

Energieträger

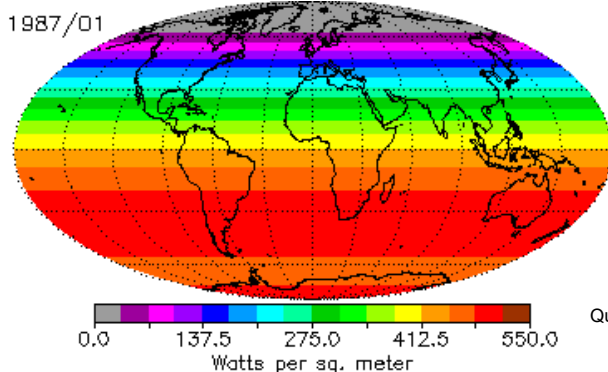
- 050 Windenergie -

EGT
Sommersemester 2017

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 1

Entstehung des Windes

Sonneneinstrahlung auf die Erde

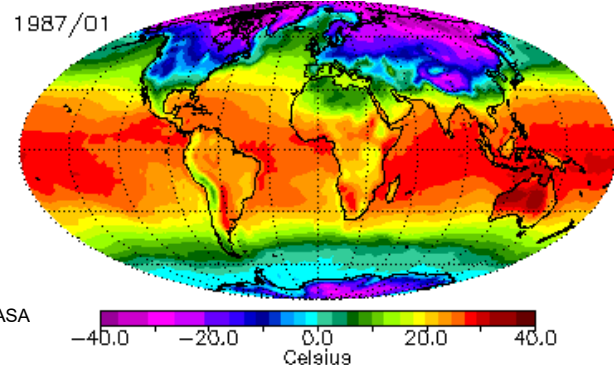


- ◆ 5 400 000 000 PJ/a erreichen die Oberfläche der Atmosphäre.
- ◆ Weltweiter Primärenergiebedarf 2008: 518 000 PJ

- In 50 Minuten erreicht die Erde soviel Sonnenenergie, wie in einem Jahr an Primärenergie verbraucht wird

Daten: IEA

Oberflächennahe Temperatur

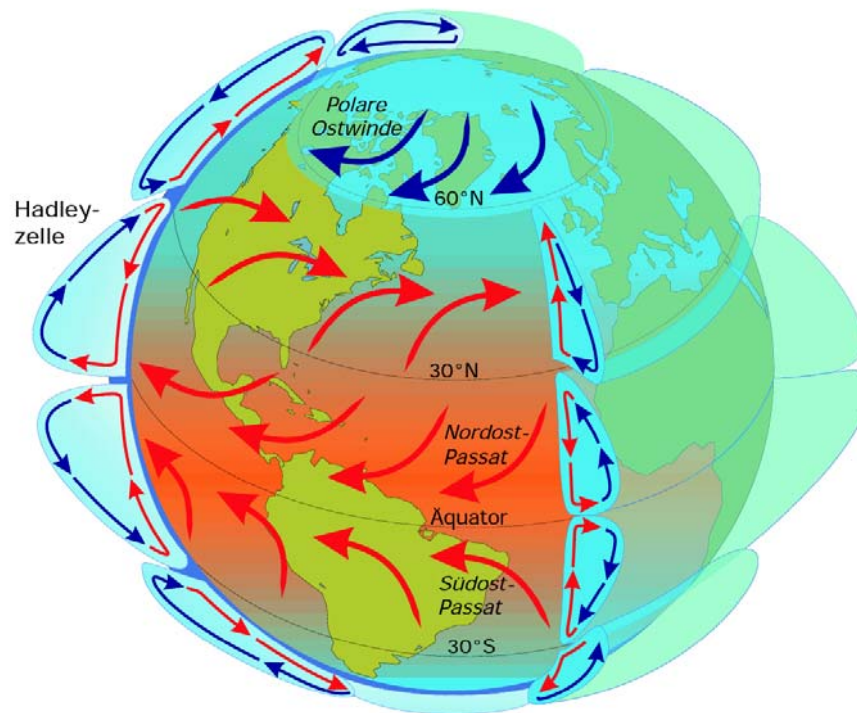


Quelle: NASA

- ◆ Kugelform der Erde,
- ◆ Ungleiche Wärmekapazität des Bodens,
- ◆ Topographie,
- ◆ Tageszeit,
- ◆ Wetter (z.B. Bewölkung),
- ◆ Feuchtigkeit der Luft
- Ungleiche Temperaturverteilung

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 2

Globales Windsystem

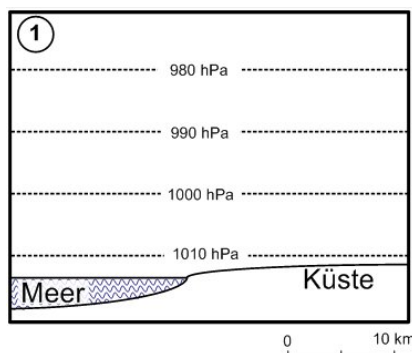


Quelle: [Qua08]

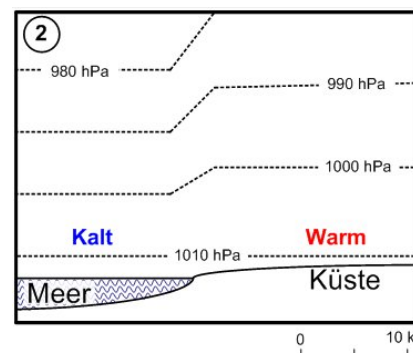
© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 3

Lokale Ausgleichswinde

See-Landwind



1. Der Luftdruck ist ausgeglichen. Es ist gibt keinen Druckunterschied zwischen Meer und Küste, Wind oder thermische Zirkulation.



Quelle: BWE

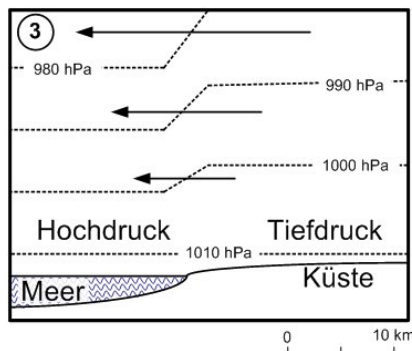
2. Die Sonnenstrahlen heizen eine Zone stärker als die andere auf. Im Meer ist die Wärmekapazität größer als an Land. Die Luft ist über der Erde wärmer als über dem Wasser. Die Dichte der warmen Luft ist geringer als die Dichte der kalten Luft und die Temperaturdifferenz führt einen Druckunterschied herbei.

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 4

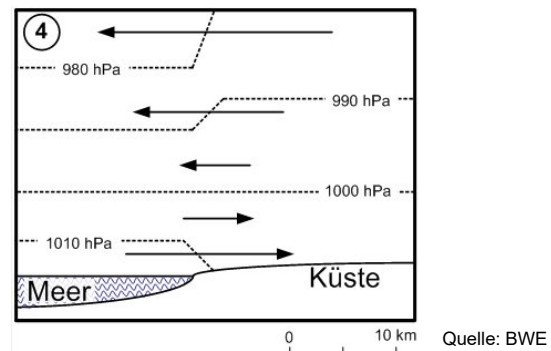


Lokale Ausgleichswinde

See-Landwind



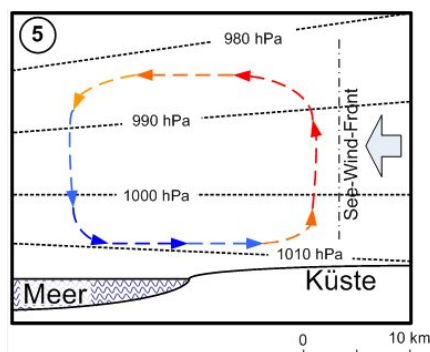
3. Dieser Druckunterschied ist instabil und löst dann eine Luftmassenbewegung aus. Die Luft geht vom höheren Druck zum niedrigen Druck (vom Land zum Meer). In der Höhe, wo die Druckdifferenz größer ist, ist auch die Luftbewegung stärker.



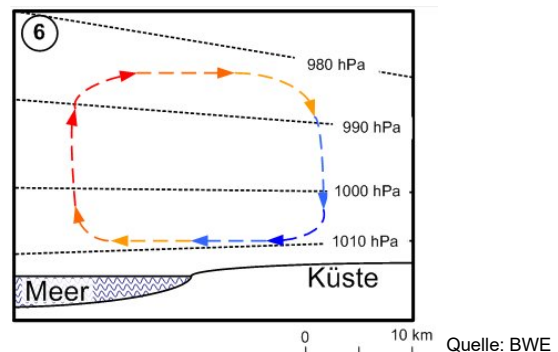
4. Diese Luftbewegung löst einen Luftmangel über dem Boden und einen Überdruck über dem Meer aus: in Bodennähe ist ein Gegenwind vom Meer zum Land entstanden. In höheren Luftschichten geht die Luftbewegung vom Land zum Meer weiter.

Lokale Ausgleichswinde

See-Landwind



5. Die Luft geht in Bodennähe vom Meer zum Land und erwärmt sich, die warme Luft von der Küste wird über dem Meer wieder abgekühlt. Eine geschlossene Zirkulation ist entstanden. Dieser Zyklus geht solange weiter wie die Küste sich erwärmt und endet wenn die Sonnenstrahlen an Intensität abnehmen und so die Wärmezufuhr geringer wird.

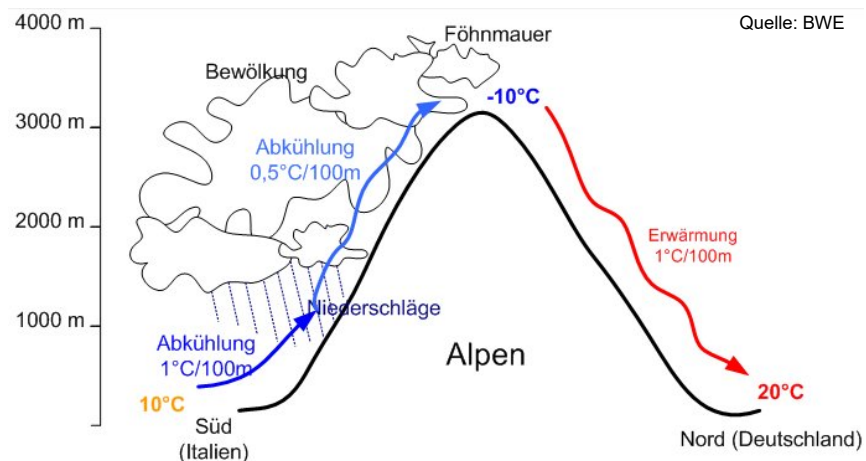


6. Nachts ist dieser Zyklus umgekehrt: die Luft kühlt sich über der Küste ab und wird über dem Wasser wieder erwärmt und steigt nach oben. Das oben beschriebene Prinzip ist genau umgekehrt und über dem Boden weht der Wind vom Land zum Meer. Der beschriebene Zyklus ist nachts sehr viel schwächer als tagsüber.



Lokale Ausgleichswinde

Warmer Fallwind



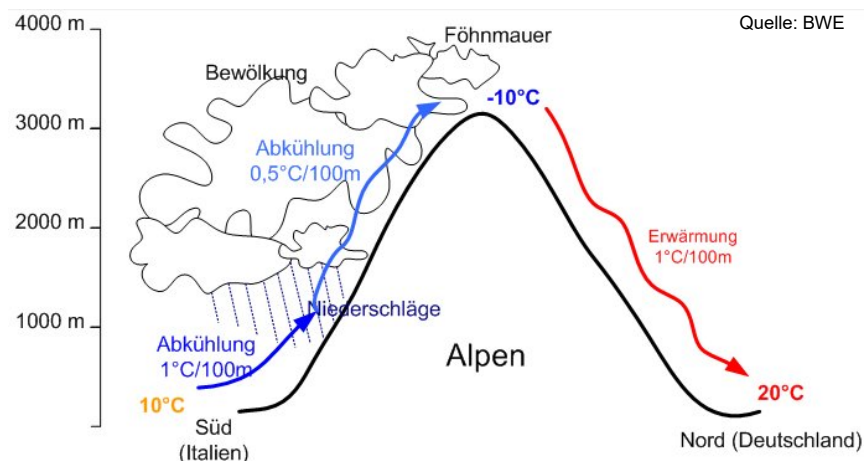
- ◆ Wind weht in der Höhe über ein Gebirge, dabei steigt er und kühlt sich ab. Dabei kondensiert Wasser aus, es bilden sich Niederschläge und Bewölkung aus. Deswegen gibt es in der Luv-Seite eines Gebirges schlechteres Wetter als auf der Lee-Seite.
- ◆ Der nun trockene Wind weht über die Gebirgskuppe und auf der Lee-Seite des Gebirgszuges hinab. In der Lee-Seite sinkt, verstärkt und erwärmt sich der Wind wegen des Einfluss eines größeren Luftdrucks. Wegen seiner niedrigen Feuchtigkeit ist die Erwärmung schneller als die Erkaltung auf der Luv-Seite: sie beträgt ein Grad Celsius je 100m Höhe.

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 7



Lokale Ausgleichswinde

Warmer Fallwind

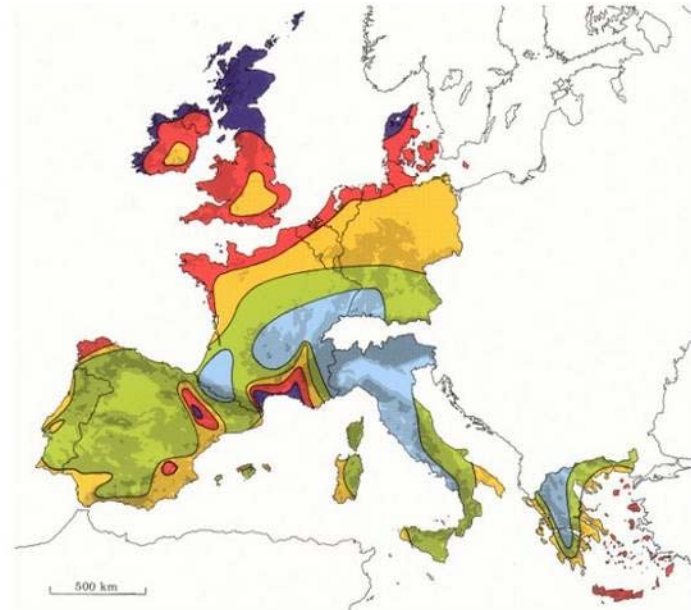


- ◆ Die Temperatur eines Föhnes kann um bis zu 30 Grad in ein paar Stunden steigen. Deswegen gibt es auf der Lee-Seite höhere Temperaturen als auf der Luv-Seite eines Gebirges. Die Temperatur des Windes ist wegen der niedrigen Feuchtigkeit höher hinter als vor dem Gebirge.
- ◆ Beispiele:
 - Föhn in Süddeutschland
 - Jauk in Kärnten

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 8

Windpotenzial

Europa



Windgeschwindigkeit

- > 6 m/s
- 5 bis 6 m/s
- 4,5 bis 5 m/s
- 3,5 bis 4,5 m/s
- < 3,5 m/s

Quelle: RISOE DTU

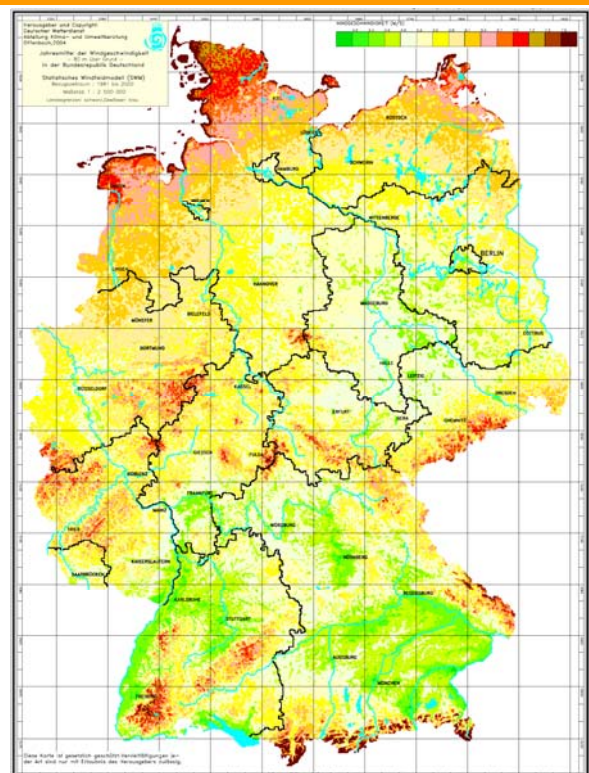
- ◆ Mittlere Windgeschwindigkeit auf einer fiktiven Meereshöhe ohne Berücksichtigung von Orographie oder Rauigkeiten
- ◆ Herausragende Verhältnisse in Großbritannien
- ◆ Frankreichs Mittelmeerküsten profitieren vom Düseneffekt der angrenzenden Gebirge

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 9

Windpotenzial

Deutschland

- ◆ Diese Karte stellt die mittlere Windgeschwindigkeit 80 m über dem Boden dar und unterscheidet sich deshalb sehr von den vorangehenden (theoretische Windgeschwindigkeit auf Meeresspiegelhöhe ohne Hindernisse und Rauigkeit).
- ◆ Technisches Potenzial der Windenergie in Deutschland:
 - Onshore: 237 TWh/a
 - Offshore: 70 – 85 TWh/a bis 2030
- ◆ Zum Vergleich: Nettostromerzeugung in Deutschland 2010: 584 TWh



Daten: Kaltschmitt und Wiese 2003; BMU 2002; AGE 2011

Quelle: DWD

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 10



Windstärke / Windklassen

Die Beaufort-Skala

- ◆ Sir Francis Beaufort entwickelte 1806 eine zwölfteilige Skala um die Windgeschwindigkeit in Windstärken einzuteilen. Die Maßeinheit dieser Skala lautet Beaufort, abgekürzt bft.
- ◆ Die nach Beaufort gemessenen Winde werden üblicherweise in die Stärken 0 bis 12 eingeteilt, die sich nach den beobachtbaren Auswirkungen des Windes auf die Umgebung (im Binnenland und auf See) bemessen.
- ◆ Zwischen Windgeschwindigkeit v und Beaufort-Windstärke B befindet sich folgender Zusammenhang:

$$v(m/s) = 0,836 \cdot B^{3/2} \quad \text{oder} \quad v(km/h) = 3,01 \cdot B^{3/2}$$

- ◆ Eine moderne Windkraftanlage (WKA) fängt mit einer schwachen Brise (5 m/s) zu drehen an, erreicht ihre Nennleistung mit einem steifen Wind (13 m/s) und kann bis zum schweren Sturm (25 m/s) ungefährdet drehen und Strom liefern.

Quelle: BWE

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 11



Windstärke / Windklassen

Die Beaufort-Skala

Windstärke	Bezeichnung	Windgeschwindigkeit in m/s	Wirkungen an Land
0	still	0 bis 0,5	Rauch steigt senk recht hoch
1	leiser Zug	0,6 bis 1,7	Rauch schwach bewegt
2	leichte Brise	1,8 bis 3,3	für das Gefühl bemerkbar
3	schwache Brise	3,4 bis 5,2	Blätter leicht bewegt
4	kräftige Brise	5,3 bis 7,4	hebt Staub und loses Papier
5	frische Brise	7,5 bis 9,8	kleine Bäume schwanken
6	starker Wind	9,9 bis 12,4	heult an Häusern
7	steifer Wind	12,5 bis 15,2	wirft auf Wellen Schaumköpfe
8	stürmischer Wind	15,3 bis 18,2	hindert am Gehen
9	Sturm	18,3 bis 21,5	deckt Ziegel ab
10	schwerer Sturm	21,6 bis 25,1	wirft Bäume um
11	orkanartiger Sturm	25,2 bis 29,0	schwere Zerstörungen
12	Orkan	über 29,0	schwere Verwüstungen

Bereich der
Windstromproduktion

Quelle: BWE

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 12



Windstärke / Windklassen

Die IEC-Windklassen

- ◆ In der Windenergiebranche charakterisiert man Standorte nach den IEC Windklassen.
- ◆ Diese Skala gibt keine Windgeschwindigkeit zu einer bestimmten Zeit an, sondern beschreibt das Windpotenzial eines Standorts nach mittleren und maximalen Geschwindigkeiten.
- ◆ Deutsche Nordseeküste ist im IEC I. Im Binnenland befinden sich üblicherweise die Zonen IEC II bzw. III.

IEC Windklassen	V_{ave} : Mittlere Windgeschwindigkeit (m/s)	V_{10} : Max 10 min Mittlere Windgeschwindigkeit in 50 Jahre (m/s)	V_{50} : Max 3 sek. Böe Geschwindigkeit in 50 Jahren (m/s)	V_d : Max 3 sek. Böe Geschwindigkeit in einem Jahr (m/s)
IV	6	30	42	31,5
III	7,5	37,5	52,5	39,375
II	8,5	42,5	59,5	44,625
I	10	50	70	52,5

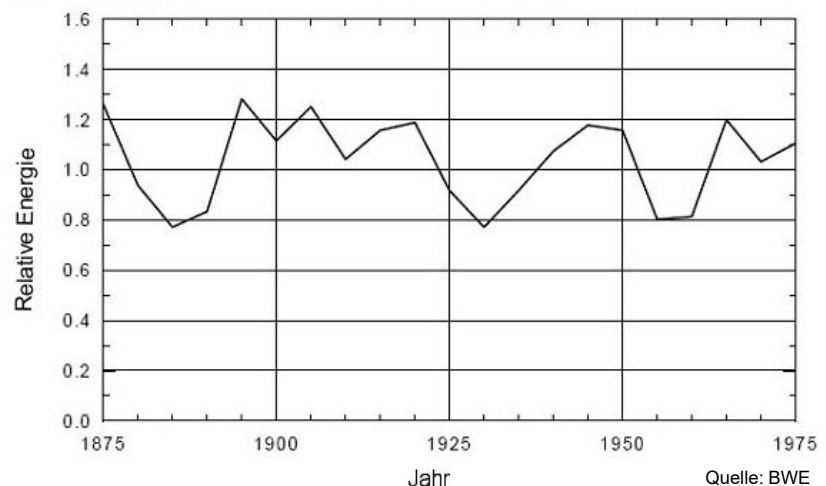
Quelle: BWE

Windschwankungen



Jahresschwankungen

- ◆ Der Wind ist in der Zeit nie konstant und Schwankungen sind in allen Zeiträumen zu bemerken.
- ◆ In vielen Regionen können lange Wind-Perioden von 10 bis 20 Jahren, mit klassischen Abweichungen von plus und minus 20% beobachtet werden.
- ◆ Beispiel: mittlere 5-Jahres-Windenergie zwischen 1875 und 1985 in Hesselø, Dänemark.



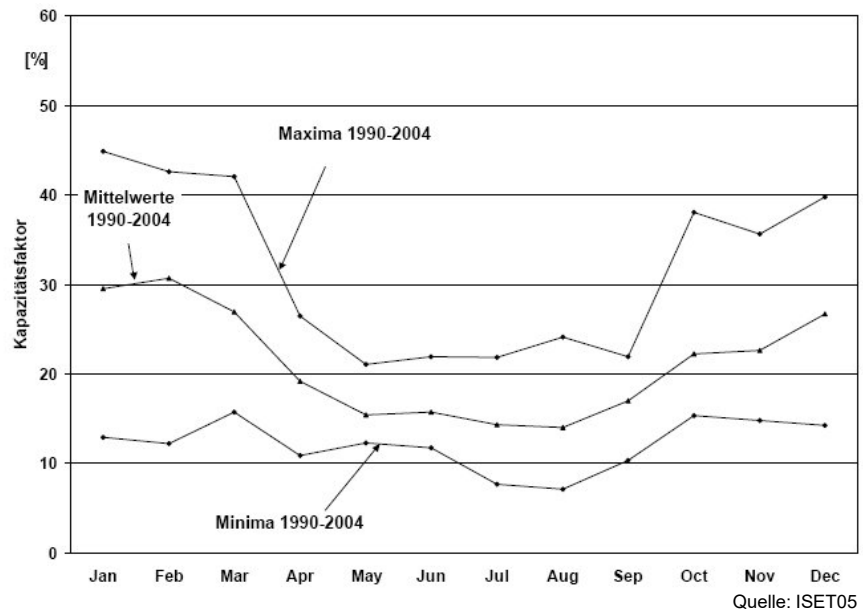
Quelle: BWE



Windschwankungen

Saisonale Schwankungen

- ◆ In Deutschland weht der Wind stärker und öfter im Winter als im Sommer, deswegen produzieren die deutschen Windkraftanlagen zwei Mal mehr Energie im Februar als im Juni.
- ◆ Beispiel:
Mittlerer monatlicher Ausnutzungsgrad der Windkraftanlagen in Deutschland.



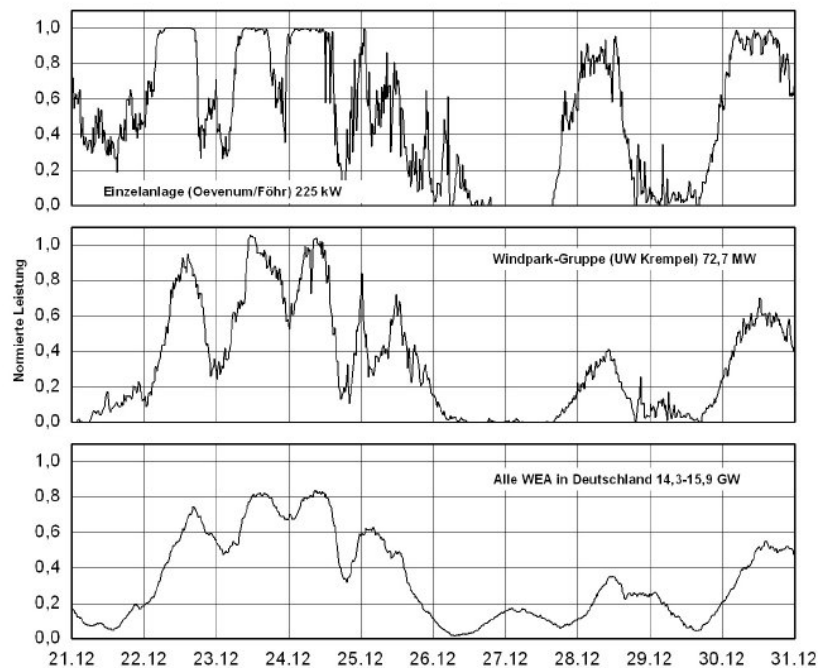
© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 15

Windschwankungen



Zeitverlauf der normierten Leistung einer Windkraftanlage, einer Windpark-Gruppe und aller deutschen WKAs.

- ◆ Verteilung auf eine größere Fläche, und die große Anlagenzahl führt zu einer Vergleichmäßigung der Einspeisung.
- ◆ Dieser Effekt führt zu einer niedrigeren Belastung des Netzes sowie einer besseren Vorhersagbarkeit der Einspeisung durch Windstrom.



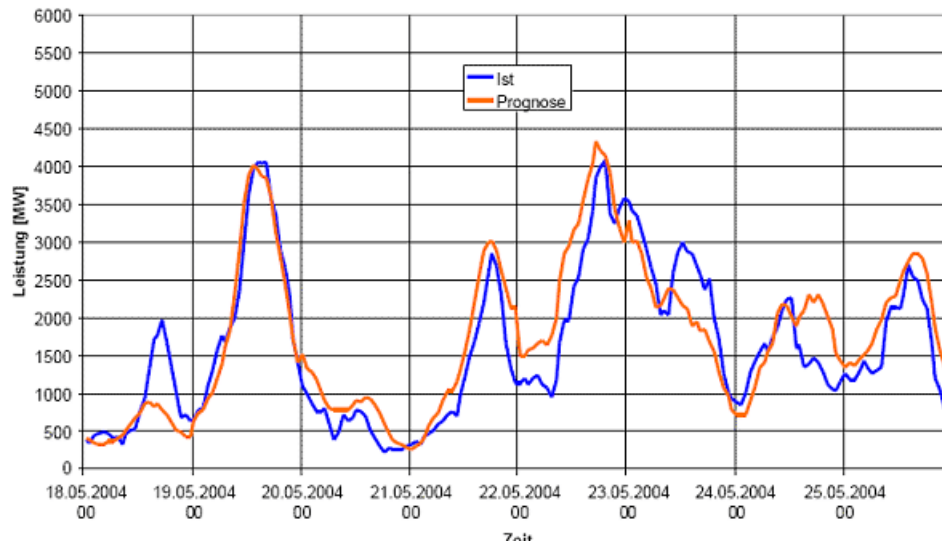
© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 16



Windschwankungen

Windleistungsvorhersage

- Um die Windenergie ins Netz integrieren zu können wird die Höhe der eingespeisten Windleistung vorhergesagt. Wenn der Wind nicht weht, muss der Strom durch andere Kraftwerke erzeugt werden. Mit Hilfe der Prognose kann der Netzbetreiber die Stromerzeugung an den vorhergesagten Stromverbrauch anpassen.



Quelle: ISET05

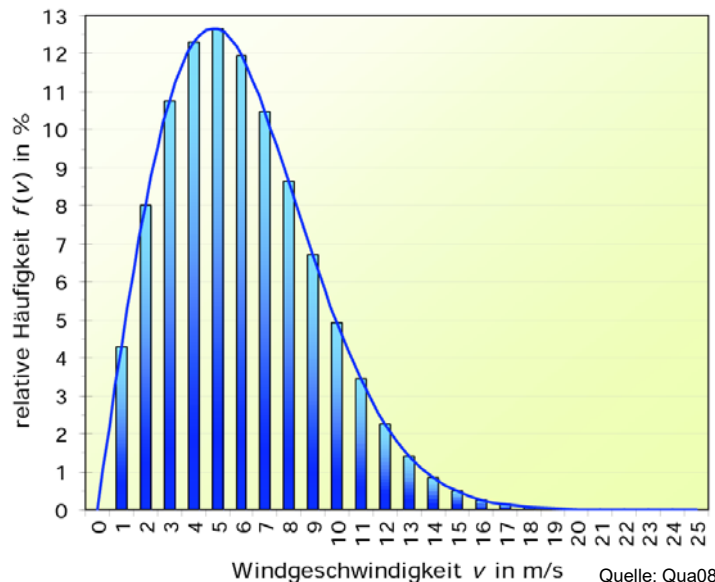
© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 17



Häufigkeitsverteilung des Windes

Weibull-Verteilung

- Um die Energieerzeugung durch eine WKA vorherzusagen benötigt man eine Aussage über die Häufigkeit der unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten.
- Dazu teilt man die Windgeschwindigkeiten in Klassen mit je 1 m/s Klassenbreite (also 0 bis 1 m/s; 1 bis 2 m/s, 2 bis 3 m/s, usw.).
- Der Energiegehalt des Windes an einem Standort lässt sich nun durch die Häufigkeiten dieser Windgeschwindigkeitsklassen ausdrücken, d.h. durch die Angabe der Zeit (oder der relativen Häufigkeit) mit der die jeweilige Windgeschwindigkeitsklasse auftritt.



Quelle: Qua08

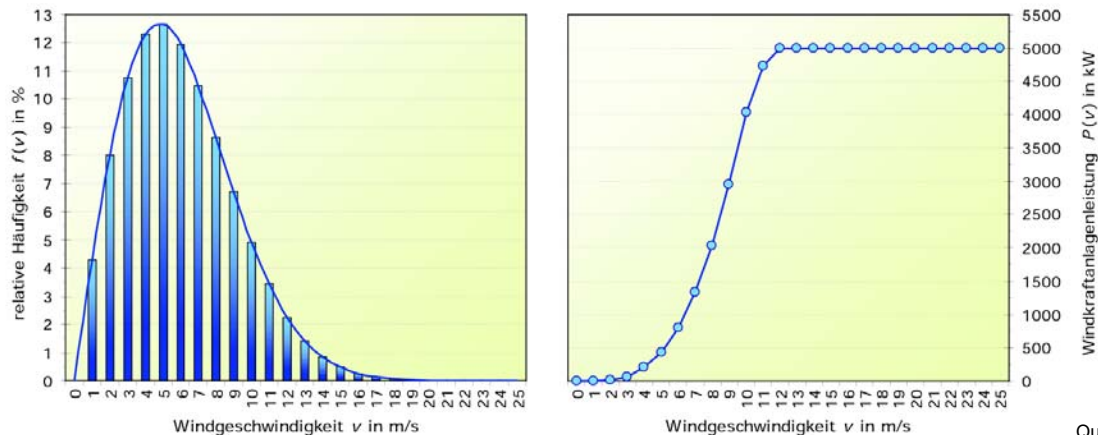
© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 18



Häufigkeitsverteilung des Windes

Abschätzung des Ertrags eines Windparks

- Die Leistungskennlinie einer Windkraftanlage gibt an, welche elektrische Leistung $P(v)$ die Windkraftanlage bei einer Windgeschwindigkeit v abgibt. Die Leistungskennlinie stellt in der Regel der Hersteller einer Anlage zur Verfügung.
- Der Jahresertrag E der Windkraftanlage lässt sich anhand beider Kennlinien berechnen, wenn man jeweils für jede Windgeschwindigkeit den entsprechenden Wert der Häufigkeitsverteilung mit der Leistungskennlinie multipliziert und anschließend alle Ergebnisse addiert.



© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 19



Häufigkeitsverteilung des Windes

Abschätzung des Ertrags eines Windparks

$$E = \sum_i f(v_i) \cdot P(v_i) \cdot 8760 \text{ h} = \left[f\left(0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \cdot P\left(0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) + f\left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \cdot P\left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) + f\left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \cdot P\left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) + \dots \right] \cdot 8760 \text{ h}$$

- Beispiel für die vorherige Folie:

$$E = \left(0\% \cdot 0 \text{ kW} + 4,3\% \cdot 0 \text{ kW} + 8\% \cdot 7,5 \text{ kW} + 10,8\% \cdot 62,5 \text{ kW} + 12,3\% \cdot 205 \text{ kW} + \dots \right) \cdot 8760 \text{ h}$$

$$= 11\,685\,000 \text{ kWh}$$

- Es erfolgen Abschläge aufgrund von
 - gegenseitiger Anlagenverschattung (Parkwirkungsgrad)
 - Anlagenausfällen und Stillstandszeiten (Verfügbarkeit)
 - anderen nicht berücksichtigten Einbußen

Quelle: Qua08

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 20



Physik der Windenergienutzung

- ◆ Energieumwandlungen durch eine Windkraftanlage
 - Die Rotorblätter einer Windkraftanlage wandeln die kinetische Energie der strömenden Luft in kinetische Energie des rotierenden Windrades um.
 - Der Generator der WKA wandelt diese Rotationsenergie weiter in elektrische Energie um.
- ◆ Kinetische Energie der strömenden Luft
 - Jedes bewegte Objekt mit einer Masse m enthält eine kinetische Energie E (Bewegungsenergie), um die sich der Gesamtenergiebetrag des Objekts zu einem ruhenden und ansonsten gleichen Objekt unterscheidet:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

- Für Windkraftanlagen ist die bewegte Masse die Luft die durch die Rotorfläche strömt.
- ◆ Energie und Leistung
 - Die Leistung P ist gleich der Energie E pro Zeiteinheit. Um die Leistung zu kalkulieren müssen wir in der oberen Gleichung die Masse m durch den Massenstrom dm/dt der durch die Rotorfläche der Windkraftanlage strömt, ersetzen.



Physik der Windenergienutzung

- ◆ Die Masse der Luft ist:

$$m = \rho \cdot V$$

wobei die Dichte ρ abhängig ist von Temperatur und Druck:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

Mit steigendem Druck p steigt die Dichte, während sie mit steigender Temperatur T sinkt. Die spezielle Gaskonstante R ist eine Materialkonstante und beträgt für trockene Luft:

$$R_{\text{Luft}} = 287 \text{ J/kg K}$$

- ◆ Der Massenstrom der Luft ist:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

mit dem Volumenstrom:

$$\dot{V} = A \cdot v = \pi \cdot r^2 \cdot v$$

wobei A die vom Rotor überstrichene Fläche ist und r der Rotorradius.

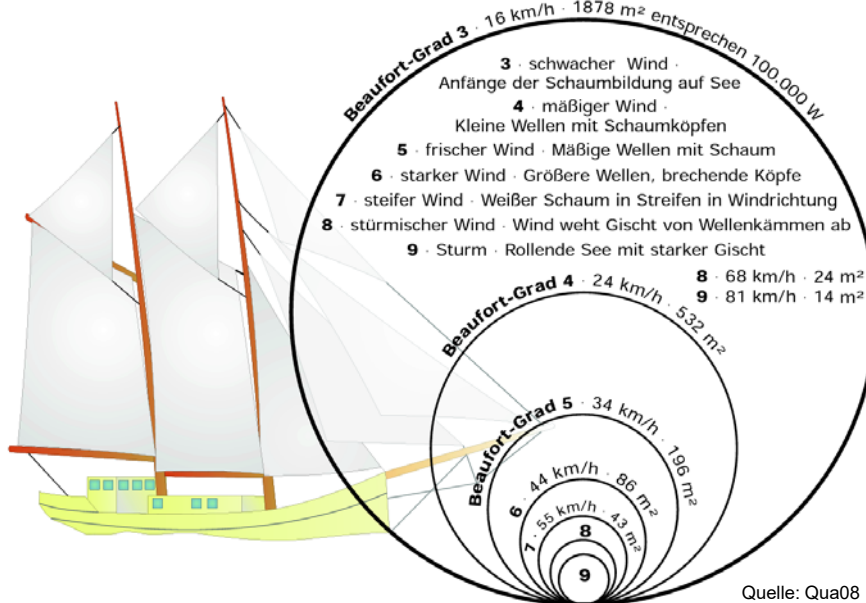


Physik der Windenergienutzung

◆ Leistung des Windes

- Mit den hergeleiteten Formeln können wir die Leistung des Windes, der durch die Rotorfläche eines Windrades strömt, berechnen zu:

$$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3$$



© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 23



Physik der Windenergienutzung

Maximaler Leistungsbeiwert

- ◆ Der Leistungsbeiwert c_p bezeichnet das Verhältnis der dem Wind entzogenen Leistung zur der im Wind enthaltenen kinetischen Leistung (vgl. Folien „Widerstandsprinzip“):

$$c_p = \frac{P_{\text{Wind,ent}}}{P_{\text{Wind}}}$$

- ◆ Unabhängig vom aerodynamischen Prinzip können nicht 100% der Windenergie in Rotationsenergie umgewandelt werden.
- ◆ Der deutsche Physiker Albert Betz (1885-1968) hat 1920 die optimal erreichbare Leistungsumsetzung berechnet. Dies hat er 1926 veröffentlicht.
- ◆ Das Betz'sche Gesetz lautet, dass es ein optimales Verhältnis der Geschwindigkeiten v_1 vor und v_3 nach dem Rotor gibt. Wenn die Geschwindigkeit v_3 nach dem Rotor null ist kann der Wind nicht durch die Windkraftanlage hindurchströmen. Wenn der Wind nicht gebremst ist können wir seine Leistung nicht umwandeln.

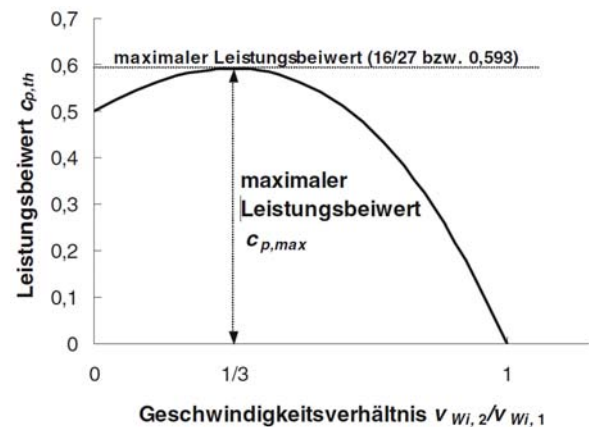
© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 24



Physik der Windenergienutzung

Maximaler Leistungsbeiwert

- Die optimale Windabbremmung ist mit dem Verhältnis v_3/v_1 von $1/3$ erreicht.
- Für dieses Verhältnis ist der optimale Leistungsbeiwert c_p (der aerodynamische Wirkungsgrad) gleich $16/27 = 59\%$.
- In der Rotorebene ergibt sich dann eine Geschwindigkeit von $2/3 v_1$. Hat der ungestörte Wind z.B. eine Geschwindigkeit von 9 m/s dann beträgt die Geschwindigkeit in Rotorebene 6 m/s und hinter der Anlage 3 m/s .



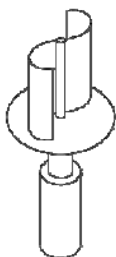
Quelle: Kal06



Physik der Windenergienutzung

Langsamläufer

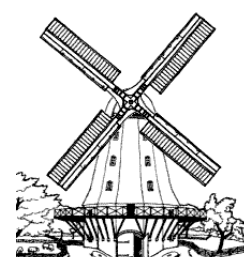
- Langsamläufer haben eine Auslegungsschnelllaufzahl von maximal 2,5.
- Alle Widerstandsläufer haben eine Schnelllaufzahl niedriger als 1 und sind Langsamläufer.
- Auftriebsläufer mit einer Schnelllaufzahl von 1 bis 2,5 sind auch Langsamläufer. In dieser Kategorie finden wir die Westernmills mit einer Schnelllaufzahl von ca. 1; Bockwindmühle und Holländerwindmühle mit einer Schnelllaufzahl von 2.



Savoniusrotor



Westernmill

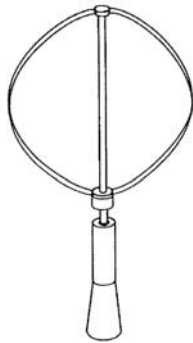


Holländer-Windmühle

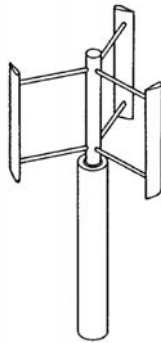
Physik der Windenergienutzung

Schnellläufer

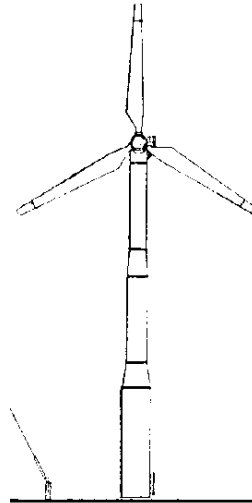
- ◆ Schnellläufer sind Auftriebsläufer mit einer Schnelllaufzahl von 2,5 bis über 15. In dieser Kategorie finden wir alle Strom erzeugende Windkraftanlagen mit einem bis drei Rotorblättern.



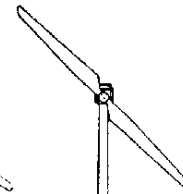
Darrieusrotor



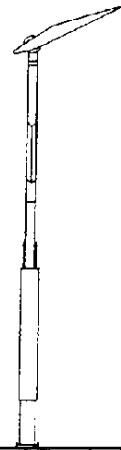
H-Darrieusrotor



Dreiblattrotor



Zweiblattrotor

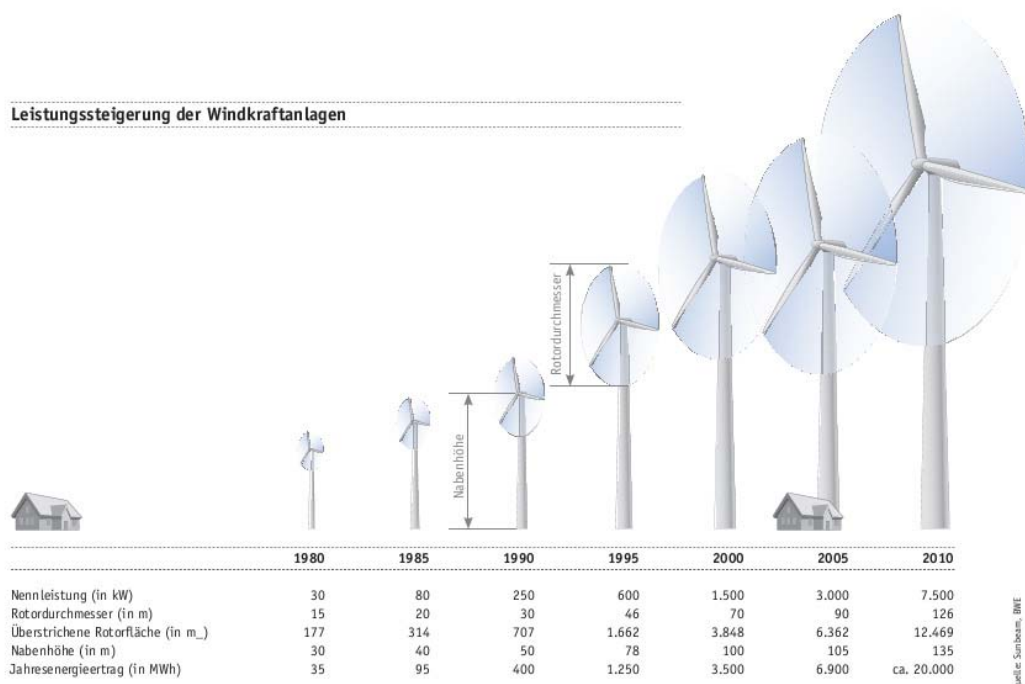


Einblattrotor

Physik der Windenergienutzung

Entwicklung der Anlagengröße

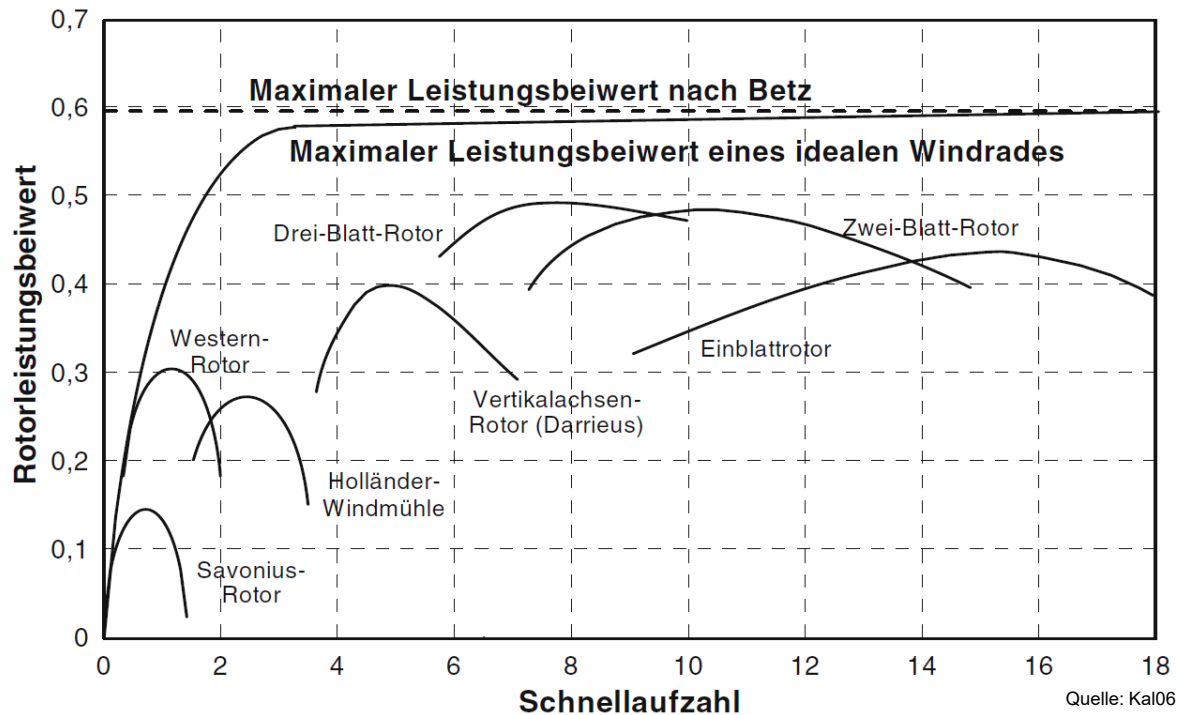
Leistungssteigerung der Windkraftanlagen





Physik der Windenergienutzung

Leistungsbeiwerte verschiedener Rotortypen

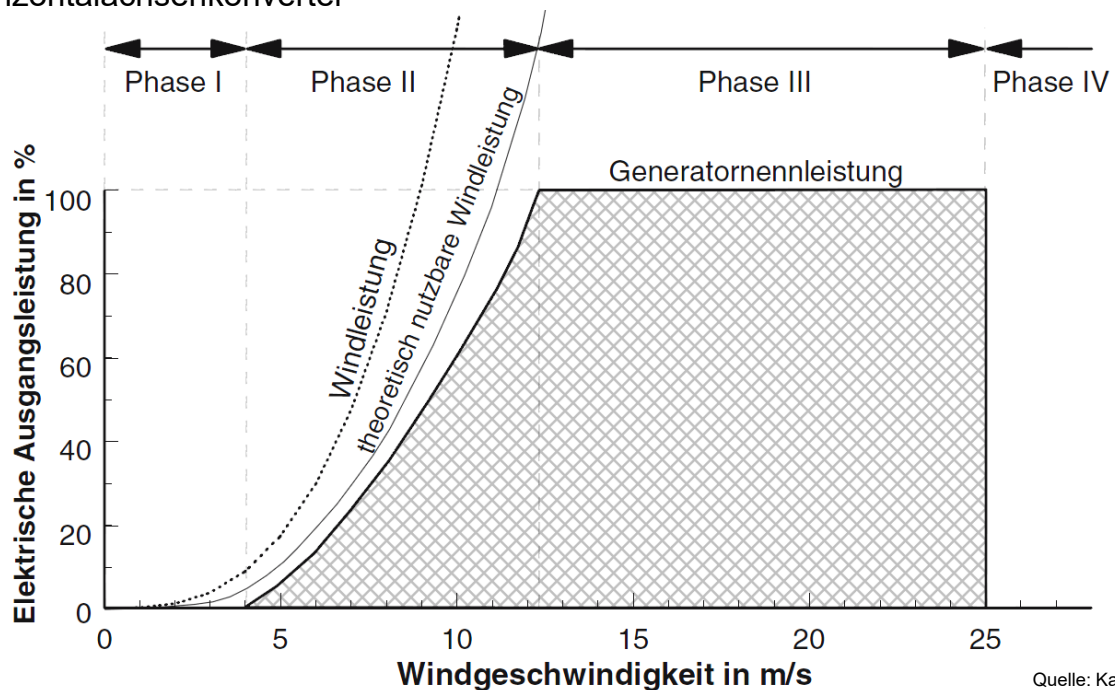


© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 29



Physik der Windenergienutzung

Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Generatorleistung moderner Horizontalachsenkonverter

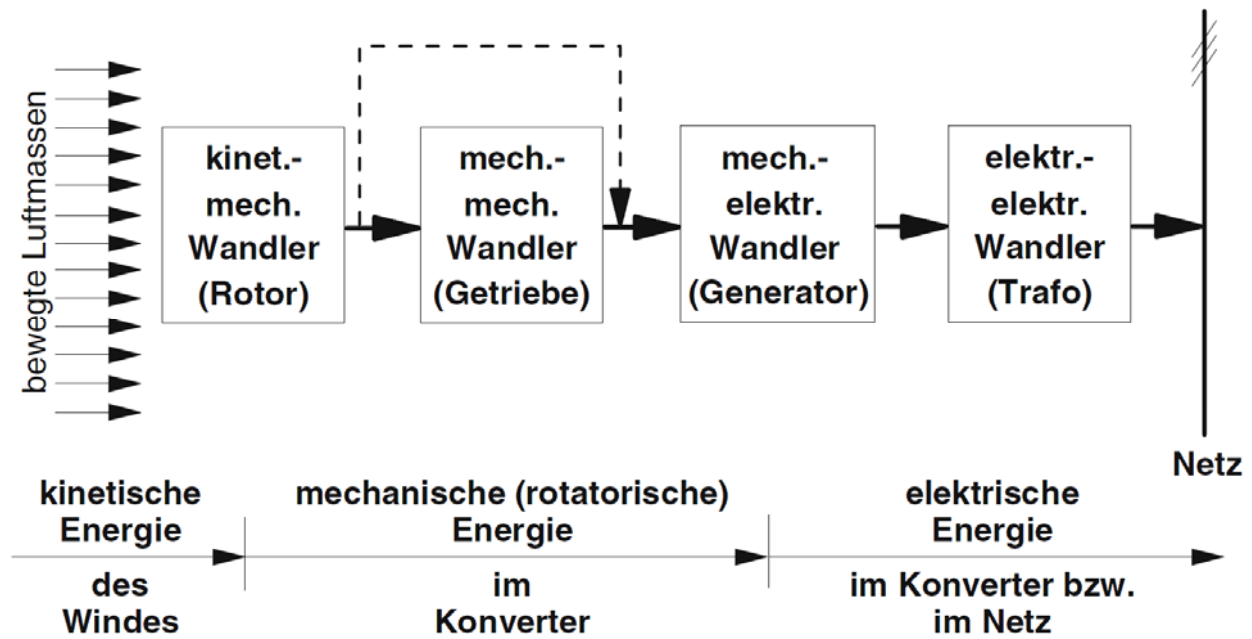


© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 30



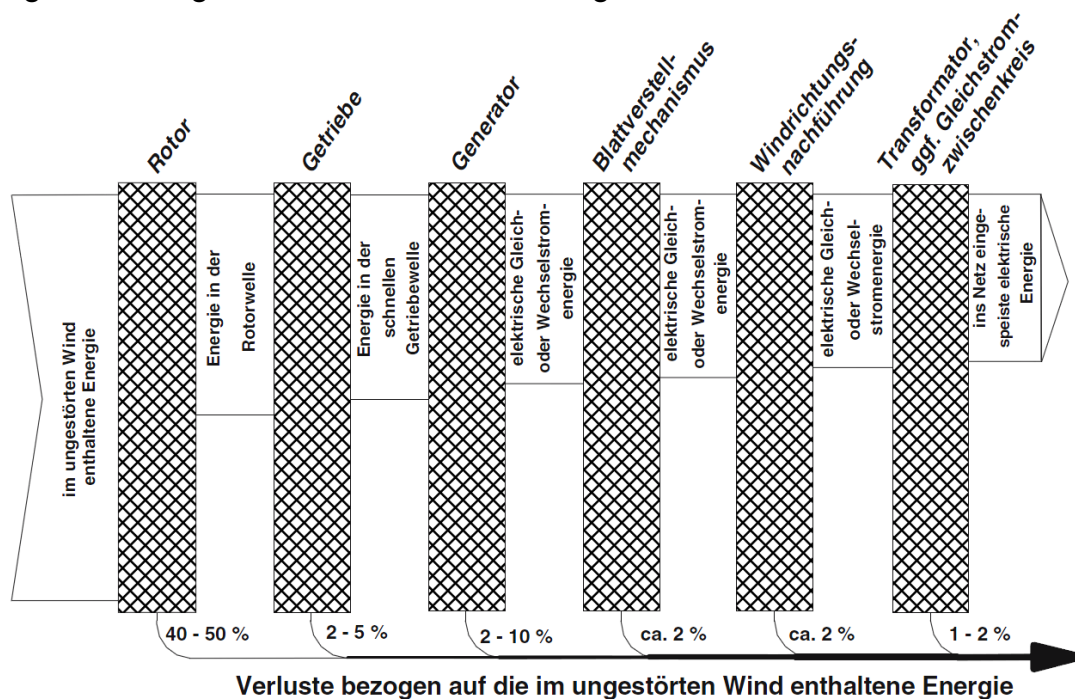
Physik der Windenergienutzung

Energiewandlungskette einer Windkraftanlage



Physik der Windenergienutzung

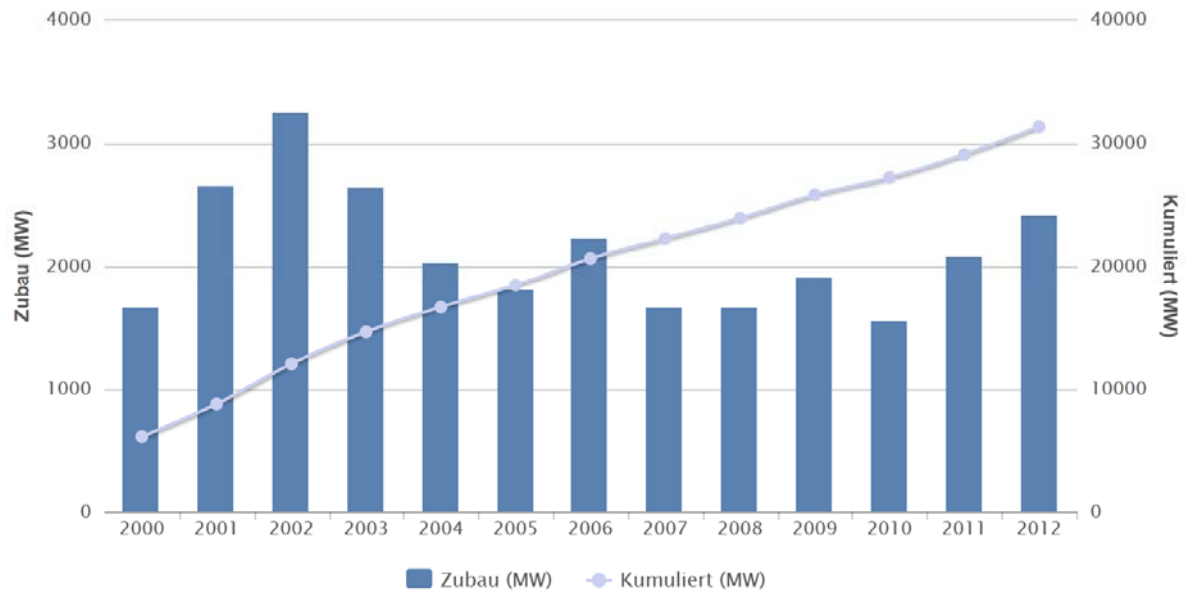
Energiewandlungskette einer Windkraftanlage





Ausblick

Installierte Windenergieleistung und Zubau in Deutschland



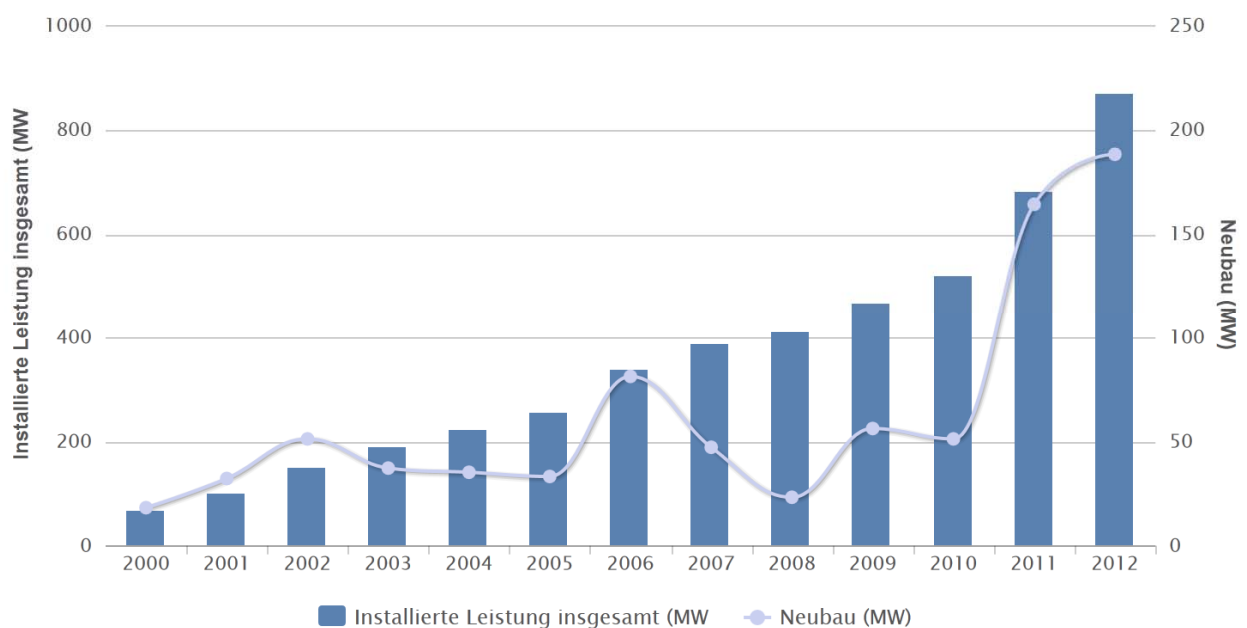
Quelle: Bundesverband Windenergie, www.wind-energie.de

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 33



Ausblick

Installierte Windenergieleistung und Zubau in Bayern



Quelle: Bundesverband Windenergie, www.wind-energie.de

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bucker 12.05.2017/ 34



Theoretisches Angebotspotenzial	in EJ/a	47 – 76
Theoretisches Stromerzeugungspotenzial	In PWh/a	8 – 12
Technisches Erzeugungspotenzial Onshore	GW TWh/a	169 346
Technisches Erzeugungspotenzial Offshore	GW TWh/a	69 254
Technische Nachfragepotenziale - Ansatz I	TWh/a	75 – 85
- Ansatz II	TWh/a	211

Ansatz I: Weitere Optimierung der Regelbarkeit des vorhandenen Windparks und Verkauf überschüssigen Windstroms.

Ansatz II: Basierend auf dem technischen Onshore- und Offshore-Potenzial wird die direkt in das Stromversorgungssystem hinausgehende Windstromerzeugung in Pumpspeicherkraftwerken (kleinerer Anteil) und in Wasserstoffspeichern (größerer Anteil) zwischengespeichert.

Quelle: Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien (2013)

© Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bückner 12.05.2017/ 35