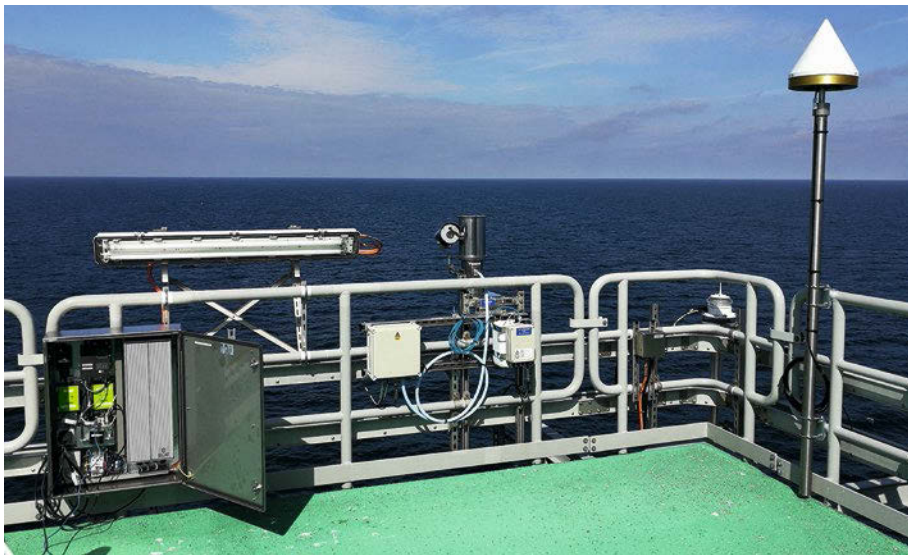


Präzise Positionsbestimmung und Ausrichtung auf hoher See

GNSS Die Anforderungen an die Positionierung und Vermessung von Offshore-Windkraft-Anlagen werden immer anspruchsvoller. Dies gilt sowohl für eine möglichst präzise Positionsbestimmung auf hoher See als auch für die Ausrichtung aller Anlagen in einem Windpark. Mithilfe redundanter GNSS-Referenzstationen können Dienstleister der Windpark-Betreiber ihre Schiffe für Installations-, Verlege- und Wartungsarbeiten eindeutig und wiederholbar positionieren und navigieren.

Jürgen Rüffer, Michael Schulz, Dr. Gerhard Wübbena



Stationsaufbau im Windpark „Horns Rev 3“

Quelle: Allsat GmbH

Seit 2013 ist die in Hannover ansässige Allsat GmbH beim Neubau von Offshore-Windparks in der Nordsee tätig, die längste Zeit davon für Vattenfall in den Windparks „DanTysk“ von 2013 bis 2015, „Sandbank“ von 2015 bis 2017 und „Horns Rev 3“ von 2017 bis heute.

Die dabei gesammelten Erfahrungen führen zu Überlegungen für die Nutzung von Präzisions-GNSS (Global Navigation Satellite Systems = globale Navigationssatellitensysteme) für Anwendungen sowohl in der Nordsee als auch zum Positions-Monitoring von Windanlagen generell. Die Möglichkeiten für eine erweiterte Nutzung von GNSS sollen in diesem Beitrag erläutert werden, ausgehend von den konkreten Anwendungen und Erfahrungen in den genannten Windparks.

Im Jahr 2013 wurde die Allsat GmbH erstmals von Vattenfall beauftragt, eine

GNSS-Referenzstation für die Errichtung des Windparks „DanTysk“ zu liefern, zu installieren und während der Aufbauphase zu betreiben.

Der Zweck einer solchen Referenzstation ist die Belieferung aller Vertragspartner für die Errichtung und den Anschluss eines Offshore-Windparks mit hochpräzisen GNSS-Korrekturen in Echtzeit. Damit können sich alle Vertragspartner, die einen geodätischen GNSS-Empfänger nutzen, jederzeit und wiederholbar mit einer Genauigkeit von <2 cm absolut positionieren. So lässt sich zum einen die Position eines Schiffes sehr genau in Echtzeit positionieren, zum anderen können die Anlagen genau ausgerichtet und die Peripherie wie z.B. die Kabel für den Windpark präzise vermessen und wiedergefunden werden. Sämtliche hydrografischen Vermessungen können im gleichen Bezugssystem homogen und präzise verortet werden.

Um dies zu gewährleisten, müssen an einem präzise zu vermessenden Standort der GNSS-Referenzstationsantenne sekundlich neue GNSS-Korrekturen erzeugt und verteilt werden. Da die an Land inzwischen typische Verbreitung der Korrekturen via Mobilkommunikation auf See nur in Ausnahmefällen möglich ist, wird dort bisher auf 70 cm UHF-Funk-Systeme zurückgegriffen.

Als Standort für die Referenzstation zum Bau von „DanTysk“ wurde die Plattform „Fino3“ gewählt, da sich diese in ausreichender Nähe zum Gebiet des geplanten Windparks befindet. Mit der erlaubten Sendeleistung für 70 cm-Funk konnte eine Reichweite von 25 km sicher erwartet werden. Allerdings lagen die Randgebiete des Windparks zum Teil bis zu 30 km entfernt, wodurch eine präzise Positionsbestimmung im Zentimeterbereich nicht garantiert werden konnte.

Andererseits war die Forschungsstation „Fino3“ als vorhandener und permanent bewohnter Standort mit Internet-Anbindung besonders geeignet, um dieses erste Projekt für eine GNSS-Referenzstation zum Bau eines Offshore-Windparks mit geringem Risiko und hoher Verfügbarkeit zu realisieren.

Die Ausstattung einer GNSS-Referenzstation besteht aus folgenden Komponenten: einer wettertauglichen GNSS-Antenne, einem separaten GNSS-Empfänger mit einer Kabelverbindung zwischen Antenne und Empfänger, einer Stromversorgung, einem Internetanschluss mit Router für die externe Überwachung dieser Anlage und einem Funkmodem mit geeigneter Antenne für die Verbreitung der GNSS-Korrekturen. Darüber hinaus sollte möglichst ein Web-Interface zur Information von Nutzern und Betreiber verfügbar sein.



GNSS-Antennen auf der Forschungsplattform „Fino 3“

Quelle: Allsat GmbH

Um den dauerhaften Betrieb der Anlage sicherzustellen, werden einzelne Komponenten redundant ausgelegt und so miteinander gekoppelt, dass bei Ausfall einer Komponente übergangslos eine andere übernehmen kann. Dies waren im Fall von „DanTysk“ die GNSS-Antenne und der GNSS-Empfänger, das Funkmodem und die Stromversorgung in Form einer ausreichend dimensionierten unterbrechungsfreien Stromversorgung.

Mit dieser Ausstattung konnte in sämtlichen von Allsat unterstützten Windpark-

Errichtungen ein kontinuierlicher Betrieb über jeweils circa zwei Jahre gewährleistet werden, wobei einzelne der oben genannten Komponenten auch Fehlzeiten im Betrieb aufwies. Durch diese redundante Ausstattung wurden allerdings kostenintensive Wartungseinsätze vor Ort und Baustillstandzeiten vermieden.

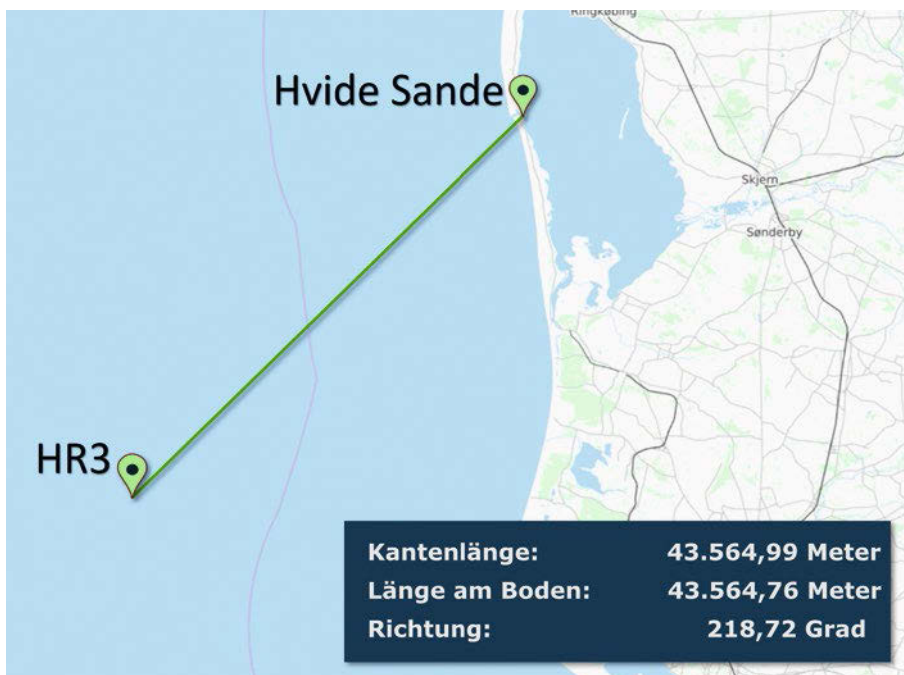
Da GNSS-Korrekturen oft Herstellerspezifische Besonderheiten aufweisen, schlug Allsat dem Kunden die Verbreitung standardisierter Korrekturen im RTCM 3-Format vor. Darüber hinaus wurde eine englisch-

sprachige Verfahrensanweisung für die Nutzer mit Empfehlungen erstellt, die eine geeignete Verarbeitung der GNSS-Korrekturen für GNSS-Empfänger unterschiedlicher Typen und Alters ermöglichten.

Eine Besonderheit des Betriebs von GNSS-Referenzstationen stellt die Anforderung eines störungsfreien Empfangs der sehr schwachen GNSS-Signale aus mehr als 20 000 km Entfernung dar. Dies wäre auf jedem der betrachteten Standorte (zweimal auf „Fino3“ sowie auf einer Umspannplattform und im Hafen von Hvide Sande, Dänemark) nur an deren jeweils höchster Stelle möglich gewesen. Dies wurde jedoch wegen der Montage der schweren Antennen sowie deren Anschluss ausgeschlossen. Somit kommt in der Regel zu Beginn eines Aufbaus nur eine Testinstallation der Antennen infrage, bei der nach 24 Stunden Betrieb eine Störungsanalyse vorgenommen werden muss, bevor ein Antennenstandort final festgelegt werden kann.

Darüber hinaus wurde die redundante Referenzstation so ausgestattet, dass sie mittels eigenem Empfangsmodem in der Lage war, die erzeugten GNSS-Korrekturen für eine eigenständige permanente Positionsbestimmung im Sinne eines Monitorings zu nutzen. Damit konnte der Bestimmungszweck der Gesamtanlage jederzeit überprüft und die Ergebnisse in Echtzeit über ein Web-Interface verfügbar gemacht werden.

Im Windpark „Horns Rev 3“ wurde eine redundante Referenzstation als



Links: Lage des Windparks in der Nordsee; rechts: Aufbau der Station in der dänischen Hafenstadt Hvide Sande



Quellen: OpenStreetMap / Allsat GmbH

gleichzeitige Monitoringstation im Hafen des 40 km entfernten Ortes Hvide Sande betrieben.

Zur Überprüfung der vollen Funktion der Referenzstationen wurde zu Beginn eines Projekts eine Messfahrt zum Windpark-Gebiet durchgeführt. Mit zwei GNSS-Empfängern unterschiedlicher Hersteller wurde dabei jeweils eine eintägige Testfahrt einmal um die Grenzen des Windparks herum mit permanenter Positionsbestimmung der Fahrtroute verifiziert.

Nutzung der Ausrüstung nach Errichtung

Die eingesetzte Ausrüstung wird üblicherweise zum Ende eines Projekts ohne konkrete Nutzung im Windpark belassen oder – falls entsprechender Bedarf in einem Folgeprojekt besteht – deinstalliert und an anderer Stelle wieder installiert. Jedoch möchte kein Projektleiter eines neuen Projekts riskieren, dass ein über zwei Jahre in rauer Umgebung genutztes technisches System für Störungen bei einer Neuinstallation verantwortlich gemacht wird. Da die Ausrüstung ihren ursprünglichen Dienst erfüllt hat, wird sie – auch aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Kosten – als abge-

schrieben betrachtet und tatsächlich abgeschrieben, obwohl sie weiterhin von erheblichem Nutzen sein könnte.

Dieser potenzielle Nutzen soll im Folgenden anhand zweier Szenarien erläutert werden.

Positionierungsservice für die Nordsee

Ein präziser Positionierungsdienst wie beispielsweise die an Land sowie in direkter Küstennähe betriebenen Satellitenpositionierungsdienste der deutschen Landesvermessungen (SAPOS) liefert innerhalb der von den GNSS-Referenzstationen eingeschlossenen Fläche einen derartigen Service. Seit vielen Jahren wird damit eine permanent verfügbare Wiederholungsgenauigkeit für eine Positionsbestimmung mit GNSS in der Größenordnung von <2 m in der horizontalen und <3 cm in der vertikalen Positionskomponente erreicht.

Wesentliche Komponenten eines solchen Positionierungsservices sind dafür geeignete geodätische GNSS-Empfänger und -Antennen, die heutzutage neben den Satellitensignalen des GPS auch die Signale von den Systemen GLONASS, Galileo

und BeiDou empfangen und für die gemeinschaftliche Berechnung einer Empfängerposition nutzen können. Die Orte der GNSS-Referenzstationen sollten dafür i.d.R. nicht weiter als 100 km voneinander entfernt liegen und ihre Daten über eine IP-Kommunikation an eine zentrale Software geliefert werden. Dort werden diese GNSS-Daten in Echtzeit für flächenhafte Korrekturmodelle verarbeitet. Daraus resultiert ein für jeden Ort der eingeschlossenen Fläche individueller Satz von Echtzeit-Korrekturen, die die systembedingten Fehler aus den Satellitensignalen (insbesondere die atmosphärischen Fehler) korrigieren und hochgenaue Positionen liefern können. In einem Gebiet von der Größe der Nordsee können heute auch größere Entfernungen zwischen den GNSS-Referenzstationen für ein flächendeckendes Netz mit zufriedenstellender Leistung sorgen.

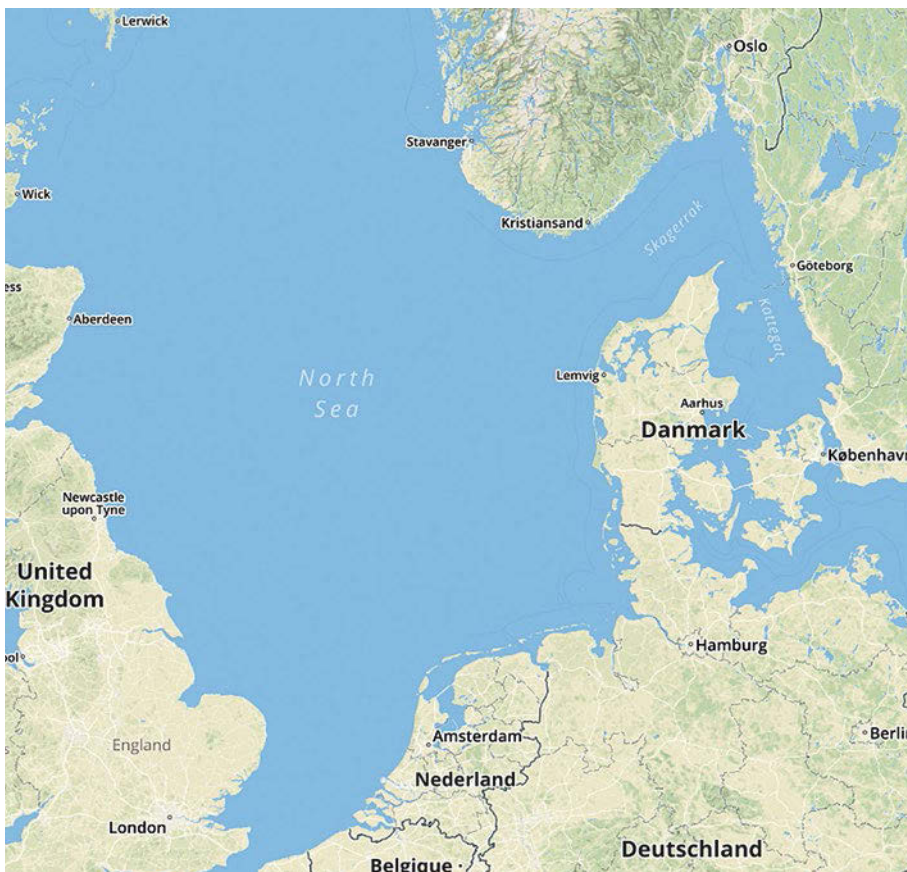
Zwar gibt es heute bereits Dienste, die echtzeitnahe GNSS-Korrekturen über Satelliten ausstrahlen (z.B. Omnistar, Veripos, Atlas), dies sind jedoch Dienste mit herstellerproprietären und verschlüsselten Formaten, die nicht von jedem Empfängertyp und nur mit Freischaltung einer Nutzungslizenz des jeweiligen Anbieters/GNSS-Herstellers entschlüsselt werden können und damit eine breite Anwendung erschweren. Die Vorteile des hier vorgeschlagenen Service liegen einerseits in den geringeren Kosten für die Nutzer, in der Homogenität und Genauigkeit der Koordinaten (einheitliches Bezugssystem) und in den Möglichkeiten eines Online-Supports für die Nutzer.

Für einen solchen Service sind drei wesentliche Dinge zu beachten:

- › Der Nutzer verfügt über einen GNSS-Empfänger, der die gleichen (nicht notwendigerweise alle) Satellitensignale empfängt wie die umgebenden Referenzstationen.

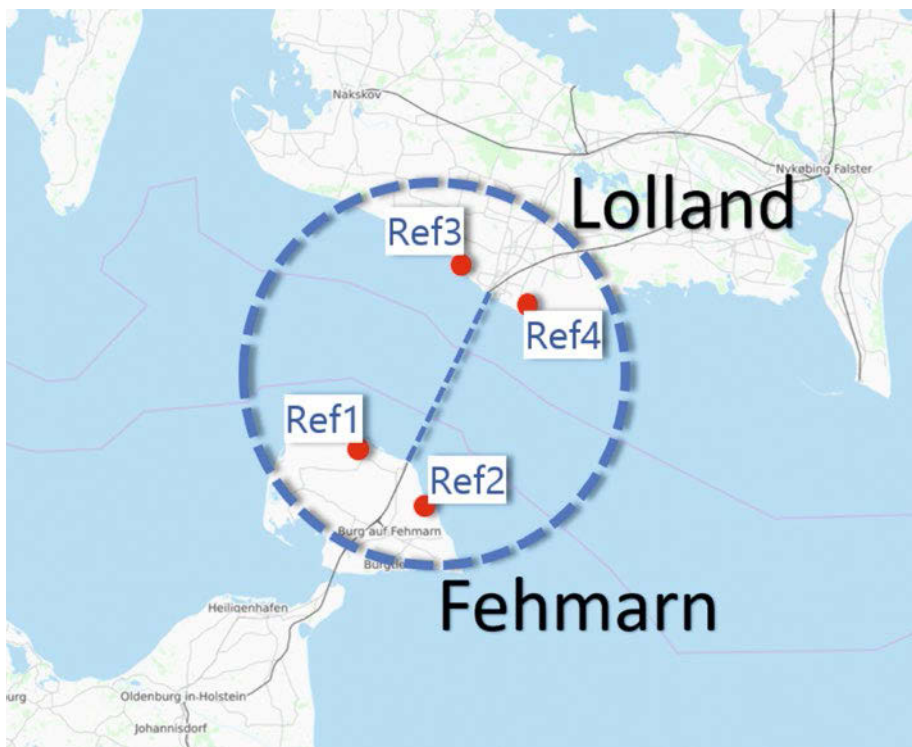
- › Im betrachteten Gebiet (hier: Nordsee) wird eine ausreichende Anzahl von GNSS-Referenzstationen permanent betrieben und via Internet (mit sehr niedrigen Datenraten) mit einem zentralen Rechner verbunden. Dazu genügen 15 bis 20 Stationen auf See und die gleiche Anzahl an Land, die jedoch an den Küsten der Anrainerstaaten existieren und deren Daten normalerweise frei zugänglich sind.

- › Es besteht mindestens eine Zwei-Wege Kommunikation zwischen der Zentrale und jeder einzelnen Referenzstation sowie mindestens eine einseitige Kommu-



Nordsee-Übersicht

Quelle: OpenStreetMap



Das Fehmarnbelt Positioning System (FBPS) seit 2009

Quelle: OpenStreetMap

nikation zwischen der Zentrale und jedem Nutzer.

Besteht die Möglichkeit, im Arbeitsgebiet eine Zwei-Wege-Kommunikation einzurichten (z.B. durch ein regionales WAN oder einen regionalen Mobilfunk), so wäre eine Online-Unterstützung der Nutzer bei Problemen aus einer Service-Zentrale möglich.

Unter diesen wenigen Voraussetzungen hat der temporäre Ausfall einer oder sogar mehrerer GNSS-Referenzstationen im Netz nahezu keine Auswirkung auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung, sofern noch ausreichend funktionsfähige GNSS-Referenzstationen ihre Daten an die Zentrale liefern.

Das Fehlen solcher Services im Gebiet der Nordsee hat drei wesentliche Gründe:

- › Es gab bisher zu wenige Nutzer in der Nordsee, die den Betrieb eines solchen Dienstes als wirtschaftlich sinnvoll erscheinen ließen.
- › Die wünschenswerte Zwei-Wege-Kommunikation ist im Gebiet der Nordsee nicht bzw. nur in direkter Küstennähe verfügbar.
- › Der Betrieb eines derartigen übernationalen Service scheitert an der fehlenden Flexibilität nationaler behördlicher Betreiber.

Die ersten beiden Punkte ändern sich jedoch vor allem durch die Nutzung der Nordsee und vergleichbarer Gebiete für die Erzeugung von Windenergie seit einigen Jahren drastisch.

Der dritte Punkt erfordert ein gemeinsames Verständnis der Windpark-Betreiber für den wirtschaftlichen Nutzen eines GNSS-Korrekturservice.

Folgende Aspekte müssen dafür angepasst werden:

- › Die für die Errichtung eines Windparks installierten GNSS-Referenzstationen sollten permanent weiterbetrieben werden und ihre Daten über das Internet an eine zentrale Stelle eines Service-Providers liefern.
- › In den jeweiligen Hauptnutzungsgebieten (also z.B. den Windparks) könnten lokale Zwei-Wege-Kommunikationseinrichtungen installiert werden, um die Gebiete mit einem Komplettservice zu versorgen.
- › Es sollte ein Service-Betreiber gefunden werden, der System und Nutzer betreut und nicht von staatlicher Seite finanziert werden muss. Durch vergleichsweise geringe Nutzungsgebühren kann sich ein solcher Service durch die Nutzer und Windpark-Betreiber re-finanzieren.

All dies dürfte im Zeitalter zunehmender Digitalisierung der Wirtschaft und der öffentlichen Verwaltungen (Stichwort:

Open Data-Strategie) kein unüberwindbares Problem darstellen.

Nutzen des Systems

Die oben genannten Aspekte hätten zur Folge, dass die Nutzer sich nicht mehr um das korrekte Koordinatensystem und eine korrekte Systemlagerung kümmern müssen, da dies über den Service der GNSS-Korrekturen geliefert wird. Weiterhin kommt es nur im Extremfall eines massiven Ausfalls multipler GNSS-Referenzstationen oder des Internets zu einer erheblichen Störung des Betriebs. In diesem Fall kann jedoch jede einzelne Referenzstation lokal ihre GNSS-Korrekturen in einem regional begrenzten Gebiet (Radius 20 bis 30 km) mit gleicher Genauigkeit ausstrahlen.

Bei unerwartetem Ausfall eines einzelnen Vertragspartners im Windpark-Betrieb kann jeder neue Dienstleister direkt an bereits geleistete Arbeiten anschließen, da Vermessungsdaten homogen und präzise für eine ganze Region gültig sind und das Wiederauffinden nach Koordinaten präzise möglich ist.

Am Beispiel eines lokalen Positionierungsservice für den Bau der Feste Fehmarnbelt-Querung (Fehmarnbelt Positioning System, kurz: FBPS) soll der multiple Nutzen eines GNSS-Referenznetzes erläutert werden.

Der Bauherr für die Feste Fehmarnbelt-Querung, die dänische Firma Femern AS, entschied sich mit Beginn der Erkundungsphase Mitte der 2000er Jahre, für dieses Großprojekt von Beginn an ein hochpräzises (1 cm Genauigkeit) und einheitliches Koordinaten- und Echtzeit-Positionierungssystem zu installieren. Dafür war höchste Systemverfügbarkeit oberstes Ziel, um für die dort benötigten teuren Spezialmaschinen dauerhaft zentimetergenaue Navigation und Positionierung sicherzustellen.

Da es sich in Projekten dieser Größenordnung um den koordinierten Einsatz von zahlreichen unterschiedlichen Dienstleistern handelt, sollte ein auf internationalen Standards basierender Dienst bereitgestellt werden.

Die Verwendung internationaler Standards bei GNSS-Korrekturen, Mobilfunk und Funk-Kommunikation sowie Koordinaten-(Referenz)-Systemen ermöglichen jedem Anwender, mit handelsüblichen geodätischen GNSS-Empfängern im selben Koordinatenbezug mit vergleichbarer hoher Genauigkeit zu arbeiten.

Dieser Service lief von der Inbetriebnahme 2009 bis zu seiner zeitweisen Stilllegung im Jahr 2016 (aufgrund von

Projektblockaden durch in Deutschland anhängige Klagen) völlig störungsfrei und soll 2021 mit Baubeginn auf dänischer Seite wieder aufgenommen werden. Dies kann weitgehend mit den bereits 2008 installierten Komponenten geschehen, die auch nach mehr als zehn Jahren seit erster Inbetriebnahme betriebsbereit diesen Service liefern können.

Eine weitere mögliche Anwendung auf Basis permanent installierter GNSS-Referenzstationen soll im Folgenden beschrieben werden.

Überwachung der Stabilität von Offshore-Windanlagen

Die Überwachung von Windenergie-Anlagen liegt typischerweise in den Händen der entsprechenden Hersteller. Zunehmend interessieren sich auch die Betreiber solcher Anlagen für die Monitoring-Thematik, da die Anlagen dann besonders effektiv und damit wirtschaftlich arbeiten, wenn sie störungsfrei möglichst lange und über die prognostizierte Lebensdauer hinaus wirtschaftlich Strom erzeugen.

Somit gilt es, jede mögliche Beeinträchtigung dieser Systeme, die zu einer Reduzierung des Wirkungsgrades der Anlage führen, frühzeitig zu erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Heute ist in Windkraftanlagen bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren im Einsatz, GNSS-Sensoren zählen jedoch bisher nicht dazu. Die für den Betrieb der Anlage elementaren Informationen wie das Azimutsystem für die optimale Ausrichtung der Gondel im Wind und hochfrequente Schwingungen der Gondel werden von Sensoren erfasst, die nur relative Messungen ermöglichen.

Abgesehen von einigen wenigen Pilotstudien mit dem Einsatz präziser geodätischer GNSS-Empfänger gibt es bisher kaum Erfahrungen mit kostengünstigen GNSS-Sensoren, die mit entsprechender Genauigkeit und Frequenz die Auslenkungen und Schwingungen einer WE-Anlage absolut erfassen können.

Inzwischen sind auch kostengünstige Ein-Frequenz-Empfänger in der Lage, solche Bewegungen in drei Positionskomponenten und mit Abtast-Frequenzen ≤ 10 Hz und mit einer Genauigkeit im Zentimeter-Bereich zu erfassen. Allerdings sind dafür einige Randbedingungen zu bedenken, die bisher nicht zufriedenstellend gelöst wurden:

› Die geeignete Montage von GNSS-Antennen – vorzugsweise in der Nähe der Gondel, die eine wenig gestörte Messung



GNSS-Monitoring von Windkraftanlagen

von GNSS-Signalen ermöglicht. Bei sich drehendem Rotor werden die GNSS-Signale regelmäßig und ständig durch die umlaufenden Rotoren unterbrochen und abgelenkt, was mit den bisher erprobten Verfahren nicht vermieden werden kann.

› Diese Störungen sollten minimiert werden, um kostengünstige Ein-Frequenzempfänger (Faktor 10 bis 100 gegenüber geodätischen Empfängern) nutzen zu können, da diese besonders empfindlich auf derartige Störungen reagieren und eine sichere Positionsbestimmung für den oben skizzierten Bedarf erschweren.

› Die bislang fehlende Möglichkeit, das Potenzial einer solchen Lösung an einer Pilotanlage zu erproben, da die Hersteller der Anlagen eine solche Studie nicht zulassen, solange diese im Rahmen einer Herstellergarantie betrieben werden.

› Die Überwachung einer einzelnen Anlage ist aufgrund der Betriebskosten für ein solches Monitoring (insbesondere für Installation und Betrieb einer geodätischen GNSS-Referenzstation) mit bisherigen Methoden wenig attraktiv.

Allerdings gibt es inzwischen erheblich wirtschaftlichere Ansätze. Hier kommen u.a. einige Aspekte der oben beschriebenen Nutzung einer geodätischen GNSS-Referenzstation in einem Windpark zum Tragen:

› Die Referenzstation in einem Offshore-Windpark erfüllt einen Mehrfachnutzen. Sie dient in erster Linie dem Aufbau und Betrieb eines Windparks und der Koordi-

nation bei der Installation aller dafür notwendigen Anlagen (sowohl oberhalb als auch unterhalb der Wasseroberfläche).

› Die Referenzstation liefert durch ihre Messdaten nebenbei einen wichtigen Beitrag für ein großflächiges GNSS-Referenznetz für multiple und zahlenmäßig unbeschränkte Positionierungs- und Vermessungsaufgaben.

› Die Referenzstation liefert im lokalen Rahmen eines Windparks hochpräzise Korrekturen für Ein-Frequenzempfänger, die exemplarisch an einigen wenigen WE-Anlagen oder flächendeckend an jeder Anlage eines Windparks installiert sein können und permanent das Bewegungsverhalten der Gondel in drei Dimensionen relativ zur Referenzstation im 3D-Raum beschreiben.

Insbesondere unter den zum Teil hohen Wind- und Wellenlasten in der Nordsee können derartige Bewegungszeitreihen ohne größeren Wartungsaufwand wertvolle Hinweise über das reale Verhalten und den wirtschaftlichen Betrieb einer WE-Anlage über lange Zeiträume liefern. Dies dürfte bei den zunehmend ins Gespräch kommenden schwimmenden Anlagen von besonderem Interesse sein.

Zusammenfassung und Ausblick

Aus den Erfahrungen mit präziser Positionierung mittels GNSS-Referenzstationen auf hoher See werden einige Möglichkeiten dieser Technologie skizziert, die bisher nur in geringem Maß offshore genutzt werden. Die hier beschriebenen Technologien sind heute Stand der Technik und lassen sich modular und skaliert installieren und nutzen. Dabei werden in diesem Beitrag nur wenige der heute denkbaren Prozesse der Georeferenzierung und Digitalisierung auf See angesprochen. Die Bereitstellung eines GNSS-Referenznetzes auf privat-wirtschaftlicher Basis kann einen deutlich breiteren Nutzen ermöglichen als in den beschriebenen Beispielen vorgestellt.

Literaturhinweise/Referenzen

Jensen, A., Hermsmeyer, D., Huck, B., Ruffer, J., Skellerup, P.: 20 Kilometers, Heavy Construction – World's Longest Immersed Tunnel, 40 Meters Underwater, GPS World 5/2011
Hermsmeyer, D., Jensen, A., Huck, B., Skellerup, P., Ruffer, J.: Positionierungssystem für die feste Fehmarnbeltquerung, VDVmagazin 3/2011
Schulz, M., Ruffer, J.: Präzise Positionierung und Monitoring, Schiff&Hafen 12/2013
Unternehmens-Referenzen: www.allsat.de; www.geopp.de

Die Autoren:
Jürgen Ruffer und Michael Schulz,
Geschäftsführer, Allsat GmbH, Hannover;
Dr. Gerhard Wübbena, Geschäftsführer,
Geo++ GmbH, Garbsen