



Virtuelle Akademie **Nachhaltigkeit**

# Aktuelle Windenergieanlagen – Technik und Konzepte

## Episode 1: Grundlagen der Windenergie und WEA

Matthias Brandt, Vorstand  
Deutsche Windtechnik AG

 **Universität Bremen**  
**\*EXZELLENT.**

**ZMML**  
Zentrum für Multimedia  
In der Lehre

**DBU** 

Deutsche Bundesstiftung Umwelt



Veranstaltung: Technik, Energie und Nachhaltigkeit *erstellt und gefördert durch*



# Übersicht der Lerneinheit

## Episode 1: Grundlagen der Windenergie und Windenergieanlagen (WEA)

Episode 2: Technik und Konzepte

Episode 3: Interview mit dem Referenten



## Lernziele dieser Episode

### Lernziel 1:

Sie können den Aufbau einer Windenergieanlage wiedergeben.

### Lernziel 2:

Sie kennen die verschiedenen Bauteile der WEA und können deren Aufgaben erklären.

### Lernziel 3:

Sie sind in der Lage, den Zusammenhang zwischen physikalischen Kräften und der Windenergie herzustellen und zu reflektieren.



# Formen der Windenergie: Offshore & Onshore



(Dingley, 2014)



Unterschiede, Ausbau, Potenziale ...



## Formen der Windenergie: Offshore & Onshore

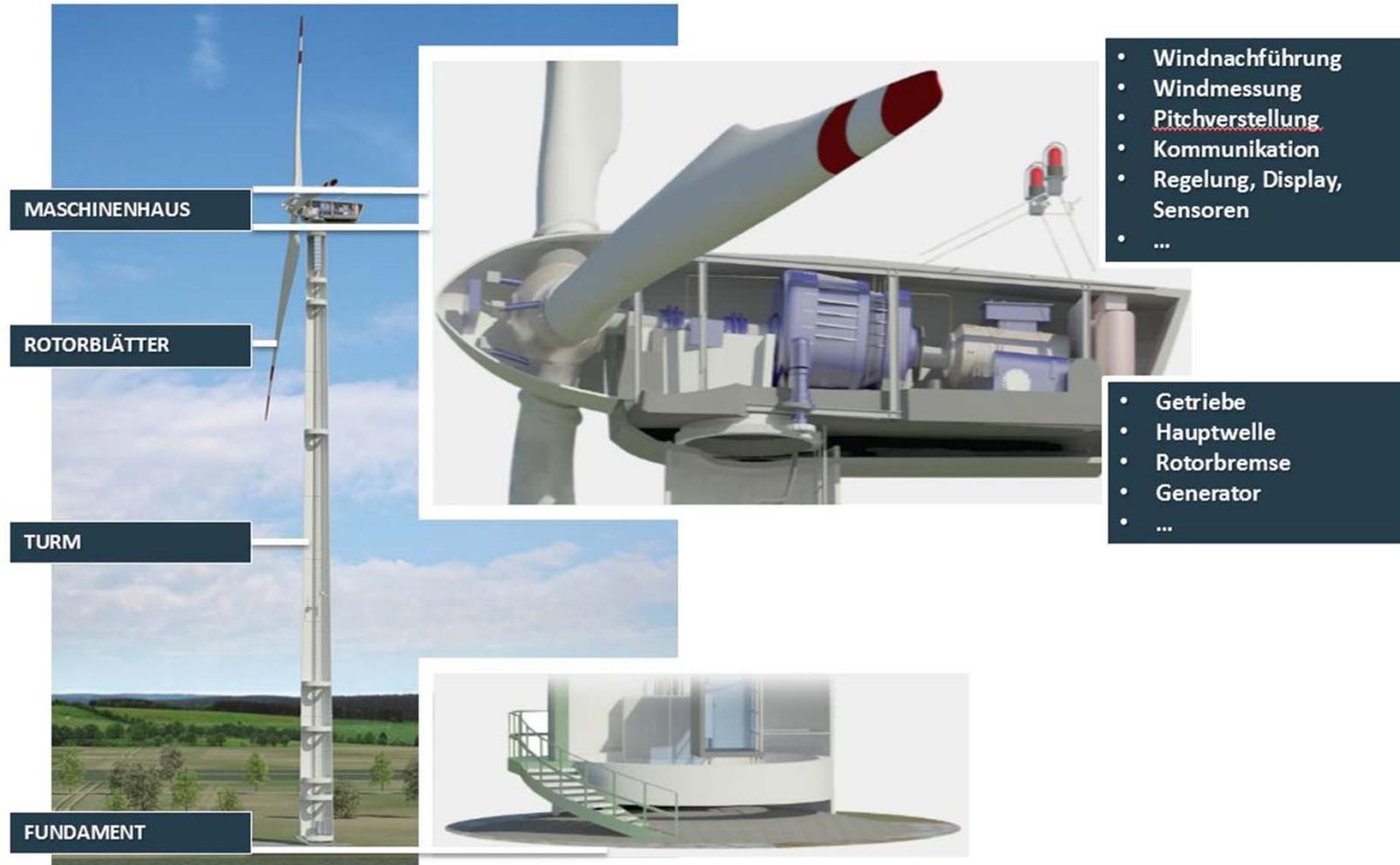
	Vorteile	Nachteile
Offshore	<ul style="list-style-type: none"><li>• Höhere Windgeschwindigkeiten</li><li>• Mehr Volllaststunden</li><li>• Geringere Turmhöhen</li><li>• Großes Platzangebot</li><li>• Keine Beeinträchtigungen für den Menschen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zugänglichkeit</li><li>• Korrosionsgefährdende Umgebung</li><li>• Entfernung zum Verbraucher</li></ul>
Onshore	<ul style="list-style-type: none"><li>• Erreichbarkeit</li><li>• Errichtungskosten</li><li>• Nähe zum Verbraucher</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• geringere Windgeschwindigkeiten</li><li>• Schwindendes Platzangebot</li></ul>

➤ Offshore und Onshore stehen nicht in Konkurrenz sondern ergänzen einander!

**Unterschiede:** Externe Bedingungen an Technik, Ausrüstung, Material und Personal sowie variierende Windausbeuten zählen zu den grundlegenden Unterschieden



# Aufbau der Windenergieanlage



Quelle: Eigene Darstellung



# Aufbau der WEA: Fundament / Gründung



(Groupsixty, 2014)

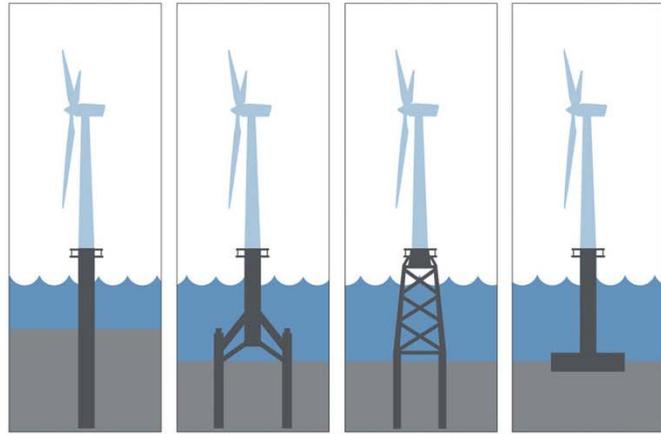
**Onshore**



(Treiling, 2014)



# Aufbau der WEA: Fundament / Gründung



(HDT, 2014)

Offshore



(dpa, 2014)



(dpa, 2014)



## Aufbau der WEA: Fundament / Gründung

### Onshore: vorwiegend Stahlbeton

- Meist Flachgründungen bestehend aus Beton und Stahl
  - Bei weichem Untergrund zusätzliche Pfahlgründungen
- Je nach Bauart des Turms achteckig-, kreis- oder kreuzförmig
- Anbindung des Turmes an das Fundament geschieht durch Fundamenteinbauteil
  - Unterschiedliche Konzepte: Einfachflansch oder Doppelflansch sowie Köcher- oder Korbsystem



## Aufbau der WEA: Fundament / Gründung

### Offshore: Stahlgerüst (Monopile, Tripod)

- Monopiles werden mit Hilfe eines Pfahls in den Meeresboden gerammt
- Bei tieferen Gewässern werden Tripiles und Tripods sowie Jacket-Strukturen bevorzugt, da diese eine bessere Verteilung der Kräfte ermöglichen



## Aufbau der WEA: Turm



(Treiling, 2014)

### Stahlrohrturm



(dpa, 2014)



(Geyer, 2014)



# Aufbau der WEA: Turm



(Treiling, 2014)



(Treiling, 2014)

## Betonrohrturm



(Treiling, 2014)



# Aufbau der WEA: Turm

## Gittermastturm



(Groupsixty, 2014)

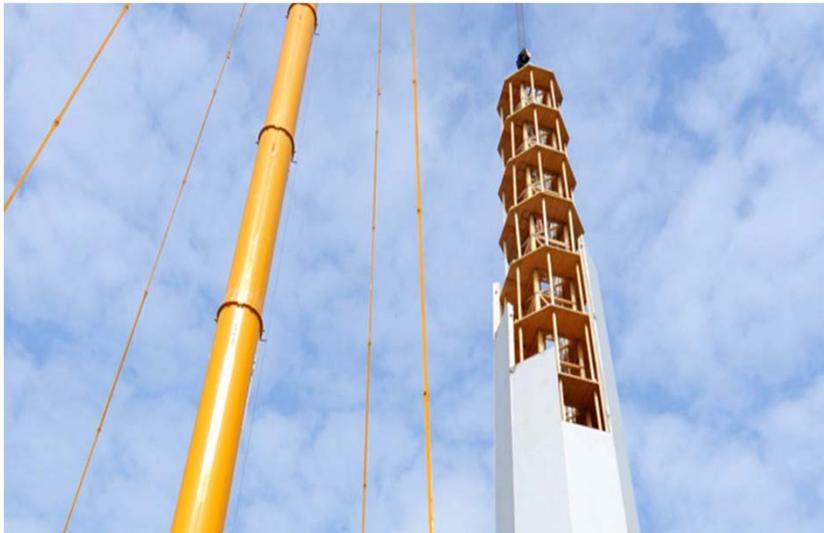


(Groupsixty, 2014)



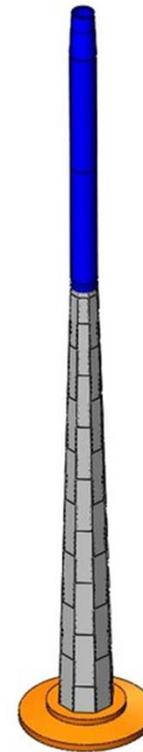
# Aufbau der WEA: Turm

## Geschlossener Holzturm



(Janzing, 2014)

## Hybridturm



(SKI, 2014)



(SKI, 2014)



## Aufbau der WEA: Turm

### Material:

- Rohrtürme aus **Stahl** als gängigste und am weitesten verbreitete Turmbauart
- **Beton**türme bestehen aus vorgefertigten Betonsegmenten oder werden direkt vor Ort hergestellt (Ortbeton)

### Weitere Varianten:

- Hybridturm
  - Unterer Teil aus Beton (Ortbeton oder Fertigteile), oberer Teil aus Stahl
- Gittermast
  - Geringer Materialbedarf und hohe Eigendämpfung. Schlechte Möglichkeiten zur Automatisierung
- Geschlossener Holzturm
  - Erster Prototyp bei Hannover. Möglicherweise vorteilhaft durch besser verteilte Last, geringe Kosten und besserer Ökobilanz



## Aufbau der WEA: Turm

### Allgemein:

- Größter und schwerster Teil der Windenergieanlage
  - Wirtschaftliche Bedeutung: Macht zwischen 15 und 25 Prozent der Kosten der WEA aus
- Windlast bewirkt hohe Biegemomente
- Je höher der Turm (mitentscheidender Faktor für den Ertrag der Anlage) desto breiter der Turmfuß
- An Küstenstandorten reichen schon relativ kleine Turmhöhen aus. Im Binnenland sind meist größere Turmhöhen notwendig.
  - man rechnet mit etwa 0,8 % Mehrertrag pro Meter Höhe
  - Hersteller bieten verschiedene Turmhöhen und Varianten für die gleiche Rotorgröße an
- Hohe offizielle Ansprüche an WEA Türme: Tragsicherheitsnachweis, Betriebsfestigkeitsnachweis, Gebrauchstauglichkeitsnachweis



## Aufbau der WEA: Maschinenhaus



Hauptlager

Triebstrang

Getriebe

Bremse

Generator

Azimutmotor

Steuerelektronik

Sensorik/Windmesser

(BWE, 2014)



## Aufbau der WEA: Maschinenhaus



(Groupsixty, 2014)



(Groupsixty, 2014)



(Siemens, 2014)

- Hauptkomponenten befindet sich gegen Umwelteinflüsse geschützt im Maschinenhaus (Gondel)
- Unterschieden wird in erster Linie nach Triebsträngen mit und ohne Getriebe, nach der Lagerung sowie nach der Anordnung der Hauptkomponenten



# Aufbau der WEA: Rotor



(CIV, 2014)



(VDE, 2014)



(Groupsixty, 2014)



## Aufbau der WEA: Rotor



(GAIA, 2014)

- Rotornabe und Rotorblatt
- Die Rotornabe verbindet die Rotorblätter mit dem Rest der Maschine und überträgt die Leistung auf die Rotorwelle.
- Rotorblätter entnehmen der Luftströmung Energie, die dann dem Generator zugeführt wird.



## Aufbau der WEA: Rotorblatt

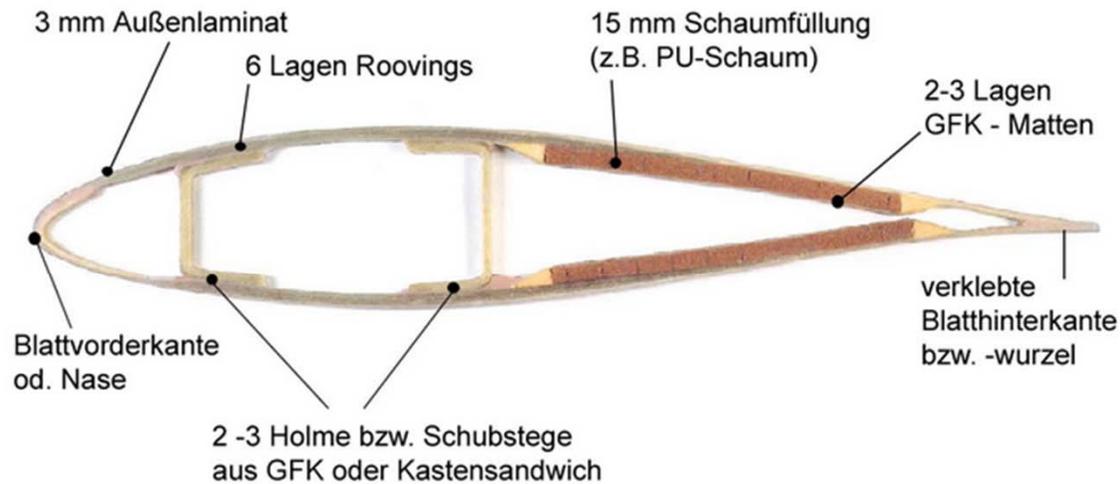


(Evers, 2014)

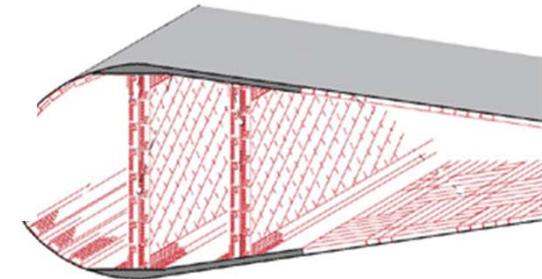


## Aufbau der WEA: Rotorblatt

### Beispiel für den Aufbau eines modernen Rotorblatts:



(Rotortechnik, 2014)



- Moderne Rotorblätter bestehen in der Regel aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und werden zumeist in Halbschalen-Sandwichbauweise mit Versteifungsholmen oder –stegen im Inneren hergestellt.
- Vermehrt kommen bei langen Rotorblättern auch Kohlenstofffasern zum Einsatz.



## Kennzahlen

- **Nabenhöhe:** Die Höhe vom Erdboden bis zum Mittelpunkt des Rotors in Metern (ungefähr die Turmhöhe).
- **Rotordurchmesser:** Der Durchmesser des Kreises, der von den Rotorblättern abgedeckt wird in Metern.
- **Nennleistung:** Maximal mögliche Leistung der Anlage in Kilowatt (kW) oder Megawatt (MW). Tatsächliche Leistung hängt von der Windgeschwindigkeit ab.
- **Volllaststunden:** Die Zeit in Stunden in einem Jahr in der die Anlage bei Nennleistung läuft.



## Kennzahlen

- **Leistungskennlinie:** Die elektrische Abgabeleistung einer WEA in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Stellt das offizielle Leistungszeugnis der Windkraftanlage dar und berücksichtigt nahezu alle maßgebenden Eigenschaften einer WEA zur Energielieferung.
- **Leistungsbeiwert  $[c_p]$  oder Betz'sches Maximum (59%):** Dies stellt das Leistungsmaximum dar, das aus dem Wind entnommen werden kann. Es ist der theoretisch maximale Wirkungsgrad.
- **Schnellaufzahl  $[\lambda]$ :** Sie gibt das Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit ( $u$ ) der Rotorspitze zur Windgeschwindigkeit ( $v$ ) an.



# Physikalische Grundlagen

## Windgeschwindigkeit, Beaufortskala

Bft	km/h	m/s	Bezeichnung
0	< 1	0 - 0,2	Stille
1	1 - 5	0,3 - 1,5	schwacher Wind
2	6 - 11	1,6 - 3,3	schwacher Wind
3	12 - 19	3,4 - 5,4	schwacher Wind
4	20 - 28	5,5 - 7,9	mäßiger Wind
5	29 - 38	8,0 - 10,7	frischer Wind
6	39 - 49	10,8 - 13,8	starker Wind
7	50 - 61	13,9 - 17,1	starker Wind
8	62 - 74	17,2 - 20,7	Sturm
9	75 - 88	20,8 - 24,4	Sturm
10	89 - 102	24,5 - 28,4	schwerer Sturm
11	103 - 117	28,5 - 32,6	orkanartiger Sturm
12	> 117	> 32,7	Orkan

(Windwaerts, 2014)



## Physikalische Grundlagen

**Windgeschwindigkeit:** Bei der Beaufortskala nehmen die Windgeschwindigkeiten mit der Größe der Zahl zu, die üblicherweise gebräuchliche Skala reicht dabei von 0 (Windstille) bis 12 Beaufort (Bft) (Windgeschwindigkeiten von mehr als 120 km/h).

Mit den **IEC Windklassen** werden die Potentiale möglicher Standorte für Windräder beschrieben.

- IEC Klassen werden in vier Kategorien unterteilt (IEC I – IV)
- IEC-Windklasse I beschreibt die Kategorie mit der höchsten Geschwindigkeit

Zuordnung:

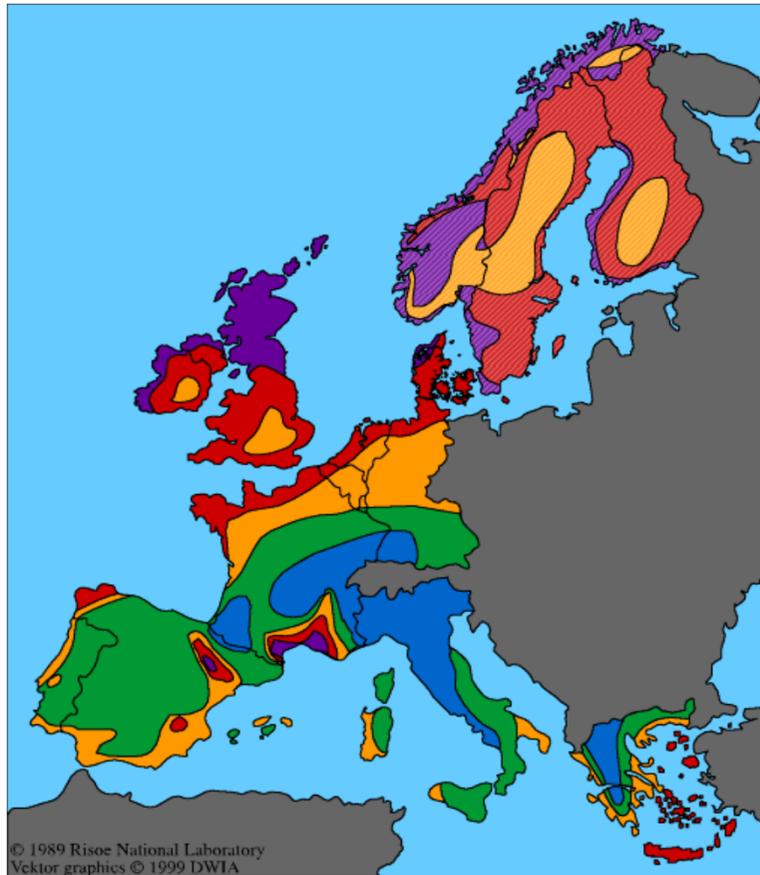
- deutsche Küstenregionen IEC-Windklasse I
- Binnenland IEC-Windklassen II und III
- die Klasse VI kommt in Deutschland nicht zur Anwendung

➤ Windgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde [m/s]



# Physikalische Grundlagen

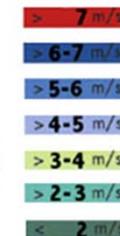
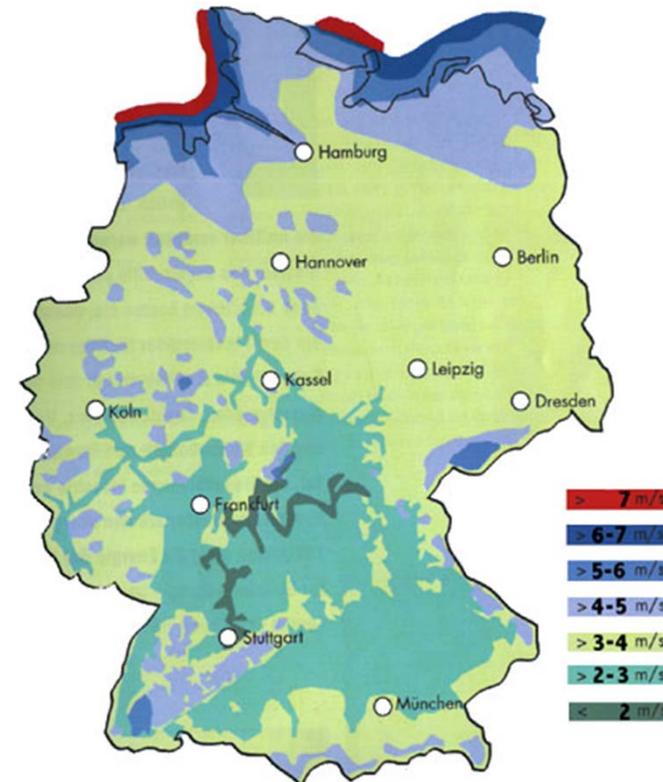
## Mittlere Windgeschwindigkeiten in Europa und Deutschland



© 1989 Risoe National Laboratory  
 Vektor graphics © 1999 DWIA

(Waller, 2014)

Farbe	geschütztes Gelände	freies Gelände
	m/s >6.0 W/m <sup>2</sup> >250	m/s >7.5 W/m <sup>2</sup> >500
	5.0-6.0 150-250	6.5-7.5 300-500
	4.5-5.0 100-150	5.5-6.5 200-300
	3.5-4.5 50-100	4.5-5.5 100-200
	<3.5 <50	<4.5 <100
		>7.5
		5.5-7.5
		<5.5

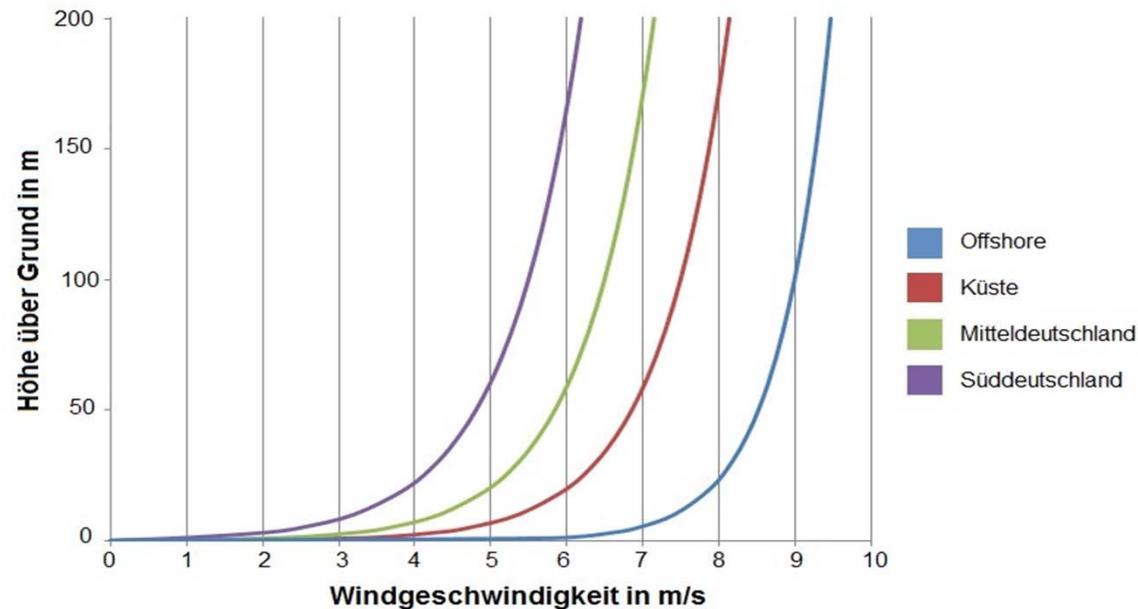


(Jahresdurchschnitt der Windgeschwindigkeit, gemessen in 10m Höhe)



# Physikalische Grundlagen

## Grenzschichtprofil an unterschiedlichen Standorten



(Pubantz, 2014)

Die Windgeschwindigkeit hängt von der Höhe und der Rauigkeit (Reibungsverluste durch Bauwerke und Vegetation) des Geländes ab. Windgeschwindigkeit steigt mit der Höhe nicht linear, sondern nahezu exponentiell.



# Physikalische Grundlagen

## Leistung des Windes:



Mit der nachstehenden Gleichung lässt sich die im Wind enthaltene Leistung in Watt [W] bestimmen:

$$P_{\text{Wind}} = 0,5 \cdot A \cdot \rho \cdot v^3$$

A : durchströmte Fläche (Rotorfläche) in m<sup>2</sup>

v : Windgeschwindigkeit in m/s

ρ : Luftdichte im kg/m<sup>3</sup>



## Physikalische Grundlagen

### Beispielrechnung (für die Windleistung):

Auf einer Fläche von 5 m<sup>2</sup> bei einer Luftdichte von 1,225 kg/m<sup>3</sup> und bei einer Windgeschwindigkeit von 3,0 Metern pro Sekunde erreicht der Wind eine Leistung von rund 82,5 W.

$$P_{\text{Wind}} = 0,5 \cdot A \cdot \rho \cdot v^3$$

Steigt die Windgeschwindigkeit um das Dreifache auf 9,0 Meter pro Sekunde ver-27-facht sich die Leistung auf 2232,5 W = 2,23 kW.

**Die Windgeschwindigkeit ist maßgebend für die Windleistung!  
Siehe dritte Potenz  $v^3$**



## Physikalische Grundlagen

- Als **Leistungsbeiwert**, wird das Verhältnis aus der dem Wind entnommenen Leistung zur Gesamtleistung des Windes bezeichnet.
- Albert Betz (1885-1968) errechnete 1920 die theoretisch optimal erreichbare Leistungsumsetzung für ein idealisiertes Windrad.

$$\text{Betz'scher Leistungsbeiwert } c_{P,Betz} = 0,593$$

- Der **Leistungsbeiwert** muss mit der Leistung des Windes multipliziert werden, um die abzugebende Leistung einer Windenergieanlage zu berechnen.
- Heutige WEA erreichen einen maximalen Leistungsbeiwert (Wirkungsgrad) von  $c_p = 0,5$ .
- Der verminderte Leistungsbeiwert resultiert aus Verlusten bei der Energieumwandlung in Form von Wärme und Schall an den Komponenten.



## Aufgaben für das Selbststudium

1. Diskutieren Sie die verschiedenen Gegebenheiten Off- und Onshore. Welche Schwierigkeiten leiten sich ab?
2. Recherchieren Sie den Zusammenhang zwischen den Kennzahlen und der Leistung einer Windenergieanlage!
3. Untersuchen Sie die geographischen Unterschiede in Europa. Wo macht Windenergie Sinn, wo nicht?



## Literatur und Quellen

- Academics. (29. Juni 2014). academics.ru. Von <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/302855> abgerufen
- AG, B. I. (01. Juni 2014). gymmuenchenstein.ch. Von [http://www.gymmuenchenstein.ch/stalder/klassen/sa/rev\\_d/watt.htm](http://www.gymmuenchenstein.ch/stalder/klassen/sa/rev_d/watt.htm) abgerufen
- Bayer. (29. Juni 2014). research.app.bayer.de. Von <http://www.research.app.bayer.de/media/img/windkraft/windkraft-infografik.jpg> abgerufen
- BWE. (29. Juni 2014). wind-energie.de. Von [www.wind-energie.de/infocenter/technik](http://www.wind-energie.de/infocenter/technik) abgerufen
- Canstein, C. v. (01. Juni 2014). wikipedia.org. Von [http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte\\_der\\_Windenergienutzung#mediaviewer/Datei:SKMBT\\_C55007120513590-2.JPG](http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Windenergienutzung#mediaviewer/Datei:SKMBT_C55007120513590-2.JPG) abgerufen
- DBU. (29. Juni 2014). dbu.de. Von [https://www.dbu.de/123artikel33157\\_341.html](https://www.dbu.de/123artikel33157_341.html) abgerufen
- Dingley, A. (29. 06 2014). wikimedia.org. Von [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barrow\\_Offshore\\_wind\\_turbines.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barrow_Offshore_wind_turbines.jpg) abgerufen
- Enercon. (29. Juni 2014). windkraft-journal.de. Von <http://www.windkraft-journal.de/2012/11/19/enercon-setzt-sich-mit-nachdruck-fuer-eine-weiterentwicklung-des-eeg-ein/> abgerufen
- Evers. (29. Juni 2014). www.eversgmbh.de. Von <http://www.eversgmbh.de/Startseite/ueber-Evers/News-Presse/News-Archiv/Der-neue-Evers-Katalog-Nr-12-ist-da.aspx> abgerufen
- Ferchau. (29. Juni 2014). ferchau.de. Von [http://www.ferchau.mediainformationssystem.de/press\\_releases/view/500/locale:deu](http://www.ferchau.mediainformationssystem.de/press_releases/view/500/locale:deu) abgerufen
- GAIA. (29. Juni 2014). <http://www.gaia-mbh.de>. Von <http://www.gaia-mbh.de/windenergie/leistungen/> abgerufen
- geographylwc. (29. Juni 2014). geographylwc.org.uk. Von <http://www.geographylwc.org.uk/GCSE/igcse/weather/weather.html> abgerufen
- Gipe, P. (30. Mai 2013). wind-works.org. Von <http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=544> abgerufen
- Groupsixty. (29. Juni 2014). wikipedia.org. Von <http://lexikon.freenet.de/Windkraftanlage#Fundamentvarianten> abgerufen
- Hau, E. (2008). Windkraftanlagen. Berlin: Springer Verlag.
- HDT. (29. Juni 2014). hdt-hessen.de. Von <http://www.hdt-essen.de/windenergie/#{2}> abgerufen
- Heier, S. (2009). Windkraftanlagen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Heinzelmann, B. S. (2011). Strömungsbeeinflussung bei Rotorblättern von Windenergieanlagen mit Schwerpunkt auf Grenzschichtabsaugung. Berlin: Technische Universität Berlin.



## Literatur und Quellen

- Hohmann, H. (01. Juni 2014). fotocommunity.de. Von <http://www.fotocommunity.de/pc/pc/display/19260070> abgerufen
- Janzing, B. (29. Juni 2014). taz.de. Von <http://www.taz.de/Baumaterial-fuer-Windkraft-Tuerme-/!107748/> abgerufen
- Kaltschmitt, M. (2013). Erneuerbare Energien. Berlin: Springer Vieweg.
- Karel, K. (01. Juni 2014). wikipedia.org. Von [http://de.wikipedia.org/wiki/Hermann\\_Honnef#mediaviewer/Datei:Honnef\\_01.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Hermann_Honnef#mediaviewer/Datei:Honnef_01.jpg) abgerufen
- Kuijen, K. v. (01. Juni 2014). mstudioblackboard.tudelft.nl. Von [http://mstudioblackboard.tudelft.nl/duwind/Wind%20energy%20online%20reader/Static\\_pages/wind\\_pioneers.htm](http://mstudioblackboard.tudelft.nl/duwind/Wind%20energy%20online%20reader/Static_pages/wind_pioneers.htm) abgerufen
- Lynn, P. A. (2012). Onshore and Offshore Wind Energy. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Maegaard, P. (2014). Wind Power for the World - International Reviews and Developments. Singapor: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.
- Messoll, A. K. (2013). Untersuchung eines Ringgenerators für Windenergieanlagen der 10 MW-Klasse auf Basis statischer Versuchsmodelle und numerische Simulation. Kassel: (Heinzelmann, 2011).
- NASA. (28. August 2008). dvidshub.net. Von <http://www.dvidshub.net/image/861453/smith-putnam-wind-turbine-display#.U7UoVG20Og4> abgerufen
- Nordmann, A. (29. Juni 2014). wikipedia.org. Von <http://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage#mediaviewer/Datei:Windkraftanlage.svg> abgerufen
- Pubantz, M. (29. Juni 2014). buergerwindpark.de. Von <http://www.buergerwindpark.de/content/technik> abgerufen
- Quaschnig, V. (2006). Regenerative Energiesysteme. Carl Hanser Verlag: München.
- Quaschnig, V. (2008). Erneuerbare Energien und Klimaschutz. München: Carl Hanser Verlag.
- Schelter, M. (29. Juni 2014). michael-schelter.de. Von <http://www.michael-schelter.de/?p=53> abgerufen
- SKI (29. Juni 2014). <http://www.ski-consult.de/erneuerbare-energien/windenergieanlagen/hybridturm.html>
- Treiling, T. (29. Juni 2014). abowind.com. Von <http://www.abowind.com/de/unternehmen/bautagebuch-dorn-duerkheim.html> abgerufen
- Rotortechnik (29. Juni 2014) <http://www.rotortechnik.at/Rotor/rotortechnik.htm>
- Vestas. (29. Juni 2014). vestas.com. Von <http://www.vestas.com/en/media/news> abgerufen
- Walbeck, K. G. (01. Juni 2014). panoramio.com. Von [http://www.panoramio.com/photo\\_explorer#view=photo&position=13&with\\_photo\\_id=13608339&order=date\\_desc&user=2159207](http://www.panoramio.com/photo_explorer#view=photo&position=13&with_photo_id=13608339&order=date_desc&user=2159207) abgerufen



## Literatur und Quellen

- Waller, G. (29. Juni 2014). *Einführung in die Windenergietechnik*. Von [https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CC4QFjAB&url=http%3A%2F%2Frze-falbala.rz.e-technik.fh-kiel.de%2F~waller%2Fftp%2FWindenergie%2FWindenergie02.pdf&ei=Cle6U5O6KaiK7Ab-rIG4Cg&usg=AFQjCNEwoGzxr\\_HZISKleHKwL7XBYlriTg&bvm=bv.701](https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CC4QFjAB&url=http%3A%2F%2Frze-falbala.rz.e-technik.fh-kiel.de%2F~waller%2Fftp%2FWindenergie%2FWindenergie02.pdf&ei=Cle6U5O6KaiK7Ab-rIG4Cg&usg=AFQjCNEwoGzxr_HZISKleHKwL7XBYlriTg&bvm=bv.701) abgerufen
- Wesselak, V. (2013). *Regenerative Energietechnik*. Berlin: Springer Vieweg.
- Windwaerts. (29. Juni 2014). *windwaerts.de*. Von [http://www.windwaerts.de/fileadmin/user\\_upload/grafiken/Windstaerken-Skala-Tabelle.png](http://www.windwaerts.de/fileadmin/user_upload/grafiken/Windstaerken-Skala-Tabelle.png) abgerufen