



Basics of Electrical Power Generation

Windenergie



Stand: 2011
1 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

GE Global Research
Freisinger Landstrasse 50
85748 Garching
kontakt@reg-energien.de

Inhalte

1. Wind allgemein
2. Technik zur Windnutzung
3. Installierte Windkraftanlagen

Stand: 2011
2 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Wind allgemein

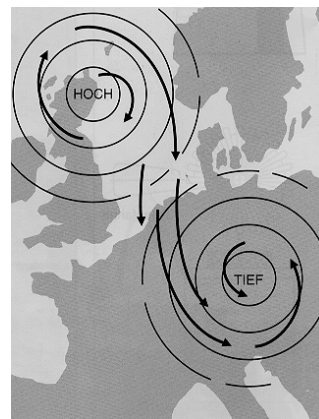
Entstehung von Wind

- Der durchschnittliche Luftdruck liegt bei ca. 1.013 hPa
- Dichte- und Druckgradienten in Atmosphäre entstehen durch Sonneneinstrahlung
- Die Sonneneinstrahlung ist von Region zu Region unterschiedlich stark
- Windenergie ist eine indirekte Form der Sonnenenergie
- Wind ist Ausgleichsströmung der Luft zwischen Regionen unterschiedlichen Luftdrucks Hochdruck- und Tiefdruckgebiete

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

mit: A = Rotorfläche senkrecht zum Wind [m²]

v = Windgeschwindigkeit [m/s], ρ = Luftdichte [kg/m³]



Source: <http://www.reg-energien.de>
4 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Windgeschwindigkeiten

Windstärke nach Beaufort	v [m/s]	Auswirkung im Binnenland	Auswirkung auf See
0	0 - 0,2	Rauch steigt senkrecht empor	Spiegelglatte See
1	0,3 - 1,5	Windrichtung nur durch Rauch erkennbar	Schuppenförmige Kräuselwellen
2	1,6 - 3,3	Wind im Gesicht fühlbar, Blätter säuseln	Kurze, kleine Wellen
3	3,4 - 5,4	Blätter und dünne Zweige bewegen sich	Wellenkämme beginnen sich zu brechen
4	5,5 - 7,9	Bewegte Zweige und dünne Äste, hebt Staub	Noch kleine Wellen, aber viel-fach weiße Schaumköpfe
5	8,0 - 10,7	Kleine Bäume beginnen zu schwanken	Mäßig lange Wellen mit Schaumkämmen
6	10,8 - 13,8	Pfeifen an Drahtleitungen	Bildung hoher Wellen (2,5 m - 4 m), größere Schaumflächen
7	13,9 - 17,1	Fühlbare Hemmung beim Gehen	See türmt sich, Schaumstreifen in Windrichtung
8	17,2 - 20,7	Bricht Zweige von den Bäumen, erschwert erheblich das Gehen	Hohe Wellenberge (über 7 m), Gipfel beginnen zu verwehen
9	20,8 - 24,4	Kleinere Schäden an Häusern und Dächern	Dichte Schaumstreifen, Rollen der See, Gischt verweht
10	24,5 - 28,4	Entwurzelt Bäume, bedeutende Schäden	Sehr hohe Wellenberge, See weiß durch Schaum
11	28,5 - 32,6	Verbreitete schwere Sturmschäden	Außergewöhnlich hohe Wellen-berge, Kämme überall zu Gischt verweht
12	> 32,7		Luft mit Schaum und Gischt angefüllt, keine Fernsicht mehr

Stand: 2011
5 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Geschichte der Windenergie

- Jahrhundertelange haben Menschen Wind genutzt:
 - zur Fortbewegung (Segelschiffe, Ballons)
 - zur Verrichtung mechanischer Arbeit (Windmühlen, Wasserpumpen)



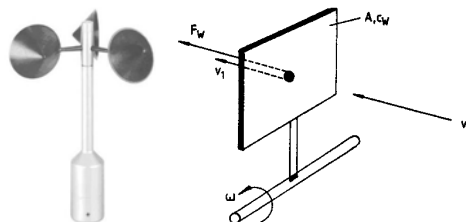
Stand: 2011
6 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Technik zur Windnutzung

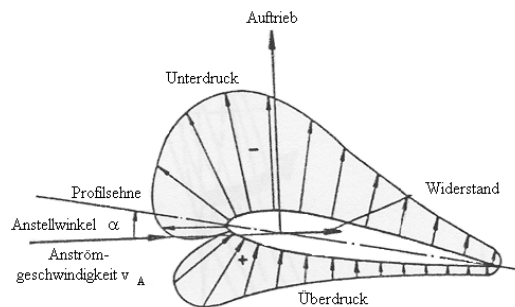
Funktionsprinzip Widerstandsläufer

- Widerstandsläufer sind die einfachste Umwandlungsmöglichkeit der Windenergie in ein Drehmoment
- Dem Wind wird eine Widerstandsfläche A entgegengehalten
- Die Luftwiderstandskraft wird zum Antrieb genutzt
- Die Kraft wirkt in Richtung der Anströmung
- Widerstandsläufer haben einen niedrigeren Wirkungsgrad
- Ausführungsbeispiel:
Schalenkreuzanemometer



Funktionsprinzip Auftriebsläufer

- Moderne Windkraftanlagen zur Stromerzeugung sind aerodynamisch angetriebene Turbinen
- Rotorblätter sind als aerodynamisches Profil ausgeprägt
- Der Druckunterschied zwischen Saug- und Druckseite des Rotorblattes erzeugen Auftrieb
- Der Auftrieb wird in Drehmoment und Drehzahl zum Antrieb des Generators umgesetzt
- Sie sind technisch aufwendiger als Widerstandsläufer
- Höherer Wirkungsgrad

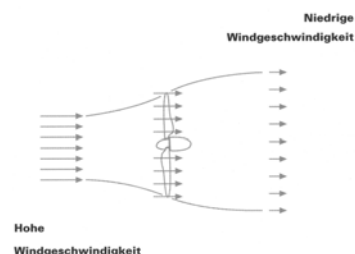


Stand: 2011
9 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Theoretisch nutzbare Windenergie

- Windenergie ist kinetische Energie der Luftteilchen
- Nur ein Teil der Windenergie kann genutzt werden, da die Geschwindigkeit durch ein Windrad nicht auf 0 abgebremst werden kann
- Die Strömungsenergie kann theoretisch zu maximal 59,3% entnommen werden → Betz'scher Leistungsbeiwert (c_p)
- Durch Leistungsentnahme verlangsamt sich der Wind wobei der Massenstrom gleich bleiben muss
- Daher erfolgt eine Aufweitung des Windes bei verringerter Geschwindigkeit

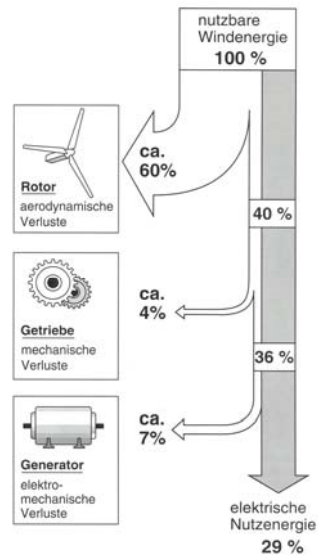


Stand: 2011
10 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Nutzbare Windenergie

- Die theoretische Ausnutzung von 59,3% der Windenergie wird vom realen Rotor nicht erreicht
- Zusätzliche Verluste entstehen an Getriebe und Generator
- Für ein realistisches Beispiel ist, bei optimalen Bedingungen, nach Abzug der verschiedenen Verluste, ein knappes Drittel der Windenergie als elektrische Nutzenergie umwandelbar

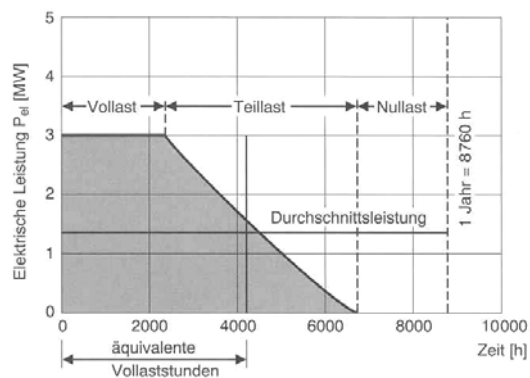


Stand: 2011
11 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Beispiel einer Jahresdauerlinie (3 MW WKA)

- An windgünstigen Standorten (onshore) ist für mehr als 2000 Stunden Volllastbetrieb möglich
- Die Verfügbarkeit einer WKA liegt bei über 7.000 Jahresbetriebsstunden, davon allerdings gut 2/3 im Teillastbereich
- Im Nulllastbereich steht die Anlagen aufgrund von Wartungen und Reparaturen oder wegen mangelnder Windstärke



Stand: 2011
12 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Bauformen

- Horizontale Rotationsachse
 - Horizontale Lagerung der Drehachse
 - Häufigste Bauform
 - Die Achse muss der Windrichtung nachgeführt werden



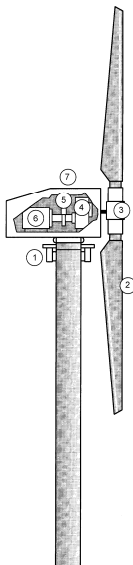
- Vertikale Rotationsachse
 - Vertikal gelagerte Drehachse
 - Funktion unabhängig von Windrichtung
 - Mechanische und elektrische Bauelemente können am Boden untergebracht werden
 - Verhältnismäßig ungünstiger Wirkungsgrad



Stand: 2011
13 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Systemkomponenten Horizontalkonverter



- ① Turm mit Nachführung
- ② Rotorblätter
- ③ Blattverstellung
- ④ Getriebe
- ⑤ Bremsen
- ⑥ Generator
- ⑦ Gondel



Stand: 2011
14 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Offshore-Windkraftanlagen

- Die Nutzung der Windenergie im Meer wird als Offshore-Windenergie bezeichnet
- Der Vorteil sind hohe durchschnittliche Windgeschwindigkeiten und längere Windzeit auf dem Meer: dadurch bis zu 40% höhere Energieausbeute als an Land
- In Nord- und Ostsee werden bis 2030 Windparks mit 25.000 MW Leistung installiert



Stand: 2011
15 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Installierte WKAs

Installierte Leistung in Deutschland

- Anlagenhäufung in Nord- und Mitteldeutschland (2010: ~ 28 GW mit 22.000 Anlagen)
- Treiber ist das regionale Windaufkommen



Stand: 2011
17 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Offshore-Anlagen in Deutschland



Stand: 2011
18 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Installierte Leistung der EU 2007

Deutschland führend im Europäischen Vergleich

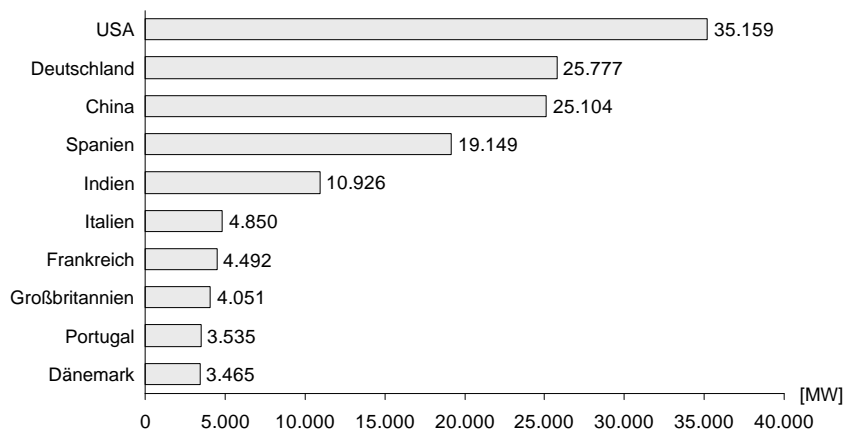


Stand: 2011
19 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Installierte Windenergiekapazität Top 10 (2009)

- USA mit höchster installierten Kapazität
- Deutlicher Abstand zwischen Top 5 und Rest



Stand: 2011
20 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Zusammenfassung

- Wind ist Ausgleichsströmung der Luft zwischen Regionen unterschiedlichen Luftdrucks
- Die Strömungsenergie kann theoretisch zu maximal 59,3 % entnommen werden → Betz'scher Leistungsbeiwert (c_P)
- Für ein realistisches Beispiel ist ein knappes Drittel der Windenergie als elektrische Nutzenergie umwandelbar
- Bauformen: Horizontale und vertikale Rotationsachse
- Die Nutzung der Windenergie im Meer wird als Offshore-Windenergie bezeichnet
- Die installierte Anlagenleistung häuft sich in Nord- und Mitteldeutschland
- USA hat die höchste installierte Kapazität (ca. 35 GW)

Stand: 2011
21 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

Frei

Stand: 2011
22 / 22

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer