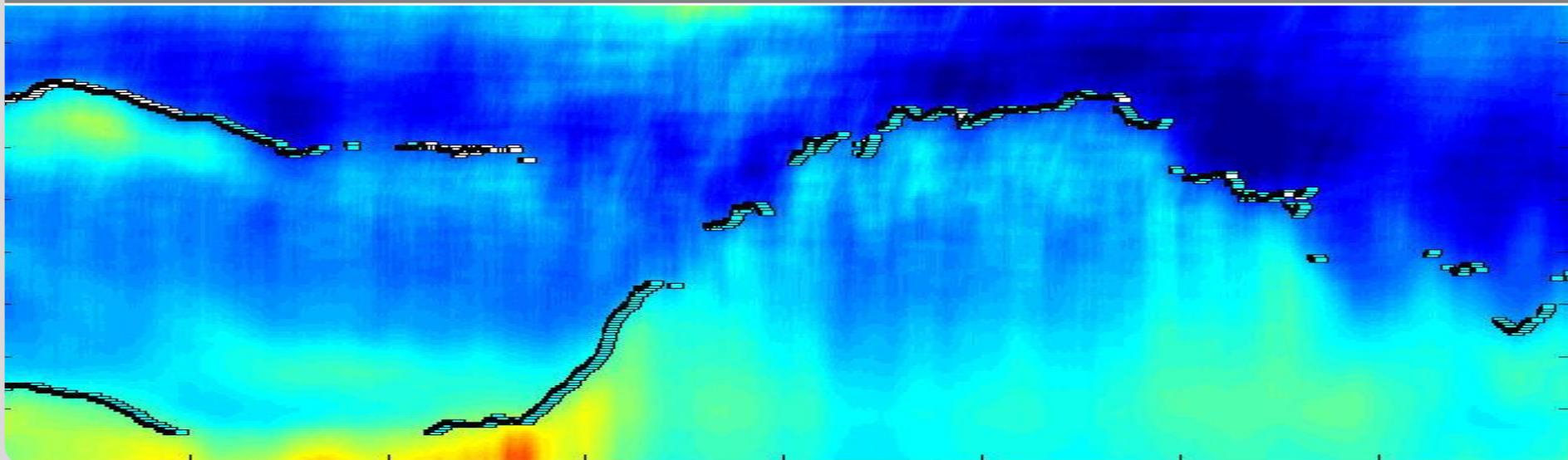


Atmosphärische Turbulenz und die Nachläufe großer offshore-Windparks

Stefan Emeis
stefan.emeis@kit.edu

INSTITUTE OF METEOROLOGY AND CLIMATE RESEARCH, Atmospheric Environmental Research





grundsätzliche Überlegungen zur atmosphärischen Turbulenz

Turbulenzzeugung

Turbulenzzeugung in der Atmosphäre durch zwei Mechanismen:

- (a) mechanische Erzeugung
 - Reibung
 - Scherung

- (b) thermische Erzeugung
 - Labilisierung

Turbulenzzeugung

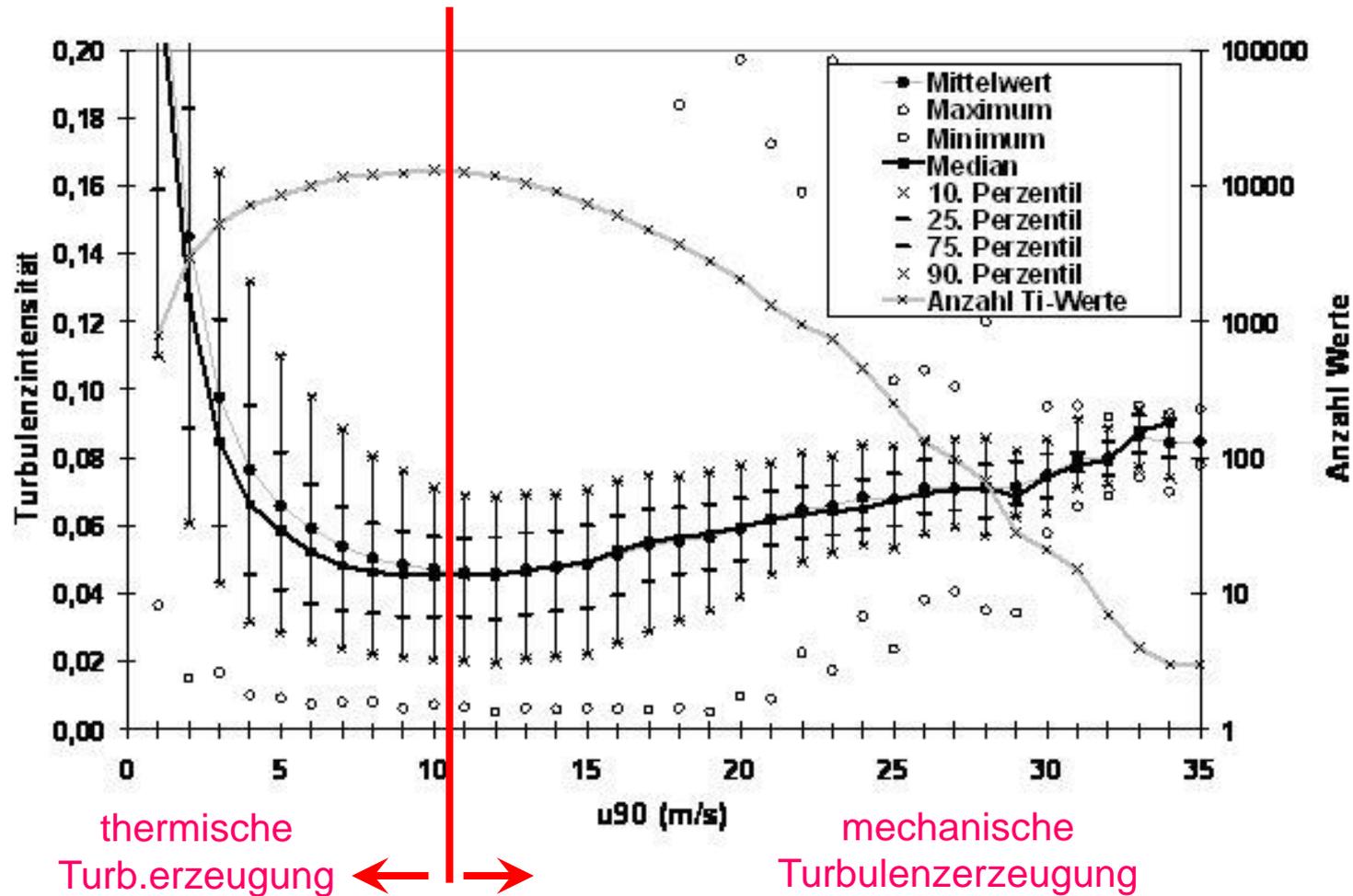
über Land:

Turbulenzintensität nimmt mit wachsender Windgeschwindigkeit ab und konvergiert gegen einen konstanten Wert

Labilisierung der Grenzschicht im Wesentlichen durch das vertikale Temperaturprofil bestimmt

über See ist das anders!

Turbulenzintensität an FINO1 als Funktion der Windgeschwindigkeit



Doktorarbeit Matthias Türk 2008: Ermittlung designrelevanter Belastungsparameter für Offshore-Windkraftanlagen
<http://kups.uni-koeln.de/2799/>

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:

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

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

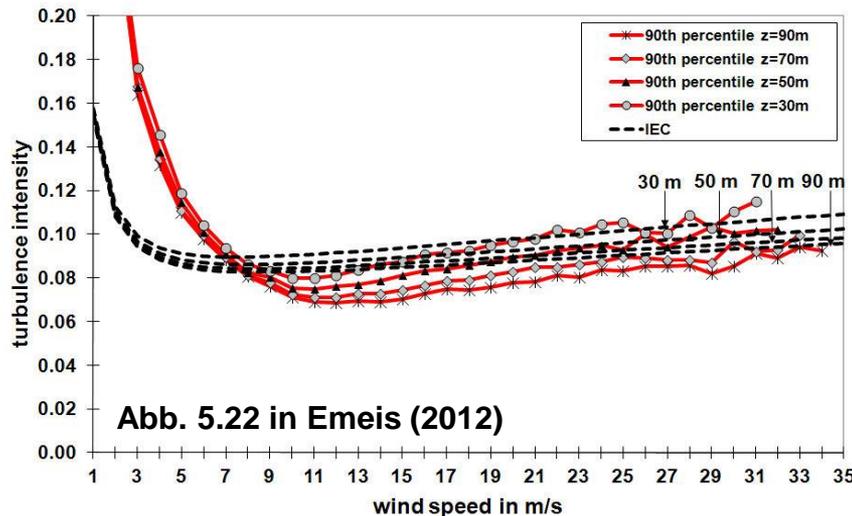


Abb. 5.22 in Emeis (2012)

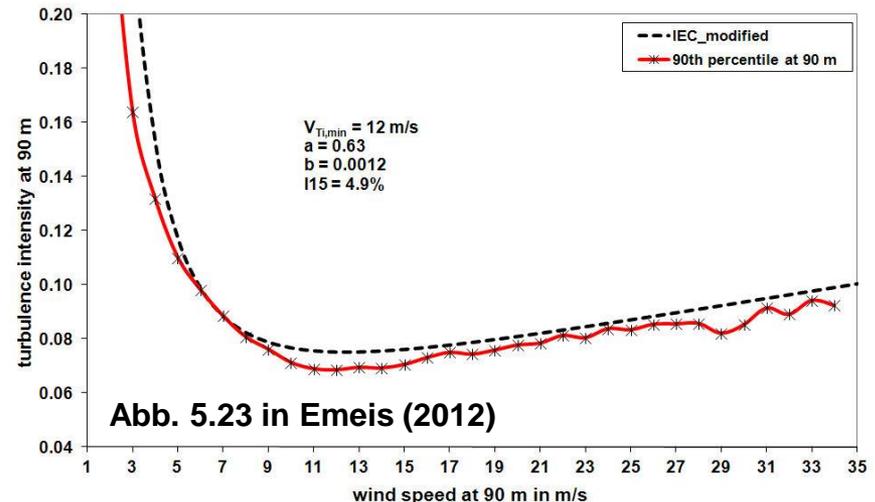
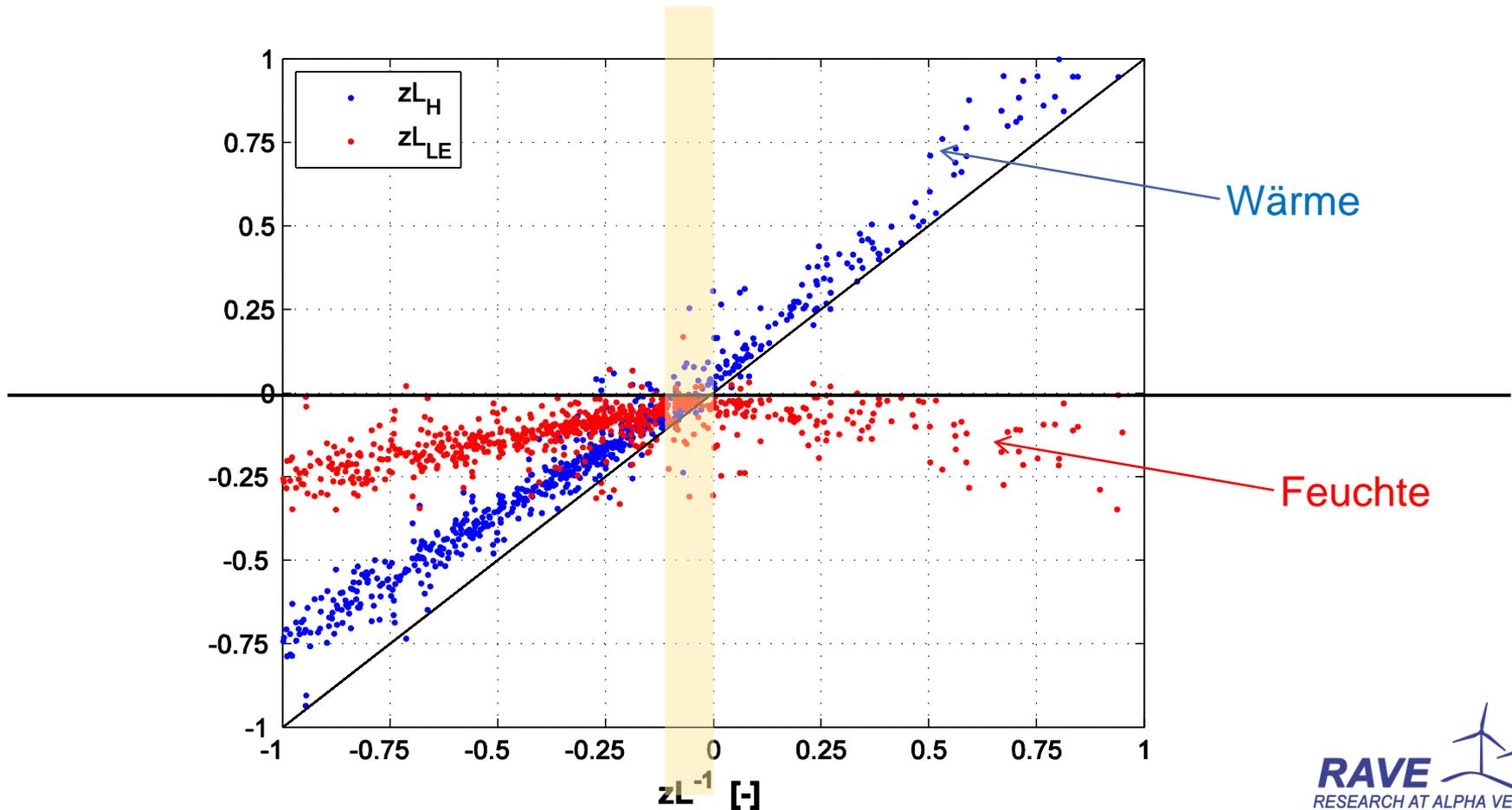


Abb. 5.23 in Emeis (2012)

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



2

Turbulenzparametrisierung in numerischen Modellen

Turbulenzparameterization in mesoskaligen Windfeldmodellen wie MM5 oder WRF:

	A1	A2	B1	B2	C1
MY 1982	0.92	0.74	16.6	10.1	0.08
MYJ 2002	0.660	0.657	11.878	7.227	0.00083
new	0.91	0.54	28.76	13.08	0.15

plus eine Anpassung der turbulenten Längenskala (Nakanishi 2001)

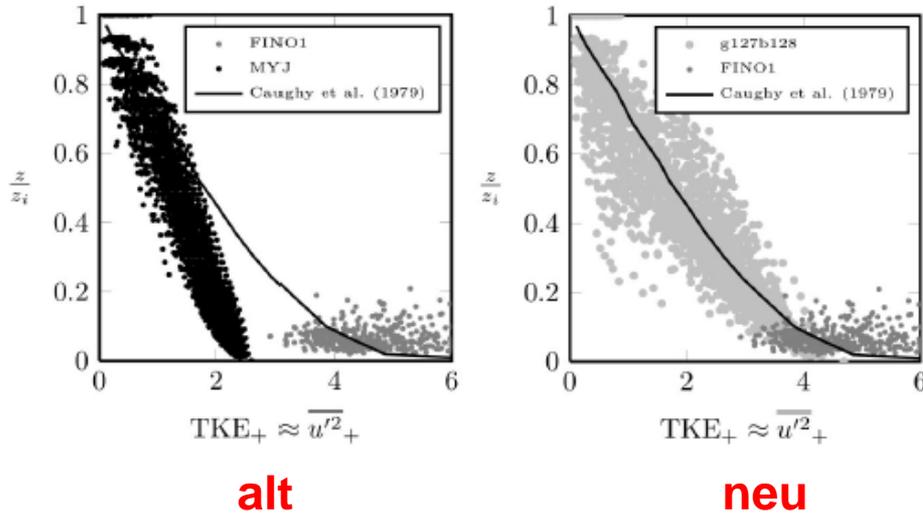
neue Werte basieren auf modernen Labor Daten

- bei **sehr hohen Reynoldszahlen**
- gemessen mit **sehr kleinen Sensoren** nahe der Wand



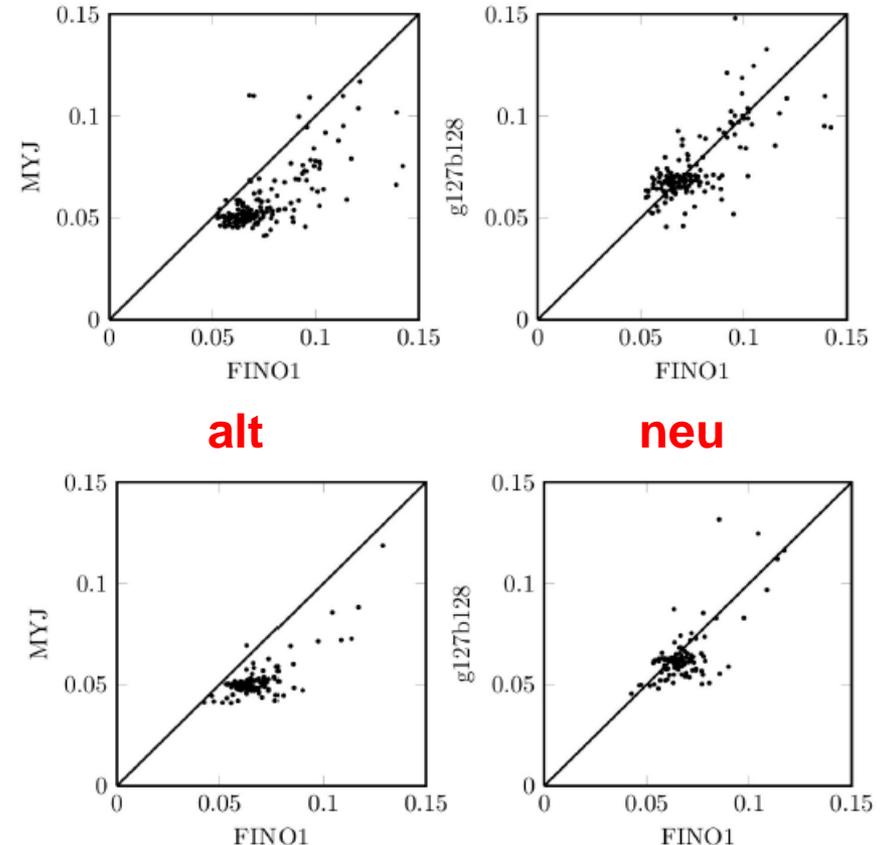
Foreman, R., S. Emeis, 2012: Method for increasing Turbulent Kinetic Energy in the Mellor-Yamada-Janjić boundary layer parametrization. Bound.-Lay. Meteorol., 145, 329-349.

Vergleich von Modellergebnissen mit offshore (FINO1) und onshore (Caughey et al. 1979) Daten



vertikale Profile von normierter turb. kin. Energie
Januar 2005

Turbulenzintensität in 80 m Höhe Februar 2005



Turbulenzintensität in 80 m Höhe
November 2005

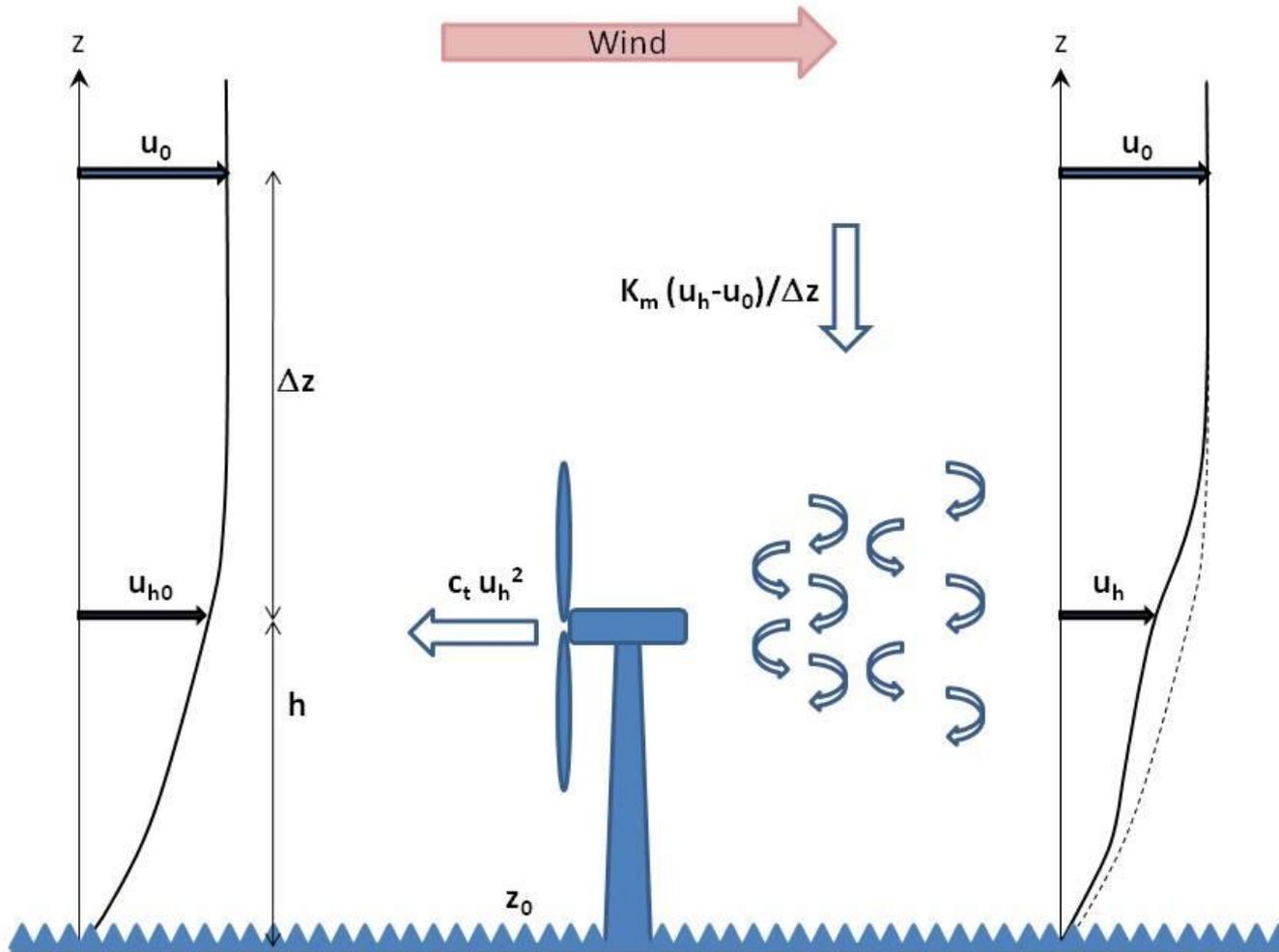
Auswertung: Richard Foreman im Rahmen des RAVE-Projekts VERITAS

3

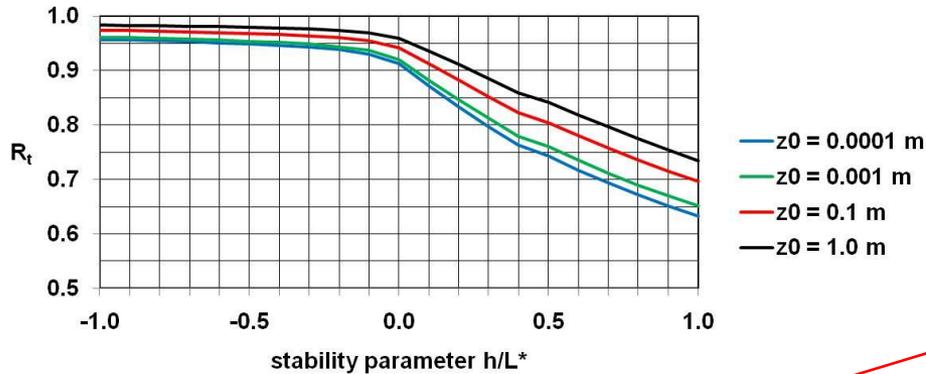
Windparkmodelle und Beobachtungen

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.

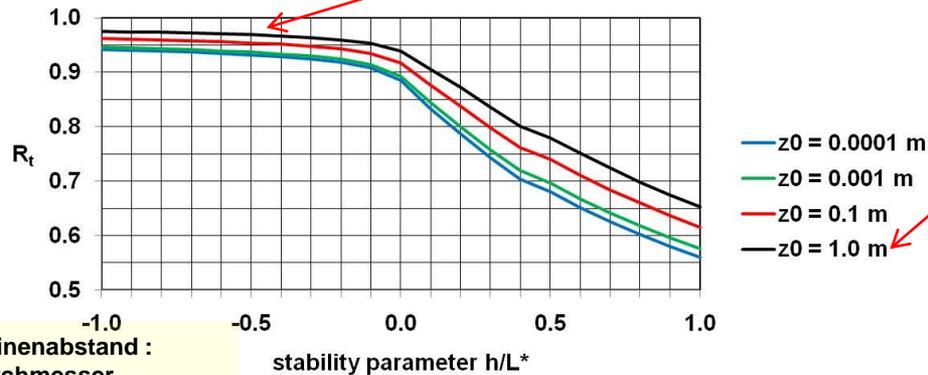


a) Reduktion der **Windgeschwindigkeit** im Parkinneren



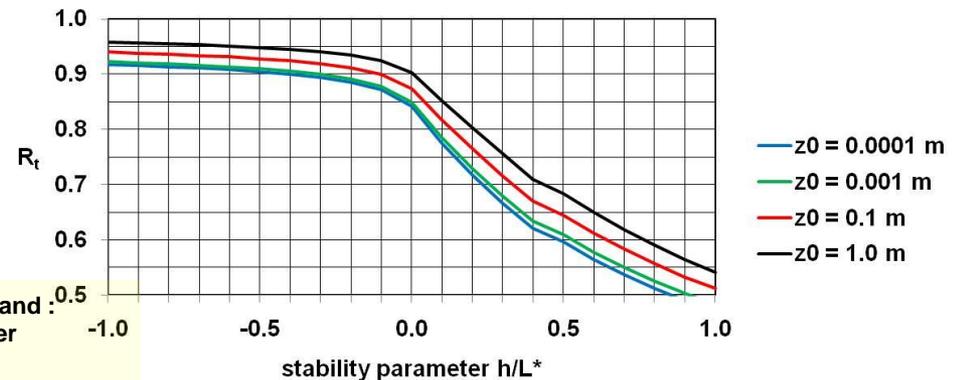
mittlerer Turbinenabstand:
10 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 10.1%



mittlerer Turbinenabstand :
8 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 12.6%



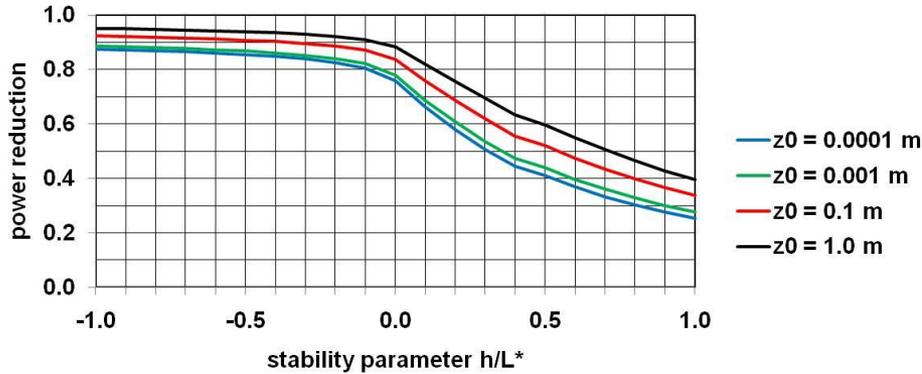
mittlerer Turbinenabstand :
6 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 16.8%

instabil → hohe Turbulenzintensität

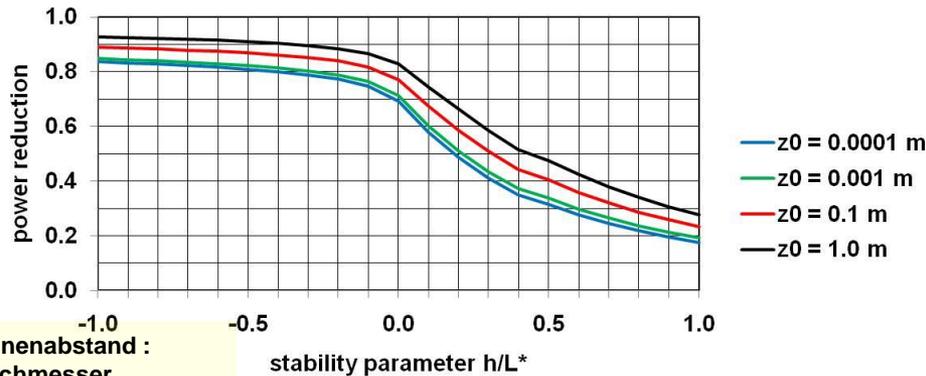
rau →

Reduktion der **Windleistung** im Parkinneren



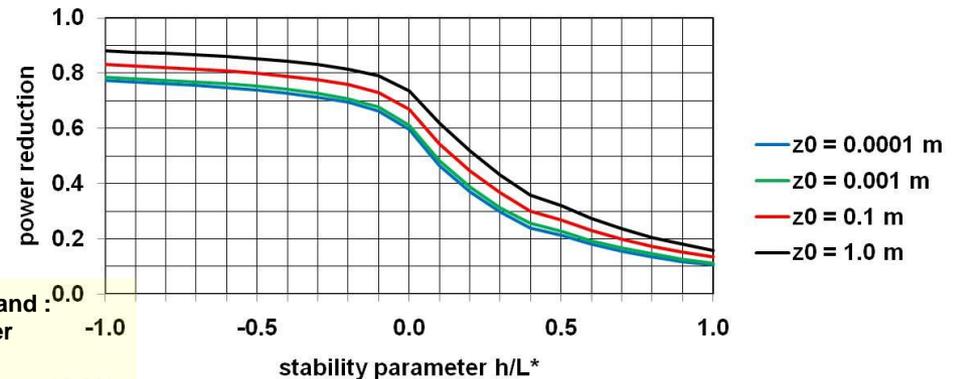
mittlerer Turbinenabstand:
10 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 10.1%



mittlerer Turbinenabstand :
8 Rotordurchmesser

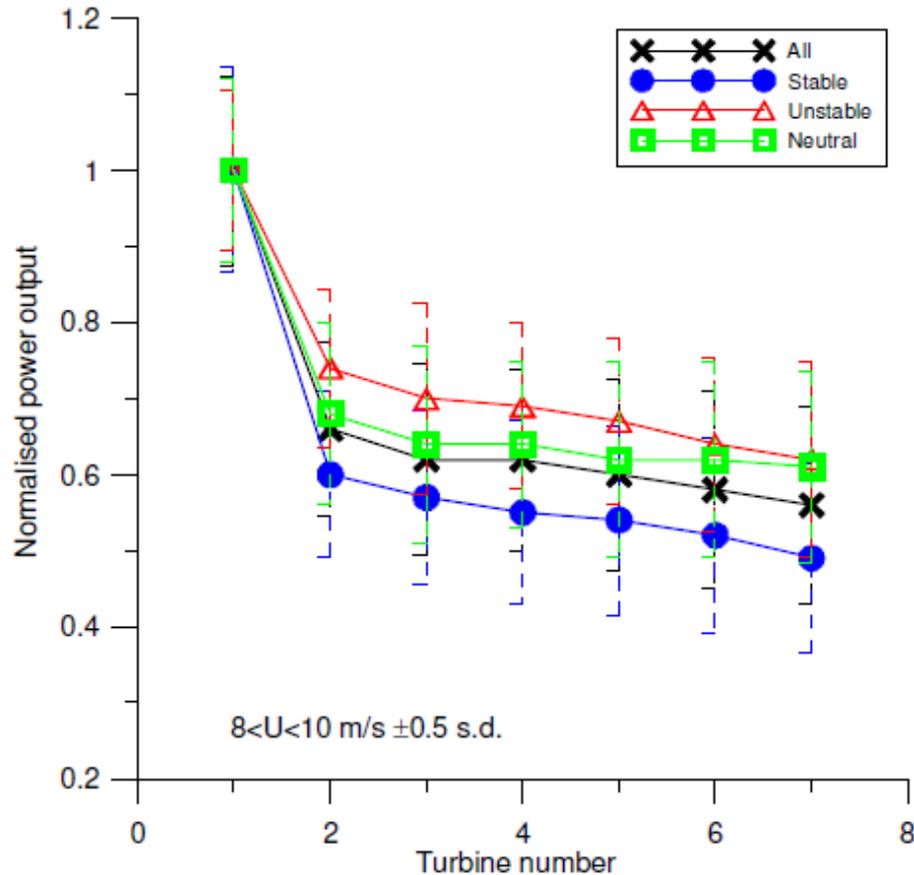
→ turbineninduzierte Turbulenz 12.6%



mittlerer Turbinenabstand :
6 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 16.8%

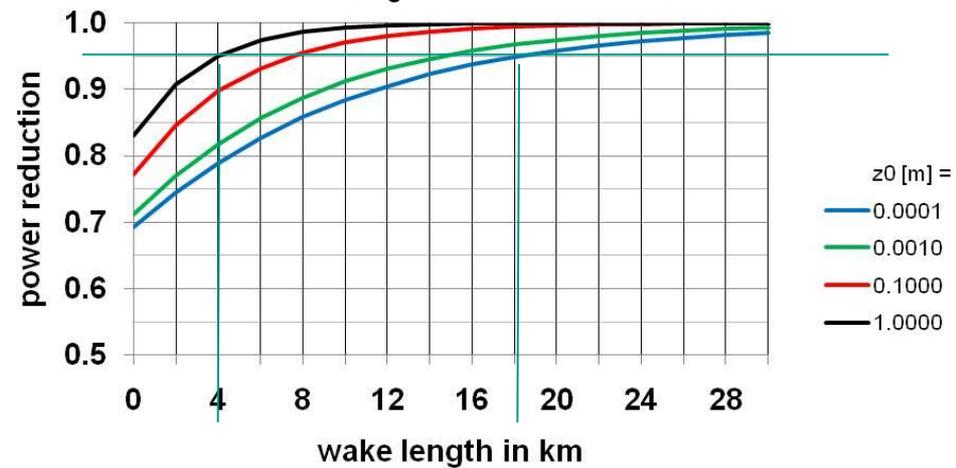
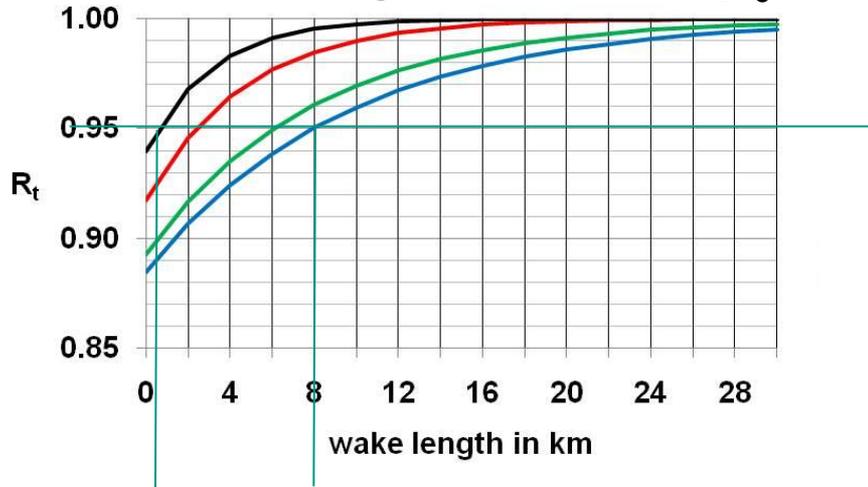
Reduktion der **Windleistung** im Parkinneren Messungen im Nysted Windpark (Ostsee)



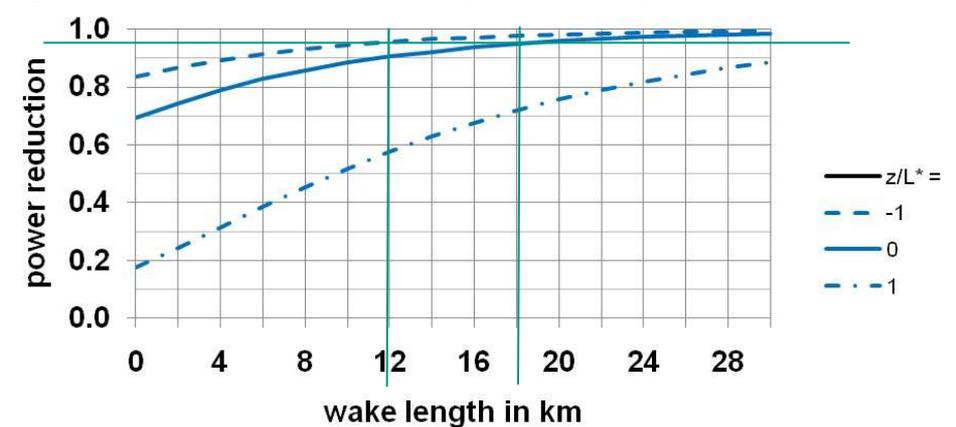
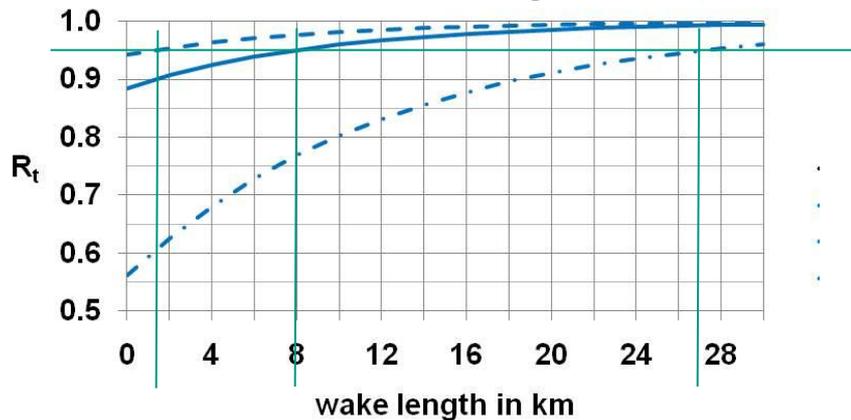
Barthelmie R, Frandsen ST, Rethore PE, Jensen L., 2007:
 Analysis of atmospheric impacts on the development
 of wind turbine wakes at the Nysted wind farm.
 Proceedings of the European Offshore Wind Conference,
 Berlin 4.-6.12.2007.

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

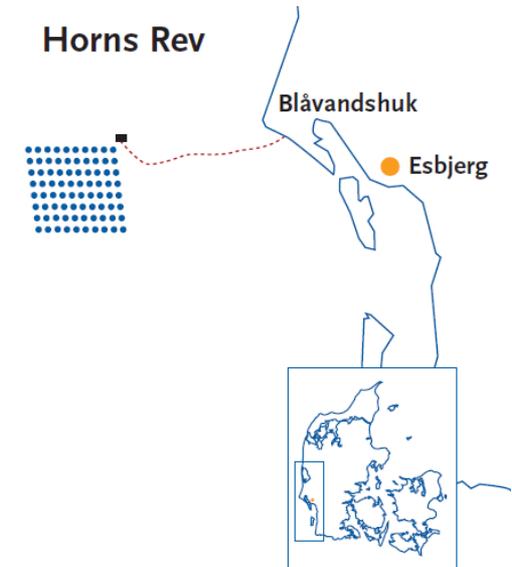
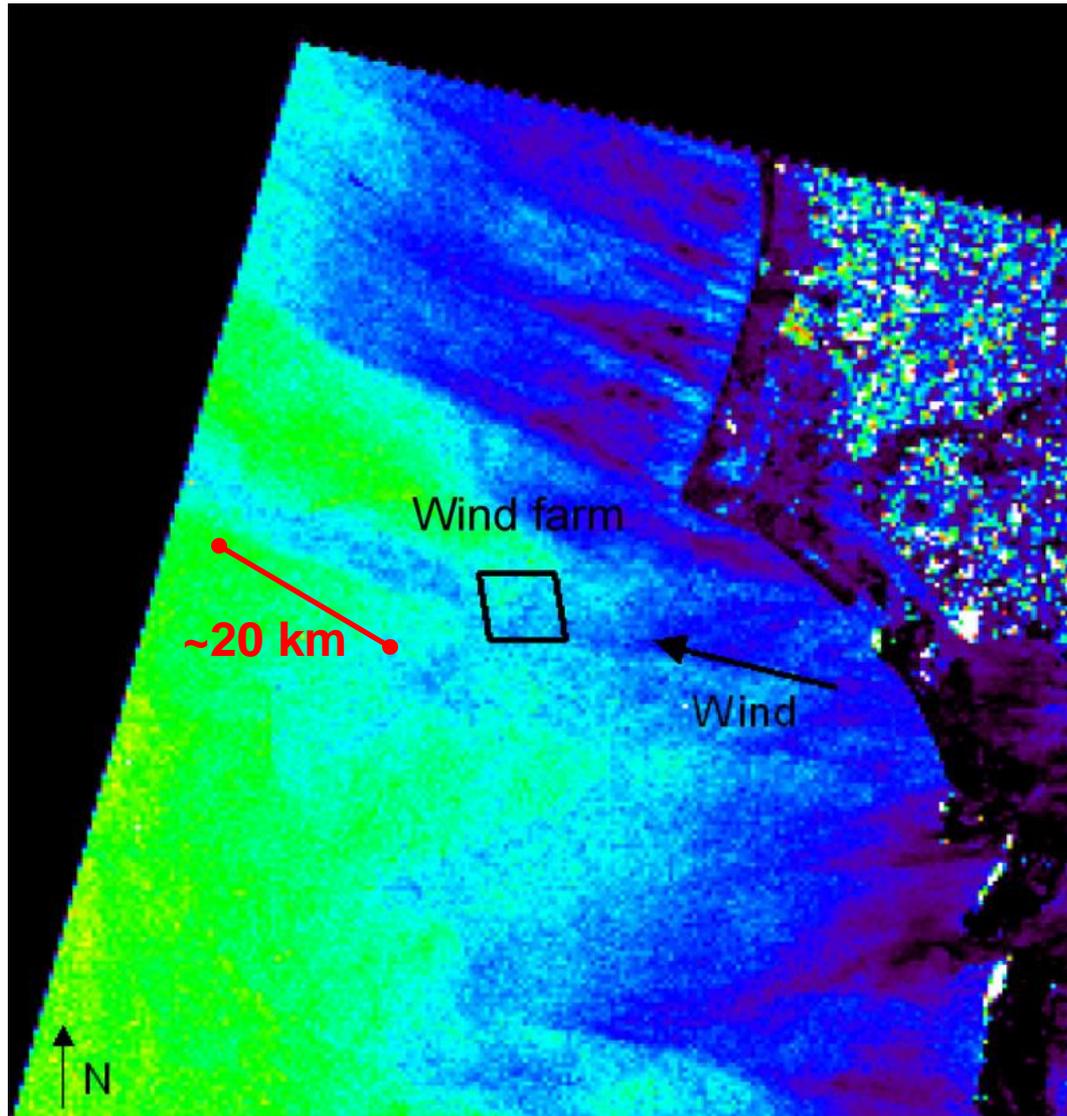
Rauigkeit: onshore ($z_0 = 1,0$ m) – offshore ($z_0 = 0,0001$ m)



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)



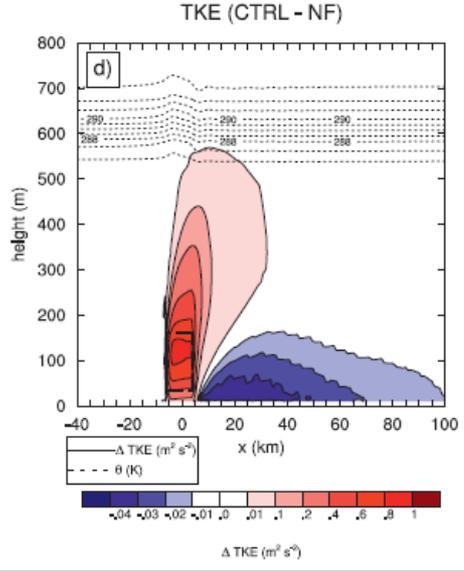
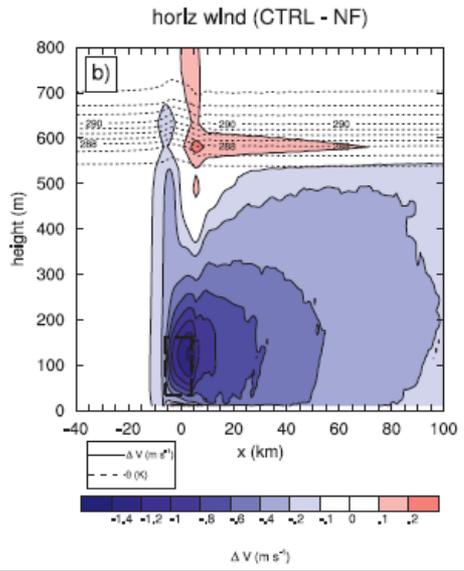
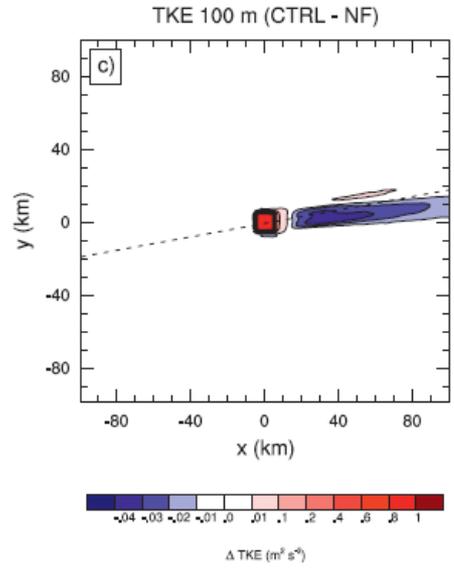
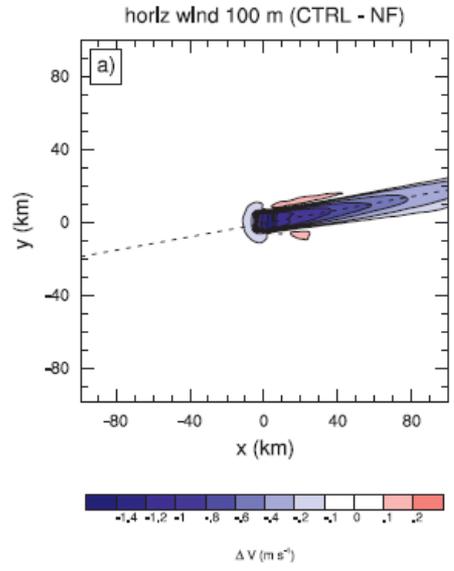
http://www.hornsrev.dk/nyheder/brochurer/Horns_Rev_TY.pdf

25. 02. 2003

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

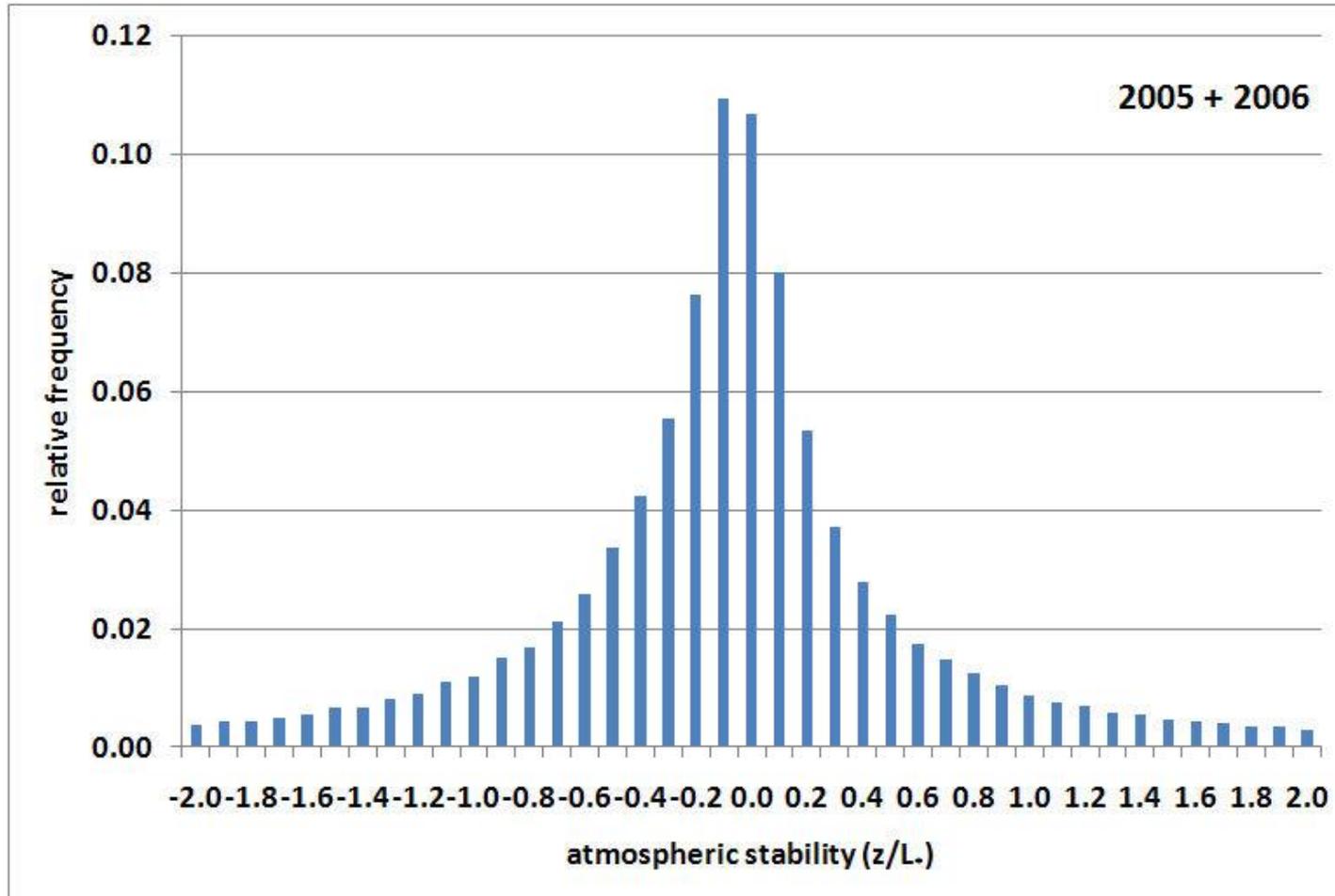
Erholung der Windgeschw. und der Turbulenz hinter einem Windpark

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>

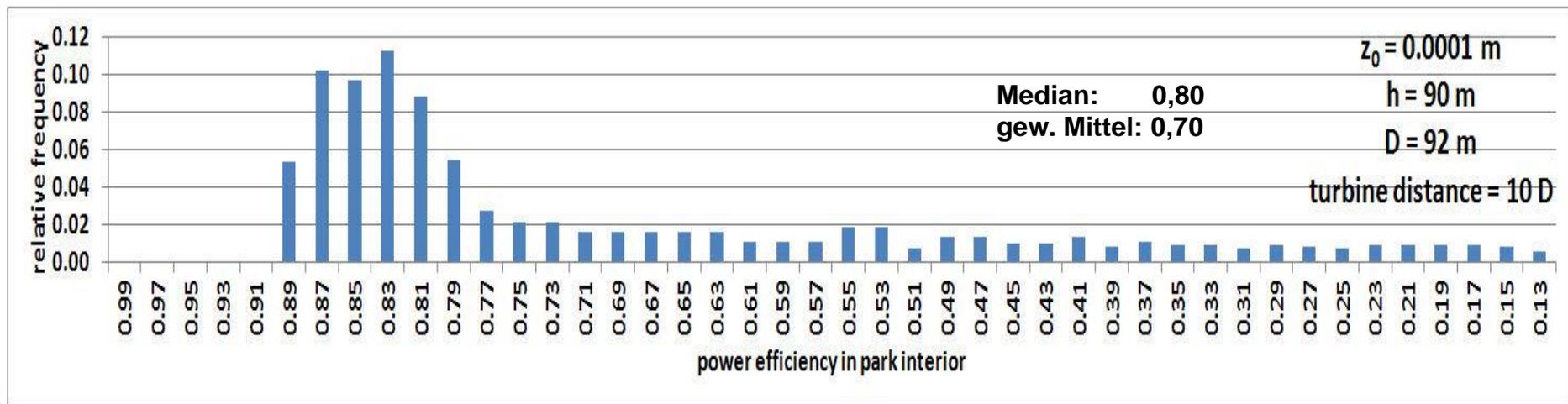
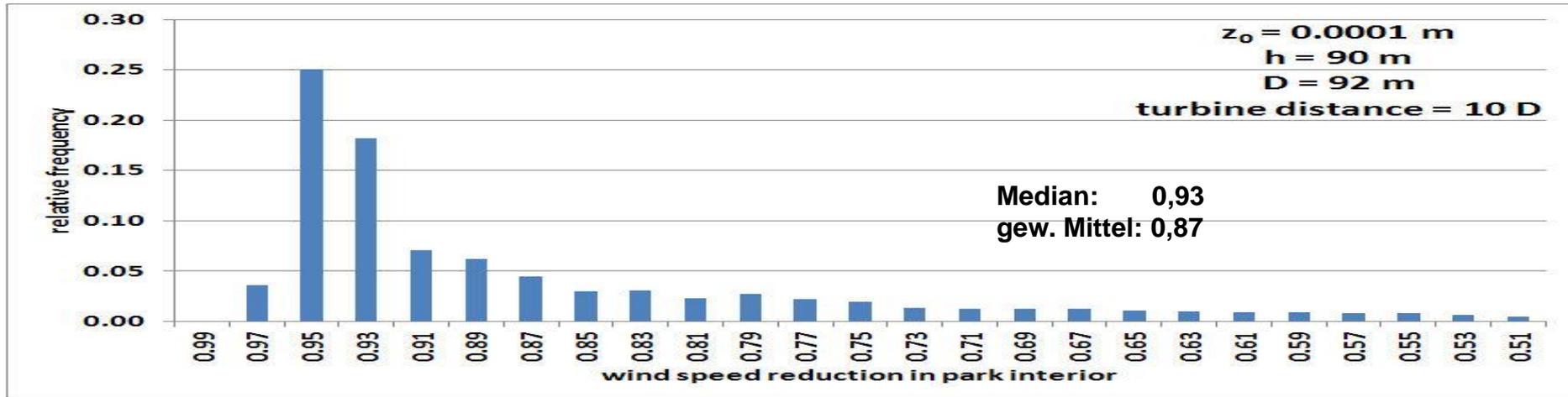
Welche Schichtungsstabilitäten treten offshore (FINO1, 80 m) wirklich auf?



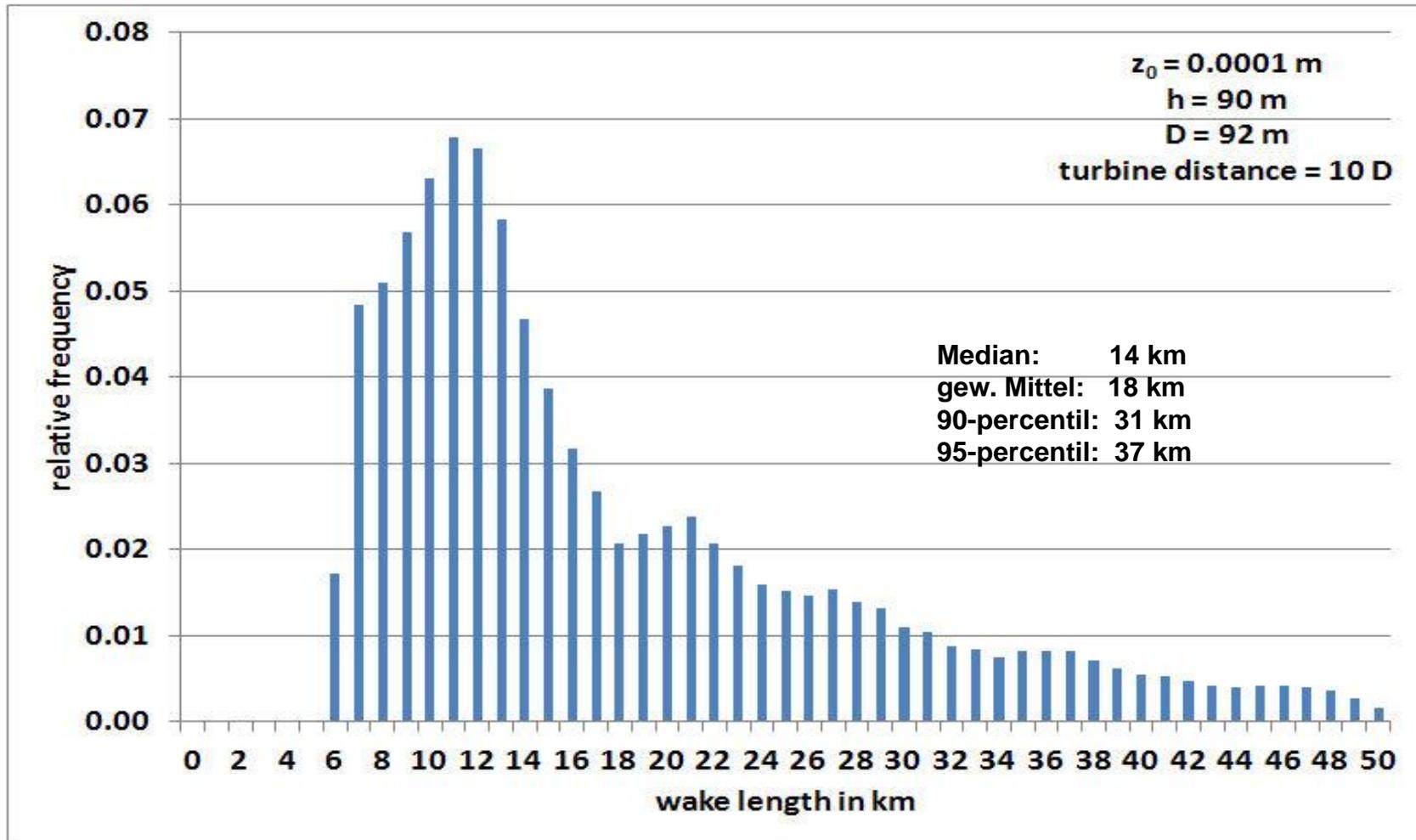
91,16%
aller
Werte

Median:
-0,07

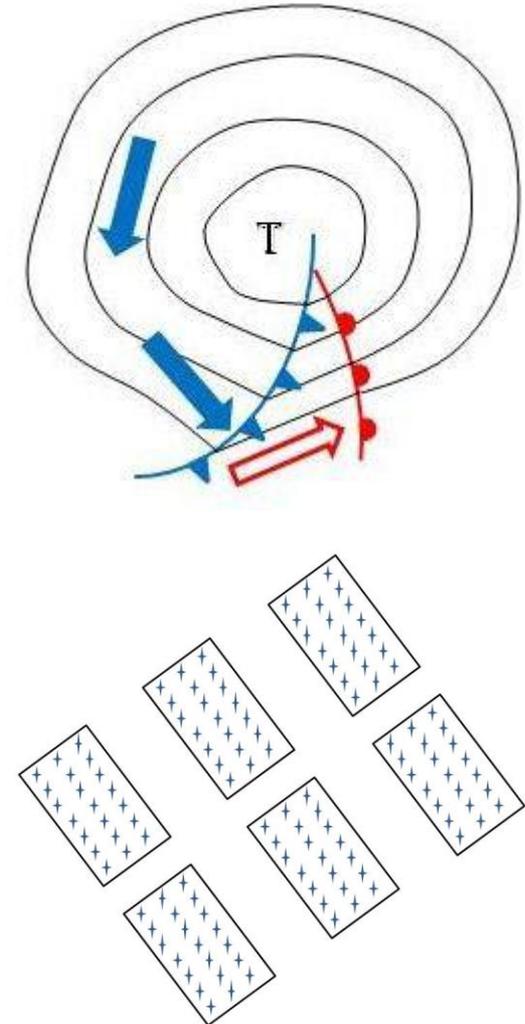
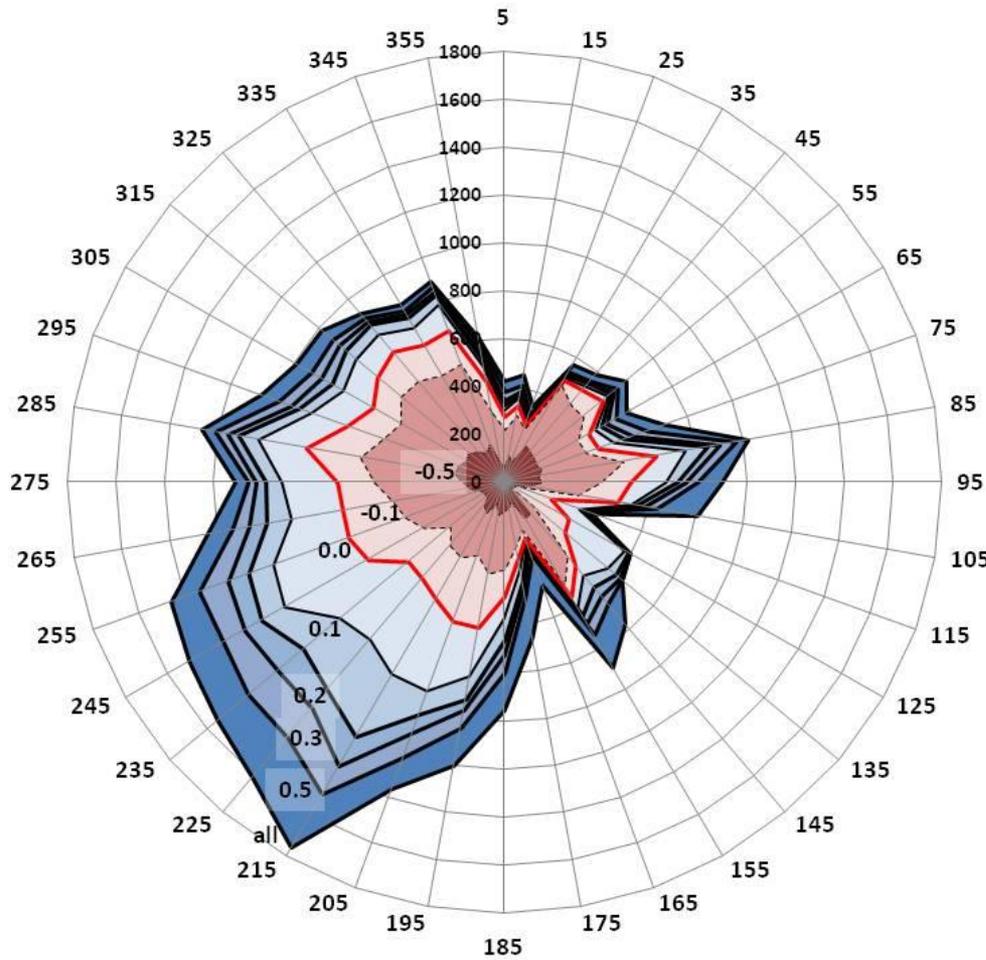
Häufigkeitsverteilung Reduktion im Windparkinneren



Häufigkeitsverteilung Nachlauflänge (<95% der Leistung)



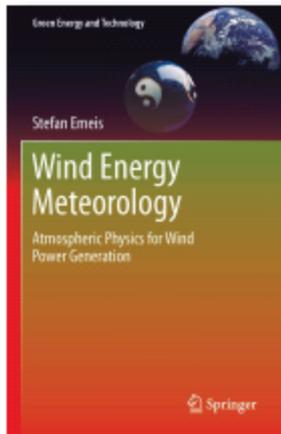
und darüber hinaus: in den mittleren Breiten sind Windrichtung und Schichtung korreliert



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

Schlussfolgerungen:

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



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**

