



## Windpotenzial im Mittelgebirge messen

Langzeitmessungen am 200 Meter hohen Messmast bei Kassel



*Einer der höchsten Windmessmasten Europas steht auf dem Rödeser Berg bei Kassel. Die Forschungsanlage erfasst mit ihren Messgeräten die Windbedingungen bis in 200 Meter Höhe. Ziel ist, den Einfluss von Waldflächen und Mittelgebirgslandschaft auf Windprofil und Strömungseigenschaften zu messen. Die Ergebnisse helfen, die meteorologischen Modelle zur Standortbewertung zu verbessern, die Belastungen einzelner Anlagenkomponenten genauer abzuschätzen und das laserbasierte LiDAR-Verfahren weiterzuentwickeln.*

Moderne Windenergieanlagen (WEA) haben bis zu 150 m Nabenhöhe und 170 m Rotordurchmesser. Für sie sind die Windbedingungen bis 200 m Höhe bedeutsam. Der Windmessmast auf dem Rödeser Berg bei Kassel erreicht diese Höhe. Seit 2012 hat er durch kontinuierliche Windmessungen die Datenbasis für die Auslegung von Binnenlandanlagen verbessert. Ziel ist, für bewaldete Mittelgebirge eine solide Datengrundlage für die Windfeldmodellierung bereitzustellen und damit bisherige Unsicherheitsfaktoren bei der Beurteilung neuer Standorte zu verringern. Gemessen werden u. a. die horizontale und vertikale Windgeschwindigkeit sowie die Turbulenzen. Damit ist es möglich, kritische Komponenten wie Rotorblätter gezielter auf die Standortbedingungen auszulegen. Der Messmast dient weiterhin dem Vergleich mit dem laserbasierten, kostengünstigeren LiDAR-Verfahren. Die Daten erhöhen die Sicherheit, wenn die Geräte für eine Standortbewertung eingesetzt werden. Die ermittelten, standortabhängigen Fehler können künftig zur Korrektur von Messergebnissen eingesetzt werden. Das Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES in Kassel hat das Forschungsprojekt geleitet.

Dieses Forschungsprojekt  
wird gefördert vom

Bundesministerium für Wirtschaft  
und Energie (BMWi)



Eine Untersuchung über die Windpotenzialflächen in Deutschland hat ergeben, dass bewaldete Mittelgebirgsstandorte etwa die Hälfte der geeigneten Flächen in Deutschland ausmachen. Dabei sind die Gebiete rausgerechnet, die aus Gründen des Naturschutzes oder des Abstands zur Wohnbebauung frei bleiben müssen. Die für die Windenergie relevanten Waldflächen befinden sich vor allem in Mittel- und Süddeutschland.

Im Jahr 2015 wurden in Deutschland mehr als 30 % aller neu errichteten WEA in der südlichen Landeshälfte errichtet, also in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen und Thüringen. Die dort stehenden Anlagen erzeugen ihren Strom in unmittelbarer Nachbarschaft zu Ballungsräumen und Industrieschwerpunkten mit hohem Strombedarf. Das entlastet die Überlandleitungen des Netzes.

### Hoch hinaus und gut ausgelegt

Der 200 m hohe Messmast steht auf einem typischen Binnenlandstandort auf 380 m über Meereshöhe. Die Anströmbedingungen sind durch die komplexe Geländestruktur der Mittelgebirgslage geprägt. In Hauptwindrichtung überströmt der Wind eine etwa zwei Kilometer lange Waldfläche, bevor er vor der Lichtung mit dem Mast steil ansteigen muss. Er ist der einzige Mast dieser Höhe in Deutschland, der auf die Anforderungen der Windenergie spezialisiert ist.

Der Mast ist alle zwanzig Meter mit Auslegern und über 40 Sensoren bestückt (z. B. verschiedene Anemometer). Damit lassen sich die Windgeschwindigkeiten horizontal und vertikal, hochfrequente Turbulenzen sowie Impulsflüsse ermitteln. Für jede Luftschicht einer WEA, vom Turmfuß bis zum höchsten Punkt der Blattspitzen, wird das Windprofil gemessen. Weitere Messgeräte erfassen Globalstrahlung, Luftfeuchte und -druck, Regenintensität, Temperatur, Vereisung und Wolkenhöhe. Alle Datenströme laufen in einem Messcontainer am Fuße der Anlage zusammen.

### Anlagen gezielt an Standorte anpassen

Die meteorologischen Daten des Messmastes fließen in die Verbesserung und Validierung von Modellen ein, mit denen Windprofile, Turbulenzen und Ertrag im Binnenland berechnet werden. Diese können damit auch Waldgebiete und komplexe Geländeformen besser abbilden. Ein WEA-Hersteller verwendet beispielsweise inzwischen die im Projekt ermittelten Turbulenzfelder, um die Belastung einzelner Komponenten von Anlagen im bewaldeten Mittelgebirge zu berechnen. Diese Erkenntnisse tragen dazu bei, den Materialeinsatz zu optimieren.

Im Laufe der Untersuchungen konnte demonstriert werden, dass LiDAR-Messgeräte die Anforderungen für eine genaue Standortbewertung auch im komplexen Binnenland erfüllen. Die Herausforderung liegt darin, lokale Messergebnisse auf großräumige Gebiete zu übertragen. Die Erfahrungen aus den Untersuchungen flossen mittlerweile in die weiterentwickelte Technische Richtlinie für die Windpotenzialbestimmung der Fördergesellschaft Windenergie ein.

### Das Windprofil lasern

Die Vergleichsmessungen zwischen dem konventionellen Messmast und verschiedenen LiDAR-Geräten ergaben, dass der Fehlerbereich kleiner ist als ursprünglich erwartet wurde. Auf dem Rödeser Berg liegt er für die



Abb. 1 Der Messmast Rödeser Berg ist 200 m hoch und mit mehr als 40 Instrumenten bestückt.

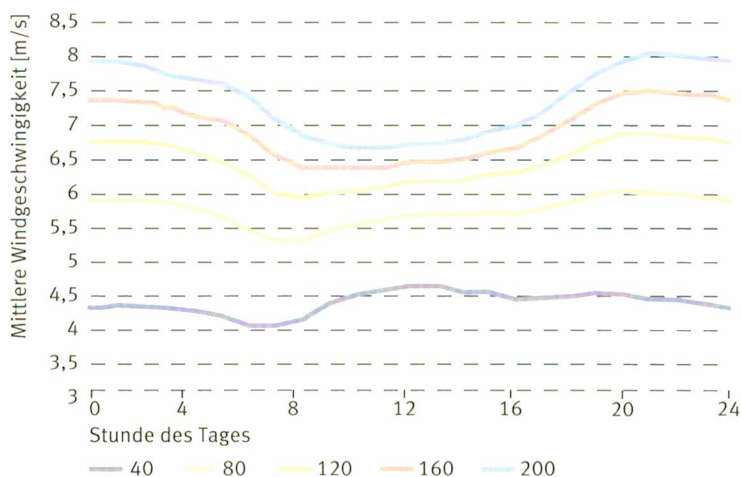


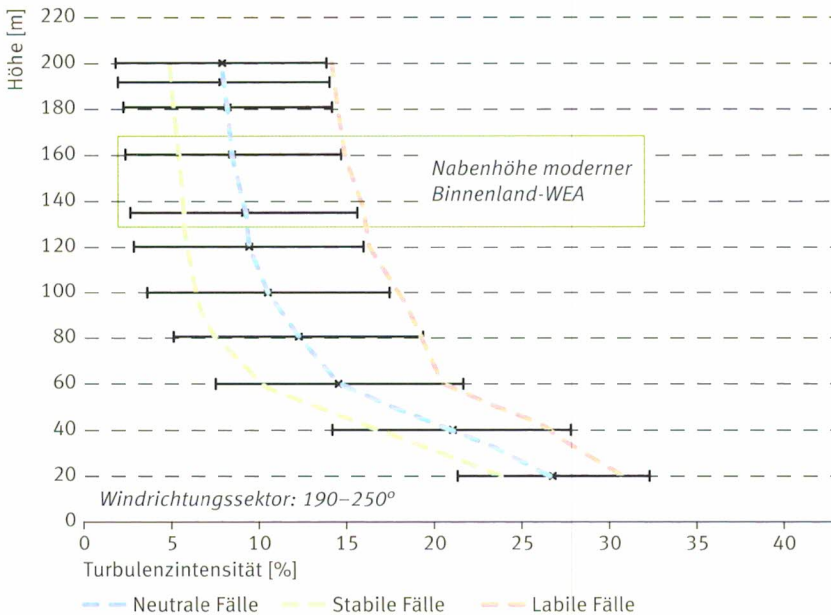
Abb. 2 Während des Tages unterscheiden sich die Windverhältnisse oberhalb von 120 und unterhalb von 80 m deutlich.

typischerweise in der Windparkplanung eingesetzten Geräte zwischen +2,5 und -4 %. Diese Abweichungen der Lasermessungen haben ihren Ursprung im Messprinzip und lassen sich dank der Korrekturfaktoren, die in den Strömungssimulationen ermittelt wurden, gut ausgleichen. Rund um einen Messstandort gibt es dabei Areale mit höheren und niedrigeren LiDAR-Fehlerwahrscheinlichkeiten, die sich als Fehlerkarte darstellen lassen. Das Fraunhofer IWES empfiehlt, von den Stellen mit niedrigen Wahrscheinlichkeiten aus zu messen. LiDAR-Messungen können die Standortbewertung geplanter Windparks vereinfachen und die Kosten senken. Neben dem Einsatz für eine Ganzjahresmessung kann das Lasergerät beispielsweise die Höhenmessungen oberhalb eines kürzeren Messmastes übernehmen.

### Windbedingungen im Mittelgebirge

In den südlichen Regionen Deutschlands und besonders im Mittelgebirge liegen die Luftschichten mit den für die Windenergienutzung wirtschaftlichen Windgeschwindigkeiten in größeren Höhen. Zwischen 100 und 200 m Höhe nimmt hier die durchschnittliche Windgeschwindigkeit um etwa 25 %





**Abb. 3** Höhenabhängigkeit der Turbulenzintensität für den Hauptwindrichtungssektor am 200 m Messmast. Die Turbulenz ist oberhalb der Baumkronen stark erhöht. Im Bereich der Nabenhöhe moderner WEA ist sie mit ca. 10 % vergleichbar mit den Verhältnissen in Küstennähe. Je nach Zustand der Atmosphäre (stabil, neutral, labil) ergibt sich eine starke Erhöhung oder Dämpfung der Turbulenz.



**Abb. 4** Die Messwerte dieser LiDAR-Geräte wurden mit den abgesicherten Daten des Messmastes verglichen. Dadurch war es möglich, systematische Messfehler zu identifizieren und Korrekturverfahren zu entwickeln.

zu. Der Einfluss der Erdoberfläche (z. B. Hügel und Wälder) auf Windgeschwindigkeit und -richtung ist groß. Dort kommt es, bedingt durch das komplexe Gelände mit beispielsweise steilen Anstiegen besonders im bodennahen Bereich, häufig zu kurzzeitigen, schnellen Änderungen der Luftströmung, sogenannten Turbulenzen. Erst 60 bis 80 m oberhalb der Baumwipfel entspricht die Turbulenz in etwa der in waldfreien Regionen. Jedes Rotorblatt durchfährt im oberen Scheitelpunkt Luftschichten mit größeren Windgeschwindigkeiten als an der tiefsten Stelle. Die Änderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe, die sogenannte Windscherung, variiert im Tagesverlauf. Durch die Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Erdoberfläche, es entstehen vertikale Luftströme und es bilden sich Grenzschichten aus. Unterhalb von ca. 70 m ist die mittlere Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit am größten, während sie oberhalb von ca. 100 m genau dann am geringsten ist. Nachts ist die Schichtung der Luftschichten stärker, die vertikale Durchmischung geringer und die Windscherung stärker ausgeprägt.

Auf diese Belastungsfaktoren muss die Anlagentechnik ausgelegt sein und die Hersteller bieten daher spezielle Binnenlandanlagen an.

## Mit Lasern dem Wind auf der Spur

Die LiDAR-Technik (engl. Light Detection And Ranging) führt mithilfe von Laserstrahlen Fernerkundungen atmosphärischer Parameter durch. Vor der Errichtung von neuen Windparks werden spezielle Doppler-LiDAR-Geräte eingesetzt, um vom Boden aus senkrecht in der Höhe Windgeschwindigkeit und -richtung zu messen. Damit können aufwendige Messungen mit einem Windmessmast entfallen. Bei Offshore-Anlagen kann das LiDAR-Messgerät auch auf einer schwimmenden Boje installiert werden. Viele Banken und Versicherer erkennen Lasermessungen für Windgutachten an.

Sogenannte Scanning-LiDAR-Geräte bieten darüber hinaus die Möglichkeit, die Windbedingungen an beliebigen Punkten innerhalb eines Windparks zu vermessen. Um die Hügelüberströmung genau zu vermessen, kombinierten die Wissenschaftler die Geräte.

## Verifizierter Windatlas

Langzeitige und räumlich möglichst genaue Winddaten mit 3 km horizontaler Auflösung bereitzustellen, war ein weiterer Bestandteil des Forschungsprojekts. Diese stehen jetzt als verifizierter Windatlas zur Verfügung. In den neuen Windatlas flossen vorhandene Messdaten von 33 meteorologischen Messmasten in Deutschland und anonymisierte Daten von vorhandenen WEA ein. Die Daten wurden fehlerbereinigt, mit den gemessenen Ertragswerten verifiziert und dann in den Windatlas aufgenommen. Ziel ist, Wetterdaten und Windstromerträge mit möglichst dichter räumlicher Abdeckung zur Verifikation des Windatlas heranzuziehen. Dem Modell können beispielsweise Windrosen, vertikale Windprofile, Tagesgänge und Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten entnommen werden. Bei den Berechnungen wurde das mesoskalige Programm Weather Research and Forecasting Model (WRF) mit dem hochauflösenden Modell Metodyn WT kombiniert, welches besonders für bewaldete Flächen geeignet ist. Die Zeitreihen der Windgeschwindigkeit des Windatlas wurden mit Leistungskennlinien aller gängigen WEA kombiniert und als Produktionsatlas veröffentlicht. Durch eine weitere Kombination mit Strommarktpreisen ist der Marktwertatlas entstanden. Die Daten sind über eine Internetplattform zugänglich und werden insbesondere für Vorabschätzungen des Wind- und Ertragspotenzials und für Indexberechnungen herangezogen.

## Das europäische NEWA-Projekt

Der Mast steht über das ursprüngliche Forschungsprojekt hinaus der Wissenschaft zur Verfügung. Die aktuellen Arbeiten fließen in den Neuen Europäischen Windatlas NEWA ein.

Dazu installierten beispielsweise in 2016 mehrere Forschungsinstitute ihre LiDAR-Messgeräte und Scanning LiDAR-Geräte vor Ort. Mithilfe eines zweiten, 140 m hohen Messmastes am Fuß des Berges wurde die Überströmung der gesamten bewaldeten Fläche detailliert vermessen. In NEWA arbeiten mehr als 30 Projektpartner aus acht Ländern zusammen. Der Atlas soll 2020 vorliegen.





## Messungen in Süddeutschland

Der Stiftungslehrstuhl für Windenergie an der Universität Stuttgart forscht ebenfalls zu den Einsatzmöglichkeiten von LiDAR in der Steuerung von Windenergieanlagen und zum Messen von Windfeldern.

Diese Geräte können den Wind nicht nur vertikal, sondern auch horizontal messen. Dazu werden die Geräte auf einer Gondel installiert. Der Scanner tastet das Windfeld vor der Anlage an beliebigen Punkten ab. Diese Messwerte lassen sich dann in die Anlagensteuerung integrieren, um die Rotoren vorausschauend optimal zum Wind auszurichten. Damit lassen sich Ermüdungs- und Extremlasten der Anlagen senken.

Die Stuttgarter führten im Projekt LiDAR complex weitere Lasermessungen im bergigen, komplexen Gelände an süddeutschen Standorten durch. Ziele waren, die Kenntnisse über den Einfluss der Topographie zu vertiefen, Daten zur Messgenauigkeit der Geräte zu ermitteln sowie für diese Korrekturalgorithmen zu entwickeln und zu validieren. Die Messungen des Windfelds erfolgten mit boden- und gondelbasierten LiDAR-Geräten sowie von Flugzeugen und Windmessmasten aus. Das topographisch stark gegliederte Gelände wurde als Modell nachgebaut und im Windkanal vermessen. Alle Daten dienen dazu, das Betriebsverhalten von Windenergieanlagen in derartigem Gelände besser zu verstehen und prognostizieren zu können.

### Testfeld in Süddeutschland

Um Windenergieanlagen besser an die Anforderungen in süddeutschen Mittelgebirgen anzupassen, bietet sich die Einrichtung eines regionalen Forschungstestfelds an. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat gemeinsam mit Partnern innerhalb des Projekts KonTest hierfür Grundlagen gelegt. Aufgabe im Projekt war, mögliche Standorte für ein Testfeld zu identifizieren sowie dort die meteorologischen Bedingungen zu charakterisieren und die Strömungsverhältnisse zu bestimmen. Ein derartiges Testfeld ermöglicht, neue Materialien und Konstruktionsweisen zu erproben sowie u. a. die Aerodynamik der Anlagen, die Lärmreduktion und die Betriebsführung zu optimieren.

## Projektbeteiligte

- » **Projektleitung Windmessmast und LiDAR-Messungen:**  
Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Kassel,  
Tobias Klaas, tobias.klaas@iwes.fraunhofer.de, www.iwes.fraunhofer.de
- » **Windatlas:** anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH, Reppenstedt,  
Martin Schneider, martin.schneider@anemos.de, www.anemos.de

## Links und Literatur

- » **Video:** Ein vierminütiges Video über den Bau des Messmastes findet sich Internet unter [www.youtube.com/watch?v=33KMORnzJj8](http://www.youtube.com/watch?v=33KMORnzJj8)
- » **Literatur:** Klaas, T.; Pauscher, L.; Callies, D.: LiDAR-mast deviations in complex terrain and their simulation using CFD. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol. 24 (2015), Nr. 6, S. 591–603

## Mehr vom BINE Informationsdienst

- » 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\\_12\\_2016](http://www.bine.info/Projektinfo_12_2016)

*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  
Daniela Bizjak  
52425 Jülich

Förderkennzeichen  
0325171A-B, 0325519A, 0325656C

ISSN  
0937-8367

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

Autor  
Uwe Milles

Urheberrecht  
Titelbild und alle weiteren Abbildungen:  
Fraunhofer-Institut für Windenergie  
und Energiesystemtechnik IWES, Kassel  
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