

Windenergie vom Anfang bis zum Ende gedacht

Trotz schwieriger Marktlage in Deutschland wird Windenergie weltweit als eine der Säulen für ein dekarbonisiertes und umweltverträgliches Energiesystem angesehen. Ende 2018 waren knapp 600 TW weltweit an Windleistung installiert. Trotz der Verlangsamung des Höhenwachstums werden die Rotorblätter aber immer noch länger (► *Abbildung 1*). Dies wird durch stetige Verbesserungen des Blatt-designs und der eingesetzten Werkstoffe erreicht.

Im Folgenden sollen die aktuellen Entwicklungen in der Windenergieforschung für zwei Bereiche aufgezeigt werden:

1. Anströmung und Nachlauf des Windes, also der Weg der Luftmoleküle vor und hinter Windenergieanlagen
2. Der Weg vom Material zur Produktion von Rotorblättern von Windenergieanlagen, die mit dieser Luftströmung interagieren

1. Bestimmung von Windpotenzialen und Anlagennachläufen

Windenergieanlagen (WEA) stellen für den Wind Hindernisse dar, und dem Wind wird Energie entzogen. Dadurch wird der Wind gebremst und die Luftunruhe (Turbulenz) erhöht.

Die genaue Kenntnis von Strömungsverhältnissen vor WEA ist wichtig

- für die Potenzialbewertung von Anlagenstandorten,
- um im Betrieb ein besseres Lastmanagement zu erreichen und
- um die Schallabstrahlung zu bestimmen.

Klassisch werden Windmessungen als Zeitreihe über etwa ein Jahr mit einem meteorologischen Messmasten vorgenommen (► *Abbildung 2*).

Die großen Nabenhöhen kommerzieller WEA werden jedoch von den meteorologischen Messmasten inzwischen kaum noch erreicht. Messungen durch mehrere Masten mit Auslegern und Sensoren in ausgeklügelter Position und Abständen können als sogenanntes Met-Masten-Array erweitert werden.

Alternativ stehen heute neben in-situ-Geräten an Messmasten immer mehr Fernmesssysteme zur Verfügung, mit denen Wind- und Turbulenzfelder vertikal aufgelöst bis in einige hundert Meter Höhe erfasst werden können [1] (► *Abbildung 3*).

Gleichzeitig erlaubt neuere Messtechnik zusätzlich die Erfassung von turbulenten Windströmungen. Diese Variationen in der Anströmung hängen von Tagesgang und komplexen Topografien ab und beeinflussen auch die Nachlaufcharakteristik.

Numerische Simulationen der turbulenten Strömung untersuchen außerdem detailliert den Einfluss auf WEA und die Nachläufe [2].

Bei Windmessungen mit *light detection and ranging* (Lidar) oder *sound detecting and ranging* (Sodar) wird der dreidimensionale Windvektor aus mindestens drei synchronisierten Messungen in drei verschiedene Richtungen zusammengesetzt. Insgesamt erzielen Lidarmessungen ähnlich gute Ergebnisse wie klassische Verfahren, höhere Unsicherheiten entstehen aber in komplexem Gelände. Windmessungen mit mehreren gepulsten Lidaren zeigen eine geringere Auflösung verglichen mit in-situ Messungen. Windmessungen mit kontinuierlich scannenden Lidar-



DLR
Dr. Sarina Keller
sarina.keller@dlr.de

Fraunhofer IEE
Berthold Hahn
berthold.hahn@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer IWES
Florian Sayer
florian.sayer@iwes.fraunhofer.de

IZES
Jan Hildebrand
hildebrand@izes.de

KIT
Prof. Dr. Stefan Emeis
stefan.emeis@kit.edu

ZSW
Andreas Rettenmeier
andreas.rettmeier@zsw-bw.de

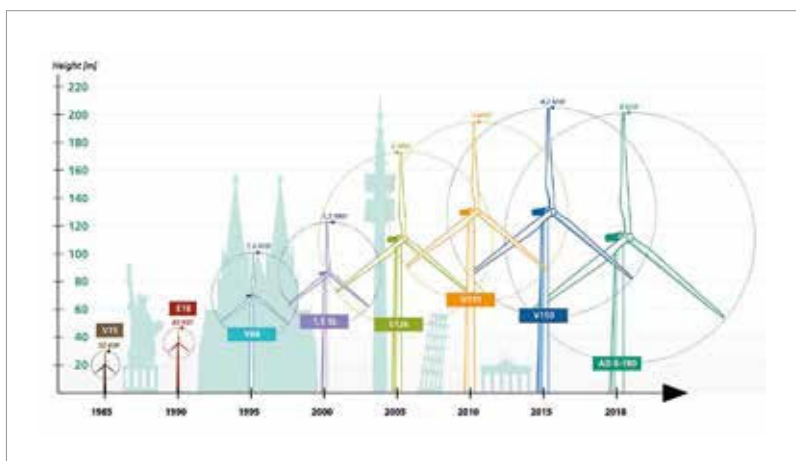


Abbildung 1
Größenzunahme von Windenergieanlagen
Quelle: IWES

Abbildung 2
Zwei meteorologische Messmasten
 des WindForS-Forschungstestfelds am Albtrauf bei Geislingen/Donzdorf
 Quelle: WindForS



Systemen erfassen die Strömung mit höherer räumlicher Auflösung aber geringerer Reichweite [3].

Neuartige Messungen mit Drohnenschwärmen (UAV = Unmanned Aerial Vehicle) erlauben die simultane Erfassung des dreidimensionalen Windvektors an bis zu 100 flexiblen Messpunkten. Dadurch kann das dreidimensionale Windfeld beispielsweise in einer Ebene vor oder hinter der WEA mit einer hohen räumlichen Auflösung direkt erfasst werden [4].

In anderen Forschungsprojekten wurden Messungen über der Nordsee per Flugzeug und Satellit durchgeführt. Je nach Wetterlage erholt sich die Windgeschwindigkeit manchmal erst nach einigen wenigen Kilometern (onshore) oder 10 bis zu 100 Kilometer (offshore) hinter einem Windpark wieder auf ihren ursprünglichen Wert. Der Effekt ist besonders stark über der relativ glatten Meeresoberfläche. Stromabwärtsliegende Windparks können bei Windgeschwindigkeiten, die zwischen der Einschaltgeschwindigkeit und der Nenngeschwindigkeit liegen, im Ertrag beeinträchtigt werden. Bei dem weiteren Ausbau in der Nordsee ist diese Abschattung bei bestimmten Wetterlagen relevant (wärmere Luft über kälterem Wasser) (► *Abbildung 4*).

Inzwischen haben Fernerkundungssysteme Einzug gefunden in die Technische Richtlinie „Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen“ der FGW e.V. und der IEC61400-12 „Messung des Leistungsverhaltens von Windenergieanlagen“. Außerdem liegen seit diesem Jahr mit dem *weather research and forecast model* (WRF) simulierte Winddaten für verschiedene, windenergierelevante Höhen für ganz Europa im New European Wind Atlas vor [5].

Bei Simulationen kommen zusätzlich zu *Large Eddy Simulationen* (LES) auch *Computational Fluid Dynamics* (CFD) und *Detached-Eddy Simulationen* (DES) zum Einsatz. DES sind eine Kombination aus LES und *Reynolds Averaged Navier Stokes Modellen* (RANS), letztere sind jedoch sehr rechenintensiv. Durch die Kombination von LES und RANS erreicht man eine höhere Genauigkeit im Vergleich zur reinen LES-Simulation, was für Nachlaufsimulationen oder für Standorte im bergig-komplexen Gelände Vorteile bringen können.

Die zunehmende Kenntnis von Windströmungen vor und hinter einer WEA hilft auch bei der Bestimmung von Schallausbreitung. Eine situationsabhängige Schallbeurteilung (anstelle von starren Grenzwerten) erlaubt eine ertragreichere Stromproduktion oder eine bessere Nutzung der Flächen bei gleichzeitig besserer Akzeptanz. Messungen im Umfeld von WEA haben zum Beispiel die Veränderungen des Schallpegels in Zusammenhang mit Wettersituationen verdeutlicht [6]. Der Nachweis durch Messungen und Modellrechnungen, wie stark der Schallpegel unter bestimmten Wettersituationen bei den Anwohnern reduziert werden kann, erlaubt hier eine höhere Flexibilität. Die bisherigen Methoden (ISO 9613-2) sind diesbezüglich noch nicht verlässlich genug. Nur mithilfe von simulierten Schallausbreitungsrechnungen kann man diesen Einfluss gezielt nachweisen

Abbildung 3
Windmessungen mit Lidar:
 Verbund aus synchronisierten Lidar-Scannern und einem Lidar-Profilier
 Quelle: ZSW



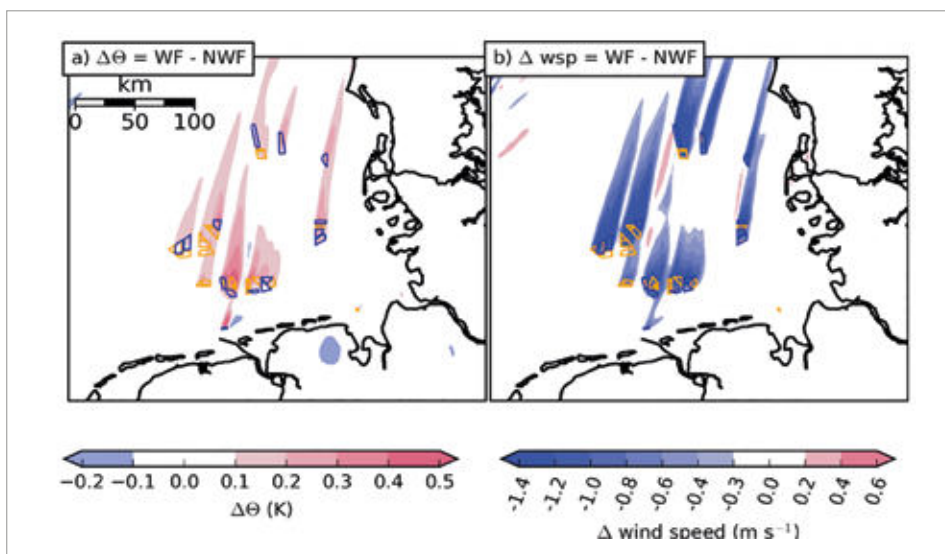


Abbildung 4
Einfluss von WEA auf Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
 Quelle: KIT, Projekt WIPAFF

und beziffern. Messtechnisch ist es nicht möglich, diesen Anteil der Lärmbelastung aus der Gesamtlärmbelastung herauszufiltern.

Neben der technischen Dimension sind Schallaspekte insbesondere aus Akzeptanzsicht eine wichtige Einflussgröße. Das Ausmaß der Lärmbelastung hängt neben den messbaren akustischen Größen – also der Geräuschbelastung – von zahlreichen nicht-akustischen Faktoren ab, wie z.B. der Einstellung zur Geräuschquelle oder der wahrgenommenen Fairness des Planungsverfahrens. In diesem Zusammenhang spielt das Verfahrenswissen eine große Rolle, welches potenzielle Unsicherheiten minimiert, die konfliktverschärfend wirken können. Hierzu zählen insbesondere Fragen nach den Grenzwerten der TA Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm), deren Messung und Überprüfung bei Genehmigung und Betrieb von WEA. In diesem Zusammenhang ist das Vertrauen in den Projektierer bzw. Betreiber, die Genehmigungsbehörden und in das Genehmigungs- bzw. Monitoringverfahren ein relevanter Parameter. Um das Verfahrenswissen zu erhöhen und einen Raum für einen moderierten sachlichen Austausch zu bieten, sind Dialogverfahren ein wichtiger Lösungsansatz. Hierfür gibt es aktuell verschiedene Beispiele, z.B. das Forum Energiedialog in BaWü (FED), das Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (KNE) oder den Winddialog Saar.

2a. Materialien in Rotorblättern

Alle modernen Rotorblätter folgen einem ähnlichen strukturellen Ansatz (► *Abbildung 5*). Die unterschiedlichen Biegemomente werden von den Holmgurten aus Faserverbundwerkstoffen, den Stegen und durch die Blattnase und Endkante übernommen. Dabei verwenden sowohl die Holmgurte als auch häufig die Laminare im Blattendkantenbereich unidirektionale Fasern. Die Stege und die aerodynamische Hülle der Blattstruktur werden typischerweise mit Sandwichaufbauten realisiert, die aus Kernwerkstoffen (Balsa-holz, PET-Schäume oder PVC-Schäume) und vergleichsweise dünnen Laminaten bestehen.

In Rotorblättern kommen heute im Wesentlichen *glasfaserverstärkte Kunststoffe* (GFK) zum Einsatz, die einen guten Kompromiss zwischen Kosten und spezifischen mechanischen Eigenschaften darstellen. Da die Durchmesser von WEA zunehmen, steigen die Blattlänge und überproportional auch die Rotorblattmassen. Damit erhöhen sich aber auch die statischen und insbesondere dynamischen Lasten an den Rotorblättern und die Beanspruchungen im Blattanschlussbereich deutlich.

Durch den gezielten Einsatz von *kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff* (CFK) in den Holmgurten konnten bereits in der Vergangenheit größere Rotorblätter

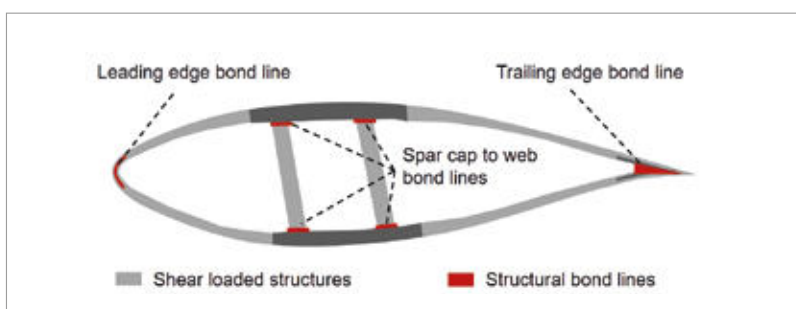


Abbildung 5:
Beispiel für eine typische Rotorblattstruktur
 [Quelle: IWES]

Abbildung 6
**Beispiel für eine
 Blattprüfung**
 Quelle: IWES



gebaut werden. *Faser Metall Laminate* (FML) am Blattwurzelanschluss stärken die Verbindungsbereiche („Lochleibungsfestigkeit“), und mit Nanopartikeln modifizierte Faserverbunde die Risshemmung [7]). Diese neuen Materialsysteme können sowohl in endlosfaserverstärkten Laminaten der Rotorblätter als auch in den benötigten Klebstoffen zum Fügen der Ober- und Unterschale eingesetzt werden. Die bisherigen Fasermaterialien werden zum Verkleben hauptsächlich mit einer Epoxidharzmatrix kombiniert. Es gibt aber auch Bestrebungen, Polyurethane als Matrixmaterial zu verwenden. Eine vereinfachte Aushärtung und eine niedrigere Viskosität sind die Vorteile dieses Materials [8]. Durch Materialuntersuchungen und Ganzblattprüfungen werden die Werkstoffe und Strukturen immer besser verstanden, die Simulationswerkzeuge verbessert und Unsicherheiten im Design reduziert (► **Abbildung 6**).

2b. Bauweisen und Produktion

Die heutige Produktion von Rotorblättern für Windkraftanlagen ist immer noch überwiegend von der konventionellen zweischaligen Bauweise geprägt. Die zwei Halbschalen werden dabei in zwei separaten Werkzeughälften gefertigt und anschließend verklebt.

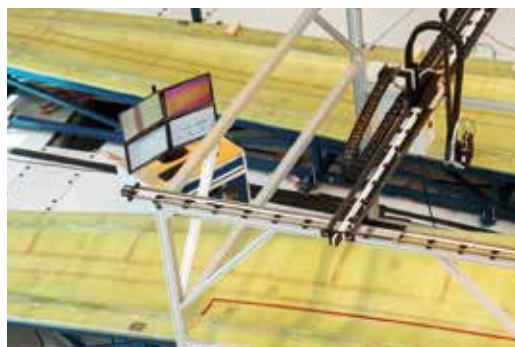


Abbildung 7
**Optische Messzelle
 im Einsatz an einer
 Rotorblattform**
 Quelle: DLR

Ein verbreitetes Konzept ist die Fertigung mit Hilfe von *Prefab*-Bauteilen (in separaten Formwerkzeugen vorab gefertigt), die als ausgehärtetes Faserverbundbauteil in die jeweilige Formwerkzeughälfte eingelegt werden. Zu den Bauteilen, die im *Prefab*-Verfahren gefertigt werden, zählen unter anderem die Gurte und die Stege, die vor der Verklebung der beiden Halbschalen auf eine der beiden Halbschalen laminiert werden. Für deren Herstellung wird inzwischen immer häufiger *Pultrusionstechnologie* (Strangziehverfahren) eingesetzt, um hohe Faservolumenanteile und sehr genaue Faserausrichtungen zu erhalten. Die *Preforms* aus Faserhalbzeugen werden in den Formen überwiegend durch vakuumunterstützte Harzinfusionsverfahren mit Harz getränkt. Zur Aushärtung des Harzes wird mit beheizten Formwerkzeugen gearbeitet.

Neue Verfahren in der Rotorblattproduktion konzentrieren sich insbesondere auf Qualitätsverbesserungen, das Erreichen einer gleichmäßigeren Qualität (geringere Fertigungstoleranzen) und geringere Produktionskosten durch Materialeinsparungen und einen besseren Personaleinsatz.

Beispiele für solche Entwicklungen sind das Verkleben und das Schleifen von Rotorblattoberflächen, bei dem der Klebstoff bedarfsgerecht aufgetragen wird [9]. Eine Optimierung der Bauweisen und Fertigungsverfahren hinsichtlich einer verbesserten oder automatisierten Fertigung muss dabei schon beim Design der Rotorblätter beginnen (Design for Production). Des Weiteren wird an Technologien geforscht, die eine berührungslose Überwachung der Bauteilqualität während der Fertigung erlauben (► **Abbildung 7**). Hierzu wird zum Beispiel eine Messbrücke entwickelt und prototypisch umgesetzt, die mit unterschiedlichen optischen Sensoren ausgestattet ist und die Messung von Prozessparametern wie der Fließfrontposition des Harzes, der Bauteiltemperatur sowie der

Bauteildicke erlaubt. Auch die Bilddokumentation des Baufortschritts ist möglich. Die Messbrücke ist auf einem Schienensystem montiert und über die gesamte Länge der Rotorblattform verfahrbar.

Im Projekt SmartBlades 2 (► *Abbildung 8*) wurden vier Rotorblätter nach dem jetzigen Industriestandard gefertigt und jeder Arbeitsschritt hinsichtlich seines Automatisierungspotenzials untersucht. Ein wesentlicher Aspekt der Untersuchung war dabei die Wirtschaftlichkeit geeigneter Automatisierungskonzepte und deren Machbarkeit [10]. Kostentreiber bei der Rotorblattproduktion sind die verwendeten Fertigungsmaterialien wie Glas- bzw. Kohlefaserhalbzeuge. Besondere Anforderungen liegen hier bei der Qualitätssicherung der Produktion um die Sicherheitsfaktoren zu senken und somit Gewicht und Materialkosten zu reduzieren.

Quellenangaben

- [1] Emeis, S. (2010): Measurement Methods in Atmospheric Sciences. In situ and remote. In: Quantifying the Environment, Vol. 1. Borntraeger Stuttgart.
- [2] Lutz, T., Schulz, C., Letzgus, P., and Rettenmeier, A. (2017): Impact of Complex Orography on Wake Development: Simulation Results for the Planned WindForS Test Site. In: Journal of Physics, Conference Series, Volume 854.
- [3] Bradley, S., A. Strehz, S. Emeis (2015): Remote sensing winds in complex terrain – a review. In: Meteorologische Zeitschrift, 24, 547-555.
- [4] Wildmann, N., Hofsäb, M., Weimer, F., Joos, A., and Bange, J. (2014): MASC – a small Re-motely Piloted Aircraft (RPA) for wind energy research. In: Advanced Science Research, 11, 55-61.
- [5] Wildmann, N., Bodini, N., Lundquist, J. K., Bariteau, L., and Wagner, J. (2019): Estimation of turbulence parameters from scanning lidars and in-situ instrumentation in the Perdigão 2017 campaign. In: Atmospheric Measurement Techniques Discussion, in review.
- [6] LIPS Projekt: [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=Deutsches%20Zentrum%20f%C3%BCr%20Luft-%20und%20Raumfahrt%20e.V.%20\(DLR\)&m=2&id=661486&p=13&s=14&v=10](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=Deutsches%20Zentrum%20f%C3%BCr%20Luft-%20und%20Raumfahrt%20e.V.%20(DLR)&m=2&id=661486&p=13&s=14&v=10)
- [7] Exner, W., Hein, R., Mahrholz, Th., Wierach, P., Monner, H.P., Sinapius, M. (2018): Impact of nanoparticles on the process-induced distortions of carbon fiber reinforced Plastics: An experimental and simulative approach. In: Journal of Applied Polymer Science, 135, 47031.
- [8] Arash, B., Exner, W., Rolles, R. (2019): A viscoelastic damage model for nanoparticle/epoxy nanocomposites at finite strain: A multiscale approach. In: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 128, 162-180.
- [9] Schmidt, S., Mahrholz, Th., Kühn, A., Wierach, P. (2019): Powder binders used for the manufacturing of wind turbine rotor blades. Part 2. Investigation of binder effects on the mechanical performance of glass fiber reinforced polymers. In: Journal of Composite Materials, 53 (16), 2261-2270.
- [10] <https://www.forschungsverbund-windenergie.de/en/joint-projects/smart-blades-2-en>



Abbildung 8
Fertigung eines Testrotorblattes im Projekt SmartBlades 2
 Quelle: IWES