



## Turm und Fundamente testen

Neues Testzentrum erprobt die tragenden Strukturen und zugehörigen Bauverfahren von Windenergie-Anlagen



**BINE**  
Informationsdienst

*Für die Nutzung der Windenergie bieten die Hersteller immer größere und leistungsstärkere Anlagen an. Mit zunehmender Anlagengröße verlangen Wind und Wetter den Bauwerken und Anlagenkomponenten immer mehr ab. Um die als Türme und Fundamente eingesetzten Bauteile vorab testen und optimieren zu können, eröffnete 2014 das Testzentrum Tragstrukturen an der Universität Hannover. Hier werden Komponenten aus Stahl, Beton und weiteren Materialien auf Biegen und Brechen gefordert.*

Im Testzentrum Tragstrukturen zerren Kräfte wie bei Windstärke 10 am Bauteil einer Windenergie-Anlage (WEA) und rütteln das Material kräftig durch. Dabei ist in der Halle selbst nicht das geringste Lüftchen zu spüren. Wissenschaftler können hier auf Testständen mit Maschinenkraft extreme Belastungen auf Modelle von Türmen, Masten, Fundamenten sowie auf Komponenten und Schrauben ausüben. In der Praxis verursachen der Wind und die von ihm angeregten Bewegungen der Rotoren und Drehungen der Gondel diese Lasten. Bei Offshore-Anlagen kommen die Wellen, die Strömung und das Zusammenspiel von Wind und Wellen hinzu. Eine WEA muss all diesen Kräften mindestens 20 Jahre sicher standhalten. Dabei spielt die Wirtschaftlichkeit in zweifacher Hinsicht eine Rolle: Es geht darum, die Investitionskosten ohne Einbußen bei der Zuverlässigkeit zu minimieren. Zu massiv ausgeführte Komponenten, die keinen Zugewinn an Sicherheit bieten, bedeuten unnötige Material- und Installationskosten.

Das neue Zentrum verfügt über zwei große Teststände: die Grundbauversuchsgrube und das Spannfeld. In der 10 m tiefen und mit Sand gefüllten Grube werden Trag- und Gründungsstrukturen von Offshore-Fundamenten sowie zugehörige Bauverfahren im Maßstab 1:10 und größer untersucht. Im Spannfeld lassen sich Modelle von Tragstrukturen im Maßstab bis 1:5 einspannen und über mehrere Achsen belasten. Ziel

---

Dieses Forschungsprojekt wird gefördert vom

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

---



Abb. 1 Das Testzentrum Tragstrukturen

ist unter anderem die Prüfung des Ermüdungsverhaltens. Speziallabore für Beton, Faserverbundwerkstoffe und geotechnische Untersuchungen, eine Resonanzprüfmaschine sowie eine Klimakammer runden die Möglichkeiten im Zentrum ab. Als Ergebnis liegen dann reproduzierbare Daten für extreme sowie zyklische Belastungen von Bauteilen und Materialien vor. Um die Anforderungen eines ganzen Anlagenlebens zu simulieren, reichen in der Halle drei bis vier Monate. Das Zusammenspiel von Modellen, großmaßstäblichen Experimenten und numerischen Berechnungen hilft, WEAs präziser auszulegen und Simulationsprogramme zu validieren. Die Leibniz Universität Hannover betreibt mit dem Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, IWES, als Kooperationspartner das Testzentrum Tragstrukturen Hannover.

### Versagen durch Materialermüdung vorbeugen

Die Drehbewegungen der Rotoren übertragen den überwiegenden Teil der auf eine WEA wirkenden Lasten. Diese müssen von Nabe, Maschinenhaus, Turm und Fundament abgetragen werden. Daneben belasten auch z. B. das Nachführen der Gondel mit der Windrichtung und offshore die Kraft der Wellen Turm und Fundamente. Weniger die extremen Ereignisse, wie z. B. starke Stürme, sondern vielmehr eine hohe Zahl andauernd wechselnder Belastungen fordern die Statik in besonderer Weise. Ein Beispiel hierfür sind Böen und Windturbulenzen, wenn sich die Windrichtung innerhalb kurzer Zeit immer wieder ändert und die Rotoren stark wechselnden Belastungen ausgesetzt sind.

Gründungsstrukturen von WEA sind auf drei Ziele ausgelegt:

- Alle Bauteile müssen bruchfest gegen Extrembelastungen sein.
- Während des 20- bis 30-jährigen Betriebs darf es durch die Dauerbelastung zu keinem Versagen durch Materialermüdung kommen.
- Damit von außen eingebrachte Schwingungen nicht die Eigenfrequenz des Systems anregen, das sich dadurch immer weiter aufschaukeln würde, ist die möglichst genaue Kenntnis der Steifigkeit des Systems notwendig.

In die Auslegung fließen alle maximal zu erwartenden Betriebszustände, sämtliche Kombinationen von Störfällen und die Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse ein. Dafür ermitteln und berechnen die Entwickler die Entwurfslasten. Das Bauwerk wird so ausgelegt, dass es allen Lasten widerstehen kann. Die im Testzentrum er-

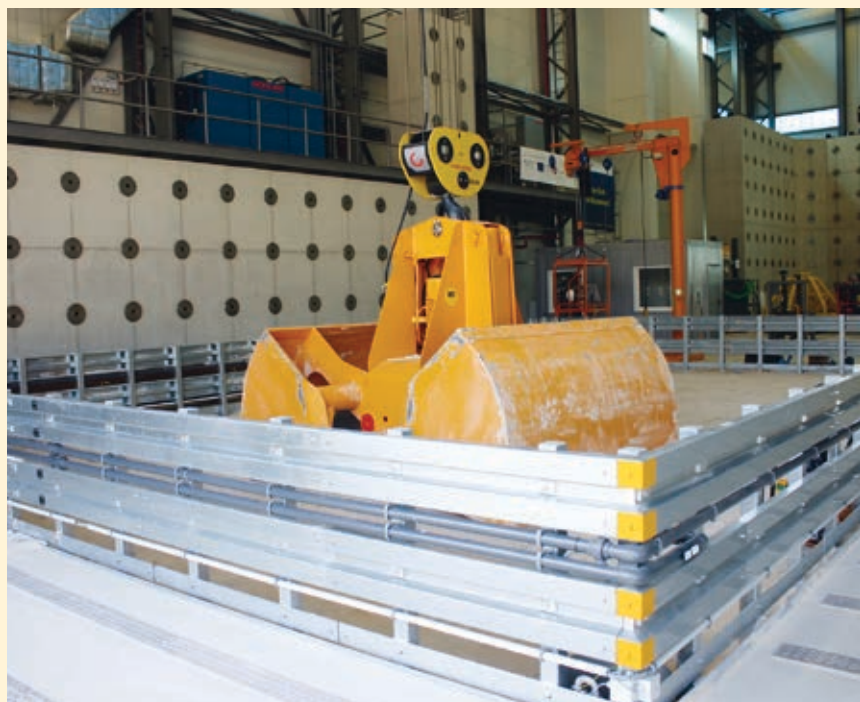


Abb. 2 Die Grundbauversuchsgrube fasst 1.250 m<sup>3</sup> Sand.

<b>Vertikallasten</b>	max. 2.000 kN Zug max. 700 kN Druck
<b>Horizontallasten</b>	max. 500 kN Zug/Druck
<b>Prüffrequenz</b>	Bis 5 Hz
<b>Ankerpunkte</b>	500 kN Zug- und Drucklast und 270 kN Schubkraft
<b>Auslegung für den Einsatz von Rammen</b>	Bis zu einer Schlagenergie von 20 kJ/Schlag

Abb. 3 Daten zur Grundbauversuchsgrube.

Zum Vergleich: Jedes Triebwerk eines Airbus A 380 entwickelt eine maximale Schubkraft von 311 bis 343 kN.

mittelten Daten erleichtern es künftig, den Bauwerkswiderstand genauer vorherzusagen.

### Gründungen in den Sand setzen

Die Grundbauversuchsgrube (Abb. 2 und 3) mit einer Grundfläche von 126 m<sup>2</sup> und einer Tiefe von 10 m fasst 1.250 m<sup>3</sup> Sand. Dieser ist wassergesättigt und durch vier Brunnen ist es möglich, den Feuchtegehalt zu variieren. Hier werden Bauverfahren sowie die Verankerung von Fundamenten der Offshore-Anlagen im Meeresboden getestet. Am Kopf des Prüfkörpers, in der Realität entspricht das dem Turmfuß, befinden sich hydraulische Aktuatoren zum Eintragen von Lasten. Ein Beispiel ist eine Kombination aus zyklischen Lasten und großen Impulsen, was z. B. in der Realität einem Dauerbetrieb bei einzelnen, hohen Wellen entspricht. Dehnungs-, Neigungs- und Beschleunigungssensoren zeichnen alle Bewegungen auf. Die Wissenschaftler nutzen die Grube auch, um das Bodenverhalten im Umfeld des Prüfkörpers und die Wechselwirkungen zwischen Baugrund und Fundament zu untersuchen. In einem weiteren Forschungsgebiet geht es darum, lärmarme Installationsmethoden für die Gründungen zu entwickeln und zu erproben. Möglichkeiten hierzu sind, Pfähle durch Vibrieren in den Boden einzubauen oder die sogenannten Suction Buckets. Bei diesen gründet die Windenergie-Anlage auf einer Art umgedrehtem Eimer, der am Meeresgrund festgesaugt wird.



Abb. 4 Über Ankerpunkte und Widerlagerwinkel erfolgt die Lasteinleitung auf dem Spannfeld.



Abb. 5 Außenansicht der 4,2 m breiten und 2,8 m tiefen Klimakammer, in der Tests mit Süß- und Salzwasser durchgeführt werden.

### Spannende Prüfungen für Komponenten

Im Spannfeld (Abb. 4) testen die Wissenschaftler Komponenten und große Modelle auf Materialermüdung. Der Teststand besteht aus einer 200 m<sup>2</sup> großen Betonbodenplatte, die an zwei Seiten rechtwinklig von massiven Betonwänden begrenzt wird. Um beispielsweise ein hybrides Verbindungselement aus Stahl und Beton (Grouted Joints) zu prüfen, wird dieses zwischen der Bodenplatte und den Wänden eingespannt. Über 14 hydraulische Zylinder wirken dann verschiedene Lasten auf das Prüfobjekt ein. Die Zylinder erzeugen Kräfte zwischen 250 und 2.000 kN und die Prüffrequenz variiert zwischen 0,1 und 50 Hz.

Genau wie in der Realität wirken Zug-, Schub- und Drehkräfte aus verschiedenen Richtungen auf die Objekte ein. Geprüft werden z. B. Stahlknoten oder Knotenpunkte von Schwergewichtsfundamenten, auf denen Offshore-Anlagen errichtet werden. Alle Bauteile lassen sich sowohl stehend wie liegend testen.

### Klimakammer und Labore

In der Klimakammer (Abb. 5) wird die Alterungsbeständigkeit der Materialien getestet. Ursachen für Korrosion und andere Formen der Materialzersetzung sind langjährige Temperaturwechsel, Salznebel oder die kontinuierliche Bestrahlung mit UV-Licht, die in der Kammer im Zeitraffer ablaufen. Mit diesen Untersuchungen lässt sich das Verhalten beispielsweise im letzten

## Immer höher hinaus

Bei Windenergie-Anlagen machen die Türme ungefähr ein Fünftel der Gesamtkosten aus. Gesucht sind deshalb Bauwerke, die die gewünschte Höhe mit der notwendigen Steifigkeit und möglichst niedrigen Kosten erreichen. Meistens kommt bei Anlagen an Land eine der folgenden vier Konstruktionen zum Einsatz: Stahlrohtürme (mit und ohne Abspannung), Betontürme, entweder aus Fertigelementen oder aus Ort-beton, Gitter- oder Fachwerkmasten, wie sie auch bei Hochspannungsleitungen gebräuchlich sind, und Hybridtürme. Diese bestehen unten aus einem Betonturm, auf den dann ein Stahlrohturm folgt. Alle Fundamente sind im Boden mit Fundamenten aus Stahlbeton verankert, die je nach Bodenbeschaffenheit auf Pfählen stehen.

Offshore-Anlagen gründen überwiegend auf einem Monopile, einem Tripod oder einer Jacket-Konstruktion (Abb. 6). Die beiden Letzteren werden mit kleineren Pfählen im Untergrund verankert, während der Monopile selbst in den Untergrund gerammt wird. Derzeit arbeiten Forscher an der Entwicklung lärm-ärmer Bauverfahren und neuer Fundamentkonzepte.

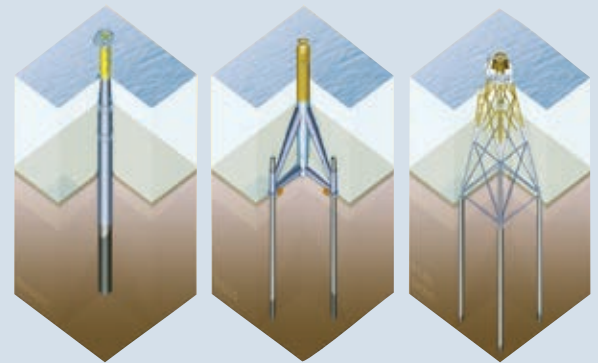


Abb. 6 Monopile, Tripod, Jacket (von links nach rechts)

Viertel der Anlagenlebensdauer im Labor vorab erproben. Damit sind Prüfungen nach verschiedenen Normen mit Kondenswasser und in Salzsprühnebel möglich. Die Untersuchungen zielen auch auf den zeitlichen Verlauf des sogenannten VergROUTungsprozesses. So heißt der Fügeprozess zwischen dem Rammrohr und dem Turmfuß bei Offshore-Anlagen. Das Betonlabor ermöglicht, die Qualität von Frisch- und Festbeton sowie Probekörper aus Hochleistungsbeton zu überprüfen. Die Feinanalyse der Bruchstellen eines Bauteils, das in einem Prüfkörper zum Versagen geführt hat, erfolgt im Structural-Health-Monitoring-Labor. Ein Composite-Labor ermöglicht, Verfahren für die Reparatur beschädigter Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen zu entwickeln. Eine Resonanzprüfmaschine ergänzt das Untersuchungsspektrum. Durch sie sind schnelle und kostengünstige Versuche mit großen Probestückzahlen möglich, um Berechnungen statistisch abzusichern. Außerdem dient sie dazu, die Ermüdungsfestigkeit von Verbindungsmitteln, wie Schrauben, zu ermitteln. Die Maschine verfügt über eine axiale Kraft von 1.000 kN und arbeitet in einem Frequenzbereich von bis zu 120 Hz.



## Projektgruppe GIGAWIND

Nach dem Testzentrum Rotorblatt und dem Prüflabor DyNaLab für Gondeln geht mit dem Zentrum Tragstrukturen jetzt eine weitere Testeinrichtung in Deutschland in Betrieb. Das Bundeswirtschaftsministerium hat den Aufbau dieser Einrichtungen als Teil der Energieforschung mit fast 50 Mio. Euro gefördert. Ende 2015 kommt noch das BladeMaker-Demozentrum hinzu. Hier werden neue Verfahren zur automatisierten Herstellung von Rotorblättern erprobt.

Offshore Windparks sind nur dann wirtschaftlich erfolgreich, wenn die Anlagen auf festen Füßen stehen. Seit mehr als 15 Jahren erforscht die Projektgruppe GIGAWIND an der Leibniz Universität Hannover die bau- und umwelttechnischen Grundlagen der Fundamente und Türme. Die Wissenschaftler untersuchten den Einfluss von Meeresströmungen, Seegang und Wellen und entwickelten Bewertungskriterien für die geotechnische Beurteilung des Baugrunds. Dank der Untersuchungen kann die Auslegung der Fundamente heute von einer verlässlicheren Datengrundlage aus erfolgen. Dies ist eine Voraussetzung, um durch eine stärkere Serienfertigung der Fundamente die Anlagenkosten weiter zu senken.

Die Projektgruppe betreute im Zuge der Begleitforschung zur Forschungsinitiative RAVE die bautechnischen Themen auch beim deutschen Offshore-Testfeld alpha ventus. Ein Schwerpunkt dabei war die Erforschung der Kolkbildung. Kolke entstehen, wenn eine feste Struktur, z. B. das Fundament einer Windenergie-Anlage, im Wasser verankert wird. Im Umfeld dieser Struktur ändert sich das Strömungsmuster, was zu erhöhter Erosion auf dem Meeresboden führt. Dadurch entsteht rund um die Struktur eine Vertiefung im Boden, die Kolk genannt wird. Um dieses Phänomen zu erforschen, wurden Modelle von Fundamentbauwerken im weltgrößten Wellenkanal in Hannover getestet und mit Echolotmessungen aus dem Umfeld von Anlagen im Testfeld verglichen. Die Untersuchungen ergaben, dass die Standsicherheit der Anlagen durch die Kolkbildung nicht bedroht ist.

Beim bis 2016 noch laufenden Projekt GIGAWIND life steht die Lebensdauerforschung der Tragstrukturen im Mittelpunkt. Die Daten der weltweit einmaligen Langzeitmessungen an den Anlagen in alpha ventus sollen genutzt werden, validierte Methoden und Strukturmodelle zu entwickeln. Diese dienen sowohl zur Untersuchung von Einzelanlagen als auch für ein weiter optimiertes Fundamentdesign künftiger Offshore-Anlagen.

## Projektbeteiligte

- » **Projektleitung:** Leibniz Universität Hannover.  
Institut für Statik und Dynamik, Prof. Dr. Raimund Rolfes, r.rolfes@isd.uni-hannover.de  
Institut für Stahlbau, Prof. Dr. Peter Schaumann, schaumann@stahl.uni-hannover.de
- » **Versuchsbetrieb:** Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) Hannover, Bereich Strukturkomponenten, Dr. Maik Wefer, maik.wefer@iwes.fraunhofer.de

## Links und Literatur

- » [www.tth.uni-hannover.de](http://www.tth.uni-hannover.de)

## Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Gondeln im Schnelldurchlauf testen. Projektinfo 15/2014
- » Die Zeitmaschine für Rotorblätter. Projektinfo 15/2011
- » Heier, S.: Nutzung der Windenergie. FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2012. 156 S., 6., vollst. überarb. Aufl., ISBN 978-3-8167-8607-8, 29,80 Euro
- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter [www.bine.info/Projektinfo\\_05\\_2015](http://www.bine.info/Projektinfo_05_2015)

*BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter [www.bine.info/abo](http://www.bine.info/abo)*

## Impressum

**Projektorganisation**  
Bundesministerium  
für Wirtschaft und Energie (BMWi)  
11019 Berlin

Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Klaus Korfhage  
52425 Jülich

**Förderkennzeichen**  
0325320

**ISSN**  
0937 - 8367

**Herausgeber**  
FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut  
für Informationsinfrastruktur GmbH  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

**Autor**  
Uwe Milles

**Urheberrecht**  
Titelbild, Abb. 1 – 5:  
Leibniz Universität Hannover

Eine Verwendung von Text und  
Abbildungen aus dieser Publikation ist  
nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion  
gestattet. Sprechen Sie uns an.

## Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?  
Wir helfen Ihnen weiter:

**0228 92379-44**  
**[kontakt@bine.info](mailto:kontakt@bine.info)**

**BINE Informationsdienst**  
Energieforschung für die Praxis  
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197  
53113 Bonn  
[www.bine.info](http://www.bine.info)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages