

Offshore Turbulenz und die IEC 61400-3

Priv.-Doz. Dr. Stefan Emeis

Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Atmosphärische Umweltforschung
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Kreuzeckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen

stefan.emeis@imk.fzk.de



Offshore Wind und Turbulenz

- Meeresoberfläche horizontal homogen, glatter als über Land

aber

- Rauigkeit ist windgeschwindigkeitsabhängig
- Rauigkeitselemente haben Eigenbewegung
- thermisch: Jahresgang statt Tagesgang

daraus folgt:

- anderer Vertikalaufbau der Grenzschicht
- andere Windverhältnisse
- andere Turbulenzverhältnisse

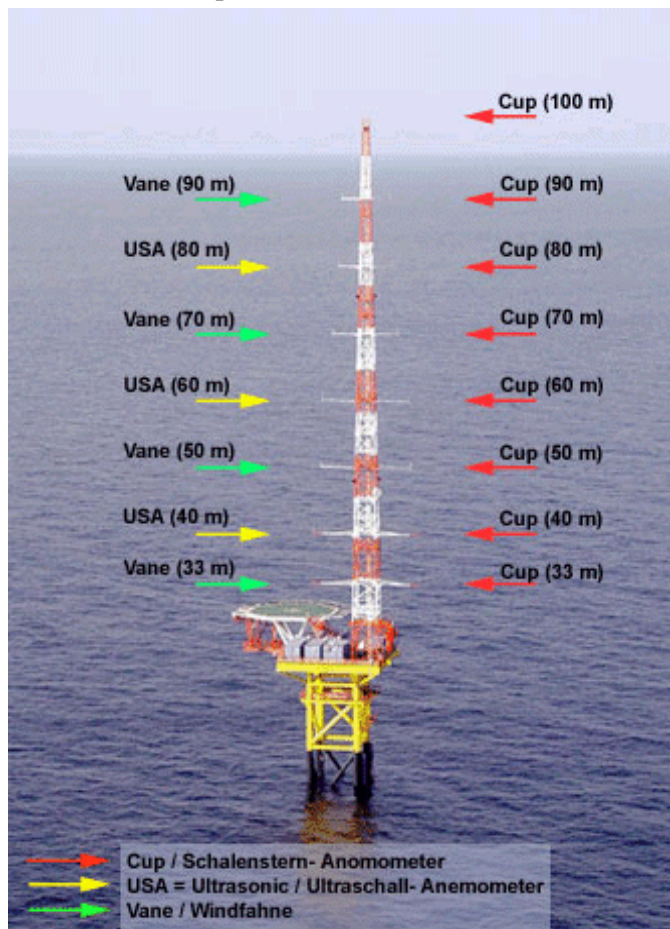
- Wellenalter ist weiterer Skalierungsparameter



Offshore Wind und Turbulenz

Datenquelle:

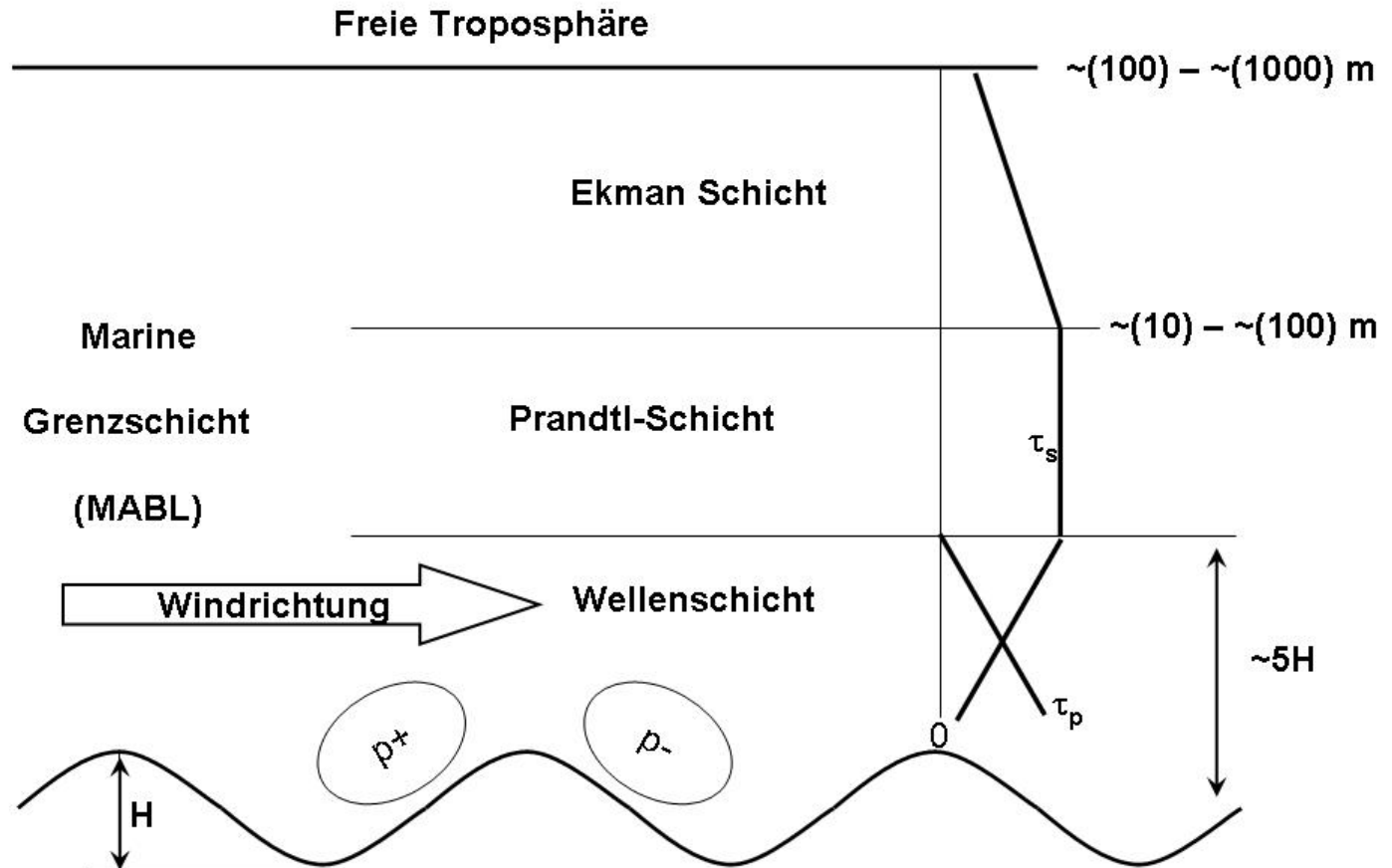
Project OWID





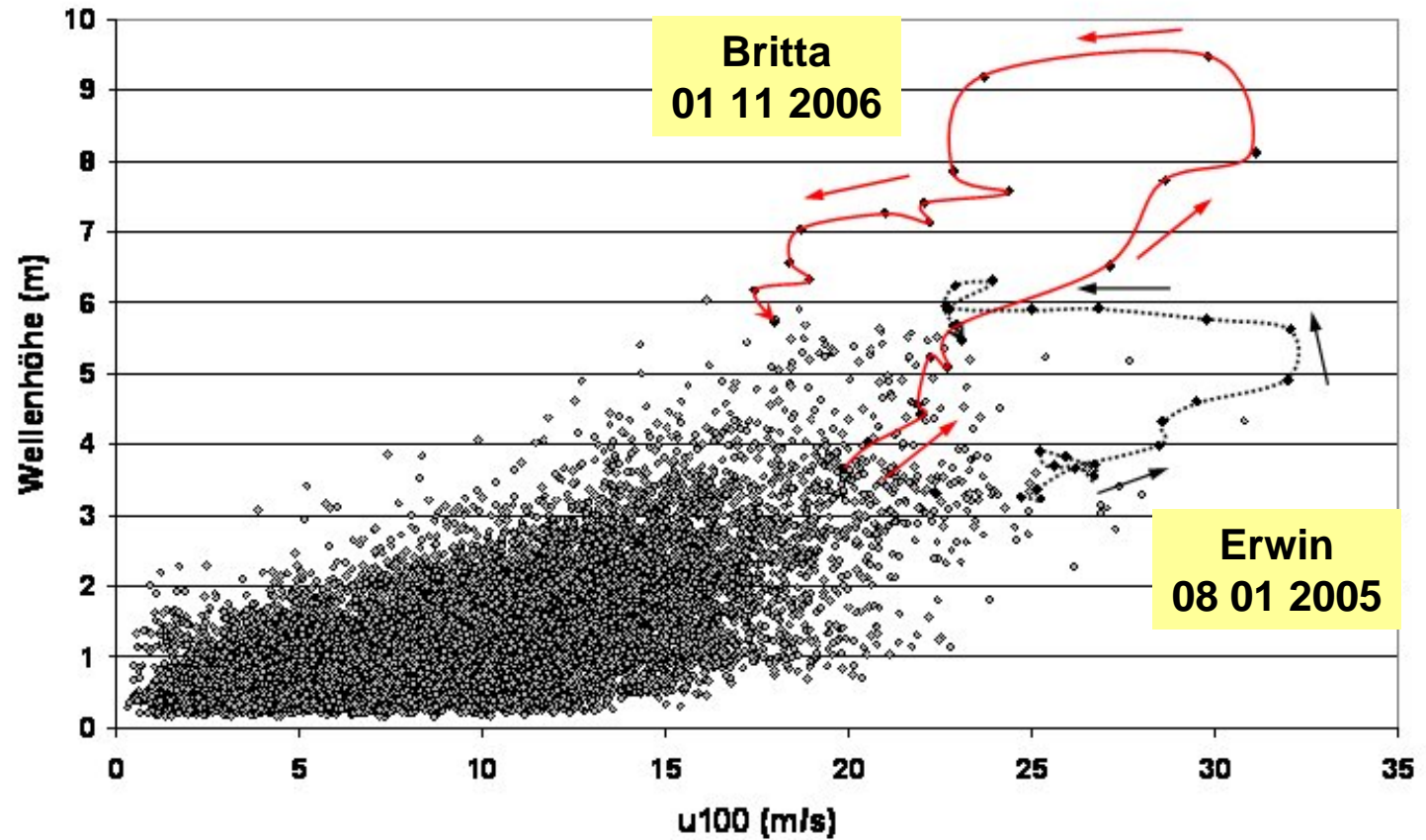
Wellenhöhe, Vertikalaufbau der marinen Grenzschicht und Wellenalter

Vertikalaufbau der marinen Grenzschicht





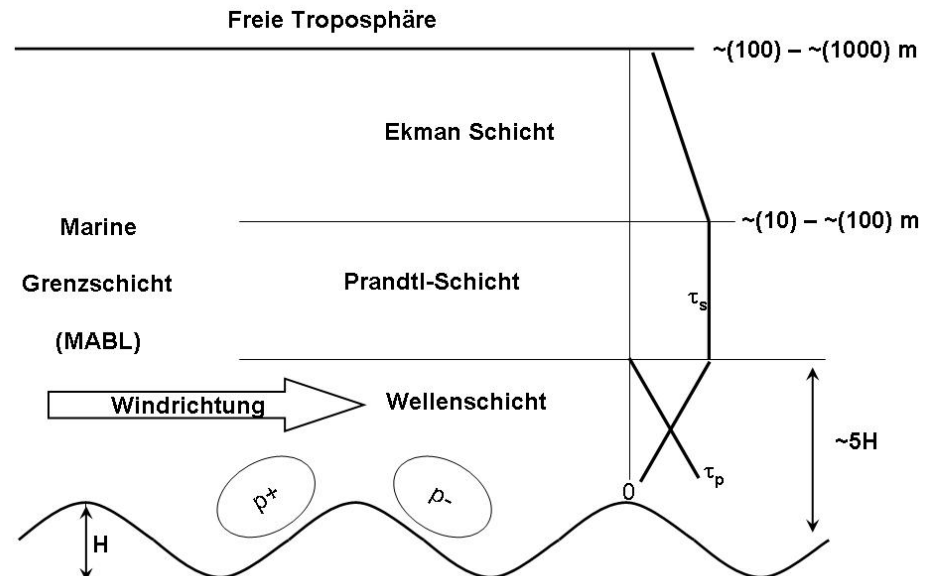
Wellenhöhe als Funktion der Windgeschwindigkeit





Höhe von Wellen- und Prandtl-Schicht

Wind	5 m/s	15 m/s	30 m/s
Wellenhöhe	0,5 m	2 m	8 m
Wellenschichthöhe	2,5 m	10 m	40 m
Prandtl-schichthöhe	10 m	40 m	100 m





Wellenalter

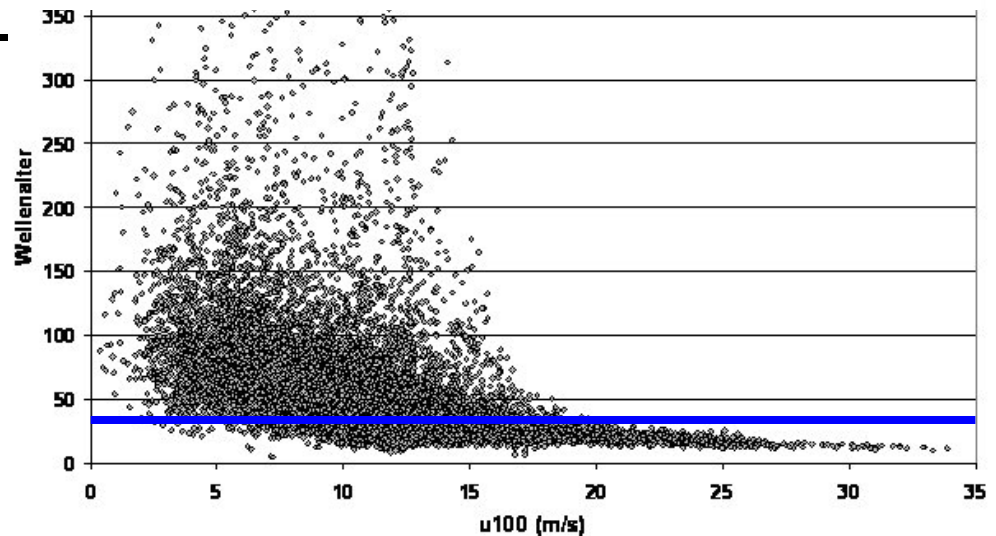
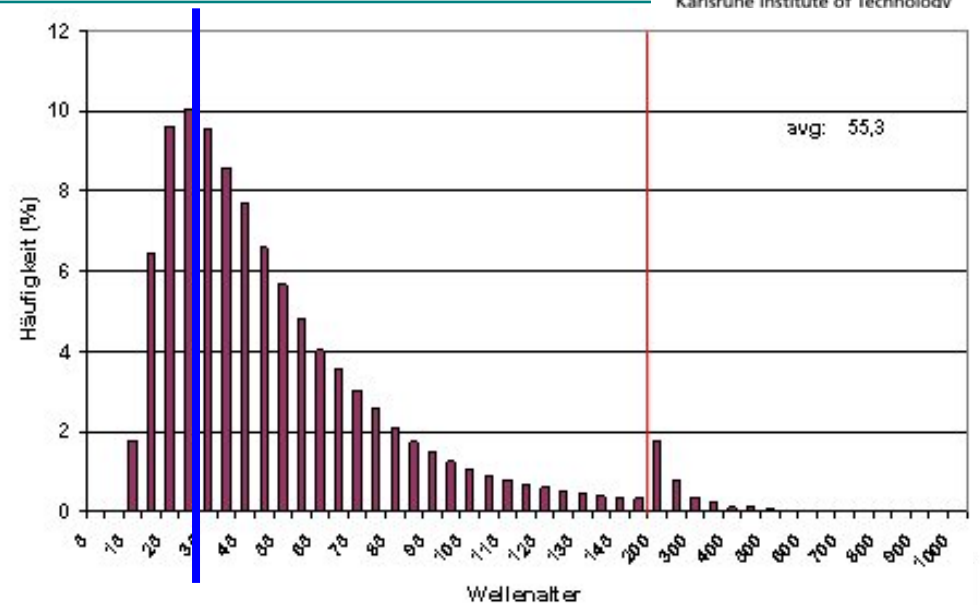
$$u_*/c_{ph}$$

kleiner ~30:

windgetrieben,
bekannte Grenzschichttheorien
gültig

größer ~30

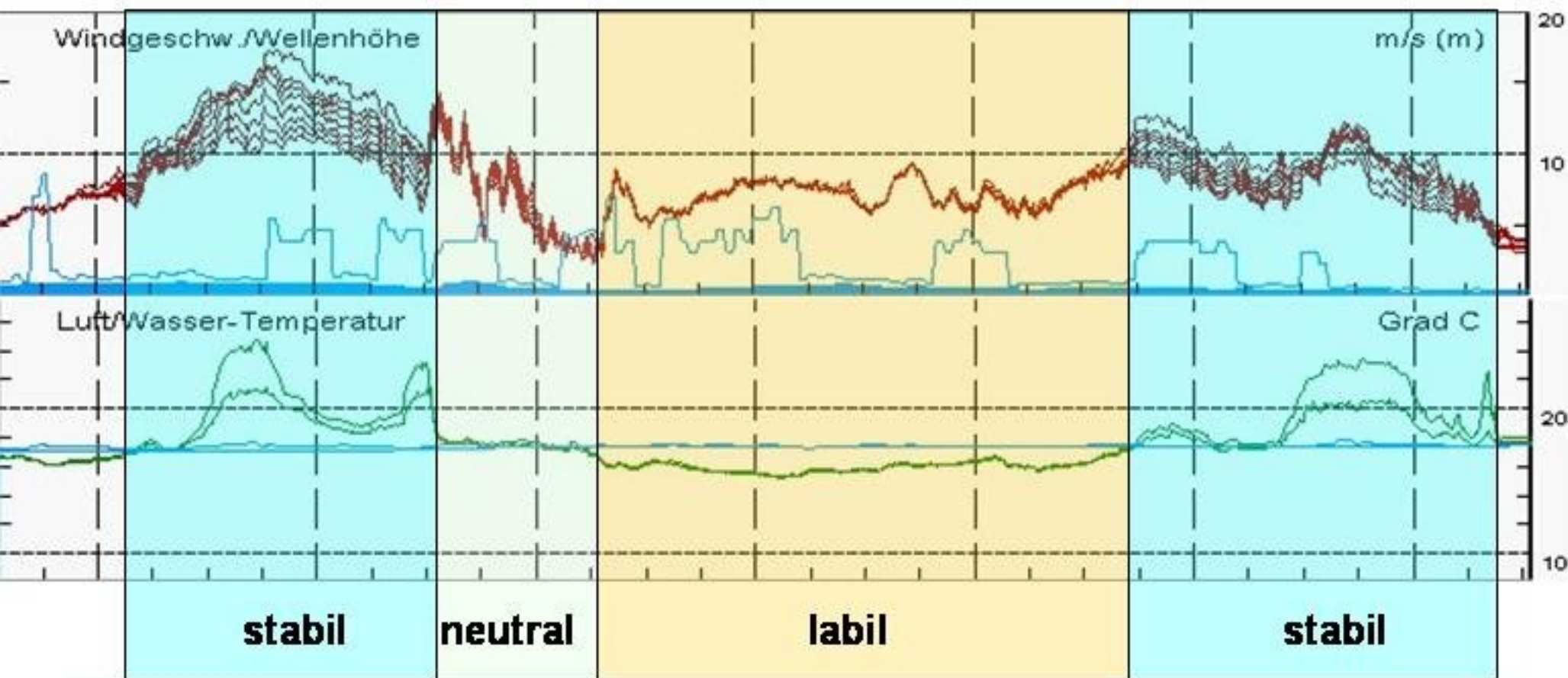
wellengetrieben





Windprofile und Turbulenz

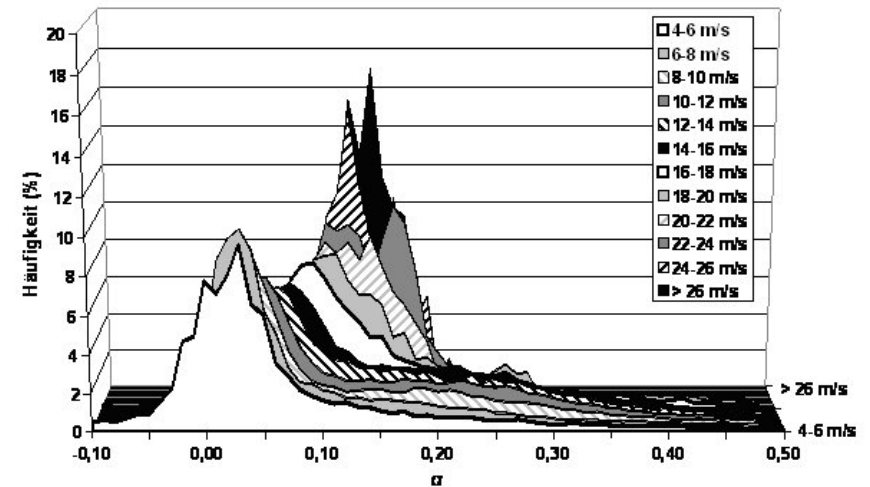
**Zeitreihen von der FINO1-Plattform:
Windgeschwindigkeit und Luft/Wasser-Temperatur
Woche bis zum 6. September 2005 11:46 Uhr**



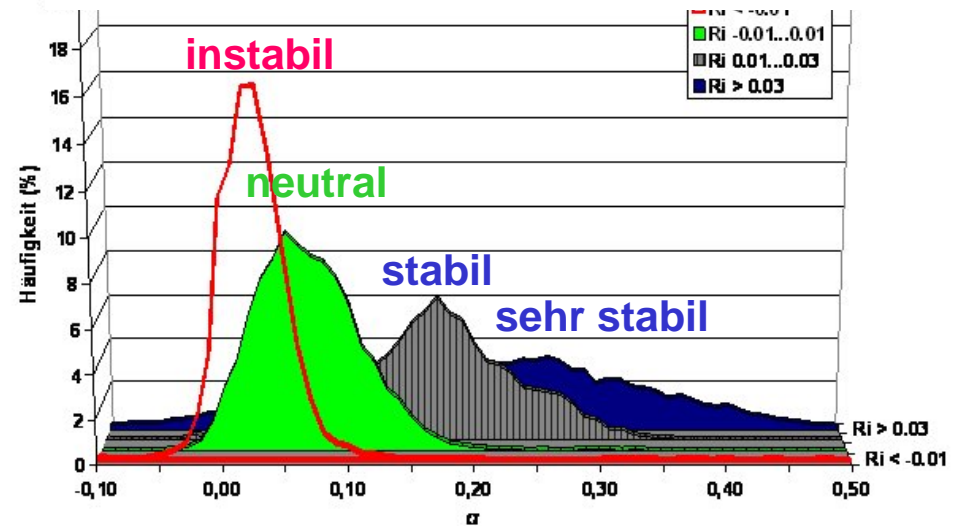


Höhenexponent des Windprofils

als Funktion der
Windgeschwindigkeit

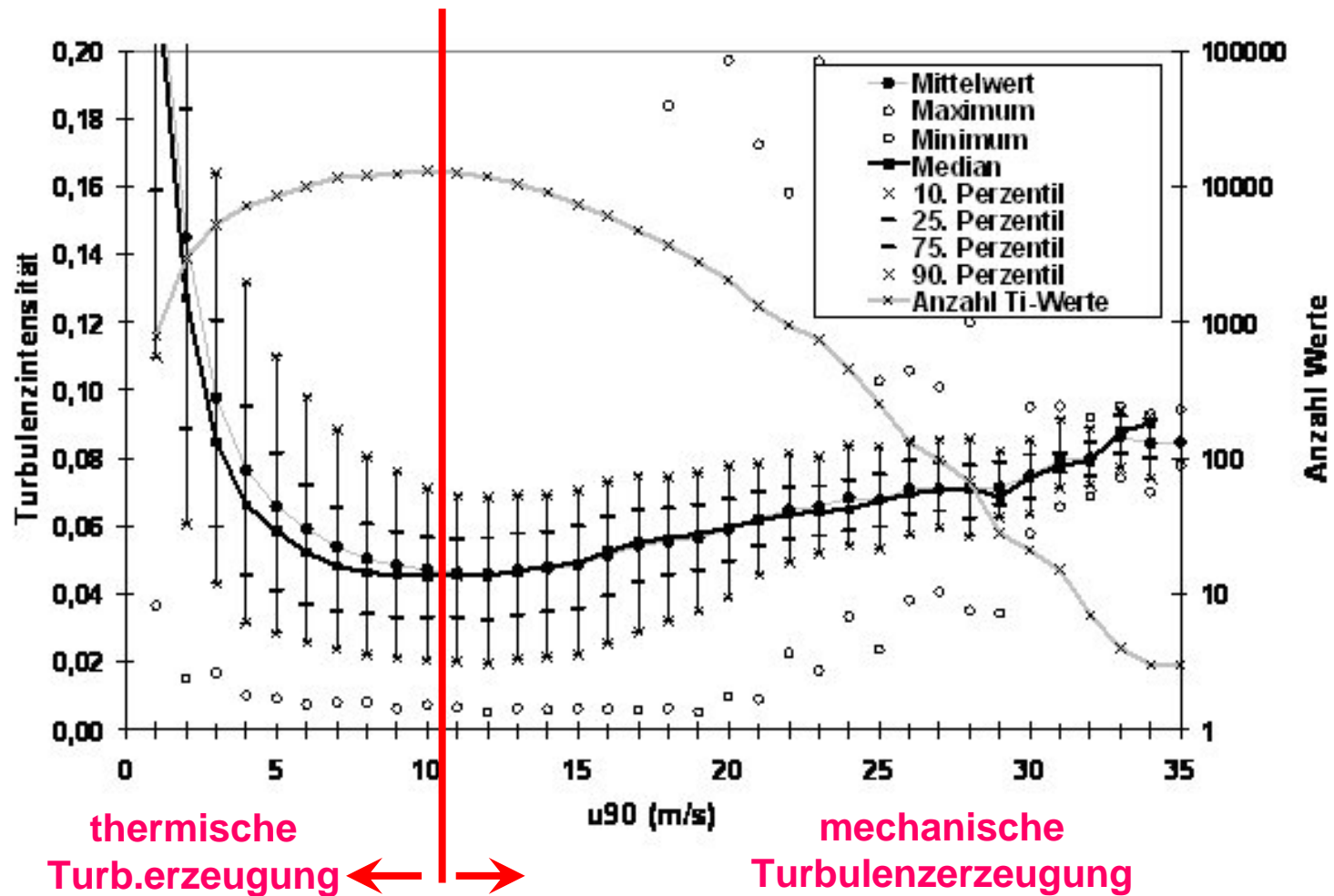


als Funktion der
Schichtung



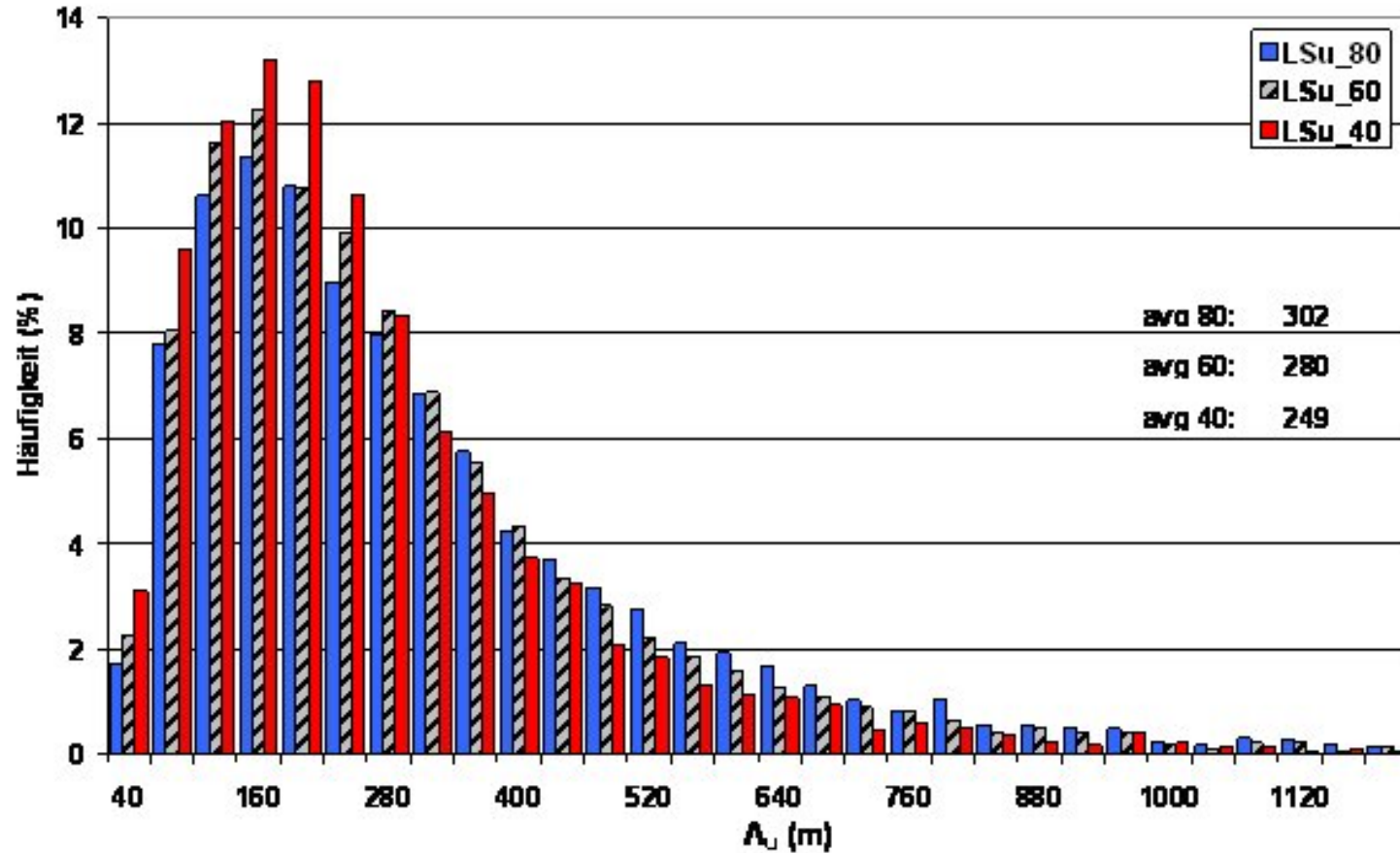


Turbulenzintensität als Funktion der Windgeschw.





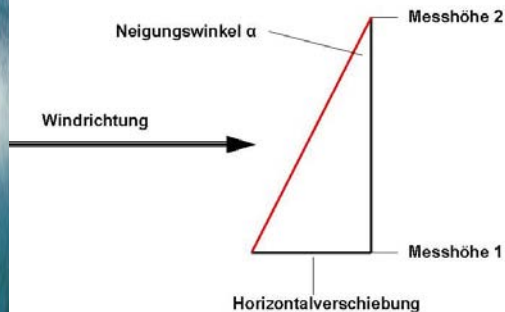
Längenskalen der Turbulenzelemente



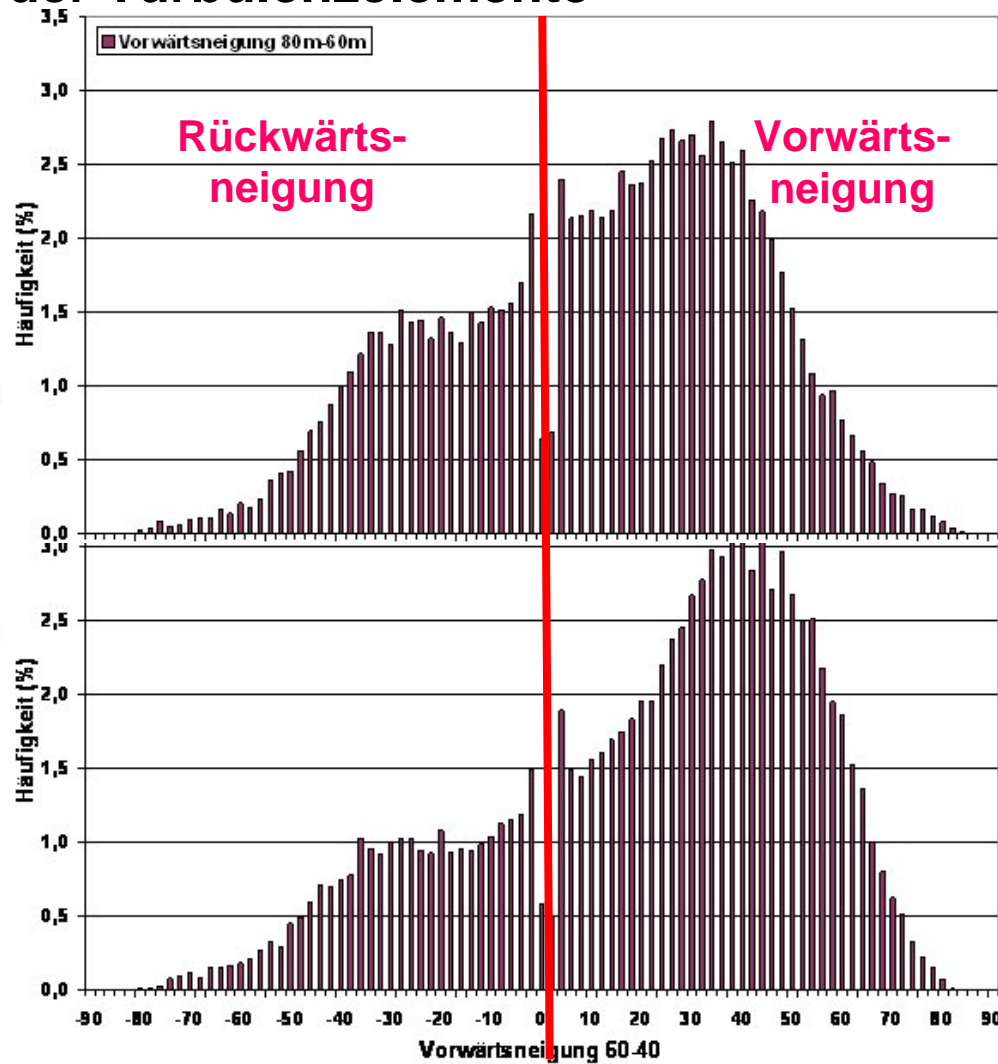
Vorwärtsneigung der Turbulenzelemente



60 bis 80 m



40 bis 60 m





Vergleiche mit Annahmen in der IEC 61400-1 und 61400-3

Normal wind profile model (NWP)

Die IEC 61400-3 gibt 0,14 für den Höhenexponenten vor

Auswertung für $z_{\text{ref}} = 40 \text{ m}$, $z = 90 \text{ m}$

Windgeschwindigkeit (m/s)	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl Werte
4-6	0,048	0,144	18178
6-8	0,068	0,114	23318
8-10	0,094	0,109	25236
10-12	0,116	0,109	24599
12-14	0,129	0,104	19863
14-16	0,137	0,101	13645
16-18	0,138	0,092	8540
18-20	0,142	0,084	4874
20-22	0,131	0,056	2270
22-24	0,133	0,039	1210
24-26	0,130	0,034	384
>26	0,130	0,025	247





Normal wind profile model (NWP)

Die IEC 61400-3 gibt 0,14 für den Höhenexponenten vor

Auswertung für $z_{\text{ref}} = 40 \text{ m}$, $z = 90 \text{ m}$

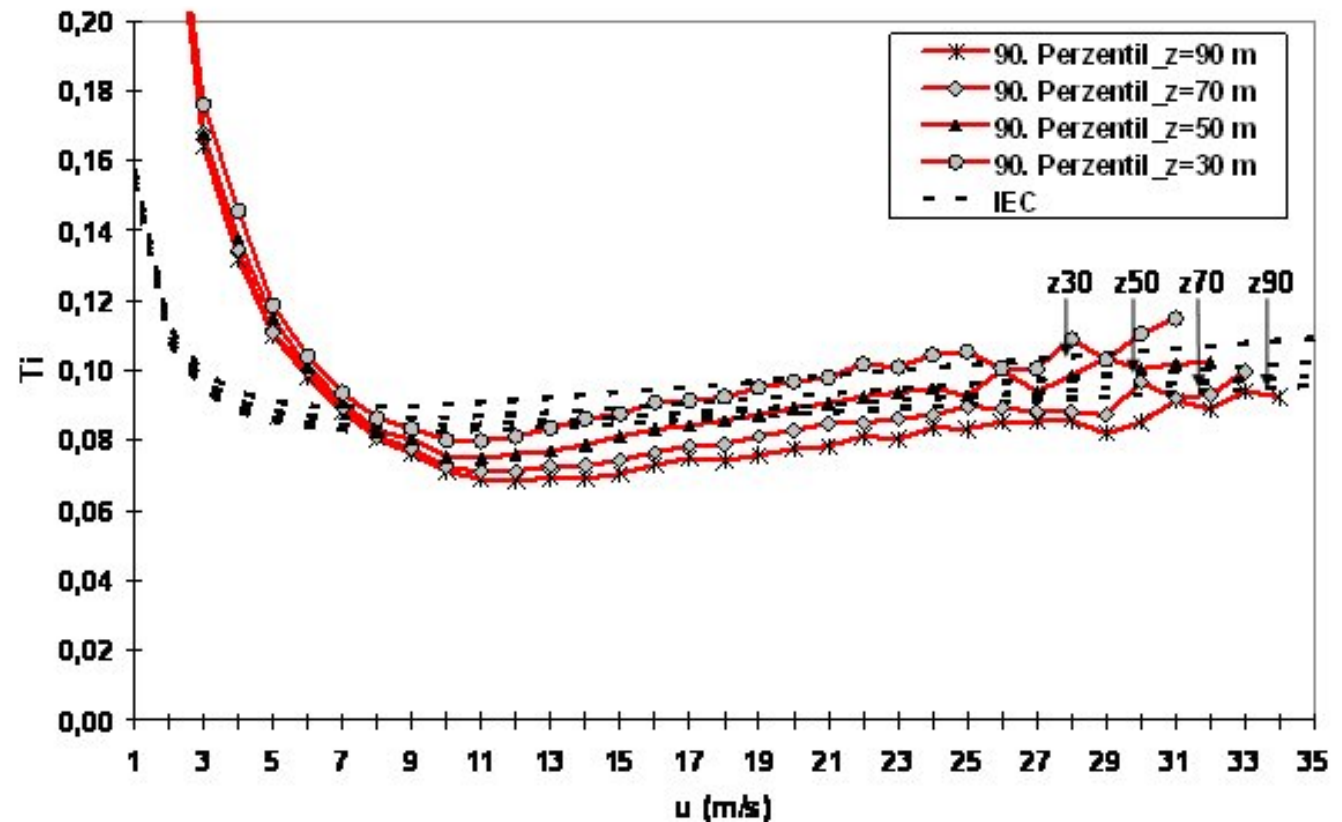
Bulk-Richardson-Zahl Ri_B	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl Werte
< -0,01	0,023	0,036	9450
-0,01...0,01	0,063	0,048	11939
0,01...0,03	0,149	0,065	10626
> 0,03	0,190	0,185	11361

Die IEC 61400-3 erscheint nicht in allen Fällen als ausreichend konservativ.



Normal turbulence model (NTM)

Vergleich: beobachtete und von der IEC-Norm angenommene 90-Perzentilwerte der Turbulenzintensität





Normal turbulence model (NTM)

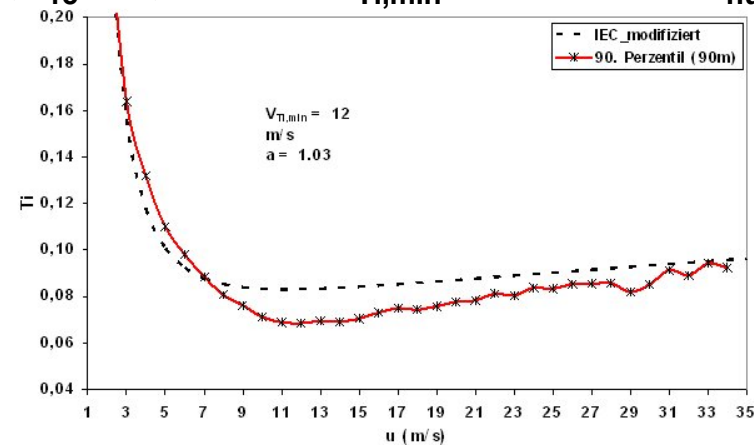
Die IEC 61400-3 (Gl. 27) fordert:

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

Alternativvorschlag:

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

mit $a = 1,03$, $I_{15} = 4,9\%$ und $V_{Ti,min} = 12 \text{ m/s}$ für $z_{hub} = 90 \text{ m}$

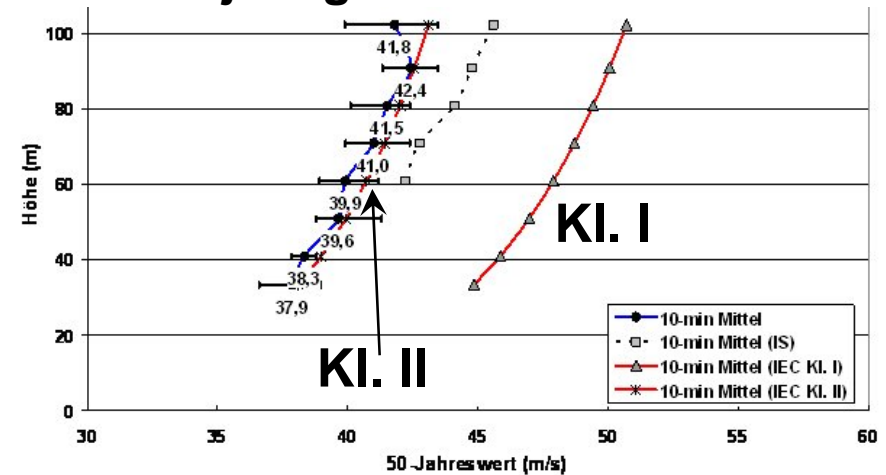




Extreme wind speed model (EWM)

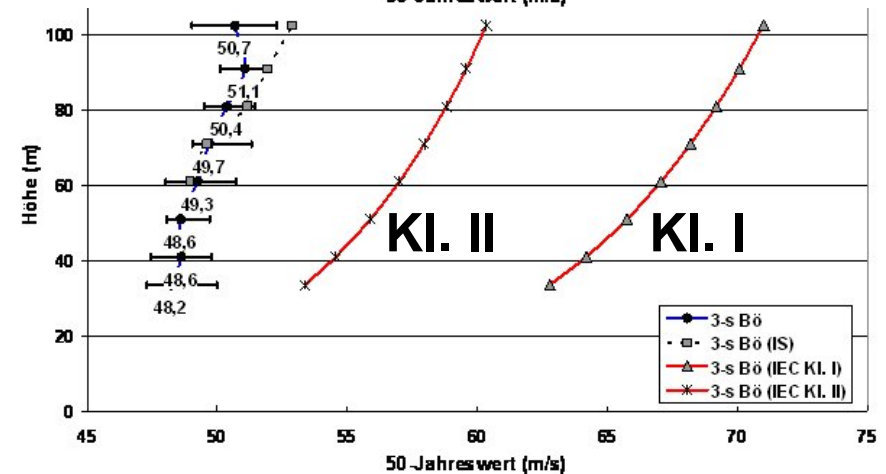
Vertikale Profile der 50jährigen Extreme

10 min-
Mittel



3 s-Böe

(mit 0,983 aus
den 1 s-Daten
errechnet)





Extreme wind speed model (EWM)

Der Hellmann-Exponent für die Extremwinde:

für das 10 min-Mittel scheint 0,11 richtig

für die 3 s-Böe scheint 0,11 etwas zu hoch

Der 50-Jahreswert für die Turbulenzintensität:

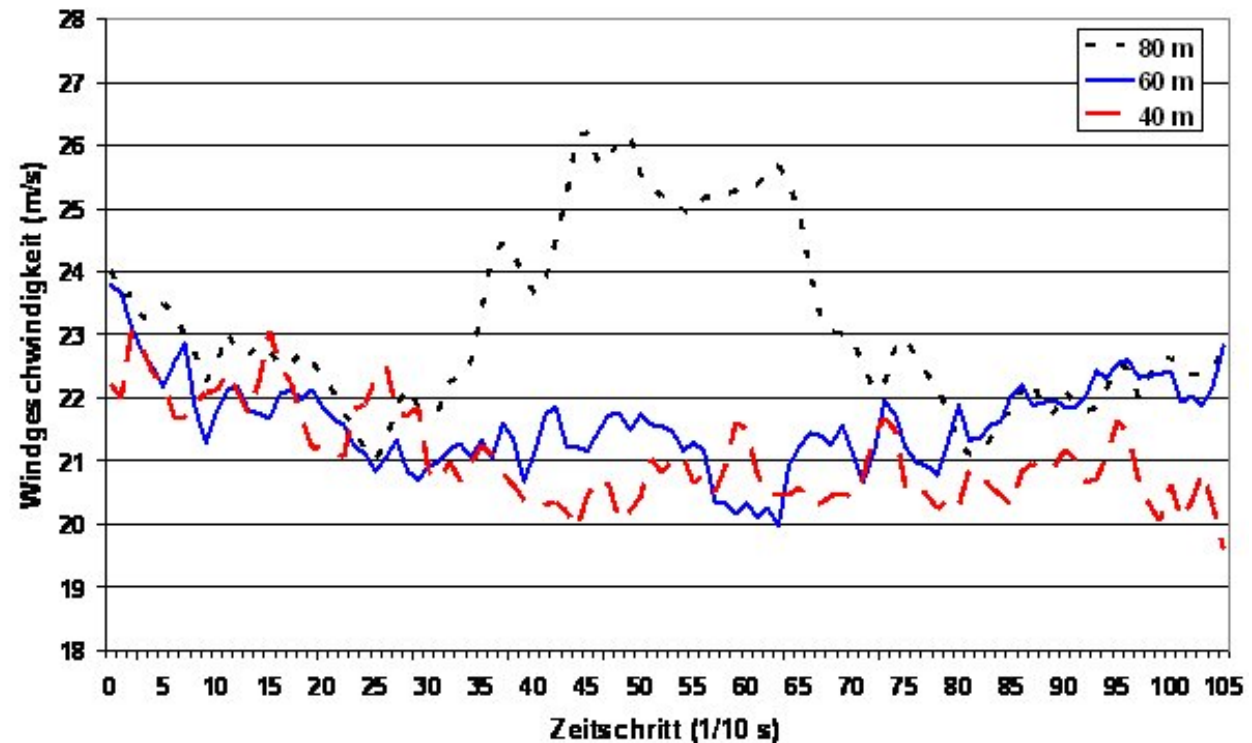
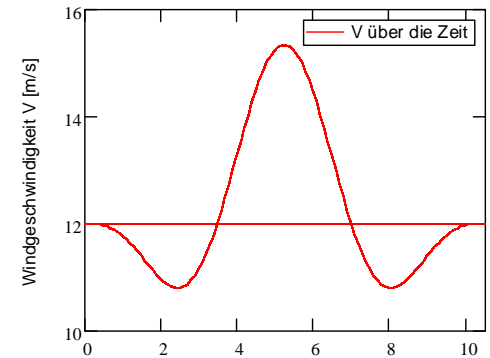
0,11 erscheint ausreichend konservativ

(die Extrapolation der Daten ergibt ca. 0,10)



Extreme operating gust (EOG)

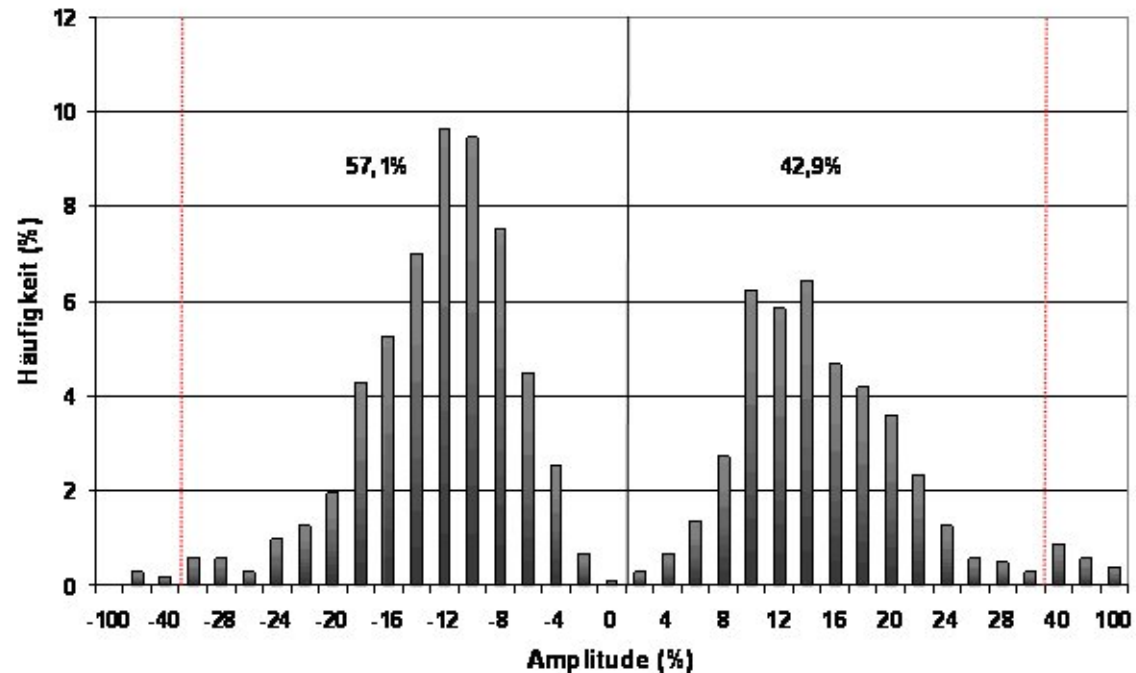
gleichzeitige Beobachtung in drei
Höhen (10,5 s), Korrelation $> 0,85$





Extreme operating gust (EOG)

Häufigkeitsverteilung der EOG (10,5 s) in 80m Höhe
(z.B. 440 Fälle im Jahr 2005)



mehr negative als positive „Mexikanische Hüte“



Extreme operating gust (EOG)

Häufigkeit in Abhängigkeit von der Länge
(relativ zur Häufigkeit für 10,5 s Länge)

8 s	10,5 s	14 s
1,60	1,00	0,63

kürzere EOGs sind häufiger als die 10,5 s-EOGs der Norm



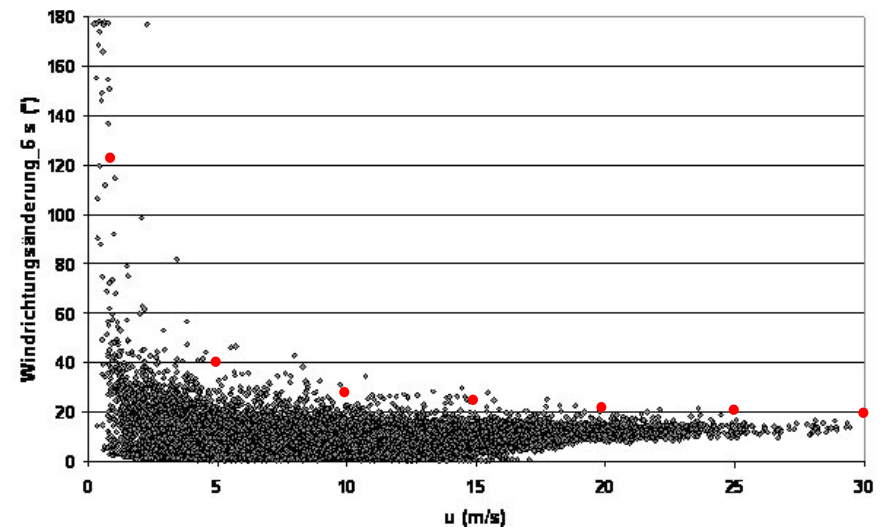
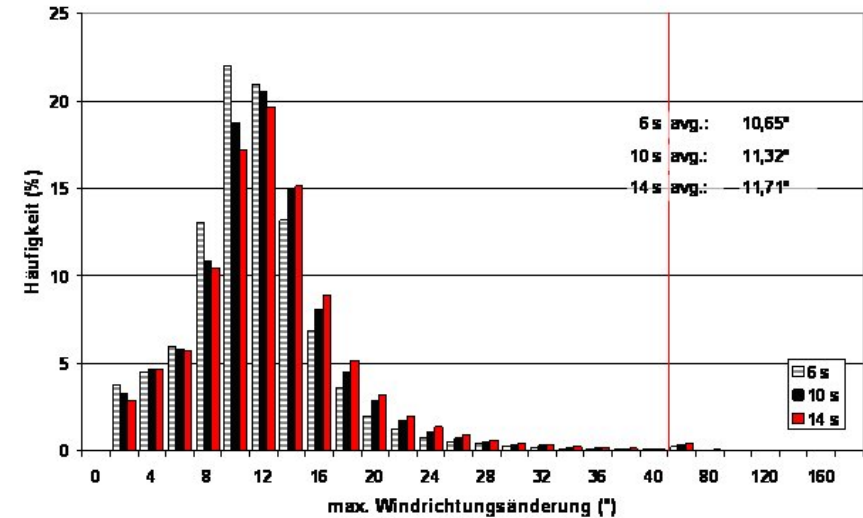
Extreme direction change (EDC)

Häufigkeits-
verteilung für
6, 10 und 14 s

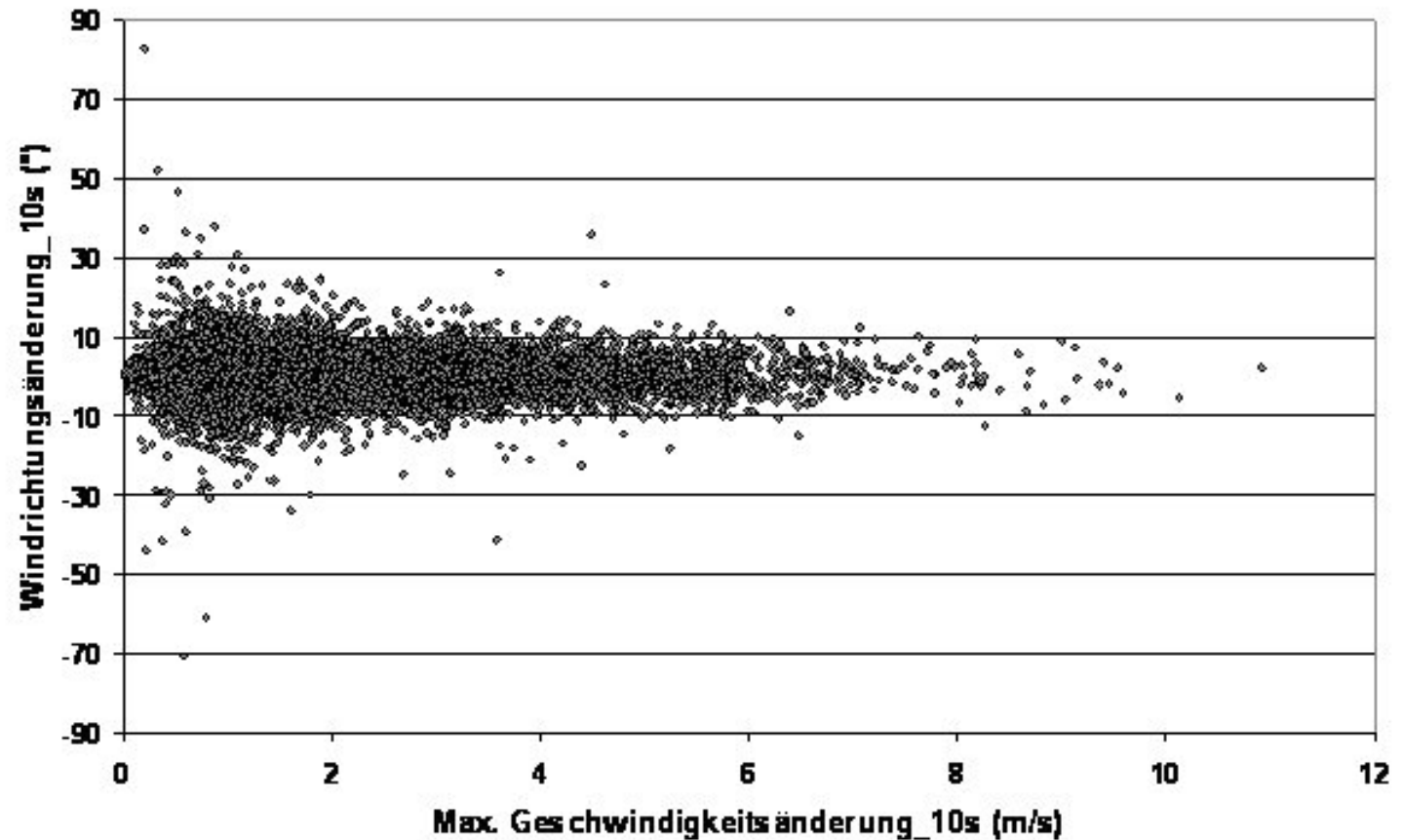
als Funktion der
Windgeschw.

Vergleich mit
61400-1, Gl. 20:

$D = 120 \text{ m}$
 $\Lambda = 42 \text{ m}$



Extreme coherent gust with direction change (ECD)





Zusammenfassung Vergleich zur IEC 61400

NWP: Exponent 0,14 ist nicht immer konservativ

NTM: Gl. (27) für σ_u in IEC 61400-3 sollte umformuliert werden

EWM: Klasse II erscheint weitgehend ausreichend

**EOG: - es gibt häufiger negative als positive „Hüte“
- EOG mit 8 s Länge 1,6 mal häufiger als mit 10,5 s Länge**



Einige abschließende Überlegungen zu offshore-Windparks mit einem einfachen analytischen Modell



Impulsbilanz eines Windparks in einer turbulenten Windströmung (EF93-Modell)

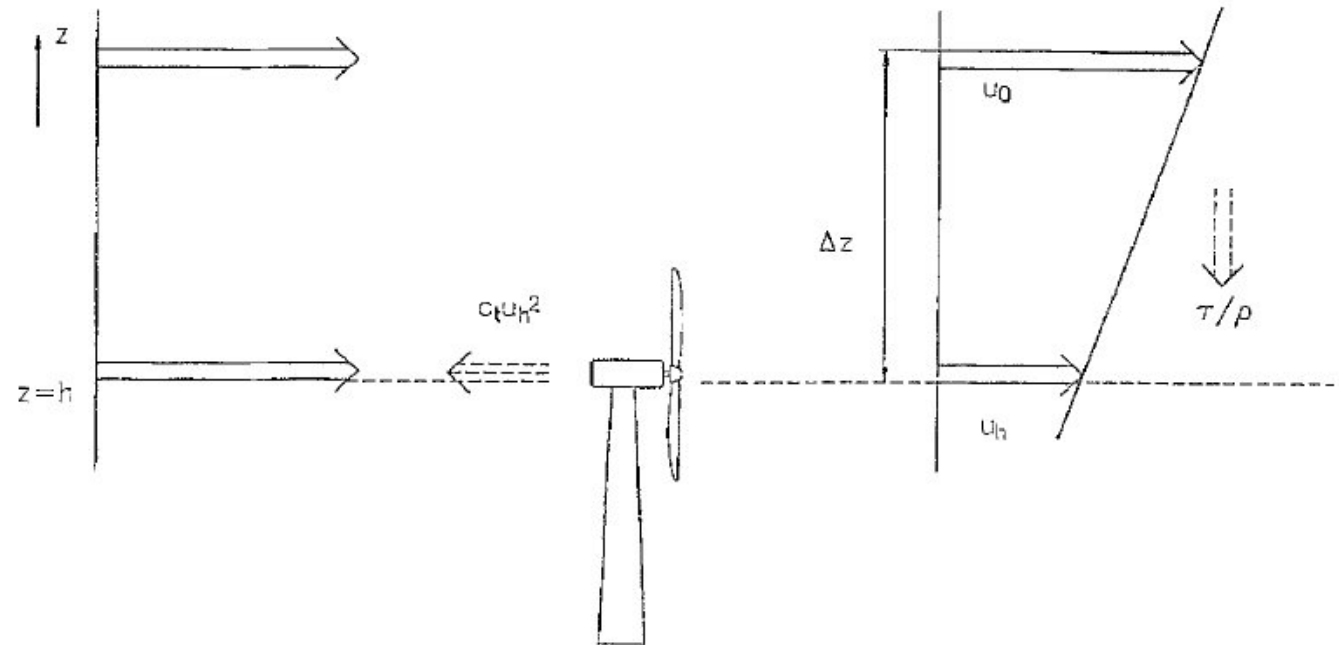
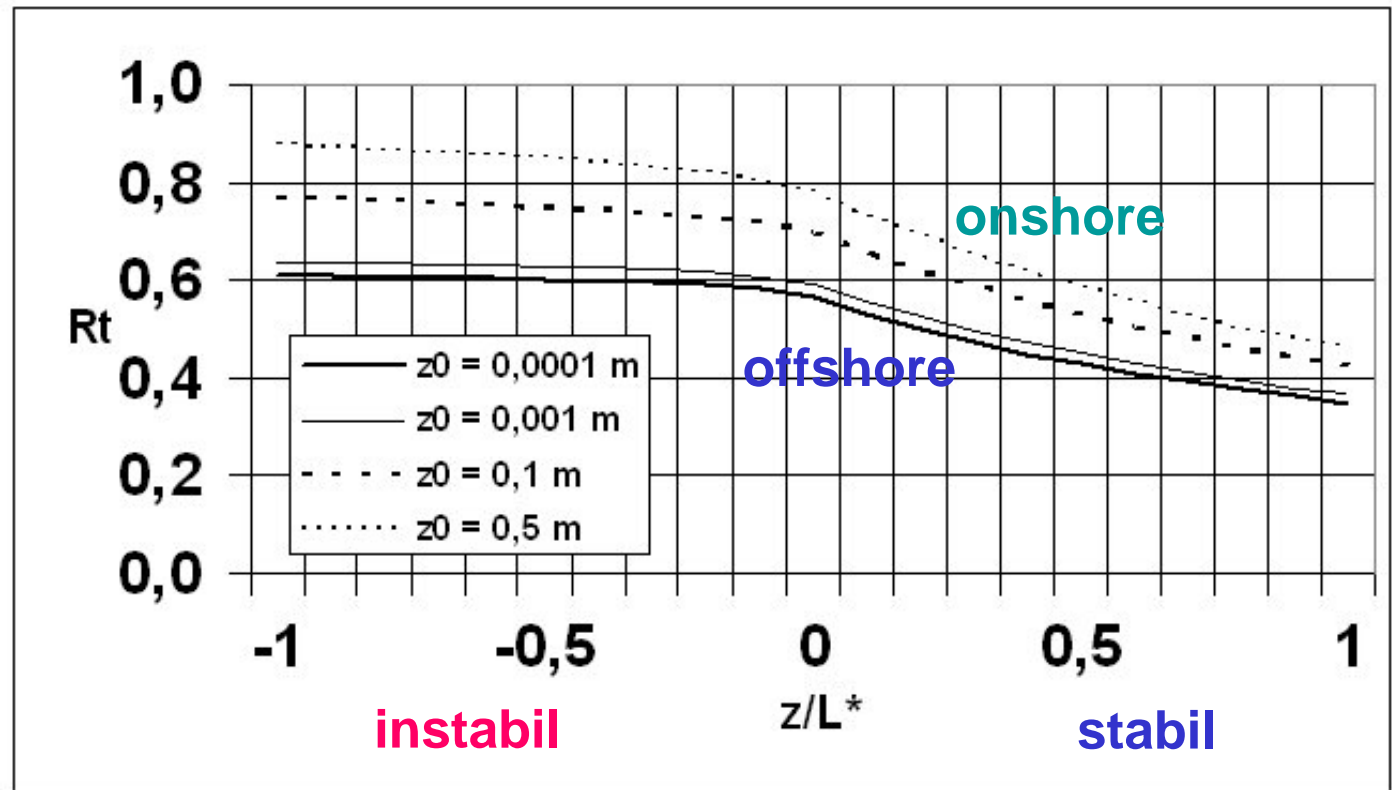


Fig. 1. Basic momentum budget for an ensemble of wind turbines in a turbulent flow. The momentum loss due to the turbines is compensated by downward turbulent momentum flux.

Emeis, S., Frandsen, S., 1993: Reduction of Horizontal Wind Speed in a Boundary Layer with Obstacles. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 64, 297-305.



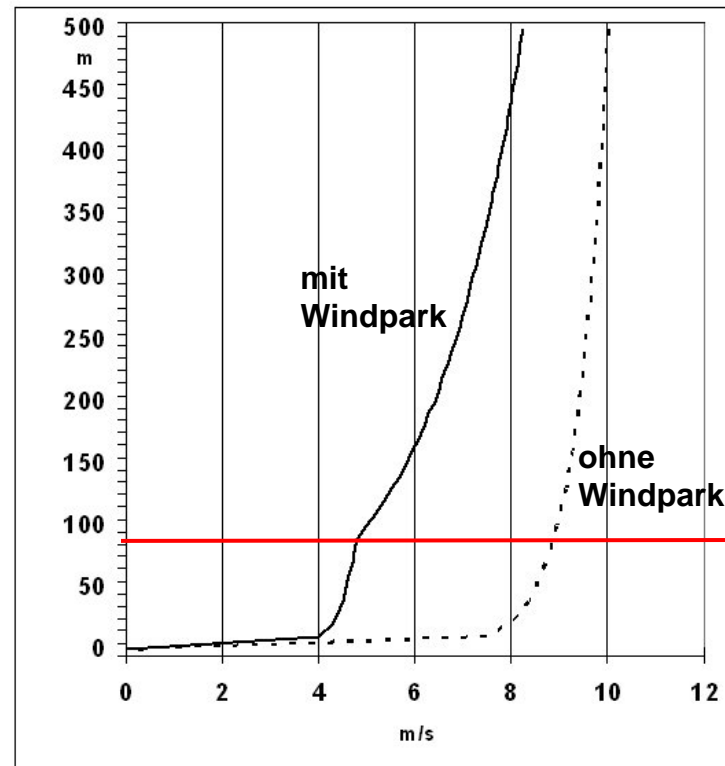
Impulsbilanz eines Windparks in einer turbulenten Windströmung: Reduktion der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe (erweitertes EF93-Model)



je rauer die Oberfläche → desto effektiver der Windpark

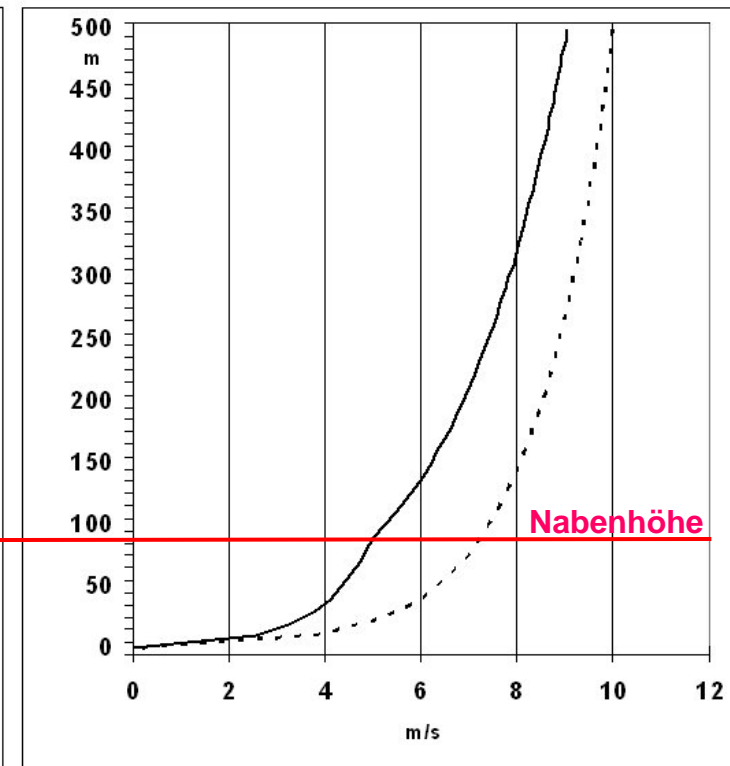


Impulsbilanz eines Windparks in einer turbulenten Windströmung: vertikales Windprofil neutrale Schichtung (erweitertes EF93-Modell)



glatt ($z_0 = 0,0001 \text{ m}$)

$u = 10 \text{ m/s}$



rau ($z_0 = 1 \text{ m}$)



Zusammenfassung und Ausblick



Unterschiede offshore - onshore

andere Oberfläche (glatter, bewegter)

**anderer Grenzschichtaufbau
(„junge“ Wellen nur in ca. 30% der Fälle)**

Vorgaben der IEC 61400 sind nicht in allen Aspekten konservativ

**geringeres Turbulenzniveau führt zu
geringerer Effektivität von Windparks
(→ größerer Abstand zwischen WEAs nötig)**

Konsequenzen für die offshore Windnutzung

Berechnungsmodelle müssen angepasst werden

in Windparks müssen größere Abstände zwischen den einzelnen WEA eingeplant werden

Windparks müssen zueinander einen größeren Abstand haben

es gibt noch viel zu tun in RAVE und anderen Forschungsvorhaben



Danke für Ihre Aufmerksamkeit

... und ein ganz großer Dank geht an

Matthias Türk*),

**der einen großen Teil der Auswertungen
gemacht hat**

***) jetzt: KEMA Consulting, Bonn**





Wellenhöhe als Funktion der Windgeschwindigkeit

bisher an FINO1
beobachtet

Schätzung 50-Jahreswert

Sektor / Windgeschwindigkeit	25 m/s	30 m/s	35 m/s	40 m/s	Erklärte Varianz [R ²] in %
nördlich (290 - 40°)	6,7	9,2	12,1	15,5	69,5
östlich (40 - 120°), instabil	5,2	7,0	9,2	11,8	75,2
südlich (120 - 210°), instabil	4,2	6,0	8,1	10,6	61,3
südlich (120 - 210°), stabil	3,4	4,8	6,5	8,5	53,0
westlich	4,1	5,3	6,6	8,1	56,6
östlich (40 - 120°), stabil	1,6	1,6	1,7	1,6	29,9



**Extreme
operating
gust (EOG)**

**Amplitude
(Diff. Min-Max)**

**Magnitude
(Max)**

