Moritz A. Graf*, Fabian Ehmer, Christoph Eisermann, Martin Jakobi und Alexander W. Koch

Faseroptische Überwachung von mechanisch deformierten Kabelgeflechtsstrukturen mittels optischer Zeitbereichsreflektometrie

Fiber-optic monitoring of mechanically deformed cable structures by means of optical time-domain reflectometry

DOI 10.1515/teme-2018-0030

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein neuartiger Ansatz zur Schadensdetektion in Stromversorgungskabeln vorgestellt. Die Funktionalität des Messsystems kann bezüglich des durch Makrobiegungen induzierten Anstiegs des Dämpfungsbelags verifiziert werden. Durch den verwendeten Integrationsansatz sind Mantelschäden im Stromversorgungskabel detektierbar, wodurch langfristige Ausfallgründe frühzeitig erkannt werden. Über eine integrierte optische Faser und ein optisches Zeitbereichsreflektometer kann unabhängig von der elektrischen Energieübertragung im Kabel eine exakte und effiziente Schadenslokalisierung sichergestellt werden, was wiederum eine Zeit- und Kostenersparnis zur Folge hat.

Schlüsselwörter: Zustandsüberwachung, optische Zeitbereichsreflektometrie, Tagebau.

Abstract: This article presents a novel type of damage detection system for power cables. The functionality of the measuring system can be verified with respect to macrobending-induced increase of attenuation. Due to the used integration approach, damage to the sheath at the power supply cable can be detected, whereby long-term failure causes can be detected at an early stage. By means of an integrated optical fiber and an optical time domain reflectometer, regardless of the electrical energy transmission in the cable, an exact and efficient damage localization can be provided, resulting in time and cost-effective procedure.

Keywords: Structural health monitoring, optical time domain reflectometry, opencast mining.

***Korrespondenzautor:** Moritz A. Graf, Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Technische Universität München, Theresienstr. 90, 80333 München, E-Mail: m.graf@tum.de

Fabian Ehmer, Christoph Eisermann, Martin Jakobi, Alexander W. Koch, Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Technische Universität München, Theresienstr. 90, 80333 München

1 Einleitung

Beschädigte Energie- oder Datenübertragungssysteme stellen in vielen Bereichen des sozialen Lebens sowie in den verschiedensten Industriezweigen Probleme dar. Ein besonders präzises Beispiel aus dem alltäglichen Leben ist die Beschädigung von Glasfaserkabeln bei innerstädtischen Bauarbeiten. Für viele Industriesektoren stellen die mit der Beschädigung einhergehenden Ausfallzeiten von strombetriebenen Maschinen unnötige zusätzliche Opportunitätskosten dar. Von besonderer Signifikanz treten diese entgangenen Gewinne im deutschen Tagebausektor auf. Die dort eingesetzten Abbaugeräte werden über teure, teilweise kilometerlange Stromversorgungskabel elektrisch betrieben. Oftmals liegen dabei die Kabel ungeschützt im Bewegungsareal der Abbau- und Nutzfahrzeuge, der sogenannten Arbeitssohle [19, S. 292ff]. Staubige Umgebungsbedingungen und die damit verbundenen schlechten Sichtverhältnisse auf dem Tagebau führen zu regelmäßigem Überfahren der Kabel durch schwere Nutzfahrzeuge. Auf resultierende Kabelbeschädigungen und Maschinenausfälle folgt die Schadenslokalisation mit anschließender Reparatur durch großzügiges Austauschen der betroffenen Kabelstelle. Bei großen Abbaugeräten mit hohen Fördermengen, wie zum Beispiel bei einem Schaufelradbagger, stellt die Dauer eines Maschinenstillstandes einen entscheidenden Faktor für die entgangenen Gewinne eines Tagebaubetreibers dar.

Der Stand der Technik beinhaltet überwiegend elektrische Schadensdetektionssysteme. Diese unterteilen sich in verschiedene Verfahren zur Erkennung der Fehlerart sowie fehlerbedingte Vorortungs- und Nachortungsverfahren zur Lokalisierung des Defekts. Aufgrund einiger technischer Nachteile gehört in der Praxis die manuelle Sichtprüfung der Kabel nach wie vor zu den gängigen Methoden. Bisherige faseroptische Forschungsansätze im Kontext dieses Beitrags konzentrieren sich bezüglich der Überwachung

unterschiedlichster Kabelstrukturen zumeist auf die Integration der Sensorik in den Leiter oder in Leiternähe [7, 12, 14, 18]. Ziel hierbei ist für gewöhnlich die Überwachung von beschädigungsbedingten Temperaturabweichungen im Kabel, beispielsweise durch Faser-Bragg-Gitter [6, 11, 13], oder temperatursensitive Rückstreuverfahren [2, 7, 12, 15]. Bei der Anwendung im Tagebau stellen die langen Messstrecken, wechselnde Temperaturen der umgebenden Arbeitssohle (Tag/Nacht, Jahreszeiten, Witterung etc.), möglichst hohe Ortsauflösung des Schadensdetektionssystems und eventuelle Dehnungskompensationen bei gleichzeitig möglichst geringem Eingriff in den Kabelaufbau, temperaturbasierte faseroptische Ansätze vor große Probleme.

Die hier präsentierte faseroptische Überwachung von Kabelgeflechtsstrukturen mittels optischer Zeitbereichsreflektometrie stellt eine Alternative zu bisherigen Forschungsansätzen dar. Mechanisch besonders beanspruchte Stromversorgungskabel besitzen im Tagebau zumeist ein zusätzliches Torsionsschutzgeflecht. Die Integration eines Lichtwellenleiters in diese Geflechtsstruktur, welche sich im äußeren Kabelmantel befindet, bildet die Grundlage des Messsystems. Über das Messprinzip der optischen Zeitbereichsreflektometrie kann über Beschädigungen des Lichtwellenleiters auf die Schadensposition im Kabelverlauf geschlossen werden. Messergebnisse zum grundlegenden Funktionalitätsnachweis dieser neuartigen Sensoranordnung werden im Nachfolgenden präsentiert.

2 Grundlagen

Stromversorgungskabel von Großgeräten, insbesondere trommelbare Kabel von Schaufelradbaggern, sind auf dem Tagebau großen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Aus diesem Grund besitzen sie eine zusätzliche Geflechtsschicht aus Aramid- oder Polyesterfasern in der Mantelstruktur des Kabels. Diese zweidimensionalen Geflechtstrukturen werden automatisiert während des Herstellungsprozesses des Kabels gefertigt. Zumeist wird ein konstanter Geflechtswinkel von 45° verwendet. Dieser bezieht sich in der Anwendung auf den Winkel zwischen Kabelachse und den einzelnen Fasern des Schutzgeflechts (vgl. Abbildung 1) und stellt einen Kompromiss zwischen resultierender Biegsamkeit und Zugbelastungsschutz der Kabel dar. Als Geflechtsmuster wird für gewöhnlich ein sogenanntes *Diamond Pattern* gewählt [1, S. 55ff].

Dieses besteht in der Anwendung häufig aus 36 Fasersträngen, die sich helixartig um das Kabel winden und hierbei je nach Position abwechselnd über- oder unter-

flochten werden (vgl. Abbildung 1). Ein Strang besteht hierbei aus jeweils zwei Einzelfasern mit einem Durchmesser unter 1 mm. Abhängig vom Einsatzgebiet können sich die geometrischen Abmessungen der Kabelkomponenten stark unterscheiden. Das betrachtete trommelbare Stromversorgungskabel des Typs (N)TSCGEWOEU (18/30kV; 3x120+3x70/3) für den Tagebau besitzt ein Torsionsschutzgeflecht mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 67 mm, bestehend aus Polyesterfasern. Für gewöhnlich werden Systemlängen der Stromversorgungskabel von bis zu 1,5 km im deutschen Tagebau verwendet [19, S. 298ff].

Abb. 1: Schematische Darstellung des Geflechtsmusters im Kabelaufbau.

Aufgrund des dargestellten Aufbaus der Geflechtsstruktur im Stromversorgungskabel kommt es bei der Integration zu einer Ondulation der optischen Faser in der Geflechtsstruktur. Dieser wellenlinienartige Verlauf kann die Funktionalität der faseroptischen Sensorik beeinträchtigen, da optische Fasern, wie im Nachfolgenden dargestellt, von externen Einflüssen wie Makrokrümmungen beeinflusst werden können.

Die Verwendung von integrierter faseroptischer Sensorik weist im Bereich der Nachrichtentechnik sowie der Datenübertragung im Vergleich zu elektrischen Systemen erhebliche Vorteile auf [9, S. 15ff] [22, S. 23f]. Besonders zeichnen sie sich bei langen Übertragungsstrecken sowie bei dem Einsatz in unmittelbarer Nähe von elektromagnetischen Störfeldern aus. In einem Lichtwellenleiter wird ein Messsignal in Form einer elektromagnetischen Welle mittels Totalreflexion am Übergang zwischen Kern und Mantelschicht übertragen. Da bei dieser Totalreflexion die gesamte eingestrahlte Leistung reflektiert wird, tragen lediglich andere Phänomene zum Leistungsverlust bei [3, S. 35ff]. Diese Leistungsabschwächung zwischen einge-

strahlter Eingangsleistung P_{ein} im Vergleich zu der am Ende des Lichtwellenleiters mit der Länge L ankommenden Leistung P_{aus} wird auch als Dämpfung bezeichnet, besitzt grundsätzlich den Dämpfungsbelag

$$\alpha = -10 \cdot \lg \left(\frac{P_{aus}}{P_{ein}} \right) \cdot \frac{1}{L} \quad (1)$$

und wird als positive Zahl [22, S. 46ff] mit der Einheit $\frac{\text{dB}}{\text{km}}$ angegeben [3, S. 115ff][5, S. 71ff][16, S. 371ff]. Häufig wird als Bezugsleistung für P_{ein} der Referenzwert 1 mW gewählt und nicht der Dämpfungsbelag, sondern das sogenannte Pegel- bzw. Dämpfungsmaß

$$p = \alpha \cdot L = -10 \cdot \lg \left(\frac{P_{aus}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (2)$$

in der Einheit dBm angegeben [4, S. 27ff] [16, S. 371ff]. Die für den Dämpfungsbelag α verantwortliche Leistungsreduzierung setzt sich aus mehreren Einzeldämpfungen zusammen [3, S. 115ff]. Die hauptverantwortliche Dämpfungskomponente in Glasfasern ist dabei die Rayleigh-Streuung [5, S. 71ff] [22, S. 706ff]. Sie beschreibt die Streuung des Lichts an mikroskopischen Inhomogenitäten des amorphen Glasfaserkerns, deren geometrische Abmessungen kleiner als die Übertragungswellenlänge λ sind [3, S. 118ff] [21, S. 420ff]. Diese Inhomogenitäten verursachen minimale Brechzahlunterschiede, welche beim Durchlaufen des Kernmaterials zu Streulicht in alle Raumrichtungen führen. Darüber hinaus kann dieser Effekt durch Verunreinigungen oder Störstellen zusätzlich verstärkt werden [3, S. 118ff] [17, S. 86ff]. Das Rückstreuphanomen wird mittels Abbildung 2 schematisch auf einer Länge Δz des Lichtwellenleiters veranschaulicht.

Abb. 2: Schematische Darstellung des optischen Rückstreuphanomens [3, S. 220ff] [5, S. 74ff].

Ein großer Teil der reflektierten Energie verlässt so den Lichtwellenleiter, da die Bedingungen der Totalreflexion nicht erfüllt werden kann [5, S. 71ff]. Ein wesentlich kleinerer Bruchteil der eingestrahnten Lichtleistung wird bei der Rayleigh-Rückstreuung zum Fasereingang unter Berücksichtigung der Totalreflexionsbedingung mit gleichbleibender Wellenlänge zurückreflektiert und kann dort

messtechnisch erfasst werden [10, S. 205ff]. Der entstandene Leistungsverlust durch Rayleigh-Streuung

$$\alpha_R = \frac{\alpha_{1\mu}}{\lambda^4} \quad (3)$$

ist stark von der Übertragungswellenlänge abhängig, wobei die materialspezifische Konstante $\alpha_{1\mu}$ den Dämpfungsbelag für $\lambda = 1 \mu\text{m}$ bezeichnet, welcher für Quarzglas näherungsweise den Wert $0,8 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$ annimmt [4, S. 27ff] [17, S. 86ff] [21, S. 420ff]. Die Rayleighstreuung in reinem SiO_2 ist nicht von der Umgebungstemperatur des Lichtwellenleiters abhängig. Jedoch haben hohe Temperaturen bei der Herstellung der optischen Faser einen Einfluss durch die im erstarrten Glaskern lokal unterschiedlichen Dichteschwankungen. Diese Schwankungen verursachen eine stärkere Rayleigh-Streuung und damit höhere Dämpfungswerte [10, S. 101ff] [20].

Zusätzlich zu intrinsischen Dämpfungen treten Leistungsverluste aufgrund von externen Einflüssen, beispielsweise durch Faserbiegungen verursacht, auf [3, S. 115ff]. Diese sogenannten Makrokrümmungen entstehen durch Biegestellen mit konstantem Krümmungsradius auf einer Länge von über 1 mm [3, S. 122ff] und treten beispielsweise durch das Aufwickeln auf einer Trommel während der Faserverlegung auf [9, S. 25ff] [10, S. 104ff]. Für Standard-Singlemode-Fasern ist die Krümmungsempfindlichkeit ab einem Krümmungsradius von 30 mm vernachlässigbar [21, S. 426ff]. Anhand Abbildung 3 sollen im Folgenden die möglichen Auswirkungen einer Makrokrümmung erläutert werden.

Abb. 3: Schematische Darstellung einer Makrokrümmung und deren Auswirkungen [3, S. 38ff].

Vor einer Makrokrümmung breitet sich der Lichtstrahl im Winkel α unter der Bedingung der Totalreflexion im Lichtwellenleiter aus. Hierbei ist zu beachten, dass lediglich Winkel, welche kleiner als der Grenzwinkel α_{grenz} , sind totalreflektiert werden können. Eine Reflexionsstelle innerhalb der Makrokrümmung führt zu einer Reflexionswinkeländerung im Winkel α' , welcher auf die in Abbildung 3 eingezeichnete Tangente bezogen wird. Für den

Fall, dass $\alpha' > \alpha_{\text{grenz}}$, wird der Lichtstrahl nicht mehr totalreflektiert, wodurch es zur teilweisen Auskopplung der Lichtleistung in den Mantel kommt. Abschließend ist zu beachten, dass die Ausbreitung nach der Makrokrümmung unter dem Winkel α'' erfolgt [3, S. 38ff].

Die zuvor beschriebenen Dämpfungsphänomene können mithilfe der optischen Zeitbereichsreflektometrie (engl. *optical time-domain reflectometry* – OTDR) vermessen werden. Hierbei werden monochromatische Lichtpulse einer Laserdiode in die zu vermessende optische Faser eingekoppelt. Nach dem Senden wird die durch Rayleigh-Streuung zurückreflektierte Lichtleistung über einen Strahlteiler oder Faserkoppler auf einen Detektor geleitet und dort erfasst. Da beim Durchlaufen des Lichtpulses durch die optische Faser kontinuierlich Bruchteile zurück gestreut werden, ist die Messung über die gesamte optische Faser räumlich verteilt. Über die Laufzeit der Lichtpulse und die Materialparameter der Messfaser kann somit eine orts aufgelöste Dämpfungsdarstellung der Lichtwellenleiterstrecke in einem Reflektogramm erzeugt werden. Aufgrund der Form des darin abgebildeten Dämpfungsverlaufs kann auf sogenannte Ereignisse, wie Makrobiegungen, Spleiße, Stecker oder Faserenden, geschlossen werden. Diese Ereignisse können, je nach Ortsauflösung des Messgeräts, exakt lokalisiert werden [9, S. 201ff] [22, S. 704ff]. Abbildung 4 zeigt schematisch einen typischen Dämpfungsverlauf eines OTDR-Reflektogramms. Hierbei ist zunächst die kontinuierliche Rayleigh-Streuung mit einer konstanten Dämpfungszunahme über die gesamte Messstreckenlänge zu erkennen. Bei Steckerverbindungen und Faserenden mit Brechzahländerungen treten an Grenzflächen aufgrund von Fresnelreflexionen, wie bei der Rayleigh-Streuung, Verluste in Form von Rückreflexionen oder Streuungen auf. Spleiße zeigen im Vergleich eine leichte Dämpfung ohne Reflexion. Eine Makrobiegung zeigt ebenso eine Dämpfung ohne reflektierende Komponente [9, S. 201ff] [21, S. 428ff]. Die Höhe der Dämpfung ist abhängig vom Biegeradius des Lichtwellenleiters an dieser Stelle. Über die Breite des erhöhten Dämpfungsbereichs lässt sich zudem auf die Länge der Makrobiegung schließen.

Der Dämpfungsbelag α von Spleiß, Stecker oder Makrokrümmung kann durch das Verhältnis von Pegel p und der dazugehörigen faseroptischen Streckenlänge L in Formel 4 beschrieben werden [9, S. 201ff] [22, S. 704ff]:

$$\alpha = \frac{p_{t_1} - p_{t_2}}{L_{t_2} - L_{t_1}}. \quad (4)$$

Für die Dämpfungsbestimmung eines Ereignisses stellt t_1 den Zeitpunkt unmittelbar vor und t_2 den Zeitpunkt direkt nach einem Ereignis dar. Wird hingegen t_1 als der Anfang und t_2 als das Ende der zu vermessenden Faser

Abb. 4: Darstellung einer typischen OTDR-Messkurve [9, S. 201ff] [21, S. 428ff].

festgelegt, so kann der Dämpfungsbelag α der gesamten Messstrecke bestimmt werden. Das OTDR-Verfahren zählt zu den zerstörungsfreien Messverfahren [22, S. 704ff] und bietet als reflektierendes Messsystem den Vorteil, dass die Messung von einer Seite durchgeführt werden kann [8].

3 Messaufbau

Der neu entwickelte Ansatz zur Schadensdetektion von Kabelbeschädigungen basiert, wie zuvor dargelegt, auf der Integration einer optischen Faser in das Torsionsschutzgeflecht eines im Tagebau eingesetzten Stromversorgungs-kabels. In diese Geflechtsstruktur können helixartig optische Fasern eingebracht werden. Durch die radialsymmetrische Anordnung können, im Gegensatz zu Sensoren, welche parallel zur Kabelachse integriert werden, die Messdaten auch beim Wegrollen des Kabels erfasst werden. Die leichte Integrierbarkeit und die elektromagnetische Immunität der faseroptischen Sensoren erweist sich in dieser Anwendung als zusätzlicher Vorteil. Um die Funktionalität der Sensorik über die extremen Längen der Stromversorgungs-kabel nachzuweisen, muss insbesondere der Einfluss der, durch die Ondulation der optischen Faser hervorgerufenen, Makrokrümmungen auf das Sensorsignal der optischen Faser betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde der in Abbildung 5 schematisch dargestellte Messaufbau entworfen. Hierbei sind an einer Basisplatte in äquidistanten Abständen Erhöhungen angebracht. Die geometrischen Abmessungen der Erhöhungen und deren Abstände zueinander wurden so gewählt, dass sie denen der beziehungsweise unterflochtenen Geflechtsstränge und deren Abständen im realen Kabel entsprechen.

Auf diese Basisplatte wurde eine Monomode-optische Faser mit der Gesamtlänge von ca. 1800 m (entspricht bei einem Flechtwinkel von 45° , einer theoretischen Kabellän-

Abb. 5: Schematische Darstellung des Messaufbaus.

ge von ca. 1,2 km) aufgewickelt und deren Dämpfungsbelag als Referenzmessung mittels zuvor beschriebener optischer Zeitbereichsreflektometrie bestimmt. Abbildung 5 zeigt links schematisch den Aufbau des optischen Zeitbereichsreflektometers [5, S. 209ff], welches über eine Vorlauffaser von 1006 m (Länge variabel, 1006 m herstellerbedingt) mit der Messfaser verbunden ist. Die Ondulation der Messfaser wird mittels zweier weiterer Platten (vgl. Abbildung 5, Deckel oben, bzw. Deckel unten) analog zur Ondulation einer optischen Faser in der Geflechtsstruktur des Stromversorgungskabels erzeugt. Hierbei greifen die Erhöhungen der Deckel in die Abstände zwischen den Erhöhungen der Basisplatte und erzeugen so den charakteristischen wellenlinienartigen Verlauf der optischen Faser in einem *Diamond Pattern* [1]. Der durch die Makrokrümmungen resultierende Dämpfungsbelag konnte nachfolgend evaluiert werden.

Abb. 6: Simulierte Beschädigung eines Starkstromkabels mit Torsionsschutzgeflecht.

Abbildung 6 zeigt die simulierte Querbelastung des Stromversorgungskabels mit typisch beim Tagebau auftretenden Querbelastungen. Die Beschädigungen des Mantels und der Geflechtsstruktur sind klar erkennbar, wodurch

die in der Praxis verzeichneten Kabelbeschädigungen bei Überrollungen im Tagebau bestätigt werden. Im Anwendungsfall des Tagebaus kann es dazu kommen, dass Mantelschäden nicht sofort registriert werden, da die Stromversorgung aufrechterhalten bleibt. In diesem Fall können zum Beispiel Durchschläge oder das Eindringen von Feuchtigkeit zur fortschreitenden Beschädigung führen, welche langfristig mit unvorhergesehenem Maschinenstillstand einhergeht. Bei einer wie in Abbildung 6 dargestellten Beschädigung des Mantels, der Geflechtsstruktur und der integrierten optischen Faser detektiert das auf optischer Zeitbereichsreflektometrie basierende Messverfahren die Position des Schadens durch den veränderten Abstand zwischen OTDR und Faserende. Die Position der Beschädigung entlang des Kabels ist somit unabhängig von der Funktionstüchtigkeit der elektrischen Leiter des Stromversorgungskabels bestimmbar. Zum Nachweis dieser Funktionalität des Messaufbaus wurde die im Messaufbau befindliche optische Faser zehn Mal aktiv durchtrennt und jeweils die Schadensstellen lokal erfasst. Die Länge der jeweils abgetrennten optischen Faser betrug 21 cm, was der Ganghöhe der helixartig integrierten optischen Faser in der zuvor dargelegten Geflechtsstruktur mit dem durchschnittlichen Durchmesser von 67 mm entspricht.

4 Messergebnisse

Die beschriebene, im Messaufbau ondulierte optische Faser wird nun über eine Vorlauffaser mit 1006 m Länge an das optische Zeitbereichsreflektometer angeschlossen und der Dämpfungsbelag in unbelasteten Referenzmessungen mit belasteten Messungen verglichen. In nachfolgender Abbildung 7 ist, aus Gründen der Vollständigkeit, zunächst links das gesamte Reflektogramm zu erkennen.

Abb. 7: Reflektogramm mit Dämpfungsverlauf vor und nach der Ondulation der optischen Faser.

Bei allen Messungen wurde über die Reflektogrammmessung über eine Dauer von 5 min bei einer Pulsdauer von 5 ns und einer Ortsauflösung von 4 cm gemittelt. Die Wellenlänge betrug 1550 nm. Markante Ereignisse (vgl. Abbildung 4) sind in Form der Fresnelreflektion am Beginn der Vorlauffaser bei 0,0 m erkennbar. Weiterhin ist die Reflektion im Stecker zwischen Vorlauffaser und der Messfaser bei 1006 m und am Ende der Messfaser bei ca. 2800 m auszumachen.

Der Vergrößerung des Dämpfungsbereichs ist zu entnehmen, dass die Makrobiegung der realgetreu ondulierten optischen Faser keinen nennenswerten negativen Einfluss auf die Funktionalität der faseroptischen Sensorik in der beschriebenen Geflechtsstruktur hat. Bei eingeschränkter Funktionalität der Sensorik würde der registrierte Dämpfungsbelag über die ondulierte Länge der optischen Faser zu schnell abfallen, sodass das Ereignis des Faserendes nicht mehr vom Rauschboden im Reflektogramm unterscheidbar wäre. Der Dämpfungsbelag der Messfaser wurde nach Gleichung 4 bestimmt. Sowohl die Referenzmessung (unbelastet) (vgl. Abbildung 7, blau) als auch die Messung (belastet) wurden fünf Mal wiederholt. Die resultierenden Dämpfungsbeläge, deren Mittelwerte sowie deren Abweichungen „Differenz“ bestätigen die Funktionalität der faseroptischen Sensorik und sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Zustand/Messung	unbelastet	belastet
Messung 1 (db/km)	0,269	0,305
Messung 2 (db/km)	0,233	0,294
Messung 3 (db/km)	0,228	0,294
Messung 4 (db/km)	0,261	0,284
Messung 5 (db/km)	0,228	0,294
Mittelwert (db/km)	0,244	0,294
Differenz (db/km)	0,050	

Im Anschluss an die Ondulationsmessung wurde die optische Faser am Faserende zehn Mal aktiv durchtrennt und jeweils die Schadensstellen erfasst. Die Länge der abgeschnittenen optischen Fasern betrug hierbei 21 cm. Der Abstand zum Faserende wurde nach jedem Durchtrennen der optischen Faser in 3 separaten Messungen über die Software- und herstellerbasierte Ereignisdetektion des optischen Zeitbereichsreflektometers erfasst. Abbildung 8 zeigt die detektierten Ereignisse der Faserenden bei der ursprünglichen Faserlänge L und nach jedem Durchtrennen der optischen Faser.

Abb. 8: Reflektogramm mit Lokalisierung des Faserendes im Verlauf der Faserdurchtrennungsmessungen.

Im Falle einer Mantelbeschädigung eines Stromversorgungskabels durch Überrollen kann die Messanordnung, wie in Abbildung 8 erkennbar, die Beschädigung der optischen Faser im Kabelverlauf klar lokalisieren. Nachfolgende Tabelle zeigt die Lokalisierung der Schadensstelle im Abstand $L - \Delta L$ in den Messreihen durch die Ereignisdetektion des optischen Zeitbereichsreflektometers im Detail.

$L - \Delta L$ / Messung	Messung 1 (m)	Messung 2 (m)	Messung 3 (m)	Mittelwert (m)	Messdifferenz OTDR (m)
L - 0 cm	2804,62	2804,54	2804,58	2804,58	
L - 21 cm	2804,42	2804,38	2804,38	2804,39	0,19
L - 42 cm	2804,18	2804,10	2804,18	2804,15	0,24
L - 63 cm	2803,94	2803,94	2803,94	2803,94	0,21
L - 84 cm	2803,74	2803,74	2803,74	2803,74	0,20
L - 105 cm	2803,46	2803,50	2803,46	2803,47	0,27
L - 126 cm	2803,26	2803,26	2803,30	2803,27	0,20
L - 147 cm	2803,14	2803,10	2803,14	2803,13	0,15
L - 168 cm	2802,94	2802,94	2802,94	2802,94	0,19
L - 189 cm	2802,82	2802,82	2802,82	2802,82	0,12
L - 210 cm	2802,47	2802,51	2802,51	2802,50	0,32

Die in diesem Beitrag präsentierten Ergebnisse weisen die Funktionalität des entwickelten Messsystems nach. Durch den neuartigen Integrationsansatz sind Mantelschäden im Stromversorgungskabel detektierbar, wodurch langfristige Ausfallgründe frühzeitig detektierbar sind. Über den Abstand zwischen dem Faserende der integrierten optischen Faser und dem optischen Zeitbereichsreflektometer, kann, unabhängig von der elektrischen Energieübertragung im Kabel, eine exakte, effiziente Schadenslokalisierung sichergestellt werden, was wiederum eine Zeit- und Kostenersparnis zur Folge hat.

Literatur

- [1] S. Adanur. *Handbook of industrial textiles*. Technomic Publishing AG, 1995.
- [2] E. Bascom und B. Clairmont. Considerations for Advanced Temperature Monitoring of Underground Power Cables. 2014.
- [3] W. Bludau. *Lichtwellenleiter in Sensorik und optischer Nachrichtentechnik*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, Lübeck, 1. Auflage, 1998.
- [4] V. Brückner. *Optische Nachrichtentechnik - Grundlagen und Anwendungen*. Teubner Verlag, 2003.
- [5] B. Bundschuh und J. Himmel. *Optische Informationsübertragung*. Oldenbourg Verlag, 2003.
- [6] J. Burgmeier, W. Schippers, N. Emde, P. Funken und W. Schade. Femtosecond laser-inscribed fiber Bragg gratings for strain monitoring in power cables of offshore wind turbines. *Appl. Opt.*, 50(13):1868–72, 2011.
- [7] T. H. Dubaniewicz, P. G. Kovalchik, L. W. Scott und M. A. Fuller. Distributed measurement of conductor temperatures in mine trailing cables using fiber-optic technology. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 34(2):395–398, 1998.
- [8] D. Eberlein. LWL-Messtechnik - Teil1: Hilfsmittel, Vorbereitung und Messverfahren. *Elektropraktiker*, 60. edition, 2006.
- [9] D. Eberlein, W. Glaser, C. Kutza und C. Labs, J. und Manzke. *Lichtwellenleiter-Technik*. Expert Verlag, 8. Auflage, 2010.
- [10] R. Engerlbrecht. *Nichtlineare Faseroptik - Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. Springer Vieweg Verlag, 1. Auflage, 2014.
- [11] W. Gan und Y. Wang. Application of the distributed optical fiber grating temperature sensing technology in high-voltage cable. *Proceedings, 2011 Int. Conf. Electron. Mech. Eng. Inf. Technol.*, S. 4538–4541, 2011.
- [12] A. Günday und S. E. Karlık. Optical Fiber Distributed Sensing of Temperature, Thermal Strain and Thermo-Mechanical Force Formations on OPGW Cables under Wind Effects. 8:462–467.
- [13] W. Guo und Y. Li. Temperature and Strain Online Monitoring System of Power Cable Based on Fiber Bragg Grating. *Proc. 4th Int. Conf. Wirel. Commun. Netw. Mob. Comput.*, (1):1–4, 2008.
- [14] Q. Jiang und Q. Sui. Technological study on distributed fiber sensor monitoring of high voltage power cable in seafloor. *Proc. 2009 IEEE Int. Conf. Autom. Logist. ICAL 2009*, S. 1154–1157, 2009.
- [15] A. A. Khan, N. Malik, A. Al-Arainy und S. Alghuwainem. A review of condition monitoring of underground power cables. *Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Cond. Monit. Diagnosis, C. 2012*, S. 909–912, 2012.
- [16] R. Martin. Optoelektronik. In *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, chapter 6. Hering, E., Bressler und K., Gutekunst, J. Springer Vieweg Verlag, 7. Auflage, 2017.
- [17] G. Schiffner. *Optische Nachrichtentechnik - Physikalische Grundlagen, Entwicklung, moderne Elemente und Systeme*. Teubner Verlag, 1. Auflage, 2005.
- [18] K. Singh und S. Hon. Cable Monitoring Solution - Predict With Certainty Technology. *Proc. 12th IET Int. Conf. Dev. Power Syst. Prot.*, 2014.
- [19] R. Stoll, C. Niemann-Delius, C. Drebenstedt und K. Müllensiefen. *Der Braunkohlentagebau - Bedeutung, Planung, Betrieb, Technik, Umwelt*. Springer Verlag, 1. Auflage, 2008.
- [20] K. Tsujikawa, K. Tajima und M. Ohashi. Rayleigh Scattering Reduction Method for Silica-Based Optical Fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 18. edition, 2000.
- [21] M. Werner. *Nachrichtentechnik - eine Einführung in alle Studiengänge*. Springer Vieweg Verlag, 8. Auflage, 2017.
- [22] O. Ziemann, J. Krauser, P. Zamzow und W. Daum. *POF-Handbuch - Optische Kurzstrecken-Übertragungssysteme*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2007.