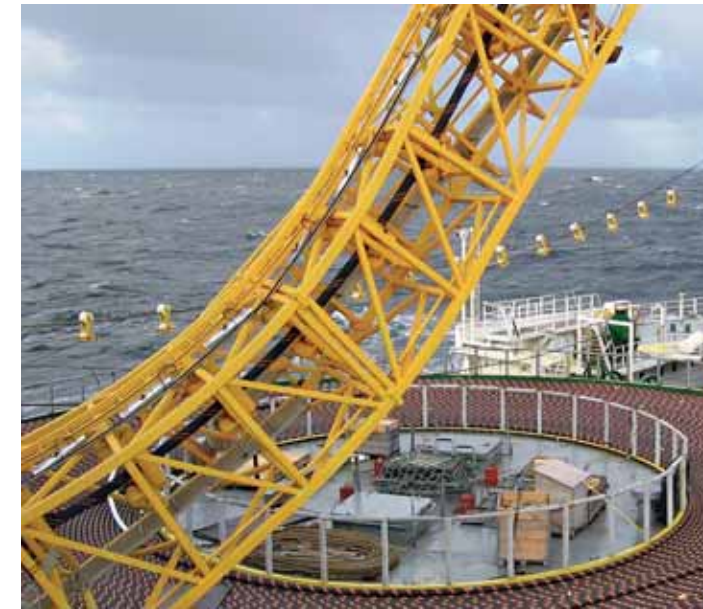


45.000 Tonnen unter dem Meer

Text/ PETER LEUTEN
Fotos/ ABB, ALPHA VENTUS, NORDED, SCANMUDRING,
SIEMENS, STATNETT, WIKIPEDIA

Schwimmflügel für eine lange Leitung: Das NorNed Hochspannungs-Gleichstromkabel wird behutsam auf den bis zu 410 Meter tiefen Meeresgrund abgesenkt. 700 Megawatt elektrischer Leistung jagen mittlerweile durch den armdicken Strang zwischen Norwegen und den Niederlanden



Nachdem 1833 die erste telegrafische Nachrichtenübertragung vom Physikgebäude bei der Paulinerkirche in der Göttinger Innenstadt zur Göttinger Sternwarte gelang, setzte in der Folge bei dieser neuen Technik eine stürmische Entwicklung ein. Etwas mehr als zwanzig Jahre später wagte man sich bereits an eine Verbindung zwischen Großbritannien und Amerika: Im Jahr 1857 begann die Verlegung des ersten Transatlantikkabels. Als das Kabel 1858 in Betrieb genommen wurde, war das eine Sensation. Doch die Ernüchterung folgte stehenden Fußes: Schon nach wenigen Wochen war das Telegraphenkabel tot. Als wahrscheinlichster Grund für den Totalausfall ist wohl eine unzureichende Isolation anzusehen. Zehn Jahre später war die Entwicklung insbesondere der Isolationsmaterialien schon weiter vorangeschritten. Das mit Hilfe des Dampfschiffs *Great Eastern* verlegte, verbesserte transatlantische Kabel erreichte bereits eine wesentlich höhere Lebensdauer. Als Telegraphie-Verbindung konzipiert, hatten diese ersten Seekabel jedoch nur die Aufgabe, vergleichsweise geringe Stromstärken über den Grund des Atlantiks hinweg zu leiten. Im Zeitalter Satellitengestützter digitaler Kommunikationswege sind derartige Seekabel gewissermaßen die Dinosaurier einer längst vergessenen grauen Vorzeit. Wenn also, wie vor kaum mehr als zwei Jahren eine zudem auch noch wesentlich kürzere See-Verbindung per Kabel Furore macht, dann muss daran schon etwas besonderes sein. In der Tat! Die zwischen den Niederlanden und Norwegen quer durch die Nordsee verlegte, rund 576 Kilometer lange Kabelverbindung *NorNed* leitet nicht tausende digitaler Daten weiter, sondern gigantische elektrische Leistungen: Bis zu 700 Megawatt können seit September 2008 auf dem Grund der Nordsee zwischen Eemshaven in den Niederlanden und Fedaa in Norwegen hin- und hergeleitet werden.

270 Millionen Euro im Meer versenkt?

Sinn der teuren Investition ist ein effizienteres Haushalten mit der elektrischen Energie: Sie soll in erster Linie dafür sorgen, dass der nachts anfallende überzählige Strom niederländischer Kernkraftwerke in norwegischen Pumpspeicherkraftwerken „gespeichert“ wird. Denn die Atommeiler haben einen gravierenden Nachteil: Sie lassen sich nur unzureichend regeln. Um tagsüber die maximale Last abdecken zu können, sind die AKWs in einer entsprechenden Leistungsdimension angesiedelt; Nachts dagegen „verpufft“ ihre Energie größ-

teils ungenutzt. Das soll das neue Kabel ändern. Die reichlich vorhandenen Wasserkraftwerke Norwegens nutzen den niederländischen Atomstrom, indem sie nachts umgekehrt laufen: also große Wassermassen bergauf pumpen. Mit deren Hilfe kann tagsüber bei Lastspitzen zusätzlicher Strom produziert werden, der dann per Kabel wieder die Rückreise in die Niederlande antritt. Das Kabel bietet damit nicht allein eine perfekte Lösung, die unzureichende Regelmöglichkeit der Atommeiler auszugleichen, es erübrigte einstweilen auch den Bau weiterer Kraftwerke, die sonst zu Spitzenlast-Zeiten nötig gewesen wären, den Energiebedarf zu decken.

Ausflug in die Physik

Die Stromtrasse auf dem Grund der Nordsee ist an sich schon eine technische Glanzleistung. Die immense Bedeutung des Projekts erschließt sich indes erst bei näherer Betrachtung der physikalisch-technischen Rahmenbedingungen. Hochspannungsleitungen, die große Leistungen über weite Distanzen hinweg leiten, kennen wir bislang nur als Stakkato von Stahlmasten, zwischen denen „Seile“ gespannt sind. Technisch ist eine solche Stromtrasse durch zwei Eigenschaften zu charakterisieren: Sie leiten sehr hohe Spannungen (bis zu 380 Kilovolt) und der durch sie hindurchgeleitete Strom wechselt 50-mal in der Sekunde seine Richtung, was bei manchen Wetterlagen durch ein deutliches „Knistern“ der Leitungen hörbar wird. Beides, die Verwendung von Wechselstrom ebenso wie die in dieser Höhe kaum brauchbare Spannung sollen vor allem die Leitungsverluste reduzieren. Denn nach dem Ohm'schen Gesetz erhöht sich die Verlustleistung beim Hindurchleiten von Strom durch ein Kabel, dessen Widerstand sich zwangsweise aus seiner Länge ergibt, proportional mit der durchgeleiteten Stromstärke. Die reduziert sich nun aber merklich, wenn besonders hohe Spannungen gewählt werden. Mittels Wechselstrom lässt sich diese hohe Spannung unter Verwendung von Transformatoren vergleichsweise leicht erzeugen. Allerdings ist es so, dass beim Durchleiten von Wechselstrom durch ein Kabel ein ständig wechselndes magnetisches Feld dieses Kabel entsteht, welches in benachbarten Kabeln wiederum eine Spannung generiert, die sich dem durchzuleitenden Strom gewissermaßen entgegenstemmt. Aus diesem Grund verlaufen die „Seile“ einer Hochspannungsleitung möglichst weit auseinander. In einem Seekabel ist dies nicht möglich. Damit derartige Leistungsverluste, die bei Fach-



Anschluss auf hoher See: Die insgesamt fünf notwendigen Verbindungen zwischen den Teilstücken des Kabels müssen auf dem Schiff erstellt werden. Einmal schlich sich bei dieser Prozedur ein Fehler ein, der später zu einem vorübergehenden Ausfall der Leitung führte

leuten „Blindleistung“ genannt werden, nicht auftreten, kam hier nur die Verwendung von Gleichstrom in Frage. So beeinflussen sich die beiden dicht beieinander liegenden Leiter des Kabels nicht. Zudem erlaubt der Wegfall jeglicher mechanischer Zugbelastungen die Verwendung von reinem Kupfer als Leiter.

Um den vergleichsweise niedrigen Leitungsverlust des Kabels von 3,7 Prozent zu erreichen, musste die Betriebsspannung allerdings auf 450 Kilovolt, also 450.000 Volt hochgesetzt werden. Da solche Spannungen wiederum nur durch Transformation zu erreichen sind, die ihrerseits die Verwendung von Wechselstrom voraussetzt, muss ergo nach der Erzeugung der Hochspannung der Wechselstrom in Gleichstrom gewandelt werden.

Mehr noch: Am Ende der Seeleitung soll der ankommende Gleichstrom ja wieder ins norwegische Stromnetz eingespeist werden, das, wie überall auf der Welt, aber mit Wechselstrom arbeitet. Somit ist es unumgänglich, den Gleichstrom in Wechselstrom zurückzuwandeln. Hierin liegt die eigentliche Sensation: Die Konvertierung solcher gigantischer Leistungen noch dazu bei derart hohen Spannungen ist erst seit wenigen Jahren möglich. Und sie erfordert einen immensen technischen Aufwand.

45.000 Tonnen Kabel

Dieser Aufwand führt insbesondere eines vor Augen: Nämlich welche Verluste durch die Erzeugung ansonsten ungenutzter Energie zu Buche schlagen würden. Denn nur unter der Voraussetzung einer gegebenen Wirtschaftlichkeit ist ein derart anspruchsvolles Projekt denkbar. Allein drei Jahre nahmen die Bauarbeiten in Anspruch.

Auch wenn die eigentliche Verlegung erst Anfang 2006 begann, die ersten Planungen zu dem schlussendlich von den beiden Stromkonzernen Statnet (Norwegen) und Tennet (Niederlande) verwirklichten Gemeinschaftsprojekt liegen schon weit zurück. Bereits 1991 wurde der Bau einer solchen Leitung in einem Grundsatzabkommen zwischen der niederländischen SEP (Verbund der niederländischen Elektrizitätserzeuger) und der Noorse Statkraft festgelegt. Die Auflösung der SEP, die Privatisierung des Elektrizitätssektors und die zwischenzeitlich sehr niedrigen Brennstoffpreise verzögerten die konkrete Umsetzung aber erheblich. Ende 2004 genehmigte schließlich die niederländische Energiekammer die Pläne für das NorNed-Kabel. Startschuss war der 05. Juni 2005. Statnet und Tennet beauftragten Bohlén & Doyen mit den Verlegungsarbeiten, allein ein Auftragswert von 50 Millionen

Euro. Für die Verlegearbeiten charterte das Konsortium für drei Jahre von der norwegischen Bourbon Cable AS das bislang größte Kabelverlegungsschiff der Welt, die Skagerrak. Sie verfügt neben einem für derartige Arbeiten unabdingbaren Dynamic Positioning System vor allem über eine gigantische Wickeleinrichtung, die in einem Stück bis zu 6.600 t Kabel aufnehmen kann. Das allerdings reichte bei weitem nicht für die ganze Strecke: Die Skagerrak nahm das von ABB in Karlskrona (Schweden) hergestellte NorNed-Kabel in sechs Einheiten entgegen, die unterwegs miteinander verbunden werden mussten. Um die Zahl der Verbindungsstellen zu reduzieren, wurde die Verbindung nicht in der ganzen Streckenlänge bipolar geführt.

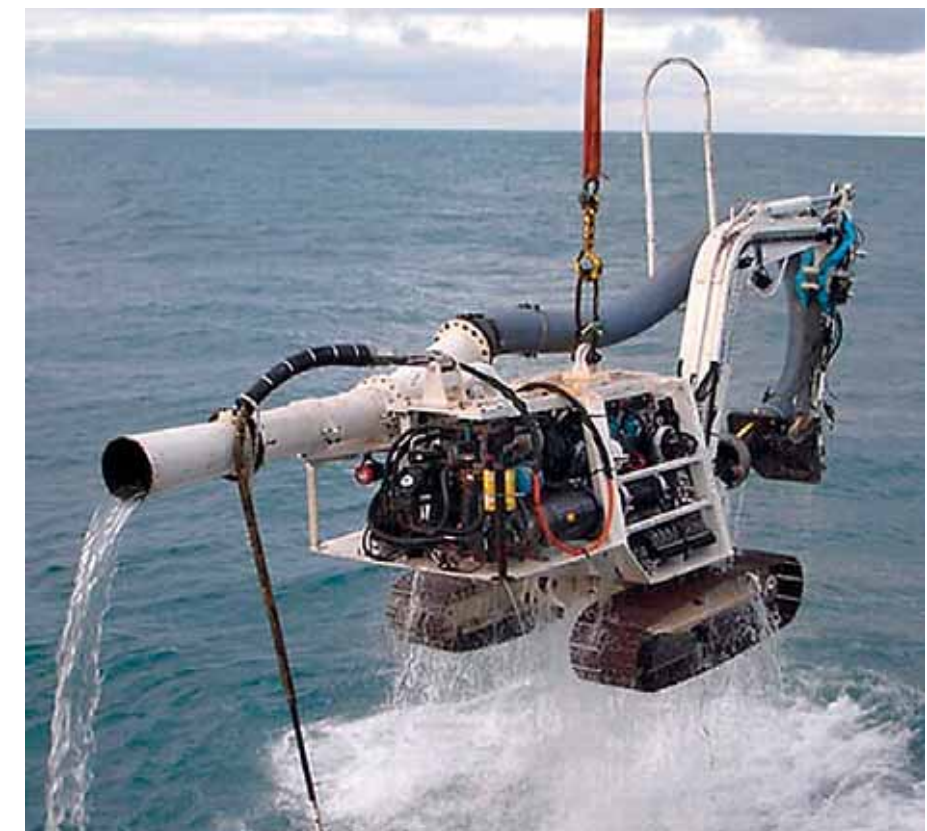
In Etappen zum Ziel

Von Holland ausgehend verläuft das Kabel zunächst 270 Kilometer als bipolare Leitung und splittet sich dann für den Rest der Strecke in zwei monopolare Leiter auf. Von der bipolaren Ausführung des Kabels konnte der Verleger Sektionen von bis zu 76 Kilometern Länge übernehmen; die monopoloaren Kabelsektionen waren bis zu 154 Kilometer lang. Damit mussten insgesamt fünf später unter Wasser lie-

gende Verbindungsstellen in Kauf genommen werden. Mit der Verlegung eines bipolaren Kabels beschritt Bohlén & Doyen echtes Neuland: Für das Handling mit dem zweidrigen Kabel musste das Verlegungsschiff mit spezieller Ausrüstung ausgestattet werden. Das Kabel selbst ist ein Absolutes High-Tech-Produkt: Den eigentlichen Kupferleiter umgibt zunächst eine Lage aus schwach leitendem Karbon-Papier, die auf der Oberfläche des Leiters jede mögliche Unebenheit eliminieren soll, die sonst die Feldstärke lokal stören könnte. Erst darauf folgen diverse Isolationsschichten, sowie bei der bipolaren Ausführung ein eingearbeiteter Stützkörper. Die mechanische Festigkeit des Kabels gewährleisten zwei Schichten einer Draht-Stahl-Armierung, die in gegenläufiger Richtung eine Doppel-Helix um das Kabel bilden.

Trassenführung

420 km der Kabelstrecke verlaufen in seichtem bis 50 Meter tiefen Gewässern, erst rund 160 Kilometer vor Norwegen erreichte das Verlege-Team Tiefen von bis zu 409 Metern. Der Kabelverlauf auf dem Grund der Nordsee erfolgt im Großen und Ganzen in gerader Linie



„Baggern Unterwasser“ mit Hilfe von ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen. Die herkömmliche Schaufel wird hier ersetzt durch einen leistungsstarken Saugrüssel. So wurde ein drei bis fünf Meter tiefer Graben für das Kabel erstellt

zwischen den beiden Anlandungspunkten in Eemshaven und Fed. Den Aushub des zuvor zwischen drei und fünf Meter tiefen Verlegetrasses bewerkstelligte ein ferngesteuerter Roboter, der letztlich starke Ähnlichkeit mit einem Bagger aufwies. Sukzessive konnte sodann das Kabel in das Bett abgesenkt und dann mit Material vom Meeresgrund abgedeckt werden. An solchen Stellen, an denen das neue Kabel bereits verlegte Unterseekabel kreuzt, musste indessen eine Rampe erstellt werden, über die das NorNed-Kabel geführt wurde. Diese Bereiche mussten anschließend mit Felsmaterial abgedeckt werden. Der Elektro-Konzern ABB lieferte neben dem Kabel auch einen Großteil des benötigten Equipments wie die Transformatoren, Thyristor-Einheiten, Stromrichter und Glättungsdröseln der Konverterstationen. Im September 2008 konnte NorNed in Betrieb genommen werden.

Doch bereits ein halbes Jahr nach Inbetriebnahme musste die Stromübertragung durch das Kabel abgeschaltet werden, nachdem am

11. April 2009 um 9.50 Uhr ein Brand in einer Kabelbox bei der Konverter-Station Eemshaven zu einem Spannungsabfall geführt hatte. Aufgrund der überaus lebensgefährlichen Spannungen beließ es die Feuerwehr dabei, das Feuer unter Kontrolle zu bringen und die in Brand geratenen Einrichtungen kontrolliert abbrennen zu lassen. Zu einer längeren Abschaltung kam es am 29. Januar diesen Jahres. Ein zunächst nur auf „ungefähr 70 Kilometer vor der niederländischen Küste“ verorteter Schaden machte die Abschaltung notwendig. Mit Hilfe eines U-Bootes musste zunächst die defekte Stelle genau lokalisiert werden. Abhängig von der Verfügbarkeit der notwendigen Spezialschiffe galt es dann, das Kabel am Meeresgrund freizulegen und an die Oberfläche zu bringen, um die defekte Sektion zu ersetzen. Der niederländische NorNed-Partner Tennet hatte für diesen Fall ausreichende Kabellängen eingelagert. Aufgrund schlechten Wetters zogen sich die Reparaturarbeiten jedoch bis Mitte April. Nach einer Reihe von Tests konnte die Übertragung wieder angefahren werden.

Vorläufer

NorNed ist allerdings nicht das erste Seekabel, das zur Übertragung elektrischer Leistungen dient: Seit 1994 verbindet etwa das ebenfalls mit Gleichstromleitung betriebene 262 Kilometer lange Baltic Cable Lübeck-Herrenwyk mit Kruseberg in Schweden. Das Baltic Cable verwendet 450 kV und war bis zur Inbetriebnahme des NorNed im Jahr 2008 mit einer Übertragungsstrecke von 250 km das europaweit längste im Einsatz befindliche Hochspannungskabel mit einer maximalen Übertragungsleistung von 600 MW.

Die Verbindung nutzt das Prinzip einer monopolen Gleichstromübertragung, die darin besteht, dass nur ein Pol als isoliertes Kabel im Erdreich bzw. am Meeresboden verlegt wird. Der zweite Pol wird als Elektrode im Wasser ausgeführt. Als Rückleitung dient bei der Seestrecke das Meerwasser bzw. die obere Erdschichten.

Bei einer monopolen Gleichstromübertragung wird also der Be-

triebsstrom der Anlage von einigen Kiloampere über den Erder geführt. Der besteht, um einen niedrigen Erdungswiderstand zu erreichen, aus einem blanken Ring aus Kupfer mit einem Radius von 1.000 Metern.

Durch den maximalen Gleichstrom von 1340 A wird an den Elektroden ein Elektrolyse-Prozess ausgelöst. Dadurch entstehen an der Anode täglich 41 kg Chlor und 47,8 kg Natriumhydroxid an der Kathode. Welche der beiden Elektroden, auf schwedischer bzw. deutscher Seite, jeweils die Anode bzw. Kathode ist, richtet sich nach der Stromrichtung.

In etwa der gleichen Länge bewegt sich auch das sogenannte BritNed-Kabel, das von der Isle of Grain an der Süd-Ost-Küste Großbritanniens nach Maasvlakte bei Rotterdam durch den Ärmelkanal verläuft und sich seit 2009 im Bau befindet. Ab 2011 soll das Kabel mit einer Maximalleistung von 1000 Megawatt in Betrieb gehen.



Oben: Zu Türmen aufgestapelt: Hunderte leistungsstärkster Thyristoren verwandeln „in Reihe geschaltet“ den ankommenden Gleichstrom wieder in Wechselstrom. Damit sie bei Spannungen von 400.000 Volt dabei keinen Schaden nehmen, müssen sie alle gleichzeitig durchschalten. Hier ist eine Genauigkeit bis auf die tausendstel Sekunde gefragt. Die nötige Präzision gewährleistet eine Ansteuerung per Lichtleiter

Links: Anschließend durchfließt der so entstandene Wechselstrom gigantische Transformatoren

Gigantisches Kabel durch die Nordsee geplant

Noch weitaus leistungsstärker soll nach einer dpa-Meldung vom 11.04.2010 eine neue Gleichstromverbindung zwischen Deutschland und Norwegen ausfallen, die in etwa parallel zum NorNed-Kabel verlaufen und ab 2015 auf einer Strecke von etwa 570 Kilometern eine Leistung von bis zu 1.400 Megawatt zwischen Flekkefjord in Südnorwegen und einem Anlandungspunkt in der Nähe von Wilhelmshaven in der Wesermarsch durchleiten soll.

Es wird die erste dieser Hochleistungstrassen sein, die nicht der möglichst effektiven Nutzung konventioneller Energieträger dienen soll, sondern insbesondere einer optimalen Einbindung erneuerbarer Energien in das europäische Stromnetz verpflichtet ist. Mit ihrer Hilfe soll künftig in Phasen geringer Netzbelastung die Energie der zahlreichen in Nord- und Ostsee entstehenden Windparks ähnlich dem NorNed-Konzept mittels Wasserkraft gespeichert werden, um sie bei hohem Strombedarf wieder abzurufen.

Die Dimension des Projekts verdeutlicht allein der Blick auf die von dem norwegisch-schweizerischen Konsortium NorGer veranschlagte Investitionssumme von 1,4 Milliarden Euro. NorGer konzentriert

sich damit auf das ungelöste Problem der Windenergie: Die Netzsicherheit bei schwankender Leistung der Windkraftanlagen. Letztlich geht es darum, zusammen mit acht europäischen Ländern an der Nordseeküste ein riesiges Stromnetz aufzubauen, um damit der Windenergie zum Durchbruch zu verhelfen.

Aufgrund der gegenüber NorNed doppelt so hohen Leistung soll das Gleichstromkabel mit einer bipolaren Betriebsspannung von bis zu ± 500 kV betrieben werden, die Verlustleistung wird auf fünf Prozent geschätzt.

Weltrekord-Spannung

Nicht unter Wasser, dafür aber mit einer bislang unerreichten Spannung von etwa 800 Kilovolt, arbeitet die weltweit erste UHGÜ-Verbindung (Ultra-Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) zwischen dem Xiangjiaba-Wasserkraftwerk im Südwesten Chinas und Shanghai. Bis zu 7.200 Megawatt elektrischer Leistung gelangen so in das rund 2.000 km entfernt gelegene Industrie- und Wirtschaftszentrum des Landes. Die neue Übertragungsleitung deckt den Strombedarf von 24 Millionen Menschen.



Für Deutschland sind die HGÜ-Seekabelverbindungen indes eine Schlüsseltechnologie zur Erschließung der gigantischen Ressourcen der Offshore-Energie. Und das gilt nicht nur für die Frage nach ihrer Zwischenspeicherung in Phasen geringer Netzauslastung. Denn alle ambitionierten deutschen Windpark-Projekte liegen fernab der Küste. Zum Beispiel der erste überhaupt ans Netz gegangene deutsche Offshore-Park Alpha Ventus. Zwölf gigantische Windturbinen produzieren seit April diesen Jahres 45 Kilometer nördlich von Borkum bis zu 60 Megawatt elektrischer Leistung. Drei Energieversorger, die Stromkonzerne EWE, Eon und Vattenfall, hatten sich zusammengesetzt, um das weltweit erste Hochsee-Windpark-Projekt zu stemmen. Schlechtes Wetter und der enorme logistische Aufwand hatten das Offshore-Projekt um mehrere Monate verzögert.

Angesichts der kaum noch vorstellbaren Dimensionen der hier instal-

lierten Anlagen ist das letztlich kein Wunder: Die Rotoren der 5M von Repower haben den enormen Durchmesser von 116 bzw. 123 Metern und fangen den Wind auf einer Fläche ein, die rund eineinhalb mal so groß ist wie ein Fußballfeld.

Bis zur Flügelspitze ragen diese kolossalen Turbinen 155 Meter aus der Nordsee empor und erreichen damit fast die Höhe des Kölner Doms! Nicht zu vergessen ist dabei die Unterwasserkonstruktion, die unter der Wasseroberfläche noch einmal 28 Meter tief bis zum Meeresgrund reicht, wo die knapp 1.000 Tonnen schweren Anlagen mit bis zu 50 Meter langen Pfählen im Boden verankert sind. Auch bei Alpha Ventus sorgt eine Hochspannungs-Gleichstromübertragung durch ein 60 Kilometer langes Seekabel für eine Anbindung des Windparks an das konventionelle Strom-Netz.

Derzeit sind in der deutschen Nord- und Ostsee mehr als 30 Wind-

parks mit einer im Endausbau geplanten Gesamtleistung von enormen 40.000 MW in der Planung bzw. zur Genehmigung beantragt. Nicht zuletzt deshalb sieht die deutsche Windindustrie sehr gute Marktchancen für den technologisch anspruchsvollen Offshore-Bereich.

Hinsichtlich der Übertragungstechnologie hat jüngst etwa ABB von dem Übertragungsnetzbetreiber transpower Aufträge im Wert von 700 Millionen US-Dollar zur Anbindung weiterer Windparks in der Nordsee erhalten. So sind der Windpark Borkum West II (400 MW) sowie weitere Windparks, die in der Nähe entstehen werden, an eine Offshore-Umrichterstation anzuschließen. Insgesamt sind Seekabelverbindungen über eine Strecke von 165 Kilometern zu erstellen. Der Auftrag umfasst die System-Entwicklung einschließlich Design, Lieferung und Installation der Offshore-Plattform, der Offshore- und

Onshore-Umrichterstation sowie die Lieferung und Verlegung der See- und Landkabel.

Und Siemens meldete Mitte des Jahres den Auftrag, den Windpark Nordsee-Ost über Seekabel in Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Technik an das Festland anzuschließen. Der Konzern mit Stammsitz in Erlangen ist nach eigenen Angaben mit einer im Bau befindlichen Leistung von insgesamt 4.600 MW Marktführer im Geschäft mit Offshore-Netzanschlüssen. Mit im Boot ist beim Windpark Nordsee-Ost Kabelhersteller Prysmian. Das Auftragsvolumen für das Konsortium beläuft sich auf rund eine halbe Milliarde Euro. Der Windpark liegt etwa 85 Kilometer vor der Küste – nordwestlich der Insel Helgoland. Insgesamt können mit diesem Netzanschluss bis zu 576 Megawatt (MW) an erneuerbarem Strom übertragen werden.