

Einige meteorologische Aspekte der Windkraftnutzung

Stefan Emeis
stefan.emeis@kit.edu

INSTITUTE OF METEOROLOGY AND CLIMATE RESEARCH, Atmospheric Environmental Research



Windenergie-relevante Arbeiten zur Grenzschicht- und Energiemeteorologie

a) auf Messungen basierend

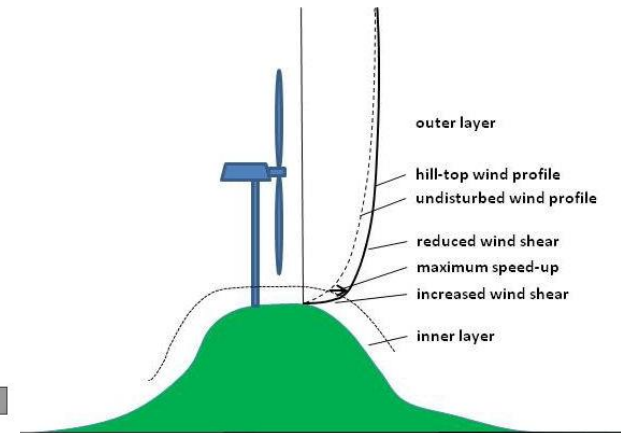
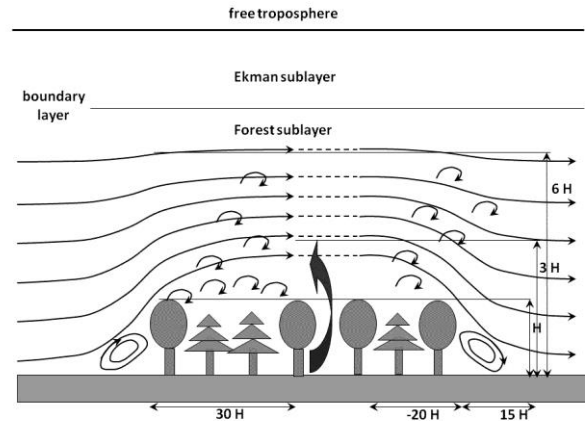
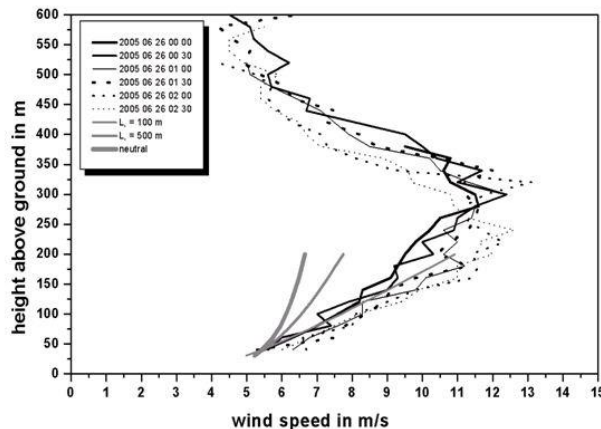
Wind- und Turbulenzprofile über Land (IFU, TRO)

- Messungen mit Fernerkundungsverfahren (Sodar, Windlidar, RASS (IFU), KIT-Cube (TRO))
 - * thermische Schichtung (z.B. nächtliche Windmaxima (low-level jets))
 - * Waldkanten, Waldgebiete
 - * Einfluss Orographie (z.B. Unterschied Flachland – Hügelkuppe),
- langjährige Zeitreihen von Windmessungen in 200 m Höhe vom KIT-Mast (TRO) (Ressourcenanalyse)



- Potential: Erfassung von inhomogen Windfeldern über Wäldern,
Erfassung von Windfeldern über orographisch gegliedertem Gelände,
Mitarbeit auf geplantes Windtestfeld in BW,

notwendig für effektive Nutzung der Windenergie in Süddeutschland und generell im Binnenland



Windenergie-relevante Arbeiten zur Grenzschicht- und Energiemeteorologie

a) auf Messungen basierend

Wind- und Turbulenzprofile auf See (IFU)

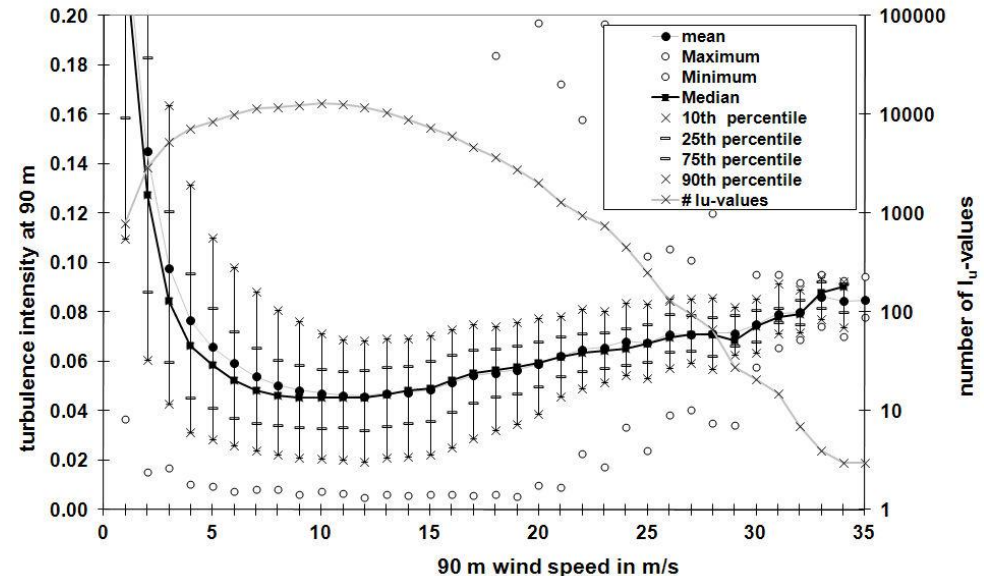
- Aufbau der marinen atmosphärischen Grenzschicht (wichtig für Planung (Auswertung von Daten vom offshore-Messmast FINO1))
- Turbulenzintensität als Funktion der Windgeschwindigkeit (wichtig für Lastberechnungen)

-Potential: Verbesserung der Analyse und Vorhersage der Wind- und Turbulenzverhältnisse über Land und über See
Verbesserung des generellen Verständnisses der maritimen atmosphärischen Grenzschicht

notwendig für den Ausbau der Offshore-Windenergienutzung



Foto: Martina Nolte, <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode>



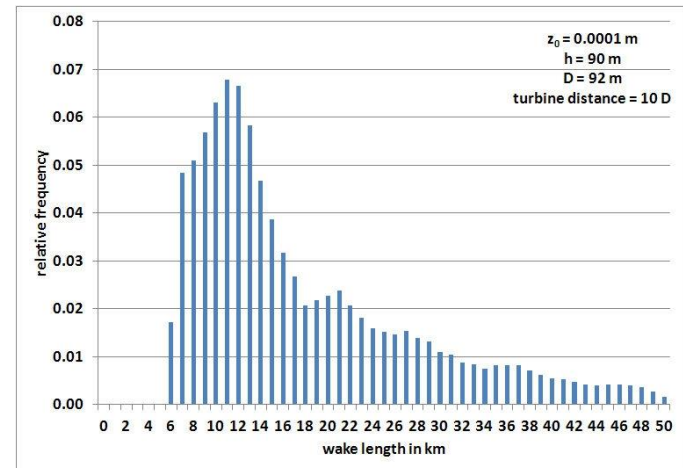
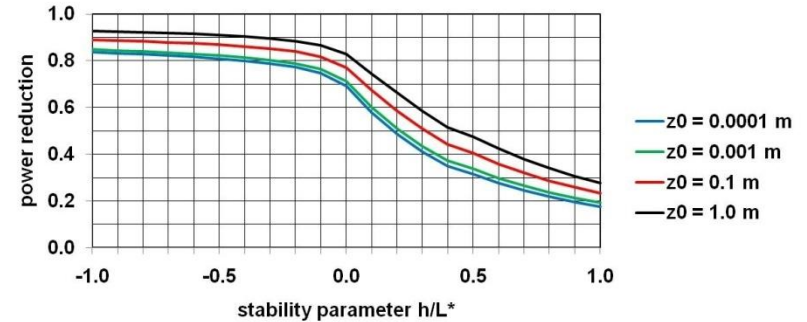
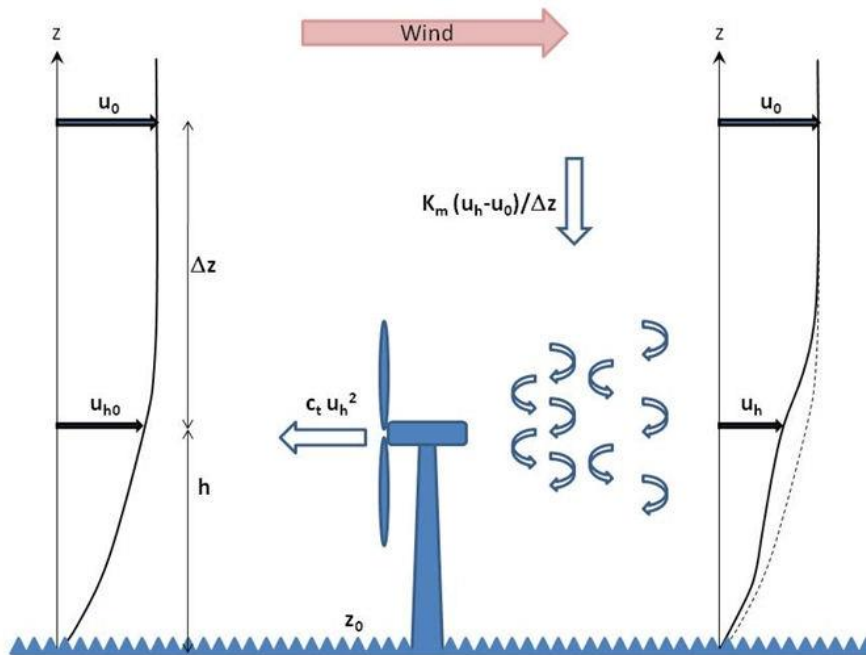
b) auf Modellierungen basierend

analytisches Windpark-Modell (IFU)

- analytisches Modell zur Windreduktion im Windpark und zur Länge des Nachlaufs hinter Windparks
- * z.B. Bestimmung des optimalen Abstands von Windturbinen in einem Windpark und von ganzen Windparks

- Potential: Unterstützung des optimalen Designs von offshore-Windparks

notwendig für die Planung optimal arbeitender Windparks



Windenergie-relevante Arbeiten zur Grenzschicht- und Energiemeteorologie

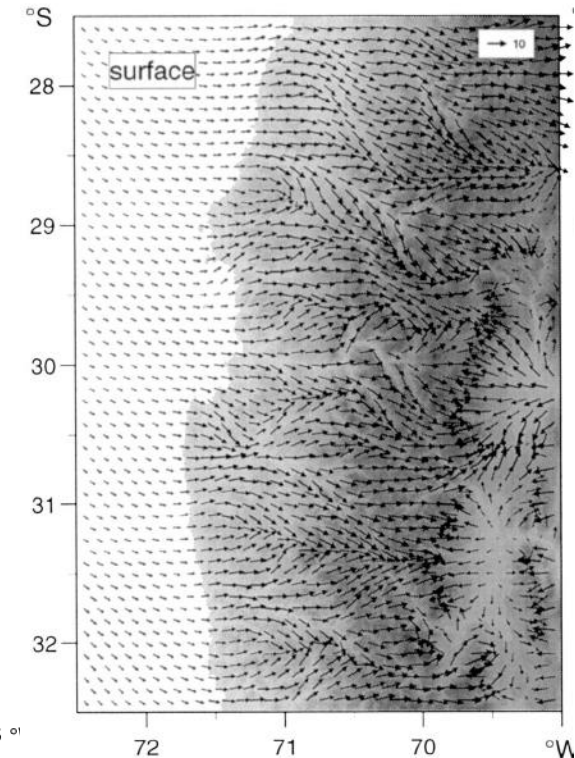
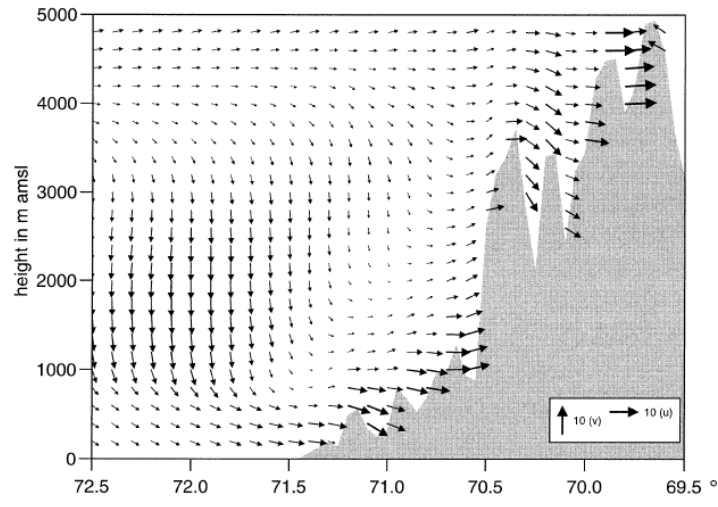
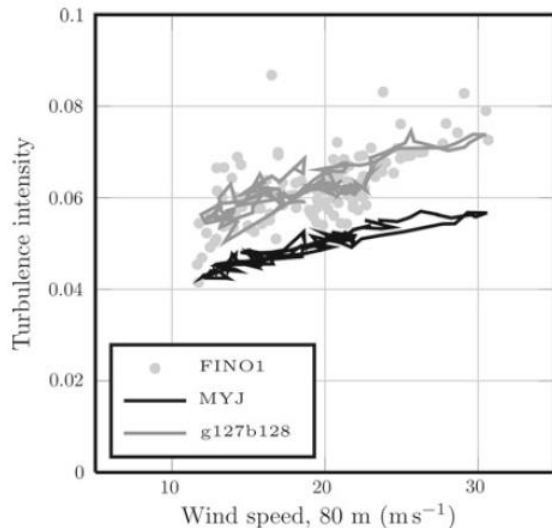
b) auf Modellierungen basierend

numerische Windfeldmodelle (WRF, KAMM, COSMO) (IFU, TRO (zusammen mit Dr. Inge Bischoff-Gauß, SCC))

- verbesserte Turbulenzparametrisierung für numerische Modelle (WRF) (wichtig für Windfeldvorhersage)
- KAMM wurde als Basismodell für den Europäischen Windatlas verwendet
- Windenergieabschätzung Chile (KAMM)
- Training thailändischer Kollegen zur Windenergieberechnung

- Potential: Analyse des Windenergiepotentials größerer Gebiete, internationale Zusammenarbeit

notwendig für die generelle Planung (wirtschaftlich, politisch) der Windenergienutzung



Einige für die Windkraftnutzung relevante meteorologische Aspekte

Tagesgang der Windgeschwindigkeit und der thermischen Schichtung,
low-level jets

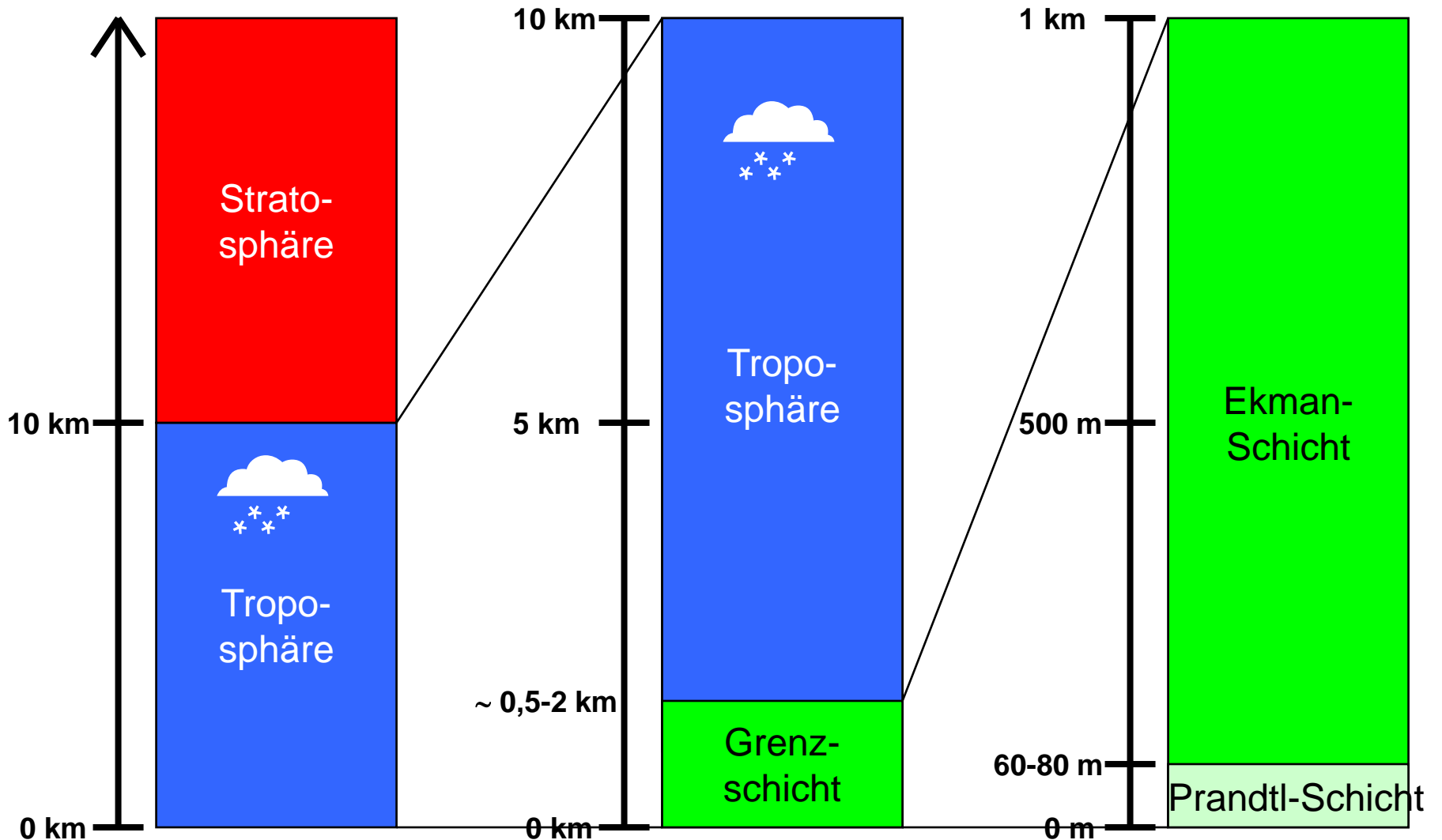
Strömungen über komplexem Gelände und deren Messung

marine Grenzschicht (offshore)

Windparks, onshore und offshore

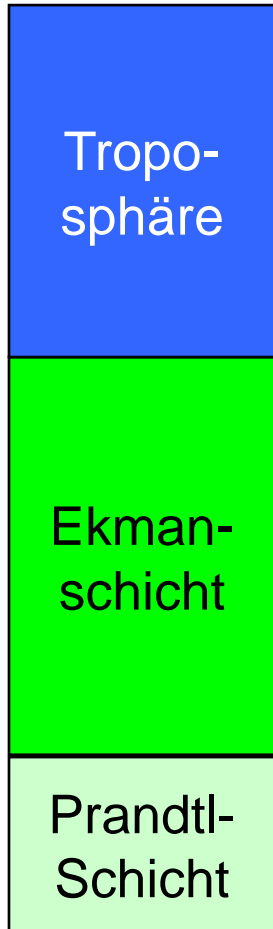


Tagesgang der Windgeschwindigkeit und der thermischen Schichtung,
low-level jets



**Kräfte,
die den Wind
bestimmen:**

**Folgen für den Wind
und sein Vertikalprofil**



**Druckgradientkraft
Corioliskraft**

**Gradientwind, weht parallel
zu den Isobaren**

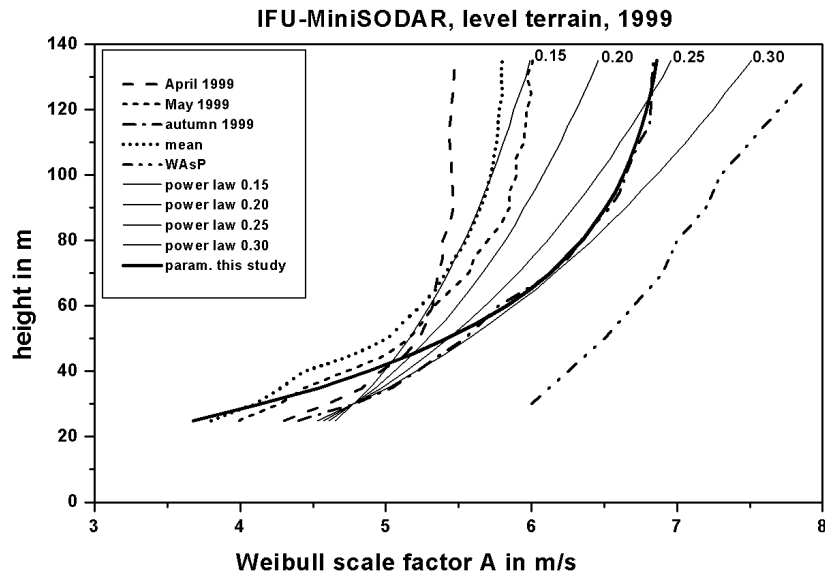
**Druckgradientkraft
Corioliskraft
Reibungskraft**

**Windzunahme mit der Höhe,
Winddrehung mit der Höhe**

**Druckgradientkraft
Reibungskraft**

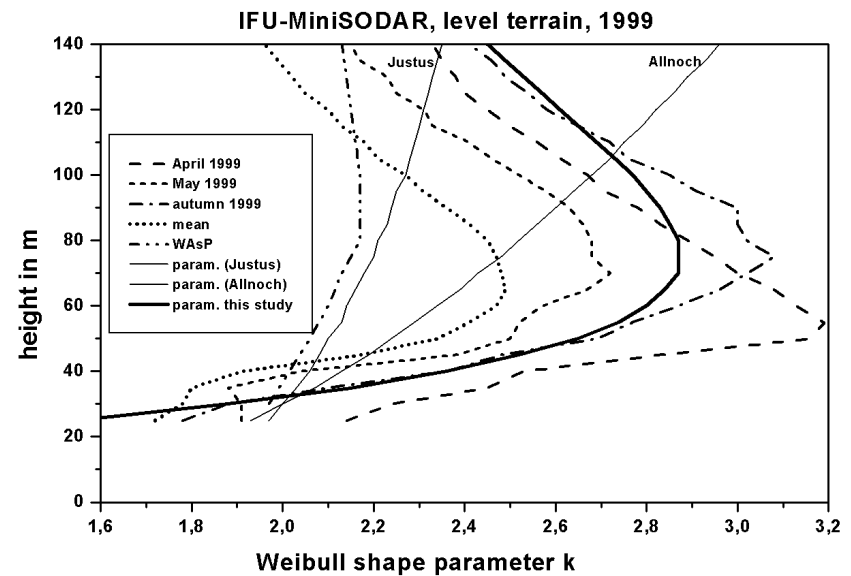
**Log. Windzunahme mit der
Höhe (Potenzgesetz), Wind
weht ins Tief hinein**

Vertikalprofile der Parameter der Weibull-Verteilung im Flachland



Weibull-Skalenparameter
($A_0 = 6,98 \text{ m/s}$, $\gamma = 0,03$)

$$A(z) = A_0 \left(1 - e^{-\gamma z}\right)$$

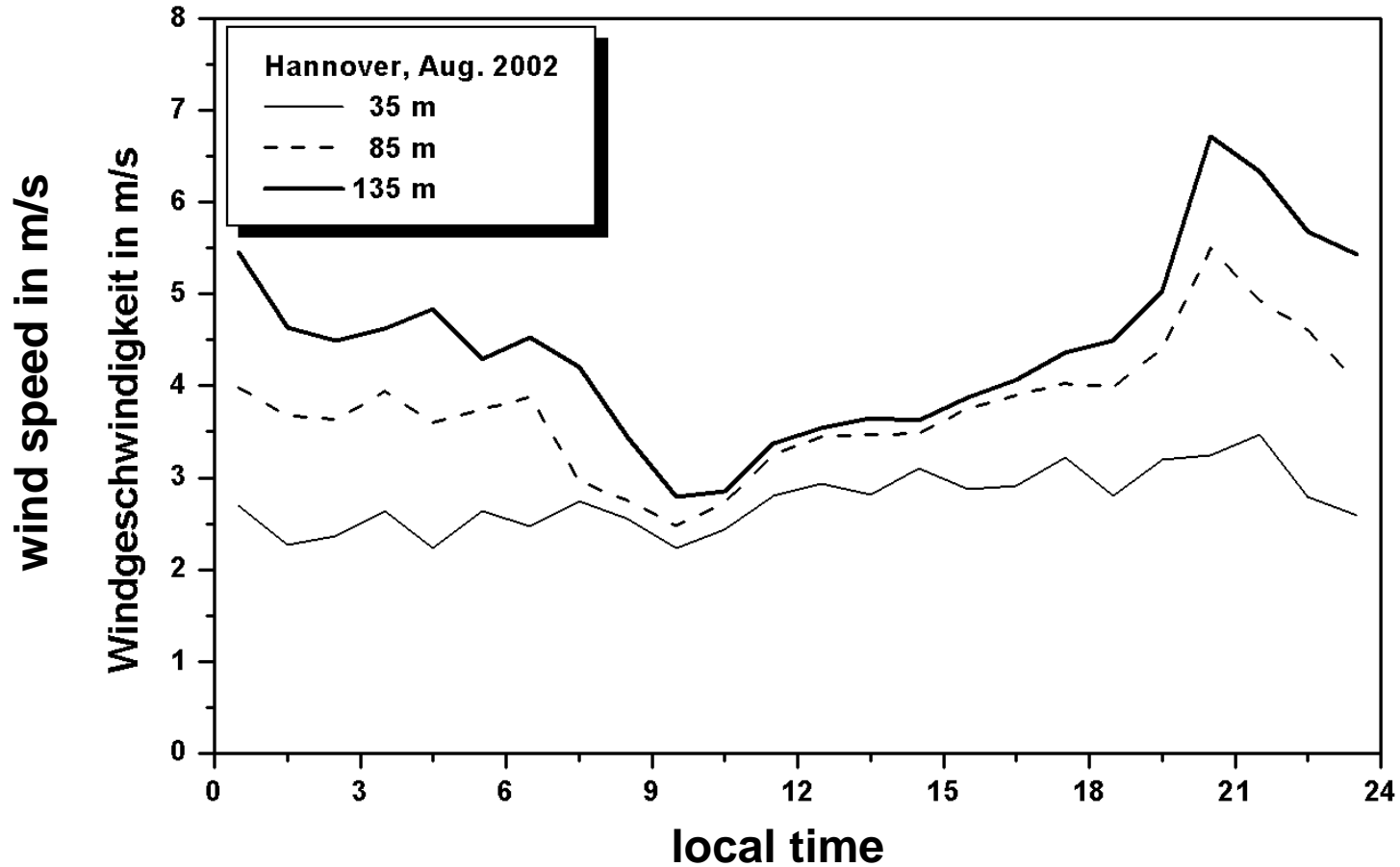


Weibull-Formparameter
($z_A = 10 \text{ m}$, $z_m = 75 \text{ m}$, $c_2 = 0.06$)

$$k(z) - k_A = c_2 (z - z_A) \exp\left(-\frac{z - z_A}{z_m - z_A}\right)$$

Wieringa (1988)

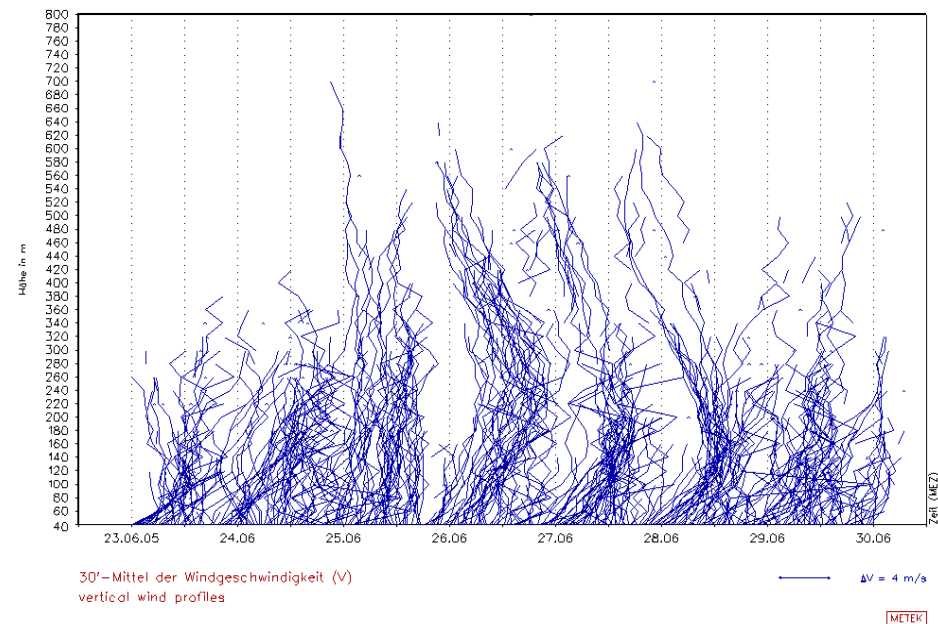
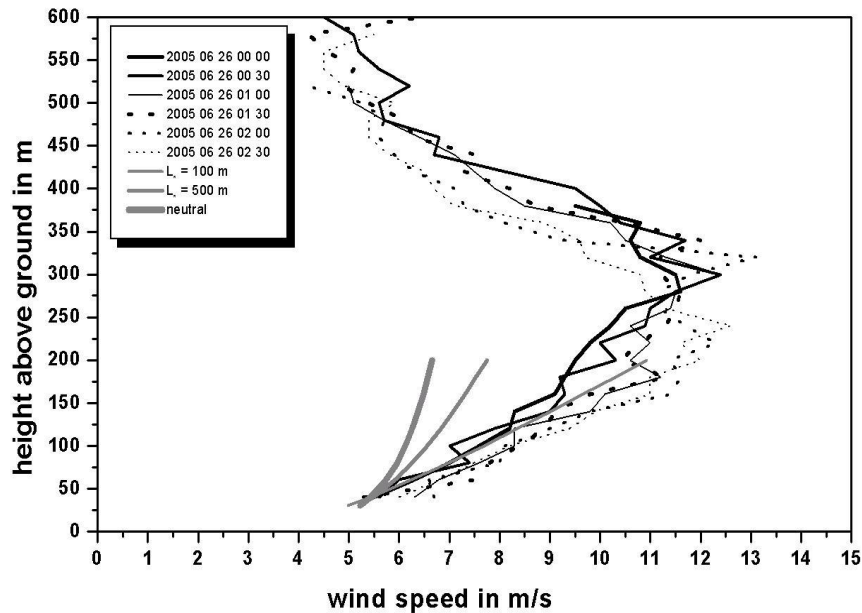
Monatsmittel des Tagesgangs der Windgeschwindigkeit August 2002, 17 Nächte mit LLJ

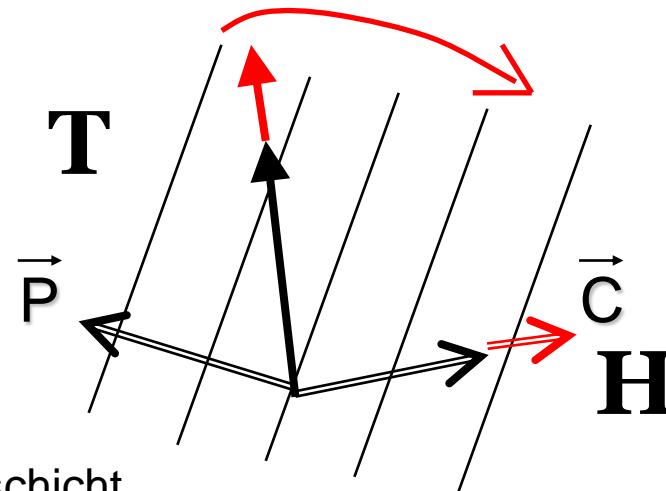
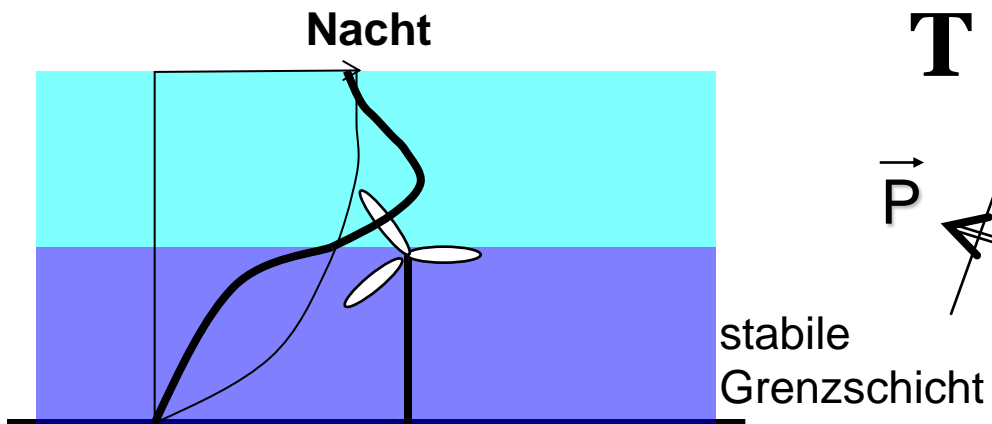
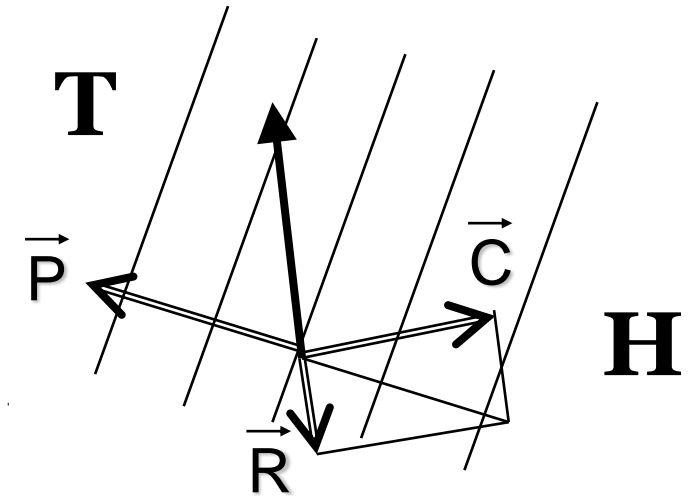
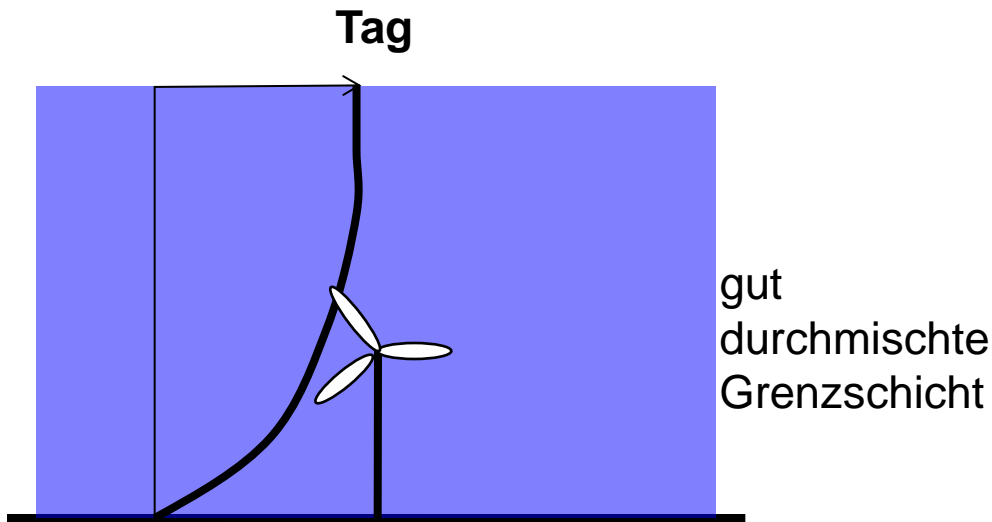


Low-level jet Beobachtung mit SODAR

vertikale Windprofile (30 min-Mittel)
26. Juni 2005

23.-30. Juni 2005

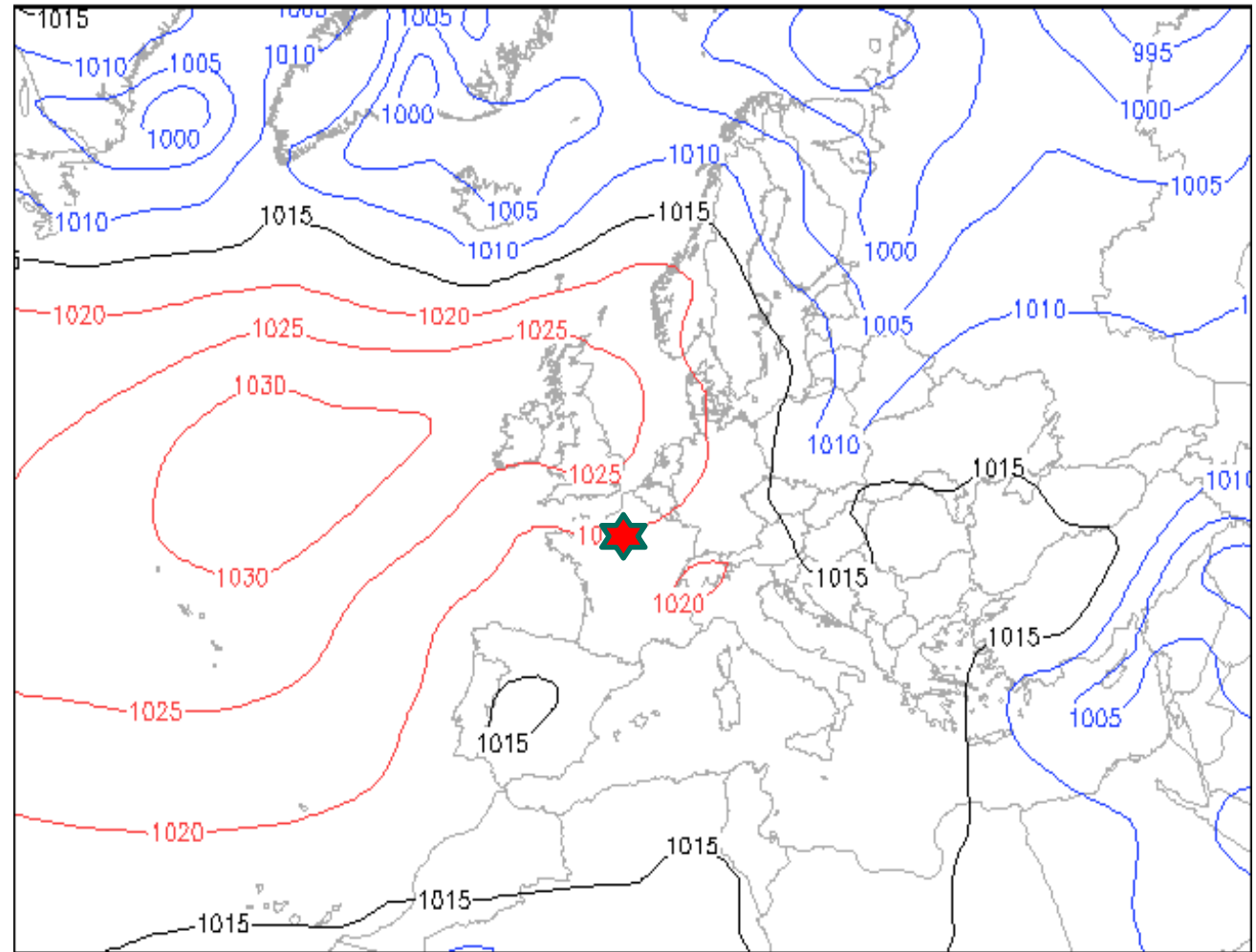




**Bodendruck
00 GMT**

26. Juni 2005

**Stern: Ort der
Beobachtung des
LLJ**



Bodendruck GFS (hPa)

So 26.06.05 00 GMT (Sa 00 + 24)
WetterOnline

LLJ-Häufigkeit über Hannover für 20 Monate in den Jahren 2001 bis 2003

in knapp 22 % aller Nächte

Großwetterlagen:

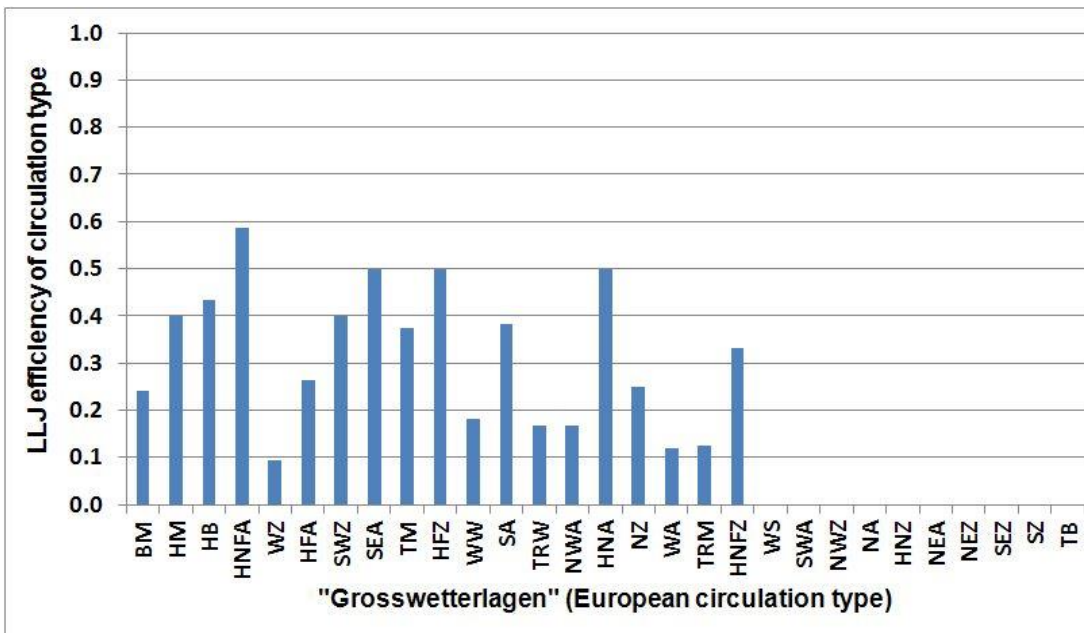
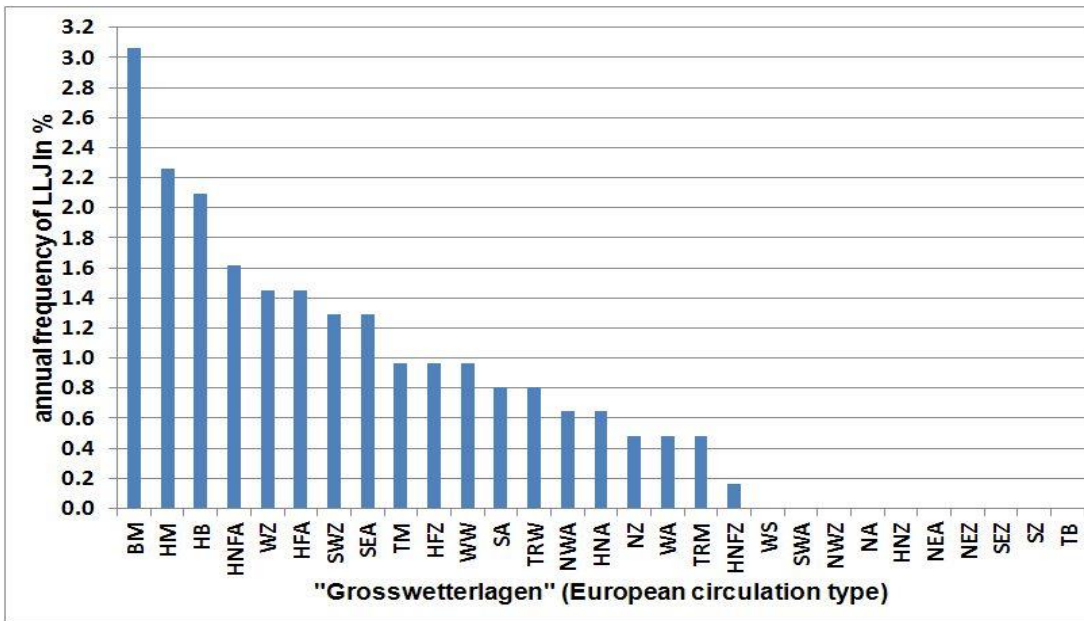
BM Brücke Mitteleuropa
HB Hoch Britische Inseln
HM Hoch Mitteleuropa

...

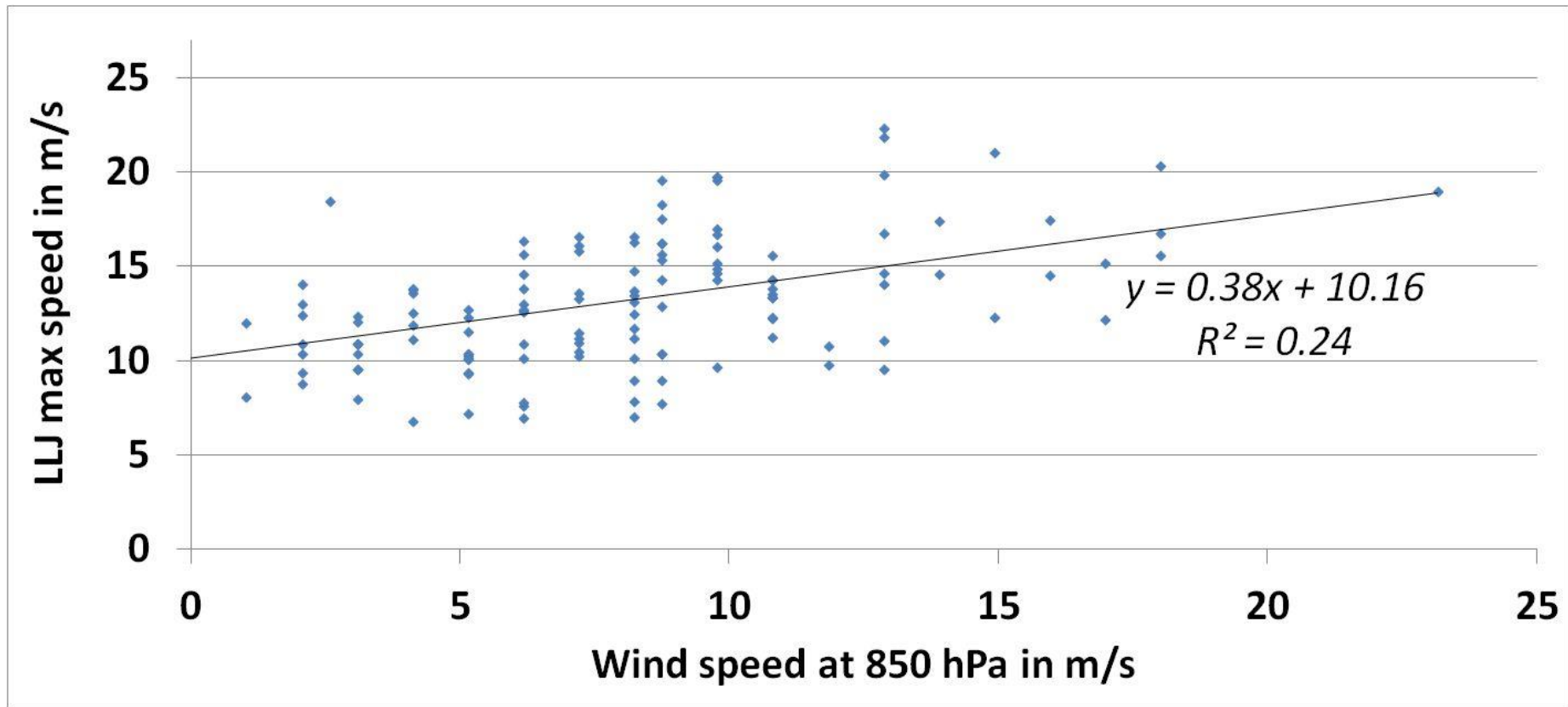
HFZ Hoch Skandinavien
HNFA Hoch Nordatlantik

...

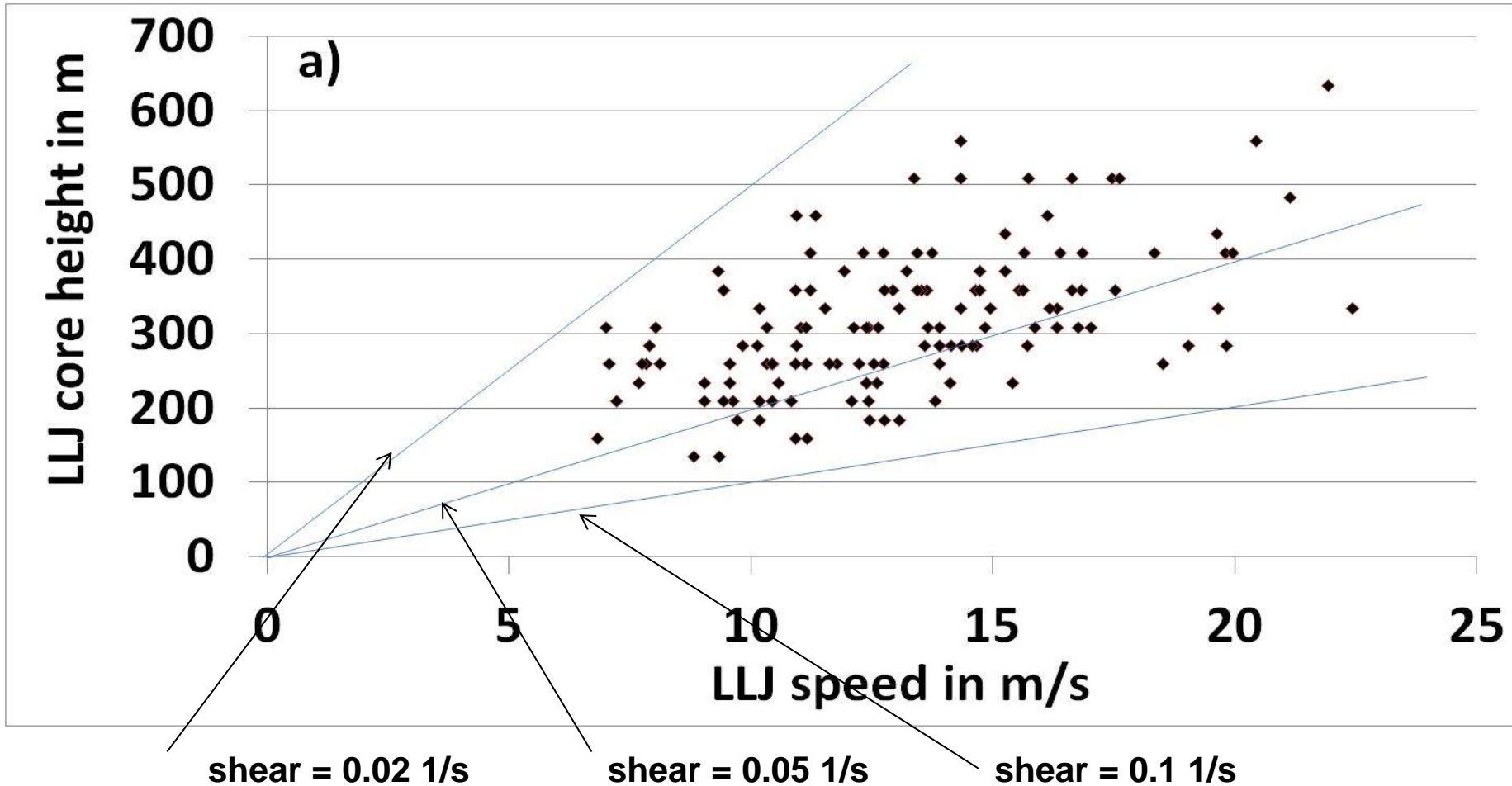
“Effektivität” einen
 LLJ über Hannover
 hervorzubringen

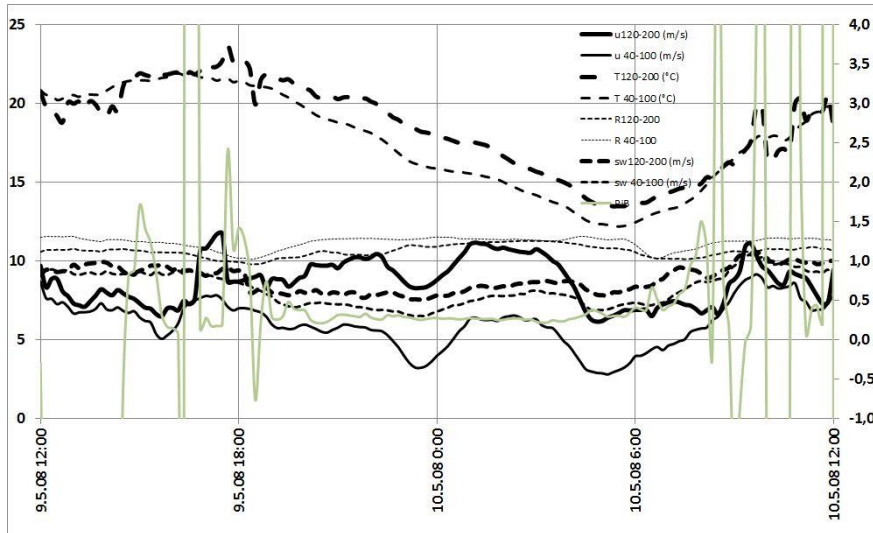


maximale Windgeschwindigkeit im LLJ und antreibende Druckgradientkraft

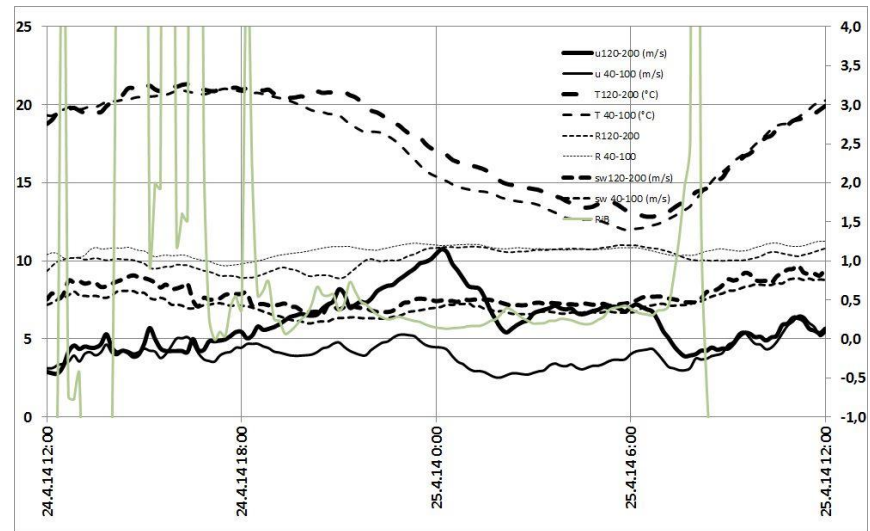
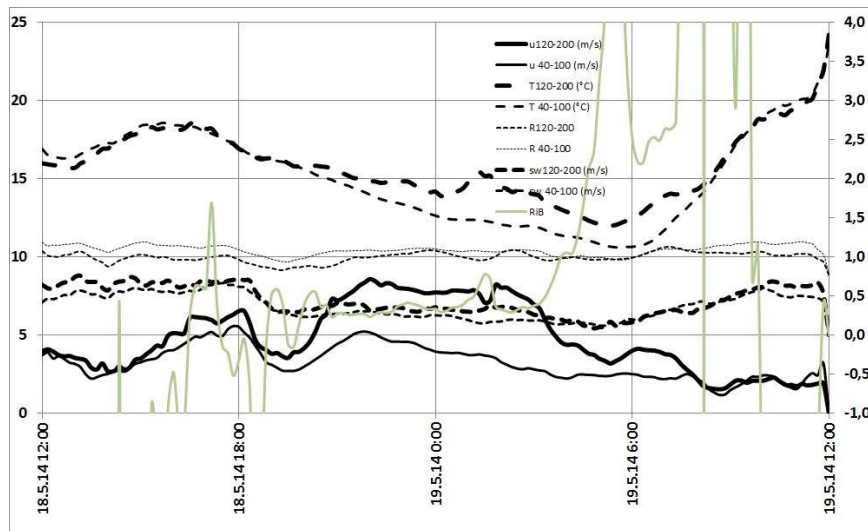


Höhe in m und Windgeschwindigkeit im Kern des LLJ in m/s über Hannover 5.2001 – 4.2003





**kritische Richardson-Zahl
als limitierende Größe
bei der Ausbildung nächtlicher LLJ**



Zusammenfassung zu LLJ

Klimatologie

- LLJ in gut 21% aller Nächte (**in de Bilt ca. 20%**)
- Kern zwischen 135 und 650 m Höhe
- LLJ Kerngeschw. 7 bis 23 m/s (**Höhe und Geschw. sind korreliert**)

Zusammenhang mit den treibenden Kräften

- 850 hPa Wind zwischen 1 und 18 m/s (**Kottmeier et al. 1983: 6-11 m/s**)
- LLJ-Kerngeschw. positiv korreliert mit 850 hPa wind (**Maximum bei 13 m/s**)
- LLJ-Kerngeschw. negativ korreliert mit 850 hPa relative Feuchte

dynamischer Einfluss auf Windturbinen

- Scherung in der Rotorebene bei 0.04 bis 0.08 1/s
- Richtungsscherung bei 0.1 bis 0.2 Grad/m

allgemein

- Scherung wächst bis maximale Scherung erreicht (relevanter Parameter: **kritische Richardson-Zahl**)

Ansätze für durchgehende Windprofilbeschreibung in der nicht neutral-geschichteten Grenzschicht (Emeis et al. 2007 basierend auf Etling 2002):

$$u(z) = \begin{cases} u_* / \kappa (\ln(z/z_0) - \Psi_m(z/L_*)) & \text{for } z < z_p \\ u_g (-\sin \alpha_0 + \cos \alpha_0) & \text{for } z = z_p \\ u_g [1 - 2\sqrt{2}e^{-\gamma(z-z_p)} \sin \alpha_0 \cos(\gamma(z-z_p) + \pi/4 - \alpha_0) + 2e^{-2\gamma(z-z_p)} \sin^2 \alpha_0]^{1/2} & \text{for } z > z_p \end{cases}$$

mit den externen Parametern z_0 , L_* und u_g
und den internen Parametern α_0 , z_p und γ .

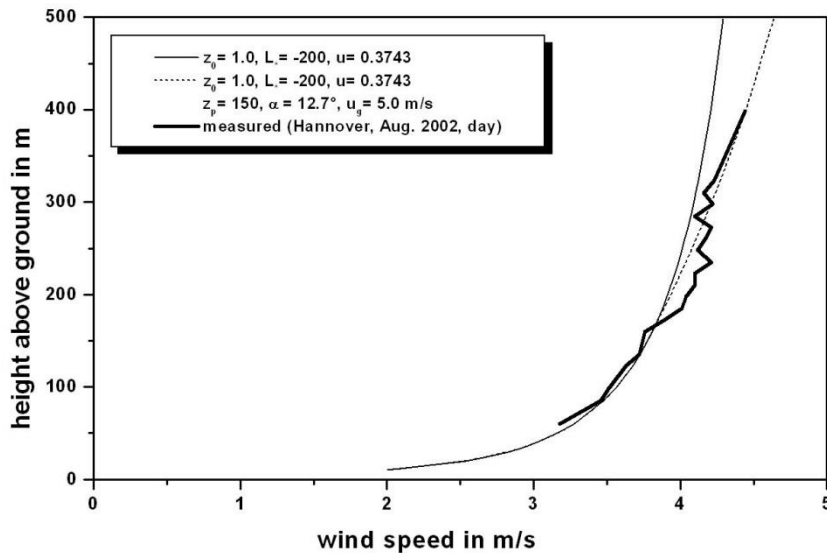
mit den externen Parametern z_0 und u_g und den internen Parametern α_0 , z_p und γ .

$$u_* = 2 \left| u_g \right| \gamma \kappa z_p \sin \alpha_0$$

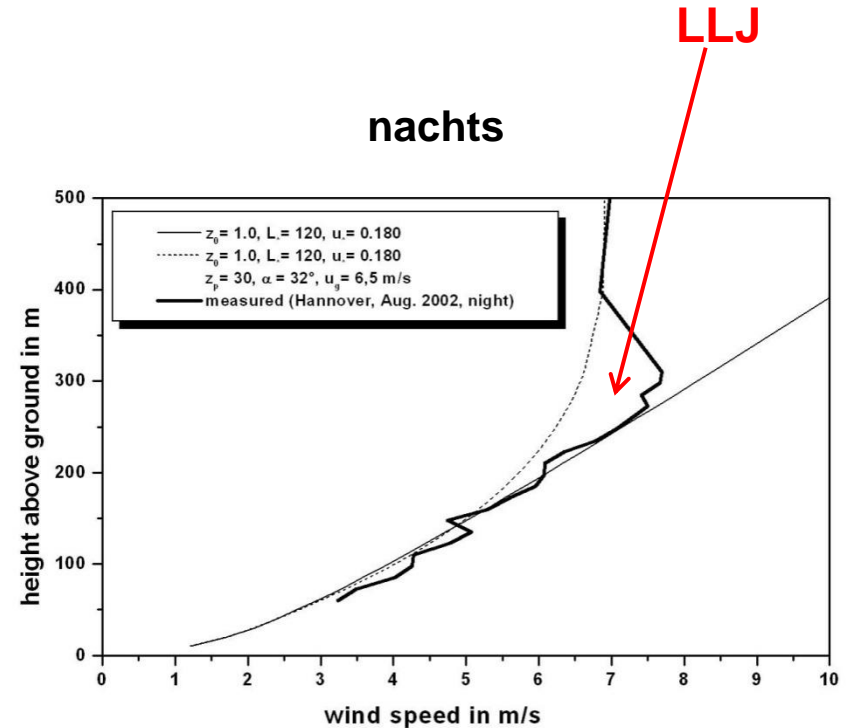
$$\alpha_0 = \arctg \frac{1}{1 + 2\gamma z_p \ln(z_p / z_0)}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{f}{2\kappa u_* z_p}}$$

tagsüber



nachts

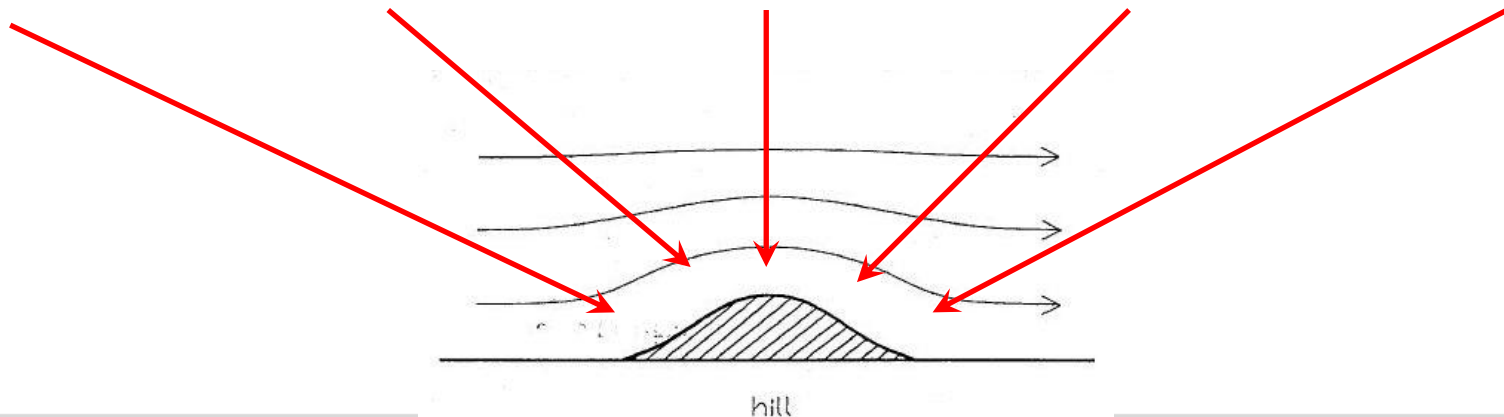
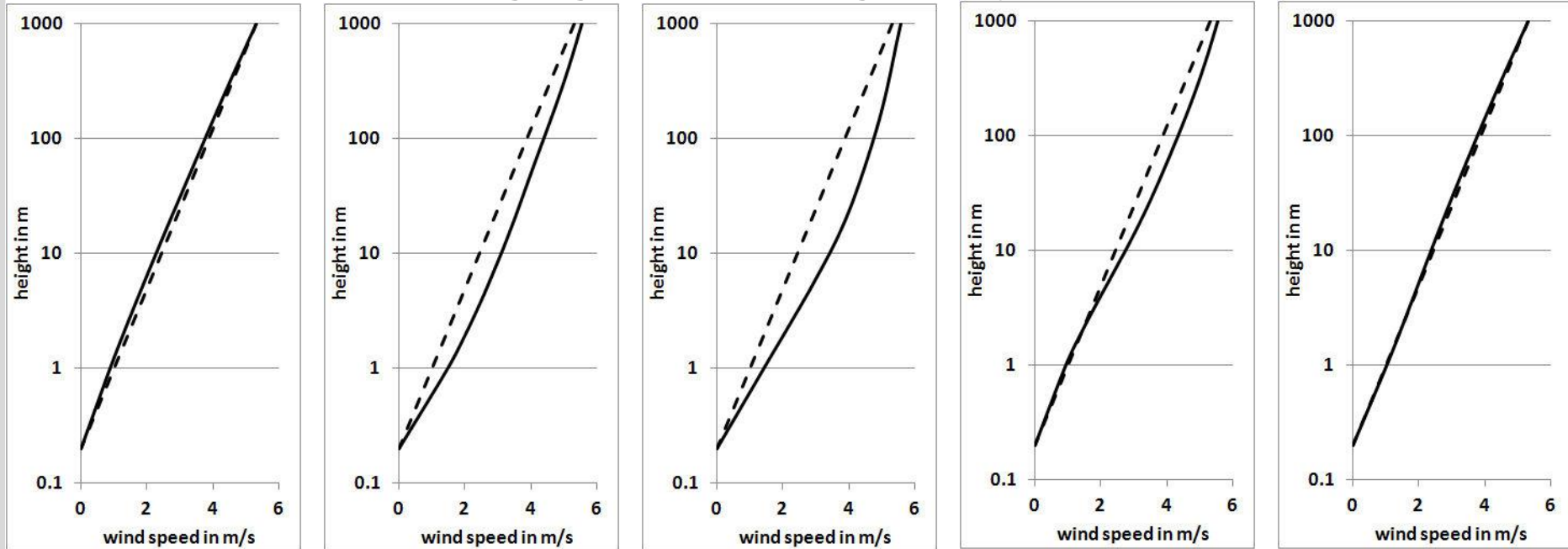


die gestrichelte Kurve zeigt die durchgehende Profilfunktion,
die durchgezogene Kurve ein nach oben fortgesetztes logarithmisches Profil

2

Strömungen über komplexem Gelände und deren Messung

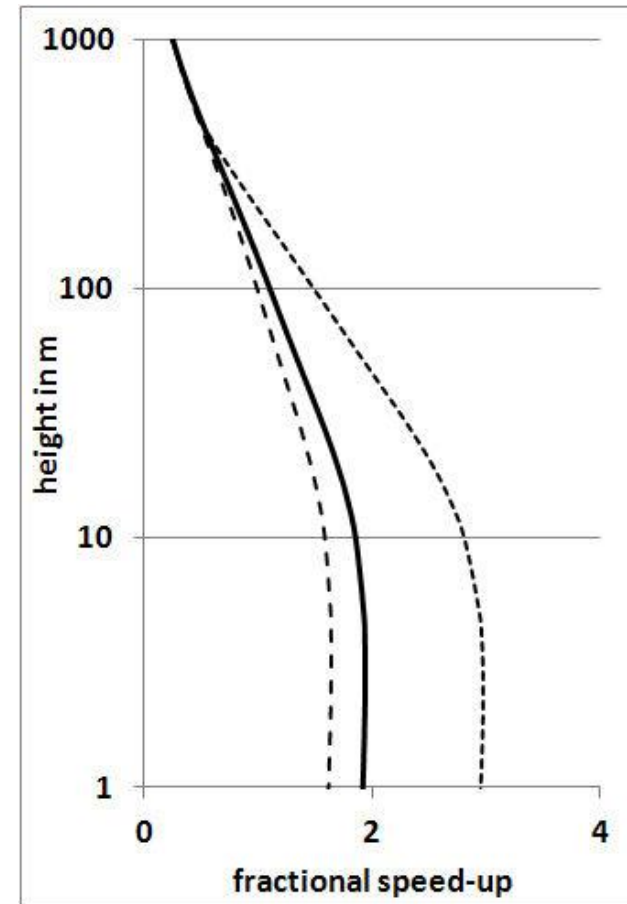
Beschleunigung über einem Hügel (analytisches Modell)



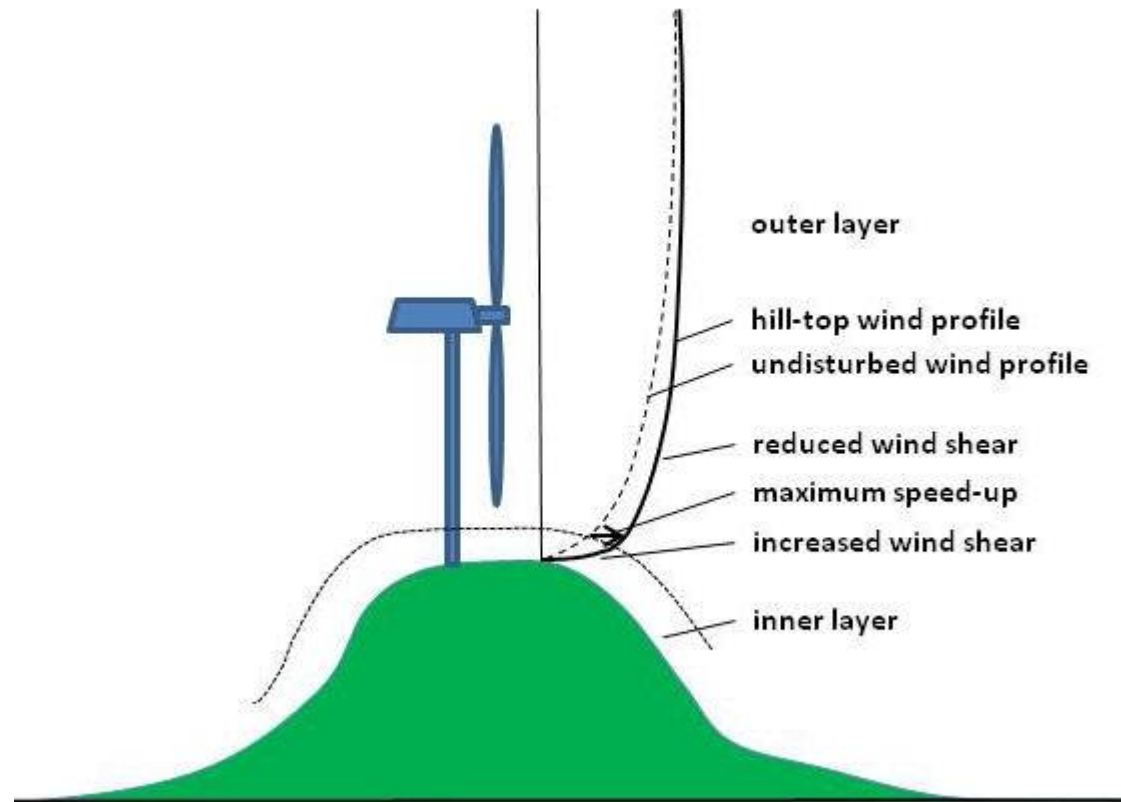
Beschleunigung über einem Hügel (analytisches Modell)

als Funktion der thermischen Stabilität

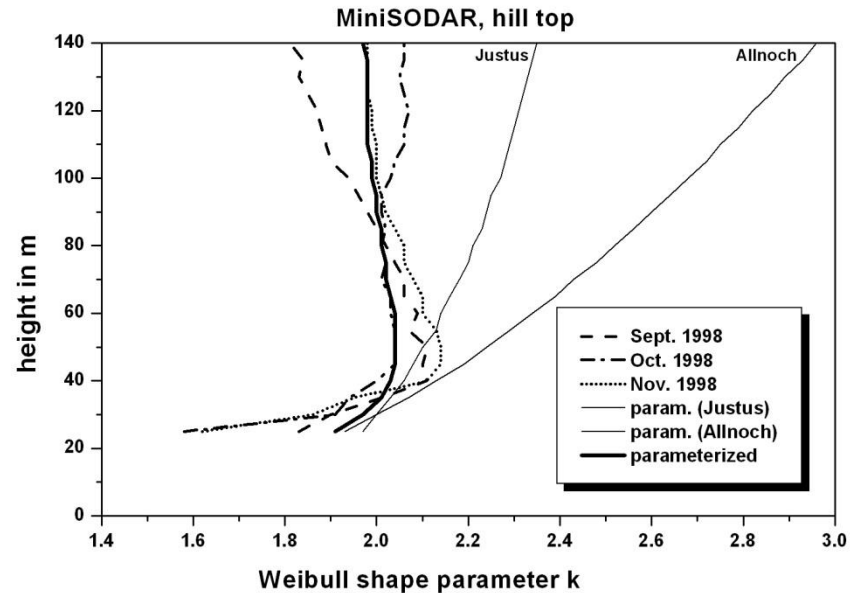
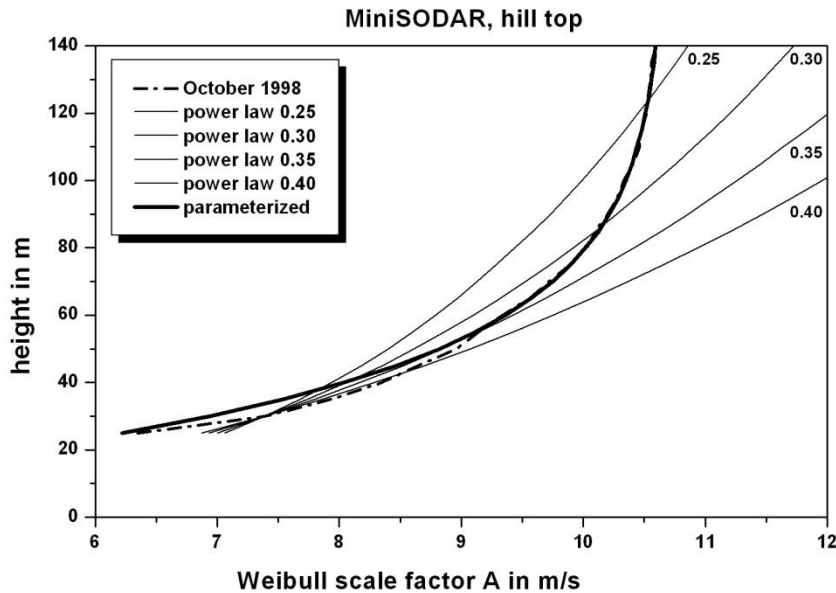
punktiert:	stabil
durchgezogen:	neutral
gestrichelt:	instabil



Beschleunigung über einem Hügel



Weibull-Parameter über einer Hügelkuppe



Weibull-Skalenparameter
($A_0 = 10,67$ m/s, $\gamma = 0,035$)

$$A(z) = A_0 \left(1 - e^{-\gamma z}\right)$$

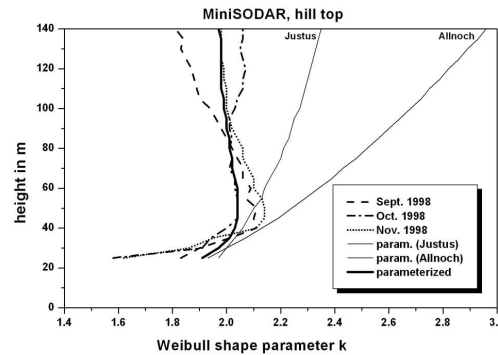
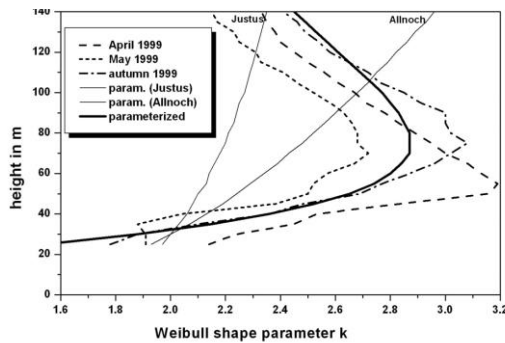
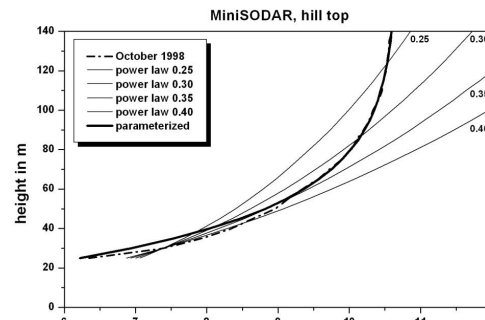
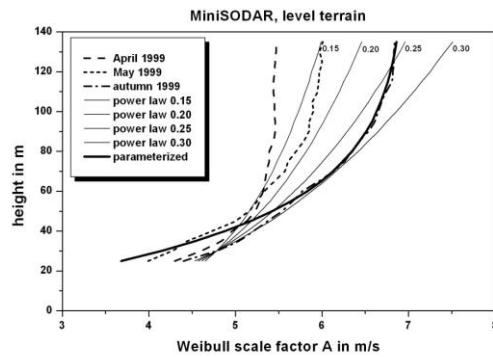
Weibull-Formparameter
($z_A = 10$ m, $z_m = 50$ m, $c_2 = 0.01$)

$$k(z) - k_A = c_2 (z - z_A) \exp\left(-\frac{z - z_A}{z_m - z_A}\right)$$

Wieringa (1988)

Flachland

Hügelkuppe



Skalenparameter

Formparameter

bodengebundene Fernmesssysteme

am IMK-IFU

SODAR, akustisch

Doppler-Analyse → wind, turbulence



SODAR-RASS (Doppler-RASS), akustisch, elektro-magnetische Rückstreuung, bestimmt Schallgeschw. → Wind- und Temperaturprofile



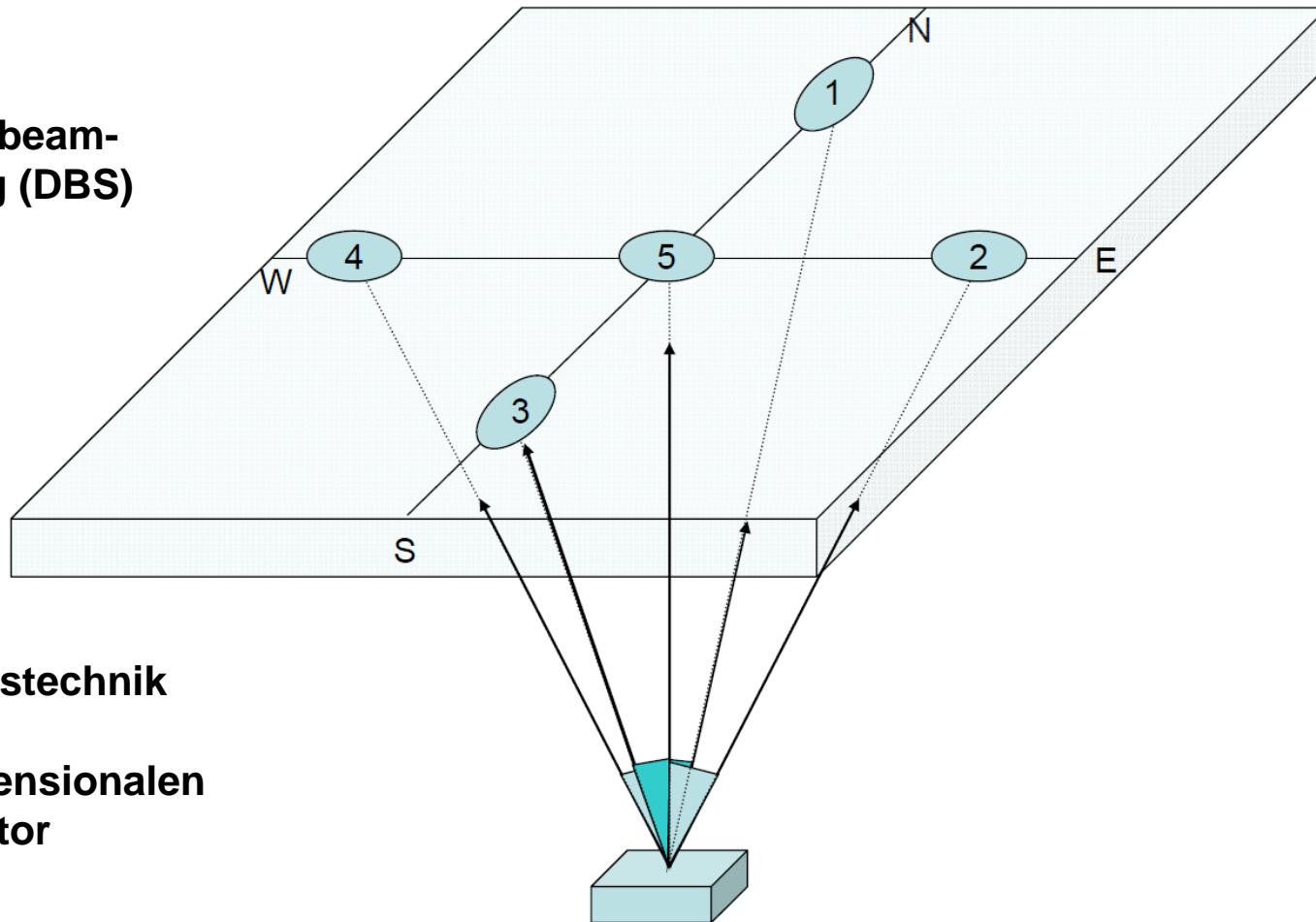
Ceilometer,
optische Pulse,
Wellenlänge ~ 0.9 μm
→ Aerosolprofile

Wind-LIDAR, optische Rückstreuung, Doppler-Analyse, Wellenlänge ~ 1.5 μm → Wind- und Aerosolprofile

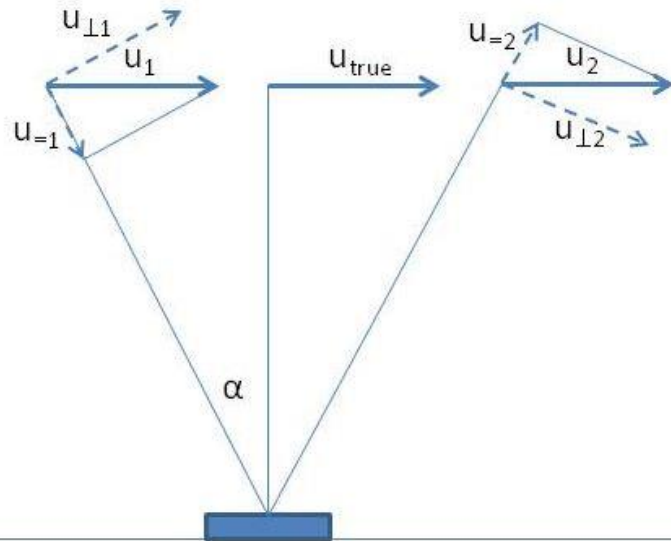


image:
Halo Photonics

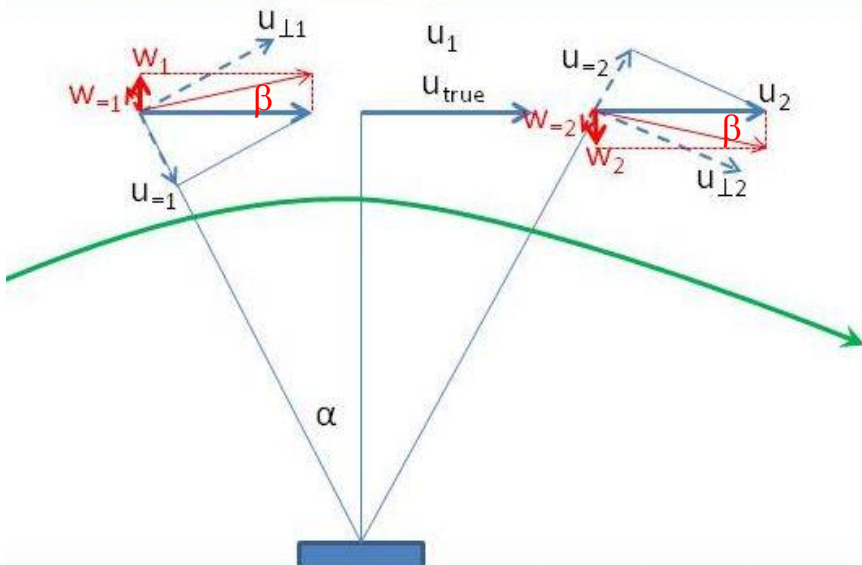
Doppler-beam- swinging (DBS)



Fernmesstechnik für den drei-dimensionalen Windvektor



Flachland



$$u_{Lidar} = u_{true} \left(1 - \frac{\sin \beta}{\tan \alpha}\right)$$

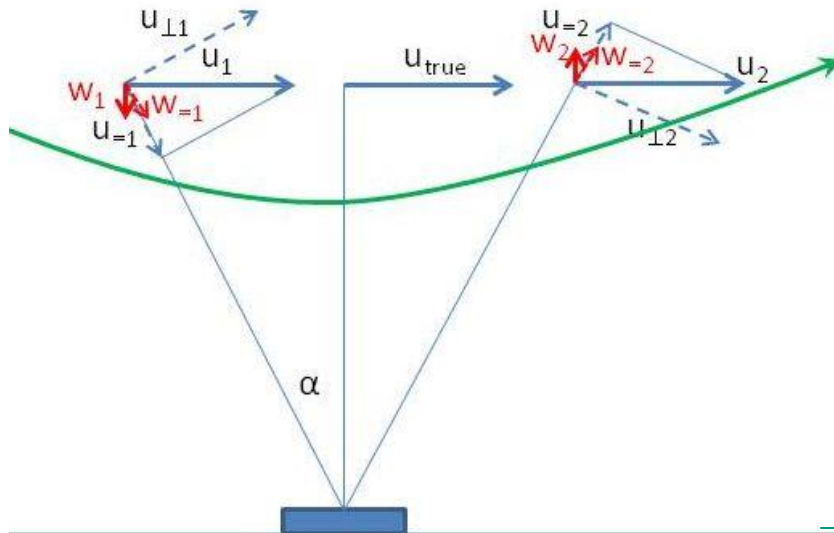
komplexes Gelände

Beispiel:

$$\alpha = 15^\circ$$

$$\beta = 0.5^\circ \rightarrow \sin \beta / \tan \alpha = 0.032$$

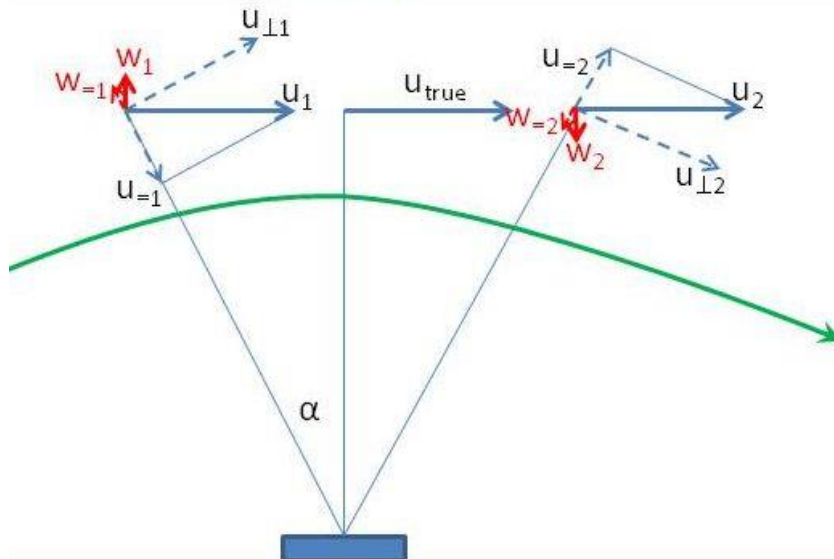
$$\beta = 5^\circ \rightarrow \sin \beta / \tan \alpha = 0.32$$



Tal:

w-Komponente kommt hinzu

→ SODAR/LIDAR misst zuviel Wind



Hügelkuppe / Pass:

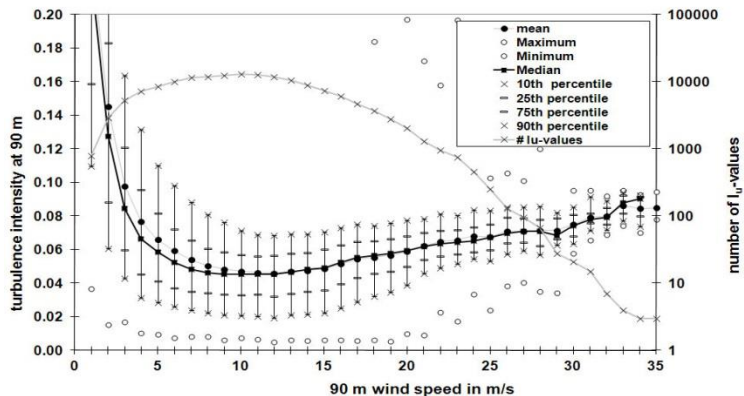
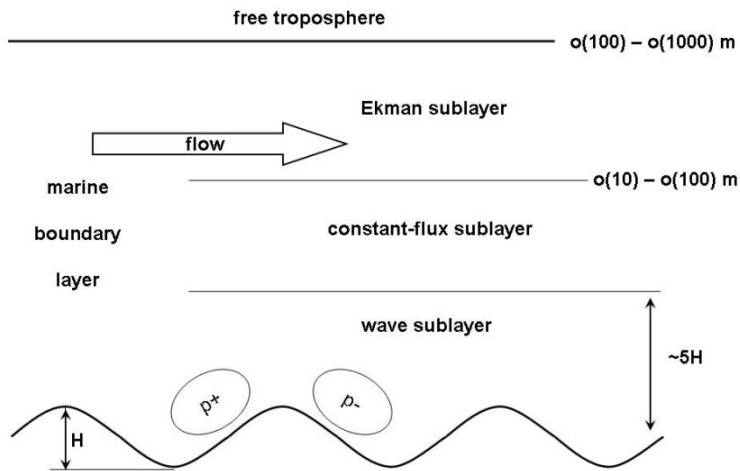
w-Komponente reduziert u-Komponente

→ SODAR/LIDAR misst zu wenig Wind

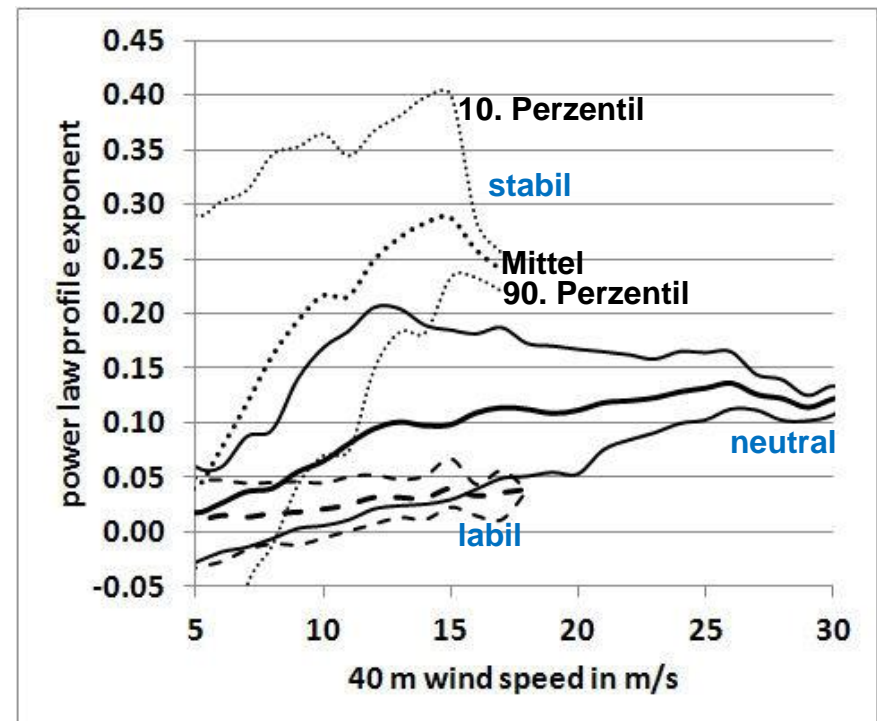
3

marine Grenzschicht (offshore)

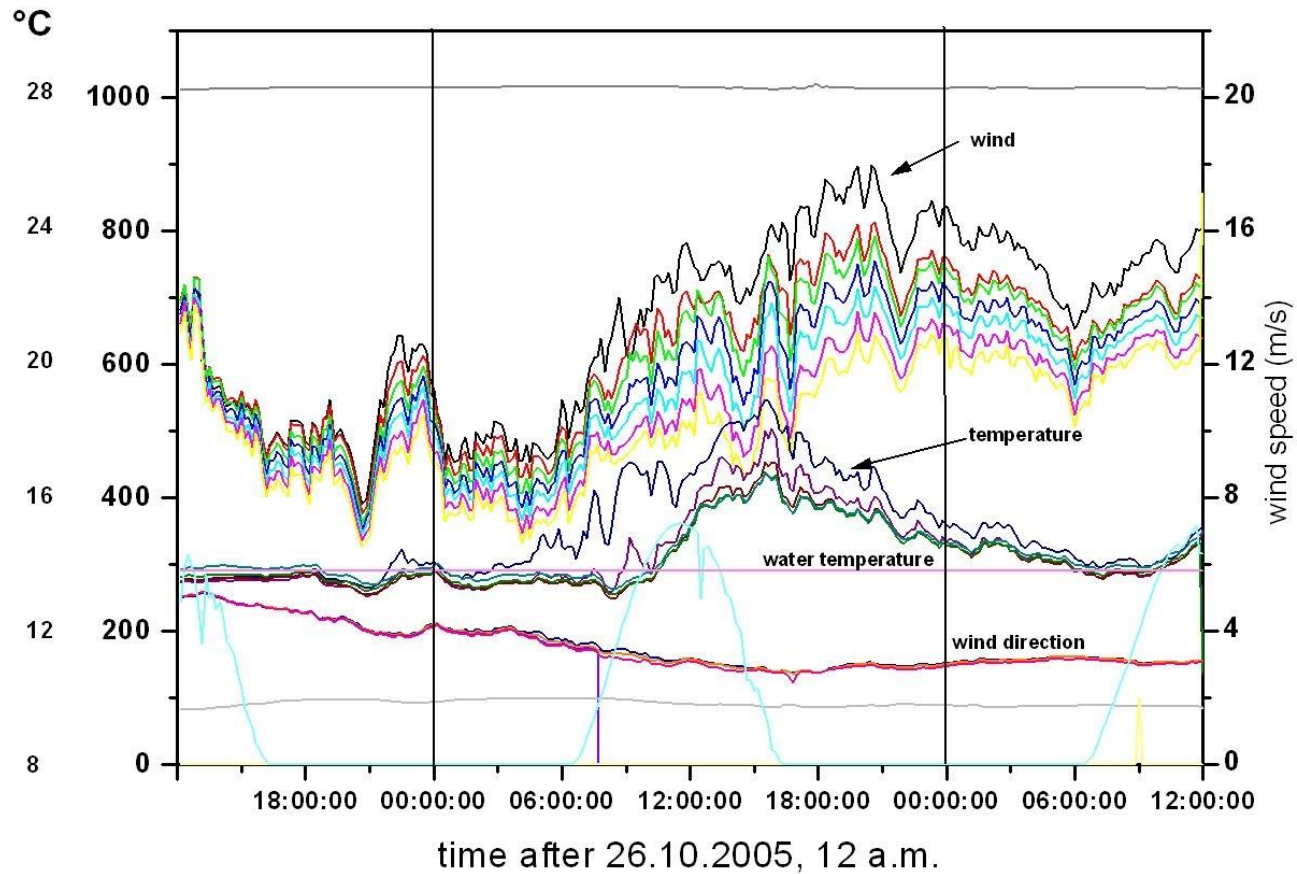
Offshore: Vertikalaufbau der Grenzschicht, Abhängigkeit der Turbulenzintensität von der Windgeschwindigkeit



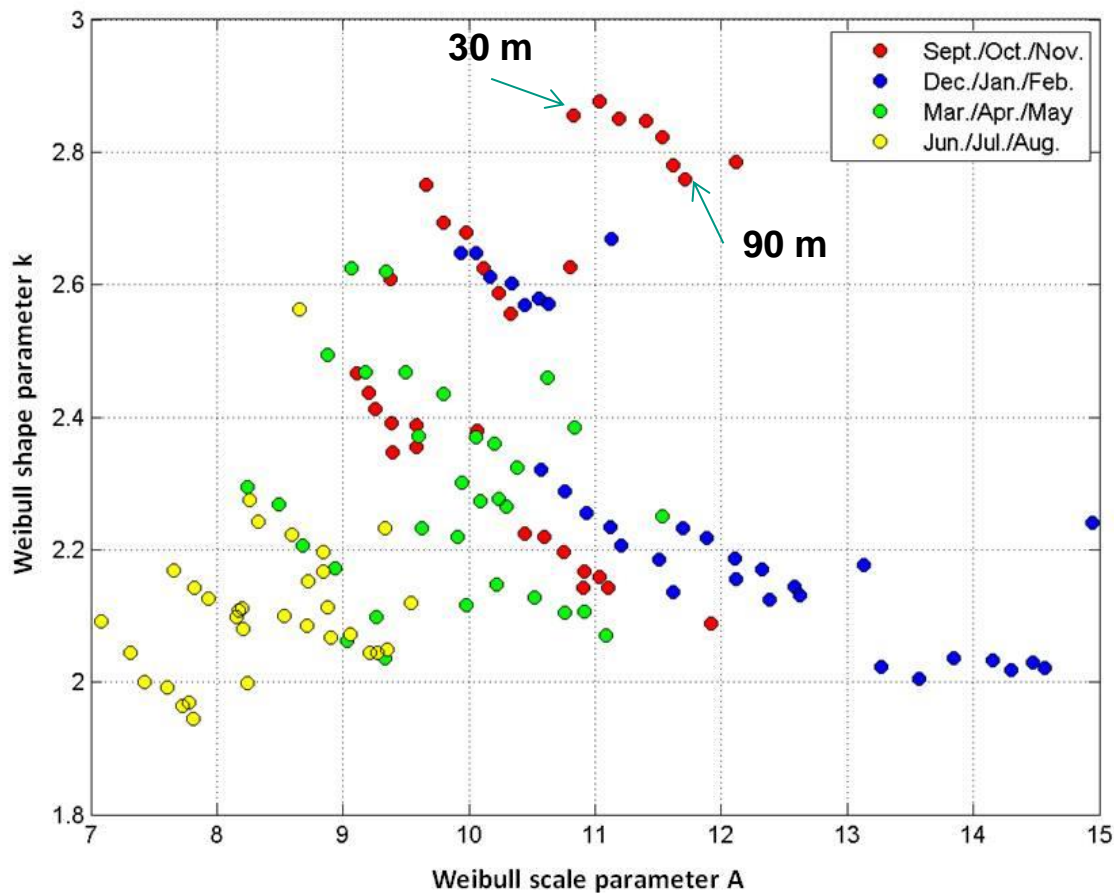
Abhängigkeit des Hellmann-Exponenten von Windgeschwindigkeit und Schichtung



Offshore: Abhängigkeit des Windprofils vom Verhältnis Wasser- zu Lufttemperatur



Offshore: Weibull-Parameter an FINO1



Beschreibung der Turbulenzintensität in Normen

Normal turbulence model (NTM)

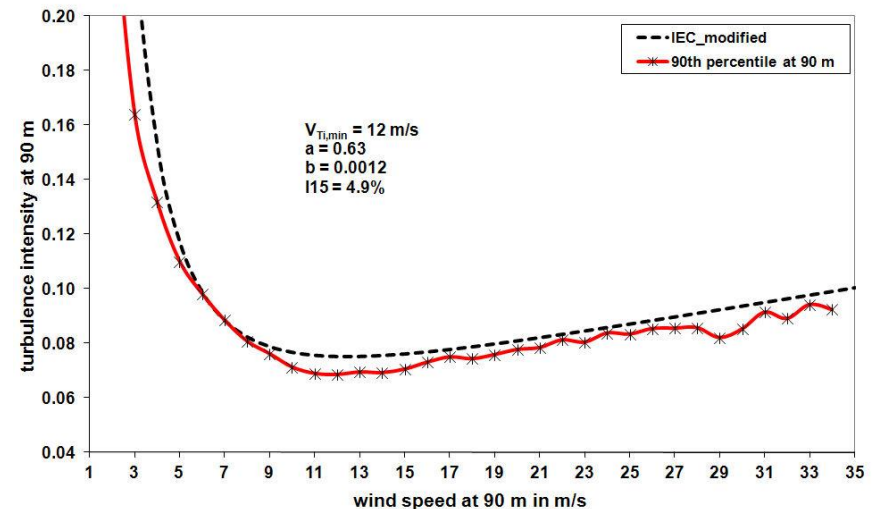
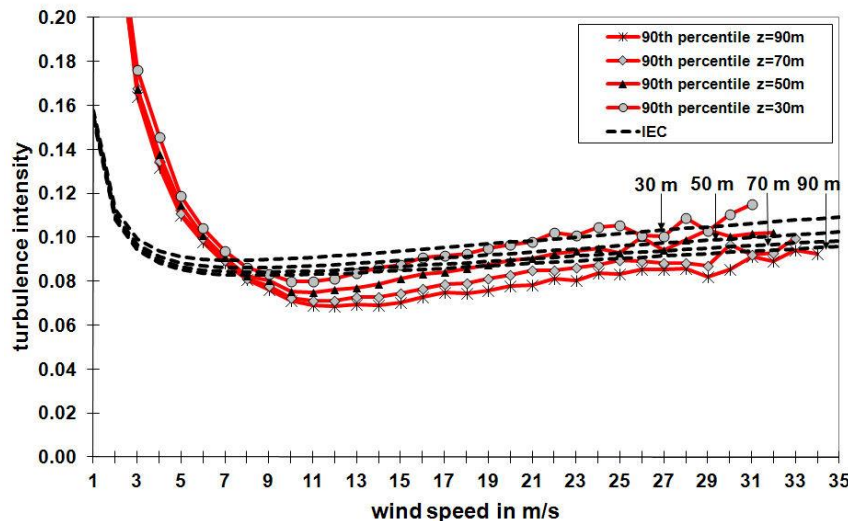
Die IEC 61400-3 (Gl. 27) fordert (T_i erhält man durch Division mit V_{hub}):

$$\sigma_{u,s} = \frac{V_{hub}}{\ln(z_{hub}/z_0)} + 1,28(1,44m/s)I_{15}$$

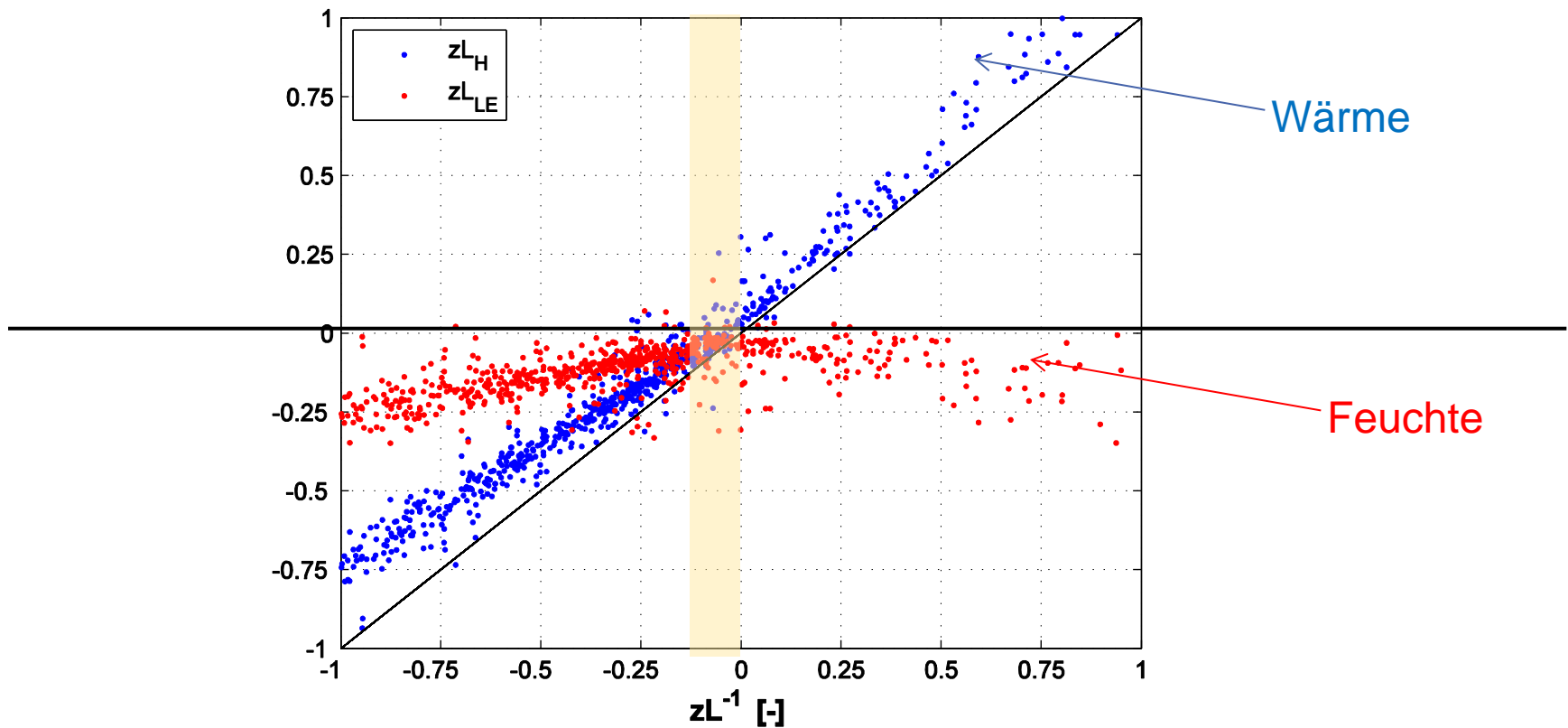
Alternativvorschlag:

$$\sigma_{u,s} = a \frac{V_{hub}}{\ln(z_{hub}/z_0)} + \frac{2V_{T_i,min}}{V_{hub}} (1,44m/s)I_{15} + bV_{hub}$$

mit $a = 0,63$, $b = 0,0012$, $I_{15} = 4,9\%$ und $V_{T_i,min} = 12$ m/s für $z_{hub} = 90$ m



offshore: Labilisierung auch durch Abnahme der absoluten Feuchte in der Vertikalen (FINO1 41,5 m-Daten für turb. Wärme- und Feuchteflüsse)

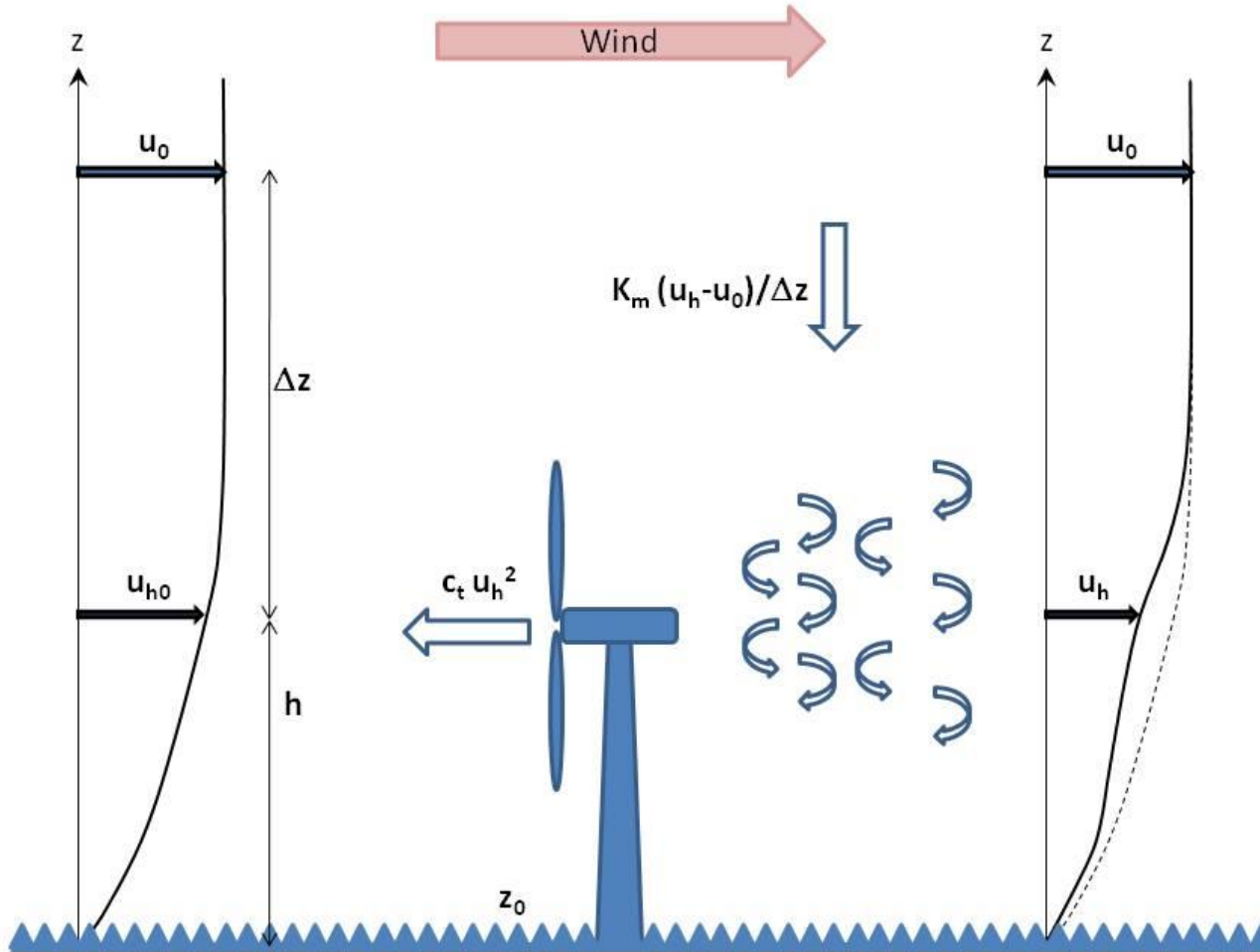


4

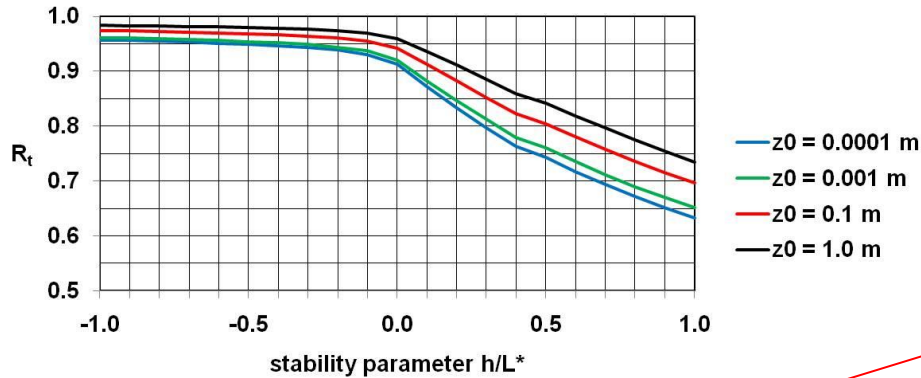
Windparkmodelle und Beobachtungen

Kapitel 6 in Emeis, S., 2012: Wind Energy Meteorology - Atmospheric Physics for Wind Power Generation. Series: Green Energy and Technology. Springer, Heidelberg etc., XIV+196 pp., 94 illus., 16 in colour, H/C, ISBN 978-3-642-30522-1

Emeis, S., 2010: A simple analytical wind park model considering atmospheric stability. Wind Energy, **13**, 459-469.

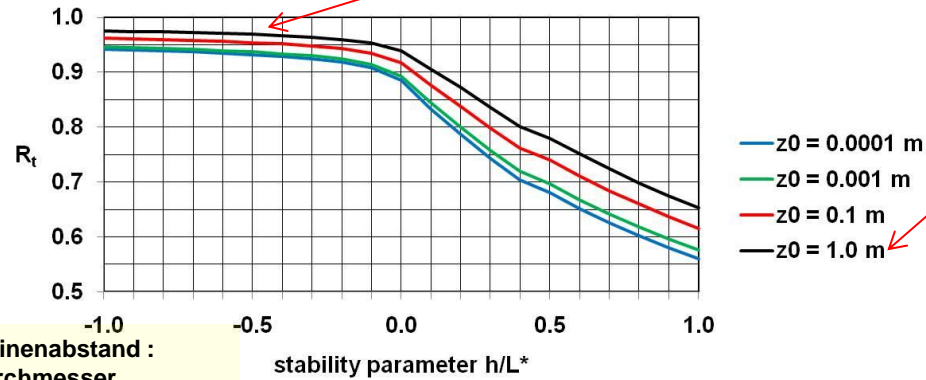


a) Reduktion der **Windgeschwindigkeit** im Parkinneren



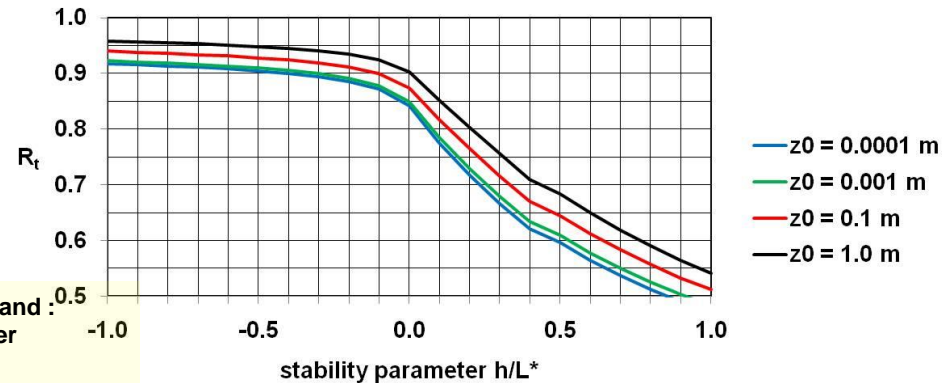
mittlerer Turbinenabstand:
10 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 10.1%



mittlerer Turbinenabstand :
8 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 12.6%

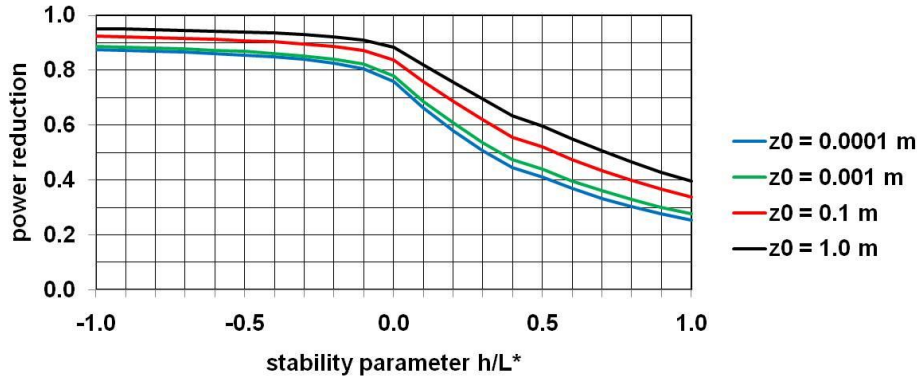


mittlerer Turbinenabstand :
6 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 16.8%

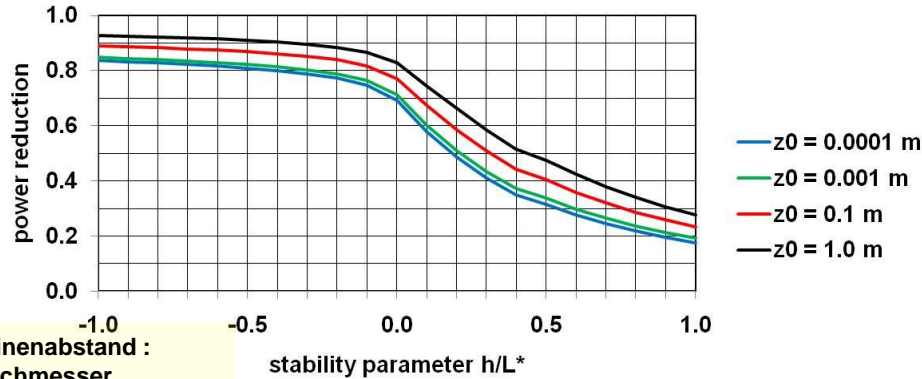
instabil hohe Turbulenzintensität
rau

Reduktion der **Windleistung** im Parkinneren



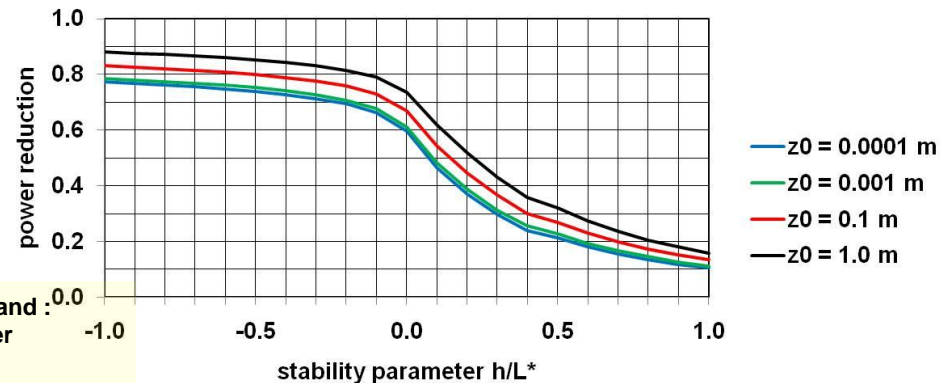
mittlerer Turbinenabstand:
10 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 10.1%



mittlerer Turbinenabstand :
8 Rotordurchmesser

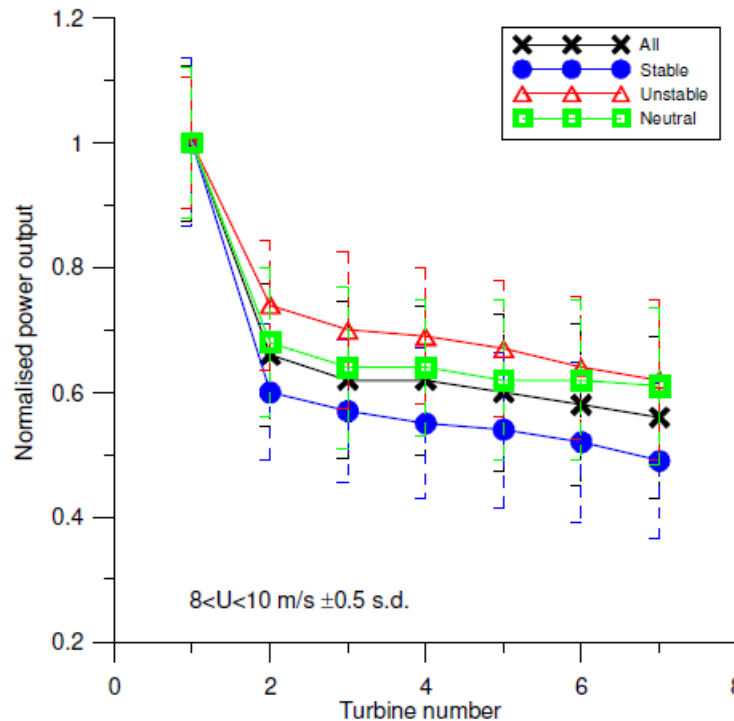
→ turbineninduzierte Turbulenz 12.6%



mittlerer Turbinenabstand :
6 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 16.8%

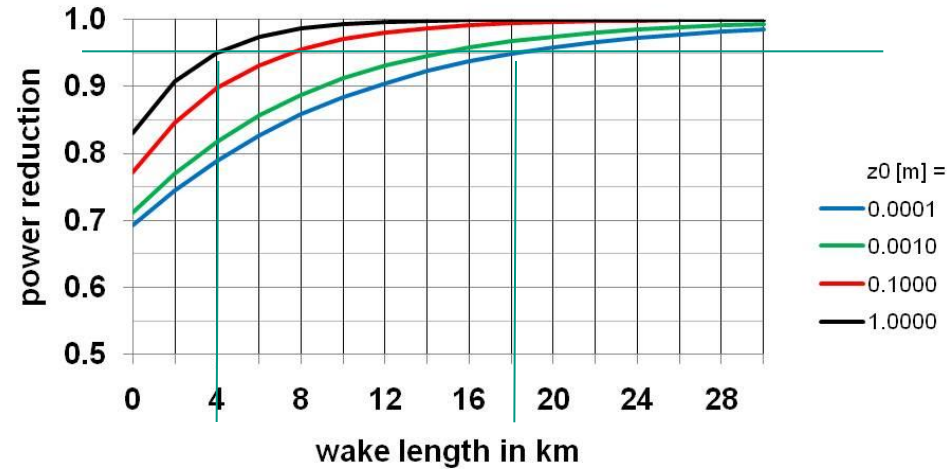
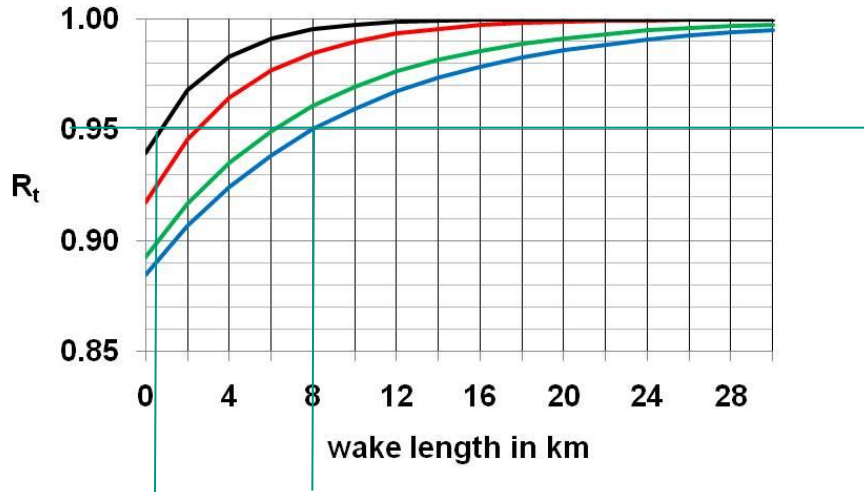
Reduktion der **Windleistung** im Parkinneren Messungen im Nysted Windpark (Ostsee)



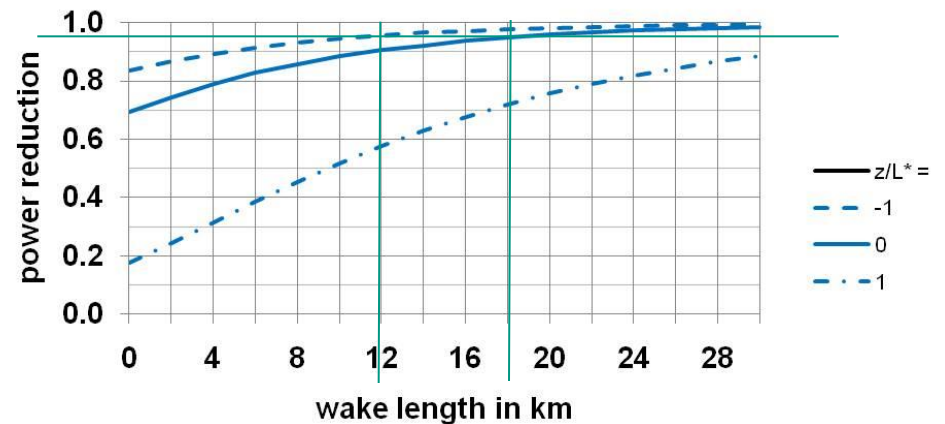
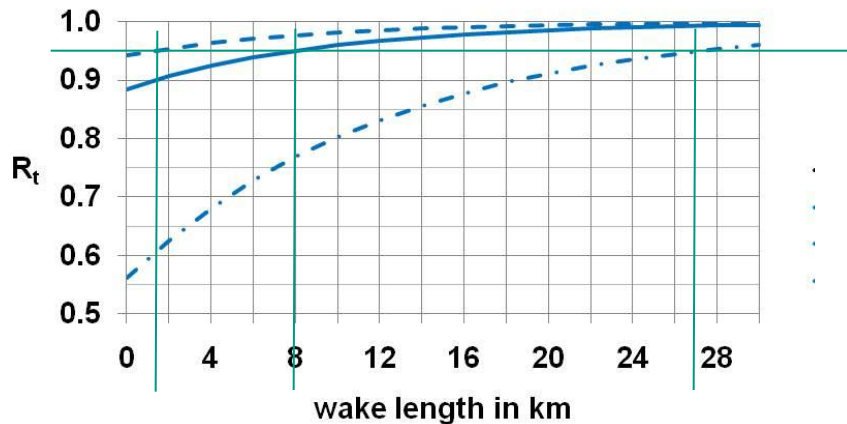
Barthelmie R, Frandsen ST, Rethore PE, Jensen L., 2007:
Analysis of atmospheric impacts on the development
of wind turbine wakes at the Nysted wind farm.
Proceedings of the European Offshore Wind Conference,
Berlin 4.-6.12.2007.

Erholung der **Windgeschw. (links)** und **-leistung (rechts)** hinter einem Windpark, mittlerer Turbinenabstand: 8 Rotordurchmesser

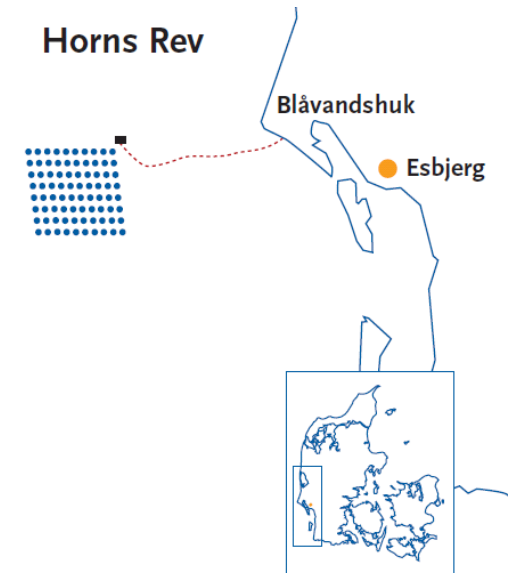
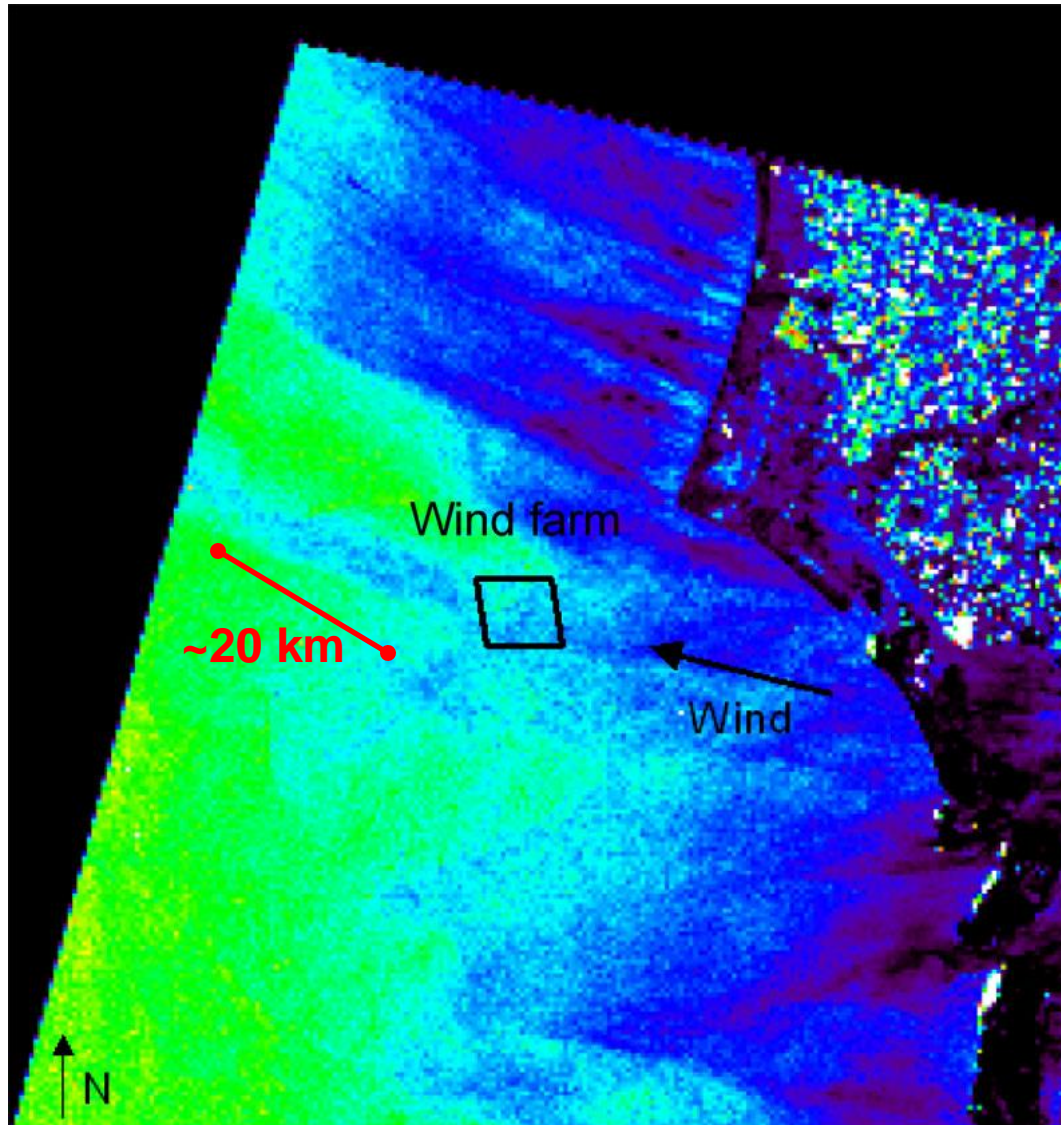
Rauigkeit: onshore ($z_0 = 1,0 \text{ m}$) – offshore ($z_0 = 0,0001 \text{ m}$)



Schichtung: labil ($h/L_* = -1$) – neutral – stabil ($h/L_* = 1$)



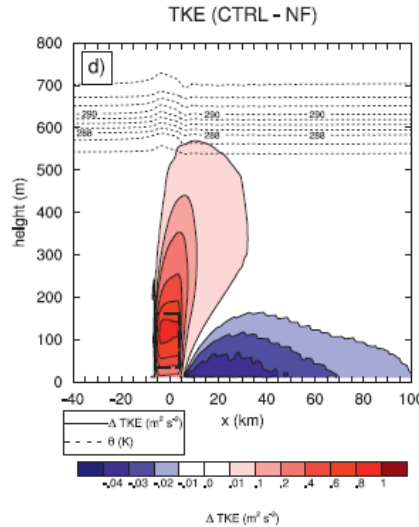
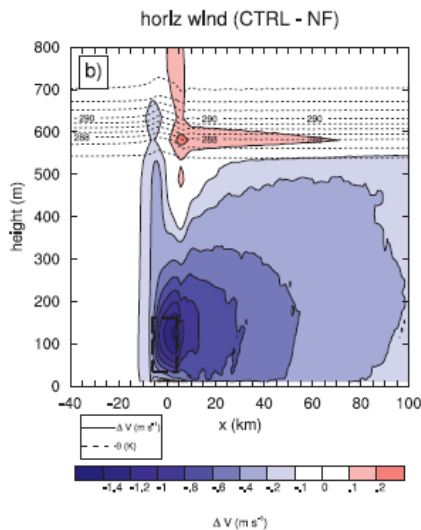
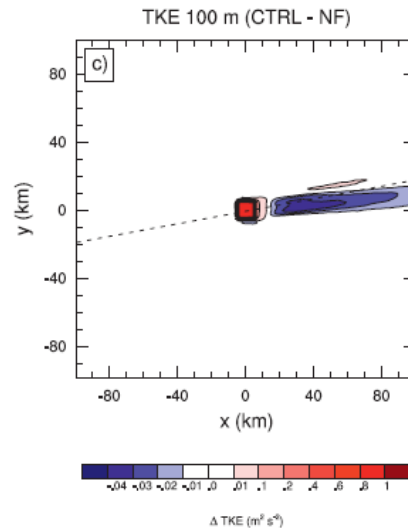
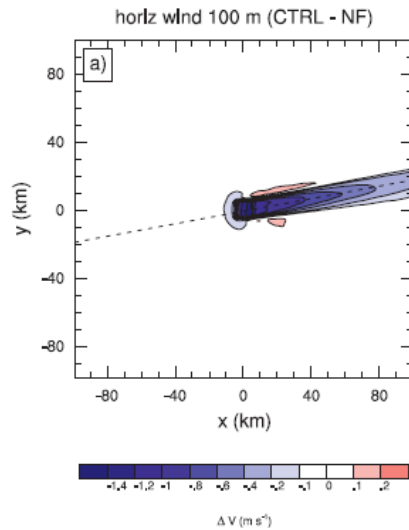
Erholung der Windgeschw. hinter einem Windpark Messungen (Envisat, SAR) am Park Horns Rev (4 km x 5 km)



http://www.hornsrev.dk/nyheder/brochurer/Horns_Rev_TY.pdf

25. 02. 2003

© ERS SAR/Risø
http://galathea3.emu.dk/satelliteeye/projekter/wind/back_uk.html



Erholung der Windgeschw. und der Turbulenz hinter einem Windpark

Modellierung mit WRF

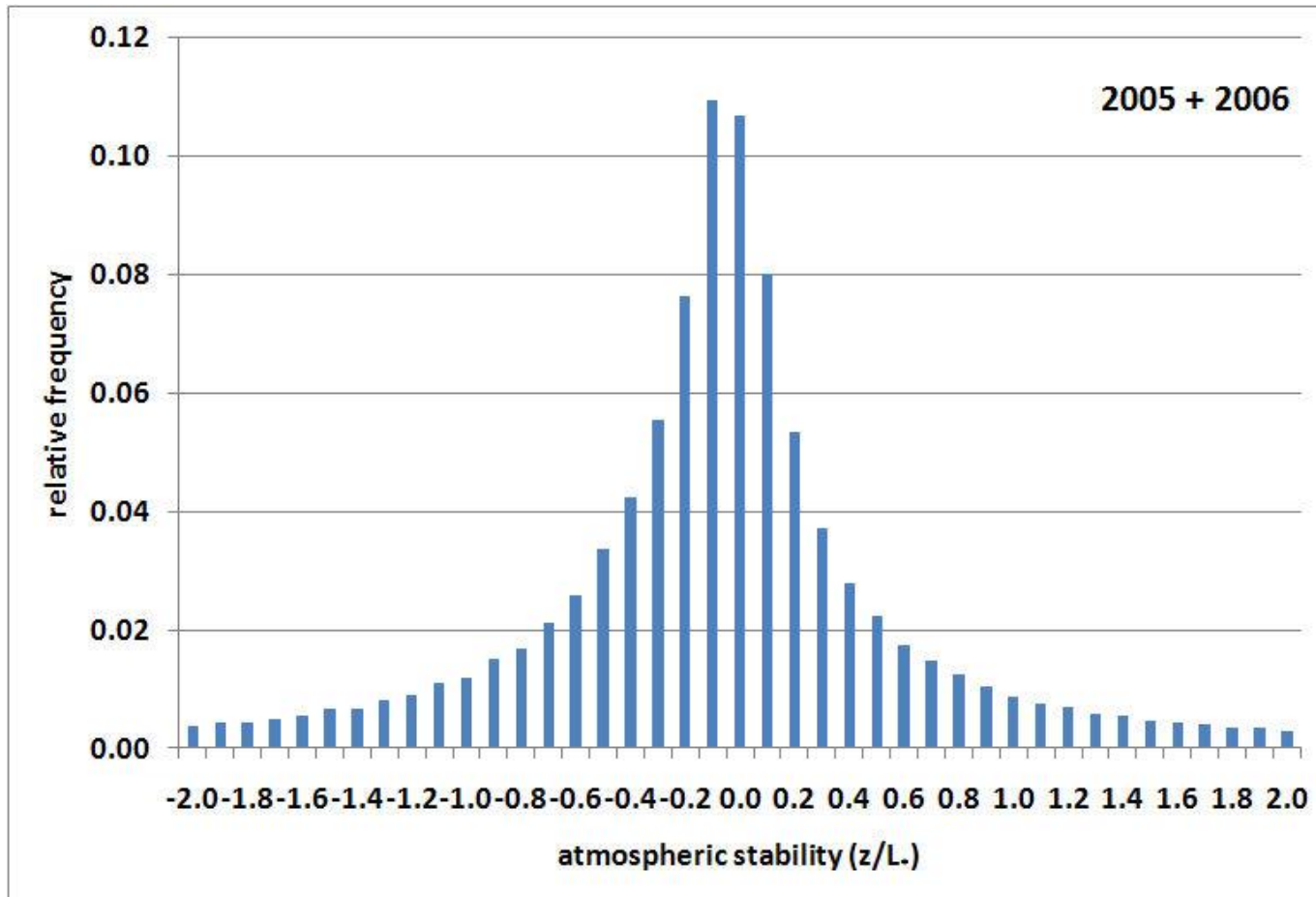
neutrale Bedingungen

Fitch, A.C., J.B. Olson, J.K. Lundquist, J. Dudhia, A.K. Gupta, J. Michalakes, I. Barstad, 2012: Local and Mesoscale Impacts of Wind Farms as Parameterized in a Mesoscale NWP Model.

Mon. Wea. Rev., 140, 3017–3038.

doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-11-00352.1>

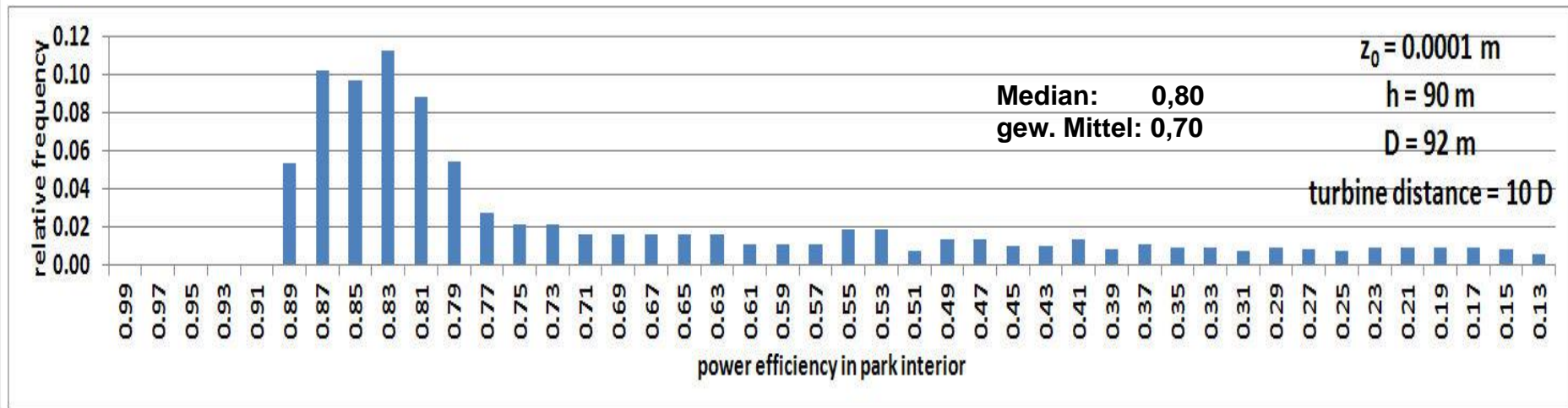
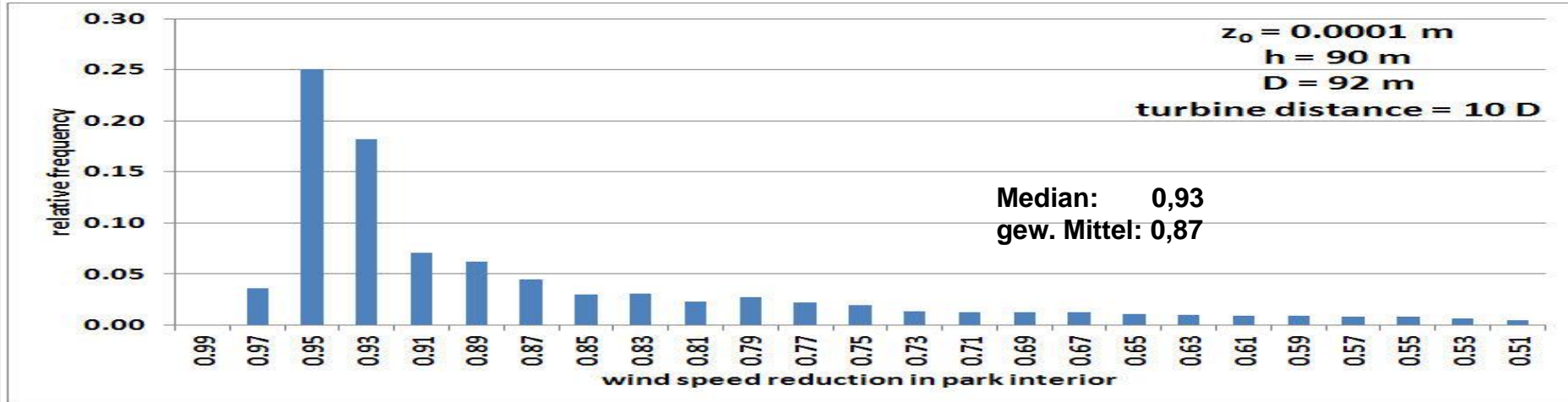
Welche Schichtungsstabilitäten treten offshore (FINO1, 80 m) wirklich auf?



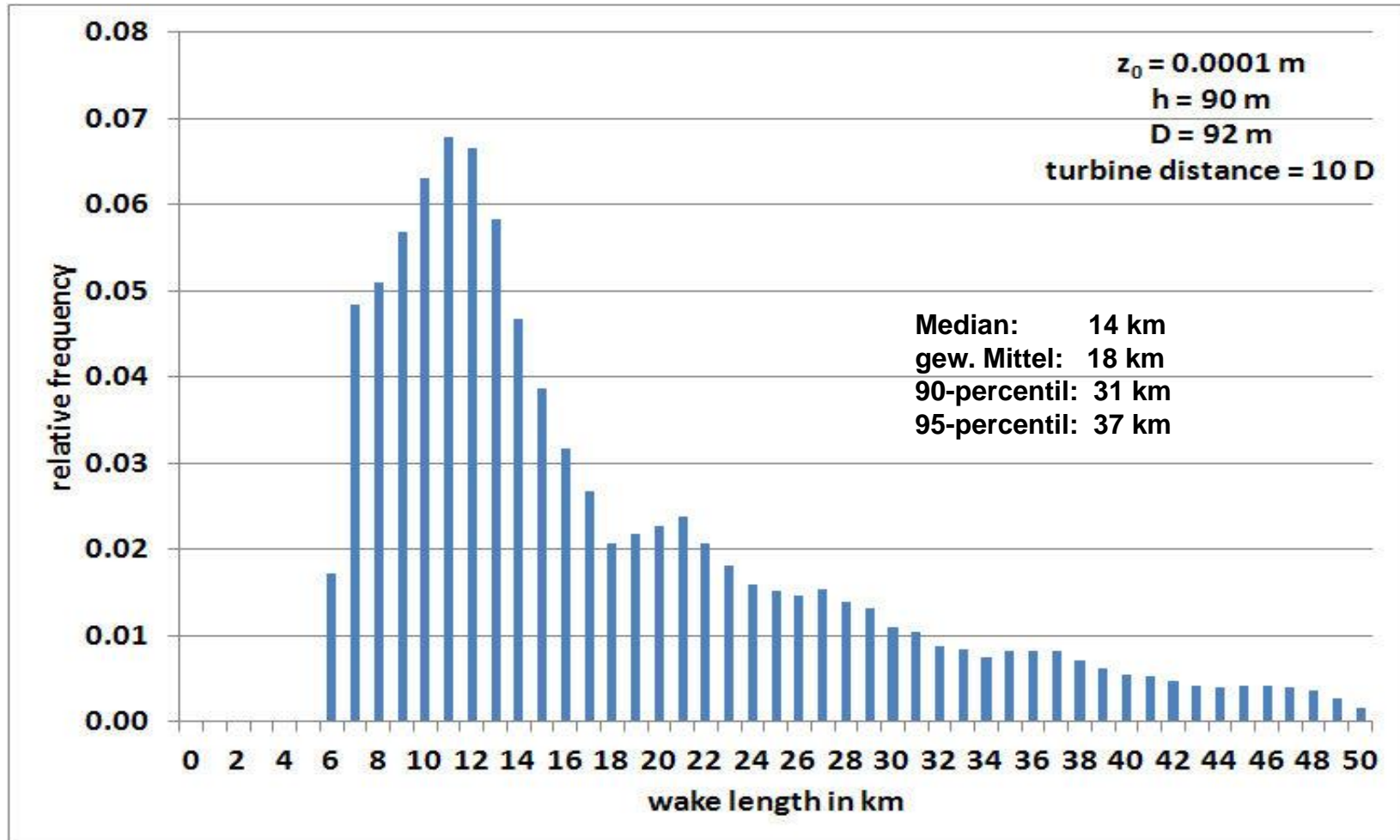
91,16%
aller
Werte

Median:
-0,07

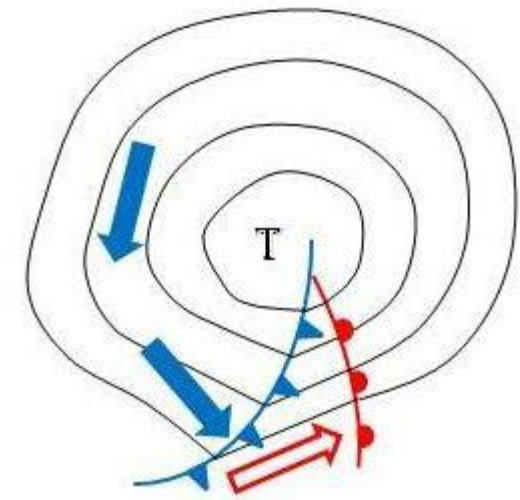
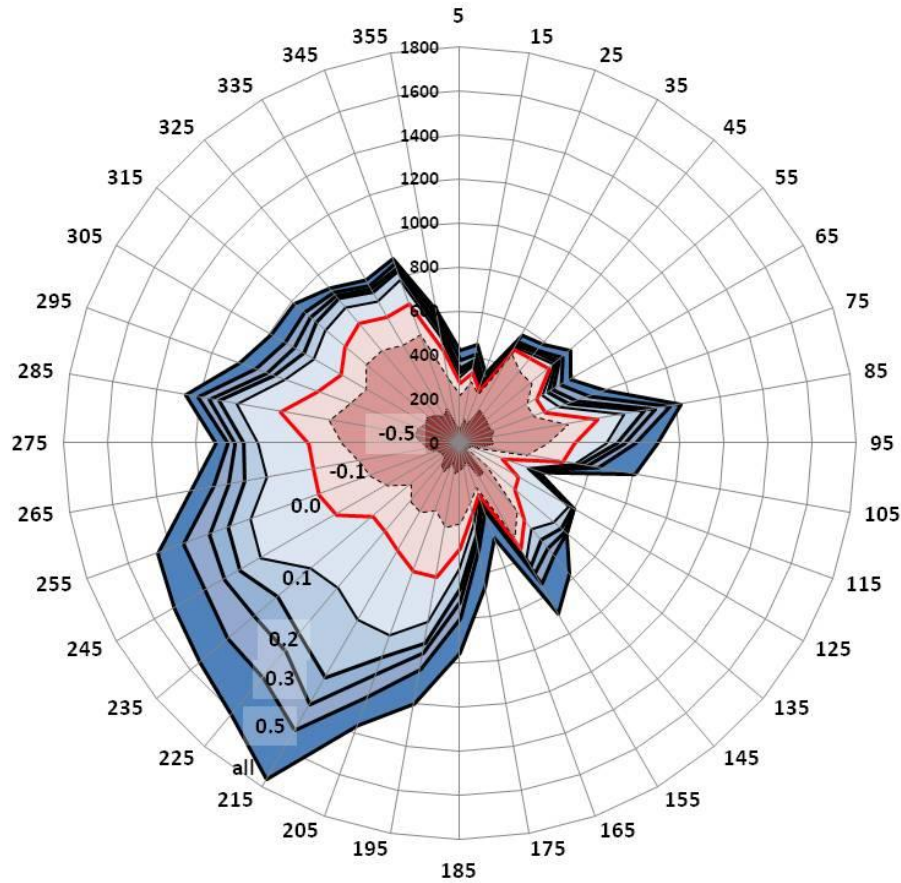
Häufigkeitsverteilung Reduktion im Windparkinneren



Häufigkeitsverteilung Nachlauflänge (<95% der Leistung)



und darüber hinaus:
in den mittleren Breiten sind Windrichtung und Schichtung korreliert



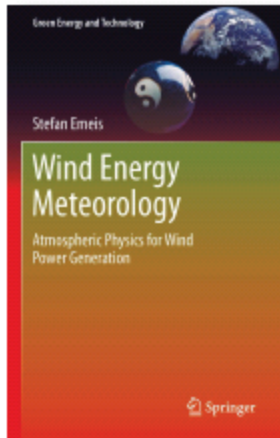
Windrose: FINO1, 2005, WR 80 m, Schichtung: 60 m

Schlussfolgerungen zu Windparks:

- **hohe Turbulenzintensität ist**
- **nachteilig für Lasten auf einzelne Windturbinen**
- **vorteilhaft bei größeren hintereinanderliegenden Windfarmen**
- **Korrelation Windrichtung-Schichtung sollte Parkplanung beeinflussen**

Generelle Schlussfolgerungen

- vertikale Profilgesetze müssen erweitert werden
- Schichtung und low-level jets sorgen für nächtliche Ertragsmaxima
- Vertikalprofile über Hügeln und Bergen anders als im Flachland
- Fernmesstechnik hat Probleme in komplexem Gelände
- thermische Stabilität über See charakteristisch anders
- offshore-Rauigkeit windgeschwindigkeitsabhängig
- geringe offshore-Turbulenzintensität erfordert größere Abstände zwischen Turbinen und ganzen Windparks



2013, 2013, XIV, 196 p. 94 illus., 16 in color.

Printed book

Hardcover

- ▶ **99,95 € | £90.00 | \$129.00**
- ▶ ***106,95 € (D) | 109,95 € (A) | CHF 133.50**

S. Emeis, Karlsruher Institut für Technologie, Garmisch-Partenkirchen, Germany
Wind Energy Meteorology

Atmospheric Physics for Wind Power Generation

- ▶ **First book devoted solely to the meteorological basics of wind power generation**
- ▶ **Presents the meteorological basics for large wind turbines and wind parks**
- ▶ **Gives guidance to plan offshore wind parks**

This book is intended to give an introduction into the meteorological boundary conditions for power generation from the wind, onshore and offshore. It is to provide reliable meteorological information for the planning and running of this important kind of renewable energy. This includes the derivation of wind laws and wind profile descriptions, especially those above the logarithmic surface layer. Winds over complex terrain and nocturnal low-level jets are considered as well. A special chapter is devoted to the efficiency of large wind parks and their wakes.



**Vielen Dank für
Ihre
Aufmerksamkeit**

Text