

# Erfolgskontrollbericht

FKZ: 03EI4037A

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2021 - 31.08.2025

## Vorhabenbezeichnung

Verbundvorhaben: OffWiPP - Offshore Windparks als Kraftwerke; Teilvorhaben: Systemanforderungen an und Regelungsstrategien für netzbildende HGÜ-Umrichter

### 1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, auch zwecks Evaluierung von Förderprogrammen/-schwerpunkten/-konzepten

Um die energiepolitischen Ziele der Bundesrepublik Deutschland zu erreichen, steigt die Anzahl der, über Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) angeschlossenen Offshore-Windparks. Bei gleichzeitiger Verringerung der konventionellen Kraftwerke, gibt es zukünftig vermeintlich einen ungedeckten Bedarf an Momentanreserve, Primär- und Sekundärregelleistung. In der Folge müssen andere netzgekoppelte Anlagen diese Systemdienstleistungen übernehmen, um einen sicheren und stabilen Netzbetrieb bei hoher Durchdringung leistungselektronisch gekoppelter Erzeuger zu ermöglichen.

Im Rahmen des Projekts "Offshore Windparks als Kraftwerke" wurden spannungseinprägende Regelungen untersucht, die in HGÜ-Umrichtern sowie in Offshore-Windenergieanlagen (WEA) implementiert werden können. Nur die Nachbildung einer Spannungsquelle hinter einer Impedanz ermöglicht die Nachbildung konventioneller Kraftwerke, insbesondere die Nachbildung der dort rotierenden Synchronmaschinen.

Im Rahmen der Fördermaßnahme "Anwendungsorientierte nichtnukleare Forschung und Entwicklung" hat dieses Projekt einen erheblichen Beitrag geleistet, um leistungselektronisch gekoppelte Erzeuger im Netz weiter zu verstärken. Durch die spannungseinprägende Regelung und die HGÜ-Betriebsführungsstrategien dieses Projekts sind Offshore-Windparks in der Lage, Systemdienstleistungen zu erbringen und damit einen Beitrag zur Verbundnetzstabilität zu leisten.

### 2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens im Vergleich zu den ursprünglichen Zielen, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen

Im Wesentlichen wurde das Verständnis für spannungsführende Regelungen während des Projekts ausgebaut. Für die Nachbildung von Synchronmaschinen müssen sich Umrichter wie eine Spannungsquelle verhalten. Dafür wurde eine Literaturrecherche zum Stand der Technik spannungseinprägender Regelungen durchgeführt. Ausgehend von Kompetenzen in der Regelung netzseitiger Umrichter wurde das erworbene Wissen evaluiert, um eine Verzusvariante der spannungseinprägenden Regelung zu erarbeiten. Dies ist erfolgt.

Dabei wurden sowohl äußere netzbildende Regelschleifen intensiv untersucht. Diese beschreiben das elektromechanische Verhalten eines Synchrongenerators. Die aus leistungselektronischer Sicht relevanten Regelschleifen sind die inneren netzbildenden Regelschleifen. Diese beeinflussen maßgeblich das dynamische, transiente Verhalten des Umrichters. Außerdem wird mit ihnen die Strombegrenzung des Umrichters vorgenommen.

Darüber hinaus liegt eine wesentliche Errungenschaft in der Erstellung generischer Modelle für MMCs und WEA; insbesondere sind die WEA hervorzuheben. Durch die Modellierung des mechanischen Teils der WEA lassen sich die Simulationen deutlich besser interpretieren, da das vereinfachte 1- oder 2-Massenschwingermodell Rückschlüsse auf die Auswirkungen auf die Mechanik der WEA zulässt. Es ist insbesondere deshalb wichtig, weil bei der Erbringung von Systemdienstleistungen im Gesamtsystem zusätzliche Energie von einem Teilnehmer bereitgestellt werden muss.

Die Erforschung, Entwicklung und simulative Erprobung der HGÜ-Betriebsführungsstrategie zählen zu den wesentlichen Ergebnissen dieses Projekts. Durch die geänderte DC-seitige MMC-HGÜ-Link-Regelung ist es möglich, ein intrinsisches Reglerverhalten einzuführen, das ausschließlich elektrische Signale zur Kommunikation nutzt und Onshore-Netzereignisse an die Offshore-WEA überträgt.

Diese entwickelte Betriebsführungsstrategie wurde simulativ intensiv erprobt, um zu überprüfen, ob die Dynamik der Onshore-Leistungseinspeisung das Gesamtsystem nicht überfordert und möglicherweise instabil werden lässt. Es ist gelungen, durch die Betriebsführungsstrategie eine zusätzliche Installation von Energiespeichern überflüssig zu machen. Die implementierten Regelungen machen einen solchen Energiespeicher obsolet.

Darüber hinaus wurden Untersuchungen zur Reduktion oder Vermeidung des Onshore-Bremstellers durchgeführt, die ergaben, dass der Onshore-Bremsteller für seine Hauptaufgabe – das Durchfahren von Onshore-Netzfehlern – durch die entwickelten Betriebsführungsstrategien vermieden werden kann. Bei weiteren Netzereignissen wie z.B. Frequenzgradienten ist eine Vermeidung sehr wahrscheinlich nicht möglich. Die Leistungsrückspeisung in das Offshore-Netz muss vermieden werden. Ein positiver Frequenzgradient könnte den Onshore-MMC dazu veranlassen. In diesem Fall wäre ein Onshore-Bremsteller weiterhin unerlässlich.

### 3. Fortschreibung des Verwertungsplans.

#### **3a. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom AN oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten**

\*\*\* nicht zutreffend \*\*\*

#### **3b. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/ industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien**

Seitens der Universität Rostock nicht zutreffend.

#### **3c. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für weitere öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen**

Die Verwertung der wissenschaftlichen Erkenntnisse seitens der Universität Rostock erfolgt durch Veröffentlichungen auf Fachkonferenzen während der Projektlaufzeit und darüber hinaus. Die Erkenntnisse des Projektes werden im Rahmen der universitären Lehrveranstaltungen genutzt, um Generationen zukünftiger Experten auszubilden. Damit tragen die Forschungsergebnisse zur Ausbildung hochqualifizierter Fachkräfte bei.

Neben den Konferenzbeiträgen erfolgt die Verwertung in zwei Promotionen.

Darüber hinaus werden die konstruierten Prüfstände in der universitären Lehre und für zukünftige Forschungsvorhaben genutzt, so dass eine nachhaltige Verwertung gewährleistet ist.

#### **3d. wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte**

Das BMW-Forschungsvorhaben "OffshoreWindparks als Kraftwerke" bildet die Basis für die weitere Forschung der Universität Rostock im Bereich der Regelung von Offshore-Windparks, MMCs und HGÜ-Verbindungen. Ein anschließendes Folgeprojekt gibt es nicht; die Universität Rostock treibt jedoch die Erforschung von HGÜ-Verbindungen, insbesondere Bipol- und MTDC-Verbindungen, am Institut weiter voran.

### 4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Aufgrund personeller Engpässe während der gesamten Laufzeit des Projekts fanden Arbeiten zu keinem Ergebnis.

Die experimentelle Erprobung der spannungseinprägenden Regelungen im Labormaßstab konnte nur teilweise durchgeführt werden. Zudem war der vorhandene MMC für die Erprobung im

Labormaßstab vorgesehen. Wie sich im Laufe der Projektbearbeitung herausgestellt hat, ist der MMC final nicht lauffähig und kann daher nicht für die Erprobung verwendet werden. Im Konsortium wurde diese Entscheidung einstimmig mitgetragen, da auch die Nachbildung über die beschafften Echtzeitsimulationsrechner und den Netzemulator die Komplexität des Gesamtsystems nicht hätte widerspiegeln können.

Die simulative Untersuchung industrieller Umrichterregelungen und deren Ertüchtigung wurde nicht durchgeführt. Während der Projektlaufzeit gab es keine spannungseinprägende industrielle Umrichterregelung, sodass nur stromeinprägende Umrichterregelungen verwendet werden könnten. Zwischen strom- und spannungseinprägend geregelten Umrichtern besteht ein grundlegender Unterschied, der bereits vor der Bearbeitung allen Teilnehmern im Konsortium klar war. Folglich hat sich das Konsortium darauf geeinigt, die AP nicht zu bearbeiten.

Abschließend wurde die AC-seitige Vermaschung der Offshore-Windparks nicht behandelt. Aufgrund der hohen Relevanz und des zusätzlichen simulativen Aufwands wurden personelle Ressourcen für die Simulationen und Untersuchungen des Gesamtsystems eingesetzt. Auch diese Entscheidung wurde einstimmig im Konsortium beschlossen.

## **5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen**

Ergebnisse des Vorhabens wurden bereits in folgenden Veröffentlichungen und Konferenzen der Öffentlichkeit präsentiert:

•M. Hildebrandt, C. Neumann, N. Hammes and H.-G. Eckel, "A Comparative Study for an Overall Grid-Forming System of HVDC and Offshore Wind Farm to Emulate Conventional Power Plants," Transformation der Stromversorgung – Netzregelung und Systemführung; 15.

ETG/GMA-Fachtagung, Netzregelung und Systemführung“, Munich, Germany, 2024, pp. 49-55.

•C. Neumann and H.-G. Eckel, "Grid-forming control and operational strategies for offshore wind turbines incorporating electrical and mechanical modelling," 23rd Wind & Solar Integration Workshop (WISO 2024), Hybrid Conference, Helsinki, Finland, 2024, pp. 477-484, doi: 10.1049/icp.2024.3834.

•M. Hildebrandt, C. Neumann, N. Hammes, M. Schütt and H.-G. Eckel, "Control of an MMC-based HVDC link for offshore wind farms to enable reliable ancillary service provision via wind turbines," 23rd Wind & Solar Integration Workshop (WISO 2024), Helsinki, Finland, 2024, pp. 263-273, doi: 10.1049/icp.2024.3798.

•M. Hildebrandt, H. Westphal, C. Neumann, M. Schütt and H.-G. Eckel, "Inner Grid-Forming Control Loops – Considerations for Physically Meaningful Controls," ETG Kongress 2025; Voller Energie – heute und morgen., Kassel, Germany, 2025, pp. 246-253.

•M. Hildebrandt, C. Neumann, M. Schütt and H.-G. Eckel, "Inner Grid-Forming Control Loops - Comparative Analysis of the Disturbance Response Behavior," 2025 Energy Conversion Congress & Expo Europe (ECCE Europe), Birmingham, United Kingdom, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ECCE-Europe62795.2025.11238634.

•C. Neumann and H.-G. Eckel, "Observer-Based Virtual Impedance Modelling for Enhanced Fault Current Limitation in Converters with Grid-Forming Open-Loop Voltage Control," 24th Wind & Solar Integration Workshop (WISO25), Berlin, Germany, 2025.

•M. Hildebrandt, C. Neumann and H.-G. Eckel, "Energy-Based Sensitivity Analysis of HVDC Control on Offshore Wind Turbine Response Within an Overall Grid-Forming System," 24th Wind & Solar Integration Workshop (WISO25), Berlin, Germany, 2025.

## **6. Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung**

Das Vorhaben wurde für den Zeitraum vom 01.09.2021 bis zum 31.08.2025 bewilligt und konnte auch in diesem Zeitraum plangemäß abgeschlossen werden.

Für die Einhaltung der Kostenplanung wird auf den kommerziellen Verwendungsnachweis der Universität Rostock (Zahlenmäßiger Nachweis gem. Nr. 19.3 NKBF 98) verwiesen.