Whitepaper

VIAVI Solutions

Prognose von Faserbrüchen und Schwachstellen

Feldversuch mit Brillouin-basierter Faserdehnungsmessung an Langstrecken-Luftkabeln

Luftkabel wurden mit einem Brillouin-OTDR charakterisiert. Gemessen wurde die Faserdehnung mit einer räumlichen Auflösung von 10 m über ein Kabel mit einer Länge von 152 km und einer maximalen Standardabweichung von 0,0015 %. Dabei wurde eine Testlösung vorgeführt, die auf die Mehrzahl der Übertragungsstrecken in der Telekommunikation anwendbar ist.

Einführung

Netzbetreiber benötigen eine Methode, um Faserbrüche, die durch eine übermäßige Dehnung und Schwachstellen in der Glasfaser ausgelöst werden, proaktiv vorherzusagen. Dieses Problem wird durch die Witterung und durch geologische Bedingungen verursacht, die die Dehnungs- und Temperaturbelastung des Glasfaserkabels fortwährend verändern. Mit Hilfe prädiktiver Messungen ist ein Wartungsteam in der Lage, die Einsatzdauer des Kabels durch Verringerung der Belastung zu verlängern oder es proaktiv vor der Unterbrechung der Übertragung auszutauschen. In den letzten Jahren haben dielektrische Verkabelungslösungen in Glasfasernetzen starke Verbreitung gefunden. Gegenüber Kabeln mit Metall-Armierung bieten sie mehrere Vorteile, wie geringere Kosten, ein geringeres Gewicht und eine einfachere Handhabung. Zudem benötigen sie keine Erdung. Trotzdem bedeutet ein leichterer Kabelaufbau häufig auch einen geringeren mechanischen Schutz, so dass die Eignung dieser Kabel für extreme Einsatzbedingungen zu prüfen ist. Um einen aussagekräftigen Vergleich zu ermöglichen, hat Rostelecom vor zehn Jahren nördlich von Irkutsk dielektrische selbsttragende Kabel (ADSS, All-Dielectric Self-Supporting) und optische Erdungsdrähte (OPGW, Optical Ground Wire) installiert. In dieser Region schwankt die Temperatur zwischen -57 °C und +40 °C und es kommt vor, dass sich eine 10 cm dicke Eisschicht auf dem Kabel bildet (siehe Bild 1a). Im Laufe der Zeit kann so der Kabelaufbau zerstört werden (siehe Bild 1b).

Bei einem derart geschwächten Kabel kann die Dehnung der inneren Faser den von den Herstellern empfohlenen Maximalwert von 0,2 % deutlich überschreiten. Mit der Verbreitung von biegeunempfindlichen Glasfasern ist es jedoch möglich, dass die auftretende Dämpfung immer noch moderat und die Datenübertragung fehlerfrei bleiben. Das darf jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass die Glasstruktur dieser Faser mechanisch keineswegs stärker ist und wahrscheinlich bei einer Dehnung (Elongation) von 4 % brechen wird. Wenn sich die Faserdämpfung nicht länger durch kritische Dehnungswerte deutlich erhöht, dann müssen die traditionellen Fehlerdiagnose-Verfahren einer Überprüfung unterzogen werden.

Bild 1a: Eisbildung

Bild 1b: Gerissene Zugentlastungselemente

Die Brillouin-Spektrumanalyse ist die einzige optische Charakterisierungsmethode, die in der Lage ist, präzise verteilte Dehnungsmessungen durchzuführen. Es ist allgemein bekannt, dass die Resonanzfrequenz der Brillouin-Streuung linear von der Faserdehnung abhängig ist. Daher findet die betreffende Messung umfassend in der Faser-Sensorik Anwendung. Das Hauptproblem bei Übertragungsstrecken in der Telekommunikation besteht darin, dass sie für gewöhnlich eine Länge von 100 km überschreiten und dass eine hohe räumliche Auflösung benötigt wird, um alle Dehnungsereignisse zu erfassen.

Ein mögliches Messverfahren ist die optische Brillouin-Analyse im Zeitbereich (B-OTDA, Brillouin Optical Time Domain Analysis). Während dieser Messaufbau bedingt durch die stimulierte Interaktion die stärksten Signale zur Verfügung stellt, besitzt er aufgrund der benötigten Schleifenkonfiguration eine nur begrenzte Reichweite. In der Praxis würde die größte messbare Entfernung einer Einweg-Übertragungsstrecke einer maximalen Länge von 80 km[1, 2] entsprechen. Größere Reichweiten wären mit Hilfe optischer Verstärker, die über die Strecke verteilt sind, realisierbar[3, 4]. Allerdings wäre der maximale Abstand von 75 km zwischen den Verstärkern nicht auf eine Übertragungsstrecke in der Telekommunikation anwendbar, ganz zu schweigen von den über eine derartige Entfernung auftretenden komplizierten nichtlokalen Effekten[5]. Die B-OTDA ist also nicht auf typische Kabelinstallationen in der Telekommunikation skalierbar und kann praktisch nicht für Messungen genutzt werden, ohne an Kabel mit einer Länge von über 80 km einen Abzweig einzufügen.

Eine zweite Möglichkeit ist die optische Brillouin-Reflektometermessung im Zeitbereich (B-OTDR, Optical Time Domain Reflectometry) an einem einzelnen optischen Testsignal, das von einem Ende der Faserstrecke eingekoppelt wird. Das B-OTDR erfasst das spontan zurückgestreute Brillouin-Licht, wie es bei einem reguläres OTDR mit der Rayleigh-Streuung der Fall sein würde. Der Vorteil dieser Konfiguration wird deutlich, wenn man eine Übertragungsstrecke prüft, die eine zu große Dämpfung oder sogar einen Faserbruch aufweist, denn das B-OTDR stellt immer zu allen erfassbaren Abschnitten Daten zur Verfügung. Im Laborexperiment wurde durch eine Kombination aus kohärenter Erkennung und Raman-Verstärkung[6] eine Rekordlänge von 150 km erreicht. Allerdings wären die räumliche Auflösung von 50 m und die Messgenauigkeit am fernen Ende nicht ausreichend. Auch für das B-OTDR waren optische Inline-Verstärker in Erwägung gezogen worden[7], die aber ebenfalls nicht für Übertragungsstrecken in der Telekommunikation nutzbar wären.

OneAdvisor 1000 DTSS zur verteilten faseroptischen Temperatur- und Dehnungsmessung

In diesem Whitepaper wird eine neuartige Implementierung eines kohärenten Brillouin-OTDRs beschrieben, das in ein batteriebetriebenes, feldtaugliches Messgerät (OneAdvisor 1000 DTSS) eingesetzt wurde. Ein erster Prototyp des VIAVI B-OTDRs wurde genutzt, um ein installiertes Luftkabel mit einer Länge von 152 km und einer Gesamtdämpfung von 34 dB mit einer räumlichen Auflösung von 10 m zu charakterisieren. Benötigt wurden zwei OTDR-Aufnahmemessungen, die von beiden Enden der Übertragungsstrecke aus durchgeführt wurden. Unserer Meinung nach ist dies die einzige Konfiguration, die in der Lage ist, die Entfernungen zu messen, die bei installierten Übertragungsstrecken in der Telekommunikation anzutreffen sind.

Versuchsaufbau

Das verwendete Messgerät nutzt die kohärente Erkennung, um selektiv die spektralen Rayleigh- oder Brillouin-Komponenten der zurück gestreuten Signale zu erkennen. Es kann reguläre OTDR-Kurven zur Charakterisierung der Dämpfung generieren, die Daten der Brillouin-Frequenzverschiebung (BFS) zur Ermittlung der Dehnungsbelastung (bei einer angenommenen konstanten Temperatur) auswerten und zudem das Landau-Placzek-Verhältnis (LPR) anwenden, um eine unabhängige Ermittlung sowohl der Temperatur als auch der Dehnung zu gewährleisten[8]. Damit stehen dem Anwender drei Typen von OTDR-Messungen, nämlich Signaldämpfung, Dehnung und Temperatur, zur Ermittlung des Status der zu testenden Glasfaser zur Verfügung.

Ergebnisse

Während dieser Versuchsreihe wurden sieben Glasfasern an drei Standorten in Ust-Kut, Kirenga und Sewerobaikalsk (Russland) getestet und 23 vollständige, in der Mehrzahl bidirektionale Aufnahmemessungen mit Rayleigh- und Brillouin-OTDRs durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sind in den Abbildungen 1 bis 3 dargestellt.

Abbildung 1 zeigt die Dehnung (Elongation) in Abhängigkeit von der Entfernung für die Strecke von Ust-Kut nach Kirenga. Sie besteht aus zwei, von beiden Faserenden durchgeführten Aufnahmemessungen. Die von Kirenga aus erfasste Kurve wurde invertiert, so dass die gesamte Übertragungsstrecke angezeigt wird und die Übereinstimmung in der Streckenmitte gut zu erkennen ist. Die Abflachungen (Plateaus) in der Kurve sind mit ihren spezifischen Frequenzverschiebungen typisch für eine Luftkabel-Installation, bei der die vorgefertigten Kabelabschnitte nicht länger als 15 km sind und jedes einzelne Kabel mehrere Glasfasern unterschiedlicher Fertigungsreihen enthält. In der Tat ist die Änderung der Brillouin-Frequenzverschiebung in der OTDR-Kurve häufig einfacher zu erkennen als die Spleißdämpfung. Dieser Umstand ist für die Auswertung nutzbar. Die Brillouin-Frequenzverschiebung eines bestimmten Glasfaser-Typs kann in Abhängigkeit von der Glasfaser-Fertigungsreihe mit ± 20 MHz um einen Nennwert schwanken[9], was einer Dehnung von ± 0,04 % entspricht. Das würde eine erhebliche Unsicherheit zur Folge haben, wenn man die Dämpfungsempfehlung des Herstellers von maximal 0,2 % exakt einhalten müsste. In diesem Fall müsste man ein Dehnungsereignis als eine relative Abweichung vom umgebenden Signal-Plateau lokalisieren und quantifizieren, was die Analyse verkomplizieren würde. Allerdings ist man angesichts der praktischen Erfahrungen, die mit Luftkabelnetzen, die unter extremen Einsatzbedingungen betrieben werden, eher gezwungen, kurzzeitige Dehnungsereignisse bis 3 % zu tolerieren. Bei Annahme einer homogenen Glasfaser-Kombination, wie in Abbildung 1, könnte man diese faserbedingten Schwankungen vernachlässigen und dem Messgerät erlauben, anhand eines festen, absoluten Grenzwertes automatisch zu entscheiden, ob das Kabel die Kriterien einhält.

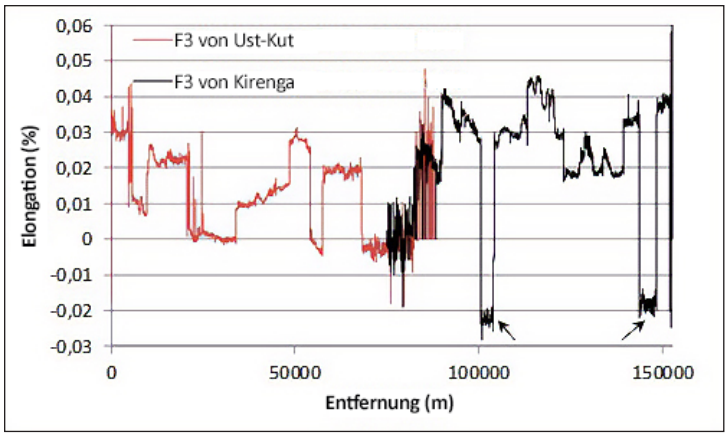

Abbildung 1: Bidirektionale Dehnungsmessung über 152 km mit einer Pulsbreite von 100 ns. Die Pfeile kennzeichnen Abschnitte der Glasfaser SMF28e+ der ersten Generation.

Die Messgerät-bedingte Unsicherheit lässt sich ausgehend von den Standardabweichungen auf den einzelnen Signal-Plateaus ohne Ereignisse der Aufnahmemessung bewerten. Diese liegen am zentralen Verbindungspunkt nach einer Streckendämpfung von 17 dB typischerweise zwischen 0,0006 % und 0,0015 %.

Viele Dehnungsprofile lassen Reihen von Spitzenwerten (Peak) mit einer charakteristischen Periodizität von 350 m bis 500 m – was dem Abstand zwischen den Masten entspricht – erkennen. Dabei beträgt die Spitzenamplitude typischerweise 0,01 %, wobei der Höchstpegel 0,03 % erreicht. Diese eher kleinen Werte ermöglichen eine beruhigende Aussage zum aktuellen Zustand der Übertragungsstrecke.

Hier ist anzumerken, dass sich die Ereignisse über Glasfaser-Reichweiten von 150 m bis 400 m verteilten und dass die Messungen im Oktober durchgeführt wurden. Vermutlich wird die Dehnung bei Eislast stärker und lokaler ausgeprägt sein, während sie im Sommer abschwächt und sich aufgrund der Kabelbewegung und der thermischen Zyklen räumlich verteilt. Trotzdem weisen die Aufnahmemessungen eine ausreichende Detail-Auflösung auf, um die Schwachstellen des Kabels auch im Sommer aufzuzeigen.

Abbildung 2 ist ein Screenshot vom Messgerät, der ein Dehnungsereignis mit zwei überlagerten Aufnahmemessungen zeigt, die bei Pulsbreiten von 100 ns und 200 ns erfasst wurden. Während die Genauigkeit und Reichweite vom glättenden Effekt und der höheren Energie der größeren Pulsbreite profitieren, werden die schnellsten Details offensichtlich übersehen. Es sollte stets die bestmögliche räumliche Auflösung verwendet werden, da der Ereignisumfang von zahlreichen Parametern, wie der Lastverteilung, dem genauen Kabelaufbau und der Installation, dem verwendeten Gel sowie anderen Faktoren, abhängig ist.

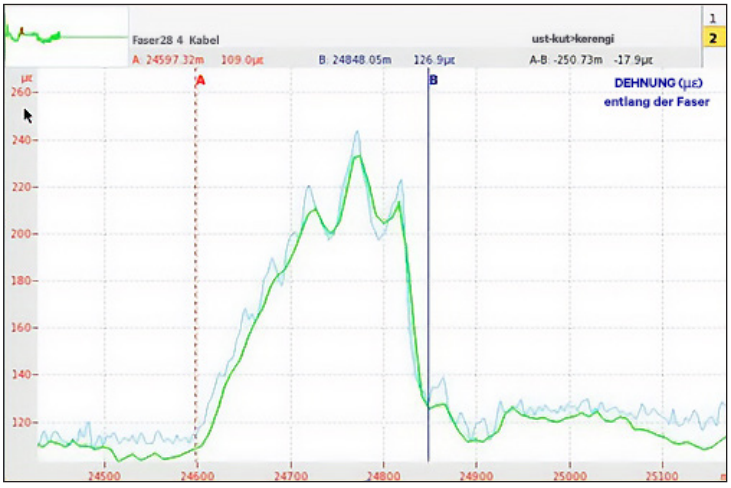

Abbildung 2: Mit Pulsbreiten von 100 ns (blau) und 200 ns (grün) erfasstes Dehnungsereignis.

Das Brillouin-Spektrum erlaubt, den Fasertyp[9] zu erkennen. Abbildung 3 zeigt ein Dual-Mode-Spektrum, das für die erste Generation der Glasfaser SMF28e+ typisch ist. Dieser Typ wurde bei Reparaturen eingesetzt, während bei der Erstinstallation eine reguläre Single-Peak-Faser SMF28e verwendet wurde.

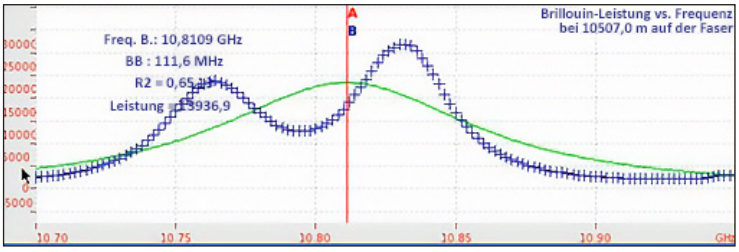

Abbildung 3: Dual-Mode Brillouin-Spektrum der Glasfaser SMF28e.

Die oben beschriebene Messreihe wäre nur der erste Schritt im Wartungszyklus des Kabels. Dieser könnte bei der Installation oder aus Anlass einer Fehlerdiagnose durchgeführt werden. Alle späteren Messungen könnten auf die gleiche Weise erfolgen. Es wäre allerdings zu empfehlen, die erste Messung als Referenz zu nutzen und relative Daten zu generieren. Damit würde man das Problem vermeiden, das bei Verwendung unterschiedlicher Glasfasern mit unterschiedlichen Frequenzverschiebungen entlang der Übertragungsstrecke entsteht. Mit den durch die LPR-Analyse erfassten zusätzlichen Daten kann das verwendete Messgerät auch die saisonalen Temperaturschwankungen zwischen beiden Messungen berücksichtigen. Im Vergleich zu einer Messung, die nur die Brillouin-Frequenzverschiebung nutzt und für die eine Schwankung von ± 0,1 % über den Temperaturbereich zu erwarten ist, würde diese Vorgehensweise die Messgenauigkeit weiter erhöhen. Eine relative und temperaturkompensierte Messung vereinfacht die Lokalisierung kleinster Dehnungsereignisse mit Hilfe eines Alarm-Schwellwerts, der auf den kleinsten Wert eingestellt werden kann, den die Wiederholgenauigkeit des Messgeräts noch zulässt.

Schlussfolgerungen

Während die B-OTDR-Technologie bereits seit langem bekannt ist, haben wir das erste im Feld einsetzbare Messgerät vorgeführt, dessen Dynamikbereich die Entfernungen berücksichtigt, die bei den Übertragungsstrecken in der Telekommunikation zur Anwendung kommen. Mit unserem Prototypen konnten wir ordnungsgemäße Messungen über eine Strecke von 152 km demonstrieren. Unsere Laborversuche zeigen, dass mit einer Pulsbreite von 400 ns und einer daraus resultierenden räumlichen Auflösung von 40 m Übertragungsstrecken bis 200 km messbar sind. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Whitepapers war die Entwicklung zur Einbeziehung relativer Messungen, der thermischen Kompensation und aller Funktionen, die benötigt werden, um das Leistungspotential des Messgeräts direkt vor Ort in vollem Umfang auszuschöpfen, abgeschlossen.

Die vorgestellte Lösung ist im Handel erhältlich als batteriebetriebene, portable Lösung (OneAdvisor 1000 DTSS) für routinemäßige Überprüfungen und die Wartung sowie als Rackeinbau-Lösung (FTH-DTSS) für die kontinuierliche Überwachung und Analyse des Glasfaser-Status im Rahmen des Optical Network Management System (ONMSi).

Literaturnachweise

1. L. Zou et al, „Long-term monitoring of local stress changes in 67 km installed OPGW cable using BOTDA," Proceedings of the SPIE, Volume 9634, id. 963461 4 S. (2015).

2. X. Qian et al, „157 km BOTDA with pulse coding and image processing," Proc. SPIE 9916, Sixth European Workshop on Optical Fiber Sensors, 99162S (2016).

3. Y. Dong et al, „Extending the Sensing Range of Brillouin Optical Time-Domain Analysis Combining Frequency-Division Multiplexing and In-Line EDFAs", J. Lightwave Technol. 30, 1161-1167 (2012).

4. F. Gyger et al, „Ultra Long Range DTS (>300 km) to Support Deep Offshore and Long Tieback Developments," ASME. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 6B: Pipeline and Riser Technology (2014).

5. L. Thévenaz et al, „Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system," Opt. Express 21, 14017-14035 (2013).

6. M. N. Alahbabi et al, „150-km-range distributed sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification," J. Opt. Soc. Am. B 22, 1321-1324 (2005).

7. Y. T. Cho, et al, „100 km Distributed Fiber Optic Sensor Based on the Coherent Detection of Brillouin Backscatter, with a Spatial Resolution of 10 m, Enhanced Using Two Stages of Remotely Pumped Erbium-Doped Fiber Combined with Raman Amplification," in Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest, ThC4 (2006).

8. P.C. Wait et al, „Landau Placzek ratio applied to distributed fiber sensing", Optics Communications 122, S. 141-146 (1996).

9. Corning White Paper WP4259, „BOTDR measurement techniques and Brillouin backscatter characteristics of Corning single-mode optical fibers" (2015).

viavisolutions.de

Kontakt +49 7121 86 2222

Sie finden das nächstgelegene VIAVI-Vertriebsbüro auf viavisolutions.de/kontakt

© 2024 VIAVI Solutions Inc.

Die in diesem Dokument enthaltenen Produktspezifikationen und Produktbeschreibungen können ohne vorherige Ankündigung geändert werden.

fiberbreaks-wp-tfs-nse-de

30194197 901 0125