



# Windenergie

Die Idee der guten alten Windmühle lebt in modernen Windenergieanlagen weiter. Heutige Anlagen sind absolute Hightech-Produkte. Dank innovativer Materialien, spezieller Stromgeneratoren und ausgefeilter Anlagenelektronik entstammt immer mehr unseres Stroms der Kraft des Windes.

## ÜBERBLICK

Heute sind Windenergieanlagen Hightech-Produkte, die den Vergleich zum Flugzeugbau nicht scheuen müssen. Dabei blickt die Nutzung der Windenergie in Europa auf eine lange Tradition zurück. Bereits im 12. Jahrhundert wurden die ersten Windmühlen (Bockwindmühlen) mit drehbarem Mühlhaus errichtet. Die technologische Weiterentwicklung mit einer drehbaren Turmkappe fand in den Niederlanden mit der „Holländerwindmühle“ im 15. Jahrhundert statt. Mitte des 19. Jahrhunderts waren in Deutschland ca. 20.000 Windmühlen in Betrieb; im Jahr 2007 liefen zum Vergleich 19.000 moderne Windenergieanlagen.

Für die Niederlande waren im 17./ 18. Jahrhundert die 9.000 Windmühlen „Motor“ des Wirtschaftsaufschwungs. Man hat sie zur Bodenentwässerung, in Sägefabriken und in Hammerwerken eingesetzt. Die erste industrielle Massenfertigung von Windenergieanlagen (WEA) erfolgte in den USA: Von 1860 bis 1930 wurden ca. 6 Mio. WEA („Westerräder“) für Grundwasserpumpen verkauft. Weltweit begann der Niedergang der mechanischen Windenergienutzung mit der Dampfmaschine, der Konkurrenz des billigen Diesels und der Elektrifizierung des ländlichen Raums.

Die moderne Windkraftnutzung begann 1891 in Dänemark. Geschützt durch die hohen Energiepreise während des 1. Weltkrieges waren später dann etwa 120 kleine Anlagen in Betrieb. In den 1920er Jahren wurden in Dänemark, der UdSSR und Deutschland die Forschungen fortgesetzt; in den USA ging 1941 die erste



**Abb. 1**

Entwicklung der Anlagentechnik 1980 – 2007 (Quelle: S. Heier, Uni Kassel; BINE) (Hintergrundfoto: panthermedia.net)

Großanlage in die netzgebundene Stromerzeugung. Nach dem 2. Weltkrieg sanken die Energiepreise und das Interesse an der Windenergie. Von 1958 – 1968 war auf der Schwäbischen Alb eine 100-kW-Anlage in Betrieb, die bereits über aerodynamische Rotorblätter aus Glasfaserverbundmaterial mit Pendelnabe verfügte.

Infolge der beiden Ölpreiskrisen und des wachsenden Umweltbewusstseins begann ab 1975 weltweit das Comeback der Windenergie. Gefördert durch eine günstige Steuergesetzgebung wurden in den USA (Kalifornien) in den 1980er Jahren ca. 16.000 WEA mit einer Nennleistung von 1.500 MW errichtet, etwa die Hälfte der Anlagen waren Importe aus Dänemark. Dies in Verbindung mit einer

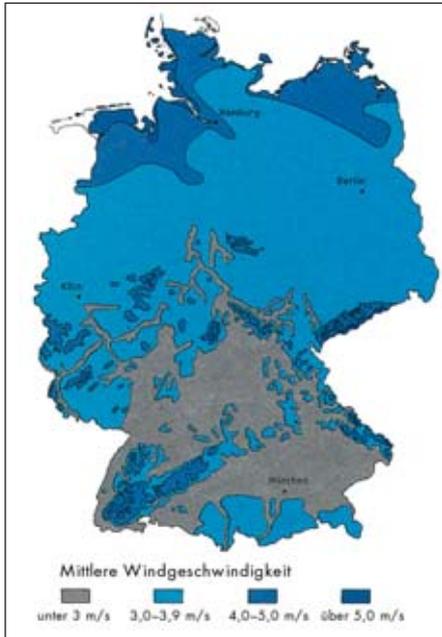
stabilen Binnennachfrage trug zum raschen Aufbau der dänischen Windindustrie bei. In Deutschland begann der bis heute andauernde Boom in den 1990er Jahren. Zu dieser Entwicklung haben die öffentliche Forschungsförderung und die wirtschaftlich verlässlichen Einspeisetarife für Strom aus erneuerbaren Energien beigetragen. Mittlerweile stehen in Deutschland die meisten Anlagen weltweit, aus der Windenergie kommt bereits 6,5% unseres Stroms (2006) und die Herstellerfirmen beschäftigen mehr als 60.000 Menschen.

### ZENTRALE BEGRIFFE

- > Windmühle
- > Windenergieanlage

# WIND IST SONNENERGIE

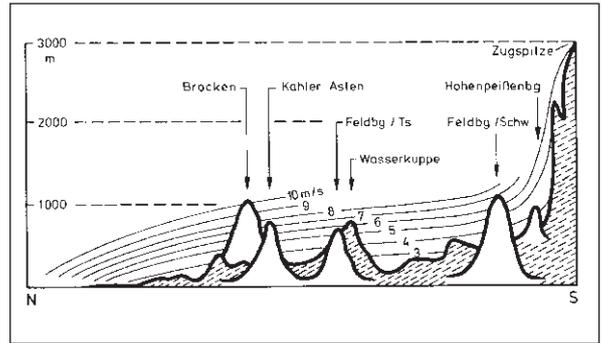
Die Sonneneinstrahlung erwärmt die Erdoberfläche und die darüber liegenden Luftmassen. Die Einstrahlung ist je nach geografischer Region (z. B. Äquator, Polgebiete) verschieden stark. Landflächen erwärmen tagsüber stärker und kühlen nachts schneller ab als Wasserflächen. Über stark erwärmten Regionen steigt die Luft auf und es entstehen Tiefdruckgebiete, während



**Abb. 2** Verteilung der Windgeschwindigkeit in Deutschland

Hochdruckgebiete sich in kühleren Regionen bilden. Die Luft strömt von Hoch- zu Tiefdruckgebieten – es entsteht Wind.

Die örtlichen Windverhältnisse hängen von der geografischen Lage ab. Über Wasserflächen und Tiefebene ohne Hindernisse werden höhere Windgeschwindigkeiten erreicht als im Binnenland. In Deutschland beträgt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit, standardmäßig gemessen in 10 m Höhe, an der Nordseeküste 6 m/s, während in Obersdorf nur 1 m/s gemessen wurden. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Geländerauigkeit. Der Wind folgt in seinem Strömungsverhalten der Erdoberfläche, d. h. durch Hügel, Berge, Bauwerke und Wälder steigt er auf. Hinter derartigen Hindernissen entstehen für Windenergieanlagen ungünstige Luftturbulenzen und Schwachwindgebiete („Lee“). Für die Stromerzeugung nutzbar wird die Windenergie ab einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 3 – 4 m/s. Die Windgeschwindigkeit nimmt mit steigender Höhe zu. An der Nordseeküste steigt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit beispielsweise von 6 m/s in 10 m Höhe auf 6,5 – 7 m/s in 30 m Höhe. Angesichts von heute üblichen Masthöhen von bis zu 160 m



**Abb. 3** Linien gleicher Windgeschwindigkeit im Nord-Süd-Querschnitt

werden auch an vielen Binnenstandorten Windgeschwindigkeiten erreicht, die den Windverhältnissen an den Meeresküsten nahe kommen. Gute Windgebiete in Deutschland sind die Küstenbundesländer, die Küstentiefen und exponierte Lagen der Mittelgebirge. Vor der Errichtung einer Windenergieanlage braucht man genaue Kenntnisse der lokalen Windverhältnisse über einen längeren Zeitraum. Dazu werden die Windgeschwindigkeiten in niedrigen Höhen gemessen und auf die geplante tatsächliche Nabenhöhe hochgerechnet.

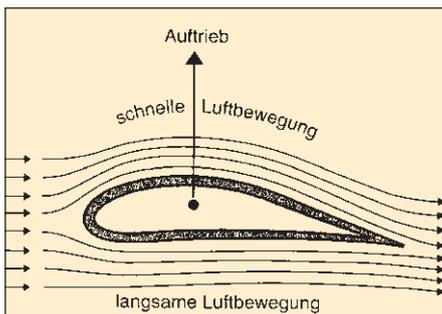
## ZENTRALE BEGRIFFE

- > Luftströmungen
- > Windgeschwindigkeit
- > Masthöhe

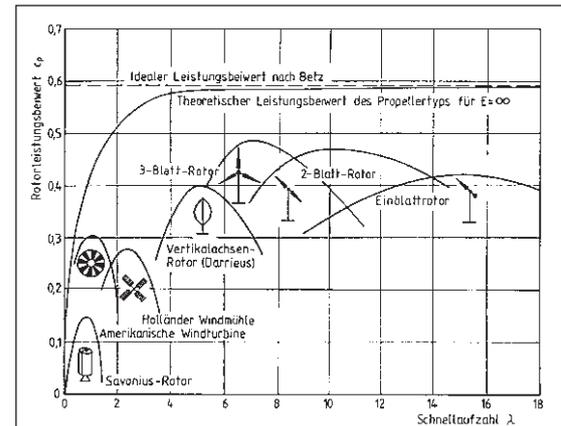
# WIND IST POTENZIELL ERTRAGREICH

Die Leistung (P) einer Windenergieanlage (WEA) wird durch folgende Formel beschrieben:  $P = c_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot F$ . Dabei ist  $c_p$  der Leistungsbeiwert,  $\rho$  ist die Luftdichte,  $v$  die Windgeschwindigkeit und  $F$  die Rotorfläche. Der entscheidende Faktor ist die in dritter Potenz in diese Formel einfließende Windgeschwindigkeit. Eine Verdopplung der Windgeschwindigkeit führt zu einer achtfachen Leistung. Ist die tatsächliche Windgeschwindigkeit an einer Anlage 10% geringer als die im Vorab-Gutachten prognostizierte, beträgt die Leistungseinbuße 27%. Der Leistungsbeiwert gibt an,

welchen Teil der im Wind enthaltenen kinetischen Energie durch eine Windenergieanlage genutzt wird. Ein 100% Entzug der kinetischen Energie ist nicht möglich. Das theoretisch berechnete Maximum für frei umströmte Rotoren liegt bei 59,3%, in der Praxis haben Windenergieanlagen mit Horizontalachse den sogenannten Leistungsbeiwert zwischen 40 und 50%. Nutzungsmöglichkeiten der Windenergie sind das Widerstands- und das Auftriebsprinzip. Widerstandsläufer nutzen den Luftwiderstand der Rotorblätter aus, der abhängig ist von der Windgeschwindigkeit und der Größe der Fläche. Derartige Anlagen drehen wegen ihrer großen Rotorfläche bei niedrigen Windgeschwindigkeiten an, haben bei höheren Windgeschwindigkeiten starke Strömungsverluste (maximaler Leistungsbeiwert ~ 20%) und dienen z. B. zum Antrieb von Wasserpumpen. Windenergieanlagen nach dem aerodynamischen Auftriebsprinzip nutzen aus, dass ein Auftrieb erfolgt, wenn eine Luftströmung einen konvex geformten Rotor umströmen muss. Die Geschwindigkeitsdifferenz des durch den Rotor „geteilten Luftstroms“ führt zu Druckdifferenzen und damit zum Antrieb.



**Abb. 4** Die Entstehung des Auftriebs (Quelle: HEW)



**Abb. 5** Leistungskennlinien von Windrotoren unterschiedlicher Bauart (Quelle: Hau)

Derartige Anlagen benötigen höhere Windgeschwindigkeiten zum Andrehen, erreichen einen höheren Leistungsbeiwert und werden zur Stromerzeugung eingesetzt.

## ZENTRALE BEGRIFFE

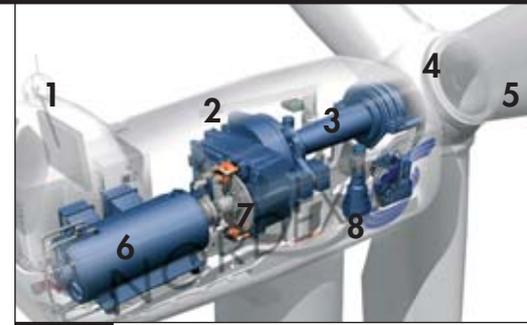
- > Windgeschwindigkeit
- > Strömungsverhalten
- > Aerodynamik

Übliche Standardanlagen zur netzgekoppelten Stromerzeugung nutzen das aerodynamische Auftriebsprinzip, haben eine horizontale Achse mit 3 Rotorblättern aus glas- oder kohlenfaserverstärkten Kunststoffen in Leichtbauweise und stehen auf 50 – 160 m hohen Turmbauten. Die Anlagen verfügen heute meist über Systeme zum Blitzschutz, zur automatischen Fehlerfrüherkennung, Leistungsüberwachung und Regelung und stehen üblicherweise in Windparks. Man rechnet bei den Anlagen mit mindestens 20 Jahren Lebensdauer. Eine heute mögliche Anlage mit 3.000 kW Nennleistung erzeugt je nach Standort 6 – 10 Mio. kWh/a Strom, mit dem man etwa 2.000 – 3.000 Privathaushalte versorgen kann. Windenergieanlagen wandeln mechanische in elektrische Energie um. Die meisten Windenergieanlagen arbeiten mit Getrieben. Damit werden die 5 – 20 Umdrehungen pro Minute eines Rotors auf die vom Generator zur Stromerzeugung benötigten 1.000 – 1.500 Umdrehungen pro Minute übersetzt. Das zweite Anlagenkonzept sind die getriebelosen Anlagen. Hier treibt der Rotor einen speziellen Ringgenerator mit großem Durchmesser direkt an, der auf 8 – 30 Umdrehungen pro Minute ausgelegt ist und über einen

zwischen geschalteten Gleichstromkreis mit Wechselrichter arbeitet. Getriebeanlagen haben mehr bewegte Teile und sind damit fehleranfälliger als getriebelose, auf der anderen Seite sind sie aber insgesamt deutlich leichter und kleiner.

Die Rotorblätter drehen ab einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s an und ab etwa 12 – 15 m/s erreichen die Generatoren die Nennleistung, die sie dann auch bei höheren Windgeschwindigkeiten konstant beibehalten. Heutige Anlagen können dank leistungsfähiger Regeltechnik auch bei Windgeschwindigkeiten oberhalb von 25 m/s (Starkwind, Sturm) weiterarbeiten und erst bei starkem Sturm werden die Anlagen netzverträglich herabgeregelt. Ein wirtschaftlich entscheidender Wert sind die Jahresvolllaststunden, d. h. die berechnete Zeit im Jahr, in der ein Generator die volle Nennleistung erbringt. Dabei erreichen die Anlagen an Land etwa 2.000, direkt an der Küste 3.000 und auf See (offshore) werden 4.000 Volllaststunden erwartet.

Bei Windenergieanlagen gibt es zur Leistungsregelung und zum Schutz vor Überlastungen zwei verschiedene Konzepte: Bei pitchgeregelten Anlagen werden die Blätter mittels einer Blattverstellvorrichtung dreh-



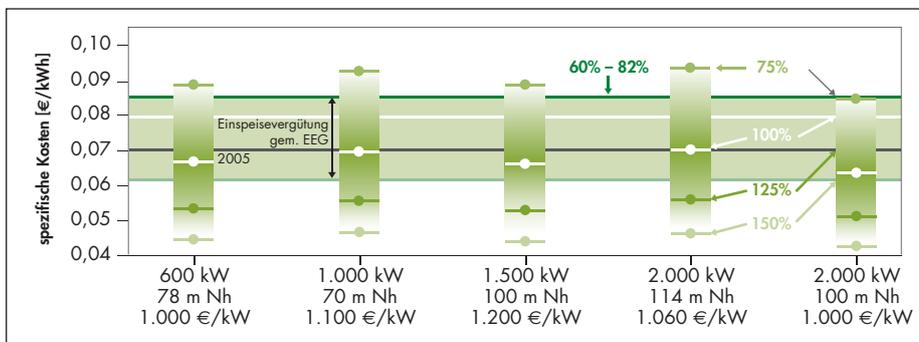
**Abb. 6** Schnitt durch eine WEA (Quelle: Nordex AG)  
 1) Windmesseinrichtung, 2) Getriebe, 3) Hauptwelle, 4) Rotor-Nabe, 5) Rotorblatt, 6) Generator, 7) Scheibenbremse, 8) Windnachführung.

zahlabhängig der Windstärke angepasst. Durch die aktive Blattverstellung bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten wird die Energieausbeute optimiert. Bei stallgeregelten Anlagen trifft der Luftstrom bei zu starken Windgeschwindigkeiten in einem Winkel auf das Rotorblatt, der zum Abbruch der Auftriebskräfte (Strömungsabriss) u.a. durch Turbulenzen führt.

### ZENTRALE BEGRIFFE

- > Standardanlage
- > Generatorkonzepte
- > Volllaststunden

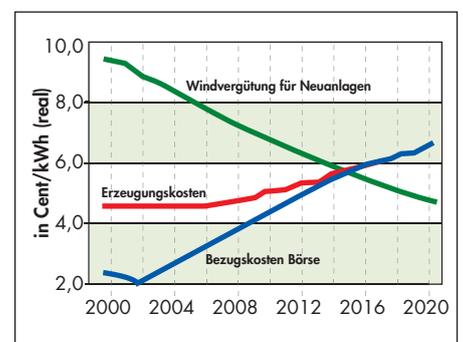
# WIRTSCHAFT & ZUKUNFT



**Abb. 7** Vergleich der Stromgestehungskosten unterschiedlicher Anlagengrößen (Quelle: ISET). Man sieht in den Säulen die Spannweite der Kosten für die 2004 am häufigsten installierten Anlagengrößen und im horizontalen grünen Band den Bereich der gesetzlich garantierten Vergütung (EEG).

Die Windenergie steuerte zu Beginn der 1990er Jahre wenige Promille zur Stromversorgung bei und dieser Wert stieg bis Ende 2006 auf 6,5% an. Prognosen über den weiteren Ausbau der Windenergie in Deutschland halten für das Jahr 2030 einen Anteil von bis zu 25% Windstrom am deutschen Stromverbrauch für möglich. Eine der heutigen neuen Großanlagen (5.000 kW) erzeugt an einem Tag rechnerisch die Strommenge, für die eine der vor 20 Jahren üblichen Anlagen noch ein Jahr gebraucht hat. Zukünftig können die knapper werdenden möglichen Standorte für Anlagen besser genutzt werden. Durch den Ersatz älterer Kleinanlagen durch moderne Großanlagen (Repowering) besteht in den Küstenbereichen sogar die Chance, mehr Windstrom zu pro-

duzieren, gleichzeitig die Zahl der Anlagen zu reduzieren und die Standorte neu zu ordnen. In Zukunft werden Windparks auch im küstennahen Meer (Offshore Anlagen) errichtet, da dort ideale Windverhältnisse herrschen, die hohe Erträge versprechen. Der erfolgreiche Aufbau der Windenergie in Deutschland wurde durch die seit 25 Jahren kontinuierliche Forschungsförderung sowie die verlässlichen Einspeisetarife für Strom aus erneuerbaren Energien (seit 2000: Erneuerbare-Energien-Gesetz) ermöglicht. Diese Gesetze regeln bis heute die Abnahme des Windstroms durch die Stromwirtschaft und eine Mindesthöhe der Vergütung. Diese ist degressiv angelegt, so nimmt von Jahr zu Jahr die Mindestvergütung entsprechend dem zu erwartenden technischen Fortschritt ab.



**Abb. 8** Entwicklung der Windstromvergütung und Preise konventionellen Stroms (Quelle: Bundesverband erneuerbare Energien)

Auch wirtschaftlich hat die Windenergie Fortschritte zu verzeichnen. Im Vergleich zu 1990 konnten die Stromgestehungskosten, also der Preis zu dem Windstrom erzeugt wird, um ca. 60% gesenkt werden. Abhängig von der Entwicklung der Energiepreise besteht die Perspektive, dass Windstrom um das Jahr 2015 billiger werden könnte als Strom aus konventionellen Kraftwerken. Mittlerweile gehen ca. 70% der in Deutschland produzierten Anlagen in den Export.

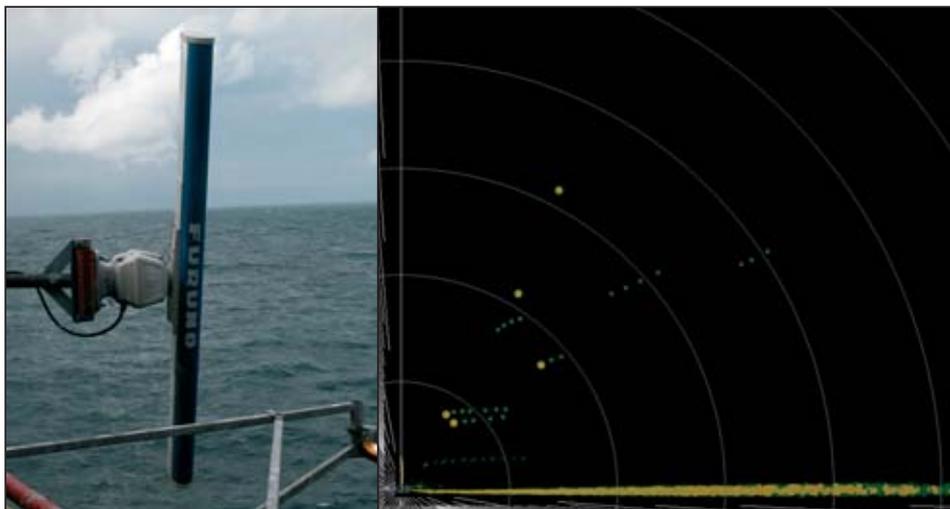
### ZENTRALE BEGRIFFE

- > Potenzial
- > Wirtschaftlichkeit
- > Stromgestehungskosten

Windenergie zählt zu den erneuerbaren Energien, d. h., sie steht aus menschlicher Perspektive ohne zeitliche Begrenzung zur Verfügung. Moderne Anlagen erzeugen im Küstenbereich nach 3 – 4 Monaten bzw. im Binnenland nach 6 – 7 Monaten bereits soviel Energie wie zu ihrer Herstellung aufgewendet worden ist. In 20 Jahren erntet eine Windenergieanlage 40 – 70-mal mehr Energie als sie selbst bei Herstellung „gekostet“ hat. Während dieser Zeit erspart sie der Umwelt weitere CO<sub>2</sub>-Belastungen und trägt zum Klimaschutz bei.

In den letzten Jahren haben Forschungseinrichtungen und Unternehmen daran gearbeitet, negative Umweltauswirkungen der Anlagen zu reduzieren. Durch die heutigen Großanlagen in Windparks werden die einzelnen Standorte besser genutzt, sodass andere Flächen frei bleiben können. Außerdem stehen am Standort die Flächen rund um ein Anlagenfundament (15 x 15 m) weiterhin der Landwirtschaft oder der Natur zur Verfügung. Die heute üblichen Großanlagen wirken auch optisch ruhiger, da ihre Rotoren geringere Umdrehungszahlen pro Minute aufweisen als bei den kleineren Anlagen früherer Jahre. Mattierte Lacke reduzieren störende Reflexionen des Sonnenlichts.

Für den Vogel- und allgemeinen Artenschutz stellen Windenergieanlagen an Land kein großes Problem dar, wobei es aber wenige besonders betroffene Arten gibt. Untersuchungen zeigen, dass im Schnitt pro Anlage und Jahr in Deutschland mit einem toten Vogel gerechnet werden muss. Zum Vergleich: Jährlich fallen in Deutschland Millionen Vögel dem Straßenverkehr, Hochspannungsmasten oder Glasflächen zum Opfer. Im Offshore-Bereich sind die entsprechenden Untersuchungen noch nicht abgeschlossen. Beim Ausbau der Windenergie ist der Schutz der Natur eine wichtige Anforderung. Daher sollen keine Anlagen in der Nähe von Brut- und Rastgebieten, von Feuchtgebieten und Vogelzuglinien ausgewiesen werden.



**Abb. 9** Der Offshorebereich ist aktuell ein Schwerpunkt der ökologischen Begleitforschung. Auf der Forschungsplattform FINO I (45 km nördlich Borkum) wird der Vogelzug über der Nordsee mit Radar beobachtet. Rechts ein damit aufgenommenes Radarbild mit ziehenden Vögeln (Maßstab: Ein Ring sind 25 nautische Meilen) (Quelle: Institut für Vogelforschung „Vogelwarte Helgoland“)

## ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Heier, S.: Nutzung der Windenergie. FIZ Karlsruhe. BINE Informationsdienst, Bonn (Hrsg.). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2012. 160 S., 6., vollst. überarb. Aufl., ISBN 978-3-8167-8607-8, BINE-Fachbuch

Das Bundesumweltministerium bietet über das Portal [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de) aktuelle Informationen. Auf dieser Seite sind auch u. a. Unterrichtsmaterialien über erneuerbare Energien (Stichwort: Bildungsmaterialien) eingestellt. Das BMU fördert zum Thema Energie weiterhin auch die Portale [www.unendlich-viel-energie.de](http://www.unendlich-viel-energie.de) sowie für Kinder und Jugendliche [www.powerado.de](http://www.powerado.de) als spezielles Angebot.

## ▼ Herausgeber

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

## ▼ Autor

Uwe Milles

## ▼ ISSN

1438-3802

## ▼ Nachdruck

Nachdruck des Textes zulässig bei vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares – Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung der jeweils Berechtigten.

## ▼ Stand

Dezember 2007

## BINE Informationsdienst Energieforschung für die Praxis

BINE Informationsdienst berichtet zu Energieeffizienztechnologien und Erneuerbaren Energien.

In kostenfreien Broschüren, unter [www.bine.info](http://www.bine.info) und per Newsletter zeigt die BINE-Redaktion, wie sich gute Forschungsideen in der Praxis bewähren.

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

### Kontakt

Fragen zu diesem **basisEnergieinfo**?  
Wir helfen Ihnen weiter:

**Tel. 0228 92379-44**



FIZ Karlsruhe, Büro Bonn  
Kaiserstraße 185 – 197  
53113 Bonn

[kontakt@bine.info](mailto:kontakt@bine.info)  
[www.bine.info](http://www.bine.info)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages