Windbedingungen verstehen, um Turbinen schonend und systemdienlich zu betreiben

Systemdienliche Integration von Offshore-Windenergieanlagen

Windgeschwindigkeiten fluktuieren auf Skalen von Sekunden bis hin zu Stunden und darüber hinaus und führen so zu schwankenden Stromeinspeisungen und Lastspitzen an Windenergieanlagen. Die Windbedingungen in den großen Höhen moderner Turbinen oder in der Mitte eines Windparks lassen sich derzeit kaum vorhersagen und werden im Reallabor 70 GW mithilfe umfangreicher Offshore-Messungen erfasst und im Windkanal nachgestellt. Auf dieser Basis werden Leistung und Lasten von Windenergieanlagen analysiert, um geschickte systemdienliche Regelungskonzepte zu entwickeln. Diese haben das Ziel, die Steuerung der Turbinen nicht nur an die aktuellen Windbedingungen, sondern auch an den aktuellen Strombedarf anzupassen. Die Übertragungsnetze könnten so direkt von der Energieerzeugung her stabilisiert werden.

- **Die anvisierten Ausbauziele der Offshore Windenergie in der Nordsee sind herausfordernd.**
- **Der geplante Leistungsertrag pro Meeresfläche wäre der weltweit Höchste.**

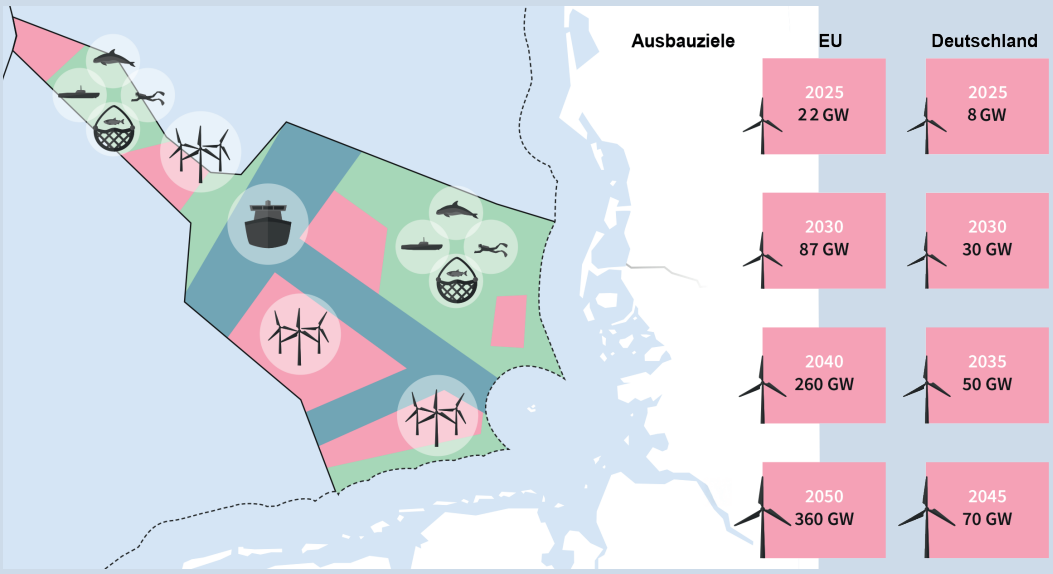
▸ Ausbau der Offshore Windenergie in der Nordsee: Um bis 2045 das Ziel von 70 GW Offshore-Wind zu erreichen, braucht es innovative Lösungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Im Reallabor wird erforscht, wie bestehende und zukünftige Windparks nachhaltig geplant und betrieben werden können und wie der maritime Raum optimal genutzt werden kann – unter Berücksichtigung konkurrierender Interessen wie z.B. Fischerei, Schifffahrt und Naturschutz.

▸ Windenergieanlagen wurden mit jeder Generation größer, was strukturelle und aerodynamische Herausforderungen mit sich bringt. Hinzu kommen Abschattungseffekte zwischen einzelnen Turbinen und ganzen Windparks. Wetterbedingungen wie Stürme, hohe Wellen und Eisbildung können die Anlagen beeinträchtigen und erfordern innovative Regelungskonzepte. Windschwankungen und Nachlaufeffekte wirken sich direkt auf das Stromnetz aus. Deshalb müssen diese zunehmend bei der Bereitstellung von Systemdienstleistungen und für die Netzstabilität berücksichtigt werden.

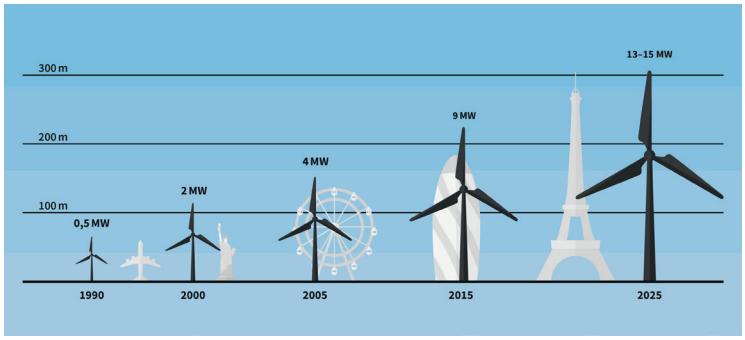
Windparks in der Deutschen Bucht

Die farblich markierten Flächen in der Nordsee skizzieren unterschiedliche Meeresnutzungen, wie z.B. Naturschutz, Fischerei und Schiffahrt. Die roten Flächen kommen für die Energiegewinnung durch Windenergie bis zum Jahr 2045 in Betracht.

Rechts ist der schrittweiser Ausbau der Offshore Windenergie hin zum grünen Kraftwerk Europas dargestellt.



- **Offshore Windenergieanlagen sind in der Vergangenheit aus wirtschaftlichen Gründen mit jeder Turbinengeneration größer geworden.**
- **Fluktuierende Windgeschwindigkeiten führen zu schwankender Stromerzeugung.**



▸ Offshore-Windenergie trägt zunehmend zur Stromerzeugung bei, wobei sich die Anlagengröße in den letzten 25 Jahren nahezu verdreifacht hat. Moderne Anlagen erreichen eine Höhe von über 300m, wodurch Offshore Windenergie trotz rauer Umgebungsbedingungen mittlerweile wirtschaftlich geworden ist. Die Planung von Offshore Windparks ist komplex und reicht von der langfristigen Freigabe von Meeresflächen für Windparks über die Einhaltung von Umwelt- und Naturschutzauflagen bis zur Schaffung von Infrastrukturen auf See und an Land.
▸ Die fluktuierenden Winde, Extremwetter und variable Netzeinspeisung erschweren die Systemintegration. Zudem erfordern höhere Windenergieanlagen bei dichterer Bauweise neue Simulationsmodelle, welche speziell die veränderten Strömungsbedingungen und Lasten abbilden zu können.

- **Die Schwankungen der Stromeinspeisungen können durch geschickte Regelungen von Windparks reduziert werden.**

▸ Damit die Netzstabilität gewährleisten wird, muss die aus dem Wind entnommene Leistung an den aktuellen Leistungsbedarf vom Netz angepasst werden. Um dies zu ermöglichen werden Regelungskonzepte benötigt, welche sowohl die elektrische Leistungsbilanz berücksichtigen, als auch aerodynamische Einflüsse. Hierzu werden aerodynamische Veränderungen und Vorhersagen benötigt, welche die Leistungsänderungen von Windereignissen beschreiben.

- **Die Anforderungen an das Design und den Betrieb von modernen Offshore Windenergieanlagen sind vielfältig.**

▸ Durch verbesserte Windprognosen sowie eine systemdienliche d.h. an den Bedarf angepasste Regelung der Windenergieanlagen könnten kurzfristig Fluktuationen auf der Skala von Sekunden bis hin zu Stunden stark reduziert und die Netzstabilität maßgeblich verbessert werden. Die Regelung der Anlagen bestimmt auch die auftretenden Lasten und kann Abschattungseffekte minimieren. Derzeit bestehen jedoch noch Wissenslücken über die herrschenden Windverhältnisse in den großen Höhen der moderne Windenergieanlagen und über die komplexen Wechselwirkungen innerhalb eines Windparks, über die dadurch erzeugten Lasten auf die Turbinen und die resultierenden Leistungsfluktuationen.

- **Umfangreiche Offshore-Messungen erzeugen eine einmalige Datenbasis.**
- **Laboruntersuchungen und Simulationen erlauben die systematische Entwicklung von Innovationen.**

▸ Das Reallabor 70 GW Offshore Wind wird in groß angelegten Offshore-Messkampagnen in bestehenden Windparks die bisher größte Datenbasis erheben, um den Status quo in Bezug auf Windfelder, Turbinendaten und Meeresströmungen zu erfassen. Die ermittelten Windfelder und Turbinendaten werden anschließend in Modelle eingearbeitet und in Laborexperimenten (z.B. Windkanal) nachgestellt. Ziel ist die Erforschung und damit eine deutlich verbesserte Prognose der komplexen Strömungsbedingungen und Turbinenlasten, sowie die darauf aufbauende Entwicklung eines Regelungskonzeptes.

Impressum: Diese Veröffentlichung ist im Rahmen des Forschungsprogramms „Transformation des Energiesystems Niedersachsen“ (TEN.efzn) am Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn) entstanden. Gefördert mit Mitteln aus zukunft.niedersachsen, dem gemeinsamen Wissenschaftsförderprogramm des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur und der VolkswagenStiftung.
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg - ForWind: Prof. Dr. Kerstin Avila (kerstin.avila@uni-oldenburg.de), Prof. Dr. Martin Kühn (martin.kuehn@uni-oldenburg.de), Dr. Andreas Rott (andreas.rott@uni-oldenburg.de), Dr. Michael Hölling (michael.hoelling@uni-oldenburg.de), Dr. Marvin Kaufmann, Dr. Matthias Wächter, Dr. Vlaho Petrović (vlaho.petrovic@uni-oldenburg.de), Julian Jüchter, Jannis Maus, Martin Wagner
Leibniz Universität Hannover - ForWind: Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann (hofmann@ifes.uni-hannover.de), Dr.-Ing. Thomas Leveringhaus (leveringhaus@ifes.uni-hannover.de), Jonas Hillmann-Apmann
Fraunhofer IWES: Dr. Martin Dörenkämper (martin.doerenkaemper@iwes.fraunhofer.de)
Gestaltung: Manuel Siebert (manuel.siebert@uni-oldenburg.de), Oldenburg, Oktober 2025

efzn

zukunft. niedersachsen

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0). © 2025 Reallabor 70 GW Offshore Wind – CC BY 4.0