Informationstechnische Infrastruktur des Netzanschlusses für Offshore-Windparks

Dipl.-Ing. Christian Großer,
Dr.-Ing. Uwe Ziebold

Christian Großer – Kurzvita

Christian Großer schloss 1985 sein Studium im Fachgebiet Gerätebau an der Friedrich-Schiller-Universität Jena als Diplom-Ingenieur ab.
Seit 1993 arbeitet er in leitender Stellung bei der Projektrealisierung nachrichtentechnischer Infrastruktur und spezialisierte sich hierbei vor allem auf die Integration faseroptischer Systeme in Hochspannungsanlagen.
Christian Großer ist seit 2003 geschäftsführender Gesellschafter bei der Power Telcom GmbH, einem namhaften Systemintegrator für LWL-Kabelanlagen im Weitverkehrs- und Ortsnetzbereich. Ferner ist er Gründer und Mitinhaber des seit 2004 bestehenden Ingenieurbüros PI-COM GbR. Power Telcom und PI-COM erwarben sich bei der Projektrealisierung von LWL-Luft-, Erd- und Seekabelanlagen äußerst bedeutende Referenzen. Hierbei war Christian Großer für die Planung der Anlagen sowie die Entwicklung und den Einsatz neuer LWL-Seekabelarmaturen zuständig.

Uwe Ziebold – Kurzvita

Dr.-Ing. Uwe Ziebold ist seit 1989 beim Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz und seinen Vorgängerunternehmen VERBUNDNETZ, VEAG, und VATTENFALL beschäftigt.
Er war als Entwicklungsingenieur und Projektleiter an der Einführung der LWL-Kabeltechnologie im Übertragungsnetz tätig.
Heute ist er als Fachgruppenleiter Leitungstechnik für alle Komponenten der Hochspannungsfreileitungen und Hochspannungskabelanlagen bei 50 Hertz zuständig.
Er studierte und promovierte an der Zittauer Hochschule für Elektroenergieversorgung.

1. Einleitung

Der Netzanschluss für einen Offshore-Windpark ist eine neue Komponente des Hochspannungs-Übertragungsnetzes überregionaler Netzbetreiber. Mit der Verbindung zweier Umspannstationen stellt er aus netztechnischer Sicht ein Element dar, das sich in seiner Bestimmung von Freileitungs- oder Erdkabel-Hochspannungsanlagen nicht unterscheidet.

Die Gewährleistung einer normgerechten Funktion erfordert dazu jedoch völlig neue Baugruppen, die unter den extremen Bedingungen eines Offshore-Umfelds zu installieren und zu betreiben sind.

Der nachfolgende Fachbeitrag beleuchtet die Aufgaben und das erforderliche Layout der „Nervenstränge“ im Netzanschluss eines Offshore-Windparks.

Innerhalb des Netzanschlusses stellt die Glasfaser als kleinste Funktionseinheit einer Energie-Kabelanlage ein wesentliches und nicht zu unterschätzendes Element dar. Vielfältige Aufgaben erfordern den Einsatz verschiedener Fasertypen in variierenden Kabelkonstruktionen, deren Kombination wiederum neue Kabelgarnituren bedingt.

Einführend werden die wichtigsten Elemente der sehr speziellen Glasfaserkabelanlage dargestellt, während in weiteren Abschnitten die konkrete Planung und Realisierung der Kabelanlage im Projekt „Netzanschluss für den Offshore-Windpark BALTIC 1“ sowie Aspekte der Betriebsführung Berücksichtigung finden.

Abb. 1: Offshore Windpark BALTIC1

Für die Netzanbindung zeichnet der Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz verantwortlich. 50Hertz sorgt mit rund 850 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für den Betrieb und den Ausbau des Übertragungsnetzes. Darüber hinaus ist das Unternehmen für die Führung des elektrischen Gesamtsystems auf den Gebieten der Bundesländer Berlin, Brandenburg, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen verantwortlich. Als Übertragungsnetzbetreiber im Herzen Europas steht 50Hertz für die sichere Integration der erneuerbaren Energien, die Entwicklung des europäischen Strommarktes und den Erhalt eines hohen Versorgungssicherheitsstandards. Als europäischer Übertragungsnetzbetreiber ist 50Hertz Teil der Elia Gruppe und Mitglied im europäischen Verband ENTSO-E.

2. Projektbeschreibung

Der Windpark BALTIC1 befindet sich in der südlichen Ostsee 16 km nord-nord-östlich des Darßer Orts. Mit 21 Windkraftanlagen und einer installierten Nenn-Leistung von ca. 48 MW ist dieser Windpark eher klein. BALTIC2, ein im Bau befindlicher, ca. 60 km nordöstlich gelegener Windpark ist im Vergleich zu BALTIC1 für die 6-fache Nennleistung ausgelegt. Zur Leistungsabführung der beiden Windparks wird ein in vier Stromkreise aufgeteiltes Exportkabelnetz aufgebaut. Im Endausbau kann über die Exportkabel zwischen BALTIC1 und dem UW Bentwisch eine max. elektrische Nennleistung von annähernd 336 MW abgeführt und in das Übertragungsnetz eingespeist werden. Damit verfügt dieser Offshore-Windparkverbund BALTIC1+2 über eine installierte Nennleistung, die in ihrer Größenordnung vergleichbar mit der mittlerer Kohlekraftwerke ist (z. B. KNG Kraftwerk Rostock: brutto 553 MW[1]).

Auf der Grundlage des Infrastrukturplanungsbeschleunigungsgesetzes (InfraStrPlanVBeschlG)[2] sind die jeweiligen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) zur Realisierung der elektrischen Leistungsabführung von Offshore-Windparks verpflichtet. Im Bereich der deutschen Ostseeküste fällt die entsprechende Zuständigkeit für alle hier geplanten und in Realisierung befindlichen Offshore-Windparks an den Netzbetreiber 50Hertz. Diese Aufgabe umfasst den elektrischen Leistungstransport von einer Umspannplattform auf See bis an Land

1 http://www.kraftwerk-rostock.de/#/kraftwerk/fakten/

2 Ursprünglicher Gesetzesentwurf der Bundesregierung in: Bundestags-Drucksache 16/54 (PDF, 44 Seiten; 515 kB)

und die Energieeinspeisung in das vorhandene Übertragungsnetz mittels See- und Landkabel.

Die Struktur der elektrischen Übertragungsstrecke zwischen Offshore-Umspannplattform und Onshore-Umspannwerk ergibt sich aus der Festlegung eines räumlich und technisch geeigneten Einspeisepunktes in das bestehende Übertragungsnetz des ÜNB. „Im Gegensatz zu den europäischen Nachbarstaaten müssen in Deutschland vor allem aus Naturschutzgründen die meisten Offshore-Windparks weit vor der Küste in einer Entfernung von 30 bis 100 km und in bis zu 40 Meter tiefem Wasser errichtet werden. Die technischen Anforderungen (Turmbau, Fundamente, Kabellegung und Netzanbindung, Wartung) liegen hierbei um ein Vielfaches höher als beim Bau von Anlagen direkt vor der Küste.“[3] Dies gilt so insbesondere auch für den Windpark BALTIC1.

Die Kabelanlage für BALTIC1 ist entsprechend Abb. 2.1 strukturiert. Mehrere Land- und Seekabelabschnitte wechseln sich ab. Dadurch wurden vielfältige Kombinationen verschiedener Kabel- und Glasfasertypen erforderlich, die mit dem Einsatz sehr unterschiedlicher Garnituren einhergehen.

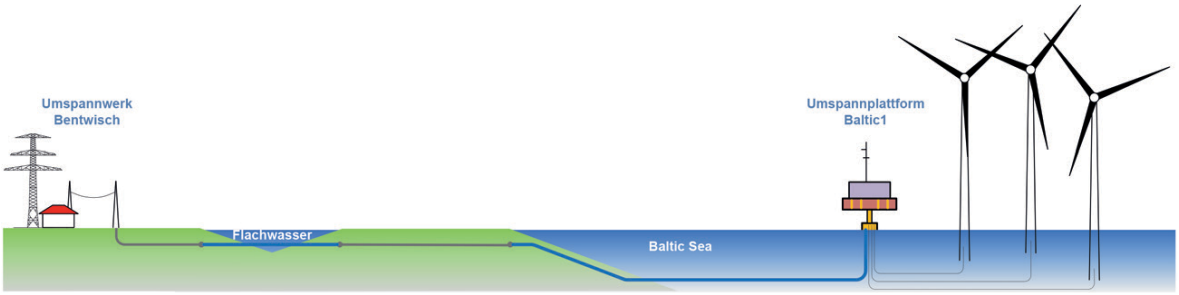

Abb. 2: Kabelanlage zwischen Umspannwerk und Umspannplattform für den Offshore-Windpark BALTIC1 (Prinzipdarstellung)

Zwischen der Umspannplattform und dem Netzeinspeisepunkt (Umspannwerk Bentwisch bei Rostock) kommt ein 150-kV Dreileiter-Drehstromkabel mit integrierten Glasfaserkabeln mit einer vergleichsweise großen Länge von 79 km zum Einsatz. Im 19 km langen Landkabelabschnitt sind sowohl 150-kV-VPE Einzelleiter als auch ein hochfaseriges LWL-Erdkabel in separaten Schutzrohren verlegt. Die 2,8 km lange Querung des Flachwassergebietes „Breitling“ bedeutete aus bautechnischer Sicht eine besondere Herausforderung, da

3 Hochstätter, M., 2007, Offshore-Windenergie, Bundesverband Windenergie e.V. (http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/Offshore.pdf), 14.04.2013

strenge Naturschutzauflagen und die Seekabelverlegung im sehr seichten Gewässer enge zeitliche und räumliche Grenzen setzten.

Die nachrichtentechnische Kabelanlage ist unverzichtbarer Bestandteil des Netzanschlusses. Zusätzlich zu den klassischen Aufgaben im Bereich elektrischer Übertragungsnetze „innerbetriebliche Kommunikation“ und „Schutzsignal-Übertragung“ hat hier die informationstechnische Infrastruktur weiterführende, insbesondere sensorische Funktionen zu erfüllen. Das ergibt sich aus der Spezifik einer Hochspannungs-See- und Erdkabelanlage, die im Gegensatz zu relativ leicht zugänglichen Freileitungen eines umfangreicheren Monitorings des jeweiligen Betriebszustandes bedarf. Die kontinuierliche Temperaturüberwachung ist für die Lastprognose genauso bedeutsam wie für die frühzeitige Erkennung sogenannter Hotspots im Kabelverlauf, die auf eventuelle Schäden am Kabel oder den Hochspannungsgarnituren hinweisen. Des Weiteren eröffnet das Kabel-Monitoring die Möglichkeit, das Auftreten von Fehlern zeitlich und räumlich mit dem Verkehrsgeschehen auf dem Meer abzugleichen, um so eventuelles Fremdverschulden von Kabelbeschädigungen (z. B. durch Schleppanker) eindeutig dem Verursacher zuzuordnen.

Da die Reichweite der verfügbaren Temperatur-Messsysteme über die gesamte Kabellänge von ca. 100 km nicht ausreicht, wurden sowohl im Onshore-Umspannwerk Bentwisch als auch auf der Umspannplattform BALTIC1 Temperatur-Controller eingesetzt. Auf Grund der dadurch erzielbaren Reichweitenüberlappung der auf verschiedenen Messfasern unabhängig voneinander ermittelten Temperaturverläufe, ist ein Gesamttemperaturverlauf über die gesamte Strecke darstellbar.

Zur Maximierung der Messgenauigkeit sind die Temperatur-Messfasern so dicht wie möglich am Hauptleiter positioniert. Im Landkabelbereich sind sie deshalb in mehreren Edelstahl- oder Kunststoffröhrchen im Schirmmantel der 150-kV-Einleiterkabel angeordnet. Im Seekabel liegt das LWL-Seekabel durch seine Anordnung im Zwickelbereich sehr nahe am Hauptleiter.

Ausschließlich für Kalibrierzwecke der Temperaturmesssysteme werden an ausgewählten, vorzugsweise gut zugänglichen Punkten Referenz-Messpunkte installiert. An diesen Punkten ist eine Beaufschlagung der Temperaturmessfaser mit einer definierten Temperatur möglich. Dazu werden in diese Übertragungsstrecke gut handhabbare Faserspulen eingespleißt. Mehrere Abtastpunkte der Temperaturmessung fallen so in diesen Referenzmessbereich und können sicher durch das Temperaturmonitoringsystem erfasst werden.

Durch die Komplexität und den ausgeprägten Neuheitsgrad der nachrichtentechnischen Infrastruktur ergaben sich technische, technologische und organisatorische Herausforderungen bei der Bearbeitung des Projektes:

- Erarbeitung von Planungsrichtlinien für offshore-LWL-Kabelanlagen auf der Grundlage bestehender Normen und Vorschriften des Netzbetreibers
- Neuentwicklung der erforderlichen LWL-Seekabelmuffentechnik, Typtest und Zertifizierung
- Ausbildung und Training und Einsatz des Montagepersonals für LWL-offshore-Technik – auch unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens verschiedener Gewerke unter offshore-Bedingungen

Bei der Offshore-LWL-Kabelanlage handelt es sich im Zusammenwirken aller Einzelkomponenten in Summe um ein neuartiges Design, dem dennoch höchste Zuverlässigkeit während einer langen Einsatzdauer (30–40 Jahre) abgefordert werden muss.

Damit ist eine langfristige Nutzbarkeit der LWL-Fasern hinsichtlich Faserqualität und Faseranzahl sowie Langlebigkeit und Zuverlässigkeit der Kabelkonstruktionen und der Muffentechnik zu gewährleisten.

3. Komponenten der LWL-Kabelanlage

3.1. LWL-Fasern

Für die nachrichtentechnische Infrastruktur im Offshore-Bereich kommen als Übertragungsmedium hauptsächlich Lichtwellenleiter (LWL) zur Anwendung. In Bezug auf Lebensdauer, erzielbarer Bandbreite, Reichweite und Unempfindlichkeit gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern ist die Fasertechnologie den Kupferkabeln deutlich überlegen. Die Integration von LWL-Kabeln in Hochspannungskabel (offshore und onshore) führt zu neuartigen Kabeldesigns, denen höchste Zuverlässigkeit während einer langen Einsatzdauer (30 bis 40 Jahre) abgefordert werden. Faserqualität und Faseranzahl sind diesen Forderungen gemäß abzustimmen.

Der Aufbau der informationstechnischen Kabelinfrastruktur leitet sich aus den Funktionen ab, die Inbetriebnahme, den Betrieb, die Überwachung und die Wartung eines Offshore-Umspannwerks ermöglichen:

3.1.1 Innerbetriebliche Datenübertragung zwischen Umspannwerk und Offshore-Plattform u. a. für Schutz- und Leittechnik und für weitere Dienste-Anbieter

Diese Dienste erfordern als Übertragungsmedium eine hinlänglich große Anzahl (z. B. 48–96) von Standard – Single-Mode-Fasern (SMF) für den Betrieb hochbitratiger Übertragungstechnik. Auf Grund der sehr guten technischen Parameter ist die SMF gegenwärtig die meist eingesetzte Faser im Weitverkehrsnetz. Sie kann für die breitbandige Datenübertragung deshalb auch als zukunftssicher eingeschätzt werden.

3.1.2 Inbetriebnahme und Überwachung der Hochspannungs-Kabelanlage

Vor der **Inbetriebnahme und bei der Wartung der Hochspannungs-Kabelanlage** sind Teilentladungs(TE)-Messungen an allen Crossbonding-Muffen, der HS-Übergangsmuffe zwischen Land- und Seekabel und den HS-Endverschlüssen im Umspannwerk durchzuführen. Zur Übertragung der extrem zeitkritischen Teilentladungs-Ereignisse ist ein Medium gefordert, das ein sehr breitbandiges Signal ohne nennenswerte Laufzeit mit einem bestmöglichen Signal-Störabstand überträgt und dabei eine optimale galvanische Entkopplung der einzelnen Messsysteme ermöglicht. Diesen Forderungen wird eine gesonderte Faserverbindung entlang der Hochspannungskabelanlage zwischen dem Kabelendverschluss im Umspannwerk und der landseitigen Übergangsmuffe zum Seekabel gerecht. Gewöhnlich sind handelsübliche TE-Messwertaufnehmer mit Multimode-Schnittstellen ausgerüstet. Die betreffenden Garniturenpunkte werden deshalb mit im LWL-Kabel integrierten Multi Mode(MM)-Fasern (2–4 Fasern) verbunden. An diesen Punkten sind die Fasern mit gut zugänglichen LWL-Steckern ausgerüstet, so dass eine unproblematische Ankopplung der Messwertaufnehmer erfolgen kann.

3.1.3. Monitoring / Lastoptimierung

Die **Lastoptimierung und frühzeitige Erkennung** von Fehlern am Kabel erfolgt über die Ermittlung und Auswertung des Temperaturverlaufs entlang der Kabeltrasse. Dazu kommt ein ortsauflösendes Temperatur-Messverfahren

DSTS (Distributed Strain Temperature Sensing) in Zusammenwirkung mit einer Analyse- und Prognose-Software (z. B. Messsystem VALCAP® mit der Software AdapPro® von nkt cables GmbH[4]) zum Einsatz.

Unter den Gesichtspunkten der Reichweite, der Auflösung und der Systemkosten finden wahlweise Messverfahren durch Ausnutzung der Raman- oder der Brillouinstreuung Anwendung.

Im Gegensatz zur Rayleight-Streuung, die als elastische Streuung zwischen den Photonen und den Inhomogenitäten des Lichtwellenleiters verstanden werden kann (vergleichbar mit dem Verhalten eines Tischtennisballs auf harter Unterlage), erfolgt bei der Raman- und Brillouinstreuung durch eine inelastische Wechselwirkung ein Energietransfer zwischen Photonen und dem molekularen Aufbau des Glases. Zum Verständnis der zu treffenden Auswahl des LWL-Fasertyps sollen beide Messverfahren nachfolgend näher beschrieben werden:

Der **Raman-Effekt** basiert auf der wärmeinduzierten Ramanstreuung. Als Antwort auf die Anregung durch einfallendes Licht entstehen Gitterschwingungen deren Wellenlängen spektral um den Betrag der Resonanzfrequenz nach oben (Stokes-Band) und unten (Antistokes-Band) verschoben sind. Das Verhältnis der Intensitäten beider Frequenzbänder ist ein Maß für die Temperatur und kann an jeder Stelle des LWL's ortsaufgelöst erfasst werden.[5] Vorzugsweise werden für dieses Messverfahren MM-Fasern eingesetzt. Die maximale Reichweite beträgt ca. 20km bei einer Ortsauflösung von 0,5m und einer Temperaturauflösung von ca. 0,1K.

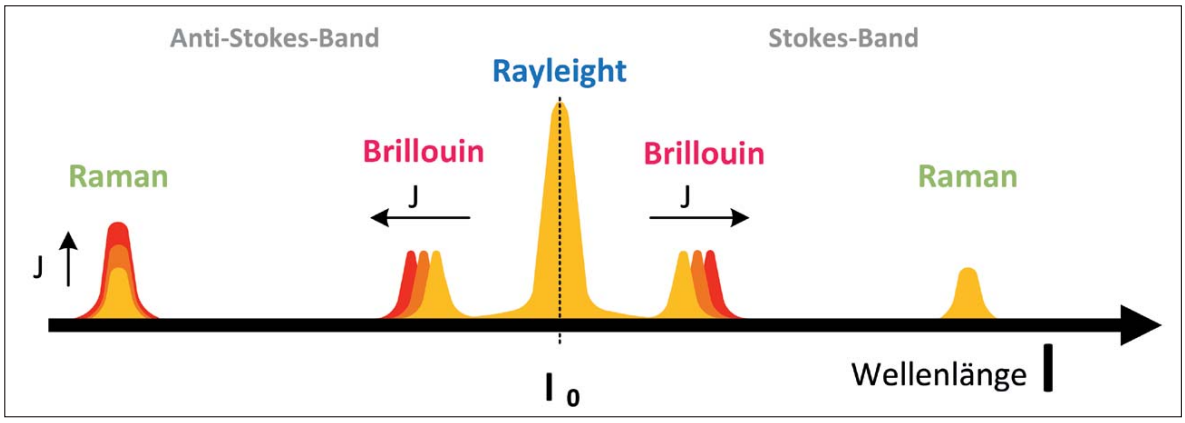

Abb. 3: Wirkung der Temperaturänderung im Hinblick auf Raman- und Brillouinstreuung

4 VALCAP® Monitoring Solutions for power cable systems (http://www.nktcables.com/sitecore/shell/Controls/Rich%20Text%20Editor/~/media/27213D8137224752A6A619ECD2A7637E.pdf)

5 D.Eberlein. Messtechnik Fiber Optic, Teil4: Moderne Messverfahren. Seite 58ff. 1. Auflage 2010. Dr. M. Siebert GmbH. ISBN 978-3-00-032451-2

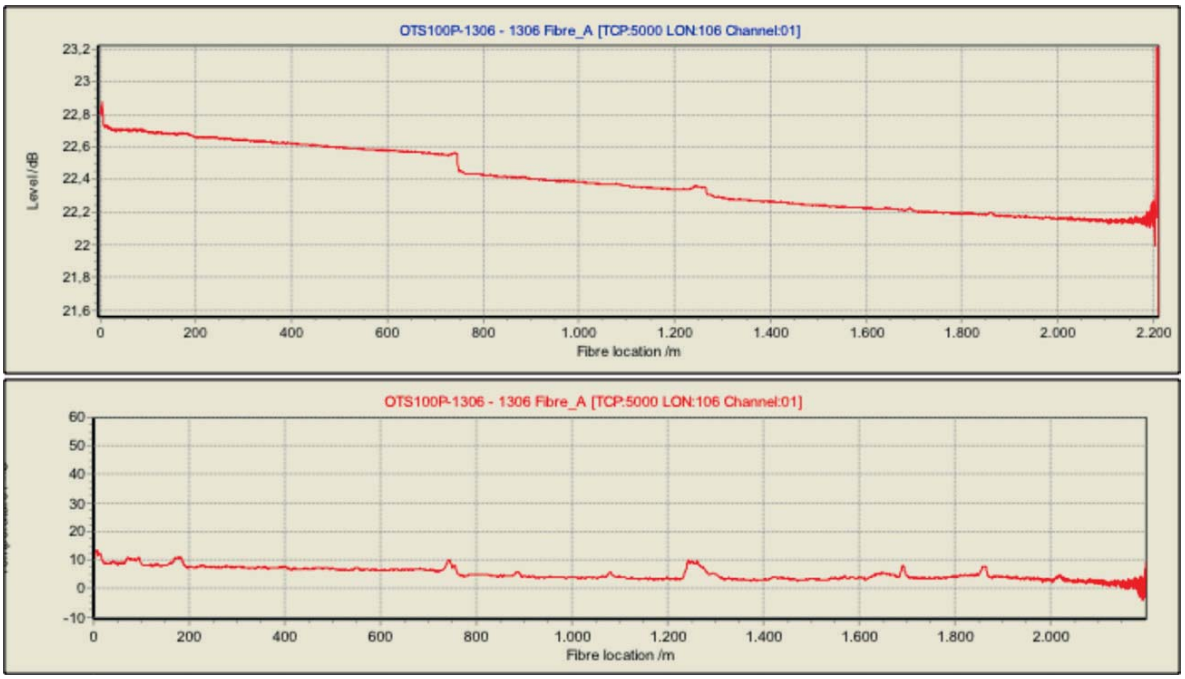

Abb. 4: Beispiel für ortsaufgelöste Temperaturmessung in einer MMF: *oben* OTDR-Kurve, *unten* DSTS-Kurve (Quelle: nkt cables GmbH)

Die ortsaufgelöste Temperaturmessung durch Ermittlung der **Brillouin-Frequenz** nutzt das Prinzip der induzierten Brillouin-Streuung (SBS), bei der unter bestimmten Bedingungen ein Teil der eingebrachten Lichtleistung an einer durch das Licht erzeugten Schallwelle reflektiert wird. Bedingt durch den Dopplereffekt, der durch die Reflexion der hin- und zurücklaufenden Lichtwelle an der mit Schallgeschwindigkeit fortlaufenden Schallwelle entsteht, ergibt sich eine Frequenzdifferenz (Brillouin-Frequenz), die eine proportionale Abhängigkeit zur Temperatur aufweist.[6] Die Reichweite entsprechender Messsysteme ist mit mehr als 50 km im Vergleich zu Raman-basierten Messsystemen deutlich höher. Als Messfasern dienen Fasern mit ausgeprägter SBS.[7] Das können SMF (gem. ITU G.652) oder NonZeroDispersionShifted (NZDS)-Fasern (gem. ITU G.655) sein. Auf Grund unterschiedlicher Designs in Bezug auf Dotierung und Brechungsindexverlauf weisen diese Fasern untereinander differierende Brillouin-Frequenzen auf. Auf Grund dessen ist eine Kombination der Messfasern innerhalb eines Messkreises unzulässig und deshalb die Spezifizierung der Messfaser allein durch Vorgabe der jeweiligen Norm (z. B.: ITU

6 D.Eberlein. Messtechnik Fiber Optic, Teil4: Moderne Messverfahren. Seite 47ff

7 M. Alahbabi, P. Wait, Y. Cho, A. Hartog, T.P. Newson. Optoelctronics Research Centre, University of South Hampton

G.655) unzureichend. Vielmehr ist darauf zu achten, daß in den vorgesehenen Messkreisen einheitliche und vom Messsystemhersteller ausdrücklich vorgegebene Fasersorten eingesetzt werden. Bei Projekten mit häufig wechselnden Kabeltypen, verschiedenen Kabellieferanten und mehreren Baulosen erhält diese Forderung eine besondere Brisanz.

Somit erfordern die oben beschriebenen betriebstechnischen Einsatzfälle die Nutzung von drei verschiedenen LWL-Fasertypen für spezielle Aufgaben.

Bezeichnung	Spezifizierung	mode-field diameter MFD (1550 nm) [µm]	Dispersion [ps/(nm km)]	typische kilometr. Dämpfung [dB/km]
Betriebsführung / Datentransport / Schutz- und Leittechnik Single-Mode-Faser SMF	ITU G.652.D	10,4 ± 0,5	$< 3{,}5_{1310\ nm} \cdots 18_{1550\ nm}$	$0{,}35_{1310\ nm}$ $0{,}22_{1550\ nm}$ $0{,}25_{1625\ nm}$
TE-Monitoring Inbetriebnahme / Überwachung der HS-Garnituren Non-zero-dispersion-shifted-Faser NZ DSF				
z. B. METROCOR® (CORNING)	ITU G.655	8,0 ± 0,4	$-10_{1530\ nm} \cdots -1_{1625\ nm}$	$< 0{,}50_{1310\ nm}$ $0{,}25_{1550\ nm}$ $0{,}25_{1625\ nm}$
z. B. LEAF® (CORNING)	ITU G.655	9,6 ± 0,4	$4_{1550\ nm} \cdots 10_{1625\ nm}$	$< 0{,}40_{1383\ nm}$ $0{,}22_{1550\ nm}$ $0{,}24_{1625\ nm}$
Temperatur-Monitoring / Lastoptimierung Multi-Mode-Faser MMF	ITU G.651	Kern-Durchm. 50 µm		$2{,}70_{850\ nm}$ $0{,}70_{1300\ nm}$

Tab. 1: Fasertypen und ausgewählte Faserparameter

3.2. LWL-Kabel

In Abhängigkeit des Einsatzbereiches, der jeweiligen Dienste und des Faserbedarfs besteht die nachrichtentechnische Infrastruktur eines Offshore Windparks aus einer außergewöhnlichen Kabelvielfalt:

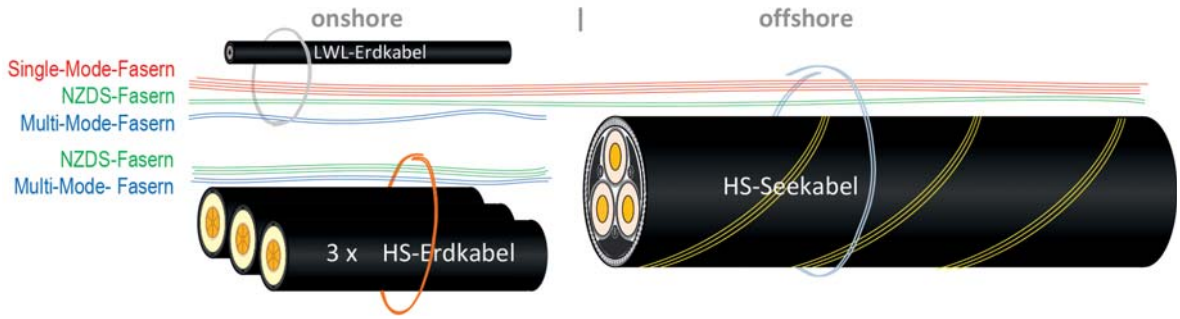

Abb. 5: Zuordnung verschiedener LWL-Fasertypen zu den jeweiligen Kabeln

Der **Landkabelabschnitt** ist durch separate LWL-Erdkabel und Hochspannungserdkabel gekennzeichnet:

Das **separate LWL-Erdkabel** hat folgenden Aufbau (Abb. 6a):

48–96 SM-Fasern gem. ITU G.652.D
10–20 NZDS-Fasern gem. ITU G.655
2–4 MM-Fasern gem. ITU G.651

Hierbei kommt ein standardisiertes Design für LWL-Erdkabel (z. B. gem. VDE 0888 Teil 3) zum Einsatz.

Gewöhnlich wird es in einem parallel zur Hochspannungskabelanlage geführtem PE-HD Schutzrohr verlegt. Im **Hochspannungs-Erdkabel** sind im geerdeten Mantelschirm 2 (mitunter auch 4) LWL-Bündeladern mit LWL integriert (Abb. 6b).

2–4 NZDS-Fasern gem. ITU G.655
2–4 MM-Fasern gem. ITU G.651

Für den mechanischen Schutz der LWL-Fasern kommen Stahlröhrchen-Hohladern aber auch Kunststoff-Mikrokabel zum Einsatz. Mitunter sind deren benachbarte Schirmdrähte mit einem größeren Durchmesser ausgeführt, so dass auf den Mantelschirm einwirkende radiale Kräfte die empfindlichen Bündeladern mit den LWL's nicht beeinträchtigen können.

Im **Seekabelabschnitt** sind grundsätzlich Hochspannungs- und LWL-Seekabel in einem konstruktiv gemeinsamen Kabelverbund geführt. Das LWL-

Seekabel vereinigt in einer zentralen Bündelader (Edelstahl- oder Kupferröhrchen) eine große Anzahl von LWL-Fasern (Abb. 6c):

48–96 SM-Fasern gem. ITU G.652.D

10–20 NZDS-Fasern gem. ITU G.655

Das LWL-Seekabel ist einlagig verseilt mit einem leitfähigen PE-Mantel versehen und hat einen quer- und längswasserdichten sowie außerordentlich zugfesten Aufbau. Der Zwickelbereich des verseilten Dreileiter-Seekabels bietet ausreichend Platz für die sichere Ablage des LWL-Seekabels im Kabelverbund. Aus Sicherheits- und Redundanzgründen sind üblicherweise mehrere LWL-Seekabel (2 oder 3) im Hochspannungs-Seekabel integriert (siehe Abb. 6c).

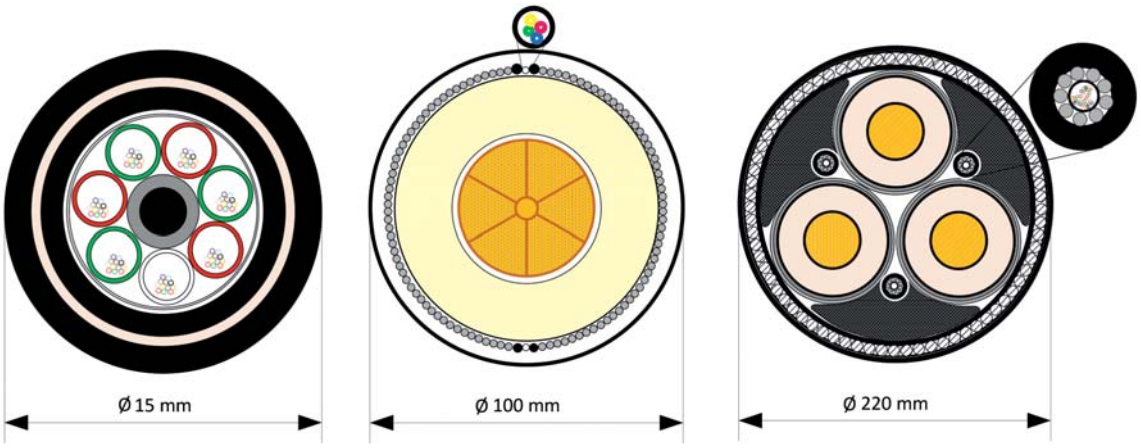

Abb. 6: (a) Separates LWL-Erdkabel
(b) VPE-Einleiterkabel mit integrierten LWL-Bündeladern
(c) 150-kV-Seekabel (Durchmesser ca. 220 mm) mit 2–3 integrierten LWL-Seekabeln

3.3. LWL-Muffen

3.3.1 Landkabelabschnitt

Die Kombination verschiedenster Kabeltypen und -größen erfordert den Einsatz ganz unterschiedlicher, in vielen Fällen bisher nicht genormter Baugruppen, insbesondere Muffen:

Übergang vom LWL-Erdkabel auf Fasern im Schirmmantel der 150-kV-Einzelleiter im Bereich von Hochspannungs-Verbindungsmuffen und -Endverschlüssen und bei der Verbindung der LWL-Fasern im Schirmmantel der 150-kV-Einzelleiter (ohne Ausschleifung von LWL-Fasern)

An diesen Stellen kann eine spezielle LWL-Muffe zum Einsatz kommen, die zuverlässig die Abfangung der empfindlichen Hohladern aus dem Schirmmantel ermöglicht, sowie mehrere LWL-Faserringe druck- und zugfrei aufnehmen kann und zur sicheren Ablage von LWL-Faserspleißen geeignet ist. Die LWL-Muffe ist in die Hochspannungsmuffe bzw. den Hochspannungsendverschluss integrierbar, da der Aufbau der Muffe äußerst flach und dem Hochspannungskabel in seiner Geometrie angepasst ist.

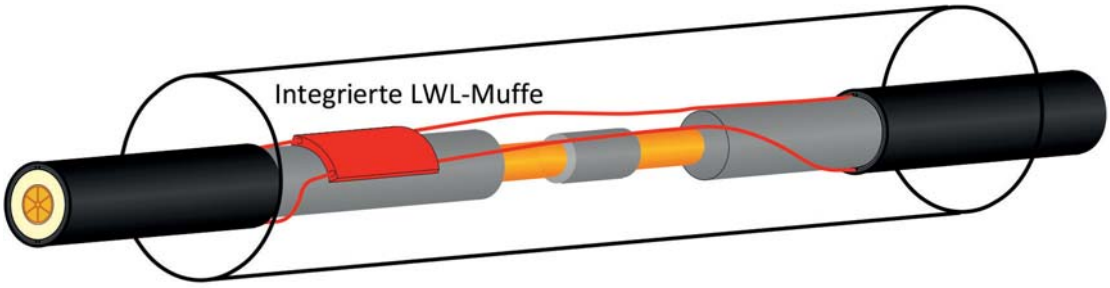

Abb. 7: LWL- Muffe mit Spleißkassette in der Hochspannungsmuffe integriert
(Quelle: PI-COM GbR)

Alternativ zu dieser Lösung können die LWL-Fasern – entsprechend mechanisch und gegen Feuchtigkeit geschützt – auch aus der jeweiligen Hochspannungsgarnitur herausgeführt und in einer separaten LWL-Muffe verbunden werden. Der Nachteil dieser Lösung ergibt sich aus der Notwendigkeit einer zusätzlichen, sehr zuverlässig abzudichtenden Kabeleinführung am Hochspannungsmuffengehäuse. Andererseits bestünde hierbei aber die Möglichkeit, nachträglich an den LWL-Fasern zu arbeiten, ohne dass die Hochspannungsmuffe zu öffnen wäre.

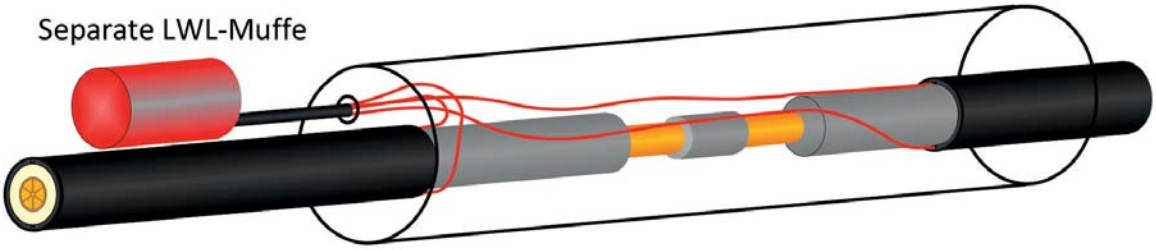

Abb. 8: LWL-Muffe außerhalb von der Hochspannungsmuffe positioniert
(Quelle: PI-COM GbR)

3.3.2. Übergang vom LWL-Erdkabel auf LWL-Seekabel (Umspannplattform)

Die Übergangsmuffe auf der Offshore-Plattform ist als Schnittstelle zwischen der In-House-Verkabelung der Plattform und dem LWL-Seekabel auf dem Schaltanlagen- oder Kabeldeck angeordnet. Hier ist sie möglicherweise besonderen klimatischen Belastungen – insbesondere starken Salznebeln – ausgesetzt. In Abhängigkeit des vorgesehenen Einsatzortes sind Bauform und Gehäusematerial festzulegen, wobei durchaus bekannte handelsübliche Produkte eingesetzt werden können. Da das LWL-Seekabel mit einer metallischen Armierung ausgestattet ist und in enger Nachbarschaft zu einem Hochspannungskabel liegt, wird ein projektbezogenes Erdungskonzept erforderlich.

3.3.3. Verbindung der LWL-Seekabel im Bereich der Seekabel-Hochspannungsmuffen durch Einsatz von LWL-Seekabelmuffen

Auf Grund der zumeist sehr großen Kabellängen zwischen Umspannplattform und Anlandung sind LWL-Seekabelmuffen genauso wie Hochspannungsmuffen erforderlich. Eine Minimierung der Muffenanzahl ist aus Gründen der Betriebssicherheit aber auch aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen geboten. Die möglichen Fertigungslängen der Hochspannungs-Seekabel betragen inzwischen mehr als 20 km. Limitierend auf die Länge wirken vor allem Fertigungs- aber auch Transportkapazitäten für das Seekabel, das durchaus ein Gewicht von 80–100kg/m aufweisen kann.

Typischerweise kommt die sogenannte OMEGA-Muffe bei offshore-Muffenmontage zum Einsatz, da die zuvor verlegten Seekabel-Längen überlappend abgelegt und erst in einem zweiten Arbeitsgang gemufft werden. Die durch Wassertiefe und Montagereserve technologisch erforderliche Kabel-Überlänge bedingt nach der Muffenablage eine OMEGA-förmige Auslenkung der Seekabeltrasse. Um einen bestmöglichen Schutz der Hochspannungs- und LWL-Muffen zu gewährleisten, werden die Kabelgarnituren an der Muffenstelle in einem käfigartigen Stahlgestell integriert, das diese gegen Zug, Knickung und Querdruck während des Ablageprozesses auf den Meeresboden wirksam schützt (Abb. 9).

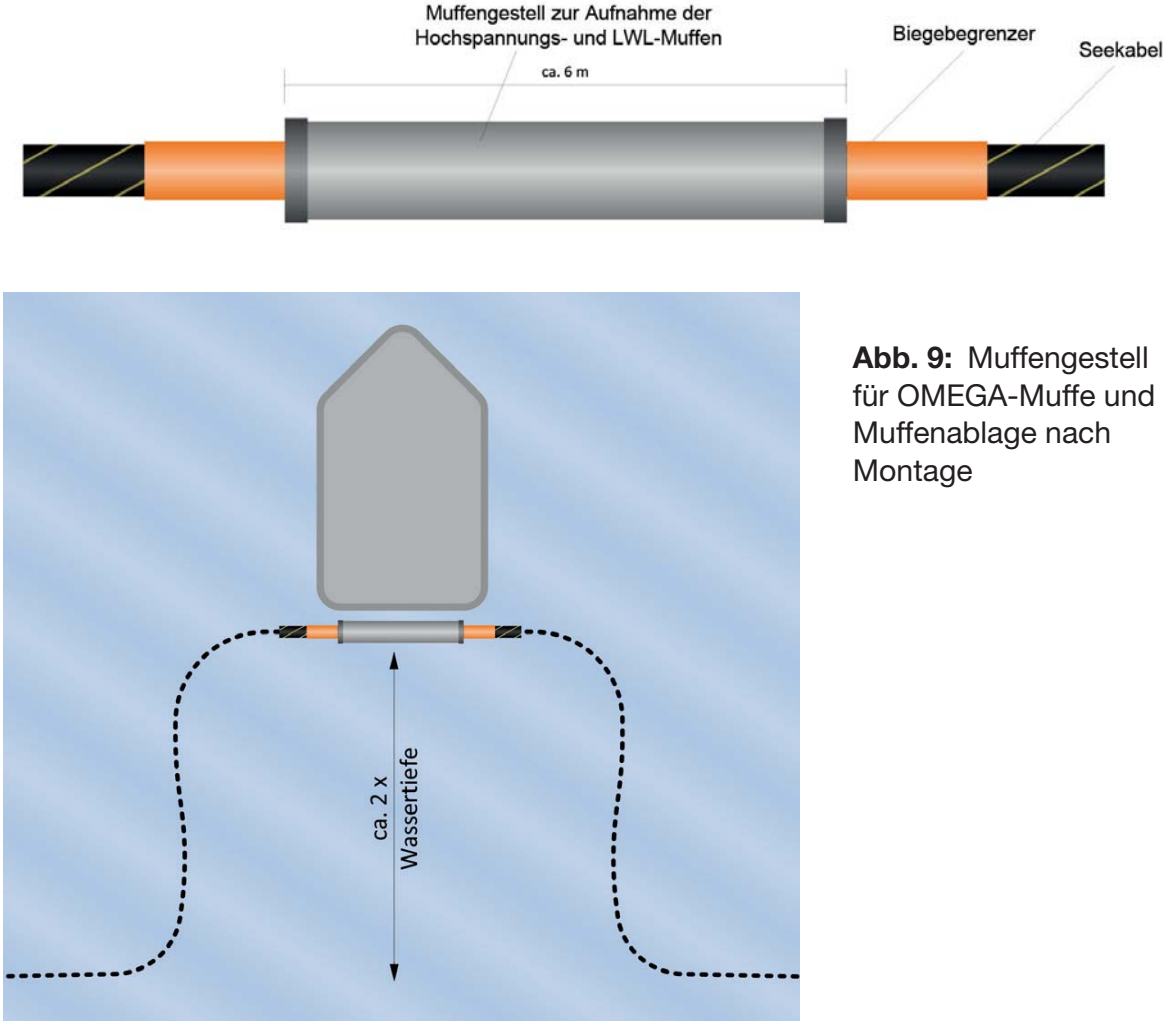

Abb. 9: Muffengestell für OMEGA-Muffe und Muffenablage nach Montage

Um die Anzahl der äußerst kostenintensiven offshore-Montagen zu minimieren, wird die Produktion möglichst großer Verlegelängen bereits im Kabelwerk oder im Hafen angestrebt. Dazu werden vor der Verlegung zwei oder mehr Seekabel-Fertigungslängen so vermufft, dass eine elektrisch und mechanisch voll belastbare Verlegelänge entsteht.

Aus diesem Einsatzfall ergibt sich ein weiteres Seekabelmuffendesign: Während bei der OMEGA-Muffe die verseilten Hochspannungs-Teilleiter und LWL-Kabel separiert und mit konventioneller Muffentechnik verbunden werden, sind hier die Hochspannungs- und LWL-Muffen in den Kabelaufbau des Hochspannungs-Seekabels ohne nennenswerte Veränderungen der Abmaße und der mechanischen Parameter zu integrieren. Zwei abweichende technische Ansätze für LWL-Verbindungen werden diesen anspruchsvollen Forderungen gerecht:

Factory-Joint: Unter fertigungstechnischen Laborbedingungen werden die recoated-en Faser-Längsspleiße ohne Faserreserve in einem Distanzstück abgelegt, das die zwei Enden der LWL-Hohladern formschlüssig und dicht verbindet. Das LWL-Seekabel kann danach komplett wieder aufgebaut und im Hochspannungsseekabel integriert werden.

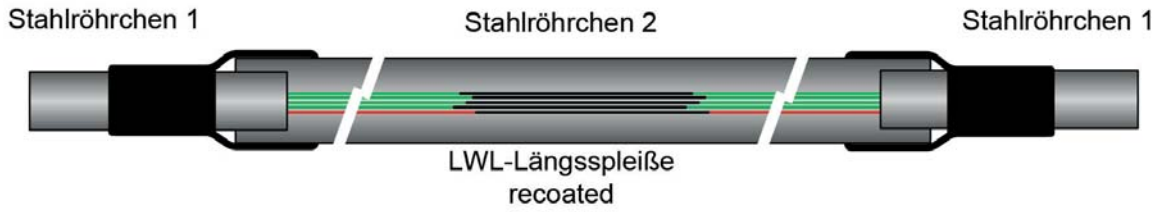

Abb. 10: Längsspleiße im factory-joint

Der Vorteil dieser Lösung besteht in der unübertroffenen Kompaktheit, wird aber durch die technologischen Hürden sehr schnell relativiert: Konstruktionsbedingt sind bei einem Längsspleiß keinerlei Faserreserven möglich. Daraus ergibt sich die Forderung, sämtliche LWL-Fasern im LWL-Kabel mit genau einem Spleißversuch bei gleich guter Spleißqualität zu verbinden. Diese Forderung kann unter sehr guten Werksbedingungen (exzellente Spleißtechnik, staubfreie Luft, äußerste Sauberkeit, keinerlei Ablenkung für das Personal) eventuell, jedoch unter raueren Montagebedingungen mit großer Sicherheit nicht erfüllt werden.

Harbour-joint: Um die Montage der LWL-Muffen leichter handhabbar zu gestalten, wird ein LWL-Muffendesign eingesetzt, das formschlüssig in das Hochspannungs-Seekabel integrierbar ist. Der Aufbau der LWL-Muffe ist äußerst kompakt, geometrisch kompliziert und fertigungstechnisch anspruchsvoll. Die Muffe erfüllt aber im Gegensatz zum oben beschriebenen factory-joint alle Anforderungen an eine LWL-Muffe mit Spleißkassette: die Kabel werden zugentlastet abgefangen und die Fasern sind mit ausreichender Reserve und mit konventionellen Spleißschutzen versehen. Die Montage kann durch erfahrenes Montagepersonal auch unter normalen Bedingungen im Außenbereich durchgeführt werden.

LWL-Seekabelmuffen werden speziell für die Applikation am Hochspannungs-Seekabel entwickelt. Besondere Berücksichtigung finden dabei die Aspekte: Druckfestigkeit und absolute Dichtigkeit bis zu mehreren 100 mWS, mechanische Belastbarkeit insbesondere Zugfestigkeit der Kabelabfangun-

gen, Korrosionsfestigkeit unter Seewasserbedingungen, gute Integrierbarkeit in die Hochspannungsmuffen sowie schnelle, unkomplizierte und sichere Handhabbarkeit unter erschwerten Montagebedingungen.

Jedem Muffentyp ist eine detaillierte Montageanweisung mit der Darstellung und Beschreibung eines jeden Arbeitsschrittes zugeordnet, so dass eine reproduzierbare Montage mit gesichertem Erfolg garantiert werden kann.

Mit der Simulation sehr großer Wassertiefen wurden alle zum Einsatz kommenden LWL-Seekabelmuffen geprüft und für die Nutzung im Offshore-Bereich zertifiziert. Die im Muffeninnenraum der vormontierten Seekabelmuffe auftretende relative und absolute Luftfeuchte wurde stets in Abhängigkeit von Temperatur und Außendruck protokolliert und bewertet.

3.3.4. Verbindung des separaten LWL-Erdkabels und der Ausschleifung von Multimode-LWL-Fasern an Cross-Bonding-Muffen:

Hier erfolgt der Einsatz handelsüblicher LWL-Erdkabelmuffen für die Ablage in Schächten oder Oberflurschränken gemäß den Montagevorgaben des Netzbetreibers (siehe Abb. 11).

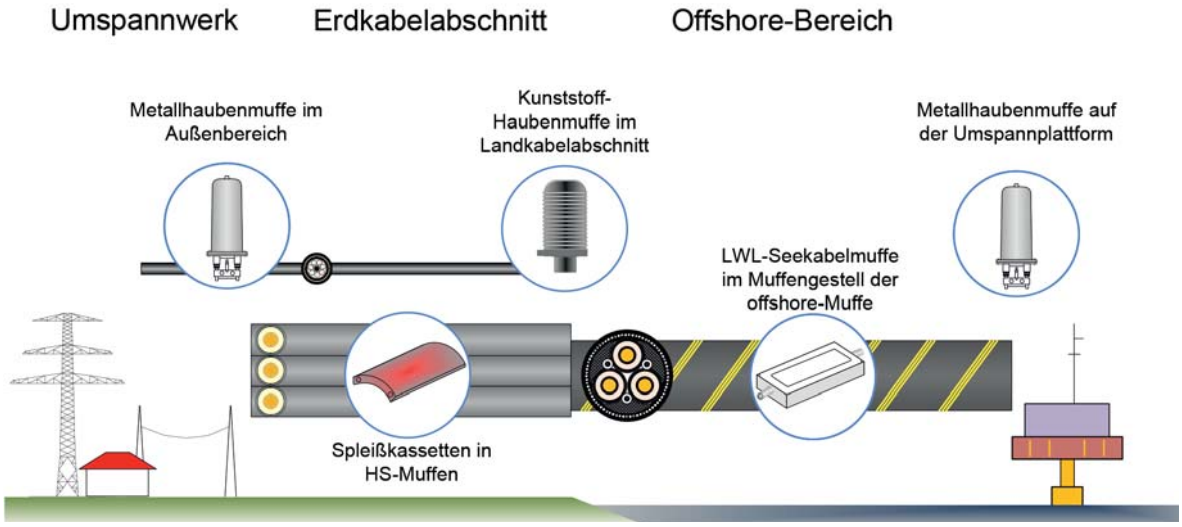

Abb. 11: Zuordung unterschiedlicher LWL-Garnituren zu einzelnen Kabelabschnitten der informations-technischen Infrastruktur des Netzanschlusses für Offshore Windparks

3.3.5. Terminierung der LWL-Kabel an den Endpunkten (off- und onshore):

Während im onshore-Umspannwerk ausreichend Raum für Kabel-Abschlusstechnik gemäß der Richtlinien des Netzbetreibers vorhanden ist, werden im Offshore-Bereich aus Platzgründen eher Racks mit hochkompakten 19-Zoll-Spleißboxen verwendet (bis zu 48 x Kupplungen / Stecker pro Höheneinheit).

4. Planung und Ausführung der Informationstechnischen Infrastruktur für den Netzanschluss des Offshore-Windparks BALTIC1

4.1. Ausführungsplanung

Die in der Ausführungsplanung zur Anwendung gebrachte Bearbeitungstiefe hat das Ziel der fehlerfreien Ausführung und des sicheren Betriebes der Kabelanlage. Auf wesentliche Bestandteile des Planwerks wird im Folgenden eingegangen:

In der **Übersichtsdarstellung** (Abb. 12) sind alle relevanten Kabelabschnitte mit genauer Angabe der Kabeltypen, getrennt nach Hochspannungs- und LWL-Kabeln, verzeichnet.

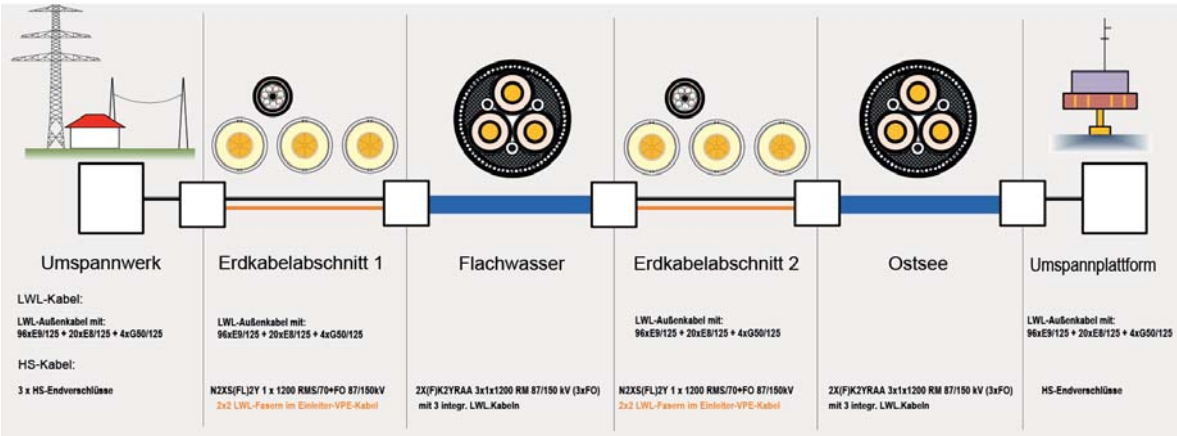

Abb. 12: Übersichtsdarstellung der Kabeltrasse

Der **Kabelplan** (Abb. 13) verdeutlicht alle Kabelaufbauten (z. B. der Einzeladern im Landkabelabschnitt bzw. der LWL-Kabel im Kabelverbund des Export-Seekabels) in Kombination wichtiger Muffenpunkte und Endverschlüsse an den Übergangsstellen.

Eine Übersichtsdarstellung verdeutlicht die Zuordnung der einzelnen Kabel zu den Abschnitten der Kabeltrasse mit Angabe der exakten Kabelbezeichnungen.

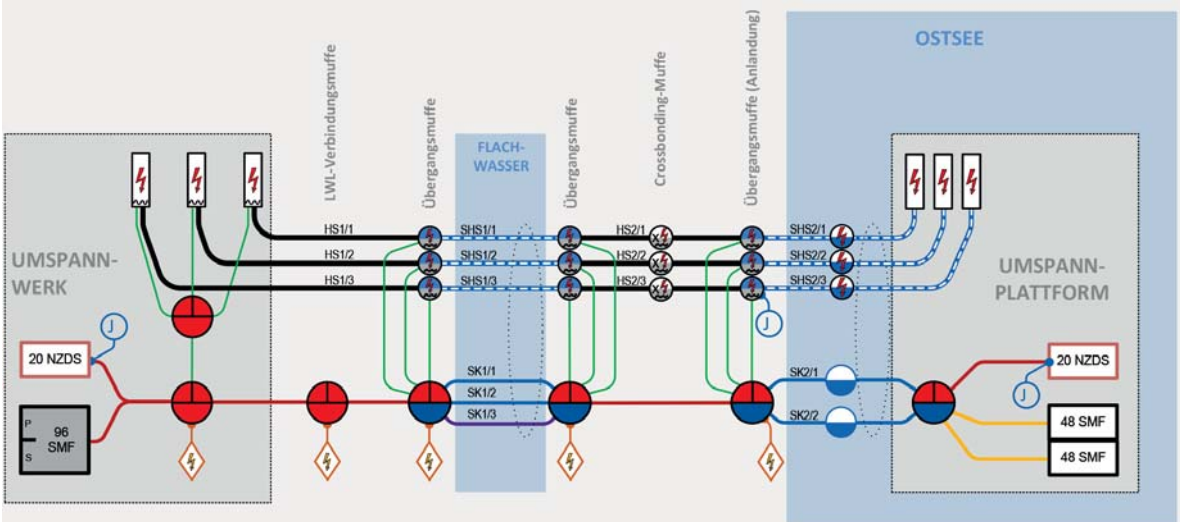

Abb. 13: Kabelplan

Die verwendeten Zeichnungs-Symbole sind einheitlich und im gesamten Planwerk durchgängig genutzt. Sie sind Bestandteil der 50Hertz-Symbolliste.

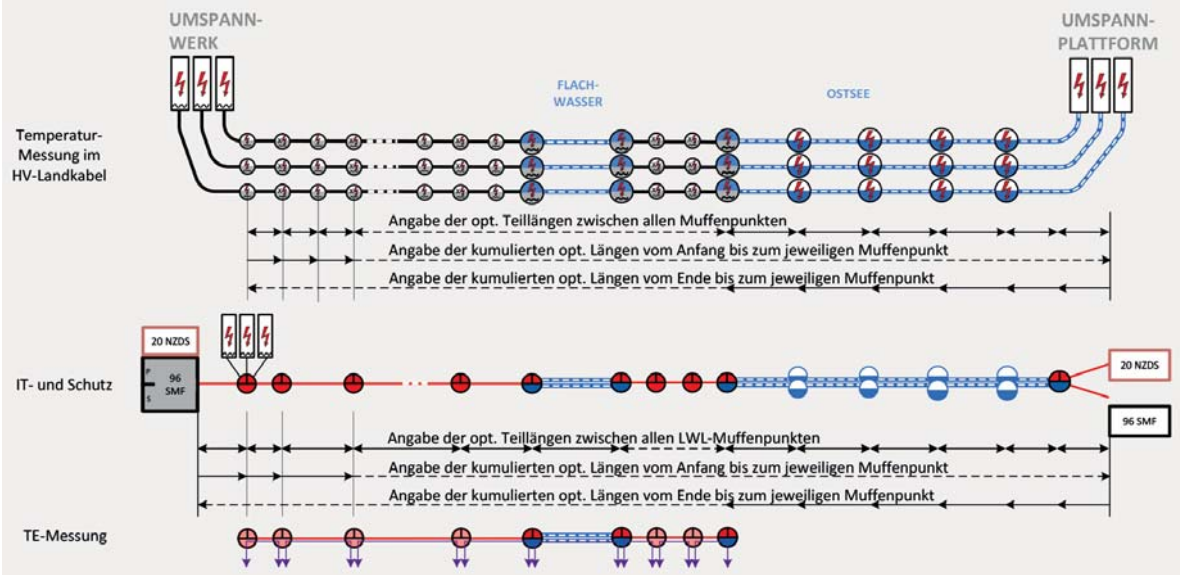

Abb. 14: Längenplan

Der **Längenplan** (Abb. 14) stellt vollständig alle Kabelmuffen und Kabelendeinrichtungen mit Angabe von Abständen und kumulierten Längen (gerechnet vom Anfang / Ende) dar. Auf Grund der unterschiedlichen Kabelaufbauten und damit verschiedener Verseillängen der LWL-Fasern (Abb. 15) ist eine Gliederung nach unterschiedlichen Kabeln erforderlich:

- LWL im Hochspannungskabel
- LWL im separat verlegten Kabel
- LWL für TE-Messung

Beispiele für Längenzuschläge V/S*100 %:
LWL-Faser im Hochspannungsseekabel: 0,8 %
LWL-Kabel im Hochspannungs-Einleitererdkabel: 22 %

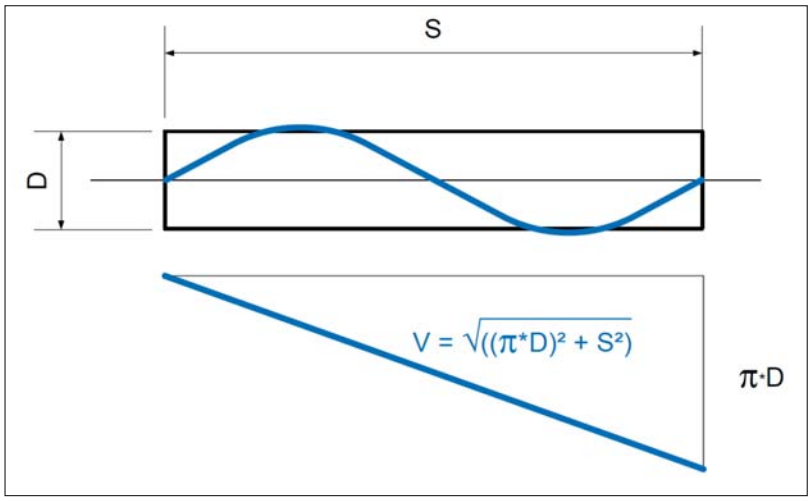

Abb. 15: Berechnung Längenzuschlag

Die Verschaltung einzelner Fasern oder Fasergruppen im gesamten Verlauf der Kabelanlage wird auf der Grundlage des **LWL-Faserplans** dokumentiert. Die Zuordnung zu bestimmten Kabeltypen muss erkennbar sein, spielt hier aber nur in Hinsicht auf die Faserführung eine Rolle. Im Faserplan ist die Kennzeichnung der Fasertypen, der Kabel- und Fasernummern und der Darstellung der Kabelendeinrichtungen von Bedeutung. Der Faserplan wird durch detaillierte **Belegungs- und Spleißpläne** für jede LWL-Muffe und für jede Kabelendeinrichtung ergänzt. Sie sichern die fehlerfreie Realisierung der komplizierten Verschaltung einer hochfaserigen Kabelanlage.

Eine systematische Zusammenstellung der **Datenblätter und Montageanleitungen** aller eingesetzten Kabel und Garnituren ist vor allem während der Bauphase für eine qualitätsgerechte Ausführung hilfreich.

In Abstimmung mit den vom Auftraggeber vorgegebenen Lageplänen sind spezielle **Lage- und Bauausführungspläne für LWL-Komponenten** – insbesondere für die Anordnung der Muffen sowie die Kabellage an Muffen- und Endverschlusspunkten – zu erstellen.
Zusammenfassung der Ausführungsplanunterlagen:

- Übersichtsplan
- Kabelplan
- Längenplan
- Faserplan mit Spleißplänen für Muffen und Kabelendeinrichtungen
- Lagepläne:
  - Onshore-Umspannwerk (Übersicht und Raumplan)
  - Offshore-Umspannplattform (Übersicht und Raumplan für Schaltanlagendeck und Fernmelderaum)
  - Detaillierter Situationsplan am Portal des Onshore-Umspannwerkes
  - Lagepläne an den Muffenpunkten (Onshore)
- Datenblätter und Montageanleitungen aller LWL-Garnituren

4.2. Errichtung der LWL-Kabelanlage

4.2.1 Offshore

Die offshore-Arbeiten an der LWL-Kabelanlage unterscheiden sich deutlich von vergleichbaren Arbeiten am Festland. Auch wenn die Arbeitsabläufe und -inhalte auf See meist nur geringfügig zu den onshore-Prozessen differieren, ergeben sich durch das maritime Umfeld deutlich veränderte Rahmenbedingungen. Das Zeitfenster für die beabsichtigten Arbeiten kann auf Grund wechselnder und schwer vorhersagbarer Wetterlagen oftmals nur sehr unzuverlässig geplant werden. Dadurch kommt es nach mitunter sehr langen Erwartungs- und Bereitschaftsphasen zu extrem kurzfristigen Montageeinsätzen.

Das Montagepersonal ist während der Montagephase einer besonderen Belastung durch ungewohnte und teilweise schwer kalkulierbare Fremdeinflüsse ausgesetzt. Die Montagebedingungen an Bord eines Schiffes oder auf einer Offshore-Plattform können ungünstig durch Zeitdruck im Montageablauf, Gleichzeitigkeit verschiedener Montagen am selben Kabel, Witterung und Seegang beeinflusst werden. Umso wichtiger ist es dann, dass hervorragend ausgebildete, belastbare und motivierte Mitarbeiter für die Ausführung der Arbeiten zum Einsatz kommen.

Die Ausbildung des Montagepersonals setzt eine gute gesundheitliche Eignung voraus, die mit entsprechenden arbeitsmedizinischen Untersuchungen (G41, G25) nachzuweisen ist[8]. Spezielle, zwingend geforderte Offshore-Sicherheitstrainings geben jedem einzelnen Mitarbeiter die Kompetenz und Sicherheit zur Abwicklung der Arbeiten auf hoher See. Selbstverständlich ist die Persönliche Schutzausrüstung (PSA) für jeden Mitarbeiter durch Rettungs- und Schutzmittel (Rettungsweste, Überlebensanzug) zu ergänzen.

Die speziell für den Offshore-Einsatz am Hochspannungs-Seekabel erforderlichen LWL-Muffen und Kabelgarnituren waren im Zuge der Projektvorbereitung neu zu entwickeln. Insbesondere handelte es sich bei BALTIC1 um LWL-Garnituren für OMEGA-Muffen (siehe Kap. 3.3.3). Aspekte wie Korrosions- und Druckfestigkeit, Dichtigkeit aber auch gute Handhabbarkeit unter erschwerten Montagebedingungen fanden bei der Konstruktion besondere Berücksichtigung. Im Ergebnis dieser Produktentwicklung entstanden unterschiedliche LWL-Seekabelmuffendesigns, die zur Applikation in Abhängigkeit der jeweiligen Voraussetzungen einsetzbar sind.

Da für die Offshore-Montagen gewöhnlich nur sehr enge Zeitfenster mit extrem kurzen Vorlaufzeiten zur Verfügung stehen, ist die exakte terminliche und inhaltliche Koordinierung der Arbeiten an den Hochspannungs- und LWL-Kabeln die Gewähr für eine erfolgreiche Durchführung.

Die fertig montierten Hochspannungs- und LWL-Muffen sind gemeinsam in einem gekapselten Muffengestell angeordnet, das mehrere Meter tief in den Meeresboden eingespült wird. Die dadurch existierende räumlichen Nähe zwischen Hochspannungskabelmuffe und LWL-Muffe sowie die äußerst aufwendige Muffenpositionierung am Meeresgrund machen eine Nachbesserung der Montagen nach erfolgtem Abschluss mit vertretbarem Aufwand unmöglich.

Deshalb sind alle denkbaren Maßnahmen zur sicheren und qualitätsgerechten Ausführung anzuwenden:

- Sorgfältige Entwicklung, Konstruktion, Erprobung und Fertigung der Muffen und Kabelgarnituren.
- Gründliche Schulung der Techniker unter möglichst wirklichkeitsgetreuen Situationen.

---

8 Ärztliche Eignungsuntersuchungen bei Arbeitnehmern auf Offshore-Windenergieanlagen und Plattformen – Empfehlung der DGMM e. V., Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Maritime Medizin e. V.

- Trockenes, sauberes und gut ausgeleuchtetes Arbeitsumfeld durch Einsatz klimatisierter Arbeitscontainer
- Einsatz offshore-tauglicher Werkzeuge und Geräte, ggf. in doppelter Ausführung, um Ausfall- und Stillstandszeiten durch Ersatzbeschaffungen während der Montage auf hoher See zu vermeiden.
- Fertigung hochfester LWL-Spleißverbindungen: das bedeutet Vermeidung jeglicher Vorschädigungen der LWL-Faser bei den Arbeitsgängen Entcoaten, Faser reinigen, Faser brechen und Faser spleißen sowie der Handhabung der ungeschützten Faser während der genannten Arbeiten.
- Enge zeitliche und inhaltliche Koordinierung zwischen Hochspannungs- und Glasfasermontage: Da alle Kabelmontagearbeiten am Hochspannungs- und LWL-Kabel in ein und demselben Raum abgewickelt werden, sind die Arbeiten so zu planen, dass die LWL-Spleißarbeiten nie gleichzeitig mit emissionsintensiven Arbeiten (z. B. Schleifarbeiten, Arbeiten mit offener Flamme, Vergussarbeiten) erfolgen.
- Planung des Bauablaufs unter Berücksichtigung des gesamten Fertigungsprozesses, Vermeidung von unnötigem Zeitdruck auf das Montagepersonal
- Baubegleitende Bewertung der LWL-Spleißverbindungen in Echtzeit während jeder Muffenmontage. Daraus ergibt sich zwingend die Montagereihenfolge für die Seekabelmuffen, und zwar beginnend vom LWL-Messpunkt. Dieser Standort ist in den günstigsten Fällen der Anlandepunkt an der Küste.

Zu den offshore-Montagen zählen auch die erforderlichen Tätigkeiten auf der offshore-Umspannplattform. Hier sind die LWL-Seekabel an das vorinstallierte LWL-Netz der Plattform anzuschließen. Dazu sind Übergangsmuffen zu montieren und eine messtechnische Bewertung der erfolgten Arbeiten vorzunehmen.

4.2.2 Onshore

Während sich die offshore-LWL-Arbeiten auf die Fertigung von Verbindungsmuffen am LWL-Seekabel beschränken, sind die onshore-Montagen an der nachrichtentechnischen Kabelanlage des Netzanschlusses weitaus vielfältiger strukturiert (siehe Abb. 5):

- Baubegleitend zu der Hochspannungsmontage der Hochspannungsverbindungsmuffen sind die Sensor-LWL-Fasern im Mantelschirm der Hochspan-

nungskabel zu montieren und etappenweise messtechnisch zu bewerten. Gemäß Faserplan bzw. den Anforderungen des Temperaturmonitoringsystems sind an definierten Muffen Referenz-Messstellen zu installieren. Auch hier gilt, dass eine Nacharbeit nach Verschluss und Verfüllung der Muffe mit vertretbarem Aufwand nicht mehr möglich ist.

- Nach Verlegung des separaten LWL-Kabels sind auch hier Verbindungsmuffen herzustellen. Da es sich hierbei um ein hochfaseriges Kabel mit verschiedenen Fasersorten handelt, sind die zeitlichen Aufwendungen entsprechend umfänglich zu kalkulieren. An den Crossbonding-Punkten der Hochspannungsanlage sind die Ausschleifungen der Fasern für die TE-Messung vorzusehen. Dies sind gewöhnlich mit LWL-Steckern konfektionierte und aus-reichend lange Breakoutkabel, die in der Nähe des Crossbonding-Punktes geschützt abgelegt werden.
- Im Umspannwerk werden an den Endverschlüssen die Sensorfasern aus den Hochspannungskabeln ausgeschleift. Noch am Portal werden alle ankommenden Fasern – sowohl die Sensorfasern als auch die Fasern aus dem separaten LWL-Erdkabel – in einer Übergangsmuffe auf ein gemeinsames Verbindungskabel gespleißt, das im Wartungsgebäude auf mehreren Kabelendeinrichtungen endet.

Nach Abschluss der Montagearbeiten und in Vorbereitung der Inbetriebnahme sind alle LWL-Faserstrecken mit den genormten LWL-Messungen zu bewerten. Der Nachweis der geforderten Faser- und Montageparameter ist die Voraussetzung für die Inbetriebnahme der informationstechnischen Systeme (Schutz- und Leittechnik, Telefon, Rechnerdaten, TE-Messtechnik, Temperaturmesstechnik).

Erst nach erfolgreicher Inbetriebnahme dieser Systeme können die Inbetriebnahmehandlungen für die Hochspannungskabel erfolgen.

Daraus wird ersichtlich, dass für elektrische Leitungsverbindungen im Offshore-Bereich eine äußerst intensive Verzahnung zwischen Hochspannungs-, Telekommunikations- und Prozesskommunikationstechnik stattfindet.

5. Aspekte der Betriebsführung und Systemführung der LWL-Kabelanlage

Die relativ hohe LWL-Kabel- und Faseranzahl und die unterschiedlichen Faserarten erfordern für den späteren Betrieb der Faserstrecken eine sehr exakte Dokumentation.

Die Projektdokumentation gliedert sich in die
- LWL-Kabel- und Garniturendokumentation
- Faser- und Fasergarniturendokumentation
- Dokumentation der Faserparameter (z. B. mit der Software FIBERDOC®)

Die LWL-Kabel- und Faserdokumentation ist essentielle Voraussetzung für eine reibungslose Betriebsführung und Systemführung sowohl für die elektrischen Stromkreise des Leistungstransports als auch für die LWL-Informationsübertragungsstrecken selbst.

Grundlage dieser Dokumentationen sind die Ausführungsplanung des LWL-Projektes und die Abnahmemessergebnisse der Werks- und Anlagenabnahmen.

Die Faserverwaltung, d. h. die Festlegung der Verwendung für jede Faserstrecke ist auf Grund mehrerer möglicher Funktionen als neue Aufgabe entstanden. Bislang werden alle installierten LWL-Faserstrecken ausschließlich für die Funktion Datenübertragung von A nach B festgelegt.

In den Seekabelprojekten nun sind folgende Funktionen zu unterscheiden und vorab festzulegen:
Faser für:
- Datenübertragungsfasern inklusive Reserve
- Schutzsignalfasern (Direktfasern) inklusive Reserve
- vermietete Fasern inklusive Reserve
- Sensorfasern inklusive Reserve
- TE-Messsystemfasern inklusive Reserve

Aus diesen unterschiedlichen Funktionen resultieren auch mehrere Zuständigkeiten in Hinblick auf die **Betriebs- und Systemführung.**

Diese vielfältigen Zuständigkeiten erfordern eine detaillierte Dokumentation der Funktionen und Parameter für jeden Zuständigkeitsbereich und eine enge Verzahnung zwischen den Fachbereichen für Planung, Bau, Betriebsführung und Systemnutzung.

6. Zusammenfassung

Der Netzanschluss eines Offshore-Windparks ist mit einer umfangreichen und komplexen nachrichtentechnischen Kabelanlage ausgestattet, die ausschließlich auf LWL-Fasertechnologie fußt. Ausgehend von den Anforderungen der unterschiedlichen Dienste bei Inbetriebnahme, Betrieb und Überwachung der Kabelanlage wird eine Vielzahl verschiedener LWL-Fasertypen erforderlich. Insbesondere bedingen Monitoring-Technologien den Einsatz zusätzlicher LWL-Fasern mit speziellen optischen Eigenschaften in Bezug auf Dispersion und SBS.

Der Netzanschluss gliedert sich in offshore- und onshore-Abschnitte, die den Einsatz unterschiedlicher Kabel – HS-Seekabel, HS-Erdkabel, separate LWL-Kabel – erfordern. Deshalb bedingt die Applikation diverser Fasertypen in Kombination mit variierenden Kabeltypen eine ansehnliche Vielzahl unterschiedlicher Kabelgarnituren. Im Vergleich zu der nachrichtentechnischen Infrastruktur an Hochspannungsanlagen (Luft- oder Erdkabel) stellt die beschriebene LWL-Kabelanlage in ihrer Komplexität eine gänzlich neue Qualität dar, die bei der Planung, bei der Organisation und Ausführung der Montage sowie dem Betrieb und der Systemnutzung Berücksichtigung finden muss.

Nach einer mehrjährigen erfolgreichen Betriebsphase eines ersten Stromkreises wird gegenwärtig der Netzanschluss für den Windparkverbund BALTIC1 und BALTIC2 mit weiteren redundant ausgeführten Kabelanlagen unter Nutzung der gewonnen Erfahrungen erschlossen.