



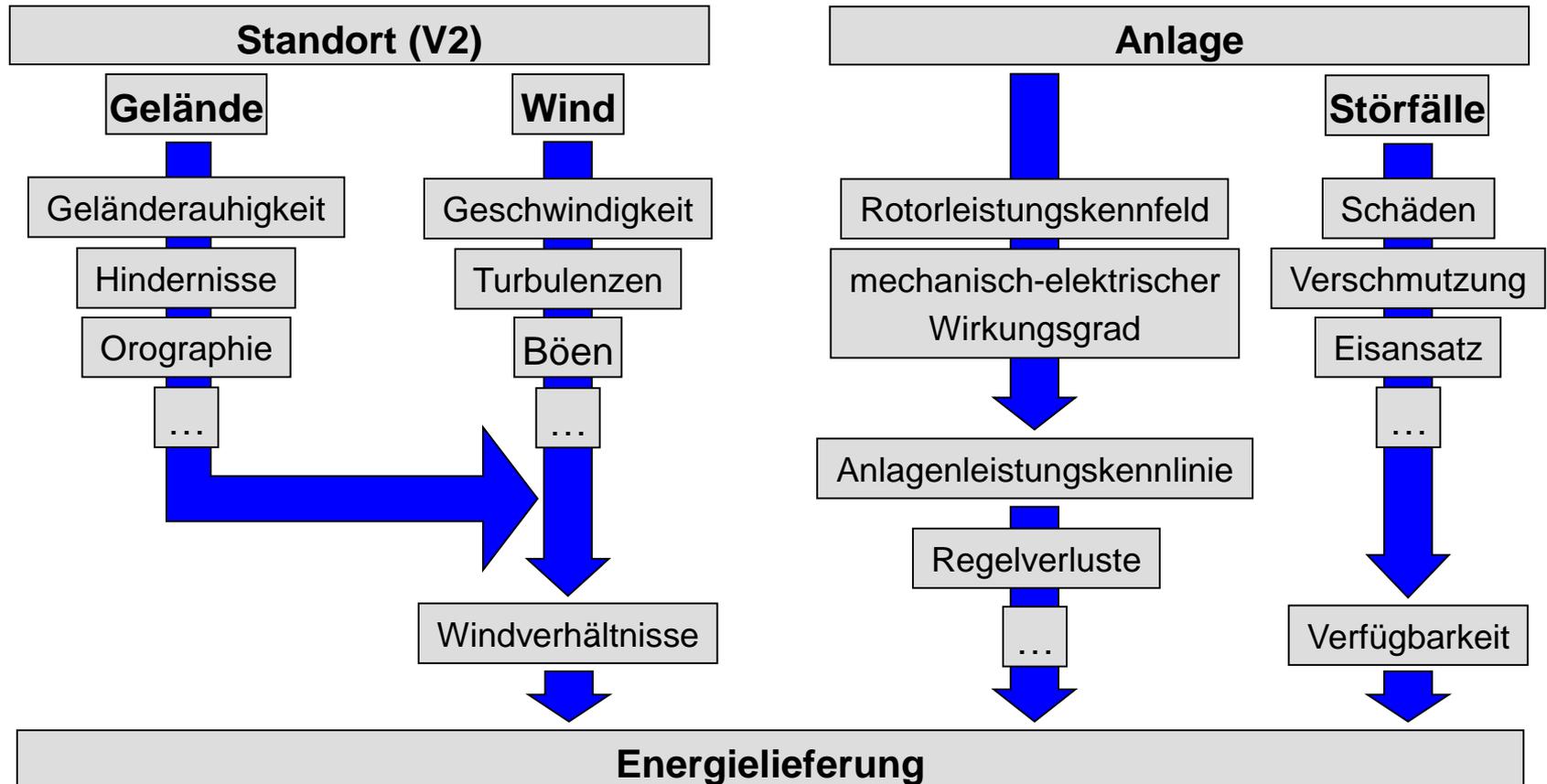
Windenergie

Windturbinen

Dr.-Ing. A. Henze, Prof. Dr.-Ing. W. Schröder

Institute of Aerodynamics, RWTH Aachen University

Motivation: Standortbewertung



Bedeutung des Windes

- Einfluss des Windes auf die theoretische elektrische Leistung:

$$P_{el} = c_P \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A_{Rotor} \cdot v_w^3$$

→ kubischer Einfluss der Windgeschwindigkeit

- weitere Einflüsse:
 - ρ Luftdichte
 - c_P Anlagenleistungsbeiwert
 - A_{Rotor} Überstrichene Kreisfläche ($\sim d^2$)

Ursachen des Windes

- globale Sonneneinstrahlung:
 - Unstetigkeit durch Tag-Nacht-Wechsel und Jahreszeiten
- inhomogene Erdoberfläche (Land, Wasser, Wüste, Wald,...)

- gesamte Leistung der Sonneneinstrahlung auf die Erde: $1,7 \cdot 10^{14}$ kW
- 2% Umwandlung in Windenergie: $3,4 \cdot 10^{12}$ kW

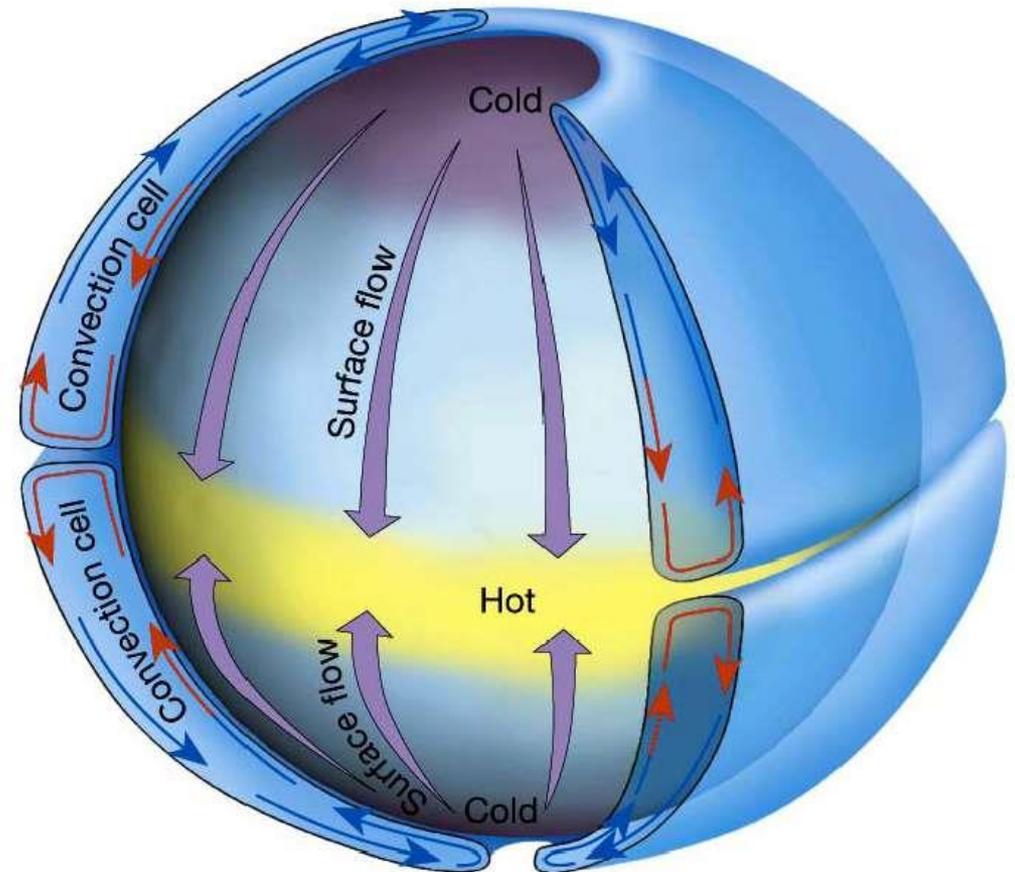
- Dichte- und Temperaturgradienten:
Druckgradientenkraft

- Erdrotation:
Corioliskraft

Ursachen des Windes

Beispiel: Temperaturgradient: einfaches Zirkulationsmodell

- nach George Hadley
- englischer Physiker und Meteorologe
- 1685 – 1768



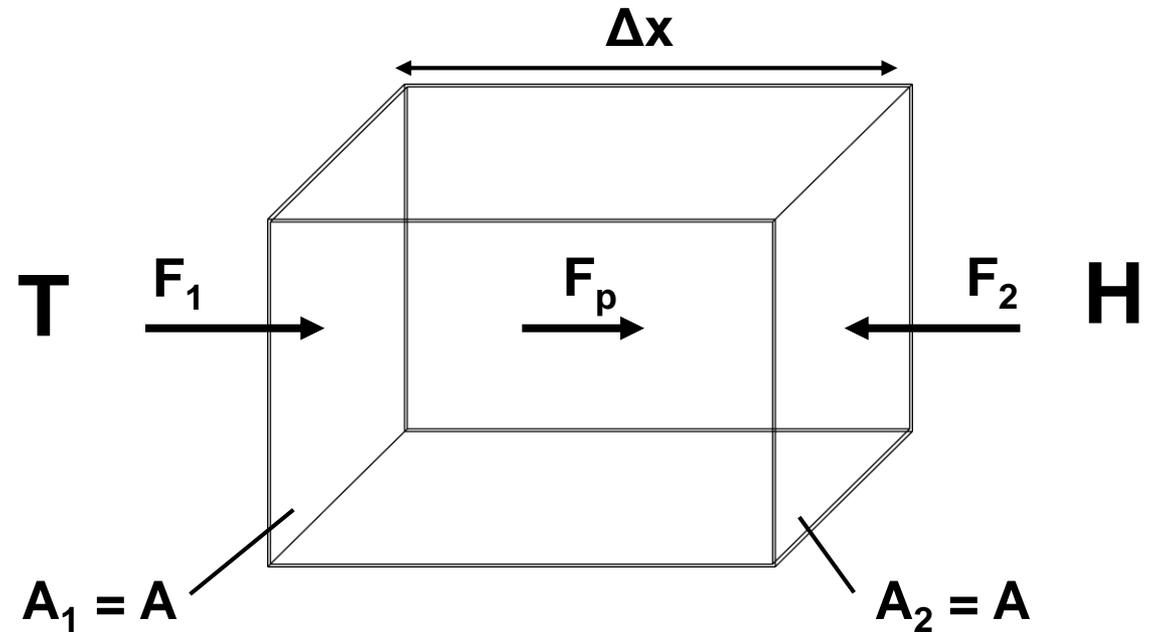
Quelle: ENC – Educational Network on Climate

Druckgradientenkraft

$$m = A \cdot \Delta x \cdot \rho$$

$$F_p = F_1 - F_2 = -\Delta p \cdot A$$

$$F_p = -m / \rho \cdot \Delta p / \Delta x$$



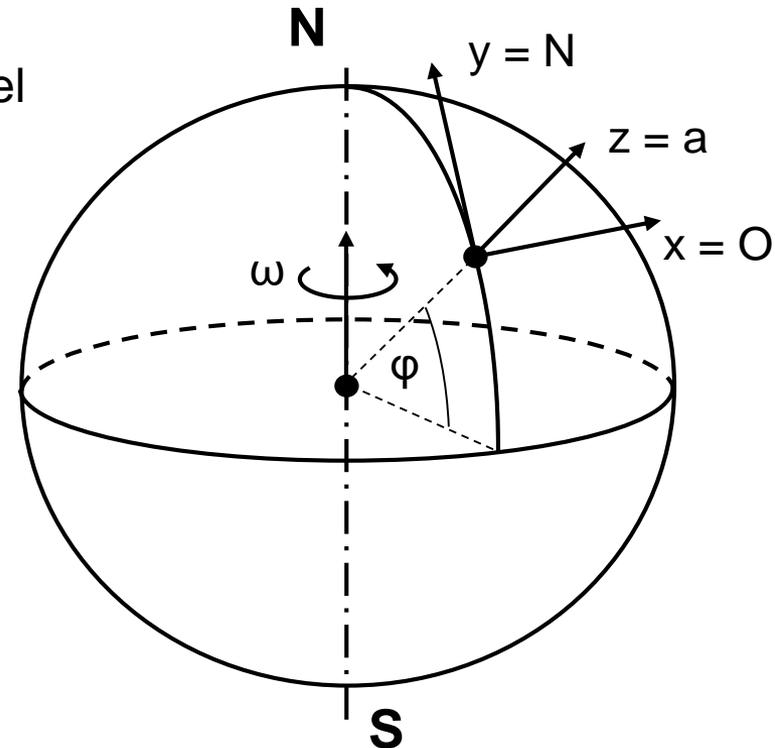
Corioliskraft

$$\vec{F}_C = 2 \cdot m \cdot (\vec{v} \times \vec{\omega})$$

- Corioliskomponenten auf einer rotierenden Kugel

$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ \omega \cdot \cos \varphi \\ \omega \cdot \sin \varphi \end{pmatrix} \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_o \\ v_N \\ v_a \end{pmatrix}$$

$$\vec{F}_C = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \begin{pmatrix} v_N \cdot \sin \varphi - v_a \cdot \cos \varphi \\ -v_o \cdot \sin \varphi \\ v_o \cdot \cos \varphi \end{pmatrix}$$



Corioliskraft

horizontale Corioliskraft

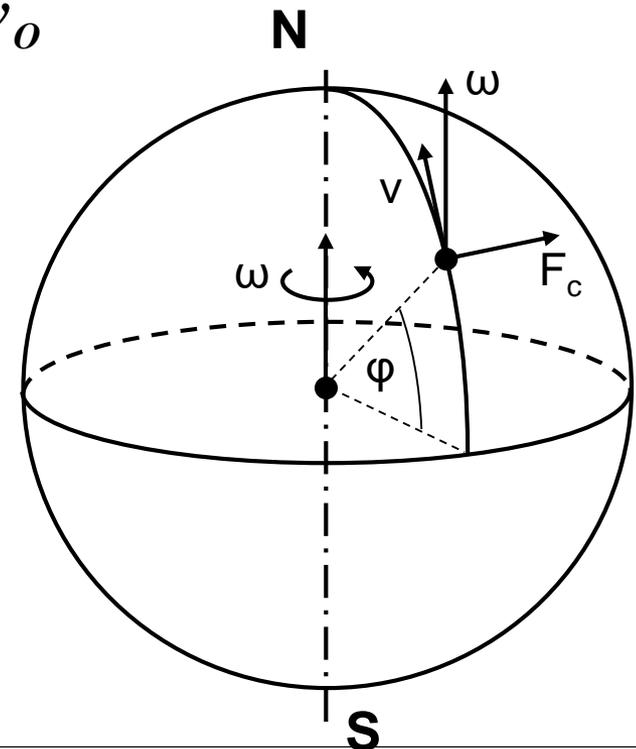
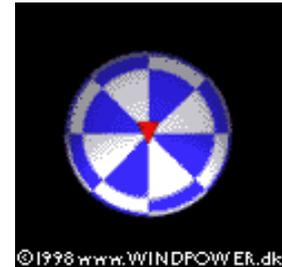
- Annahme: $v_a = 0$

$$F_C = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sqrt{v_N^2 + v_O^2}$$

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v \cdot \omega \cdot \sin(\varphi)$$

→ orthogonal zu v und ω

- am Äquator ($\varphi = 0^\circ$) herrscht keine horizontale Corioliskraft
- am Nord-/ Südpol ($\varphi = \pm 90^\circ$) ist F_C maximal

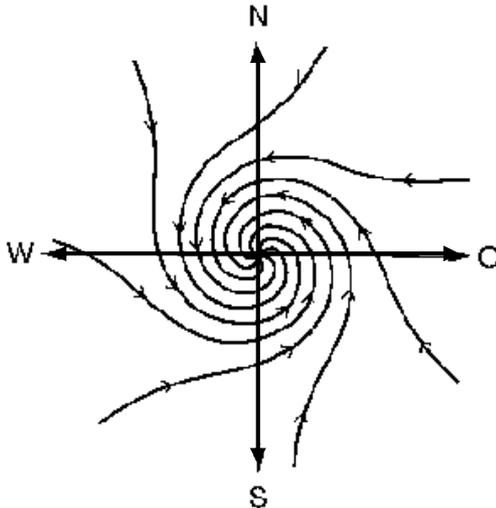


Corioliskraft

Beispiel: Corioliskraft auf der Nordhalbkugel

Namen tropischer Wirbelstürme nach Entstehungsregion

- Atlantik: Hurrikan
- Pazifik: Taifun
- Indischer Ozean: Zyklon



Quelle: Hurricane Katrina, 28.08.2005, EAPS, MIT

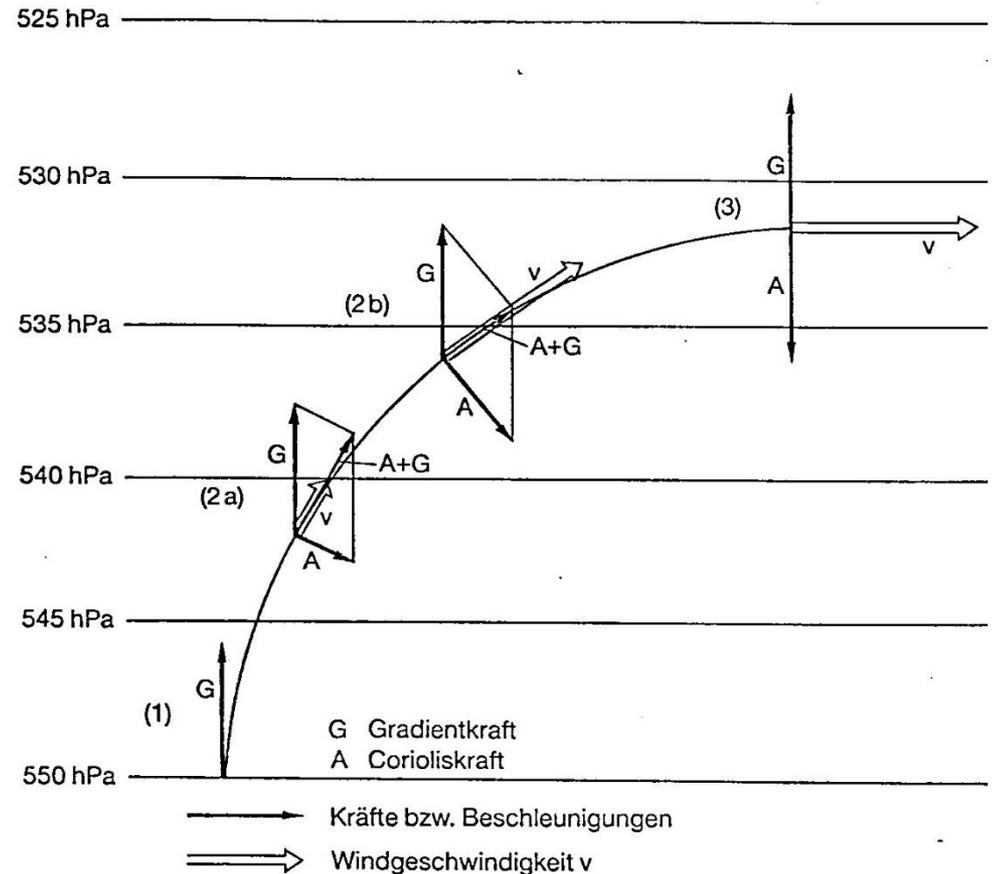
Kräftegleichgewicht

Annahmen:

- kein Reibungseinfluss
 - Luftdruckfeld mit geradlinigen Isobaren
- höhere Atmosphärenschichten (Troposphäre)

Stationärer Zustand:

- Gleichgewicht der Druckgradientenkraft G und Corioliskraft A
- Bewegungsrichtung senkrecht zum Druckgradienten (geostrophische Winde)



Quelle: www.geographie.uni-muenchen.de

Geostrophische Winde in der Troposphäre

Troposphäre:

- unterste Schicht der Erdatmosphäre
- Durchmesser der Erde: ca. 12.000km
- Dicke der Troposphäre: 11km
- enthält ~90% der Luft und ~100% des Wassers der gesamten Atmosphäre
- Entstehung des Wetters (Wetterschicht oder Advektionsschicht)

Geostrophische Winde:

- Annahme: Reibungsfreiheit in der Luft
- unbeeinflusst von der Erdoberfläche
- Luft strömt parallel zu den Isobaren

- ab einer Höhe von 600m bis 2000m
- Messung durch Wetterballons

Geostrophische Windgeschwindigkeit

- Ansatz: Kräftegleichgewicht von Druckgradienten- und Corioliskraft

$$\mathbf{0} = F_C + F_p$$

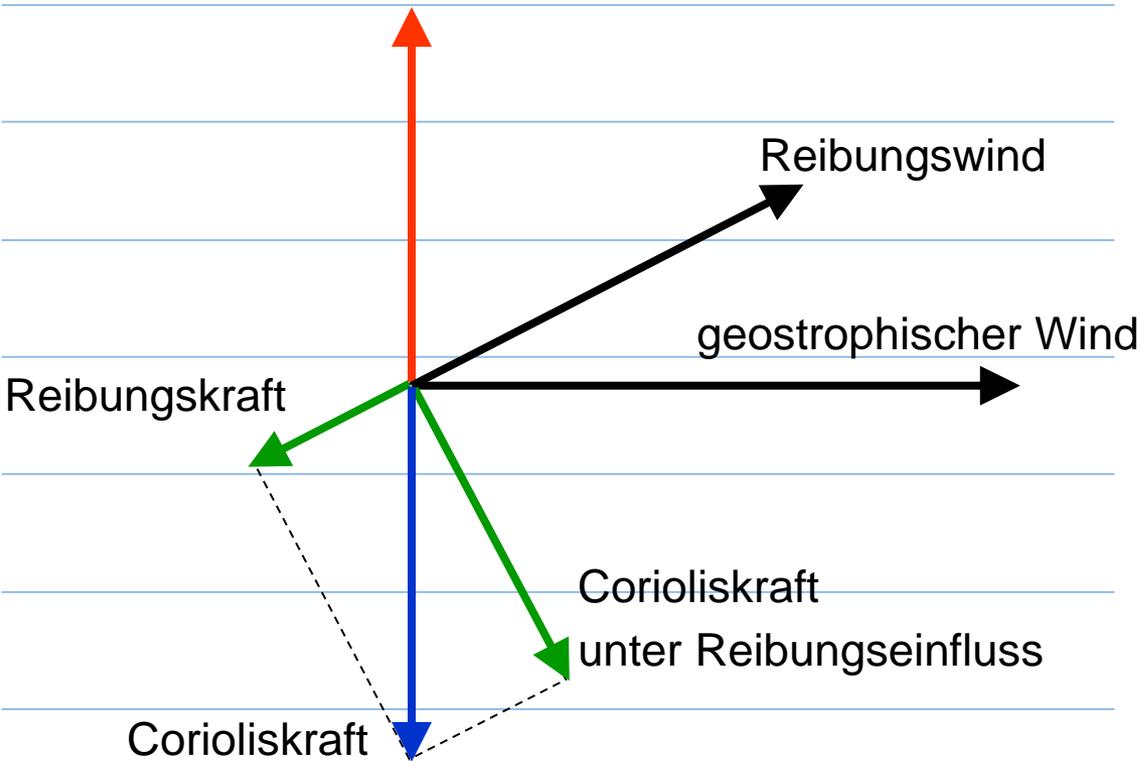
$$\mathbf{0} = 2 \cdot m \cdot v_{geo} \cdot \omega \cdot \sin \varphi - \frac{m}{\rho} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

$$v_{geo} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{1}{2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi}$$

ρ	Luftdichte
$\Delta p / \Delta x$	Druckgradient
ω	Winkelgeschwindigkeit der Erde
φ	Breitengrad

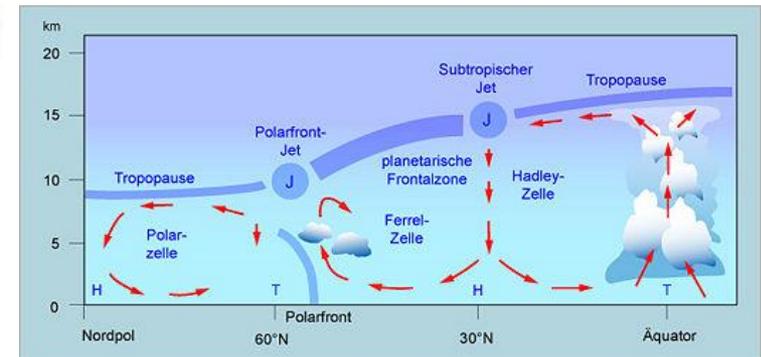
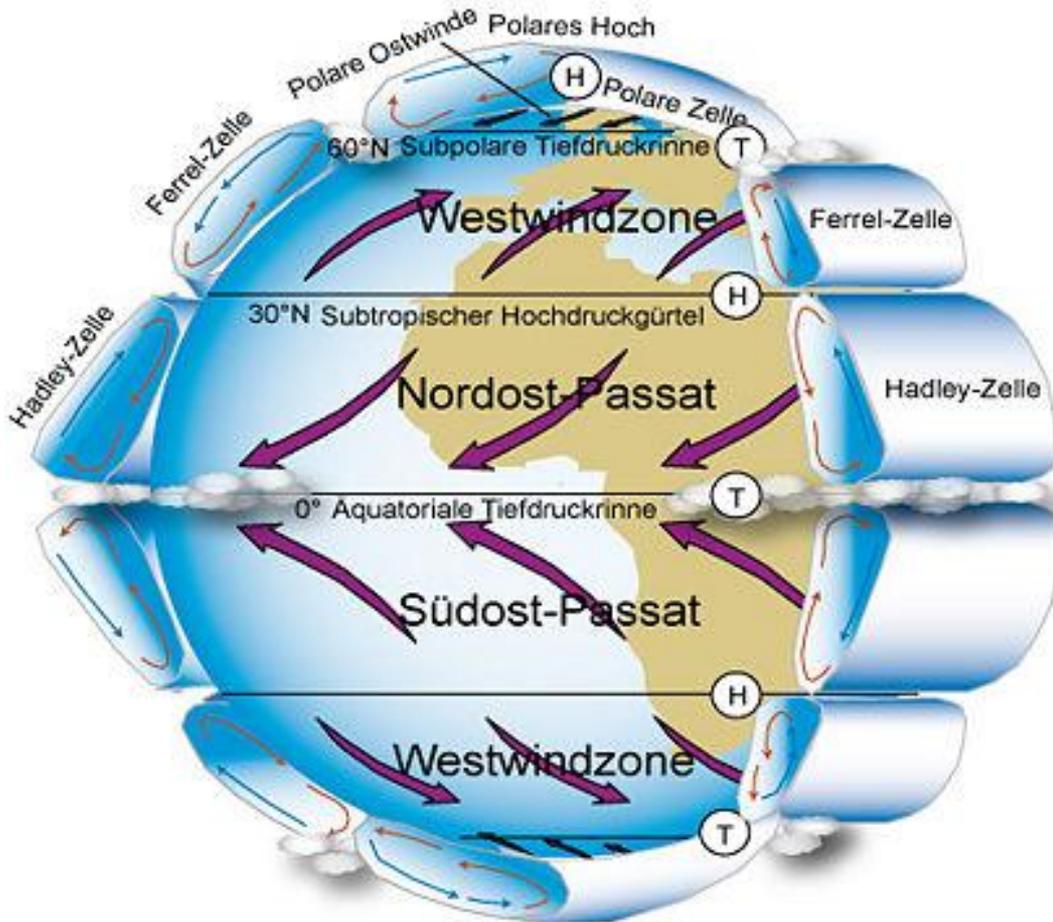
Reibungseinfluss

Tiefer Druck



Hoher Druck

Globale Zirkulation



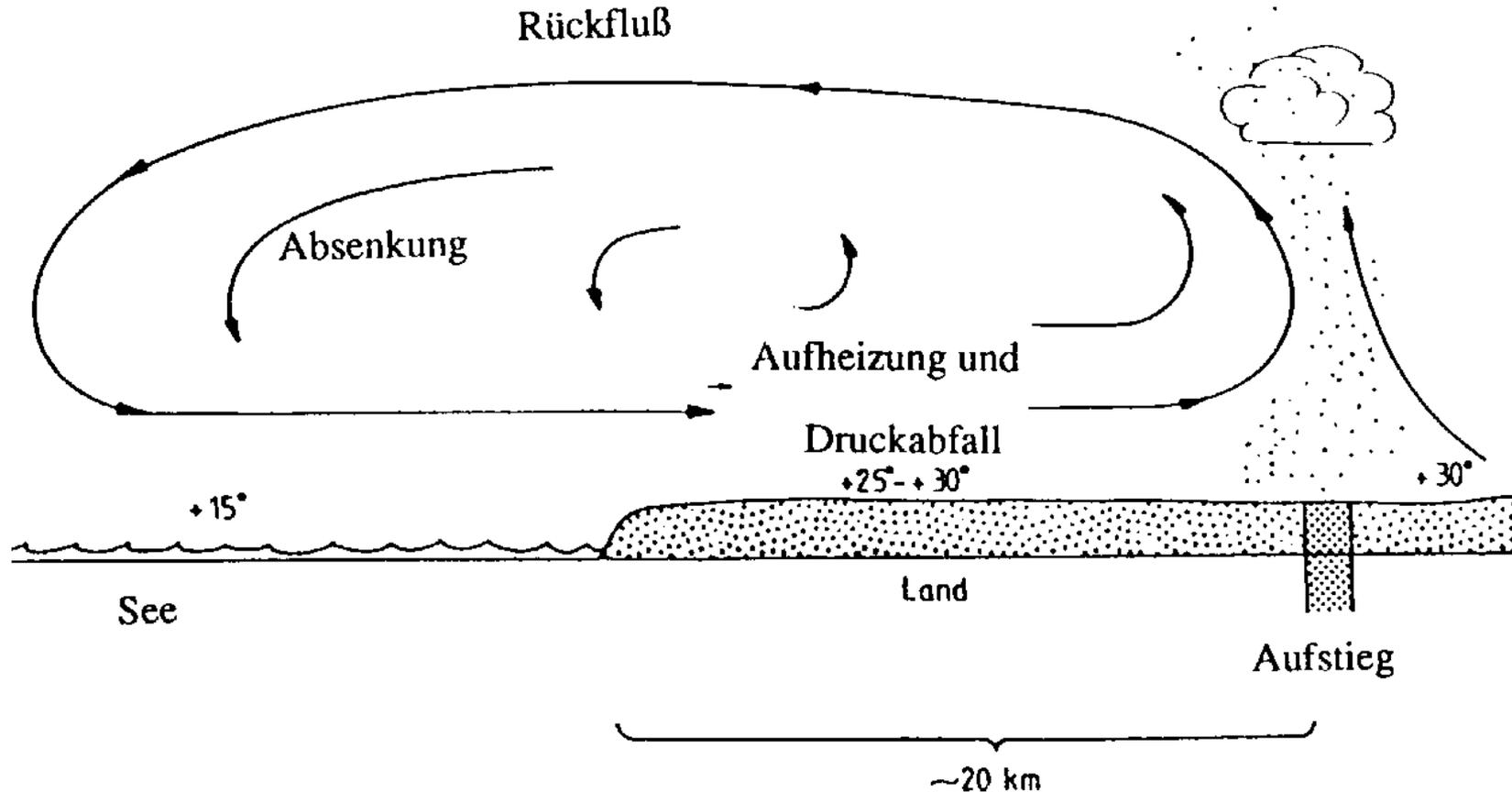
Quelle: Klimawandel-Wiki; The Water Planet – Atmospheric Circulation

Lokale Windverhältnisse

- Lokale Ausgleichswinde
- Bodennahe Grenzschicht
 - logarithmische Höhenformel
 - Potenzansatz nach Hellmann
- Geländerauhigkeit
 - Rauigkeitslänge z_0
 - Rauigkeitsklasse
- Turbulenz
- Aerodynamik der Feldaufstellung
- Windstetigkeit
 - Tages- und Jahresgang
 - Häufigkeitsverteilung (Weibull)

Lokale Ausgleichswinde I

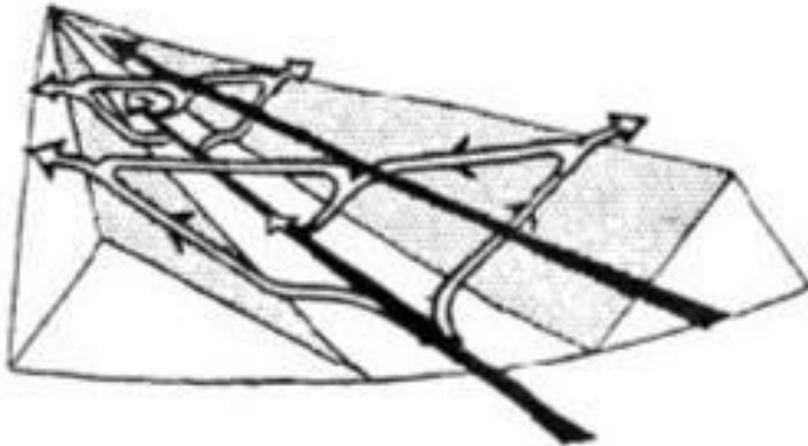
See-Land-Brise (Tagsüber)



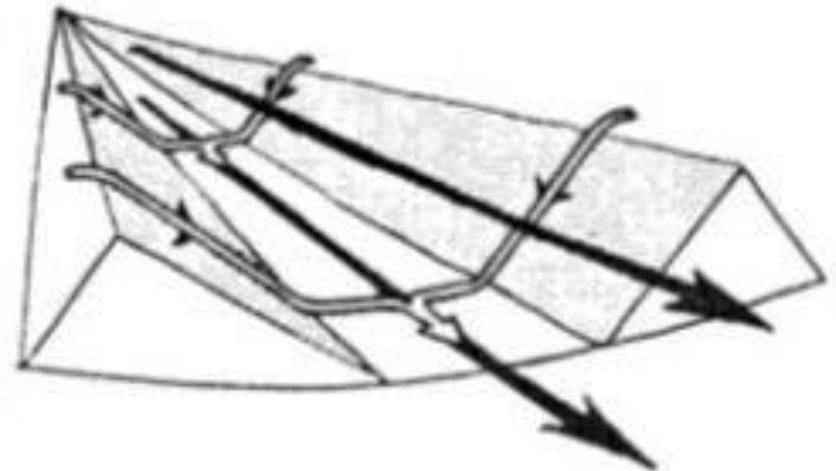
Quelle: Gasch – Windkraftanlagen, S. 98

Berg-Tal-Zirkulation

- Talwind (Mittags)



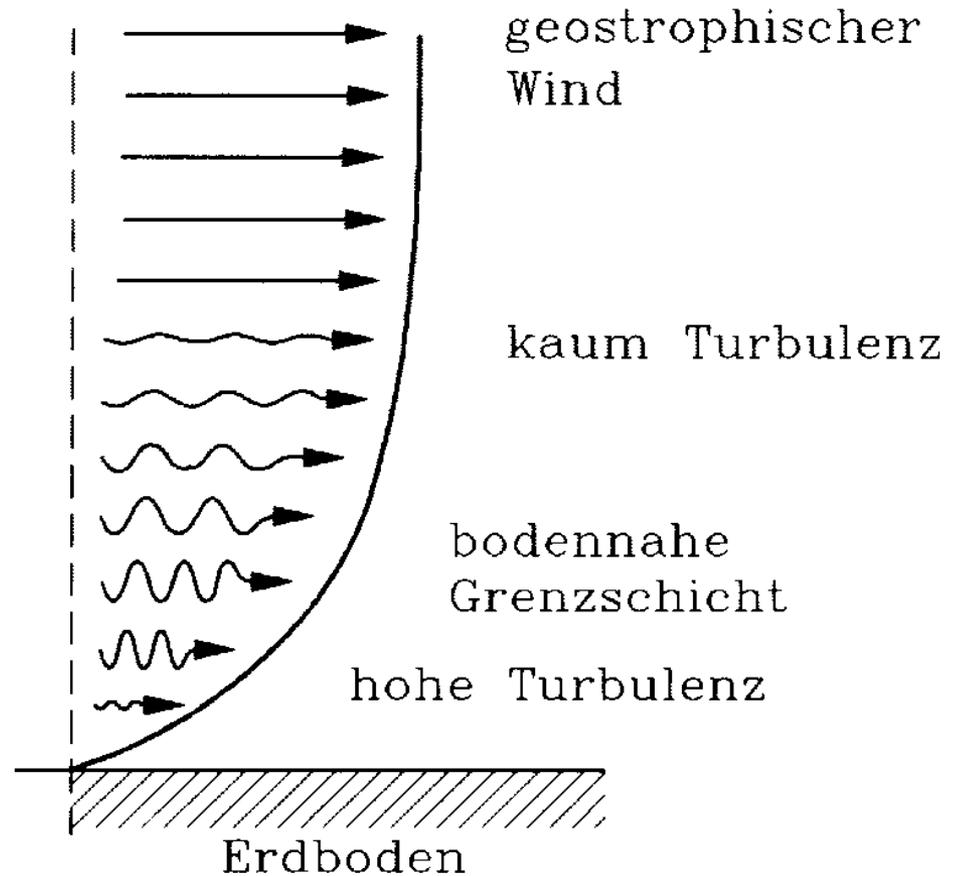
- Bergwind (Nachts)



Bodennahe Grenzschicht

Bodennahe Grenzschicht (Prandtl-Schicht)

- ausschlaggebend für die Windenergienutzung
- Höhe variiert ja nach lokalen Geländeeigenschaften und Sonneneinstrahlung
- 10 – 50 m in der Nacht
- 50 – 150 m am Tag

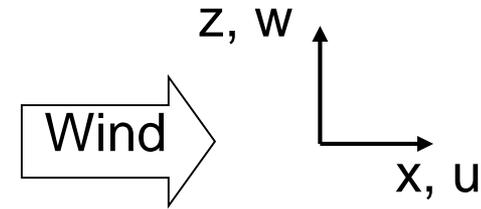


Quelle: Gasch – Windkraftanlagen, S. 100

Bodennahe Grenzschicht

Universelles Wandgesetz für turbulente Strömungen:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z \cdot u_*}{\nu}\right) + C$$



- \bar{u} : mittlere Geschwindigkeit (in x-Richtung)
- u_* : Schubspannungsgeschwindigkeit
- κ : von-Karman-Konstante
- ν : kinematische Viskosität
- C : Integrationskonstante

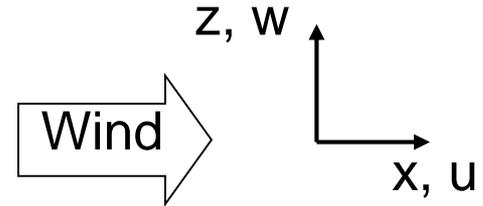
Basis ist der Mischungsweglängen-Ansatz (nach Prandtl):

$$\frac{d\bar{u}}{dz} = \frac{u_*}{\kappa \cdot z} \quad \kappa \approx 0,41$$

Bodennahe Grenzschicht

Integration ($u^* = \text{konst.}; u(z_0) = 0$):

$$\int_0^{u(z)} d\bar{u} = \int_{z_0}^z \frac{u_*}{\kappa \cdot z} dz \quad \Rightarrow \quad u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$



- z_0 : Rauigkeitslänge

Logarithmisches Windprofil (nach Prandtl)

- bezogen auf eine Referenzwindgeschwindigkeit v_{ref} in Referenzhöhe z_{ref}

$$v(z) = v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

- (Datensätze des Deutschen Wetterdienstes beziehen sich auf eine Referenzhöhe von 10m)

Durchschnittliche Windgeschwindigkeit

Potenzansatz (nach Hellmann)

- einfache Näherung wenn keine Geländerauhigkeit gegeben ist

$$v(z) = v_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha} \quad \alpha \approx 1/7$$

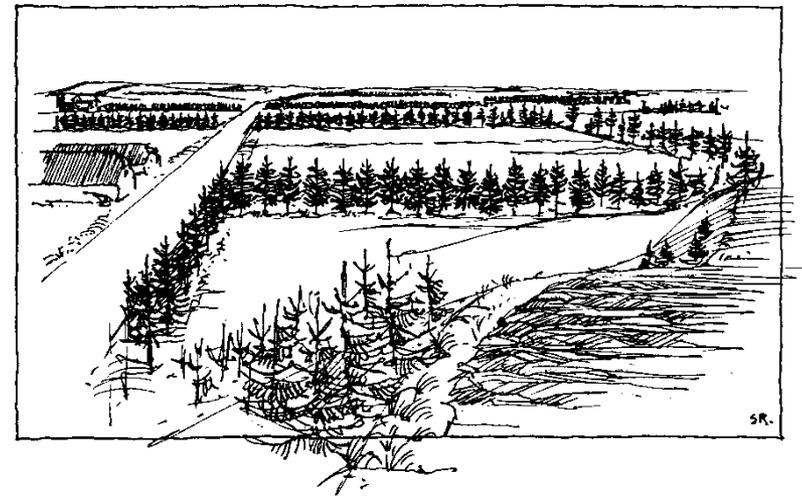
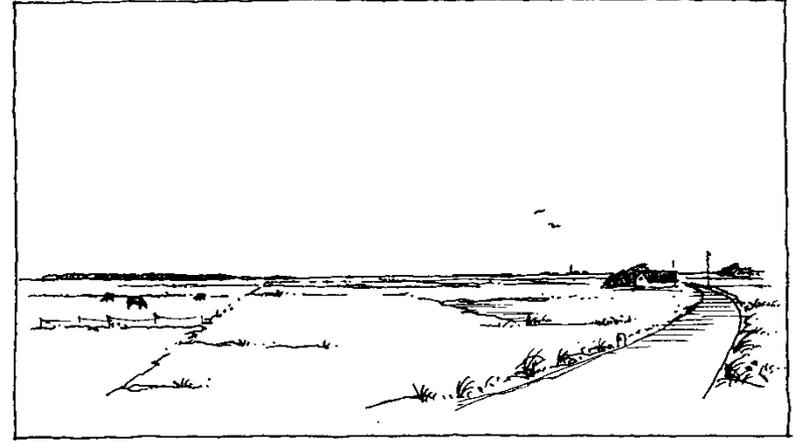
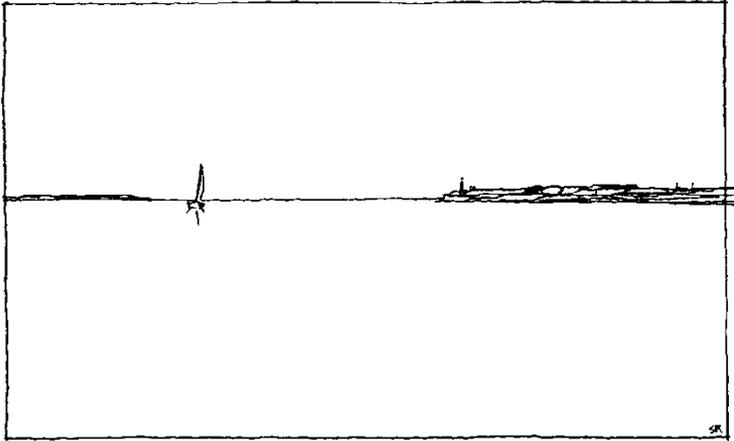
- nur Berechnung der mittleren Windgeschwindigkeit
- keine Beachtung von Turbulenzen und Böen
- Unterschätzung der Windgeschwindigkeit bei großen Nabenhöhe

Geländerauhigkeit

- Rauigkeitslänge z_0 in Metern

Rauhigkeitsklasse	Rauhigkeitslänge [m]	Energieindex [%]	Landschaft
0	0,0002	100	Wasserflächen
0,5	0,0024	73	Offenes Gelände
1	0,03	52	einzelne Häuser
1,5	0,055	45	Freiflächen min. 1250m
2	0,1	39	Freiflächen min. 500m
2,5	0,2	31	Freiflächen min. 250m
3	0,4	24	Dörfer, Wälder
3,5	0,8	18	Städte, hohe Gebäude
4	1,6	13	Großstädte

Rauhigkeitsklassen

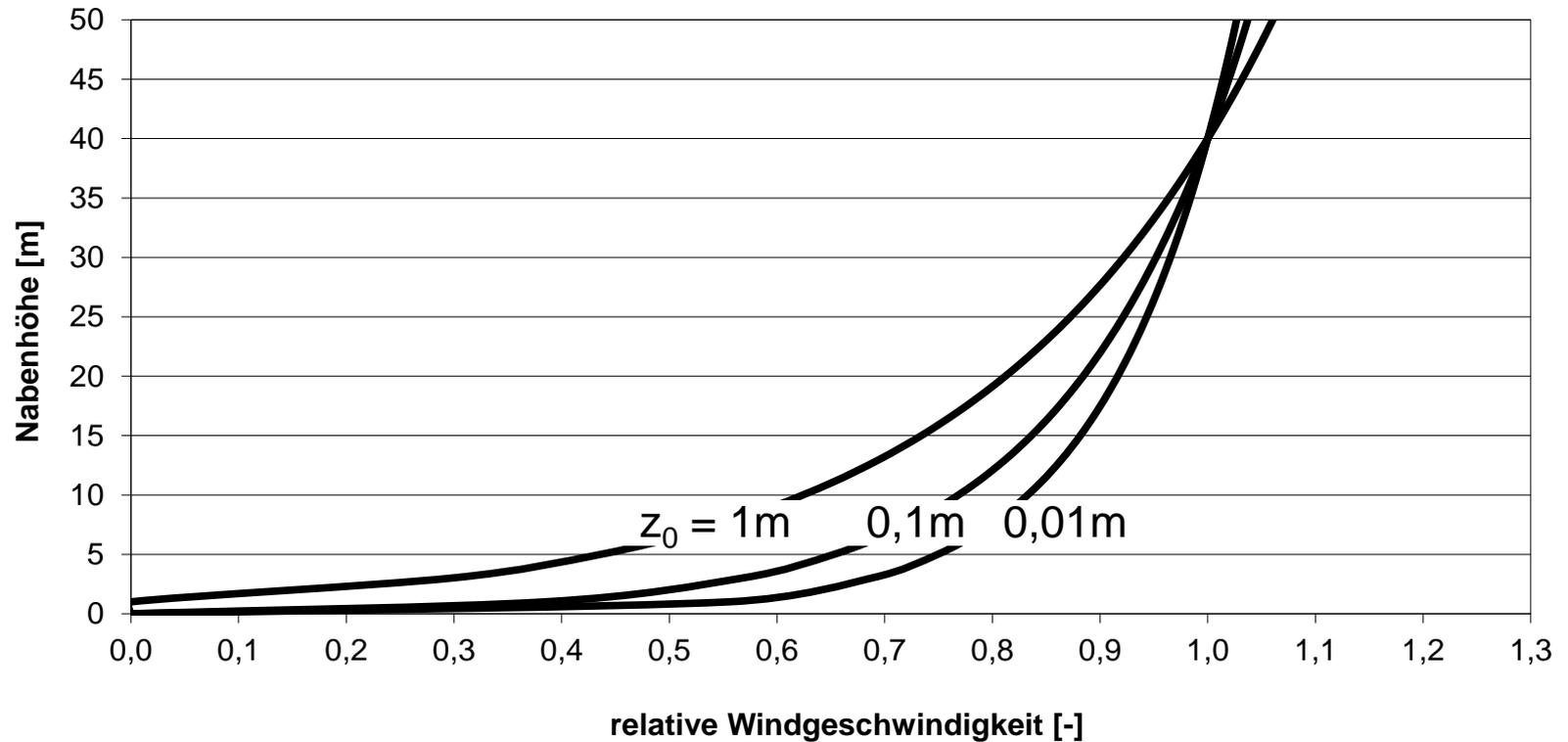


Quelle: Bundes-Verband Windenergie

Vertikale Windgeschwindigkeitsverteilung

Vertikale Windgeschwindigkeitsverteilung

- log. Höhenformel, Bezugshöhe: 40m



Turbulenz & Böen

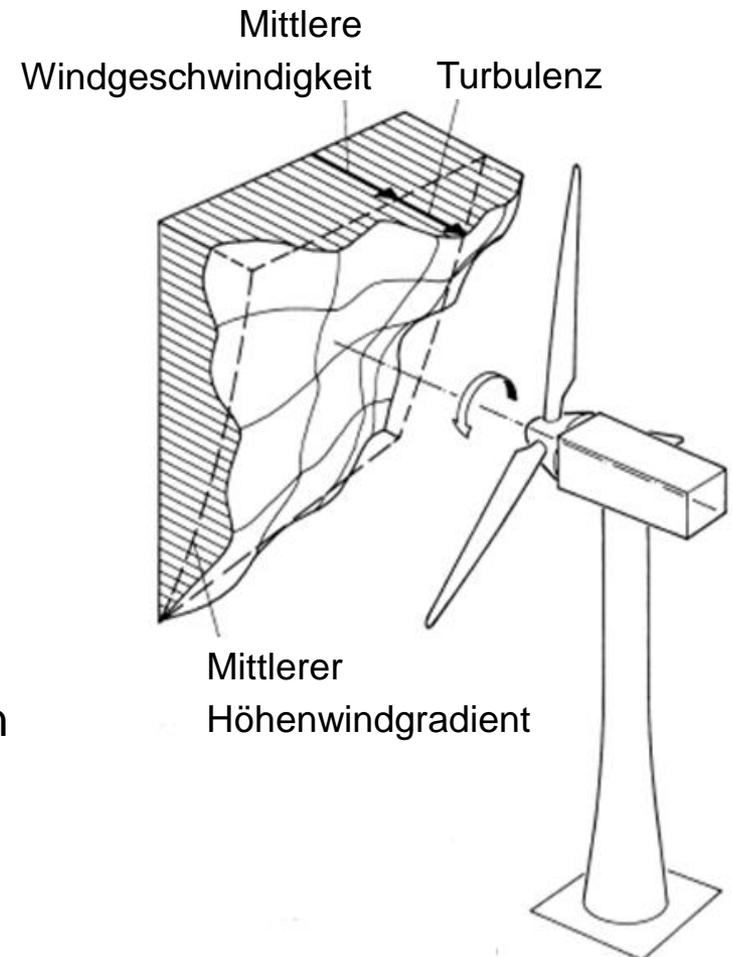
- Turbulenz

$$\mathbf{v}(t) = \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}'(t)$$

- $\bar{\mathbf{v}}$ mittlere Windgeschwindigkeit (über 10 Min. gemittelt)
- \mathbf{v}' überlagerter fluktuierender Anteil

Böen

- Dauer von einigen bis einigen zehn Sekunden
- keine allgemeine Definition für Böen
- Jahrhundertböen
 - Deutsche Bucht: $v' = 47 \text{ m/s} = 169 \text{ km/h}$
 - Offene See: $v' = 60 \text{ m/s} = 216 \text{ km/h}$
 - Antarktis: $v' = 95 \text{ m/s} = 342 \text{ km/h}$



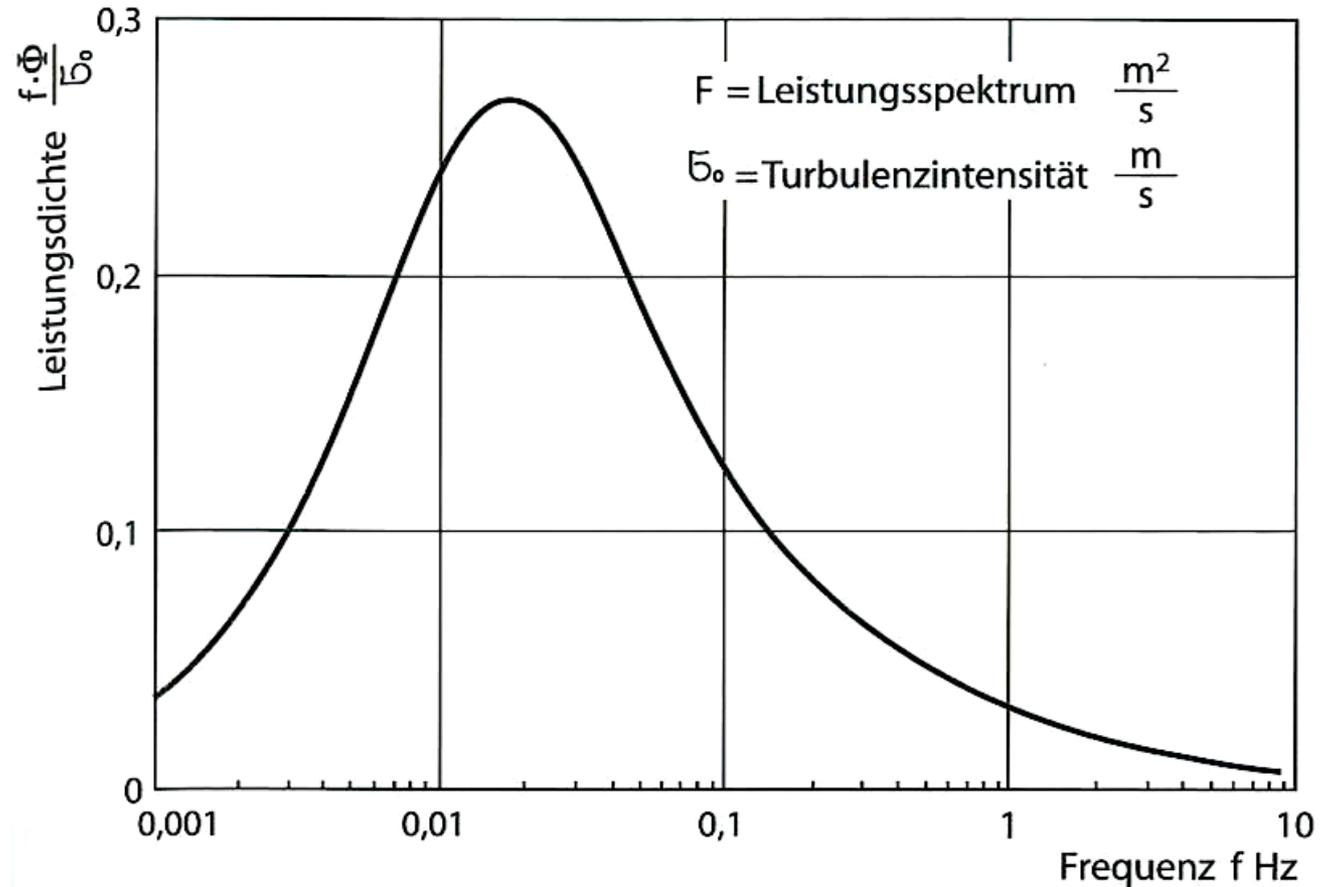
Turbulenzspektrum

Energiespektrum der Windturbulenz nach Davenport

- offenes Meer:
 $\sigma_0 = 5\%$
- dicht bebaut:
 $\sigma_0 = 20\%$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_V}{\bar{v}_W}$$

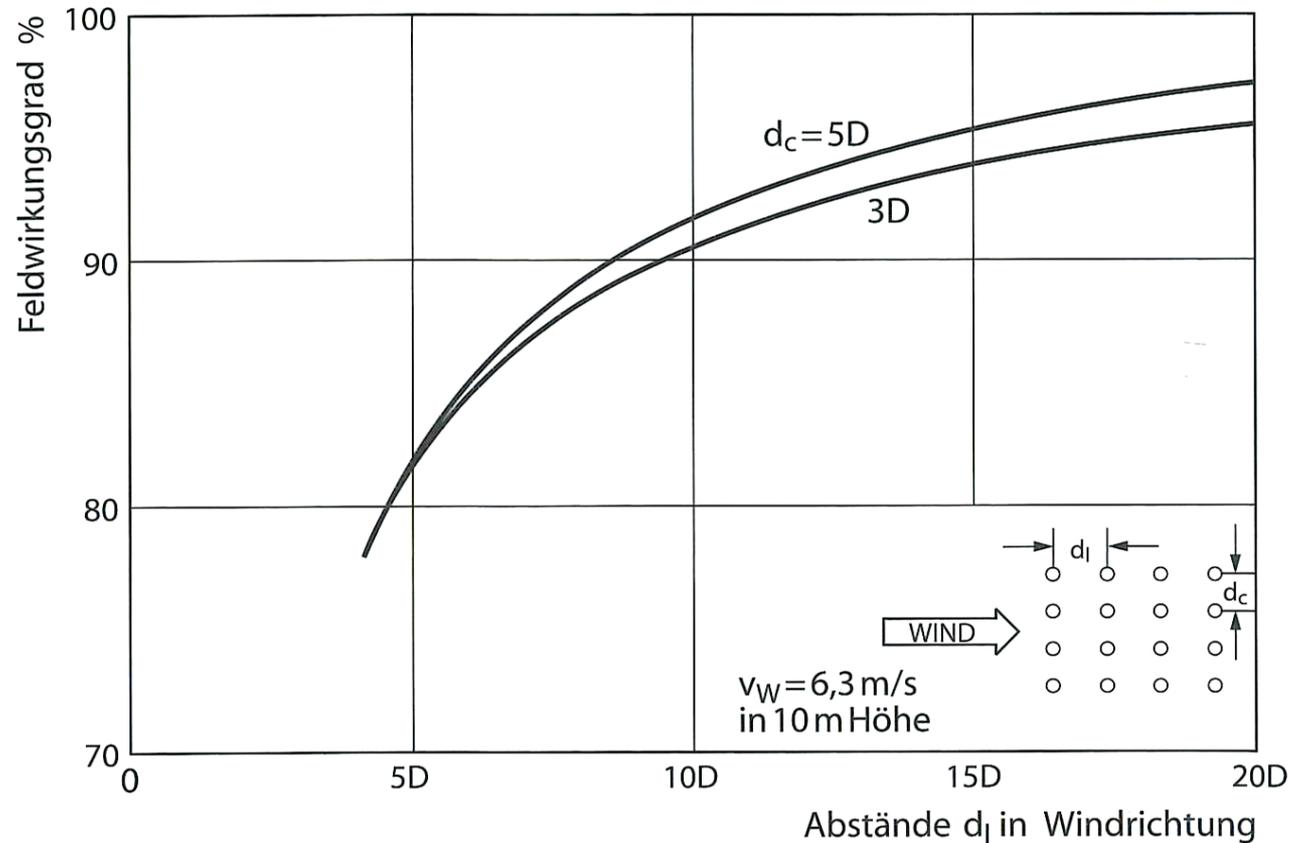
$$\sigma_V = \sqrt{\overline{v'^2}}$$



Aerodynamischer Feldwirkungsgrad I

Abhängigkeit von Abständen in Hauptwindrichtung

- vertretbarer Abstand in Hauptwindrichtung:
 $d_l = 8 \dots 10D$
- D :
Rotordurchmesser

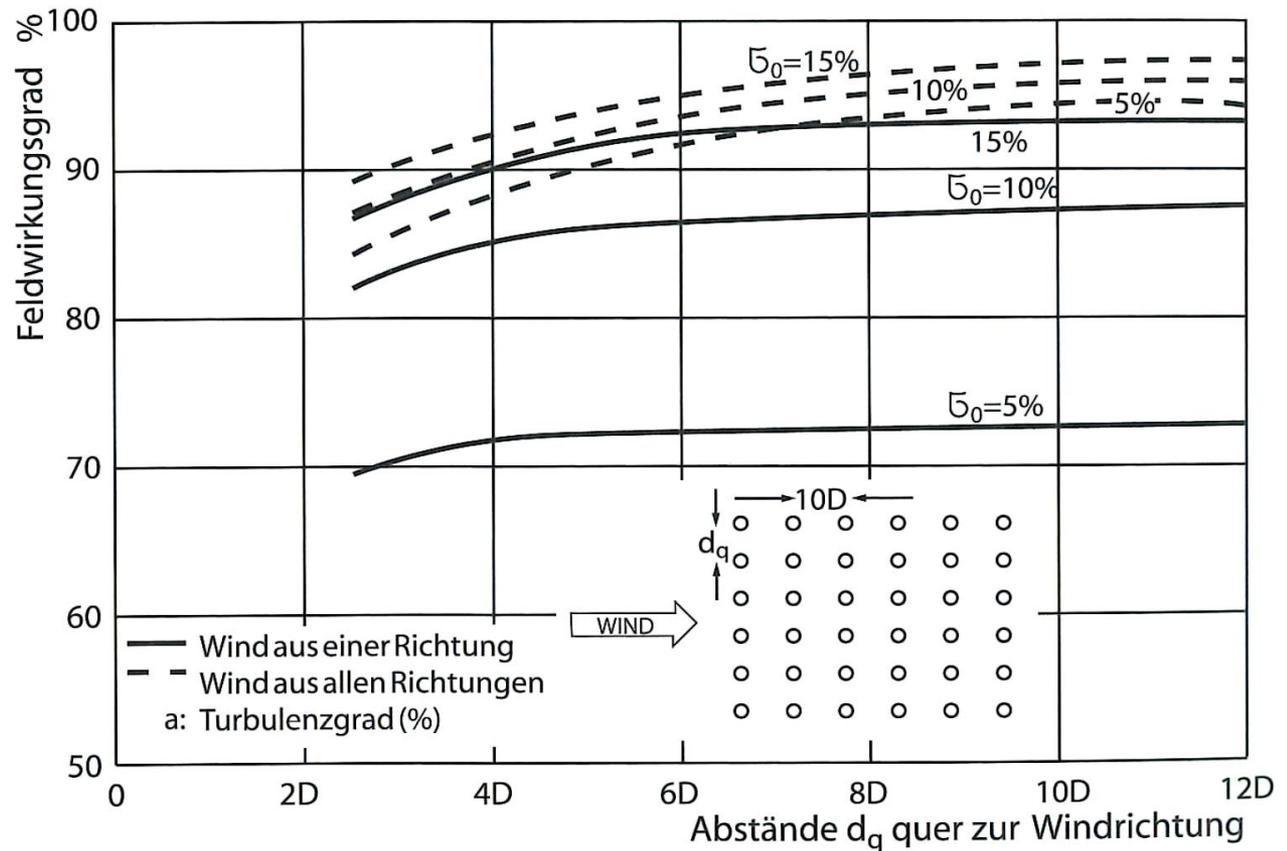


Quelle: Hau – Windkraftanlagen, Bild 18.4 (gerechnet für 16 Anlagen)

Aerodynamischer Feldwirkungsgrad II

Abhängigkeit von Abständen quer zur Windrichtung

- vertretbarer Abstand in Nebenwindrichtung:
 $d_q = 3 \dots 5D$



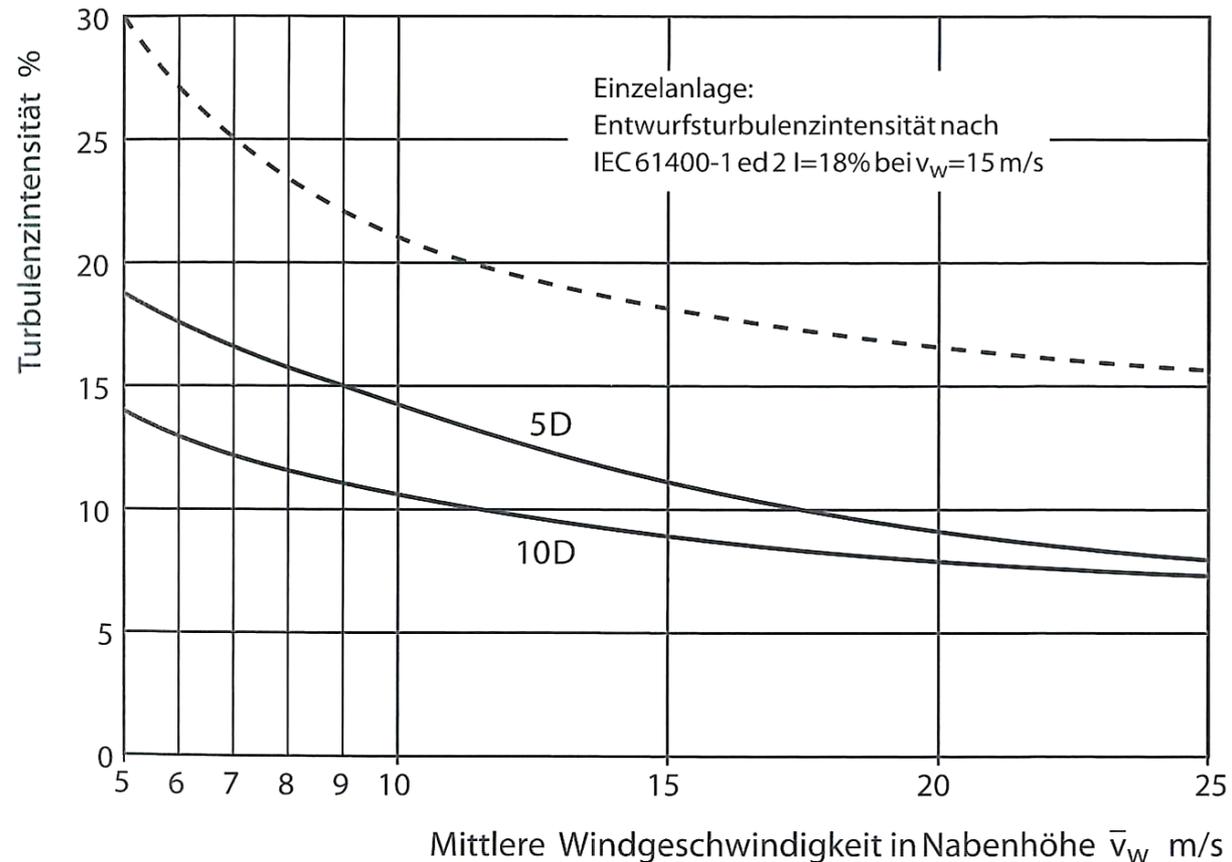
Quelle: Hau – Windkraftanlagen, Bild 18.5

Induzierte Turbulenz

Abhängigkeit vom Anlagenabstand

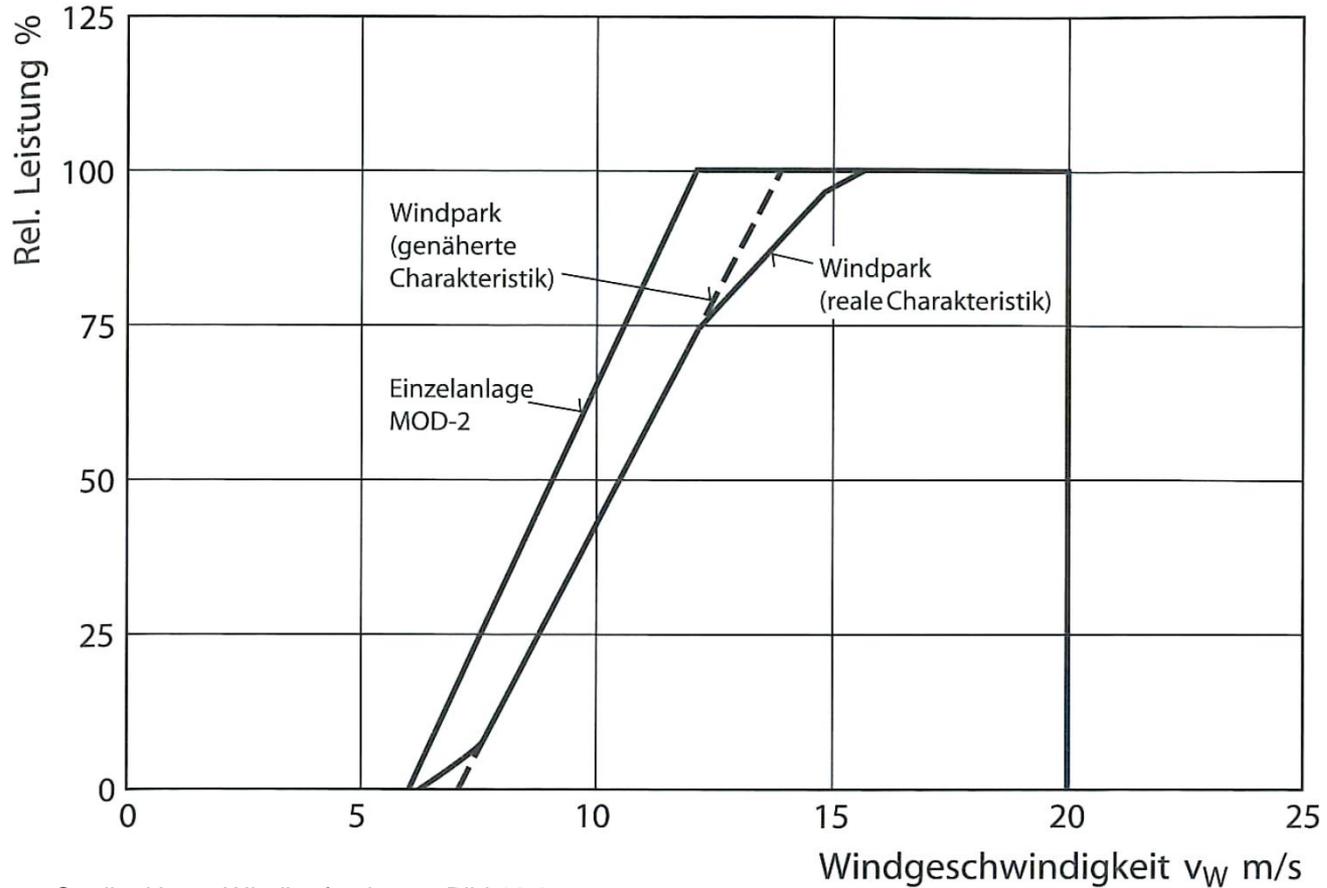
- zu der natürlichen Turbulenz addiert sich die induzierte Turbulenz
- positiver Effekt: Auffüllen der Nachlaufströmung
- negativer Effekt: Erhöhung des Ermüdungslastspektrums

→ Hersteller schreiben Mindestabstände vor



Quelle: Hau – Windkraftanlagen, Bild 18.7

Vergleich von Einzelanlage und Windpark



Quelle: Hau – Windkraftanlagen, Bild 18.6

Beispiel: Windpark

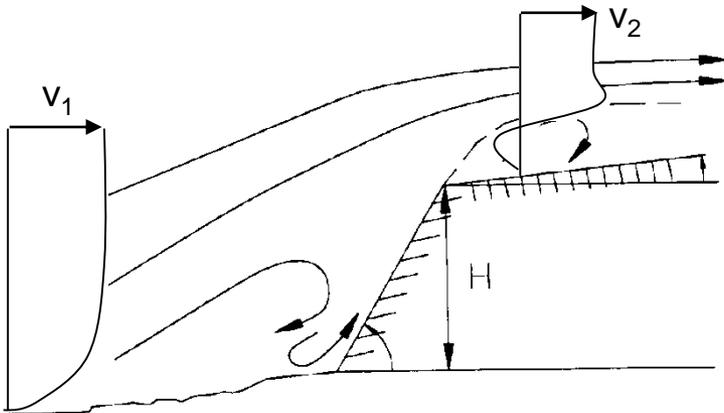
- Absenkung der Windgeschwindigkeit hinter der WKA
- Absenkung der Lufttemperatur
→ Tröpfchenbildung (Taupunkteffekt)



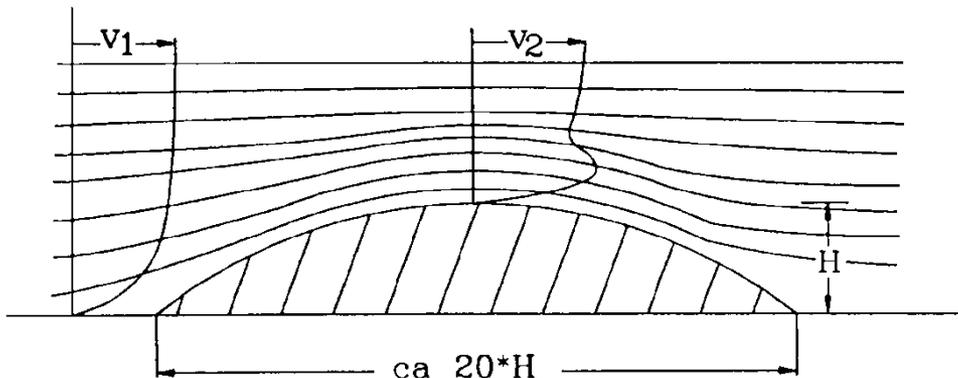
Quelle: Offshore-Windpark Horns Rev, Nordsee

Geländehöhe

- Steile Böschung: negative Windrichtung in Bodennähe



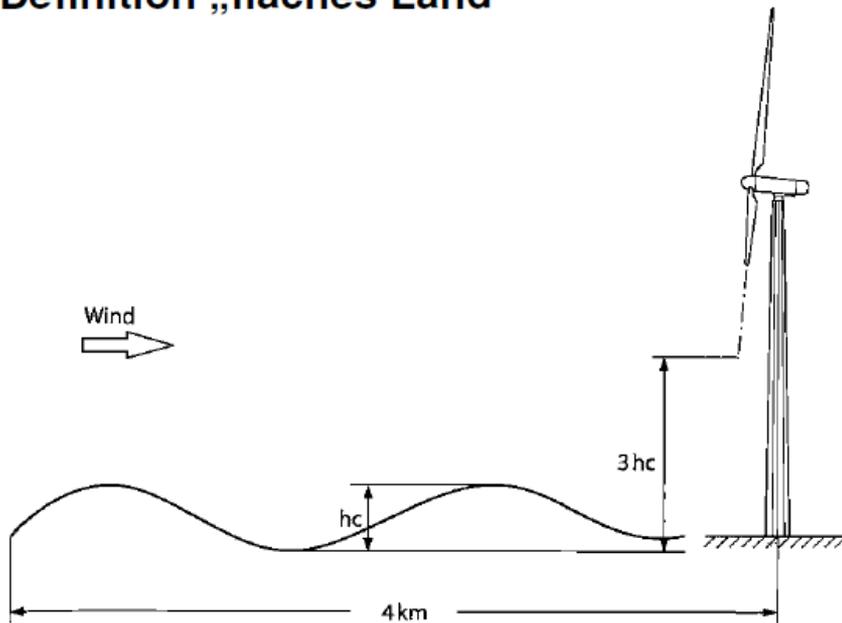
- Flacher Hügel: erhöhte Windgeschwindigkeit in Bodennähe



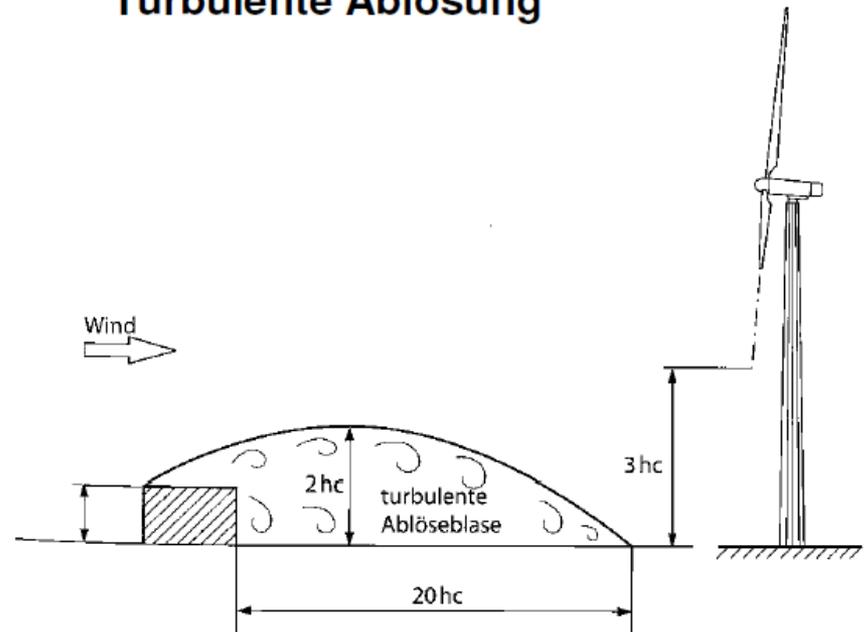
Quelle: Gasch – Windkraftanlagen, S. 103

Turbulenz nach einem Hindernis

Definition „flaches Land“



Turbulente Ablösung

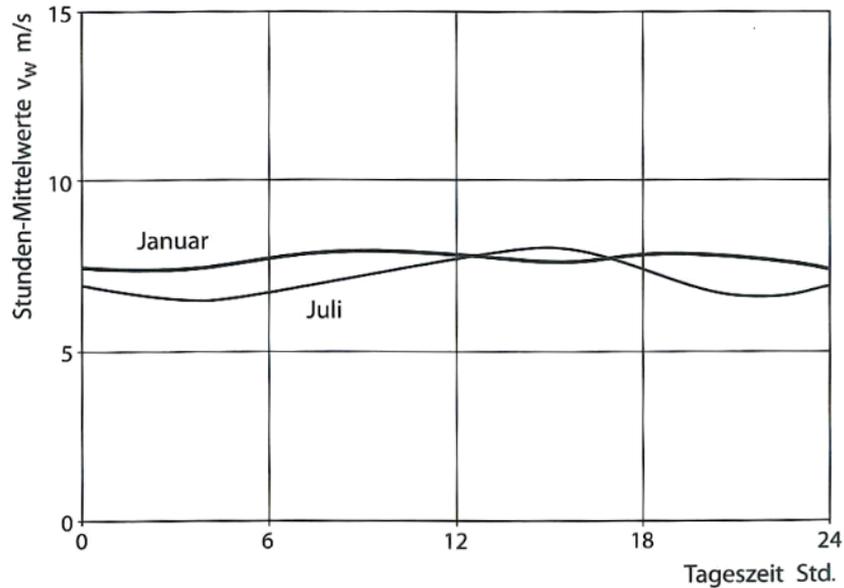


Quelle: Hau – Windkraftanlagen, Bild 13.17 & 13.18

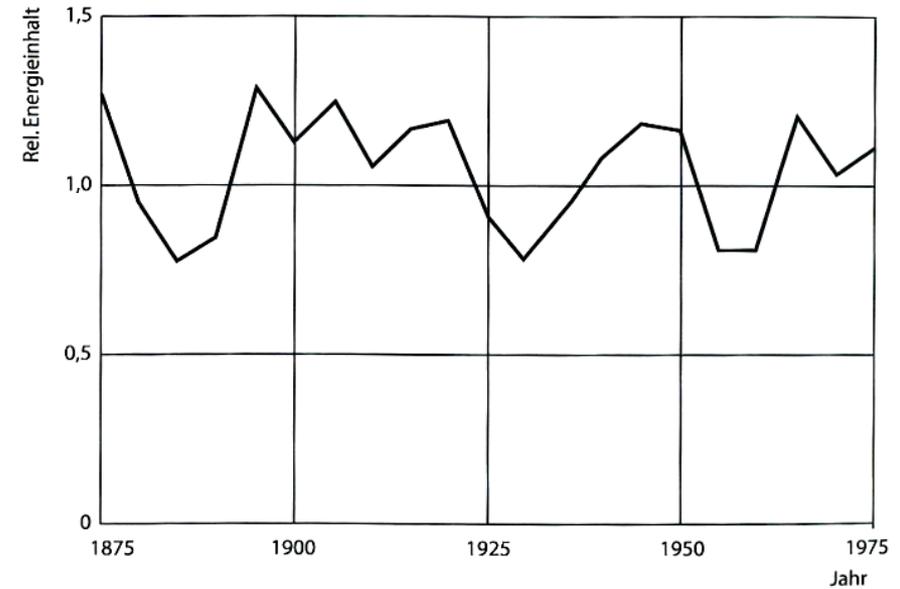
- Höhenunterschiede h_c in einem Umkreis von 11,5km sollen kleiner als 60m sein
- Höhe des Rotors soll mindestens $3h_c$ in einem Umkreis von 4km windaufwärts betragen

Windstetigkeit

Tagesgang



Jahresgang



Quelle: Hau – Windkraftanlagen, Bild 13.9 & 13.11

Häufigkeitsverteilung

- mathematische Annäherung der Windverhältnisse, wenn keine Daten vorhanden sind
- Weibull-Summenfunktion:

$$\Phi(v_w) = 1 - e^{-\left(\frac{v_w}{A}\right)^k} \quad A = \bar{v}_w \frac{2}{\sqrt{\pi}}$$

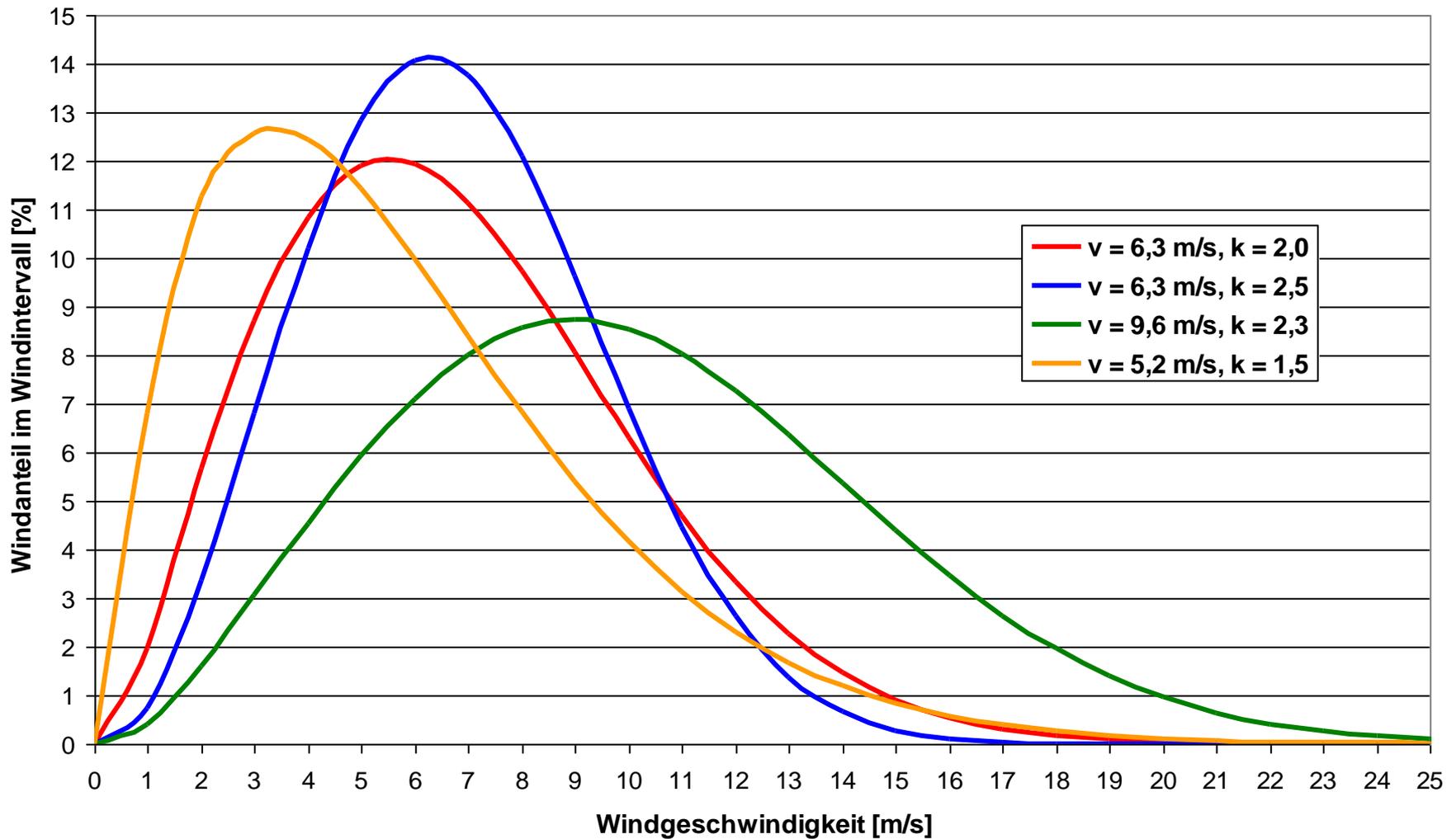
k: Steilheit, Maß für die Streuung der Windgeschwindigkeit (k = 1,5... 2,5)

A: Charakteristische Windgeschwindigkeit ($\Phi(A) = 1 - 1/e = 63,2\%$)

- Rayleigh-Verteilung (k = 2):

$$\Phi(v_w) = 1 - e^{-\left(\frac{v_w}{A}\right)^2}$$

Windgeschwindigkeitsverteilung (Weibull)



IEC Windklasse

IEC Windklasse

- Bewertung des Windpotentials an einem Standort
- Nordsee: IEC I
- Binnenland: IEC II bzw. III

IEC Windklasse	mittlere Windgeschw. [m/s]	max. 10 Min. mittlere Windgeschw. in 50 Jahren	max. 3 Sek. Böe Windgeschw. in 50 Jahren	max. 3 Sek. Böe Windgeschw. in einem Jahr
III	7,5	37,5	52,5	39,375
II	8,5	42,5	59,5	44,625
I	10	50	70	52,5

IEC: International Electrotechnical Commission

Vermessung und Berechnung der Windverhältnisse

Vermessung der Windverhältnisse

- Schalenkreuz-Anemometer
- Ultraschall-Anemometer
- SODAR (Sound Detection and Ranging)

Berechnung der Windverhältnisse

- Windatlas-Methode
- CORINE Datensatz (Vegetation/Rauhigkeitsverhältnisse) der EEA
 - Coordination of Information on the Environment
 - European Environment Agency
- SRTM Datensatz (Orographie)
 - Shuttle Radar Topography Mission

Anemometer: Schalenkreuz & Ultraschall



Quelle: sciencekids.co.nz



Quelle: pvsteuerung.eui.fh-koblenz.de

Windmessmasten

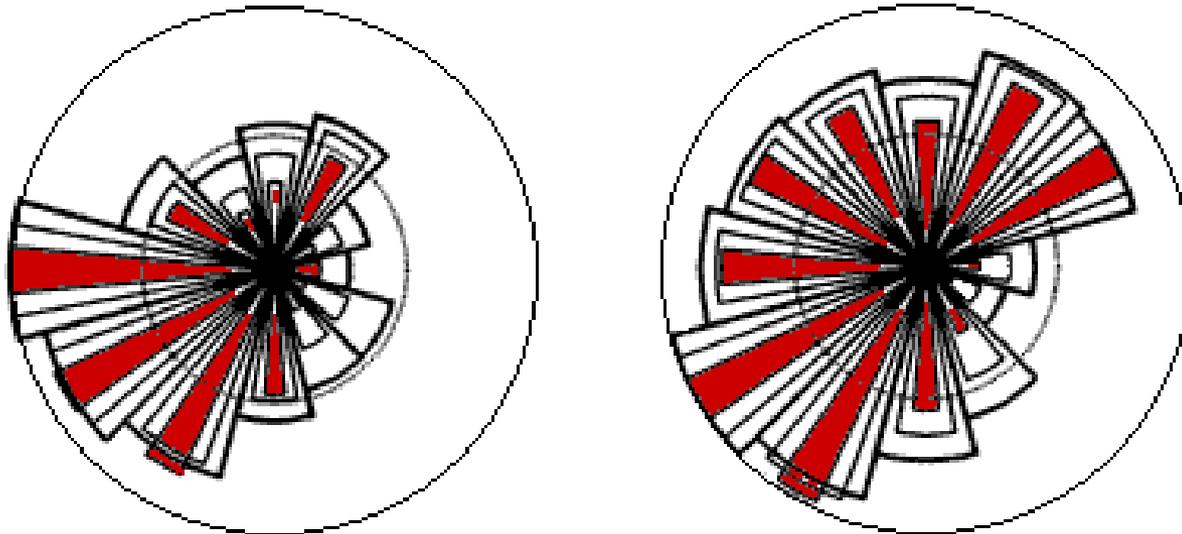
- Errichtung durch Helikopter (bei gutem Wetter) oder Kräne
 - Höhen bis 200m
 - solide Datenbasis ab einer Messung \geq Nabenhöhe
- Windgutachten



Quelle: Ge:Net GmbH

Windrose (nach Europäischem Windatlas)

- zwölf Sektoren zu je 30°
- relative Verteilung der Windrichtung
 - äußere Segment: relative Häufigkeit
 - innere Segment: durchschnittliche Windgeschwindigkeit
 - rotes Segment: kubische Windgeschwindigkeit (\sim Energiegehalt)



Quelle: windpower.org

Anemometer: SODAR

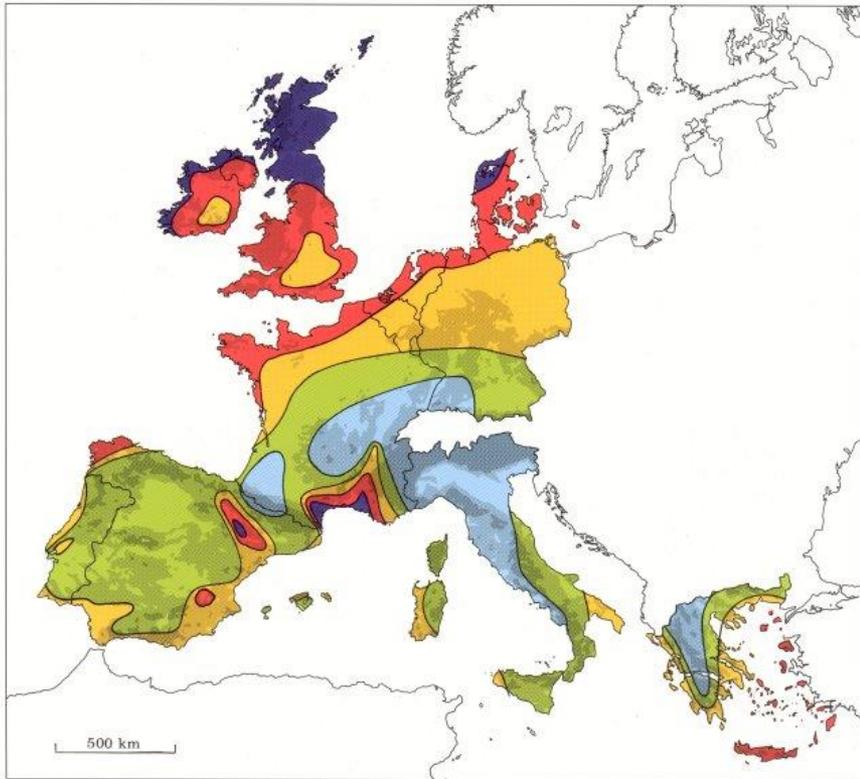
- hörbare Schallimpulse werden in die Atmosphäre abgestrahlt
- Daten über Laufzeit, Intensität und Frequenzverschiebung werden ausgewertet
- Ergebnisse sind Windgeschwindigkeit und -richtung in einer Höhe von 40 bis 600m
- vertikale Auflösung von 20m

→ absolute Genauigkeit reicht in der Regel nicht aus, um Energieertrags-rechnungen für Windparks durchzuführen

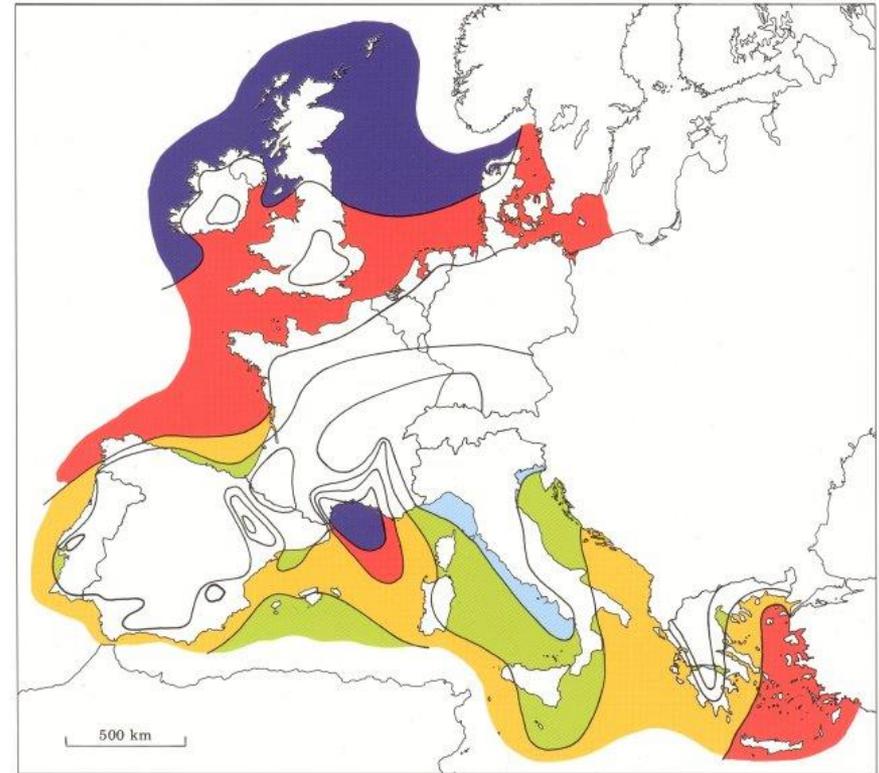


Quelle: wind-sodar.de

Windressourcen Europa



Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

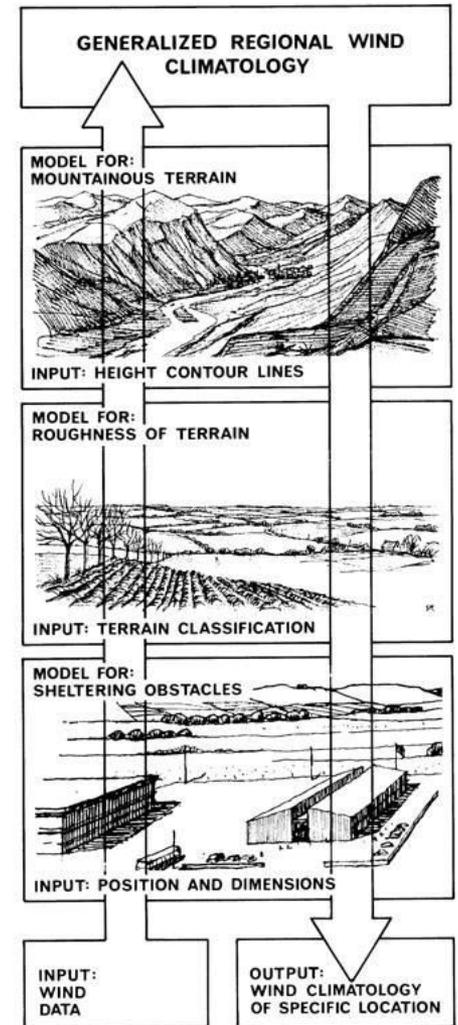


Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights									
10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

Quelle: Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark

Windatlas-Methode

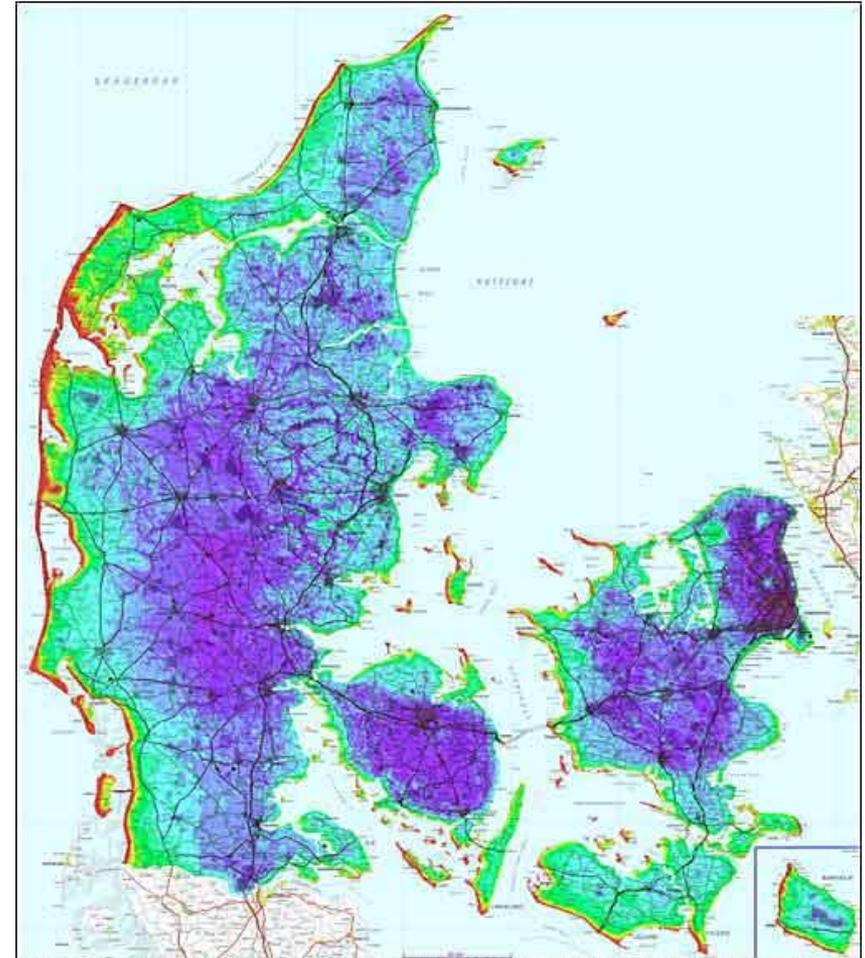
- Datenbasis: Europäischer Windatlas des dänischen Forschungszentrums Risø
- Windverhältnisse in normierter Standardumgebung ohne
 - Hindernisse
 - Geländerauhigkeit
 - Orographie (Geländekontur)
- WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Programme)



Beispiel: Windkarte Dänemark

Berechnete Windkarte

- Berücksichtigung von
 - Orographie
 - Rauigkeiten
 - Daten vorhandener WEA
- fehlende Informationen
 - neue Bäume und Häuser
 - Porösität von Hindernissen
- Auflösung von 200m x 200m
- Hauptwindrichtung West/Südwest

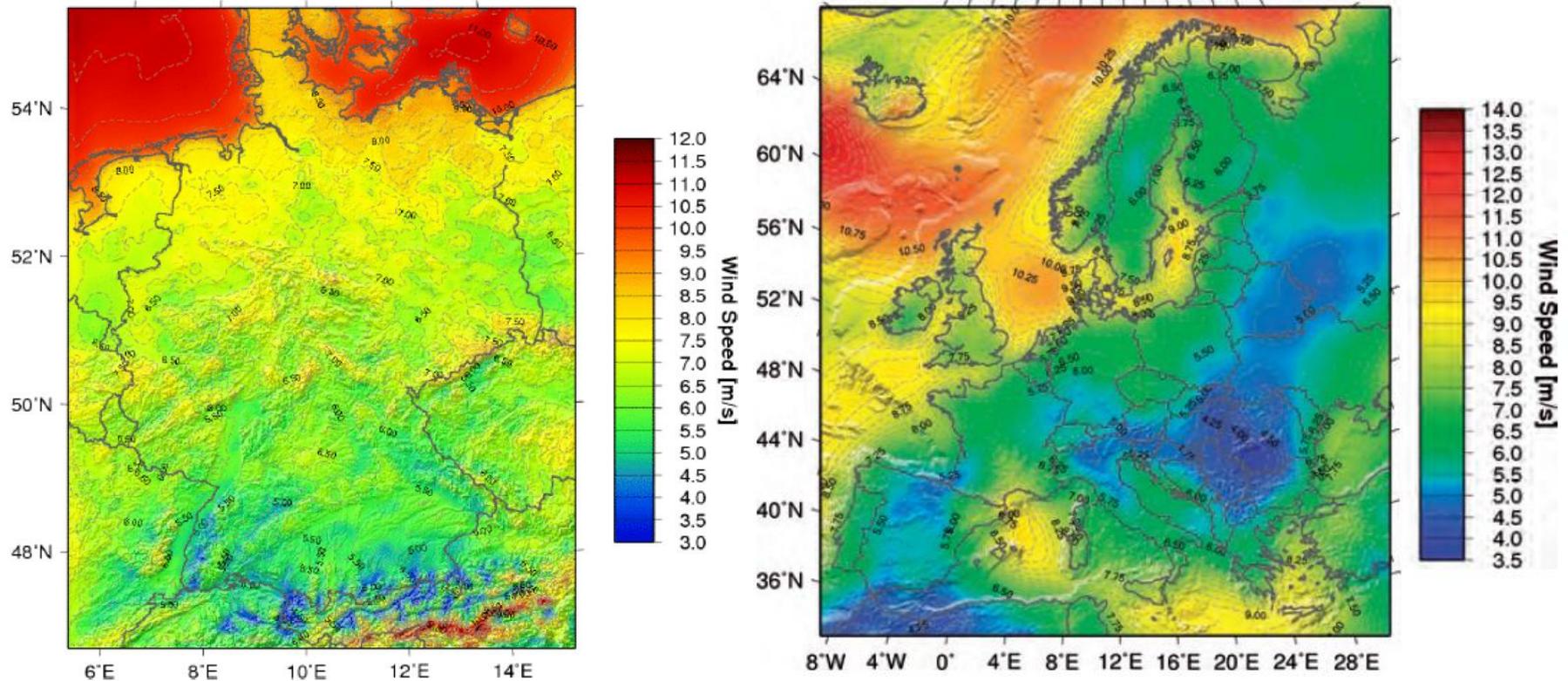


Wind Map of Denmark © 1999 Danish Energy Agency, Energy & Environmental Data, Risø National Laboratory

Quelle: Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark

- Weiterentwicklung der Windatlas-Methode
- Numerische Simulation des Atmosphärischen Zustands (vgl. FEM)
 - Strömung
 - Temperatur
 - Feuchte
 - Strahlung
- Beispiele
 - MM5
 - anemoScope
 - METRAS-PC

Mesoskala-Modelle



Quelle: anemos, Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH

Genehmigungsverfahren

- Baurecht
 - Baugesetzbuch (BauGB)
 - Baunutzungsverordnung (BauNVO)
 - Landesbauordnung (LBO)
- Gutachten, Zertifizierung

Vorgehensweise zur Errichtung

1. Standortuntersuchungen (→ V11)
2. Windkraftanlagenauswahl
3. Wirtschaftlichkeitsanalyse (→ V14)
4. Genehmigung
5. Errichtung

Antrag auf Baugenehmigung

- Baubeschreibung
- Lageplan
- Bauzeichnungen
- Statik für Turm und Fundament
- Typprüfung
 - Zertifizierungsnachweis für Bauwerk und Bauteile
 - Nachweis der sicherheitstechnische Ausrüstung
 - Gutachten für Maschinenhaus und Rotor
 - Untersuchungsergebnisse über Geräuschemission und Schwingungsverhalten
 - Betriebsanweisung für Betreiber
- Karten bezüglich
 - Schallimmission
 - Schattenwurf
 - Sichtbarkeit
 - Visualisierung der Windkraftanlagen

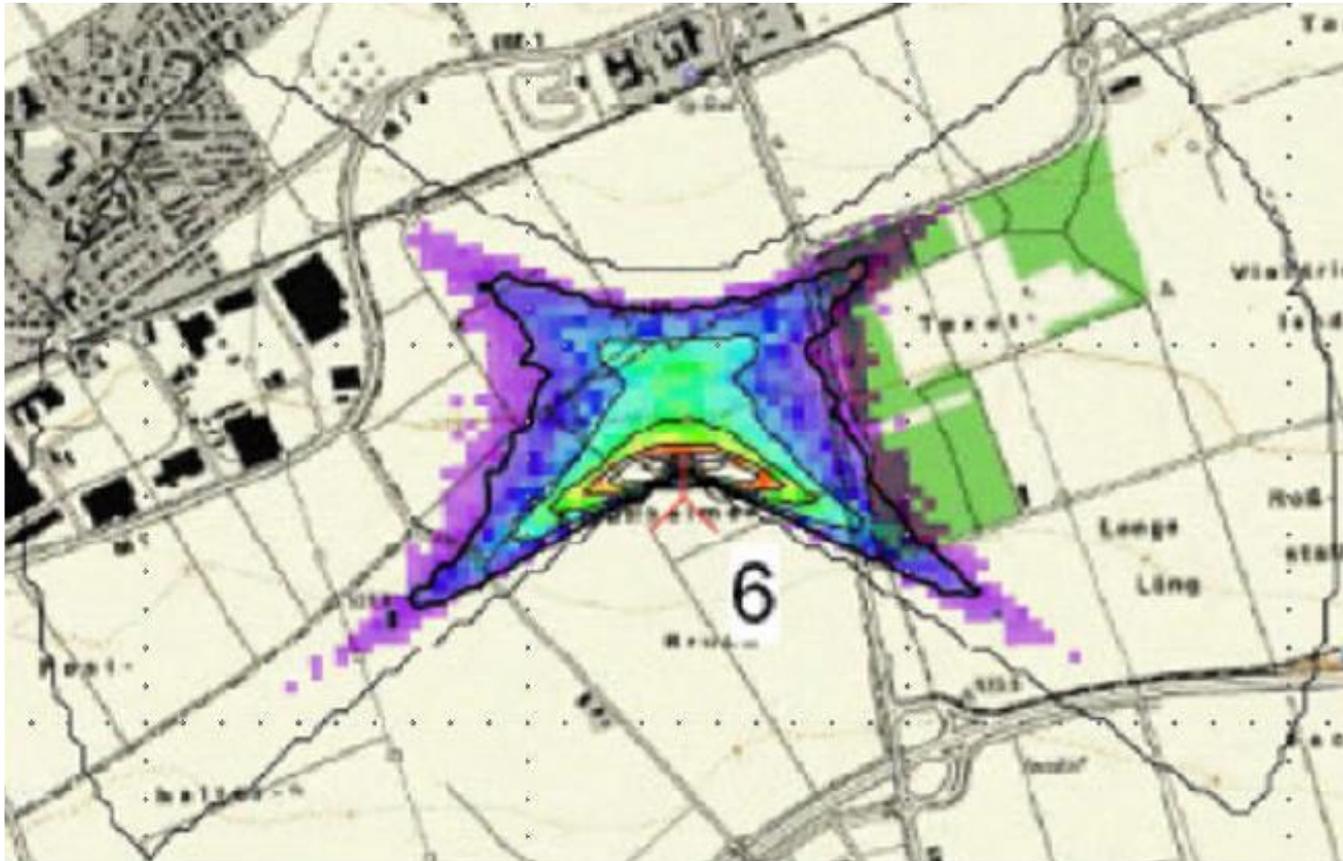
Errichtung und Inbetriebnahme

Grenzwerte Schallimmission

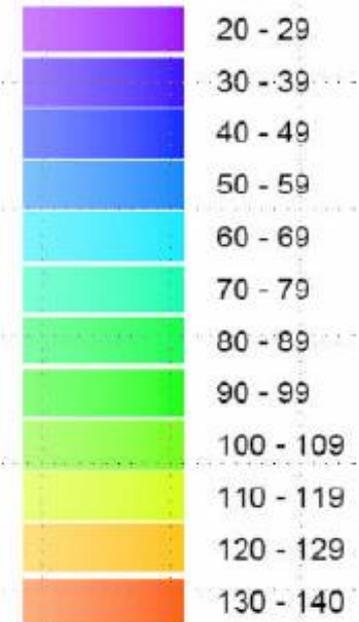
Gebiete nach BauNVO	Tag dB(A)	Nacht dB(A)
Industriegebiet	70	70
Gewerbegebiet	65	50
Misch-, Kern-, Dorfgebiet	60	45
Allgemeines Wohngebiet	55	40
Reines Wohngebiet	50	35
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	45	35

Geräuschart	Lautstärke dB(A)	Geräuschempfinden
Ticken einer leisen Uhr, feiner Landregen, Flüstern	30	sehr leise
nahes Flüstern, ruhige Wohnstraße	40	ziemlich leise
Unterhaltungssprache	50	normal
Unterhaltungssprache in 1 m Abstand, Bürolärm	60	normal bis laut
laute Unterhaltung, Rufen, PKW in 10 m Abstand	70	laut bis sehr laut
Straßenlärm bei starkem Verkehr	80	sehr laut
laute Fabrikhalle	90	sehr laut
Autohupen in 7 m Abstand	100	sehr laut bis unerträglich
Kesselschmiede	110	sehr laut bis unerträglich
Flugzeugtriebwerk	120	unerträglich bis schmerzhaft

Beispiel: Schattenwurf



Stunden/Jahr
Berechnung der
astronomisch maximal
möglichen
Beschattungsdauer



Beispiel: Fundamentgründung



Beispiel: Transport



Beispiel: Transport



Beispiel: Errichtung



Beispiel: Errichtung



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**



Hier stehen maximal
bis zu vier Zeilen
egal welcher Inhalt
und variabel in der Breite

RWTHAACHEN
UNIVERSITY