 ff.] alle 24 Stunden oder bei einer abrupten Änderung der Umgebungstemperatur durchgeführt werden muss.

5.7 Sensing-Koeffizienten

Im Allgemeinen ist die direkte Erfassung des Ausgabewerts eines Messsystems nicht möglich, weshalb eine Umrechnung der erfassten physikalischen Messgröße mittels einer mathematischen Funktion, die als Sensorkennlinie bezeichnet wird, durchgeführt werden muss. Unter Betrachtung des Berechnungsverfahrens des LUNA OBR 4600 spiegelt sich dieser Prozess im Übergang von der relativen Frequenzverschiebung auf die gesuchte Dehnung bzw. Temperaturänderung wider, wobei dieser vereinfacht in Form einer Linearkombination angenähert wird, siehe Abschnitt 4.3.3. Als Richtwerte für die Bestimmung dienen dabei Angaben des Herstellers für Standardfasern aus dem Bereich der Telekommunikation. Nach [Luna Innovations Inc. 2014b, S. 189] ergeben sich Umrechnungsfaktoren, welche mit $\epsilon = -6.67 \mu\epsilon/\text{GHz}$ für die Dehnung sowie $\Delta T = -0.801^\circ\text{C}/\text{GHz}$ für die Temperaturänderung angegeben werden können.

Allerdings wird auch auf Berechnungsfehler in einem Bereich von 10 % oder höher (siehe [Luna Innovations Inc. 2014b, S. 188]) hingewiesen, die durch die Verwendung dieser Standardkoeffizienten entstehen können. Dies beruht auf der Tatsache, dass die Faktoren immer von der Beschaffenheit des Glasfaserkerns (Gruppenbrechungsindex, thermischer Ausdehnungskoeffizi-

ent, etc.) abhängig sind, wodurch sich je nach Fasertyp unterschiedliche Werte zur Umrechnung ergeben. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche faseroptische Sensoren, insbesondere jene, welche in den durchgeführten Anwendungen und Projekten Verwendung fanden, im Zuge der Laboruntersuchungen bezüglich ihres Dehnungs- und Temperaturverhaltens kalibriert.

5.7.1 Dehnung

Die Untersuchung des Dehnungsverhaltens erfolgte unter dem Einsatz der Kalibrieranlage für faseroptische Sensoren. Dabei wurde ein Stufenprofil erstellt (siehe Abb. 5.13), um die Glasfasern unter unterschiedlichen Belastungen testen und ein zuverlässiges Ergebnis generieren zu können. Im Zuge eines Dehnungsvorgangs garantieren die meisten Hersteller faseroptischer Sensoren lediglich eine Maximaldehnung von 1.0 % ($\hat{=} 10000 \mu\epsilon$). Zur Vermeidung von Faserbrüchen wurden deshalb die Strain-Werte angepasst und die Sensoren nur in einem Bereich zwischen 0.0 und 1.0 % kalibriert, wobei das Messprofil eine Schrittweite von 0.1 % aufwies.

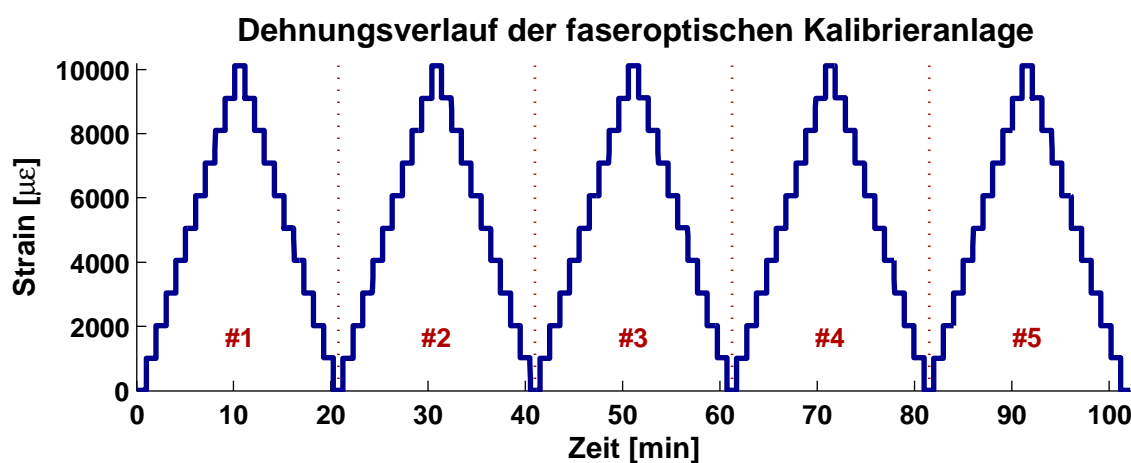


Abb. 5.13: Stufenprofil zur Kalibrierung der faseroptischen Sensoren bezüglich des Dehnungsverhaltens

Je nach abgetasteten Wellenlängenbereich beträgt die Messzeit des LUNA OBR 4600 inklusive Datenverarbeitung bis zu 8.5 Sekunden. Daher wurde die Dehnung auf jeder einzelnen Stufe des Profils über den Zeitraum von einer Minute konstant gehalten, um eine ausreichende Anzahl an Messwerten auf sämtlichen Strain-Levels erreichen zu können. Auf Grund der Anzahl von fünf Messzyklen konnte somit die Zeitdauer der Kalibrierung eines einzelnen Sensor-Samples mit ungefähr 100 Minuten abgeschätzt werden, wobei insgesamt drei Samples pro untersuchten faseroptischen Sensor geprüft wurden. Während des Versuchsablaufs erfolgte die kontinuierliche Erfassung von Messdaten sowohl mit dem LUNA OBR 4600 als auch durch die Sensoren der faseroptischen Kalibrieranlage. Die Messungen jeder Profilstufe wurden zunächst einer Ausreißerdetektion unterzogen und danach arithmetisch gemittelt.

Zur Bestimmung der einzelnen Kennlinien der Sensoren musste ein mathematischer Zusammenhang definiert werden, um eine Approximation der Sollwerte der faseroptischen Kalibrieranlage durch die gemessenen Dehnungen des OBRs erreichen zu können. Zusätzlich zur klassischen linearen Repräsentation wurde auch ein quadratisches Polynom gewählt, welches gegebenenfalls eine bessere Anpassung realisiert.

$$\epsilon = K_{\epsilon(1)} \Delta\nu \left(+ K_{\epsilon(2)} \Delta\nu^2 \right) \quad (5.4)$$

Die Auswertung dieser beiden funktionalen Zusammenhänge erfolgte in weiterer Folge separat auf Basis eines Ausgleichs nach dem Gauß-Markov-Modell. Die unterschiedliche Anzahl an gemittelten Messwerten pro Profilstufe auf Grund der durchgeführten Ausreißerdetektion wurde dabei in Form der Gewichtung der Beobachtungen berücksichtigt.

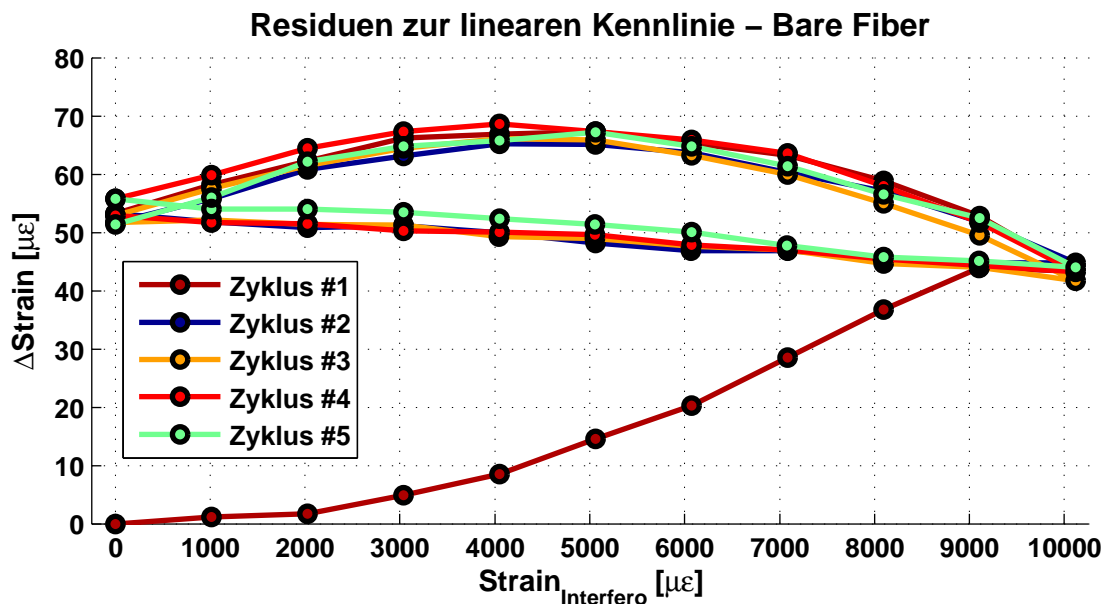


Abb. 5.14: Residuen der linearen Kennlinie einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung im Verhältnis zur Referenzmessung des Interferometers

In Abb. 5.14 sind die Residuen ($\Delta\text{Strain} = \text{Strain}_{\text{Interfero}} - \text{Strain}_{\text{Luna}}$) der geschätzten linearen Kennlinie einer blanken Glasfaser mit Ormocer-Beschichtung gegenüber den gemessenen Dehnungen des Interferometers dargestellt. Es ist zu sehen, dass der erste Zyklus im Hinweg wesentliche Unterschiede zu allen anderen Messungen aufweist. Die Ursache dieses Verhaltens wird in der Form eines Ausziehens der Faser aus dem Coating im Zuge der erstmaligen Dehnung vermutet. Sämtliche erste Messzyklen wurden daher im Zuge der Berechnungen vernachlässigt.

Tab. 5.6: Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren geschätzt für das Auftreten von Dehnungen und Verkürzungen

Faseroptischer Sensor	$K_{\epsilon(1)} \left[\frac{1}{\text{GHz}} \right]$	$K_{\epsilon(2)} \left[\frac{1}{\text{GHz}^2} \right]$	$ e _{\text{Mittel}} [\mu\epsilon]$	$ e _{\text{Max}} [\mu\epsilon]$
Bare Fiber	-6.5626 ± 0.0018	—	6.8	17.1
Coating: Ormocer	-6.5760 ± 0.0040	$(-13.7 \pm 4.0) 10^{-6}$	6.2	14.4
Bare Fiber	-6.5520 ± 0.0018	—	6.0	13.7
Coating: Polyimide	-6.5679 ± 0.0040	$(-23.2 \pm 4.0) 10^{-6}$	5.2	11.2
Sensorkabel	-6.7768 ± 0.0018	—	11.5	29.6
BRUsens strain V1	-6.8418 ± 0.0070	$(-57.0 \pm 6.1) 10^{-6}$	10.3	26.8

Die geschätzten Strain-Koeffizienten der linearen sowie der quadratischen Kennlinien aller drei untersuchter Samples der faseroptischen Sensoren sind inklusive der theoretischen Standardabweichungen in Tab. 5.6 aufgelistet. Des Weiteren sind die mittleren Abweichungen zur Kennlinie

$|e|_{\text{Mittel}}$ sowie die maximale Differenz zur Kennlinie $|e|_{\text{Max}}$ angeführt. Wie zu erwarten, zeigen alle drei überprüften Sensoren geringere mittlere Abweichungen, wenn die Strain-Werte mittels eines Polynoms 2. Ordnung berechnet werden. Die quadratischen Anteile der geschätzten Funktion sind jedoch derart gering, dass die Unterschiede in den maximalen Differenzen zwischen Hin- und Rückweg im Vergleich zur linearen Repräsentation unter $0.1 \mu\epsilon$ liegen.

Die theoretischen Standardabweichungen der Koeffizienten zeigen die hohe Präzision der einzelnen Komponenten der faseroptischen Kalibrieranlage sowie des LUNA OBRs 4600. Beispielsweise kann die Bestimmung der Dehnung einer blanken Glasfaser mit Ormocer-Beschichtung unter Verwendung des geschätzten linearen Koeffizienten mit einer Standardabweichung von $1.8 \cdot 10^{-3} \mu\epsilon/\text{GHz}$ erfolgen. Dies entspricht einer theoretischen Abweichung von etwa $0.28 \mu\epsilon$ bei einem erfassten Strain von $1000 \mu\epsilon$. In vergleichbaren Untersuchungen, siehe [Kreger et al. 2009], konnte der Strain-Koeffizient einer blanken Glasfaser des Typs SMF-28e mit Acrylat-Beschichtung lediglich mit einem resultierenden Residuum von $0.87 \mu\epsilon$ bei einer Dehnung von $1000 \mu\epsilon$ bestimmt werden.

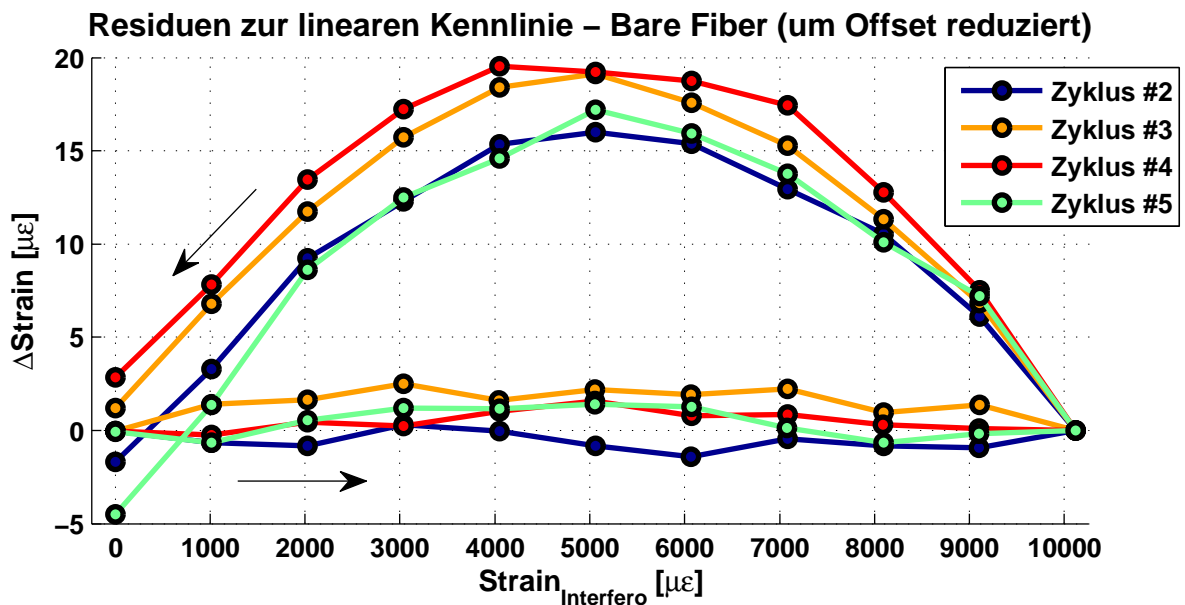


Abb. 5.15: Residuen der linearen Kennlinie einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung im Verhältnis zur Referenzmessung des Interferometers reduziert um den Offset

Abb. 5.15 zeigt abermals die Residuen zur geschätzten linearen Kennlinie der Bare-Fiber mit Ormocer-Beschichtung, welche allerdings zusätzlich um den Offset des jeweiligen Zyklus reduziert wurden. Wie schon in Abb. 5.14 ersichtlich, treten unterschiedliche Abweichungen zur Sensorkennlinie in Hin- und Rückweg auf, die in der Messtechnik allgemein als Hysteresen bezeichnet werden. Auf Grund dieser Systematik im Kalibrierprozess kann die Präzision der Koeffizienten nicht ausschließlich durch ihre theoretische Standardabweichung beschrieben werden. Zusätzlich erfolgt daher eine Abgabe der maximalen Abweichung zur Kennlinie (siehe Tab. 5.6), um die Charakteristiken eines derartigen Verhaltens aufzeigen zu können.

Des Weiteren ist visuell zu erkennen, dass eine bessere Anpassung im Zuge der Sensorverkürzung durch die Schätzung einer quadratischen Kennlinie möglich wäre. Deshalb erfolgte jeweils eine separate Berechnung der Strain-Koeffizienten für Hin- und Rückweg, um in Anwendungen, in welchen ausschließlich Dehnungen oder ausnahmslos Verkürzungen auftreten, eine

Approximation mit geringeren Abweichungen bieten zu können. Die numerischen Resultate der Schätzungen sind in den Tab. 5.7 und 5.8 aufgelistet. Die Residuen zur jeweiligen Kennlinie sind in Abb. 5.15 dargestellt. Insbesondere die mittleren und maximalen Abweichungen zur Kennlinie verdeutlichen, dass eine partielle Auswertung eine wesentliche Verbesserung im Vergleich zum Gesamtausgleich bietet. So konnte zum Beispiel das mittlere Residuum der Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung von $6.2 \mu\epsilon$ auf $1.0 \mu\epsilon$ im Falle einer Dehnung bzw. $1.3 \mu\epsilon$ im Falle einer Verkürzung reduziert werden.

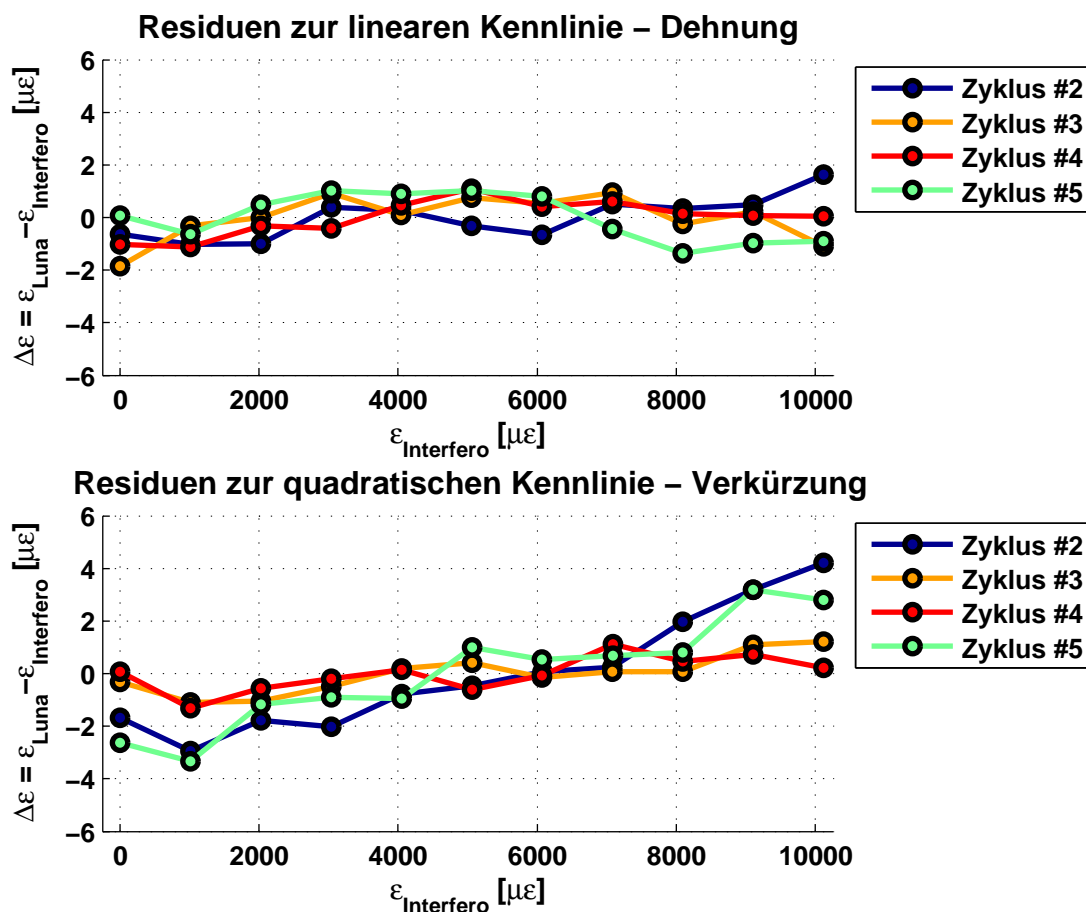


Abb. 5.16: Residuen der geschätzten Kennlinien einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung im Verhältnis zur Referenzmessung des Interferometers reduziert um den Offset

Tab. 5.7: Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren, nur geschätzt für das Auftreten von Dehnungen

Faseroptischer Sensor	$K_{\epsilon(1)} \left[\frac{1}{\text{GHz}} \right]$	$K_{\epsilon(2)} \left[\frac{1}{\text{GHz}^2} \right]$	$ e _{\text{Mittel}} [\mu\epsilon]$	$ e _{\text{Max}} [\mu\epsilon]$
Bare Fiber	-6.5557 ± 0.0024	—	1.0	4.5
Coating: Ormocer	-6.5519 ± 0.0055	$(+2.4 \pm 5.3) 10^{-6}$	1.2	5.0
Bare Fiber	-6.5434 ± 0.0024	—	1.8	5.6
Coating: Polyimide	-6.5501 ± 0.0055	$(-11.3 \pm 5.2) 10^{-6}$	1.8	4.5
Sensorkabel	-6.7657 ± 0.0025	—	3.6	10.8
BRUsens strain V1	-6.8086 ± 0.0091	$(-33.9 \pm 7.7) 10^{-6}$	4.5	9.7

Tab. 5.8: Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren, nur geschätzt für das Auftreten von Verkürzungen

Faseroptischer Sensor	$K_{\epsilon(1)} \left[\frac{1}{\text{GHz}} \right]$	$K_{\epsilon(2)} \left[\frac{1}{\text{GHz}^2} \right]$	$ e _{\text{Mittel}} [\mu\epsilon]$	$ e _{\text{Max}} [\mu\epsilon]$
Bare Fiber	-6.5716 ± 0.0024	—	5.6	17.0
Coating: Ormocer	-6.6021 ± 0.0055	$(-31.2 \pm 5.3) 10^{-6}$	1.3	6.0
Bare Fiber	-6.5589 ± 0.0024	—	5.8	13.7
Coating: Polyimide	-6.5871 ± 0.0055	$(-34.4 \pm 5.2) 10^{-6}$	1.7	5.4
Sensorkabel	-6.7873 ± 0.0031	—	10.2	31.4
BRUsens strain V1	-6.8726 ± 0.0102	$(-75.1 \pm 8.4) 10^{-6}$	5.1	15.7

5.7.2 Temperatur

Die Empfindlichkeit faseroptischer Sensoren gegenüber der Temperatur erfordert zusätzlich zur Bestimmung der Strain-Koeffizienten auch immer eine Untersuchung des Temperaturverhaltens. Die daraus resultierenden Erkenntnisse können einerseits zur Temperaturkompensation der Dehnungswerte oder andererseits zur direkten Berechnung von Temperaturänderungen genutzt werden.

Im Zuge der durchgeführten Systemuntersuchungen erfolgte eine Überprüfung der Temperatursensitivität der faseroptischen Sensoren im Kühlbrutschrank. Eine zusätzliche Ausstattung des Geräts mit PT100-Sensoren sollte eine Kontrolle der intern gemessenen Temperaturen gewährleisten und die zuverlässige Bestimmung einer Referenztemperatur ermöglichen. Das erstellte Stufenprofil, dargestellt in Abb.5.18, wurde dabei dem funktionalen Arbeitsbereich des Kühlbrutschranks mit Temperaturen zwischen 0 und 60 °C angepasst, um das Verhalten der Glasfasern unter unterschiedlichen Temperaturen analysieren zu können. Die maximale Anzahl an programmierbaren Stufen des Profils limitierte außerdem die Schrittweite zwischen den einzelnen Temperaturen auf 10 °C.

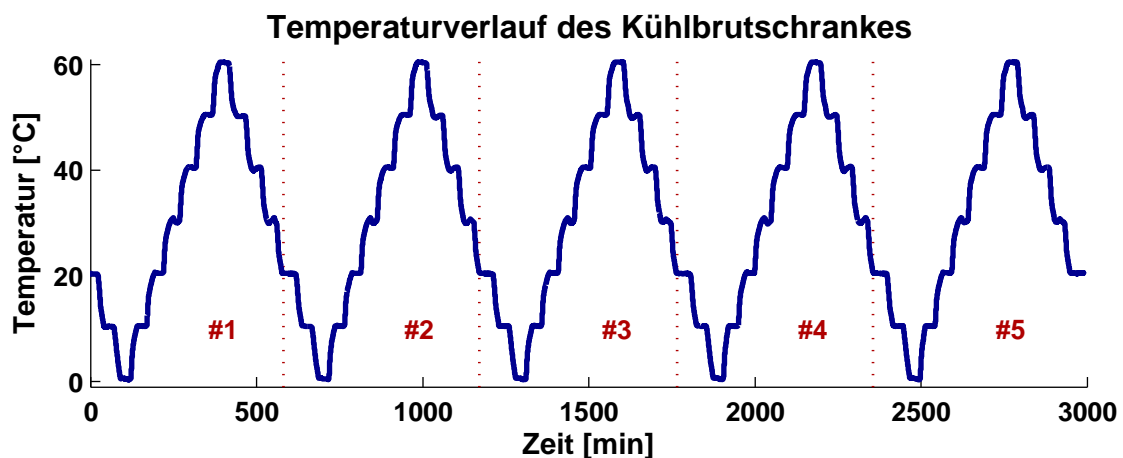


Abb. 5.17: Stufenprofil zur Kalibrierung der faseroptischen Sensoren bezüglich des Temperaturverhaltens

Im Gegensatz zu den Überprüfungen auf der faseroptischen Kalibrieranlage musste auch jene Zeitspanne beachtet werden, welche der Kühlbrutschrank für die Erhöhung bzw. Absenkung der Temperatur benötigt. Um in weiterer Folge auch den Übergang der Temperatur auf den faseroptischen Sensor gewährleisten zu können, wurde jede einzelne Profilstufe über einen Zeitraum von 20 Minuten gehalten. Somit konnte die Erfassung einer ausreichenden Anzahl an Messdaten auf der Solltemperatur der jeweilige Stufe garantiert werden. Jedoch ergab sich dadurch in Summe eine Untersuchungsdauer von ungefähr 50 Stunden pro faseroptischen Sensor.

$$\Delta T = K_{T(1)} \Delta \nu \left(+ K_{T(2)} \Delta \nu^2 \right) \quad (5.5)$$

Analog zur Bestimmung der Strain-Koeffizienten erfolgte die Messung über die Dauer des Versuchs kontinuierlich, wobei die resultierenden Daten jeder Profilstufe danach einer Ausreißererkennung unterzogen und arithmetisch gemittelt wurden. Die mathematische Beziehung zwischen den Solltemperaturen der PT100-Sensoren und den Messwerten des LUNA OBR 4600 konnte wiederum durch einen linearen Zusammenhang bzw. ein Polynom 2. Ordnung definiert werden, siehe Formel 5.5. Die Auswertung der beiden Ansätze erfolgte getrennt voneinander durch eine Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell.

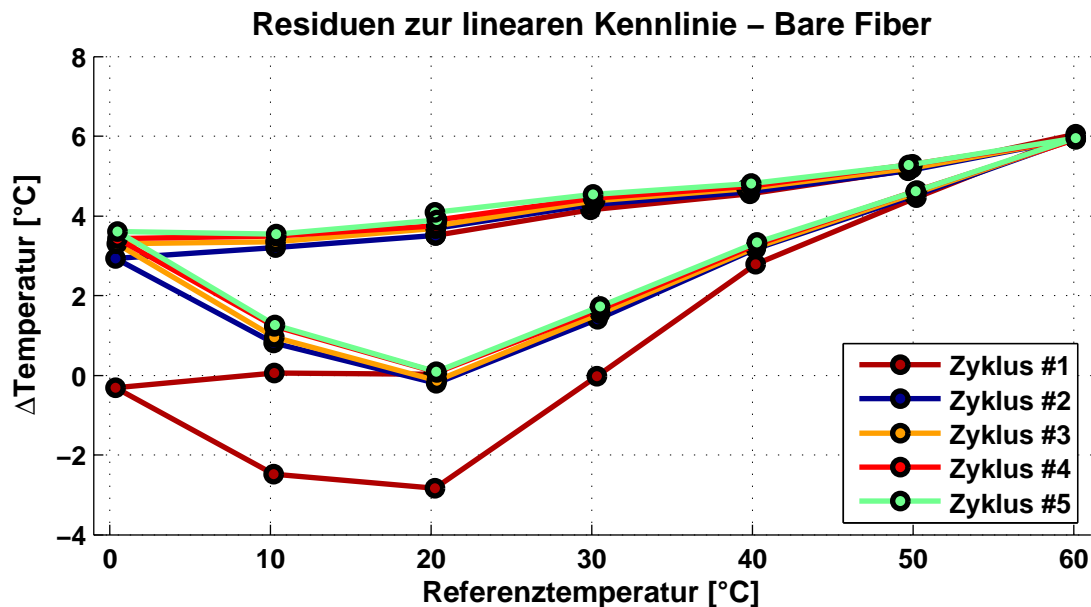


Abb. 5.18: Residuen der linearen Kennlinie einer Bare Fiber mit Acrylat-Beschichtung im Verhältnis zur Referenztemperatur

Abb. 5.18 zeigt die Residuen ($\Delta T = T_{PT100} - T_{Luna}$) der geschätzten linearen Kennlinie einer blanken Glasfaser mit Acrylat-Beschichtung im Verhältnis zur erfassten Referenztemperatur. Dabei ist ersichtlich, dass der erste gemessene Zyklus abermals wesentliche Abweichungen zu den weiteren Messungen aufweist, weshalb dieser im Zuge der Auswertung nicht mehr berücksichtigt wurde. Die Ursachen für dieses Verhalten könnten in der Beschaffenheit des Coatings (Acrylat) liegen, da andere untersuchte Bare Fibers diesen Effekt nur in geringerer Ausprägung zeigen.

Die Resultate der Ausgleichungen in Form der Temperatur-Koeffizienten inklusive zugehöriger theoretischer Standardabweichungen der linearen sowie der quadratischen Kennlinien sämtlicher untersuchter faseroptischer Sensoren sind in Tab. 5.6 angeführt. Zur besseren Interpretationsmöglichkeit können dieser Tabelle ebenfalls die mittleren Abweichungen zur Kennlinie $|e|_{\text{Mittel}}$

Tab. 5.9: Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren geschätzt für das Auftreten von Erwärmung und Abkühlung

Faseroptischer Sensor	$K_{T(1)} \left[\frac{1}{\text{GHz}} \right]$	$K_{T(2)} \left[\frac{1}{\text{GHz}^2} \right]$	$ e _{\text{Mittel}} [^{\circ}\text{C}]$	$ e _{\text{Max}} [^{\circ}\text{C}]$
Bare Fiber	-0.6203 ± 0.0065	—	1.03	4.07
Coating: Acrylat	-0.6357 ± 0.0065	$(+11.1 \pm 2.2) 10^{-4}$	1.46	3.91
Bare Fiber	-0.6482 ± 0.0061	—	0.75	2.17
Coating: Ormocer	-0.6490 ± 0.0061	$(+1.2 \pm 2.3) 10^{-4}$	0.81	2.23
Bare Fiber	-0.7839 ± 0.0081	—	1.78	4.25
Coating: Polyimide	-0.7840 ± 0.0081	$(+0.1 \pm 3.2) 10^{-4}$	1.78	4.24
Sensorkabel	-0.0749 ± 0.0010	—	0.40	1.37
BRUsens strain V1	-0.0772 ± 0.0010	$(+10.2 \pm 3.1) 10^{-6}$	0.20	0.72

sowie die maximale Differenz zwischen Hin- und Rückweg $|e|_{\text{Max}}$ entnommen werden. Es zeigt sich, dass die linearen Koeffizienten diverser untersuchter blanker Glasfasern einen Unterschied vom Faktor 10 gegenüber jenen des Sensorkabels BRUsens strain V1 aufweisen. Diese Differenzen lassen sich anhand der Umhüllung aus Kunststoff erklären, welche einen zusätzlichen Einfluss auf das thermische Verhalten des Sensorkabels ausübt. Aus diesem Einfluss ergibt sich auch eine wesentliche Steigerung der Auflösung im Rahmen der Temperaturmessung gegenüber den Bare Fibers, welche sich sowohl in den theoretischen Standardabweichungen als auch in den mittleren und maximalen Abweichungen widerspiegelt.

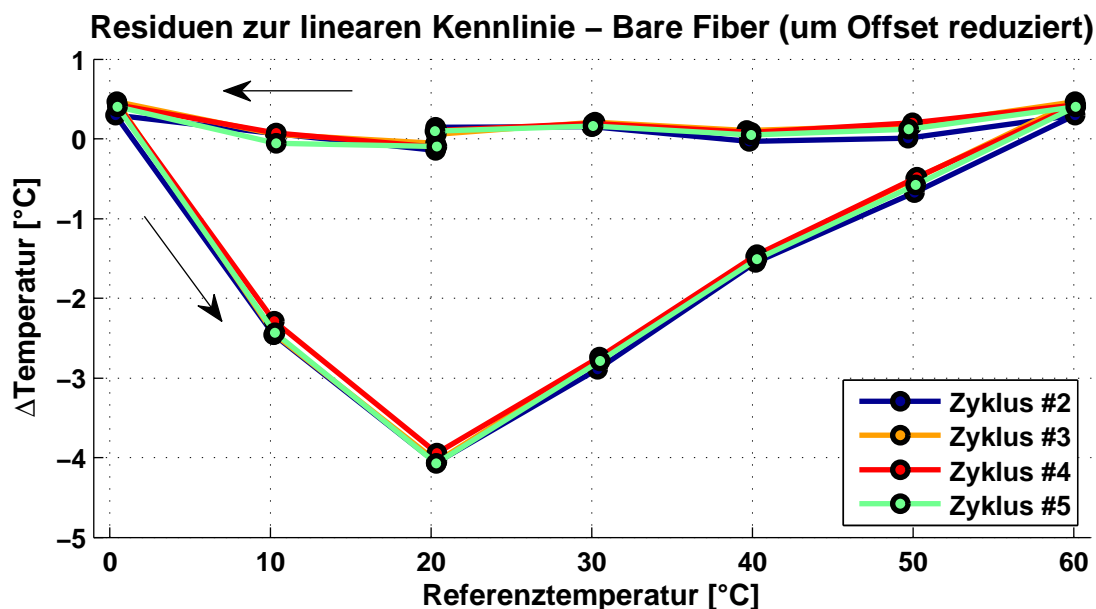


Abb. 5.19: Residuen der linearen Kennlinie einer Bare Fiber mit Acrylat-Beschichtung im Verhältnis zur Referenztemperatur reduziert um den Offset

In Abb. 5.19 sind die Residuen der linearen Kennlinie der blanken Glasfaser mit Acrylat-Beschichtung wiederum gegenüber der Referenztemperatur der PT100-Sensoren dargestellt, wobei allerdings eine Reduktion um den Offset des jeweiligen Zyklus durchgeführt wurde. Ana-

log zu den Untersuchungen des Dehnungsverhaltens zeigen sich Hysteresen zwischen Hin- und Rückweg, aus denen höhere Abweichungen zur Sensorkennlinie folgen. Diese entstehen zufolge einer irreversiblen Verformung der Bare Fiber, da sich die aufgebrachte Höchsttemperatur von 60 °C dem maximalen Einsatzbereich des Acrylat-Coatings annähert. Im Vergleich der gemittelten Residuen (Zyklus 2-5) mit anderen untersuchten Sensoren in Abb. 5.20 ist ersichtlich, dass die Hysteresen der Bare Fiber mitOrmocer-Beschichtung auf Grund ihrer höheren Einsatztemperatur eine kleinere Form aufweisen. Die minimalen Differenzen zwischen Hin- und Rückweg zeigen sich in der Darstellung der Kennlinie des Sensorkabels, welches eine wesentlich höhere Sensitivität auf Temperaturänderungen (siehe Tab. 5.9) besitzt.

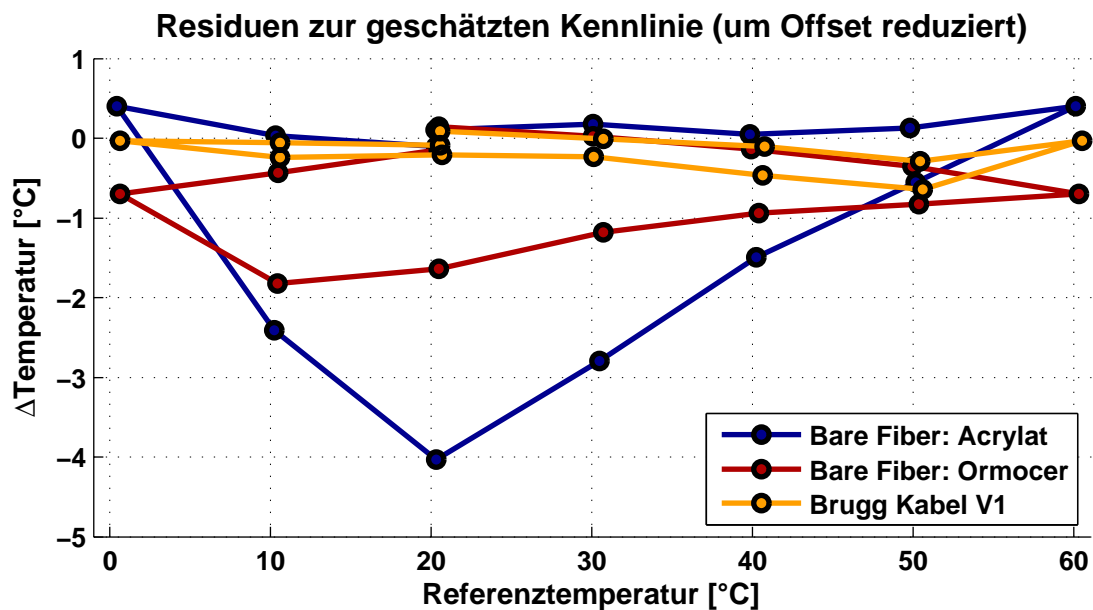


Abb. 5.20: Gemittelte Residuen der geschätzten Kennlinie unterschiedlicher Fasertypen im Verhältnis zur Referenzmessung des Interferometers reduziert um den Offset

Tab. 5.10: Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren, nur geschätzt für das Auftreten von Erwärmung

Faseroptischer Sensor	$K_{T(1)} \left[\frac{1}{\text{GHz}} \right]$	$K_{T(2)} \left[\frac{1}{\text{GHz}^2} \right]$	$ e _{\text{Mittel}} [^{\circ}\text{C}]$	$ e _{\text{Max}} [^{\circ}\text{C}]$
Bare Fiber	-0.5999 ± 0.0077	—	1.90	4.51
Coating: Acrylat	-0.6249 ± 0.0077	$(+21.4 \pm 2.8) 10^{-4}$	0.69	1.94
Bare Fiber	-0.6366 ± 0.0075	—	0.41	1.17
Coating: Ormocer	-0.6395 ± 0.0075	$(+6.8 \pm 2.8) 10^{-4}$	0.47	1.06
Bare Fiber	-0.7508 ± 0.0094	—	0.76	2.16
Coating: Polyimide	-0.7666 ± 0.0094	$(+18.2 \pm 4.0) 10^{-4}$	0.87	2.26
Sensorkabel	-0.0748 ± 0.0012	—	1.07	1.79
BRUsens strain V1	-0.0772 ± 0.0012	$(+11.4 \pm 4.0) 10^{-6}$	0.14	0.58

Tab. 5.11: Koeffizienten der linearen und quadratischen Kennlinie der untersuchten faseroptischen Sensoren, nur geschätzt für das Auftreten von Abkühlung

Faseroptischer Sensor	$K_{T(1)} \left[\frac{1}{\text{GHz}} \right]$	$K_{T(2)} \left[\frac{1}{\text{GHz}^2} \right]$	$ e _{\text{Mittel}} [^{\circ}\text{C}]$	$ e _{\text{Max}} [^{\circ}\text{C}]$
Bare Fiber	-0.6423 ± 0.0081	—	0.53	1.68
Coating: Acrylat	-0.6452 ± 0.0081	$(+2.6 \pm 2.9) 10^{-4}$	0.39	1.71
Bare Fiber	-0.6548 ± 0.0077	—	0.48	1.46
Coating:Ormocer	-0.6536 ± 0.0077	$(-3.0 \pm 2.9) 10^{-4}$	0.20	0.93
Bare Fiber	-0.8095 ± 0.0100	—	1.64	4.13
Coating: Polyimide	-0.7973 ± 0.0100	$(-15.6 \pm 4.2) 10^{-4}$	0.52	2.60
Sensorkabel	-0.0751 ± 0.0012	—	0.94	1.61
BRUsens strain V1	-0.0772 ± 0.0012	$(10.0 \pm 4.0) 10^{-6}$	0.14	0.41

In Anwendungen, in welchen lediglich Änderungen der Temperatur in eine Richtung auftreten, kann durch eine separate Schätzung für die Erwärmung bzw. für die Abkühlung des jeweiligen Sensors eine bessere Anpassung an die Kennlinie erreicht und eine Approximation mit geringeren Residuen zur Verfügung gestellt werden. Die Ergebnisse dieser partiellen Auswertungen sind in den Tab. 5.10 und 5.11 ersichtlich. Insbesondere die mittleren Abweichungen der Messwerte des Sensorkabels verdeutlichen, dass ebenso eine präzise Messung von Temperaturänderungen durch den Einsatz des faseroptischen Messsystems durchgeführt werden kann. Somit repräsentiert der LUNA OBR 4600 auch ein verteiltes Temperaturmesssystem, wobei die Dimension der berechneten mittleren Residuen der Standardabweichung von gängigen Temperaturfühlern, wie z.B. PT100-Sensoren, entspricht. Diese Präzision der Resultate kann jedoch nur unter den Voraussetzungen erreicht werden, dass die Temperaturänderungen lediglich in eine Richtung auftreten und eine ausreichende Zeitdauer für die Akklimatisierung des Sensorkabels berücksichtigt wird.

5.8 Extended Range Mode

Neben der normalen Reichweite von 30 bzw. 70 m bietet der LUNA OBR 4600 auch einen sogenannten Extended Range Mode, unter welchem eine Messung von bis zu 2 km erfolgen kann. Durch die Verlängerung der Reichweite kommt es jedoch zu einer Beeinflussung des abgetasteten Wellenlängenbereichs der Tunable Laser Source. Dieser muss durch den erweiterten Einsatzbereich beschränkt werden, um Interferenzerscheinungen zwischen Referenz- und Messsignal detektieren zu können, siehe Abschnitt 4.3.2. Anstatt des größtmöglichen Sweep-Bereichs von 41.87 nm im 30 m-Modus stehen somit im Extended Range Mode nur noch 0.40 nm zur Verfügung, wodurch wiederum der maximale Messbereich und die Präzision des Frequenzshifts beeinflusst werden.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass die Abtastung und Analyse der Faser nur in einem kleinen Bereich durch einen sogenannten Spot Scan durchgeführt wird. Die Länge dessen sensitiver Zone beträgt 2.4 m im Normalmodus und ungefähr 85 m im Extended Range Mode. Die wesentlichen Vorteile des Spot-Scans liegen dabei in der Verkürzung der Messzeit sowie

des geringeren Speicherbedarfs der Messdaten. Zusätzlich kann im Extended Range Mode mit Spot Scan eine Verbreiterung des Sweep-Bereichs auf 1.61 nm erreicht werden, welcher zu einer Erhöhung des maximalen Messbereichs führt.

Zum Vergleich der unterschiedlichen Messmodi und Reichweiten des LUNA OBR 4600 wurde ein Sensorkabel auf der faseroptischen Kalibrieranlage gedehnt und die Auswirkungen auf das Strain-Verhalten analysiert. Analog zu anderen Untersuchungen erfolgte die Überbrückung des Weges zwischen Sensor und Messinstrument mittels eines Patchcords mit einer Länge von 10 m, um eine Detektion des Strains innerhalb der normalen Reichweite gewährleisten zu können. Im Zuge sämtlicher Messungen im Extended Range Mode wurde das optische Signal über ein 300 m-Patchcord geführt, wodurch eine Situation ähnlich den realen Einsatzbedingungen simuliert werden konnte.

Auf Grund des kleinen Sweep-Bereichs von 0.40 nm im Extended Range Mode, aus welchem theoretisch ein maximaler Messbereich von $\pm 165 \mu\epsilon$ resultieren würde, war die maximale Strain im Rahmen der Überprüfungen limitiert. Daher wurde lediglich eine Dehnung von etwa 0.01 % ($\hat{=} 100 \mu\epsilon$) auf das Sensorkabel aufgebracht, um eine Auflösung des Strains unter allen untersuchten Reichweiten des Instruments gewährleisten zu können.

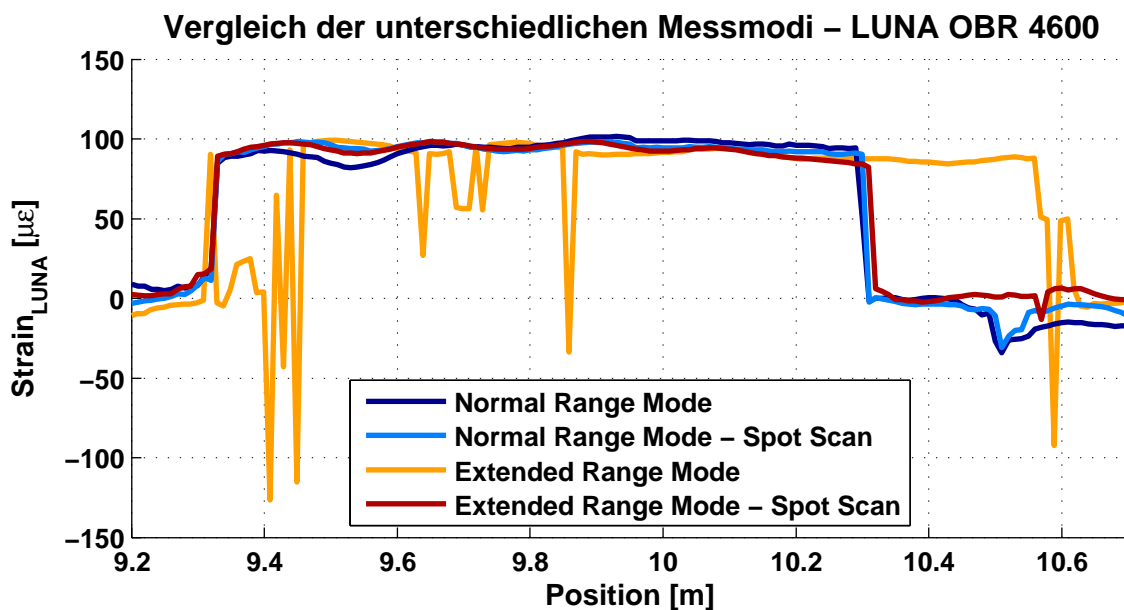


Abb. 5.21: Vergleich der unterschiedlichen Messmodi des LUNA OBR 4600

In Abb. 5.21 sind die Dehnungsverläufe aller untersuchter Messmodi des LUNA OBR 4600 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden dabei die Positionen der Messungen im Extended Range Mode bezüglich der Längendifferenz zwischen den unterschiedlichen Patchcords korrigiert. Es ist ersichtlich, dass die Resultate beider Messungen innerhalb der normalen Reichweite sowie jene des Spot Scans im Extended Range Mode ein ähnliches Verhalten im konstanten Bereich von ungefähr 9.3 bis 10.3 m aufweisen. Im Gegensatz dazu zeigt der Dehnungsverlauf im Extended Range Mode einzelne sprunghafte Änderungen. Diese entstehen durch den geringen Sweep-Bereich des Signals, weshalb eine exakte Bestimmung des Strains nicht möglich ist. Aus diesem Grund sollte eine Verwendung des Extended Range Mode ohne Spot Scan nur zur Messung von Verlusten entlang des Ausbreitungsweges mittels OTDR erfolgen.

In Abschnitt 4.3.1 wurden Probleme des LUNA OBR 4600 infolge von Verdrehungen bzw. Vibrationen des Sensorkabels erläutert. Diese führen zu zirkulierenden Polarisationszuständen des Lichts, welche die Detektion von Dehnungen bzw. Temperaturunterschieden beeinflussen. Zur Untersuchung dieser Effekte wurden künstliche Bewegungen auf den ersten Metern des 300 m-Patchcords simuliert. Dieser Messaufbau garantierte ein konstantes Verhalten des Strains entlang des untersuchten Bereichs auf der faseroptischen Kalibrieranlage. Die Erfassung der Dehnung des Sensorkabels erfolgte unter Einsatz des Spot Scans im Extended Range Mode.

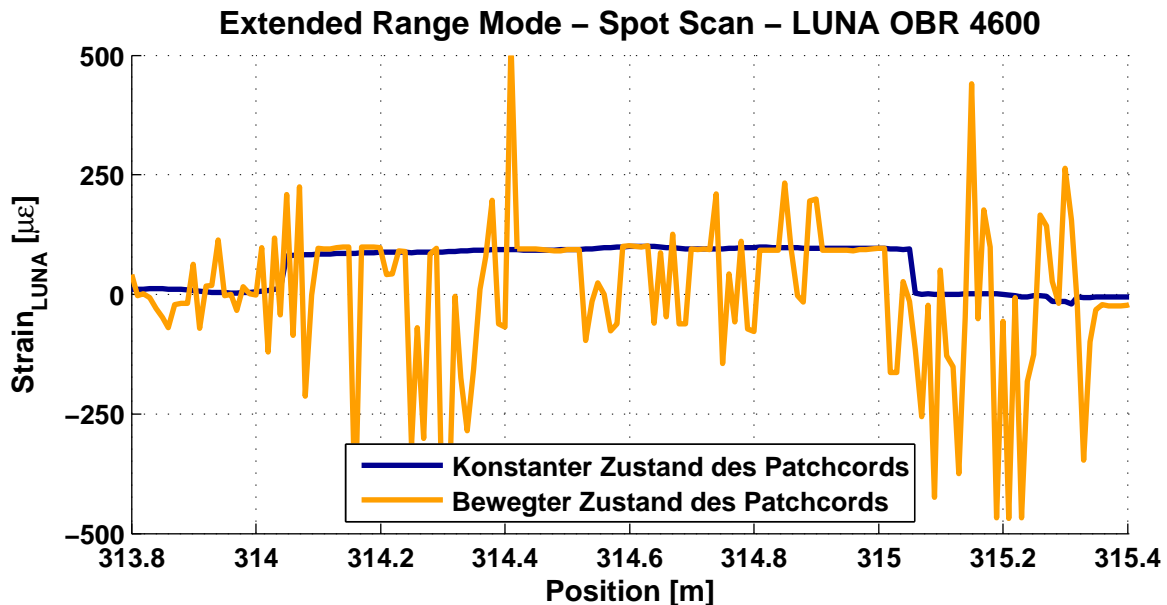


Abb. 5.22: Auswirkungen von Vibrationen und Verdrehungen auf die erfassten Dehnungen

Abb. 5.22 zeigt die Auswirkungen der unregelmäßigen Vibrationen und Verdrehungen auf den detektierten Dehnungsverlauf. Im Gegensatz zu einer Messung im unbewegten Zustand ist zu sehen, dass sprunghafte Änderungen des Strains auftreten und eine zuverlässige Erfassung nicht gewährleistet werden kann.

In den Polarisationszuständen des OBR-Signals sind Abweichungen auf den ersten 20 Metern (siehe Abb. 5.23) zum Referenzsignal zu erkennen, die ab einer Position von ungefähr 2.0 m auftreten. Diese Stelle repräsentiert dabei den Übergang auf das 300 m-Patchcord und somit jenen Punkt, ab welchem Bewegungen simuliert wurden. Betrachtet man die Differenzen in den Polarisationszuständen im Verhältnis zur Referenzmessung in Abb. 5.24, zeigt sich außerdem die Entstehung eines zirkulierenden Verhaltens. Dieses setzt sich über die gesamte Faser bis hin zum konstanten Bereich auf der Kalibrieranlage fort, wodurch eine Beeinflussung in der Detektion des Frequenzshifts folgt.

Zusätzlich zur Stabilität des faseroptischen Sensors sind somit auch Bewegungen des Verbindungskabels zu beachten, um zuverlässige Resultate bestimmen zu können. Dies trifft insbesondere auf Anwendungen, die eine längere Zuleitung des Sensorkabels zum Messobjekt erfordern, wie z.B. in der Geotechnik zu.

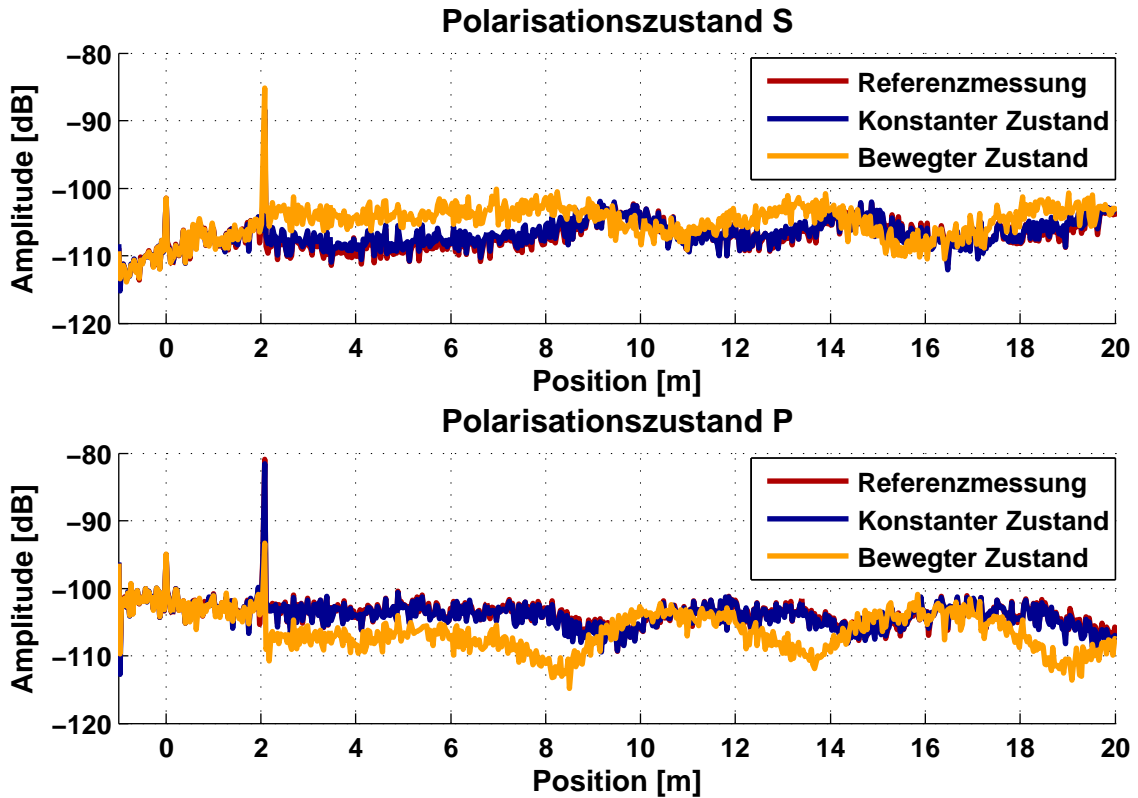


Abb. 5.23: Polarisation des OBR-Signals in unterschiedlichen Zuständen des Sensorkabels

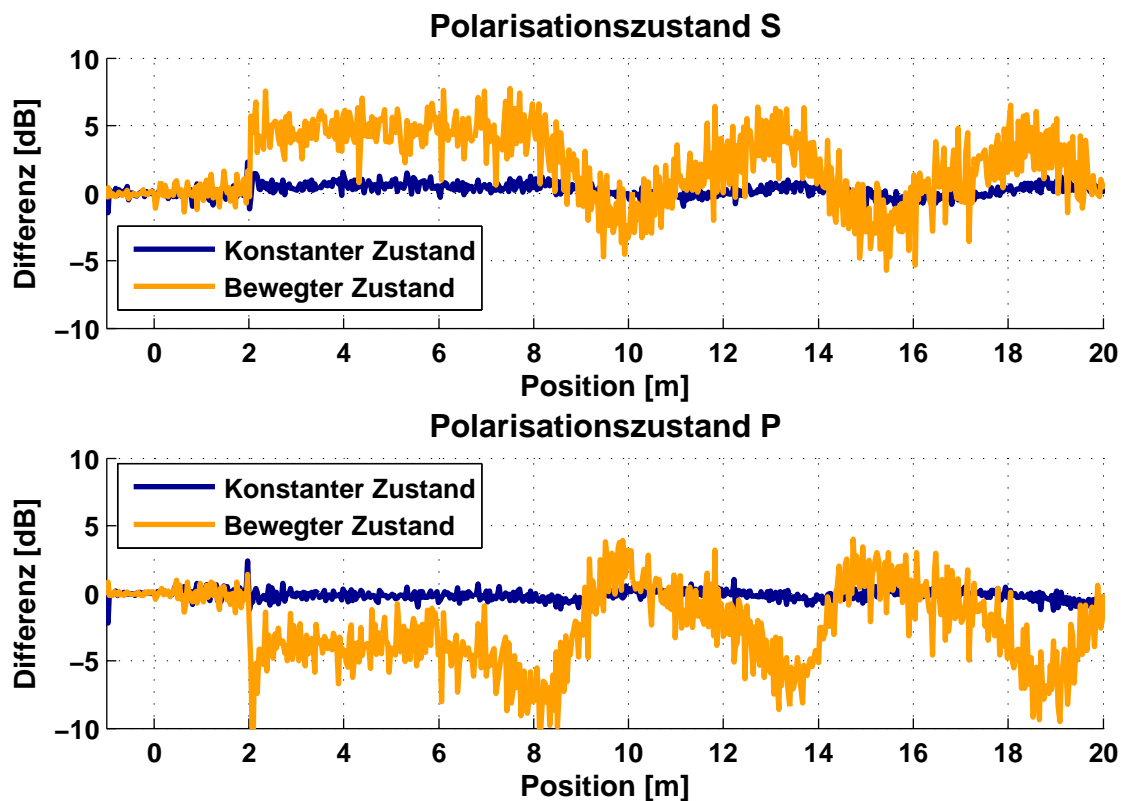


Abb. 5.24: Differenzen in den Polarisationen des OBR-Signals im Verhältnis zur Referenzmessung

Kapitel 6

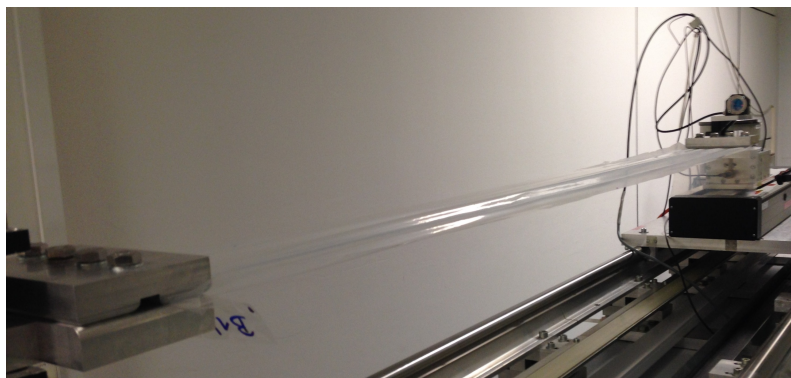
Untersuchung der Dehnungen dünnhäutiger Oberflächen

Auf Grund ihres geringen Gewichts und ihrer hohen Flexibilität bieten blanke Glasfasern eine zusätzliche Erweiterung des Potentials faseroptischer Messsysteme. Beispielsweise kann im Zuge der Instrumentierung durch deren Verwendung eine bessere Anpassung des Sensors sowie eine geringe Beeinflussung des Messobjekts erreicht werden. Jedoch ist ihre Einsatzfähigkeit unter rauen Installationsbedingungen wie z.B. im Rahmen geotechnischer Anwendungen angesichts ihrer hohen Bruchempfindlichkeit eingeschränkt.

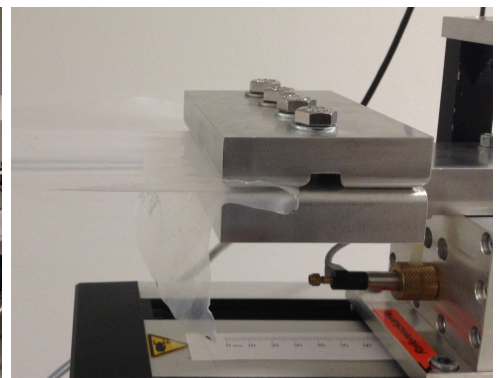
Nachfolgend werden durchgeführte Untersuchungen der Dehnungen einer dünnhäutigen Oberfläche aus Kunststoff erläutert, welche mit einer blanken Glasfaser instrumentiert wurde. Um die verteilte Erfassung des Dehnungsverlaufs entlang dieser Membran gewährleisten zu können, hatte dabei vor allem die Beständigkeit der Verbindung zwischen Objekt und Bare Fiber eine besondere Bedeutung.

6.1 Untersuchung der Membran

Die Instrumentierung mittels Glasfasersensorik erfordert zusätzlich zur Kalibrierung des faseroptischen Sensors auch eine separate Analyse der Oberfläche bzw. des Objekts, um die Resultate der Messungen besser interpretieren zu können. Aus diesem Grund wurden im vorliegenden Fall zunächst die Eigenschaften der Membran untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten in weiterer Folge ein wichtiger Indikator in der Wahl des faseroptischen Sensors sein und die Interpretation späterer Messungen der Verklebung zwischen Sensor und Membran erleichtern.



(a) Dehnung der Membran



(b) Klemmvorrichtung

Abb. 6.1: Untersuchung der Membran mittels faseroptischer Kalibrieranlage

Im Rahmen der Untersuchungen wurden mehrere Samples einer dünnhäutigen Kunststoffolie auf der Kalibrieranlage für faseroptische Sensoren geprüft, siehe Abb. 6.1a. Dazu erfolgte die Fertigung spezieller Adapter, dargestellt in Abb. 6.1b, die eine zuverlässige Klemmung der Membran gewährleisten sollten. Die Dimension eines einzelnen untersuchten Samples konnte ungefähr mit 1.20 m Länge und 0.15 m Breite angegeben werden. Jedoch wurde die Überprüfungsgröße in Form des Abstands zwischen den beiden Adaptern der Kalibrieranlage mit einem Meter gewählt. Die resultierende Überlänge des Samples konnte zur Verdoppelung des Kunststoffs auf der Klemmfläche des Adapters genutzt und somit eine robuste Klemmung gewährleistet werden.

Analog zur Kalibrierung diverser faseroptischer Sensoren in Abschnitt 5.7 erfolgte die Versuchsdurchführung in Zyklen, um das Verhalten des Kunststoffs im Zuge von Dehnung bzw. Verkürzung vergleichen und vermutete Hysteresen detektieren zu können. Zur Simulation von tatsächlichen Anwendungsbedingungen betrug die aufgebrachte Dehnung dabei 4.0 %, was einer Längenänderung der Membran von 40 mm entspricht. Die Anzahl von fünf Zyklen wurde gegenüber anderen Untersuchungen nicht verändert und die Schrittweite mit 0.25 % gewählt. Als Referenz zur jeweiligen Längenänderung der Oberfläche diente die entstehende Kraft, welche mittels des Kraftaufnehmers der Kalibrieranlage gemessen werden konnte.

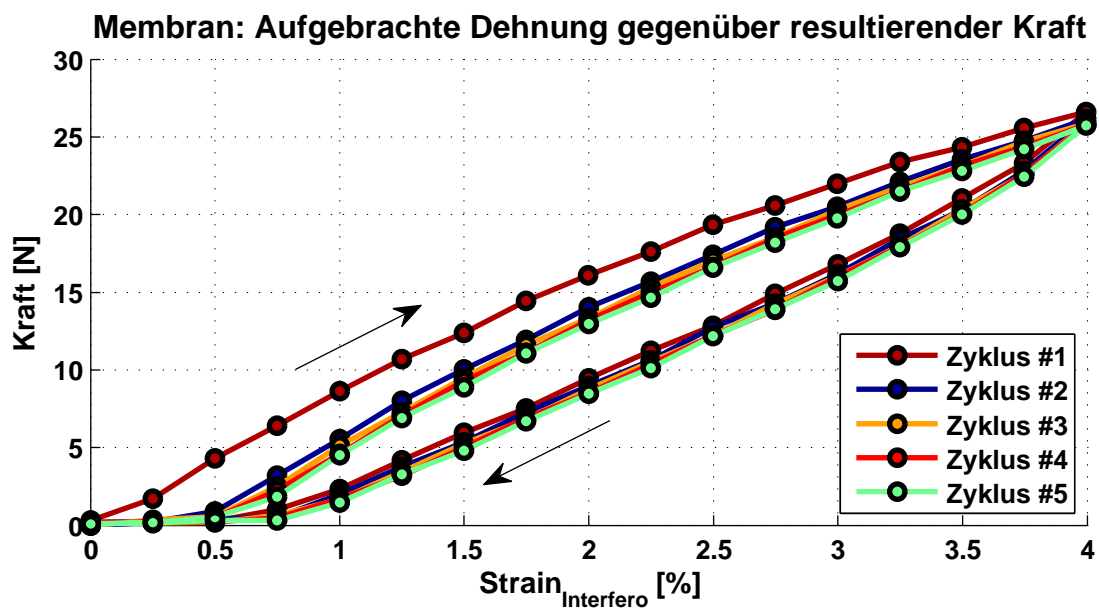


Abb. 6.2: Dehnung der Membran im Verhältnis zur resultierenden Kraft

Die Ergebnisse eines untersuchten Samples in Form der Gegenüberstellung von aufgebrachter Dehnung zu resultierender Kraft ist in Abb. 6.2 ersichtlich. Es bestätigt sich die Vermutung von Hysteresen, welche im Vergleich zwischen Dehnung bzw. Verkürzung der Oberfläche auftreten. Nach dem ersten vollständigen Auszug des Kunststoffs ist jedoch ein konstantes Verhalten in den Kraftdaten zu beobachten. Des Weiteren kann die maximal resultierende Kraft mit ungefähr 26 N bei einer Dehnung von 4.0 % angegeben werden.

6.2 Analyse geeigneter faseroptischer Sensoren

Die Selektion eines geeigneten faseroptischen Sensors ist immer von der geplanten Anwendung abhängig. Deshalb wurde im Zuge der Problemstellung bereits definiert, dass auf Grund ihres geringen Gewichts und ihrer hohen Flexibilität lediglich eine Bare Fiber die Voraussetzungen für den Einsatz erfüllt. Zusätzlich sollte die instrumentierende Oberfläche in ihrer tatsächlichen Verwendung Dehnungen in einem Bereich von bis zu 4.0 % oder mehr sowie Temperaturen von ± 50 °C bewältigen. Diese Faktoren mussten im Zuge des Auswahlverfahrens berücksichtigt werden, weshalb eine Analyse unterschiedlicher blanker Glasfasern durchgeführt wurde.

Dabei erfolgte zunächst die Bestimmung der Bruchkraft bzw. Bruchdehnung des jeweiligen faseroptischen Sensors. Neben den aus anderen Laboruntersuchungen bekannten Bare Fibers mit Ormocer bzw. Polyimide-Beschichtung wurden zusätzlich blanker Glasfasern mit einem Coating aus Acrylat (SMF-28 und SMF-28e) verwendet. Diese konnten mittels des pneumatischen Klemmsystems auf der Kalibrieranlage befestigt und dadurch schrittweise bis zum Bruch gedehnt werden. Im Gegensatz zu den Untersuchungen der Membran wurde als Abstand zwischen den einzelnen Stufen ein Strain von 0.125 % gewählt, um insbesondere im unmittelbaren Bereich der Bruchdehnung eine detaillierte Auflösung erreichen zu können.

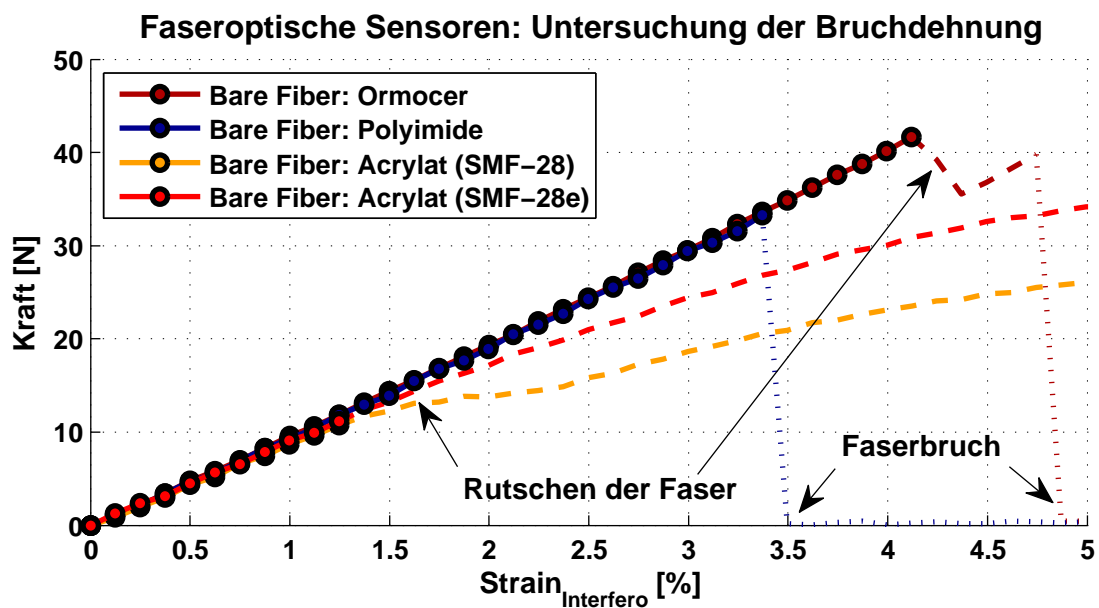


Abb. 6.3: Untersuchung der Bruchdehnung ausgewählter blanker Glasfasern

Abb. 6.3 zeigt die ausgelesenen Strain-Werte des Interferometers im Verhältnis zu den erfassten Messdaten des Kraftaufnehmers der Kalibrieranlage aller untersuchten Glasfasern. Ab dem Zeitpunkt des Faserbruchs (gepunktete Linie) bzw. einem Rutschen der Faser (strichlierte Linie) ist der Verlauf in nicht durchzogener Form dargestellt. Es zeigt sich, dass das untersuchte Sample der Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung die höchste Bruchdehnung aufweist. Jedoch kann diese auf Grund des Rutschens der Faser ab einem Strain von 4.25 % nicht exakt bestimmt werden. Als Ursache für dieses Verhalten wird ein Lösen der Beschichtung innerhalb der pneumatischen Klemmungen vermutet. Dadurch würde für Faserkern bzw. -mantel die Möglichkeit eines Nachgebens innerhalb des Adapters bestehen, was den kurzzeitigen Rückgang in den erfassten Kraftdaten erklären könnte.

Im Zuge der Untersuchungen der beiden Fasern mit Acrylat-Beschichtung konnte bereits optisch festgestellt werden, dass der Dehnungsvorgang ein Lösen der Beschichtung bewirkte. Aus diesem Grund ist ein gleitender Kraftverlauf in den Messdaten ab einem Strain von ungefähr 1.25 % zu beobachten, wodurch eine sinnvolle Interpretation bezüglich der maximalen Dehnung nicht möglich ist. Im Gegensatz dazu zeigt sich in der Darstellung des Samples der Bare Fiber mit Polyimide-Coating kein Rutschen, jedoch ist ein Bruch der Faser beim Übergang auf eine Dehnung von 3.5 % zu erkennen.

Aus den Überprüfungen geht hervor, dass lediglich die blanke Faser mit Ormocer-Beschichtung einen Strain von mehr als 4.0 % erfassen konnte, bevor eine Beeinflussung durch Rutschen bzw. ein Faserbruch auftrat. Des Weiteren weist die Ormocer-Beschichtung typischerweise einen breiten Temperaturbereich von ungefähr ± 200 °C auf. Deshalb wurden sämtliche nachfolgende Untersuchungen unter Verwendung dieses Fasertyps durchgeführt.

Das zyklische Verhalten der blanken Glasfasern wurde im Rahmen der Bestimmung der Strain-Koeffizienten (siehe Abschnitt 5.7.1) lediglich bis zu einer Dehnung von 1 % überprüft. Um einen Vergleich zwischen Bare Fiber und dünnhäutiger Oberfläche zu gewährleisten, erfolgten, in weiterer Folge Untersuchungen in einem höheren Dehnungsbereich. Analog zur Analyse der Membran wurde dabei das Glasfaser-Sample in fünf Zyklen bei einer maximalen Dehnung von 4.0 % und einer Schrittweite von 0.25 % überprüft.

Faseroptische Sensoren: Aufgebrachte Dehnung gegenüber resultierender Kraft

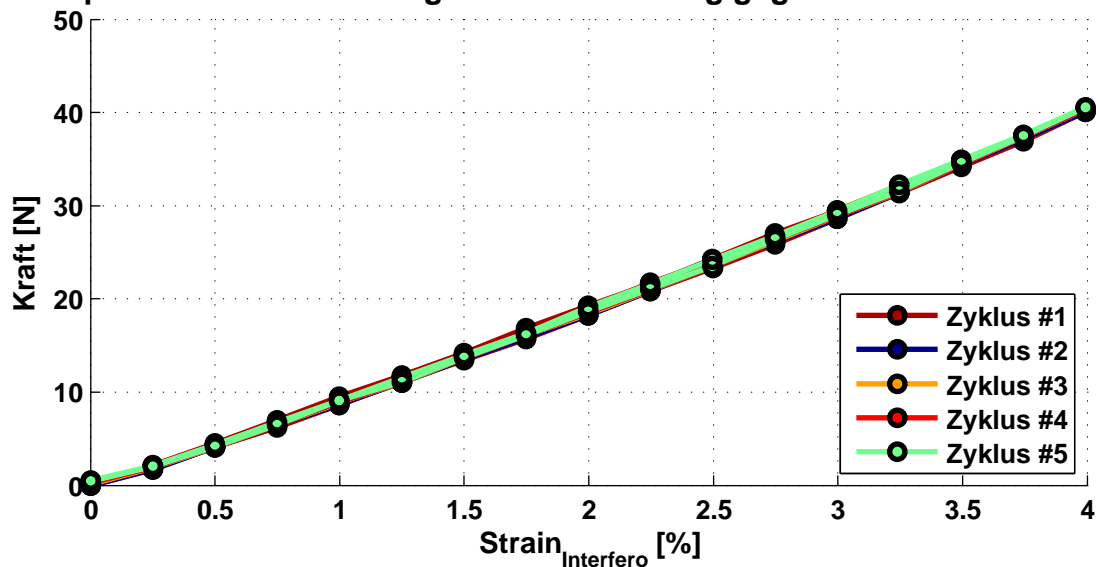


Abb. 6.4: Dehnung einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung im Verhältnis zur resultierenden Kraft

Die Resultate in Abb. 6.4 zeigen im Gegensatz zur Membran keine visuell erkennbaren Differenzen im Kraftverlauf zwischen Dehnung und Verkürzung des Sensors. Die maximal erfasste Kraft betrug dabei in etwa 40 N bei einem aufgebrachten Strain von 4.0 %. Die unterschiedlichen Steigungen im Anfangsbereich zwischen 0.0 und 0.5 % lassen sich anhand der zu geringen Vorspannung der Bare Fiber erklären. Auf Grund des sonst annähernd linearen Verlaufs der Kraftmessdaten kann jedoch davon ausgegangen werden, dass keine Beeinflussung der Faser wie z.B. durch ein Rutschen des Coatings vorliegt und die Faser mit Ormocer-Beschichtung für die Verklebung mit der dünnhäutigen Oberfläche im Rahmen dieser Anwendung geeignet ist.

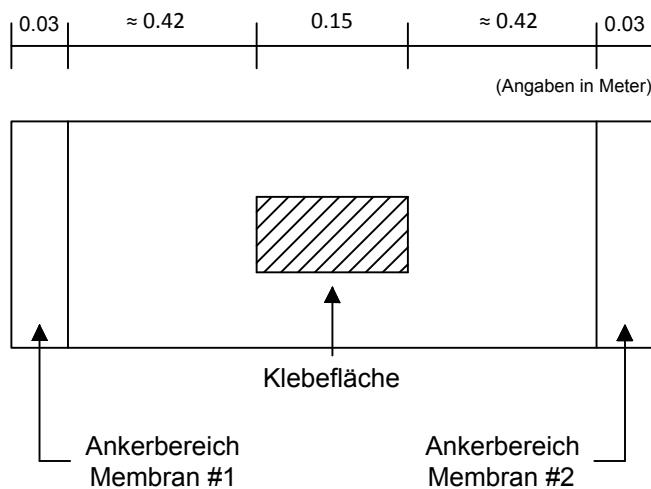
6.3 Untersuchung möglicher Klebstoffe

In messtechnischen Aufgaben, welche die Erfassung von Dehnungen zum Ziel haben, ist die Verbindung zwischen Sensor und Objekt Oberfläche von großer Bedeutung. Diese muss zuverlässig über die gesamte Messdauer bestehen, um ein Übergehen der Deformation des Messobjekts gewährleisten zu können. Im vorliegenden Anwendungsfall sollte die dünnhäutige Oberfläche aus Kunststoff mit der blanken Glasfaser verklebt werden. Auf Grund der Wichtigkeit dieser Verbindung wurden vorab unterschiedliche Klebstoffe aus diversen Einsatzbereichen getestet, siehe Tab. 6.1. Dabei erfolgte jeweils eine Verklebung von zwei Membran-Flächen über einen Bereich von 15 cm Länge sowie 2 cm Breite.

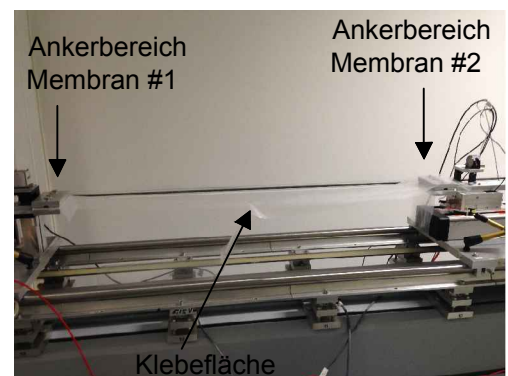
Tab. 6.1: Untersuchte Klebstoffe zur Verbindung des faseroptischen Sensors mit der Membran

Bezeichnung	Beschreibung
3M 91022	Silikon-Transfer-Klebeband
Loctite 454	Universaler Sofortklebstoff
Loctite EA 9497	Epoxidharz-Klebstoff
Uhu 47855	Montage- und Dichtkleber
unbekannt	Sanitärsilikon

Nach Beachtung der jeweiligen Aushärtezeit des Klebstoffs wurden die Prüfmuster einer händischen Zugüberprüfung unterzogen. Es zeigte sich, dass lediglich das Silikon-Transfer-Klebeband des Herstellers 3M die Beständigkeit der Verbindung zwischen den beiden Oberflächen zuverlässig aufrechterhalten konnte. Aus diesem Grund wurde ein Sample mit der Länge von einem Meter unter Verwendung dieses Klebstoffs hergestellt. Die Verklebung erfolgte wiederum nur über einen Bereich von 15 cm Länge sowie 2 cm Breite, siehe Abb. 6.5a. Zur kontrollierten Überprüfung der Zuverlässigkeit dieser Verklebung wurde eine Untersuchung auf der faseroptischen Kalibrieranlage durchgeführt, wobei die Befestigung jeweils einer Membran-Fläche an Interferometer- und Zueinheit erfolgte, siehe Abb. 6.5b. Dadurch konnten entgegengesetzte Zugkräfte simuliert werden, die im Falle eines Nachgebens des Klebstoffs zu einem Verlust im Verlauf der erfassten Kraftmessdaten führen würden. Des Weiteren ermöglichten diese Unter-



(a) Schematische Darstellung des Prüfmusters



(b) Verklebte Oberfläche

Abb. 6.5: Darstellung der Verklebung von zwei Membran-Flächen

suchungen, analog zur Analyse des faseroptischen Sensors sowie der einzelnen Membran, die Bestimmung des zyklischen Verhaltens der Klebeverbindung. Deshalb wurde wiederum eine Messung in fünf Zyklen bei einer maximalen Dehnung von 4.0 % und einer Schrittweite von 0.25 % durchgeführt.

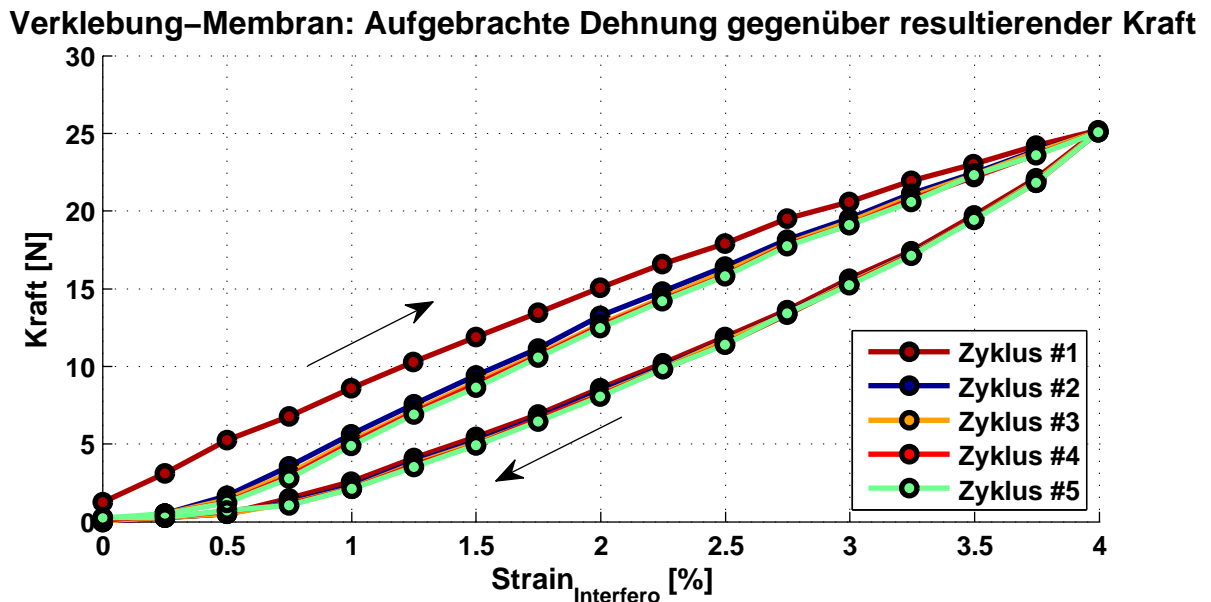


Abb. 6.6: Dehnung der verklebten Membran im Verhältnis zur resultierenden Kraft

In Abb. 6.6 sind die Ergebnisse der Untersuchungen in Form der aufgebrachten Dehnungen im Verhältnis zur resultierenden Kraft dargestellt. Der Verlauf der erfassten Kraftmessdaten zeigt dabei nur minimale Abweichungen zu Abb. 6.2, in welcher der Kraftverlauf einer einzelnen Membran ersichtlich ist. Neben dem Auftreten von Hysterese im Vergleich zwischen Dehnung bzw. Verkürzung der Klebeverbindung ist somit abermals ein konstantes Verhalten nach dem ersten vollständigen Auszug zu beobachten. Auf Grund dieser Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Beständigkeit des Klebstoffs innerhalb des untersuchten Bereichs gegeben und eine zuverlässige Verbindung des faseroptischen Sensors mit der dünnhäutigen Oberfläche durchführbar ist.

6.4 Verbindung des faseroptischen Sensors mit dünnhäutiger Oberfläche

In den Überprüfungen der Membran, des faseroptischen Sensors und des Klebstoffs konnte gezeigt werden, dass diese zur Herstellung einer instrumentierten Oberfläche geeignet sind. Abschließend musste nun eine perfekte Abstimmung der ausgewählten Einzelkomponenten erreicht werden, um eine zuverlässige Verbindung sowie in weiterer Folge eine kontinuierliche Erfassung von Dehnungen entlang der Membran gewährleisten zu können. Die Ausstattung der einzelnen Prüfmuster mit der blanken Glasfaser erfolgte jeweils in der Klebeverbindung zwischen den beiden Membran-Flächen, welche eine Breite von etwa 2 cm aufwies. Dabei wurden zwei unterschiedliche Varianten der Verklebung getestet, woraus zwei verschiedene Samples resultierten. Aus deren Untersuchung auf der faseroptischen Kalibrieranlage sollten Erkenntnisse für zukünftige Projekte dieser Art gewonnen werden.

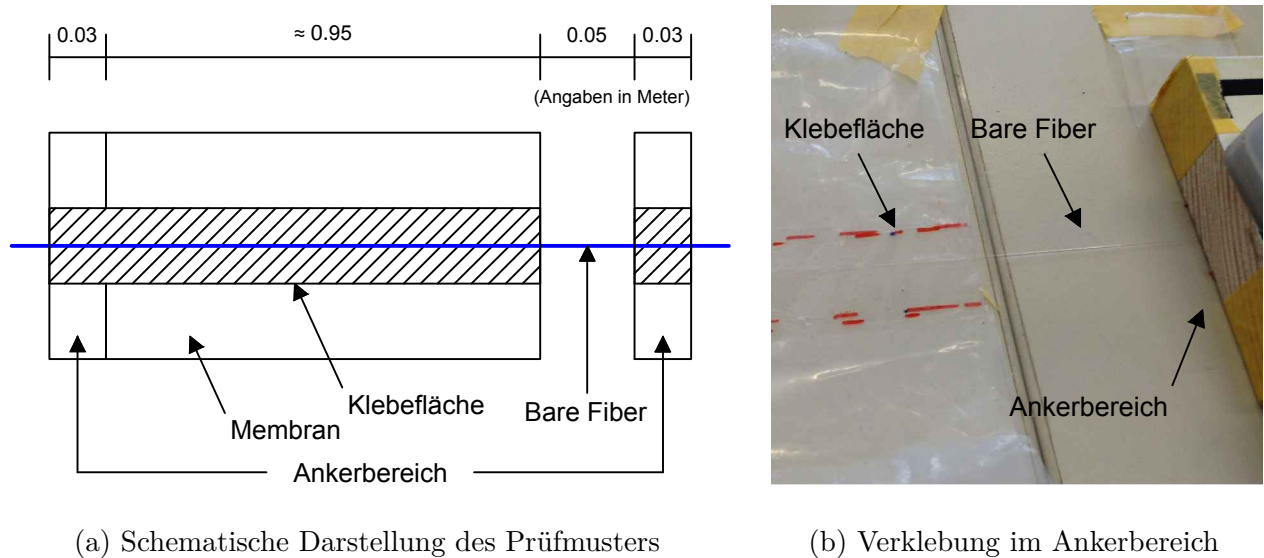


Abb. 6.7: Darstellung der partiellen Verklebung zwischen Membran und Bare Fiber

Das erste Sample wurde so gefertigt, dass keine durchgehende Verklebung zwischen blanker Glasfaser und Membran bestand, siehe Abb. 6.7b. Deshalb wird dieses in weiterer Folge als partielle Verklebung bezeichnet. Deren Aufbau, dargestellt in Abb. 6.7a, wurde in eine durchgehende Klebeverbindung mit einer Länge von 95 cm, einen freiliegenden Faserbereich (5 cm) sowie in die zwei Ankerbereiche mit jeweils 3 cm untergliedert. Im Zuge von Dehnungsversuchen auf der faseroptischen Kalibrieranlage stand somit ein 1m-Bereich zur Verfügung, in welchem das Sample überprüft werden konnte. Ziel dieser Untersuchungen der partiellen Verklebung war die Bestimmung der Strainverteilung zwischen Bare Fiber und verklebter Membran. Außerdem sollte durch diese Versuchsanordnung ein möglicher Auszug der blanken Glasfaser aus der Klebeverbindung bei einer kontinuierlichen Erhöhung der Dehnung detektiert werden. Der Ablauf der Überprüfungen auf der Kalibrieranlage sah eine stufenweise Erhöhung der Dehnung um 0.25 % vor. Dabei sollte diese Steigerung des Strains bis zu einer visuellen Feststellung des Auszugs der Faser aus der Membran durchgeführt und danach dieses Strain-Level über längeren Zeitraum gehalten werden, um eine Analyse der Verklebung unter maximal ausführbarer Dehnung zu ermöglichen.

In Abb. 6.8 sind die erfassten Strain-Werte des LUNA OBRs über die verteilte Länge der Membran lediglich bis zu einer aufgetragenen Gesamtdehnung von 2.5 % dargestellt, da ein Bruch der Messfaser beim Übergang auf eine Dehnung von 2.75 % auftrat. Die unterschiedlichen Stufen sind durch einen farblichen Verlauf gekennzeichnet. Es ist ersichtlich, dass keine homogene Verteilung des Strains über den partiell verklebten Sample vorliegt. In jenem Bereich, in welchem lediglich die blanken Glasfaser die aufgetragenen Dehnungen aufnimmt, sind dabei die größten Strain-Werte zu erkennen. Des Weiteren zeigt sich, dass der Übergang zwischen Bare Fiber und verklebter Oberfläche nicht abrupt auftritt, sondern Verschmierungen des Dehnungsverlaufs entstehen. Diese können in etwa über die halbe Länge der untersuchten Oberfläche beobachtet werden. Die letzten beiden erfassten Profile zeigen eine Sprungstelle im Strain-Verlauf bei einer Position von ungefähr 0.9 m. Auf Grund des Faserbruchs bei einer Dehnung von 2.75 % ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um einen Mikroriss handelte.

Vor dem Faserbruch war visuell kein Auszug der Faser aus der verklebten Oberfläche zu erkennen. Da die erfassten Strain-Werte jeder Stufe im Mittelwert der aufgetragenen Dehnung

der Kalibrieranlage entsprechen, ist daher davon auszugehen, dass eine feste Verbindung zwischen Sensor und Objekt vorlag. Jedoch war infolge des Bruchs der Faser eine Analyse des Langzeitverhaltens nicht möglich und die Erkenntnisse konnten lediglich über eine kurze Untersuchungsdauer erlangt werden.

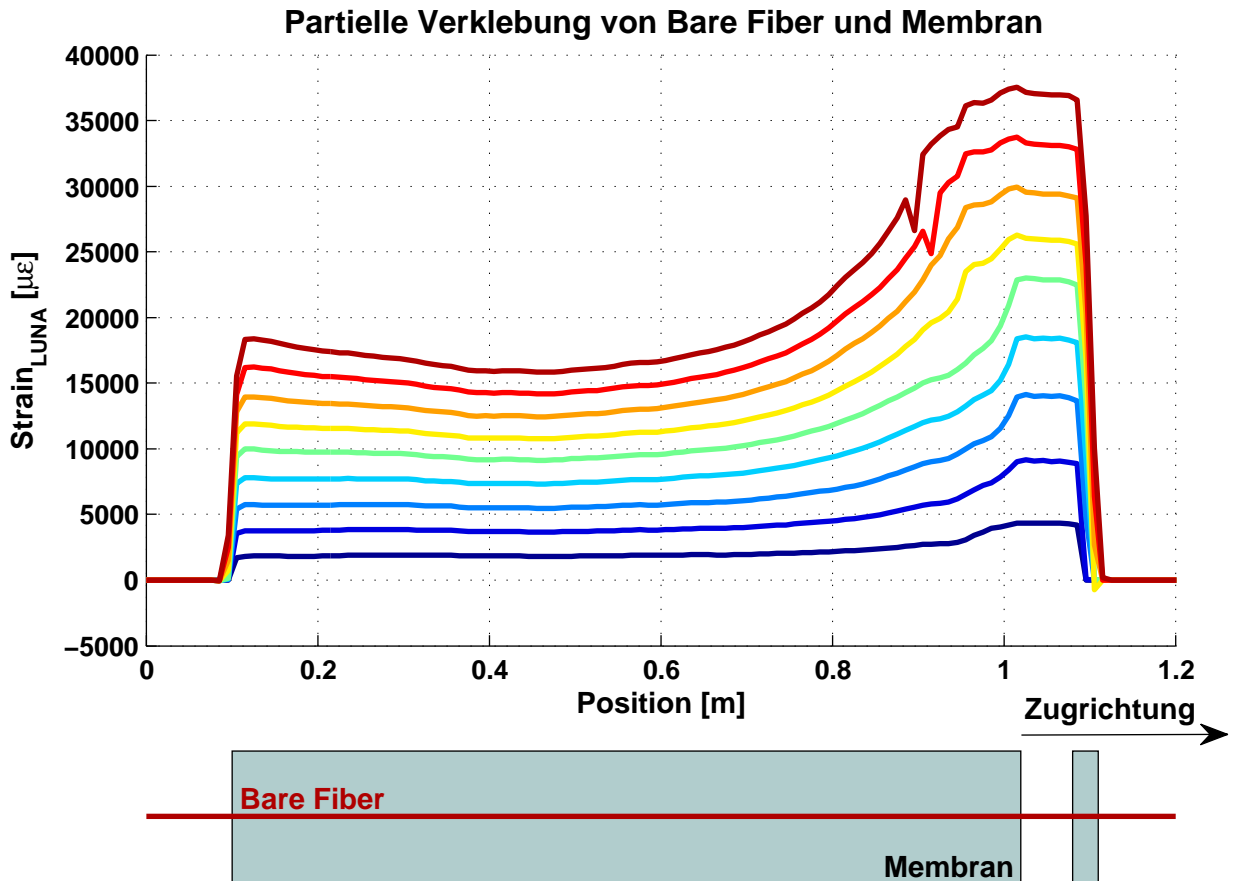
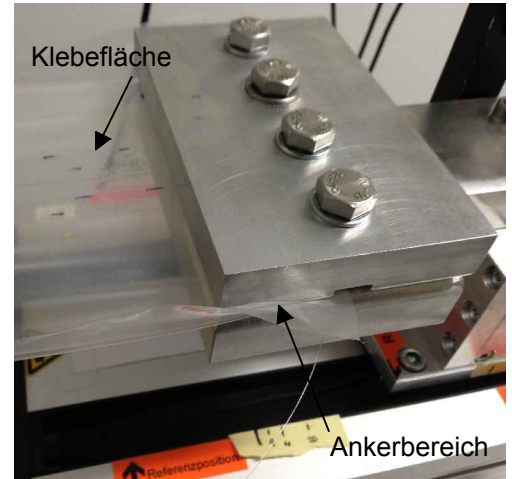
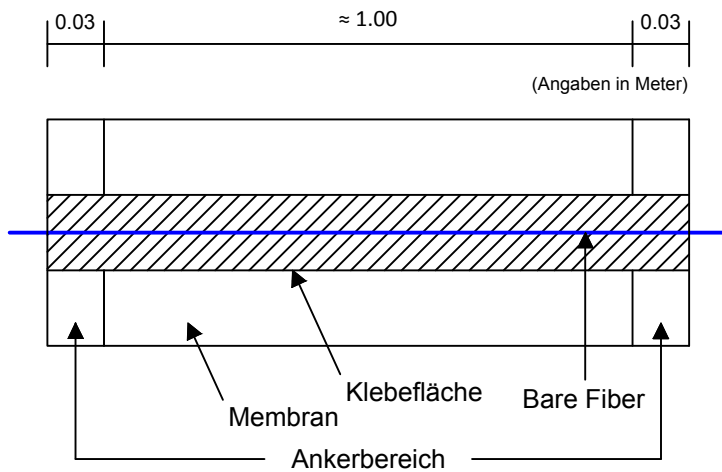


Abb. 6.8: Erfasste Strain-Werte der partiellen Verklebung von Bare Fiber und Membran

Im zweiten erstellten Sample wurde die Oberfläche, wie in Abb. 6.9a dargestellt, ohne Unterbrechung mit dem faseroptischen Sensor verbunden, wodurch eine flächenhafte Verklebung mit einer Länge von 1.06 m entstand. Auf Grund der benötigten Membran-Fläche zur Fixierung im Ankerbereich (siehe Abb. 6.9b) konnte wiederum ein Meter des Prüfmusters zur Analyse auf der faseroptischen Kalibrieranlage verwendet werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen sollte der Dehnungsverlauf entlang der gesamten Oberfläche kontinuierlich erfasst und die Beständigkeit der Klebeverbindung zwischen Membran und faseroptischem Sensor überprüft werden. Die Versuchsdurchführung auf der Kalibrieranlage erfolgte in Form eines Stufenprofils, um ebenso das zyklische Verhalten der flächenhaften Verklebung analysieren sowie einen Vergleich mit vorhergehenden Überprüfungen der einzelnen Komponenten gewährleisten zu können. Dazu sollte die Messung des Strains wiederum in fünf Zyklen bei einer maximalen Dehnung von 4.0 % und einer Schrittweite von 0.25 % durchgeführt werden.

Abb. 6.10 zeigt die Resultate der Untersuchungen, wobei der Farbverlauf analog zur Darstellung der partiellen Verklebung die stufenweise Erhöhung des Strains charakterisiert. Sämtliche erfasste Dehnungsprofile der flächenhaften Verklebung von Bare Fiber und Membran weisen dabei einen regelmäßigen Verlauf auf. Jedoch kann ein gewisser Durchhang der Oberfläche beobachtet

werden, welcher durch das Eigengewicht von Membran, Glasfaser und Klebstoff entsteht. Die Darstellung zeigt außerdem größere erfasste Dehnungswerte im Ankerbereich an der Zugscheinheit als im Bereich des Adapters der Interferometereinheit. Als Ursache für dieses Verhalten wird eine Nachwirkung der Zugkraft vermutet, die zum Zeitpunkt der Messung den Strain-Verlauf noch beeinflusst.



(a) Schematische Darstellung des Prüfmusters

(b) Verklebung im Ankerbereich

Abb. 6.9: Darstellung der flächenhaften Verklebung zwischen Membran und Bare Fiber

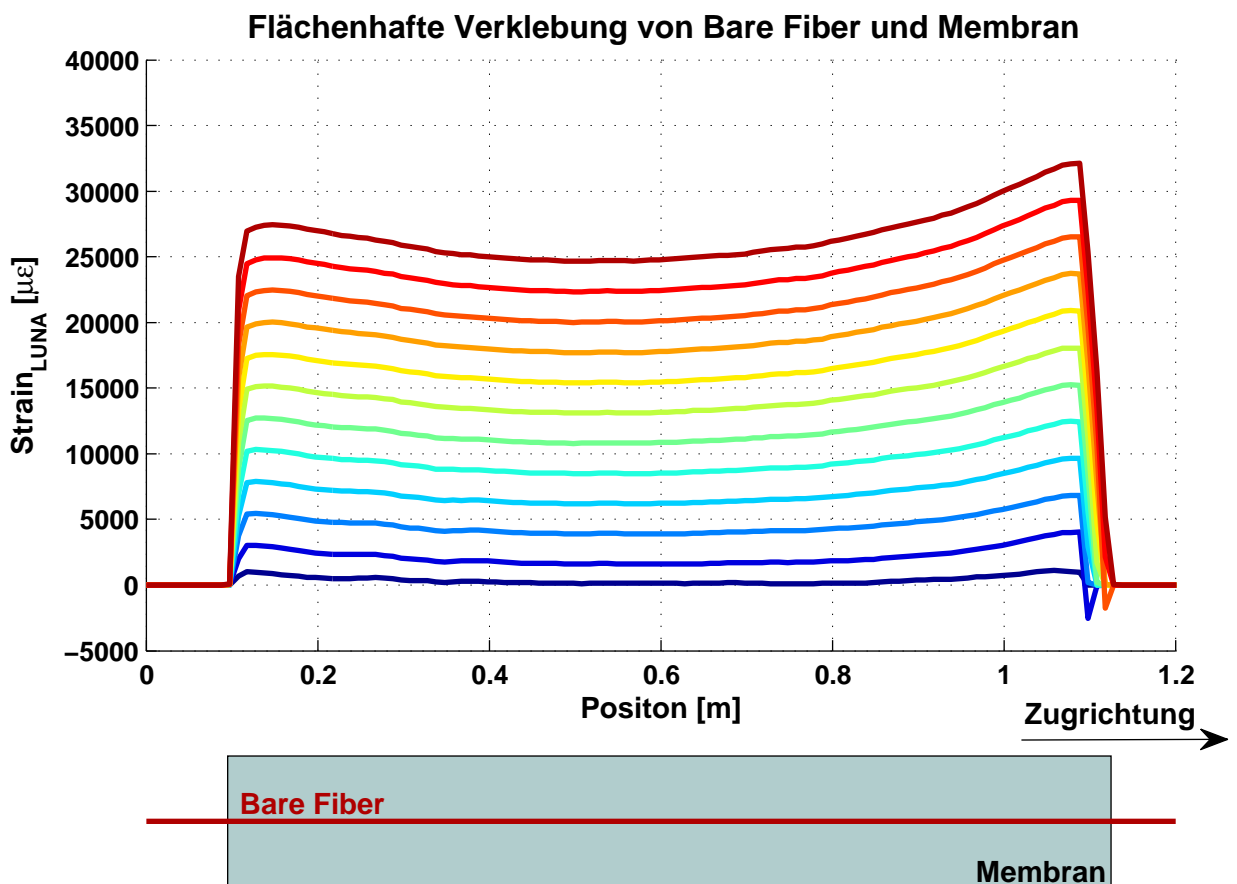


Abb. 6.10: Erfasste Strain-Werte der flächenhaften Verklebung von Bare Fiber und Membran

Auch im Rahmen der Untersuchung dieses Samples konnte der geplante Messablauf auf Grund eines Bruchs der Faser nicht vollständig durchgeführt werden. Dieser entstand im Inneren der Klebeverbindung zwischen beiden Oberflächen bei einer Dehnung von 3.0 %, wobei im Gegensatz zur partiellen Verklebung keine Beeinträchtigung der Glasfaser in den vorhergehenden Epochen wie z.B. durch Mikrorisse festgestellt wurde. Obwohl durch diesen Faserbruch keine Analyse des zyklischen Verhaltens der verklebten Oberfläche möglich war, konnte bis zu einem Strain von 3.0 % gezeigt werden, dass die Beständigkeit zwischen Bare Fiber und Membran zuverlässig und die Durchführung einer verteilten Messung des Dehnungsverlaufs möglich ist.

Verklebung–Membran–FOS: Aufgebrachte Dehnung gegenüber resultierender Kraft

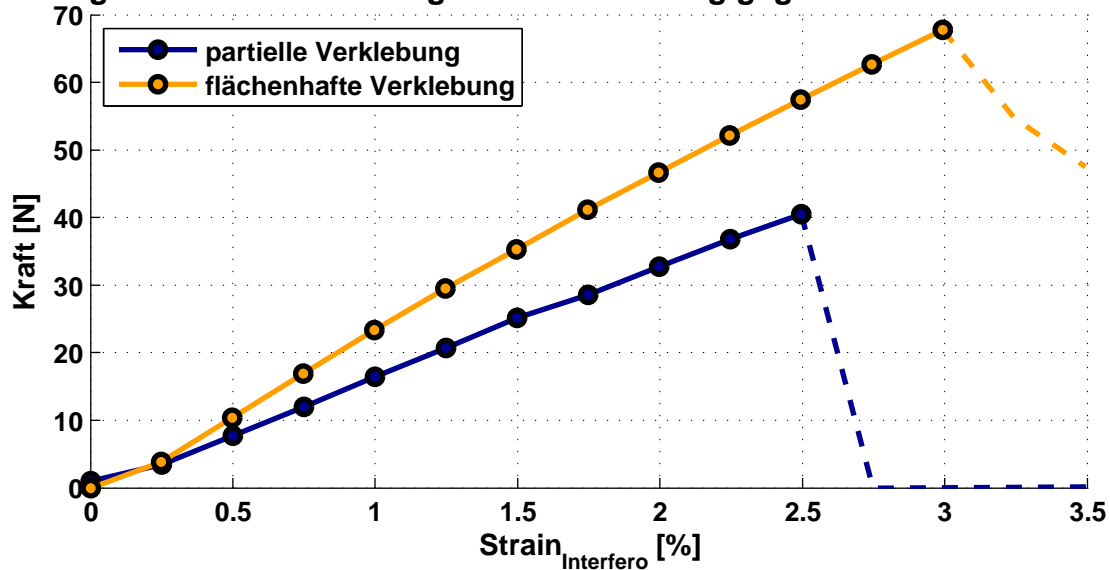


Abb. 6.11: Dehnung der verklebten Oberfläche (Bare Fiber und Membran) im Verhältnis zur resultierenden Kraft

Zum Vergleich der Messungen mit den Untersuchungen der Einzelkomponenten konnten abschließend, wie in Abb. 6.11 dargestellt, die Messdaten des Kraftaufnehmers gegenüber den Dehnungswerten des Interferometers der Kalibrieranlage betrachtet werden. Der annähernd lineare Kraftverlauf der beiden Varianten zeigt, dass bis zum jeweiligen Bruch der Glasfaser eine gute Verbindung zwischen Membran und Bare Fiber besteht. Jedoch sind Unterschiede in den Verläufen zu erkennen, welche auf Grund der Tatsache entstehen, dass die partielle Verklebung keine durchgehende Verbindung zwischen Bare Fiber und Membran aufweist. Das Gesamtsystem besitzt daher ein geringeres Elastizitätsmodul als die flächenhafte Verklebung, wodurch die Zugeinheit der faseroptischen Kalibrieranlage eine kleinere Kraft zur Dehnung benötigt.

A priori wurde angenommen, dass aus einer Dehnung der verklebten Oberfläche die Summe der erfassten Kräfte von Membran, blanker Faser sowie Klebeverbindung resultieren musste. Im Verlauf der Messdaten der flächenhaften Verklebung ist jedoch eine wesentlich höhere Kraft zu erkennen. Beispielsweise zeigt sich bei einer erstmaligen Dehnung des Gesamtsystems auf 2.0 % eine Differenz von über 10 N zur Summe der einzelnen Komponenten, siehe Abschnitt 6.2 und 6.3. Diese entsteht durch die flächenhafte Verklebung, da in den vorhergehenden Untersuchungen der Klebstoff jeweils nur über eine Fläche von 15 cm Länge sowie 2 cm Breite aufgetragen wurde. Durch die durchgehende Verbindung besitzt das System ein höheres Elastizitätsmodul als die Summe der Einzelkomponenten, wodurch größere Zugkräfte zur Dehnung benötigt werden.

Kapitel 7

Faseroptische Instrumentierung und Messung eines duktilen Rammpfahls

Die Belastbarkeit von Pfählen und Ankern erweist sich häufig als großes Kriterium im Zuge der Errichtung und Erhaltung von baulichen Anlagen. Zur Gewährleistung der Stabilität der Verankerung werden daher häufig Belastungs- bzw. Ausziehversuche durchgeführt, wobei die Erfassung der auftretenden Deformationen heutzutage standardmäßig durch den Einsatz klassischer Sensoren der Messtechnik wie z.B. Linearaufnehmer erfolgt. Im nachfolgend dokumentierten Projekt wurde ein duktiler Rammpfahl der Firma Keller Grundbau zusätzlich zur bestehenden Sensorik mit einem vorgefertigten faseroptischen Sensorkabel ausgestattet und die auftretenden Dehnungen entlang des Messobjekts verteilt erfasst.

7.1 Verwendetes Instrumentarium und Installationsvorgang

Der Installationsvorgang sah die Instrumentierung eines duktilen Rammpfahls bestehend aus drei Rohrelementen zu 5.20 m vor. Diese sollten über einzelne Muffenverbindungen miteinander verknüpft (siehe Abb. 7.1a) und das letzte Element dabei variabel an die Gegebenheiten vor Ort angepasst werden. Dadurch konnte die Gesamtlänge des zu instrumentierten Pfahls vorab mit ungefähr 15 m angenommen werden.

Als faseroptischer Sensor wurde das vorgefertigte Sensorkabel BRUsens strain V4 der Firma Brugg gewählt. Neben der umhüllenden Schicht aus Kunststoff besitzt dieses eine innere



(a) Muffenverbindung



(b) Rohrklemmschelle

Abb. 7.1: Instrumentierung des Rammpfahls

Ummantelung aus Stahl, welche einen zusätzlichen Schutz der Glasfaser in den rauen Installationsbedingungen bieten sollte. Die Verbindung zwischen faseroptischem Sensor und Messobjekt erfolgte durch den Einsatz von gewöhnlichen Rohrklemmschellen, siehe Abb. 7.1b.

Vor dem Einbau wurde sowohl das Sensorkabel als auch das Gesamtsystem bestehend aus Sensor und Befestigungssystem am IGMS untersucht. Durch Messungen des Sensors im ausgerollten und somit ungedehnten Zustand konnten auftretende Dämpfungen innerhalb des Faserkerns ermittelt sowie eine Referenzmessung für die spätere Bestimmung des Strains durchgeführt werden. Die Überprüfung des Gesamtsystems erfolgte durch eine Montage an einem PVC-Rohr, welches einen ähnlichen Durchmesser wie der eingesetzte Pfahl aufwies. Dabei wurden händische Zugtests durchgeführt und das Drehmoment der Rohrklemmschellen kontinuierlich erhöht, bis kein Nachrutschen des Sensorkabels mehr festgestellt werden konnte. Dies ermöglichte vorab eine Simulation des Einbaus und des späteren Versuchsablaufs sowie die Bestimmung der Zuverlässigkeit des Systems.

Des Weiteren war eine faseroptische Messung der Temperatur entlang des Pfahls angedacht, um eine Korrektur der Dehnungswerte vornehmen zu können. Diese sollte separat mit einem gewöhnlichen Pigtail durchgeführt werden. Die Montage erfolgte ebenfalls am Rammpfahl, wobei das Sensorkabel allerdings durch einen Kunststoffschlauch vor den Einflüssen der Dehnung isoliert wurde. Im Zuge der Auswertungen zeigte sich jedoch, dass die Temperaturunterschiede im Erdreich über die Versuchsdauer mit $< 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ geringer waren als vorab vermutet. Daher konnte eine Temperaturkompensation vernachlässigt werden, wodurch diese Messdaten im weiteren Projektverlauf nicht mehr betrachtet wurden.



(a) Rammschuh

(b) Schutz im Muffenbereich

(c) Rammverfahren

Abb. 7.2: Installation des Rammpfahls und der faseroptischen Sensoren

Die Installation des faseroptischen Sensors musste an das Einbauverfahren des Rammpfahls angepasst werden. Hierbei wird das erste Rohrelement auf den eingefetteten Rammschuh aufgesetzt (siehe Abb. 7.2a), welcher die Spitze des Pfahls im Rammverfahren schützen soll. Danach erfolgt das Rammen des Pfahls unter Druckluft in den Boden, siehe Abb. 7.2c, wobei der entstehende Raum mit Beton verfüllt wird. Abschließend wird ein Druckstab in die Suspension eingelassen, der später im Rahmen des Pfahlversuchs zum Aufbringen von Druckkräften verwendet wird.

Die faseroptische Instrumentierung erfolgte jeweils durch eine kurzzeitige Unterbrechung des Rammverfahrens. Das Sensorkabel wurde dabei durch den Einsatz der Rohrklemmschellen in einem Abstand von ungefähr 0.5 m am Pfahl montiert. Am obersten Rohrelement wurde dieser auf etwa 1.0 m erhöht, wodurch eine Analyse des Befestigungssystems ermöglicht werden sowie eine Empfehlung für ähnliche spätere Projekte resultieren sollte. Um eine Beschädigung der Faser zu vermeiden, wurde das Sensorkabel im Muffenbereich zusätzlich durch Schaumstoff sowie Gewebeklebeband geschützt, siehe Abb. 7.2b.

Trotz sämtlicher Schutzmaßnahmen konnte ein Faserbruch im Bereich der untersten Muffe am Übergang vom ersten auf das zweite Rohrelement nicht verhindert werden. Somit stand im Zuge des Versuchs lediglich eine instrumentierte Länge von ungefähr 9 m zur Verfügung, auf der eine Bestimmung der Dehnung durchgeführt werden konnte.

7.2 Versuchsdurchführung

Prinzipiell existieren zur Untersuchung der Belastbarkeit von Pfählen zahlreiche unterschiedliche Prüfverfahren. Im Rahmen der Probelastung dieses Pfahls erfolgte die Durchführung eines Primär- sowie Sekundär-Versuchs. Der Primär-Versuch diente zur Untersuchung der Druckbelastbarkeit. Dazu wurde der Pfahl über den Druckstab bis zum Durchbruch gegen den Rammschuh gedrückt. Im zweiten Schritt sollte durch den Sekundär-Versuch die Materialbeanspruchung im Zuge einer Zugbelastung aufgezeigt werden, wobei ein Ziehen des Pfahls aus der umhüllenden Betonschicht durchgeführt wurde. Dieser Vorgang erfolgte bis zur Loslösung, welche als Versagen des Pfahlkopfes bezeichnet wird.

Beide Versuchsabläufe bewirken ein gleiches Verhalten der faseroptischen Sensoren. Einerseits tritt im Rahmen des Primär-Versuchs eine Gegenkraft des Rammpfahls zur Belastung des Druckstabes auf, woraus ein Strain des Sensorkabels folgt. Der Sekundär-Versuch beruht ohnehin auf dem Zug des Pfahls und erzeugt somit Dehnungen des Sensors.

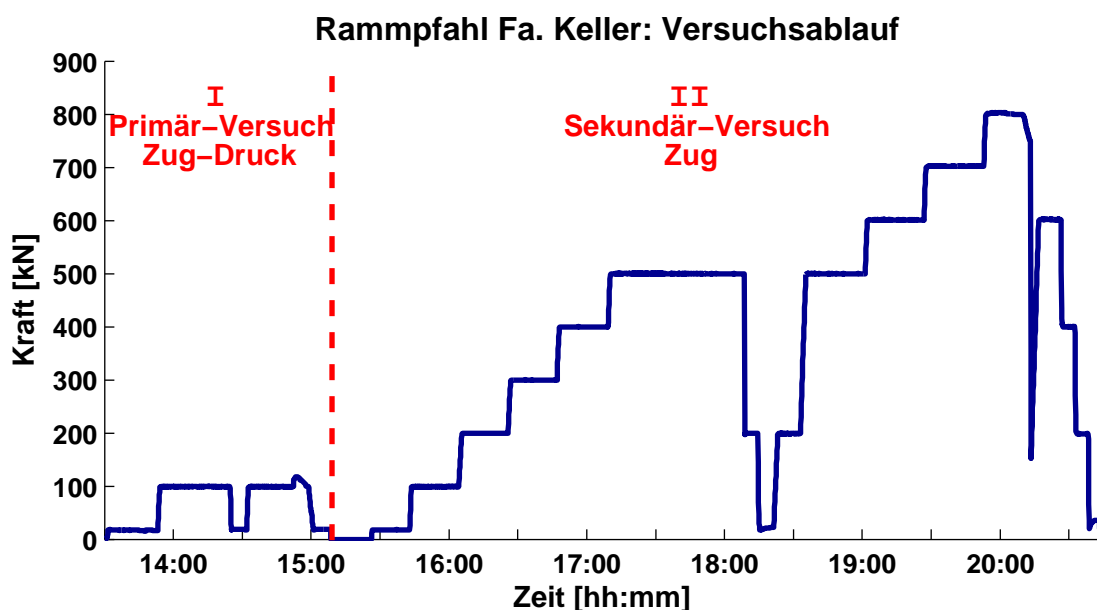


Abb. 7.3: Rammpfahlversuch, Kraftverlauf Fa. Keller

Das Aufbringen der Prüfkraft erfolgte durch den Einsatz hydraulischer Pressen. Um unterschiedliche Belastungsszenarien simulieren zu können, wurde dabei, wie in Abb. 7.3 dargestellt, ein spezielles Versuchsprofil verwendet. Neben der kontinuierlichen Steigerung der Prüfkraft sah dieses auch immer eine regelmäßige Entlastung des Versuchsobjekts vor. Dadurch entstanden wiederkehrende Epochen im Kraftverlauf, welche zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der faseroptischen Messdaten genutzt werden konnten. Somit war zusätzlich zur Erfassung der auftretenden Dehnungen eine Kontrolle der Sensorik möglich.



(a) Versuchsaufbau



(b) Linearaufnehmer

Abb. 7.4: Aufbau und verwendete Sensoren im Zuge des Rammpfahlversuchs

Im allgemeinen Prüfverfahren werden zur Bestimmung der Deformationen klassische Sensoren der Messtechnik eingesetzt, wobei diese Verschiebungen zufolge des Spitzendrucks im Primär-Versuch sowie jene zufolge der Mantelreibung im Sekundär-Versuch erfassen sollen. Die Messungen der auftretenden Bewegungen des vorliegenden Pfahls wurden unter dem Einsatz von Linearaufnehmern, siehe Abb. 7.4, durchgeführt, womit eine Vergleichsmöglichkeit für die erfassten Dehnungswerte des faseroptischen Messsystems gegeben war. Die Kontrolle der Stabilität des Pfahlkopfes sowie der Messeinrichtung erfolgte durch geodätische Prismen, deren Positionen über die Versuchsdauer kontinuierlich von einer Totalstation erfasst wurden. Die Resultate dieser Untersuchungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht detaillierter behandelt.

7.3 Auswertung und Ergebnisse

Im ersten Schritt der Auswertung erfolgte die Berechnung des Strains im Verhältnis zu jener Referenzmessung, welche vor der Installation am IGMS durchgeführt wurde. Dabei zeigte sich, dass die Zuverlässigkeit der Kreuzkorrelation bei der Ermittlung des Frequenzshifts nicht gegeben und somit keine Bestimmung der Dehnung realisierbar war. Es besteht die Vermutung, dass im Rahmen der faseroptischen Instrumentierung einzelne Micro-Bendings des Sensorkabels entstanden sind. Dadurch lag in gewissen Abschnitten eine zu große Deformation vor, welche sich außerhalb des erfassbaren Messbereichs des LUNA OBR 4600 befindet. Des Weiteren könnte der entstehende Schwund im Zuge des Aushärtens des Betons eine zu große Kompression des faseroptischen Sensors ausgelöst haben, weshalb eine zuverlässige Bestimmung der Dehnungswerte verhindert wurde. Aus diesen Gründen konnte die Veränderung des Dehnungszustandes im Verhältnis zur Ausgangssituation nicht ermittelt werden.

Angeichts der Tatsache, dass das Messverfahren des OBRs lediglich die Bestimmung des Strains zu einer vorhergehenden Messung ermöglicht, musste dennoch eine Referenzepeche zur Ermittlung der Strain-Werte gefunden werden. Daher erfolgte zunächst die Berechnung aller Epochen auf die erste durchgeführte Messung. Analog zur Untersuchung der Messpräzision in Abschnitt 5.4 zeigte sich jedoch, dass auf Grund des hohen Strains Unregelmäßigkeiten im Dehnungsverlauf auftraten und keine zuverlässige Bestimmung gewährleistet werden konnte. Deshalb erfolgte eine variable Auswahl der Referenzepeche und somit eine Verknüpfung der Messungen, wobei der aktuelle Strain-Wert jeweils aus der Summe der Vorepochen bestimmt wurde.

In einer ersten Analyse konnten die berechneten Dehnungswerte, wie in Abb. 7.5 zu sehen, in Form des Mittelwerts über die gesamte Versuchsdauer betrachtet werden. Zur Verifizierung wurde zusätzlich die aufgebrachte Kraft dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Verläufe der unterschiedlichen Daten einen annähernd gleichen Zustand aufweisen. In den faseroptischen Messdaten zeigt sich jedoch ein Kriechverhalten, welches durch das sukzessive Übergehen der auftretenden Kräfte auf das Sensorkabel entsteht. Des Weiteren sind auch die beiden wesentlichen Vorgänge des Versuchs, repräsentiert durch das Versagen der Pfahlspitze im Primär-Versuch um 14:55 (Abb. 7.5 - Ereignis a) sowie das Lösen des Pfahls im Sekundär-Versuch um 19:50 (Abb. 7.5 - Ereignis b), im Dehnungsverlauf zu erkennen.

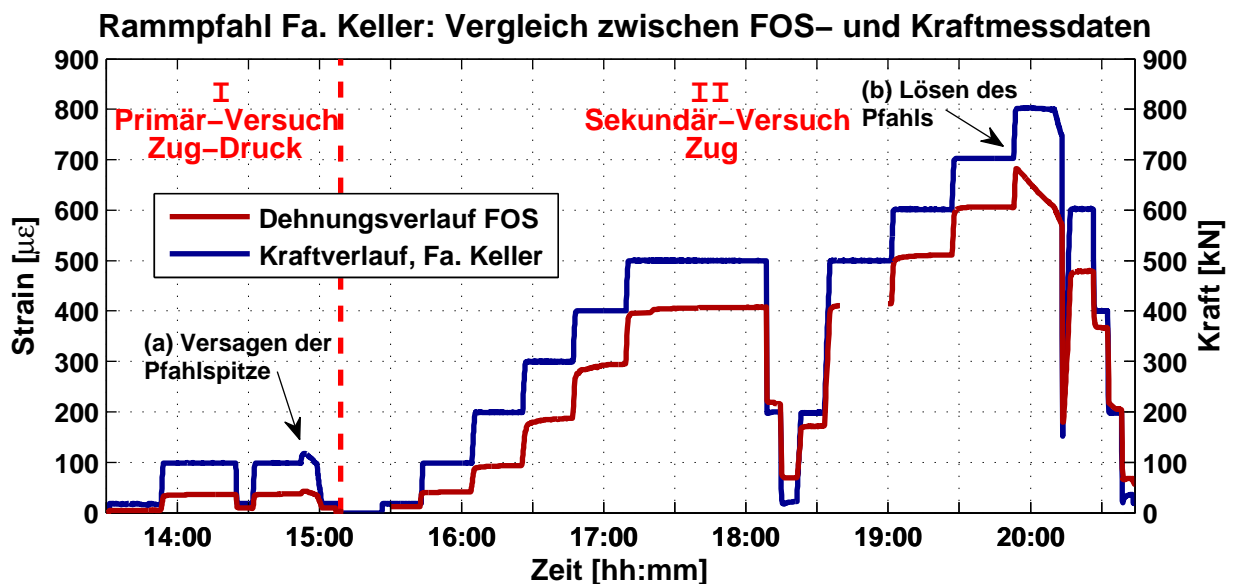


Abb. 7.5: Vergleich zwischen faseroptischen Messdaten und Kraftverlauf der Fa. Keller

In weiterer Folge wurde jeweils eine repräsentative Epoche jeder Laststufe ausgewählt und in Abhängigkeit der Tiefe mit einer Ortsauflösung von einem Zentimeter analysiert. Abb. 7.6 zeigt insgesamt fünf ausgewählte Strain-Messungen des Primär-Versuchs, wobei auch die wiederkehrenden Epochen bei einer Belastung von 20 bzw. 100 kN dargestellt sind. Dadurch ist ersichtlich, dass minimale Differenzen bei einer Belastung von 100 kN zwischen den Messungen vor bzw. nach der Entlastung auftreten. Diese können numerisch mit $< 1 \mu\epsilon$ angegeben werden und liegen somit unter der berechneten Messpräzision des OBRs. Auffällig ist außerdem ein auftretender Peak bei einer Tiefe von 2.6 m. Nach Absprache mit der Firma Keller entsteht diese Unregelmäßigkeit auf Grund des Übergangs der unterschiedlichen Bodenschichten wie Torf auf Schluff oder Kies.

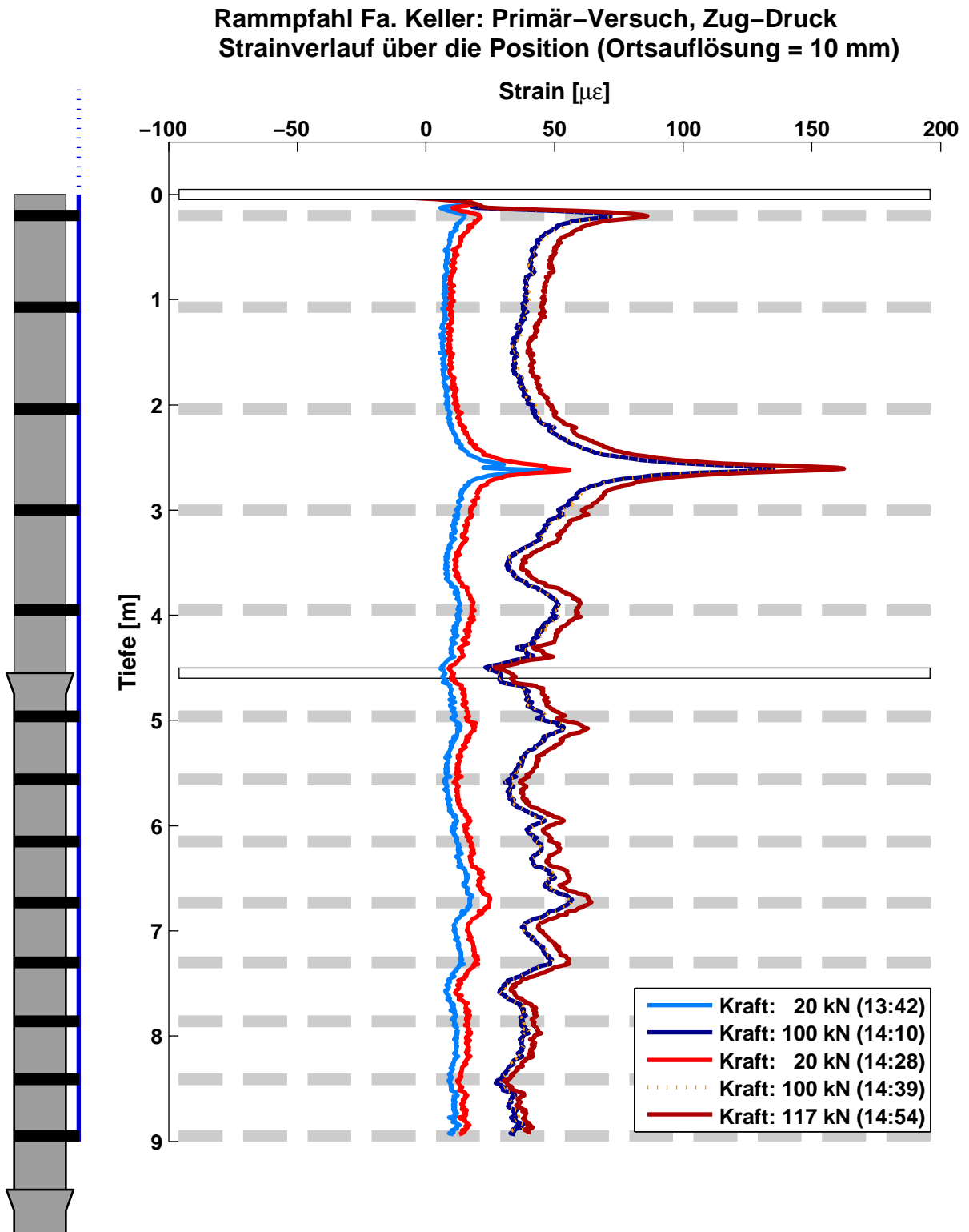


Abb. 7.6: Primär-Versuch: Faseroptischer Dehnungsverlauf ausgewählter Messepochen dargestellt in Abhängigkeit der Tiefe

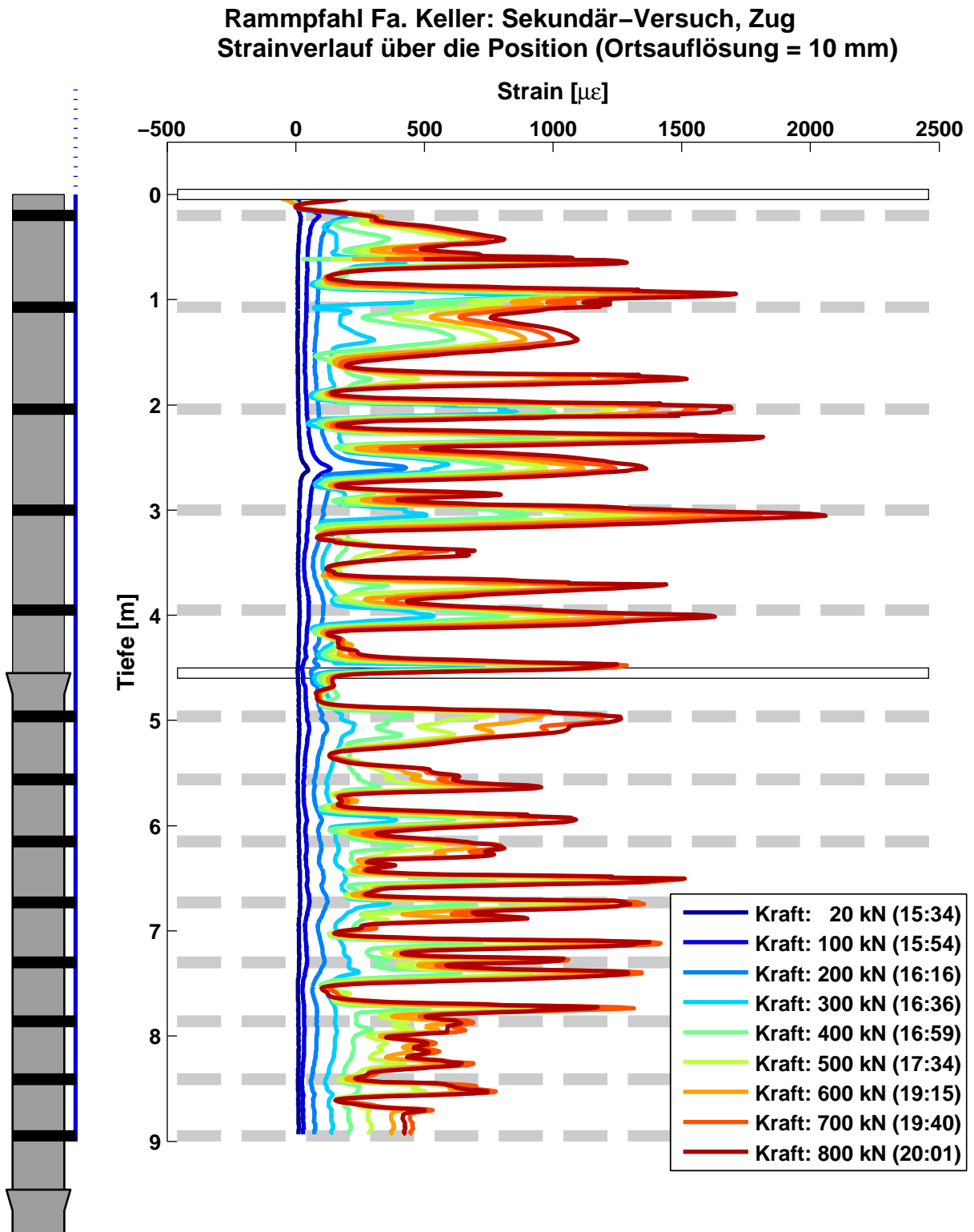


Abb. 7.7: Sekundär-Versuch: Faseroptischer Dehnungsverlauf ausgewählter Messepochen dargestellt in Abhängigkeit der Tiefe

In Abb. 7.7 sind sämtliche ausgewählte Dehnungsverläufe des Sekundär-Versuchs ersichtlich. Dabei sind die Positionen der Muffen sowie jene der angebrachten Rohrklemmschellen ebenfalls gekennzeichnet. Anders als im Rahmen des Primär-Versuchs wurden jedoch keine wiederkehrenden Epochen geplottet, um die Übersichtlichkeit gewährleisten zu können. A priori wurde angenommen, dass sich die Dehnung des Sensorkabels innerhalb zweier Klemmschellen konstant verhalten würde. Die Darstellung zeigt allerdings einen unregelmäßigen Dehnungsverlauf über die gesamte erfassbare Länge des Pfahls, wobei Spitzen auch zwischen den Klemmpunkten des Sensors auftreten. Das Verhalten ist, laut Informationen der Firma Keller, durch entstehende Risse des Betons im Zugvorgang zu erklären, die zu einer inhomogenen Verteilung des Strains über den Pfahl führen. Im Rahmen des Primär-Versuchs konnten diese Beeinträchtigungen auf Grund der Kompression des Betons nicht beobachtet werden.

Rammpfahl Fa. Keller: Zusammenhang zwischen Dehnung und aufgetragener Kraft

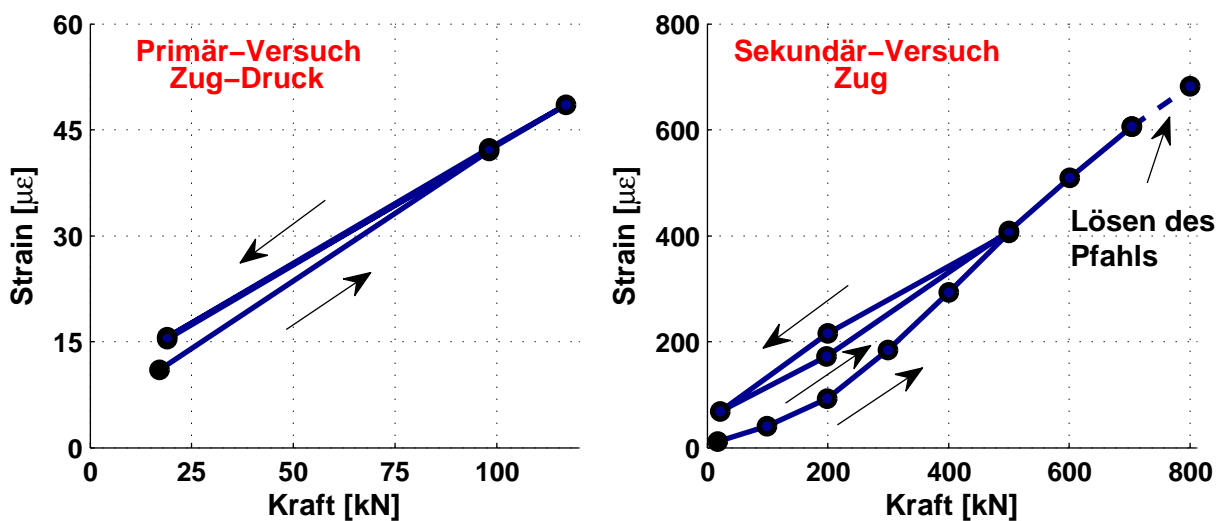


Abb. 7.8: Zusammenhang zwischen Dehnung und aufgetragener Kraft

Zur Analyse des zyklischen Verhaltens der faseroptischen Sensoren kann der Zusammenhang zwischen der mittleren Dehnung einer Messung jeder Laststufe und der aufgetragenen Kraft betrachtet werden, siehe Abb. 7.8. Dabei zeigt der Primär-Versuch wiederum die Reproduzierbarkeit der Messdaten bei einer Belastung von 100 kN von $< 1 \mu\epsilon$. Auf der Grundlaststufe von 20 kN ist eine Abweichungen von ungefähr $5 \mu\epsilon$ nach der Erstbelastung zu erkennen. Jedoch hat diese keine Auswirkung auf den nachfolgenden Dehnungsverlauf, welcher als annähernd linear beschrieben werden kann.

Im Gegensatz dazu ist in der Darstellung des Sekundär-Versuchs im unteren Bereich kein lineares Verhalten ersichtlich. Im Zuge der Entlastung des Pfahls zeigen sich Hysteresen gegenüber dem erstmaligen Aufbringen der Prüfkraft, welche zu unterschiedlichen Hin- und Rückwegen im Dehnungsverlauf führen. Allerdings ist die Reproduzierbarkeit der faseroptischen Messdaten auch in diesem Versuch durch die wiederkehrende Belastungsperiode bei 500 kN zu beobachten, wobei eine Abweichung von $< 4 \mu\epsilon$ vorliegt. Der darauffolgende Verlauf der Strain-Messungen bis zum Lösen des Pfahlkopfes bei 800 kN kann im Verhältnis zur aufgetragenen Prüfkraft wiederum als linear interpretiert werden.

Abschließend sollte aus dem Integral über die faseroptischen Messdaten der entstehende Auszug im Rahmen des Sekundär-Versuchs abgeleitet werden. Auf Grund des Faserbruchs im Rammverfahren war eine faseroptische Messung jedoch lediglich auf den beiden oberen Rohrelementen des Pfahls ($\hat{=}$ 8.97 m) möglich. Dadurch kann die vollständige Verschiebung im Verhältnis zum Ausgangszustand nicht bestimmt werden und es ergeben sich Differenzen in der Größenordnung zwischen der Integration und den erfassten Verschiebungen der Linearaufnehmer zufolge der Mantelreibung, siehe Abb. 7.9. Dennoch weisen beide Darstellungen eine ähnliche Form auf, womit ein Vergleich der Messdaten bis zum Versagen des Pfahlkopfes zulässig ist. Auffälligkeiten zeigen sich insbesondere im jeweiligen Kriechverhalten. Es ist zu sehen, dass das Kriechen in den Messungen des faseroptischen Sensorkabels im Gegensatz zu den Daten der Linearaufnehmer über einen wesentlich kürzeren Zeitraum auftritt. Dies erklärt sich anhand der Tatsache, dass eine durchgehende Verbindung zwischen optischem Sensor und Messobjekt besteht. Dadurch kann im Gegensatz zu den Linearaufnehmern ein nahezu direkter Übergang der auftretenden Deformationen erfolgen.

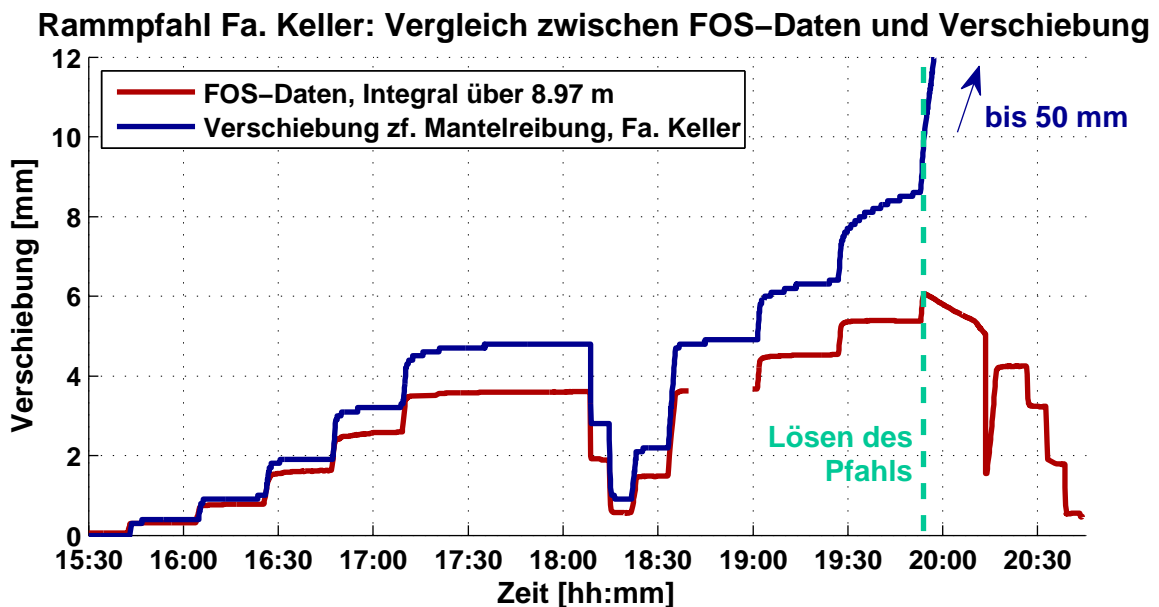


Abb. 7.9: Vergleich zwischen dem Integral über die faseroptischen Messdaten und der erfassten Verschiebung der Fa. Keller

Die Auswertungen zeigten, dass die faseroptische Instrumentierung eines Pfahls im Rahmen von Belastungsversuchen zusätzliche Informationen bereitstellen kann. Dadurch konnten neben der genauen Position des Übergangs zwischen den unterschiedlichen Bodenschichten auch entstehende Risse in der Suspension detektiert werden. Des Weiteren wurde die Reproduzierbarkeit der erfassten Daten des LUNA OBR 4600 aufgezeigt. Beispielsweise traten im Primär-Versuch maximale Abweichungen zwischen den Messungen vor bzw. nach der Entlastung von $< 1 \mu\epsilon$ auf, welche sogar unter der ermittelten Präzision des Instruments lagen. Dennoch müssten weitere Untersuchungen im Bezug auf die Überlebenschancen der Glasfaser und somit insbesondere Überprüfungen des Befestigungssystems erfolgen, um die bestehende Sensorik ersetzen und eine Überwachung von Pfahlversuchen ausschließlich mit faseroptischen Messsystemen durchführen zu können.

Kapitel 8

Conclusio

Das Potential faseroptischer Messsysteme im Zuge der Überwachung der strukturellen Eigenschaften von Objekten bietet in vielen Einsatzbereichen eine wesentliche Erweiterung bzw. Verbesserung der vorhandenen Sensorik. Jedoch sind ausführliche Laboruntersuchungen und Kalibrierungen der faseroptischen Sensoren und Instrumente unerlässlich, um die Leistungsfähigkeit analysieren sowie eine effektive Nutzung des Gesamtsystems ermöglichen zu können. Im Zuge der Überprüfungen des LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600 konnten zahlreiche Charakteristiken aufgezeigt und wichtige Kenngrößen des Messinstruments bestimmt werden. Zur Veranschaulichung des breiten Anwendungspotentials der Glasfasersensorik wurden dabei sowohl blanke Glasfasern mit unterschiedlichen Beschichtungen als auch vorgefertigte Sensorkabel eingesetzt. Die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse erfolgte in zwei unterschiedlichen Einsatzbereichen, wobei einerseits eine geotechnische Überwachungsmessung eines Ramppfahls unter Belastungsversuchen durchgeführt und andererseits eine dünnhäutige Oberfläche aus Kunststoff instrumentiert wurde. In Summe konnte somit eine umfangreiche Analyse unter konstanten Laborbedingungen sowie die Verwendung im Feldeinsatz realisiert werden, woraus zahlreiche Erfahrungen für weitere Anwendungen resultieren.

8.1 Erfahrungswerte und Erkenntnisse

In einer Zusammenfassung werden im Folgenden diverse Erfahrungswerte und Erkenntnisse der Laboruntersuchungen des LUNA OBR 4600 erläutert. Dabei ist zu beachten, dass sämtliche Überprüfungen unter optimalen Bedingungen durchgeführt wurden. Somit können in Einsatzbereichen, die keine stabilen Verhältnisse gewährleisten, Abweichungen zu den bestimmten numerischen Werten auftreten.

Die Präzision repräsentiert einen wesentlichen Qualitätsparameter in messtechnischen Anwendungen. Die Herstellerangabe des OBRs bezieht sich jedoch nur auf das Auflösungsvermögen, wobei dieses mit $1 \mu\epsilon$ für die Dehnungs- und mit $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ für die Temperaturmessung angegeben wird. In den Untersuchungen zeigte sich jedoch, dass eine Abhängigkeit zwischen Messpräzision, aufgebrachtener Dehnung sowie Fasertyp besteht. Beispielsweise konnte unter Verwendung einer Bare Fiber mit Ormocer-Beschichtung eine Präzision von $\sigma = 0.9 \mu\epsilon$ erreicht werden, wenn nur minimale Unterschiede in den Frequenzverschiebungen vorlagen. Hingegen folgte aus der Bestimmung einer Dehnung von ungefähr 1 % mit dem gleichen Fasertyp nur eine wiederholbare Genauigkeit von $\sigma = 3.0 \mu\epsilon$.

Die Analyse des maximalen Messbereichs des Instruments zeigte, dass die Strain-Bestimmung zu einer Referenzepoche lediglich bis zu einer Dehnung von $11000 \mu\epsilon$ zuverlässig durchgeführt werden kann. Die Größe dieses Bereiches ist jedoch immer von der minimalen und maximalen

Wellenlänge der Tunable Laser Source sowie der eingehenden Signalleistung abhängig. Dabei konnten die besten Ergebnisse unter Verwendung des größtmöglichen Sweep-Bereichs von 41.87 nm sowie einem Gain von 24 dB erzielt werden.

Die Angabe des Herstellers für die maximale Ortsauflösung mit $\Delta z = 1$ mm konnten im Rahmen der Untersuchungen bestätigt werden. Allerdings ist diese stets im direkten Zusammenhang mit der Integrationsbreite Δs zu betrachten, da ansonsten, insbesondere bei einer detaillierten Auflösung, Unregelmäßigkeiten im ausgewerteten Signal entstehen.

Die Rohdaten des OBRs repräsentieren das klassische Resultat eines OTDR-Signals, aus welchem eine Frequenzverschiebung zu einer Referenzmessung abgeleitet werden kann. Zur Umrechnung dieses Frequenzshifts werden üblicherweise Standardwerte der Literatur verwendet. Im Rahmen der Kalibrierung der unterschiedlichen Sensoren zeigten sich jedoch teils wesentliche Abweichungen zu diesen Faktoren. Beispielsweise wurden in den Koeffizienten zur Berechnung von Dehnungen Differenzen von bis zu 2 % festgestellt. Des Weiteren erfolgte im Zuge der Analyse des zyklischen Verhaltens eine Detektion von Hysteresen. Für Anwendungen, in denen Längen- bzw. Temperaturänderungen nur in eine Richtung auftreten, konnten deren Einflüsse jedoch durch eine separate Schätzung der Kennlinie für Hin- und Rückweg minimiert werden.

Die Akklimatisierungsdauer des Instruments stellt ein weiteres wichtiges Kriterium im Zuge von Messeinsätzen dar. In den Überprüfungen des Temperaturverhaltens des Instruments wurde diesbezüglich eine Zeitdauer von 2.5 bis 3 Minuten pro °C bestimmt. Außerdem zeigte sich, dass eine regelmäßige Kalibrierung alle 24 Stunden bzw. nach einer abrupten Änderung der Temperatur durchgeführt werden muss.

Zusätzlich zur normalen Reichweite des OBRs ist unter Anwendung des Extended Range Modes ebenfalls eine Messung über eine Distanz von bis zu 2 km möglich. Jedoch muss dabei eine Verringerung der Breite des Sweep-Bereichs und damit ein kleinerer Messbereich in Kauf genommen werden, wodurch lediglich Deformationen im Bereich von einigen 100 $\mu\epsilon$ im Verhältnis zu einer Referenzepeche detektiert werden können. Außerdem wurde in diesen Untersuchungen festgestellt, dass Vibrationen sowie Bewegungen des Sensors oder des Verbindungskabels sprunghafte Änderungen der gemessenen Strain-Werte bewirken. In diesem Fall ist daher keine zuverlässige Bestimmung des Dehnungsverlaufs möglich.

8.2 Resümee und Ausblick

Im Rahmen der detaillierten Laboruntersuchungen konnte eine umfangreiche Analyse des LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600 sowie eine Kalibrierung der einzelnen Sensorkomponenten durchgeführt werden. Somit kann in Anwendungen ein zuverlässiges, faseroptisches Gesamtsystem sowohl zur Messung von Dehnungen als auch zur Bestimmung von Temperaturunterschieden bereitgestellt werden. Infolge der hohen Auflösung und Präzision des Messinstruments war ein ebenso präzises Instrumentarium zur Kalibrierung notwendig, wobei zur Überprüfung des Dehnungsverhaltens ausschließlich die faseroptische Kalibrieranlage verwendet wurde. In den Untersuchungen des zyklischen Verhaltens zeigten sich dabei Hysteresen auch in den Messwerten der blanken Glasfasern. Aus Erfahrungen am IGMS ist ein solches Verhalten einer Bare Fiber eher untypisch, wodurch die Vermutung besteht, dass die pneumatische Klemmung der Kalibrieranlage ein minimales Lösen des Coatings zur Folge hat, welches beim Rückgang der Dehnung zu einem geringen Strain des faseroptischen Messinstruments im Vergleich zum Re-

ferenzinterferometer führt. Jedoch konnten weder visuell noch durch Analyse der Messdaten des Kraftaufnehmers der Kalibrieranlage Hinweise auf eine derartige Beeinflussung gefunden werden. Dahingehend müssten weitere Untersuchungen des Befestigungssystems durchgeführt und eventuelle Optimierungen vorgenommen werden.

Auf Grund der hohen Bruchempfindlichkeit wird die blanke Glasfaser in geotechnischen und geodätischen Anwendungen noch selten zur Dehnungsmessung eingesetzt. Im Zuge der Verklebung einer Bare Fiber mit einer dünnhäutigen Oberfläche aus Kunststoff konnte jedoch gezeigt werden, dass eine zuverlässige Verbindung zwischen Sensor und Messobjekt erreicht und eine verteilte Bestimmung des Strains durchgeführt werden kann. Zusätzliche Untersuchungen von Klebstoffen sowie Oberflächen mit unterschiedlichen Beschaffenheiten könnten in dieser Hinsicht weitere Erkenntnisse liefern. Angesichts der relativ kurzen Untersuchungsdauer wäre außerdem eine detaillierte Überprüfung der Klebeverbindung über einen längeren Zeitraum notwendig, um in möglichen Anwendungsbereichen wie z.B. als dünnhäutige Tragfläche diverser Flugobjekte oder im Monitoring von Membrandächern eine zuverlässige Instrumentierung bieten zu können.

Des Weiteren wurde auch ein klassisches Messobjekt in der Geotechnik erfolgreich mittels faseroptischer Sensoren ausgestattet. Im Rahmen von Belastungs- bzw. Ausziehversuchen eines Rammpfahls konnten dabei die aufgebrachten Prüfkraft in den Messdaten detektiert werden. Hierbei ist insbesondere die Reproduzierbarkeit des Strains bei Entlastung hervorzuheben. Eine faseroptische Messung über die gesamte Länge des Pfahls war auf Grund eines Faserbruchs nicht möglich, weshalb weiterführende Untersuchungen sich mit der Evaluierung alternativer Befestigungssysteme beschäftigen müssten, um eine höhere Überlebenschance der Glasfaser im Zuge des Einbauverfahrens zu realisieren. Zum Schutz des Sensors im Versuchsablauf könnten außerdem Rohrprofile aus Kunststoff oder Metall mit geringem Durchmesser eingesetzt werden, um eine Beeinflussung des Nutzsignals durch die auftretenden Risse im Beton zu minimieren. Eine Detektion dieser Risse wäre unter Verwendung eines weiteren Sensorkabels mit strukturierter Oberfläche, wie z.B. das BRUsens strain V3 des Herstellers Brugg, durchführbar.

Literaturverzeichnis

- Amditis, Angelos (2011). „MONICO Project - Concept, Objectives and Potential Impact“. In: *MONICO Workshop*.
- Al-Azzawi, Abdul (2007). *Fibre Optics - Principles and Practices*. CRC Press, Boca Raton, USA, 386 S.
- Brückl, E., F.K. Brunner, E. Lang, S. Mertl, M. Müller und U. Stary (2013). „The Gradenbach Observatory - monitoring deep-seated gravitational slope deformation by geodetic, hydrological, and seismological methods“. In: 10.6. Landslides, S. 815–829.
- Brugg Kabel AG (2013). Datasheet BRUsens Strain V1.
- Corning Inc. (2015). <http://www.corning.com/>. (abgerufen am: 19.01.2015).
- FBGS Technologies GmbH (2015). <http://www.fbgs.com/>. (abgerufen am: 19.01.2015).
- Fibercore Inc. (2015). <http://fibercore.com/>. (abgerufen am: 19.01.2015).
- Fiberguide Industries (2015). <http://fiberguide.com/>. (abgerufen am: 19.01.2015).
- fibrisTerre GmbH (2015). <http://fibristerre.com/>. (abgerufen am: 22.01.2015).
- Fischli, F., M. Iten, A. Carrera und A. M. Puzrin (2013). „Laboratory study of fibre-optic strain sensor fixation for monitoring tunnel linings“. In: *2nd Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures – SMAR (2013)*, 8 S.
- Froggatt, Mark, Dawn Gifford, Steven Kreger, Matthew Wolfe und Brian Soller (2006). „Distributed strain and temperature discrimination in unaltered polarization maintaining fiber“. In: *Optical Fiber Sensors*. Optical Society of America, ThC5.
- Glišić, Branko und Daniele Inaudi (2007). *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons Ltd, Chicester, England, 262 S.
- Gross, Dietmar, Wolfgang Ehlers, Peter Wriggers, Jörg Schröder und Ralf Müller (2014). *Technische Mechanik 2*. 12. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Deutschland, 306 S.
- Hayes, Jim (2011). *Fiber Optics - Technicians Manual*. Delmar Cengage Learning, Clifton Park, USA, 271 S.
- Hecht, Jeff (2002). *Understanding Fiber Optics*. 4. Aufl. Prentice Hall, Upper Saddle River, USA, 773 S.
- Hering, Ekbert, Rolf Martin und Martin Stohrer (2012). *Physik für Ingenieure*. 11. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Deutschland, 1005 S.

- Iten, Michael (2014). „Lateral movements on longitudinal distributed sensors“. In: *The Cambridge Conference on Fibre Optic Sensing in Civil Infrastructure*.
- Kreger, Stephen T, Alex K Sang, Dawn K Gifford und Mark E Froggatt (2009). „Distributed strain and temperature sensing in plastic optical fiber using Rayleigh scatter“. In: *SPIE Defense, Security, and Sensing*. International Society for Optics und Photonics, 73160A–73160A8.
- Leica Geosystems AG (2011). Leica TS11/TS15 Gebrauchsanweisung. Version 2.0.
- López-Higuera, José Miguel (2002). *Handbook of Optic Fibre Sensing Technology*. Hrsg. von José Miguel López-Higuera. John Wiley & Sons Ltd, Chicester, England, 795 S.
- Loupos, Konstantinos, George Kanellos, Matthaios Bimpas, Angelos Amditis, Oreste Bursi, Stamatia Frontistou, Johann Meisner, Dimitrios Bairaktaris, Vasilis Kalidromitis Bruno Griffoni und Athanasios Orfanoudakis (2013). „Fiber Sensors Based System for Tunnel Linings’ Structural Health Monitoring“. In: *2nd Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures – SMAR (2013)*, 9 S.
- Luna Innovations Inc. (2006). Product Datasheet: Optical Backscatter Reflectometer.
- Luna Innovations Inc. (2014a). Datasheet: Optical Backscatter Reflectometer (Model OBR 4600).
- Luna Innovations Inc. (2014b). User Guide: Optical Backscatter Reflectometer 4600.
- Marmota Engineering AG (2011a). Marmota Projekt Dokumentation: Rutschhang, St. Moritz.
- Marmota Engineering AG (2011b). Marmota Projekt Dokumentation: Belastungsversuch einer Bergstrasse für geplanten Schwertransport, Grenchenberg (CH).
- Marmota Engineering AG (2011c). Marmota Projekt Dokumentation: Sacac Behälter, Lenzburg.
- Marmota Engineering AG (2012a). Marmota Projekt Dokumentation: Reaktivierung eines abgescherten Inklinometers, St. Moritz.
- Marmota Engineering AG (2012b). Marmota Projekt Dokumentation: Prüfung von mit Sensoren bestückten Geotextilien in grossmasstäblichem Schertest.
- Marmota Engineering AG (2013a). Marmota Projekt Dokumentation: Central Line Tunnel, London Underground (UK).
- Marmota Engineering AG (2013b). Marmota Projekt Dokumentation: Überwachung einer Druckwasserleitung, Tschierschen.
- Marmota Engineering AG (2013c). Marmota Projekt Dokumentation: Westlink, Zürich.
- Memmert GmbH (2007). Produktspezifikation: Kühlbrutschrank mit Kompressor-Kühlung Modell ICP 400.

- Naumann, Helmut, Gottfried Schröder und Martin Löffler-Mang (2014). *Handbuch Bauelemente der Optik*. 7. Aufl. Carl Hanser Verlag, München, Deutschland, 716 S.
- Orfanoudakis, Thanos (2011). „Structural Health Monitoring using BRILLOUIN Time-Domain-Reflectometry“. In: *MONICO Workshop*.
- Othonos, Andreas und Kyriacos Kalli (1999). *Fiber Bragg Gratings*. Artech House Publishers, Boston, USA, 422 S.
- Presl, Robert (2009). *Entwicklung eines automatisierten Messsystems zur Charakterisierung faseroptischer Dehnungssensoren*. unpubl. Masterarbeit, FH Oberösterreich, 148 S.
- Smartec SA (2015). <http://www.smartec.ch/>. (abgerufen am: 27.01.2015).
- Soller, B.J., M. Wolfe und M.E. Froggat (2005). „Polarization resolved measurement of Rayleigh backscatter in fiber-optic components“. In: *OFC Technical Digest, Los Angeles*.
- The MONICO Project (2015). <http://www.monico-eu.org/>. (abgerufen am: 25.03.2015).
- Thévenez, Luc und Francis Berghmans (2011). *Advanced Fiber Optics*. Hrsg. von Luc Thévenez. EPFL Press, Lausanne, Schweiz, 393 S.
- Thyagarajan, K. und Ajoy Ghatak (2007). *Fiber Optic Essentials*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, USA, 242 S.
- Udd, Eric und William B. Spillman (2011). *Fiber Optic Sensors*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, USA, 498 S.
- Wallenberger, Frederick T. und Paul A. Bingham (2010). *Fiberglass and Glass Technology*. 1. Aufl. Springer-Verlag US, New York, USA, 474 S.