

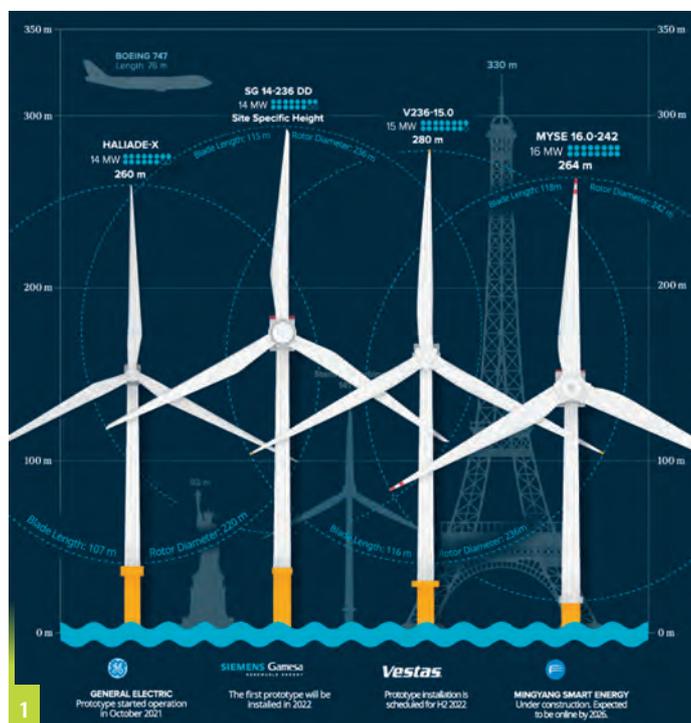
# Zur Realisierung von Mega-Windturbinen auf See

Sonderforschungsbereich entwickelt digitalen Zwilling

## OFFSHORE MEGASTRUKTUREN



In Anbetracht der Herausforderungen durch den menschengemachten Klimawandel und die geopolitisch bedingte Volatilität der Verfügbarkeit fossiler Energien werden sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene große Anstrengungen zur Dekarbonisierung der Energieerzeugung und europäischen Vernetzung der Versorgungssicherheit ergriffen. Im Rahmen der deutschen Energiewende und des Green Deal der Europäischen Kommission soll ein wesentlicher Anteil der zukünftigen Stromversorgung durch die Windenergie abgedeckt werden, insbesondere durch auf See erzeugten Strom. Um den benötigten Ausbau der Stromerzeugungskapazitäten zu realisieren, sind größere und leistungstärkere Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) notwendig als die aktuell errichteten. Solche Offshore-Megastrukturen sind effizienter bei der Stromerzeugung und somit wirtschaftlicher als heutige kleinere Anlagen, sodass die Entwicklung bereits seit vielen Jahren in Richtung größerer Anlagen geht. Lagen noch vor dreißig Jahren typische Turbinenleistungen von Windenergieanlagen an Land (onshore) bei 0,6 MW und einem Rotordurchmesser von 40 Meter, so sind diese Werte beim 2021 installierten Prototypen einer Offshore-Anlage von General Electric auf 14 MW und 220 Meter angewachsen (*Haliade-X*). Dabei erreicht ein einzel-



nes Rotorblatt eine Länge von 107 Meter und die Blattspitze eine Höhe von 260 Meter über dem Meeresspiegel. Im Laufe des Jahres 2022 werden noch größere Offshore-Turbinen von Siemens Gamesa (*SG 14-236 DD*) und Vestas (*V236-15.0*) installiert und der chinesische Hersteller Mingyang Smart Energy hat bereits die Installation einer 16 MW-Turbine für das Jahr 2026 angekündigt (*MYSE 16.0-242*).

Der Zukunftstrend zeigt in Richtung noch größerer Anlagen mit 20 bis 30 MW Leistung und darüber hinaus. Die heutigen Entwurfswerkzeuge

und Konstruktionsprinzipien nähern sich allerdings bereits den Grenzen ihrer Möglichkeiten, sodass der technischen wie wirtschaftlichen Realisierung zukünftiger, noch deutlich größerer Anlagen zurzeit noch unbeantwortete Fragen hinsichtlich Auslegungsrandbedingungen, Entwurfsprinzipien, Regelung und Strukturüberwachung gegenüberstehen. Der seit seinem Projektstart im Januar 2021 durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Sonderforschungsbereich *SFB 1463 Offshore-Megastrukturen* adressiert genau diese Herausforderungen an ein weite-

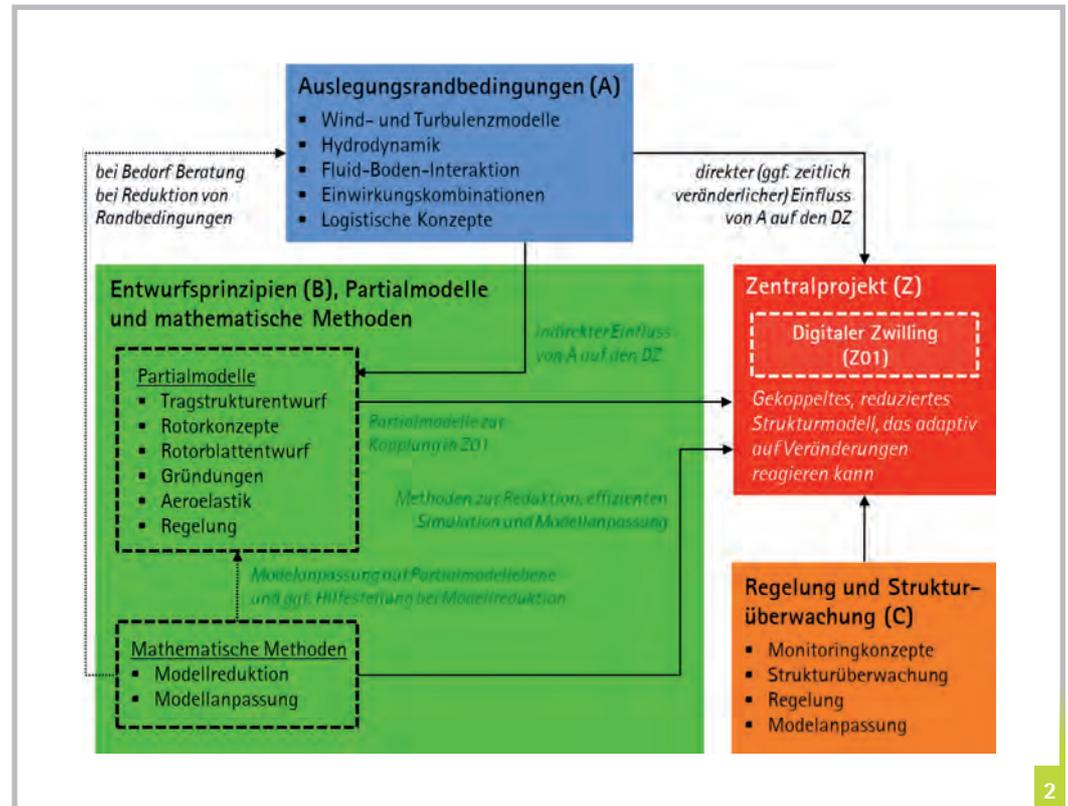
Abbildung 1  
Die größten Windturbinen  
der Welt, Stand 2022  
Quelle: VS Elements

res Größenwachstum von Windenergieanlagen auf See. Unter der Projektleitung von Prof. Raimund Rolfes (Institut für Statik und Dynamik) arbeiten Forscher standortübergreifend und multidisziplinär zusammen, darunter mehrere Mitglieder von *ForWind* – dem gemeinsamen Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen (siehe Infobox). Die physikalischen, konzeptionellen und methodischen Grundlagen für die integrierte Entwurfs- und Betriebsmethodik werden in Teilprojekten untersucht und anhand des „**Digitalen Zwillinges**“ – eines über alle Lebensphasen der Anlage hinweg lernenden digitalen Abbilds einer Offshore-Windenergieanlage – zusammengeführt. Die Herangehensweise im Projekt ist modular und gleichzeitig miteinander vernetzt und betrachtet dabei ganzheitlich Entwurf, Installation, Betrieb und Rückbau der Megastruktur.

Die Vision des SFB 1463 ist es, mithilfe des Konzepts des Digitalen Zwillinges eine integrierte Entwurfs- und Betriebsmethodik für Offshore-Megastrukturen zu entwickeln und an einem Demonstrationsbeispiel einer Offshore-Windenergieanlage mit einer Leistung von mehr als 20 MW mit Fokus auf Tragstruktur und Rotorblätter umzusetzen. In der **ersten Förderperiode des SFB** (2021 bis 24) liegt der Fokus auf der Konzept- und Methodenentwicklung und dem Entwurf der großen Strukturkomponenten und relevanter Kopplungseffekte. Die umfassende Verifizierung und Validierung dieser Methoden soll in der **zweiten Förderperiode** (2025 bis 28) erfolgen. In der abschließenden **dritten Förderperiode** (2029 bis 32) soll der Schwerpunkt in der Erforschung der Interaktion der einzelnen Konzepte und Methoden im Gesamtsystem liegen. Daher liegt in

der ersten Förderperiode der Fokus auf den Auslegungsrandbedingungen, während Fragen hinsichtlich Fertigung, Materialien und Rückbau ebenso wie eine noch weitergehende Betrachtung der Regelung und Strukturüberwachung in den möglichen späteren Förderperioden behandelt werden sollen.

Offshore-Megastrukturen. Da die Einflüsse und Wechselwirkungen der an den Prozessen beteiligten Parametern vielfach unbekannt sind, erfolgt zunächst eine umfassende Modellierung aufgrund von Mess- und Simulationszeitreihen sowie experimenteller Versuche. Für eine Integration dieser Modelle in



Im Projektbereich **Auslegungsrandbedingungen (A)** konzentrieren sich die Untersuchungen auf bisher nicht oder unzureichend erforschte Auslegungs- und Installationsrandbedingungen. Die deutliche Zunahme der Abmessungen gegenüber vergleichbaren bestehenden Strukturen, komplexe aeroelastische, hydrodynamische und bodenmorphologische Wechselwirkungen untereinander sowie mit der zunehmend flexiblen Tragstruktur, erfordern ein vertieftes Verständnis bisher unerforschter Prozesse und ihrer Ursachen in den Randbedingungen von

einen echtzeitfähigen Digitalen Zwilling ist in einem nächsten Schritt eine Vereinfachung der wirklichkeitsnahen komplexen Partialmodelle geplant, wobei die wichtigsten zuvor identifizierten Effekte trotz der Vereinfachung erhalten bleiben. Dabei ist die Modellierung der Interaktion von Auslegungsrandbedingungen untereinander, des Zusammenspiels von Auslegungs- und Installationsrandbedingungen sowie der Kopplung mit reaktiven und dynamischen OWEA essentiell für eine ganzheitliche Entwurfs- und Betriebsmethodik.

Abbildung 2 Anbindung der Projektbereiche A – C an den Digitalen Zwilling (Z01)  
Quelle: SFB 1463

Im Projektbereich **Entwurfsprinzipien (B)** stehen integrierte Entwurfsprinzipien für zukünftige Offshore-Megastrukturen und deren Komponenten sowie die Interaktion von Komponenten der Megastruktur und ihrer Umgebung im Vordergrund. Die Integration der untersuchten Auslegungsrandbedingungen hat hierbei ebenso wie die Modellreduktion eine besondere methodische Bedeutung. Die Modellreduktion ist entscheidend für ganzheitliche Entwürfe im frühen Entwurfsprozess, wo keine detaillierten strukturmechanischen Modelle vorliegen. Die innerhalb von Offshore-Windparks auftretenden aerodynamischen Interaktionen werden zunächst in den Lastannahmen der Offshore-Megastrukturen vereinfacht berücksichtigt.

Die Verknüpfung zwischen realer Struktur und Digitalem Zwilling ist existenziell für die Thematik des Sonderforschungsbereichs. Hierzu sind präzise und robuste Monitoringkonzepte und geeignete Modellanpassungsverfahren erforderlich. Diese Konzepte und Verfahren werden mit Hilfe konventioneller und bereits erprobter Messtechnik und Sensorik umgesetzt. Der geplante Fokus vom Projekt-

bereich **Regelung und Strukturüberwachung (C)** ist die Untersuchung der Verknüpfung des Realen Zwillings mit dem Digitalen Zwilling, wobei ein Realer Zwilling allerdings erst in zukünftigen industriellen Anwendungen existieren wird. Dabei wird der Ausfall und die zeitliche Änderung von Sensorsignalen über die Lebensdauer bei gleichzeitig zunehmender Kenntnis des Strukturverhaltens, die Schadensdetektion und -lokalisierung und die intelligente und adaptive Regelung von Offshore-Megastrukturen betrachtet.

Die Partialmodelle aus den Projektbereichen A bis C werden im **Teilprojekt Digitaler Zwilling einer Windenergieanlage (Z01)** in einem reduzierten Gesamtmodell zusammengeführt. Der zentrale Schwerpunkt ist die Erforschung und Weiterentwicklung von Kopplungsmethoden, die in der Lage sind, mit unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Diskretisierungen umzugehen. Innerhalb von zwei Jahren soll ein echtzeitfähiger initialer Digitaler Zwilling für eine OWEA mit mehr als 20 MW entwickelt werden, der aber noch nicht die Beiträge aus allen Teilprojekten enthält. Am Ende der ersten Förderperiode

nach vier Jahren soll der Digitale Zwilling als Gesamtmodell einer Offshore-Megastruktur für Vorauslegungen und Lastrechnungen wie auch für Regelungsprozesse und Optimierungsvorgänge zur Verfügung stehen. Dieses Modell soll in dem Sinne echtzeitfähig sein, dass alle eingehenden Mess- und Simulationsdaten, die vom Realen Zwilling generiert werden, zeitlich und räumlich erfasst werden können.

Die beteiligten Institutionen haben eine weltweit einzigartige Forschungsinfrastruktur, auf die der Sonderforschungsbereich in unterschiedlichen Teilprojekten zurückgreifen kann. Hierzu gehören das Testzentrum für Tragstrukturen Hannover (TTH) und der Große Wellenkanal (GWK+) am Forschungscampus Hannover-Marienwerder sowie das Forschungslabor für Turbulenz und Windenergiesysteme (WindLab) in Oldenburg.

**Prof. Dr.-Ing. habil.  
Raimund Rolfes  
Dr.-Ing. Clemens Hübler  
Dipl.-Ing. Andreas Ehrmann**

→ Infos und Kontaktdaten  
ab Seite 68