



HART AM WIND CAUGHT IN THE WIND

TEXT Christoph Karcher

Das Projekt X-Wakes untersucht Turbulenzen riesiger Offshore-Windparks. Dazu steuern Tübinger Forscher unbemannte Messflugzeuge in den Wind über der Nordsee.

Project X-Wakes measures turbulence from huge offshore wind farms using unmanned aircraft above the North Sea operated by researchers from the University of Tübingen.

DE Auf den ersten Blick wirkt das windschnittige Gerät wie ein frisierendes ferngesteuertes Modellflugzeug. Tatsächlich ist das orange-weiße Objekt mit rund drei Metern Flügelspannweite, einem Propeller am Heck und vier Rotoren oben eine Hightech-Apparatur, voll mit hochauflösender Messtechnik und mit einer wichtigen Mission: Daten sammeln für die Energiewende.

Das unbemannte Flugzeug, das ein Team in gelben Warnwesten an diesem sonnigen Frühherbsttag auf Helgoland startklar macht, ist ein sogenanntes Automatically Operating Unmanned Aircraft System, kurz UAS. Das UAS steht unter der Obhut von Ines Weber, Tübinger Doktorandin der Umweltphysik und Pilotin – also bestens qualifiziert für Flugeinsätze im Dienst der Forschung. Der Flieger auf Helgoland startet für das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Projekt X-Wakes (siehe Infobox). Mehrere Forschungsgruppen untersuchen in diesem, wie großflächige Windparks die Windbedingungen in der Deutschen Bucht vor den friesischen Küsten verändern: Denn Windräder nutzen nicht nur Wind, sondern sie verursachen und verändern auch selbst Luftbewegungen.

Messung mitten in der Strömung

„Mit Satellitenbildern oder Messungen aus der Ferne können Windgeschwindigkeiten nur grob bestimmt werden“, erklärt Weber. „Die beste Flugzeuge selbst die Windströmung beeinflussen, entwickelt die Arbeitsgruppe Umweltphysik vom Geo- und Umweltforschungszentrum der Universität Tübingen

- 01** Das Forschungsteam macht das Messflugzeug startklar.
The research team prepares the measuring aircraft for takeoff.
- 02** Von Helgoland aus startete das unbemannte Flugzeug zu einem Testflug über der Deutschen Bucht.
The unmanned aircraft took off from Helgoland for a test flight over the German Bight.
- 03** Hochauflösende Messtechnik erfasst hunderte Datensätze pro Sekunde und macht kleinteilige Luftbewegungen sichtbar.
High-resolution measurement technology records hundreds of data sets per second showing miniscule air movements.

PHOTOS: Universität Tübingen/ Fraunhofer IFAM

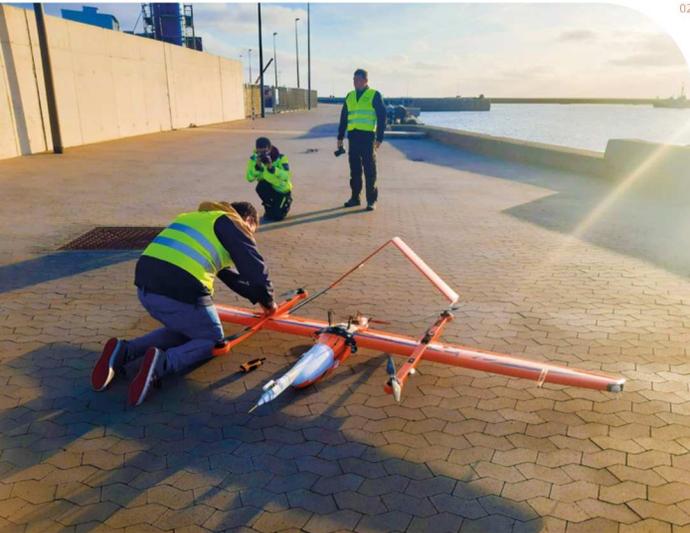


01

kleine, unbemannte Fluggeräte, die diese Aufgabe erledigen können. Vom maritimen Testzentrum auf Helgoland aus, betrieben unter anderem vom Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), erprobt sie Flugmanöver außer Sichtweite sowie Messtechnik und Datenübertragung.

Während auf dem Außengelände direkt an der Wasserkante die elektrischen Antriebe des UAS surrend Fahrt aufnehmen, blickt Weber im Testzentrum konzentriert auf die Monitore. Draußen steht zwar ein Sicherheitspilot mit Fernsteuerung, er überwacht aber nur Start und Landung. Einmal in der Luft, steuert ein Autopilot das Flugzeug entlang programmierter Messstrecken. Das elf Kilogramm schwere UAS erhebt sich senkrecht in die Höhe, startet den Heckpropeller und zischt rasant ab. Nach rund einem Kilometer ist es für das bloße Auge verschwunden.

Nun überwachen Weber und ihre Kollegen per Livestream den Flug. Bei Bedarf können sie jederzeit eingreifen. „Alle Systeme sind doppelt vorhanden, die Flugsicherheit hat höchste Priorität“, erklärt die Doktorandin. Auf dem Monitor laufen Messdaten ein: Temperatur, Wasserdampfgehalt, Windrichtung und -geschwindigkeit sowie Aerosolkonzentrationen.



02

EN At first glance, the streamlined device looks like a remote-controlled model aircraft. In fact, the orange-white object with a wingspan of around three meters, a propeller at the rear and four rotors at the top is a high-tech apparatus, packed with high-resolution measurement technology, and on an important mission: collecting data for the energy transition – the exit from nuclear and fossil-fue energy.

The unmanned aircraft, which a team is preparing for take off from Helgoland on this sunny autumn day, is an automatically operating Unmanned Aircraft System (UAS). It is controlled skillfully by the hands of Ines Weber, doctoral candidate in environmental physics at the University of Tübingen and a qualified pilot. The Heligoland flight is part of the X-Wakes project funded by the Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action (see box). In this project, several groups are investigating how large-scale wind farms are affecting the wind conditions in the German Bight, because wind turbines not only use wind, they also cause and change air movements themselves.

The most accurate measurements are made in the middle of wind currents

“Wind speeds can only be determined roughly using satellite images or remote measurements”, explains Weber. “We can get the best results if we get right in the middle with an aeroplane.” Large aircraft disturb the atmosphere. Therefore, the Environmental Physics group at the Center for Applied Geoscience at the University of Tübingen develops small, unmanned aircraft to avoid this. At the Test Center for Maritime Technologies on Heligoland, operated by the Fraunhofer Institute IFAM, researchers test flight maneuvers beyond the visual line of sight, measurement equipment and data transmission.

When the electric motors start humming and the UAS takes off outside, Weber follows the flight closely on monitors in the test center. Although there is a safety pilot on the ground, they only monitor take-off and landing. In the air, the autopilot steers the aircraft along set paths. The eleven-kilogram UAS takes off vertically, starts the rear propeller and jets off rapidly. After about a kilometer, it is no longer visible to the eye.

Weber and her team continue to monitor the flight via a live stream. If necessary, they can intervene at any time. “All systems are redundant, aviation safety has the highest priority”, she explains. Measured data is displayed on the monitor: temperature, water vapor content, wind direction, wind speed, and aerosol concentrations.

Small currents, great effect

“The UAS can perform the same meteorological measurements as a large research aircraft. However, it is much cheaper and more environmentally friendly”, says Weber. The instruments on board measure at high resolution and transmit hundreds of data sets every second. Certain quantities are accurately represented in the range of one meter, which also makes minuscule air movements visible. “Every single wind turbine creates vortices downstream”, explains Jens Bange, Professor for Environmental Physics at the Center for Applied Geoscience. “Although the wind speed is significantly reduced by the rotors, the flow is highly turbulent.

The technical term for this is a turbulent wake.”

Rather than just a handful of isolated wind turbines, the German Bight houses huge offshore wind farms such as Amrumbank West north of Heligoland with 80 wind turbines and a total height of 180 meters, each of these turbines reaches higher into the sky than the Cologne Cathedral with its 160 meters. Often several wind farms form clusters that reach as far as the eye can see.

The rotor blades mix air masses up to 300 meters above sea level. Turbulent wakes are created behind each and every turbine. The individual wakes interact with each other and build up behind the cluster to form a huge wake of up to 80 kilometers in

length, visible on satellite images as elongated streaks on the surface of the sea.

Constant vibration ages wind turbines

The altered wind currents have a significant impact on the operation of the wind farms. “Even a few-percent reduction in wind speed means major losses in electric yield for farms in the wake of an upstream farm or even cluster”, explains Bange. In addition, the turbulence causes wear by shaking the blades, the gearbox, the tower, and the foundation. Wind-farm operators therefore want to know how often and how strongly flow phenomena occur under certain weather conditions. This helps planning wind farms, increase efficiency and extend system life expectancy. X-Wakes also examines how the atmospheric interactions of wind farms influence the local climate, such as wind currents and cloud formation, enabling policymakers to answer questions, such as on the consequences for vegetation and wildlife.

“The measurements carried out so far in the German Bight show tendencies that the wake of the wind farms can influence, for example, the distribution of water vapor”, reports Dr. Andreas Platis from the Environmental Physics group, “and that this is dependent on certain wind directions. On many days it is not visible at all.” For reliable statements, however, more measurements are needed. For an overall picture,



03

Kleine Wirbel, große Wirkung

„Das UAS kann messtechnisch das Gleiche wie ein großes Forschungsflugzeug. Der Einsatz ist aber viel günstiger und umweltschonender“, sagt Weber. Die Instrumente an Bord messen mit hoher Auflösung und übertragen in jeder Sekunde hunderte Datensätze. Einzelne Größen werden im Bereich von einem Meter genau dargestellt, was auch kleinteilige Luftbewegungen sichtbar macht. Das ist entscheidend, denn im Fokus des Projekts stehen Wirbel, verursacht durch Windkraftanlagen. „An jeder einzelnen Windkraftturbine entsteht ein Wirbel, wenn der Wind auf sie trifft“, erklärt Professor Jens Bange, Leiter des Bereichs Umweltphysik am Geo- und Umweltforschungszentrum. „Im Windschatten des Rotors ist zwar die Windgeschwindigkeit verringert, die Strömung aber stark turbulent. Der Fachbegriff hierfür ist Nachlaufströmung oder „Wake.“

Nun stehen in der Deutschen Bucht nicht vereinzelt Windräder, sondern gewaltige Offshore-Windparks wie zum Beispiel Amrumbank West nördlich von Helgoland mit 80 Windenergieanlagen.

Jede davon ragt mit einem Rotordurchmesser von 120 Metern und einer Gesamthöhe von 180 Metern weiter in den Himmel als der Kölner Dom mit seinen 160 Metern. Häufig liegen mehrere Windfarmen dicht an dicht und bilden Cluster – seemeilenweit Windräder soweit das Auge reicht.

Die Heere rotierender Propellerblätter bringen die Luftmassen bis in 300 Metern Höhe über der Meeresdüngung gehörig in Wallung: An jedem Rotor entstehen Wakes, die in die dahinterstehenden Turbinen fliegen. Die einzelnen Wirbel wirken wechselseitig aufeinander und summieren sich hinter dem Cluster

zu einer riesigen Wake, einem Nachlauf von bis zu 80 Kilometern Länge. Diese weit ausgedehnten Verwirbelungen und verlangsamten Windströmungen erkennt das bloße Auge auf Satellitenbildern als lang gezogene Schlieren auf der Meeresoberfläche.

Ständiges Rütteln lässt Windkraftanlagen altern

Die veränderten Windströmungen beeinflussen wiederum den Betrieb der Windparks. „Schon eine um fünf Prozent verringerte Windgeschwindigkeit bedeutet für Anlagen im Nachlauf eines Clusters Ertragseinbußen“, erklärt Bange. Außerdem ermüdet die Turbulenz die Anlagen durch ständiges Rütteln an den Blättern, am Getriebe, an Turm und Fundament. Windpark-Betreiber wollen folglich wissen, unter welchen Wetterbedingungen, wie oft und wie stark bestimmte Strömungsphänomene auftreten. So lassen sich Windparks besser planen, die Effizienz erhöhen und die Lebenserwartung der Anlagen verlängern.

Außerdem untersucht X-Wakes, inwiefern die atmosphärischen Wechselwirkungen von Windparks das lokale Klima beeinflussen, etwa Windströmungen und Wolkenbildung. „Wir betreiben ergebnisoffene Grundlagenforschung“, ordnet Bange dies ein. Auch um den politischen Verantwortlichen für den Windkraft-Ausbau fundierte Informationen für eine vorausschauende Planung zur Verfügung zu stellen und Antworten auf berechtigte Fragen zu ermöglichen. Beispielsweise nach den Folgen für Vegetation und Tierwelt.

„Die bisherigen Messungen in der Deutschen Bucht zeigen Tendenzen, dass der Nachlauf der Windparks zum Beispiel die Verteilung von Wasserdampf beeinflussen kann“, berichtet Dr. Andreas Platis, Post-Doc der Arbeitsgruppe, „und dass dieser Einfluss zugleich sehr abhängig von bestimmten Windrichtungen ist. An vielen Tagen ist er überhaupt nicht sichtbar.“ Für belastbare Aussagen seien aber noch viele, möglichst exakte Messungen nötig. Für ein Gesamt-



bild hat das Tübinger Team auch Anlagen an Land im Blick. Forschungsflüge im Schwarzwald und auf der Schwäbischen Alb sollen Erkenntnisse liefern, wie Windströmungen in hügeligem Gelände Windkraftanlagen beeinflussen.

Erster unbemannter Testflug

Die Testflüge über dem Meer sind für die weitere Forschung ein wichtiger Meilenstein. „Wir sind die Ersten in der Nordsee, die nach der neuen EU-Verordnung für Drohnen einen Forschungsflug außerhalb der Sichtweite eines Piloten durchführen konnten und durften“, sagt Platis. „Die Flüge auf Helgoland zeigen, dass unser UAS sicher und zuverlässig

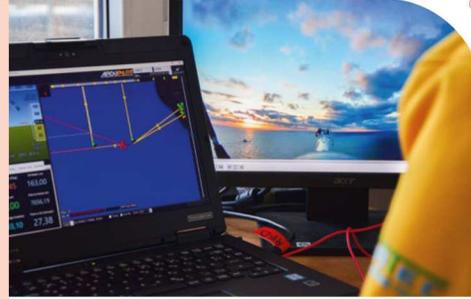
für Messungen eingesetzt werden kann.“ Die dabei gesammelten Daten werden bereits genutzt. Etwa im Helmholtz-Zentrum Geesthacht, wo damit Modelle zur Auswertung von Satellitenbildern abgeglichen und nachjustiert werden.

Auf Helgoland landet das UAS wieder auf dem Außengelände, noch vor Ablauf der möglichen Flugzeit von eineinhalb Stunden. Es müsse immer ein Puffer bleiben, erklärt Ines Weber. Eine gewisse Nervosität sei bei der Verantwortung für das rund 60.000 Euro teure Gerät durchaus vorhanden. „Wir agieren komplett selbstständig. Es gibt keine fertigen Kontrollmechanismen oder Checklisten, wir erarbeiten und erproben die Verfahren selbst. Gleichzeitig ist es ein absoluter Traumjob. Das ist Forschung: neue Dinge ausprobieren und auch an die Grenze des Machbaren gehen. Das finde ich so spannend.“

”
Das ist Forschung: neue Dinge ausprobieren und auch an die Grenze des Machbaren gehen.

This is research: trying new things and pushing the limits of what is possible.

“



- 04 Ines Weber
- 05 Professor Dr. Jens Bange
- 06 Dr. Andreas Platis

07 Der Flug wird per Livestream überwacht, bei Bedarf kann das Forschungsteam eingreifen.
The flight is monitored via livestream, the research team can intervene if necessary.

08 Das unbemannte Flugzeug kann genauso viel wie ein großes Forschungsflugzeug, arbeitet aber umwelt-schonender und günstiger.
The unmanned aircraft can do as much as a large research aircraft, but it is environmentally friendly and cheaper.

PHOTOS: Universität Tübingen/ Fraunhofer IFAM

the team of the University of Tübingen is also looking at the situation on land. Research flights in the Black Forest and on the Swabian Alb are intended to investigate how wind currents in hilly terrain affect wind turbines and vice versa.

First unmanned test flights

Test flights over the sea are an important milestone for further research. “We are the first in the North Sea to be able and allowed to conduct a research flight beyond the visible line of sight under the new EU regulation for drones”, says Platis. “The flights from Heligoland show that our

UAS can be used safely and reliably for measurements.” The data collected is already being utilised, for example in the Helmholtz Centre Heron at Geesthacht, where models for the evaluation of satellite images are compared and re-adjusted.
Back on Heligoland, the UAS lands outside the building before the maximum possible flight time of one and a half hours is used up. “We always need to plan some extra time”, explains Weber. There is a certain nervousness about the responsibility for the device, which costs around 60,000 euros. “There are no ready-made checklists, we are developing and testing the procedures ourselves. But it is an absolute dream job. This is research: trying new things and pushing the limits of what is possible.”

→ **Das Projekt X-Wakes** (gesprochen „Cross-Wakes“) untersucht seit 2019, wie der Ausbau von Offshore-Windparks Windbedingungen in der Deutschen Bucht ändert. Sieben Arbeitsgruppen folgender Institutionen forschen hier zusammen: Universität Tübingen, Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES), Technische Universität Braunschweig, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Universität Oldenburg mit dem Zentrum für Windenergieforschung (ForWind), Helmholtz-Zentrum Geesthacht und UL International GmbH.

→ **Forschungsgrundlage** sind hochauflösende Berechnungsmodelle und eigene Messkampagnen. Das Tübinger Team führte im September 2021 von Helgoland aus erstmals Testflüge mit einem unbemannten Kleinflugzeug außer Sichtweite durch.

→ **Gefördert** wird X-Wakes vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über drei Jahre mit 3,4 Millionen Euro. Windparkbetreiber unterstützen das Projekt mit Daten und Zugang zur Offshore-Infrastruktur. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) und das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) beraten die Forschenden

→ **The X-Wakes project** (pronounced “Cross-Wakes“) is investigating how the expansion of offshore wind farms changes wind conditions in the German Bight since 2019. Seven research groups are working together on the project from the following institutions: University of Tübingen, Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems (IWES), Technical University of Braunschweig, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), University of Oldenburg with the Center for Wind Energy Research (ForWind), Helmholtz-Zentrum Hereon (Geesthacht), and UL International GmbH.

→ **The research** is based on high-resolution models and own measurement campaigns. The Tübingen team conducted test flights with an UAS beyond the visible line of sight for the first time in September 2021 from Heligoland.

→ **X-Wakes is funded** by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action with 3.4 million euros over three years. Wind farm operators support the project with data and access to offshore infrastructure. The German Meteorological Service (DWD) and the Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH) advise the researchers.