



Virtuelle Akademie **Nachhaltigkeit**

Aktuelle Windenergieanlagen – Technik und Konzepte

Episode 2: Technik und Konzepte

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 WEA

Episode 2: Technik und Konzepte

Episode 3: Interview mit dem Referenten



Lernziele dieser Episode

Lernziel 1:

Sie kennen die verschiedenen Arten von WEAs.

Lernziel 2:

Sie kennen die Arten der Leistungsregulierungen für WEAs.

Lernziel 3:

Sie können die elektrotechnischen Konzepte der WEA Technik aufzählen.



Technik der WEA: Drehachse



(BWE, 2014)

Darrieus-Rotor

Vertikal



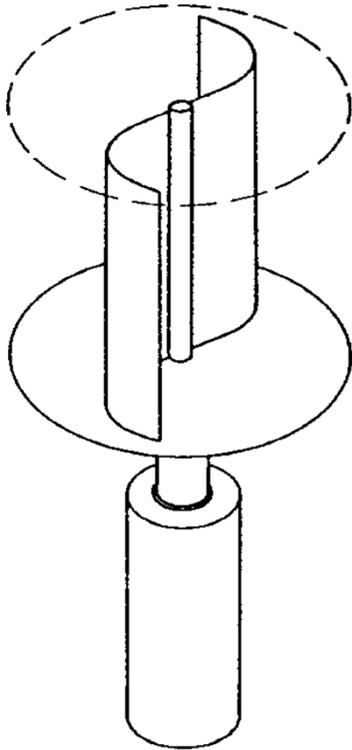
(Schelter, 2014)

H-Darrieus-Rotor



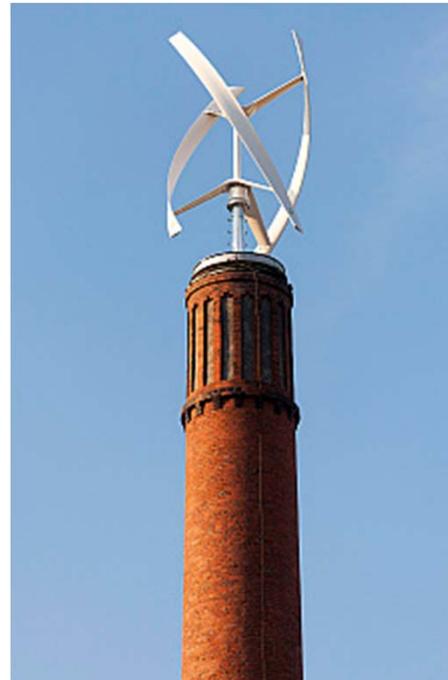
Technik der WEA: Drehachse

Vertikal



(BWE, 2014)

Savonius-Rotor



(Scheffka, 2014)



(BWE, 2014)

Amperius-Rotor



Technik der WEA: Drehachse



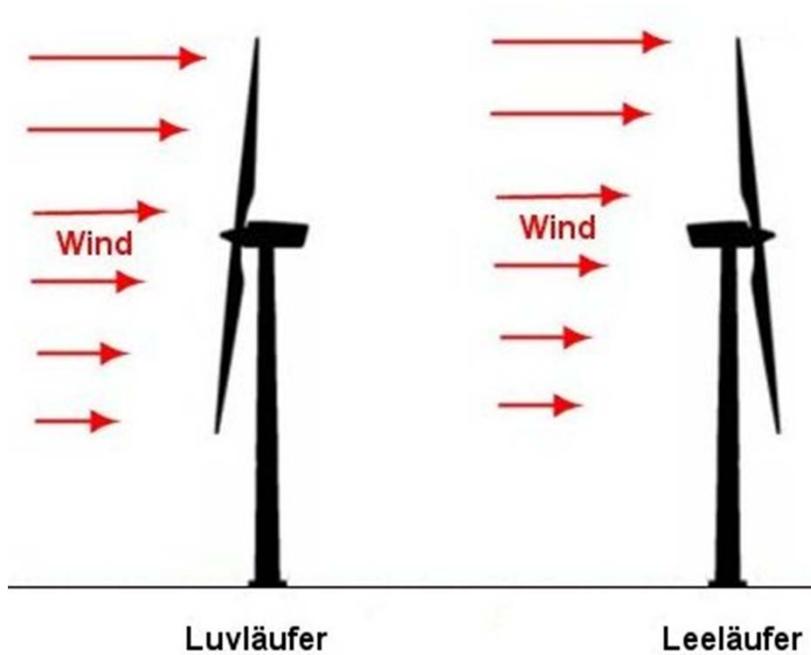
Horizontal



(Potma, 2014)



Technik der WEA: Drehachse



(BWE, 2014)

Luv- und Leeläufer

Bei großen Windenergieanlagen hat sich das Konzept des Luvläufers mit horizontaler Drehachse durchgesetzt.

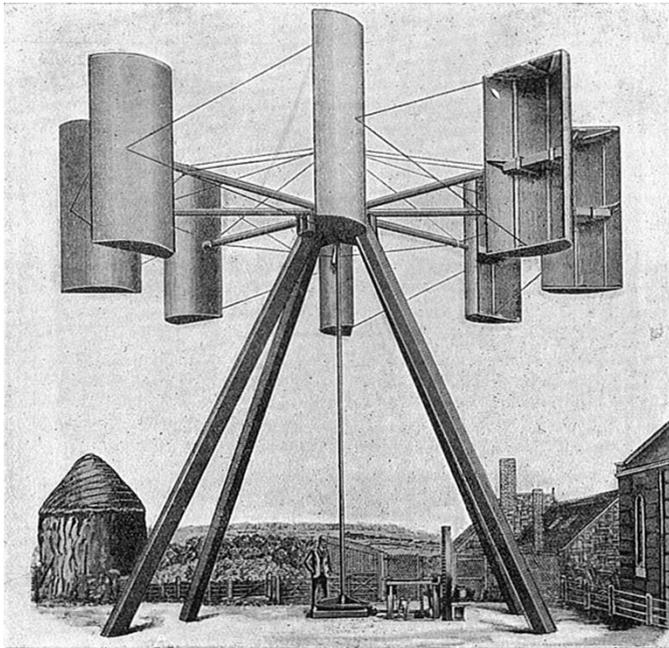
Marktverteilung der Luv- und Leeläufer

	Bis 1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	Seit 1995
Leeläufer	7%	18%	8%	5%	4%	2%	1%	0%
Luvläufer	93%	82%	92%	95%	96%	98%	99%	100%

(BWE, 2014)

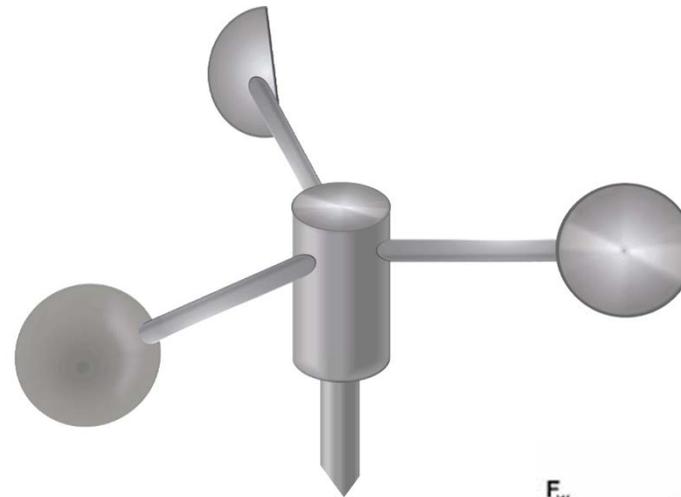


Widerstandsläufer und Auftriebsläufer



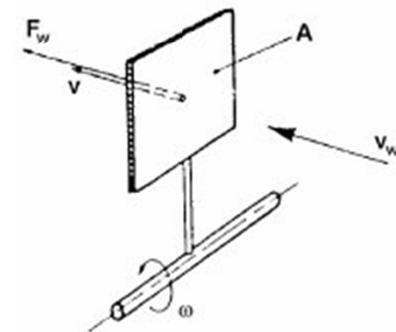
(Rankin, 1912)

Widerstandsläufer



(geographylwc, 2014)

$$C_{pmax} \approx 0,19$$



(BWE, 2014)



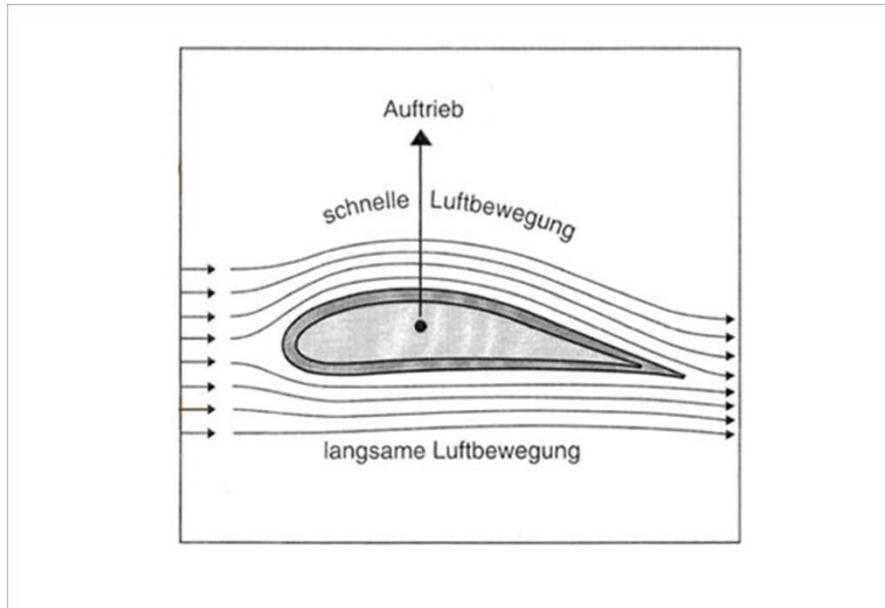
Widerstandsläufer und Auftriebsläufer

Widerstandsläufer

- Der Widerstandsläufer entnimmt dem Wind Leistung nach dem Widerstandsprinzip und wandelt diese in mechanische Energie um.
- Die einfachste Art der Windenergieumwandlung ist mit Hilfe von reiner Widerstandsfläche möglich. Die Ausnutzung der im Wind enthaltenen Energie ist jedoch gering. Der maximal mögliche Leistungsbeiwert nach der Betz'schen Impulstheorie ist $c_{pmax} \approx 0,19$.
- Findet in der kommerziellen Stromgewinnung keine Verwendung.
- Widerstandsläufer haben eine Schnelllaufzahl von maximal 1. Das heißt, das Blatt kann sich höchstens so schnell bewegen wie der Wind.



Widerstandsläufer und Auftriebsläufer



(BWE, 2014)

- Prinzip wie bei einem Flugzeugflügel

Auftriebsläufer



(BDU, 2014)



Widerstandsläufer und Auftriebsläufer

Auftriebsläufer

- Bei modernen Windenergieanlagen werden die Blätter durch das Prinzip des aerodynamischen Auftriebs bewegt. Wenn der Wind auf ein Rotorblatt trifft, so wird Luft oberhalb und unterhalb des Blattes entlanggeführt.
- Da das Blatt gewölbt ist, hat die Luft oberhalb des Blattes einen längeren Weg um das Profil herum und muss somit schneller fließen als die Luft auf der Unterseite. → Druckdifferenz
- Auftriebsläufer können horizontale oder vertikale Achsen besitzen. Der maximale Leistungsbeiwert $c_{p_{max}}$ für Auftriebsläufer beträgt theoretisch 59 Prozent und liegt somit wesentlich höher als bei Widerstandsläufern.



Leistungsregelung

Es gibt generell zwei Arten der Leistungsregelung:
(neben diesen gibt es weitere Regelungsarten)

- **Stall-Regelung**
- **Pitch-Regelung**

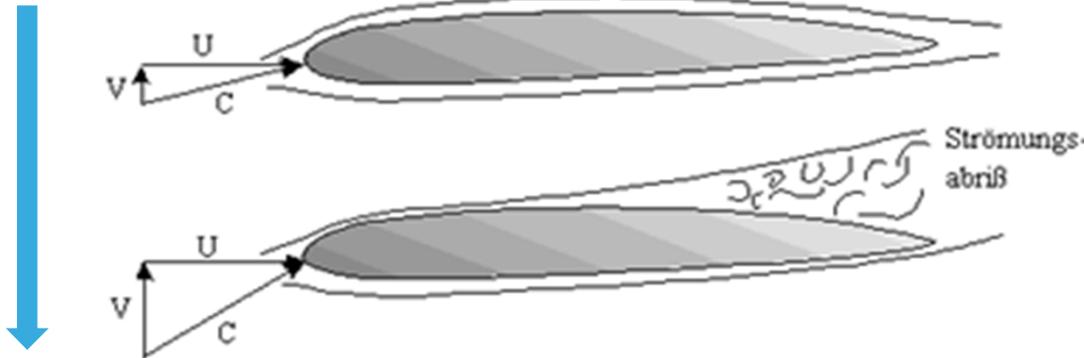
Gründe für Leistungsregelung können sein:

- Spezielle vorgegebene Generator Drehzahlen
- Leistungsbegrenzung zum Schutz vor Überlastung der WEA bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten ($>25\text{m/s}$)
- Leistungsbegrenzung aus Gründen der Netzstabilität



Leistungsregelung

zunehmende
Windgeschwindigkeit



(Hau, 2008)

Stallregelung

- Einfachstes und ältestes Regelungssystem
- Leistungsbegrenzung durch Strömungsabrisß an der Oberseite des Rotorblattes
- Betrieb des Rotors mit konstanter Drehzahl d.h. mit konstanter Umfangsgeschwindigkeit
- Schlechter Leistungsbeiwert des Rotorblattes bei hohen Windgeschwindigkeiten – es wird weniger kinetische Energie in mechanische Rotationsenergie umgewandelt

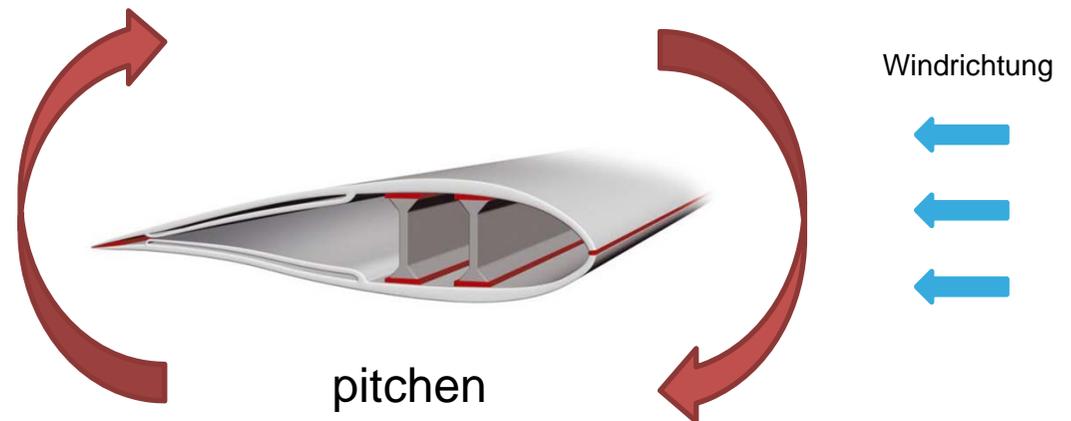


Leistungsregelung



(W3, 2014)

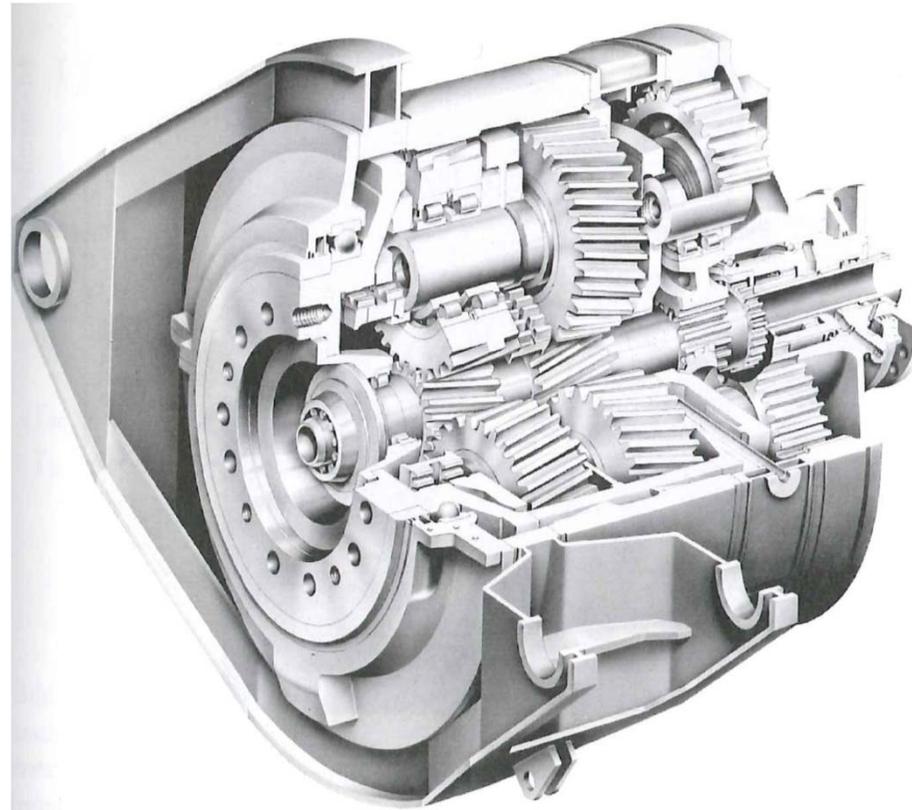
Pitchregelung



- Regelung der Leistung durch Verstellen der Rotorblätter.
- Bei Starkwind (12 bis 25m/s) ist die angebotene Windleistung zu groß und die Anlage muss in ihrer Leistungsabgabe begrenzt werden.
- Pitchwinkel nimmt mit Windgeschwindigkeit zu (von 0 bis ca. 30 Grad) und die Auftriebskraft wird so beeinflusst, dass die Leistungsabgabe der WEA konstant bei Nennleistung bleibt.



Technik der WEA: Getriebe



Hau, 2008



Technik der WEA: Getriebe

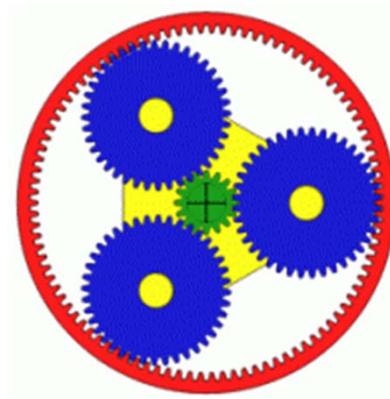
- Es gibt WEA mit horizontaler Drehachse - mit und ohne Getriebe
- Aufgabe des Getriebes ist es die niedrige Drehzahl des Rotors in eine höhere Drehzahl für den Generator zu übersetzen.
- In WEAs werden vor allem Stirnradgetriebe und Planetengetriebe verwendet.

Stirnradgetriebe



BWE, 2014

Planetengetriebe

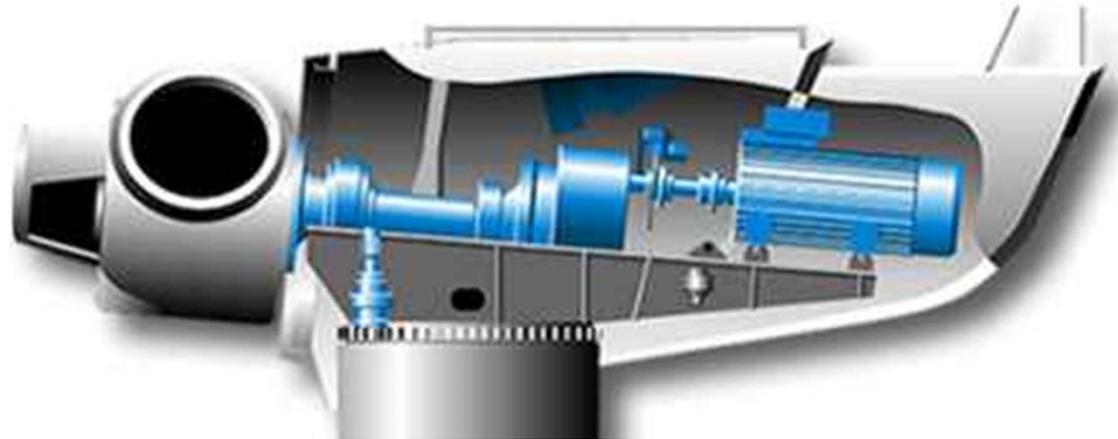


BWE, 2014

Sonnenrad – in der Mitte
Planetenräder – blau
Feststehendes Hohlrad – rot
Steg verbindet Planetenräder - gelb



Technik der WEA: Generatoren



(Blomberg, 2014)

- Der Generator ist der eigentliche mechanisch-elektrische Energiewandler.
- In WEAs kommen vor allem Synchron- oder Asynchron-Generatoren zum Einsatz.
- Die Netzanbindung erfolgt direkt oder indirekt.



Technik der WEA: Generatoren

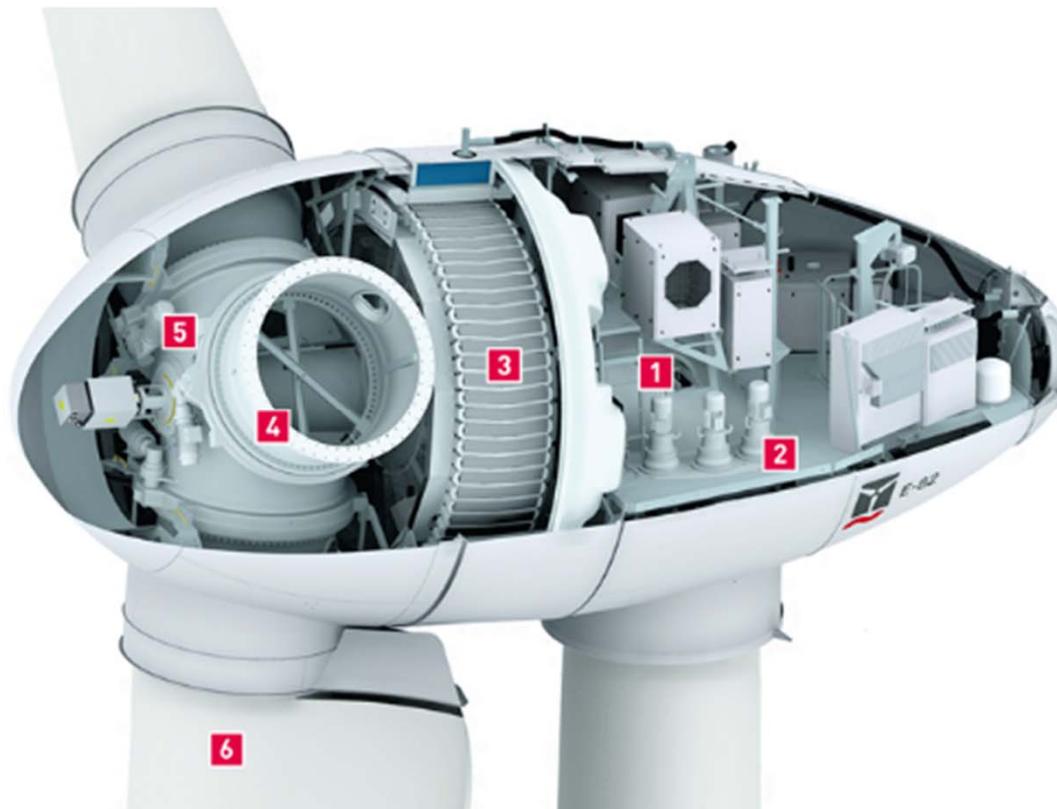
Synchrongenerator:

- Synchrongeneratoren bestehen aus einem außen feststehenden Stator und einem sich darin drehenden Läufer.
- Durch einen Permanentmagneten oder stromdurchflossene Gleichstromwicklungen wird ein umlaufendes Magnetfeld aufgebaut.
- Das umlaufende Magnetfeld erzeugt im Stator eine Spannung mit einer Frequenz, die synchron zur Umlaufgeschwindigkeit des Drehfeldes ist.



Technik der WEA: Generatoren

Beispiel:



- 1** Maschinenträger
- 2** Azimutantrieb
- 3** Ringgenerator
- 4** Blattadapter
- 5** Rotornabe
- 6** Rotorblatt

(LUBW, 2014)



Technik der WEA: Generatoren

Beispiel: Anlagenkonzept mit Ringgenerator

Generator: zwei wesentliche Techniken

- Synchrongenerator mit Permanentmagneten
- Synchrongenerator mit elektrisch erregten Magneten

Getriebe:

- Getriebelos

Netzeinspeisung:

- über Wechselrichter



Technik der WEA: Generatoren

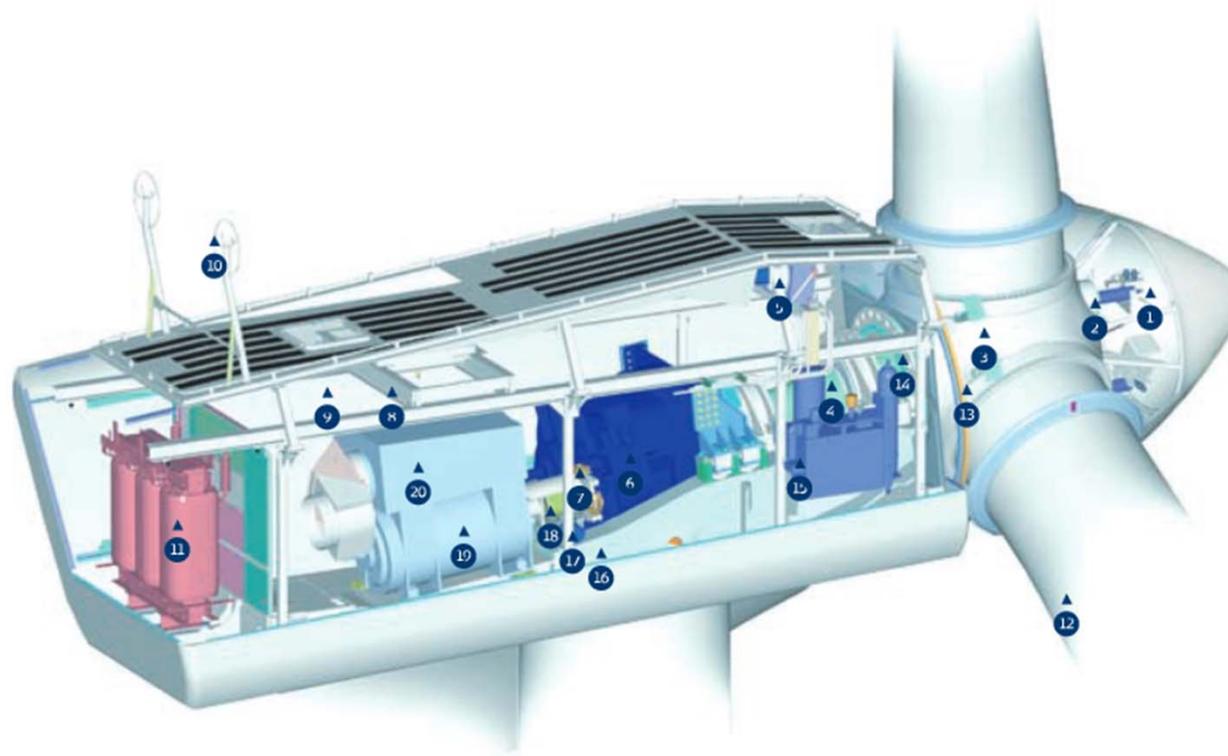
Asynchrongenerator:

- Auch Asynchrongeneratoren bestehen aus einem außen feststehenden Stator und einem sich darin drehenden Läufer.
- Der Läufer unterscheidet sich von dem der Synchronmaschine: Die Wicklung im Läufer wird direkt oder über einen Widerstand kurzgeschlossen.
- Durch eine Relativbewegung (Schlupf) zwischen Läufer und umlaufendem Ständerfeld wird ein elektrisches Feld induziert und auf diese Weise eine Spannung in der Läuferwicklung hervorgerufen.
- Das damit verbundene magnetische Feld des Läufers ergibt in Wechselwirkung mit dem Feld des Ständers die Kraftwirkung.



Technik der WEA: Generatoren

Beispiel:



(Vestas, 2014)



Technik der WEA: Generatoren

Beispiel: Doppelt gespeister Asynchrongenerator

Generator:

- Doppelt gespeister Asynchrongenerator

Getriebe:

- Zwei Stirnrad- und eine Planetenstufe

Netzanbindung:

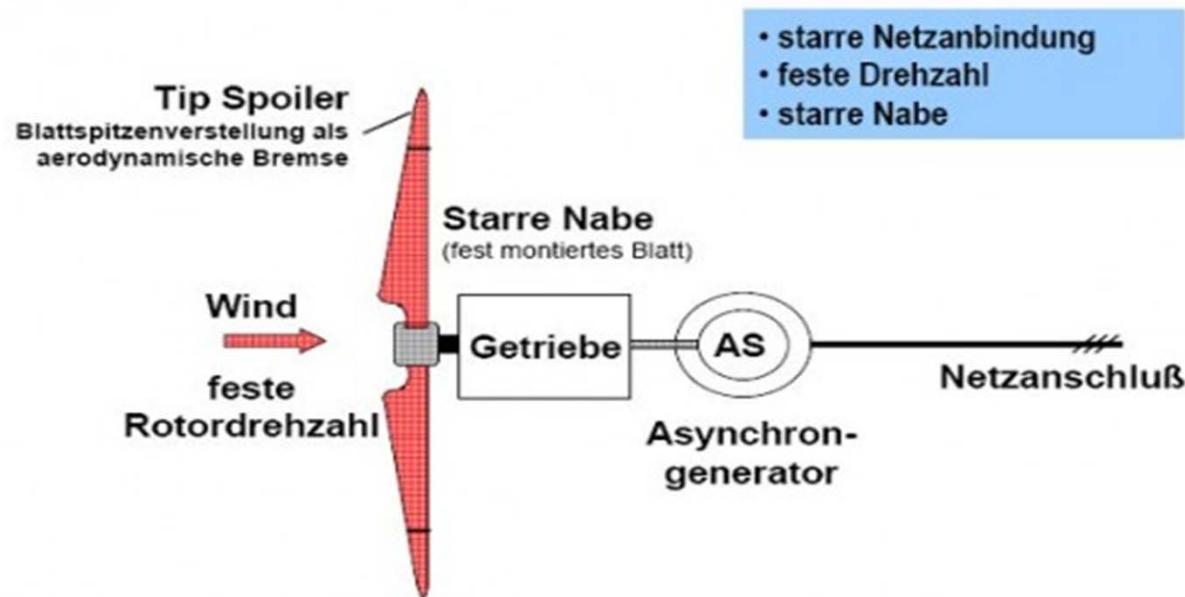
- mit Umrichter (ca. 40% Teilleistung)



Technik der WEA: Elektrische Anlagenkonzepte

Dänisches Konzept:

- Der Rotor ist durch ein Getriebe mit dem direkt auf das Netz geschalteten Asynchrongenerator verbunden.
- Aufgrund der vom elektrischen Netz vorgegebenen Frequenz muss der Rotor mit einer festen Drehzahl arbeiten.
- Leistungsregelung durch Stall.



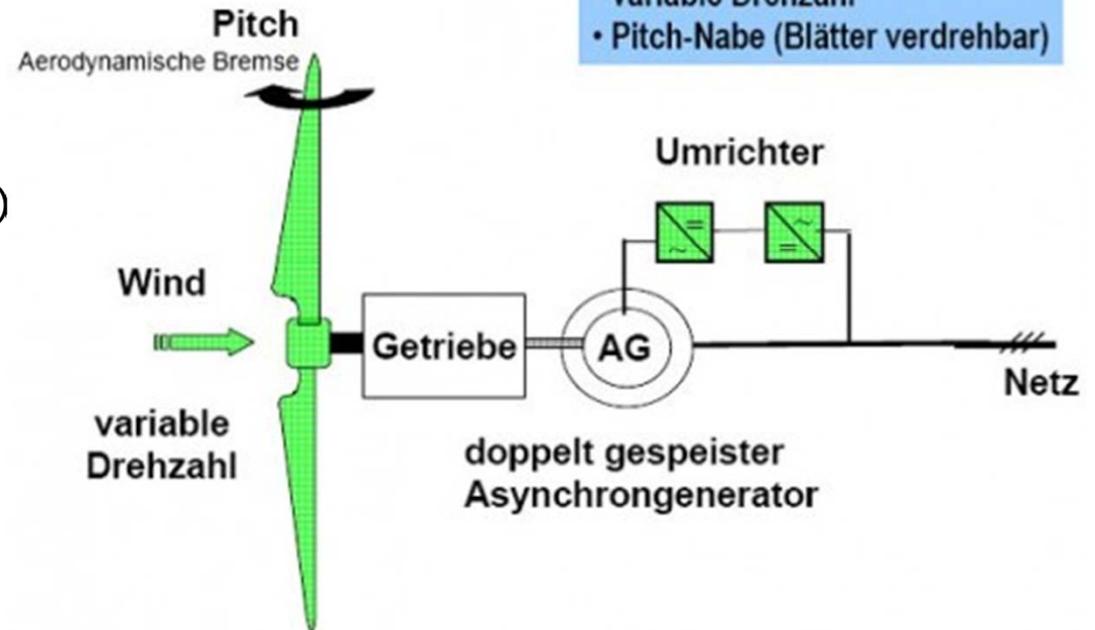
(BWE, 2014)



Technik der WEA: Elektrische Anlagenkonzepte

Doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren

- Drehzahlvariabler Rotor, der mit der Verstellung der Rotorblätter (Pitch-Regelung) geregelt wird.
- Die WEA ist mit einem Getriebe und einem doppelt gespeisten Asynchrongenerator ausgerüstet.



(BWE, 2014)

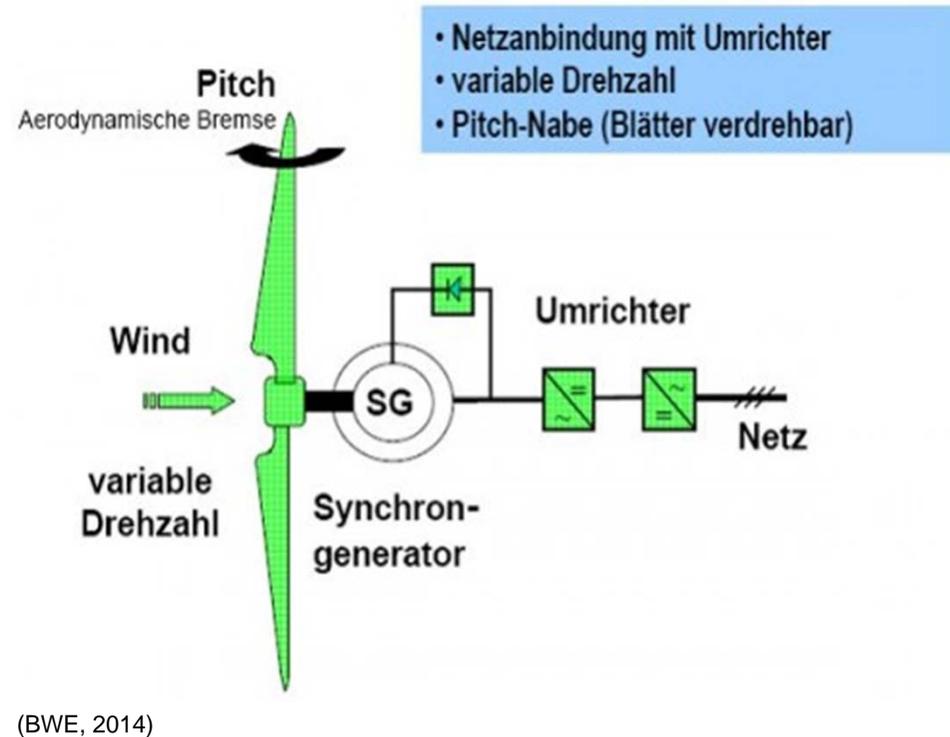
- Umrichter verbindet das elektrische Netz mit dem Läufer des Generators. Dies ermöglicht einen übersynchronen sowie einen untersynchronen Betrieb zur Netzfrequenz und damit ist der Generator drehzahlvariabel.



Technik der WEA: Elektrische Anlagenkonzepte

Drehzahlvariable WEA mit Synchrongenerator und indirekter Netzeinspeisung

- Variable Rotordrehzahl: die Rotordrehzahl kann sich an jede Windgeschwindigkeit anpassen.
- Leistungsregelung wird durch pitchen realisiert: Lasten auf die Blätter sowie Schallemissionen werden im Vergleich zur Stall-Regelung vermindert.
- Ein Umrichter passt die volle Generatorleistung an die gewünschte Spannung und Frequenz an.





Aktuelle Windenergieanlagen

Leistungsbereich	Verwendete Benennung
von 130,1 bis 310 kW	250 kW-Klasse
von 310,1 bis 749,9 kW	600 kW-Klasse
von 750 bis 1.499,9 kW	Megawattklasse
von 1.500 bis 3.100 kW	Multimegawattklasse
Über 3.100 kW	Offshore-Klasse

(Heinzelmann, 2011)

- Auf dem heutigen Markt sind die Megawatt- und Multimegawattklassen vorherrschend.



Aktuelle Windenergieanlagen

Vestas V112

- Nennleistung: 3000 kW
- Geringe und mittlere Windgeschwindigkeiten
- Unterschiedliche Ausführungen



(Vestas, 2014)

Onshore



(Niebüll, 2014)



Aktuelle Windenergieanlagen

Siemens SWT 3.6 -120

- Nennleistung: 3600 kW
- Rotordurchmesser: 120 m
- Asynchrongenerator



(Siemens, 2014)

Offshore

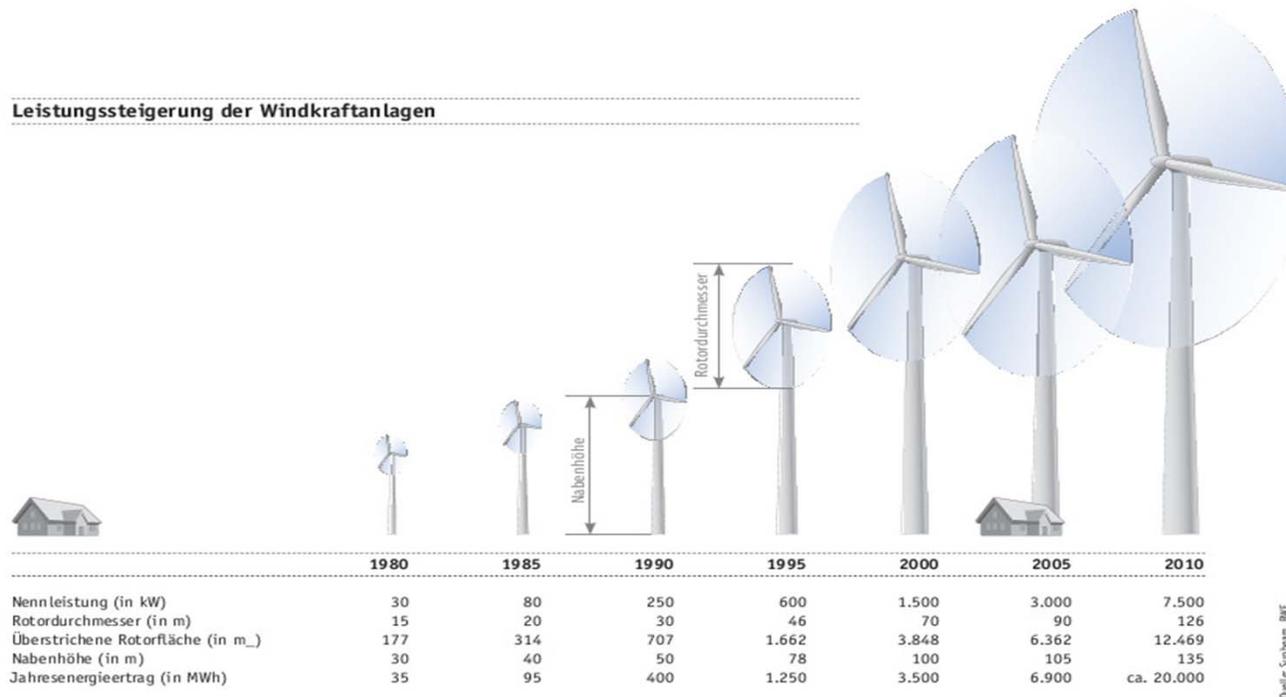


(offshorewind, 2014)



Ausblick

Leistungssteigerung der Windkraftanlagen



(BWE, 2014)

	2013		2023	
	Starkwind	Schwachwind	Starkwind	Schwachwind
Nennleistung	2,5 MW	2,2 MW	3 MW	3 MW
Rotor-Ø	85 m	90 m	100 m	115 m
Spezifische Nennleistung	441 W/m ²	346 W/m ²	382 W/m ²	289 W/m ²
Nabenhöhe	90 m	120 m	110 m	140 m
$c_{p,max}$	0,48	0,48	0,5	0,5

(IWES, 2013)





Ausblick

- Zunahme der Nabenhöhen und Rotordurchmesser
- Ausgeprägtere Differenzierung der Anlagen für spezielle Standortbedingungen
- Leichte Steigerung des maximalen Leistungskoeffizienten $C_p \max$ durch technische Weiterentwicklung
- Schwachwindanlagen



(Hindemith, 2014)



Ausblick

Enercon E126

(für wenig turbulente Starkwindstandorte zertifiziert)

- Nennleistung: 7580 kW
- Einschaltwindgeschwindigkeit: -
- Nabenhöhe: 135 Meter
- Rotordurchmesser: 127 Meter
- Generator: synchron, Ringgenerator
- Leistungsabgrenzung: Pitchregelung



(Enercon, 2014)



Aktuelle WEAs

Vestas V126

(geeignet für Standorte mit geringem Windpotenzial)

- Nennleistung: 3300 kW (wird ab einer Windgeschwindigkeit von 12m/s erreicht)
- Einschaltwindgeschwindigkeit: 3 m/s
- Nabenhöhe: 117/137 Meter
- Rotordurchmesser: 126 Meter
- Generator: synchron, Permanentmagnet
- Leistungsabgrenzung: Pitchregelung



(Vestas, 2014)



Ausblick



(Vestas, 2014)

Vestas V164

- Nennleistung: 8000 kW
- Gesamtgröße mit Rotorblatt 12-Uhrstellung 222 Meter (133 m Turm)
- Im Januar 2014 im dänischen Windpark Østerild errichtet



Aufgaben für das Selbststudium

1. Diskutieren Sie die Unterschiede bei der Leistungsregelung von Windenergieanlagen!
2. Verfolgen Sie die rapiden Leistungssteigerungen bei Windenergieanlagen. Was für ein Trend zeichnet sich ab?
3. Reflektieren Sie die einzelnen elektrischen Anlagenkonzepte. Was für Entwicklungen zeichnen sich ab?



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 abgerufen
- Bayer. (29. Juni 2014). research.app.bayer.de. Von <http://www.research.app.bayer.de/media/img/windkraft/windkraft-infografik.jpg> abgerufen
- BDU. (29. Juni 2014) https://www.dbu.de/123artikel33157_341.html
- BWE. (29. Juni 2014). wind-energie.de. Von www.wind-energie.de/infocenter/technik abgerufen
- Blomberg (29. Juni 2014) <http://www.gruene-blomberg.de/windkraft-blomberg.htm>
- Canstein, C. v. (01. Juni 2014). wikipedia.org. Von 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 abgerufen
- Dingley, A. (29. 06 2014). wikimedia.org. Von 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 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 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 abgerufen
- LUBW (29. Juni 2014) <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/223148/>
- 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. Singapore: 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
- Potma, C. (29. Juni 2014) <http://www.flowmotion.nl/DE/flowdoc.htm>
- Pubantz, M. (29. Juni 2014). buergerwindpark.de. Von <http://www.buergerwindpark.de/content/technik> abgerufen
- Quaschnig, V. (2006). Regenerative Energiesysteme. Carl Hanser Verlag: München.
- Rankin, K (1912). The Book of Modern Engines and Power Generators. London
- Quaschnig, V. (2008). Erneuerbare Energien und Klimaschutz. München: Carl Hanser Verlag.
- Scheltema, M. (29. Juni 2014). michael-scheltema.de. Von <http://www.michael-scheltema.de/?p=53> abgerufen
- Scheffka, F (29. Juni 2014) <http://www.senatspressestelle.bremen.de/detail.php?gsid=bremen146.c.73539.de&asl=>
- Treiling, T. (29. Juni 2014). abowind.com. Von <http://www.abowind.com/de/unternehmen/bautagebuch-dorn-duerkheim.html> abgerufen
- Vestas. (29. Juni 2014). vestas.com. Von <http://www.vestas.com/en/media/news> abgerufen



Literatur und Quellen

- 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 abgerufen
- 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&usq=AFQjCNEwoGzxr_HZISKIeHKwL7XBYIrITg&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 abgerufen
- W3 (29. Juni 2014) <http://w3.windmesse.de/windenergie/news/13840-elmeko-entfeuchtungsgerate-arbeiten-in-rotornaben>
- Niebüll GmbH (29. Juni 2014) http://www.bw-niebuell.de/informationen/technische_daten.php