

Energiemeteorologie

Prof. Dr. Stefan Emeis
(stefan.emeis@kit.edu)



Prof. Dr. Stefan Emeis

Karlsruher Institut für
Technologie (KIT)

Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Garmisch-Partenkirchen, Themen: Stadtforschung,
Windenergie, Fernmessung der Grenzschicht

Universität zu Köln

apl. Professor für Meteorologie, Vorlesung
„Energiemeteorologie“

KRdL/VDI

Obmann Richtlinienausschuss „Bodengebundene
Fernmessung meteorologischer Größen“

Meteorologische
Zeitschrift

Chef-Herausgeber

Energiemeteorologie

Windenergie

Solarenergie

Wasserkraft

Wellenenergie

Energiemeteorologie

Windenergie

Klimawandel und Anstieg von
Extremereignissen

Genauigkeit von
Vorhersagemethoden

Meteorologische
Informationen für
Energiesysteme

Meteorologische Daten für
ein verbessertes
Windparkmanagement

Klimawandel und Anstieg von Extremereignissen

Polwärtsverschiebung der
Windgürtel

längere Andauer einzelner
Wetterlagen (Blocking)

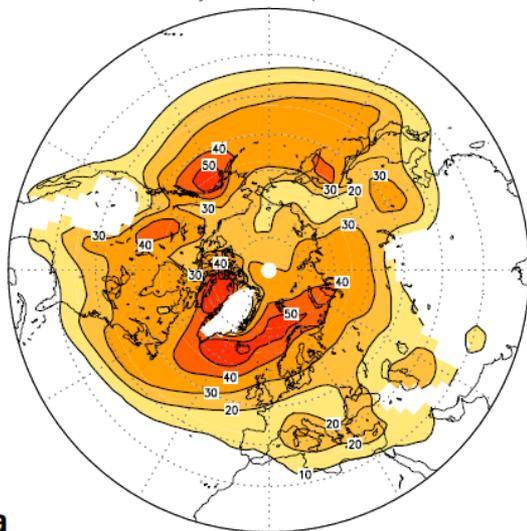
intensivere Stürme (nicht
notwendig mehr Stürme)

heftigere Gewitter und
Frontdurchgänge

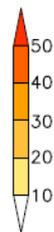
Polwärtsverschiebung der Windgürtel

(Ulbrich et al. 2009, DOI: 10.1007/s00704-008-0083-8)

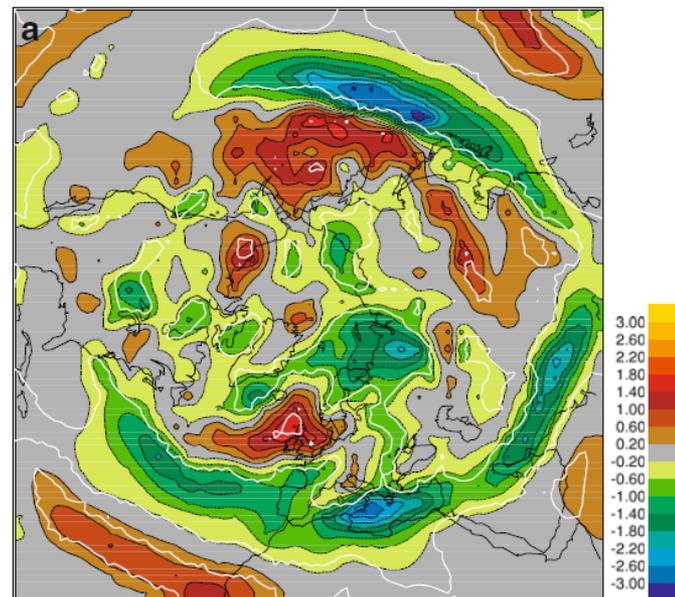
NCEP track density winter (ONDJFM, 195810–200703)



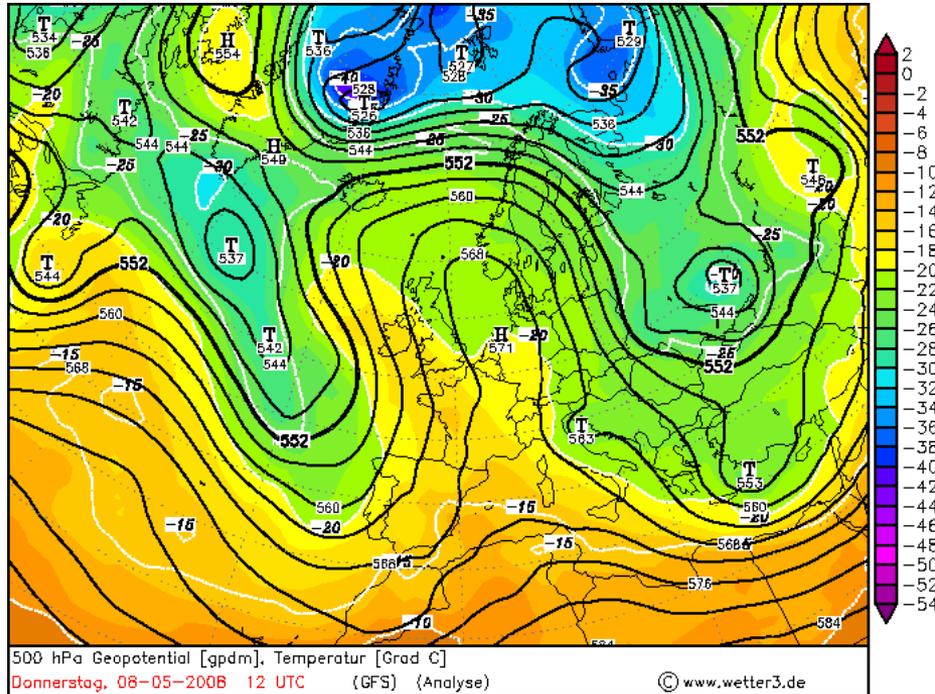
1958-
2007 a



2071-
2100



längere Andauer einzelner Wetterlagen (Blocking)



<http://www2.wetter3.de/Archiv/>

abnehmender Temperaturkontrast Pol-
Äquator → mehr meridionale Wetterlagen

die Anzahl und Dauer blockierender
Wetterlagen scheint zuzunehmen
(Omega-Wetterlagen)

je nach genauer Lage kann das eine
andauernde Hochdruck- oder
Tiefdrucklage sein

[https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/pdf/de/einfuehrung/Einfuehrung-Klimawandel_und_Wetterextreme-Ein_Überblick-\(2018\).pdf](https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/pdf/de/einfuehrung/Einfuehrung-Klimawandel_und_Wetterextreme-Ein_Überblick-(2018).pdf)

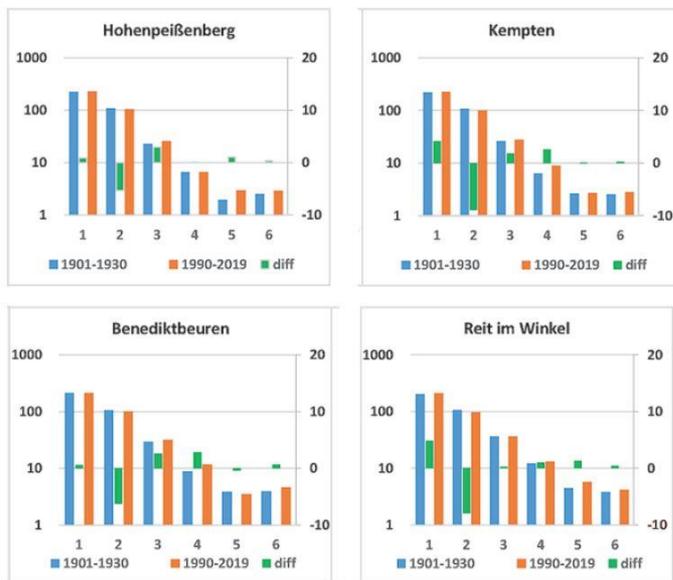
intensivere Stürme (nicht
notwendig mehr Stürme)



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dorian_2019-09-01_1002Z.jpg

- höhere Temperaturen → mehr Verdunstung aus den Meeren
- Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen
- mehr Wasserdampf → mehr (latente) Energie, die bei Kondensation frei wird
- mehr Energie → intensivere Stürme

heftigere Gewitter und Frontdurchgänge



höhere Temperaturen → Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen

mehr Wasserdampf → mehr (latente) Energie

mehr Energie

→ intensivere Gewitter

→ höhere Niederschläge

Figure 3: Comparison of two 30-year averages of number of days (logarithmic scale on the left y-axis) with precipitation amounts (RR) in six classes on the x-axis: 1) dry days (RR < 1 mm), 2) 1 mm < RR < 10 mm, 3) 10 mm < RR < 20 mm, 4) 20 mm < RR < 30 mm, 5) 30 mm < RR < 40 mm, 6) RR > 40 mm. Blue columns are for the period 1901–1930, brown columns are for 1990–2019. Green columns show the differences between the blue and brown columns (linear scale on the right).

Emeis, S., 2021, DOI: 10.1127/metz/2021/1053

Meteorologische Informationen für Energiesysteme

Vertikalprofile der
Windgeschwindigkeit

low-level jets

Windgeschwindigkeit
offshore

Windpark-Nachläufe (wakes)
vor allem offshore

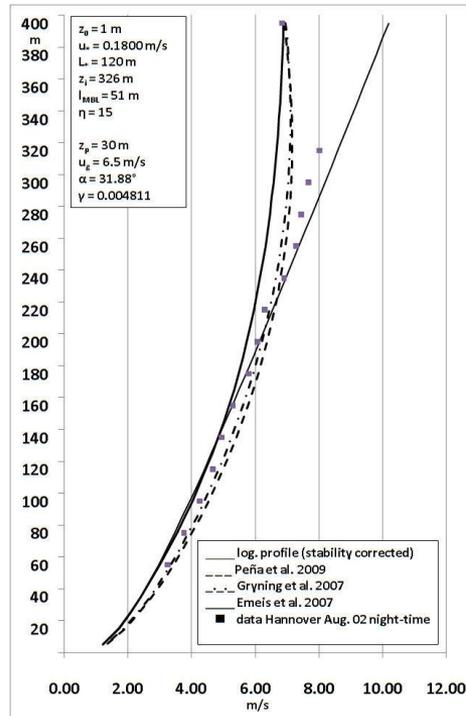
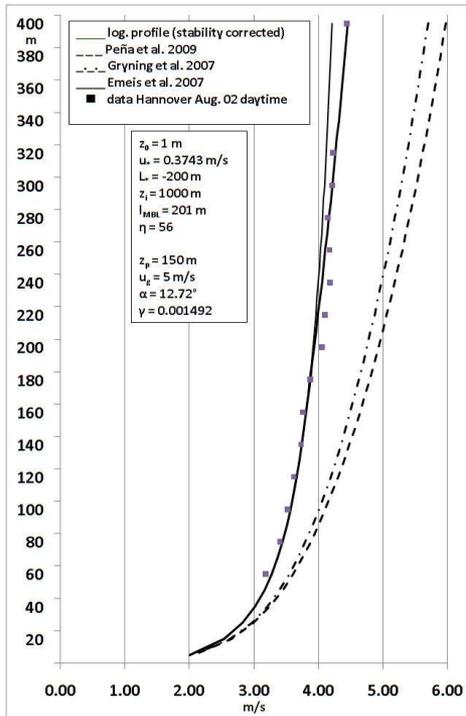
Schallausbreitung

Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit

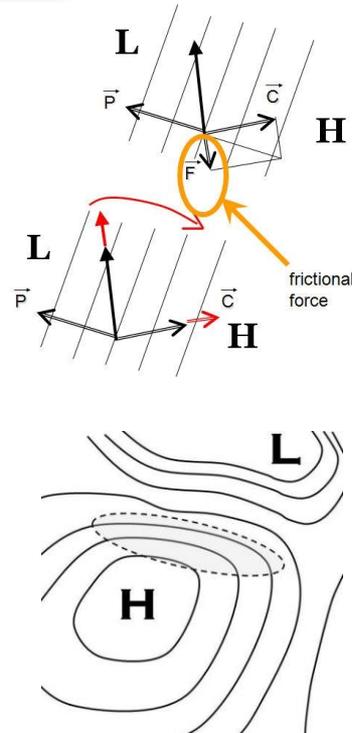
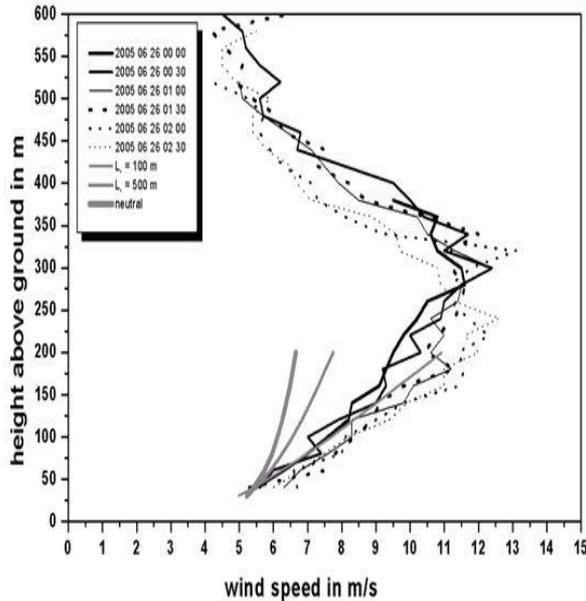
verschiedene Ansätze:

- logarithmisches Profil (formal auf die bodennahe Schicht bis ca. 80 m Höhe begrenzt)
- Potenzgesetz (empirisch, ohne formale Höhenbegrenzung)
- kombinierte Profile, die auch die Ekman-Schicht berücksichtigen

Messungen mit Windlidaren notwendig (Vorsicht in komplexem Gelände)



low-level jets



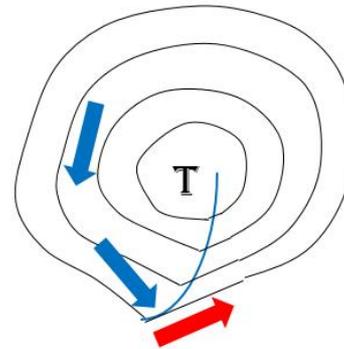
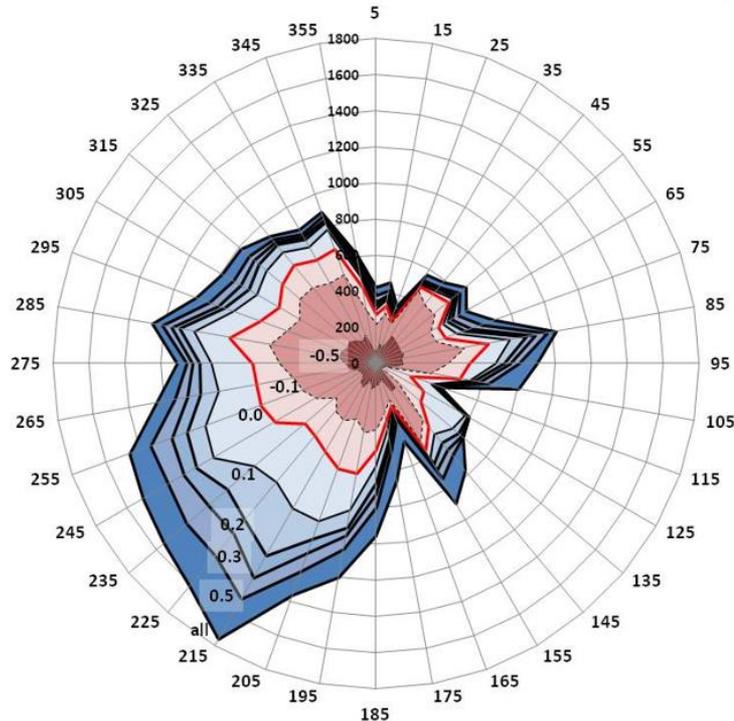
entstehen

beim Übergang Tag zu Nacht
(onshore)

beim Übergang Land zu kaltem Wasser
(offshore)

immer, wenn sich der Einfluss der
Bodenreibung auf das Windprofil
schlagartig ändert

Windgeschwindigkeit offshore

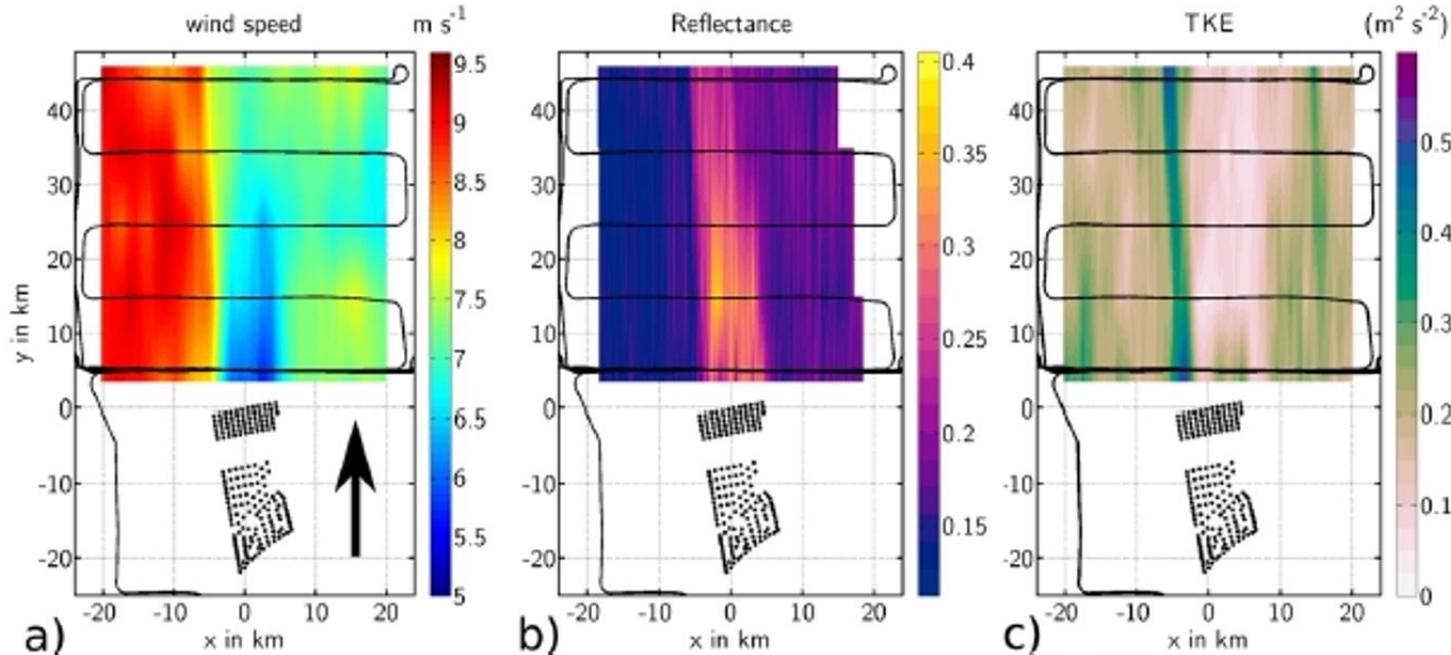


offshore:

kaum Tagesgang

dafür starke Korrelation
zwischen Windrichtung
und thermischer Stabilität,
d.h. dem Unterschied
zwischen Luft- und Wasser-
temperatur

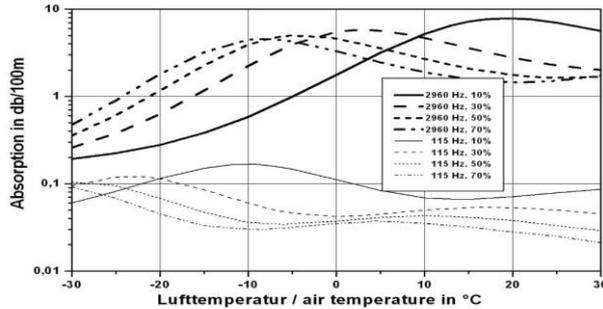
Windpark-Nachläufe (wakes) vor allem offshore



offshore:
bei stabiler
Schichtung
lange wakes
(mehr als 50 km)

Platis et al., 2018: Scientific Reports, 8, 2163. DOI:10.1038/s41598-018-20389-y

Schallausbreitung

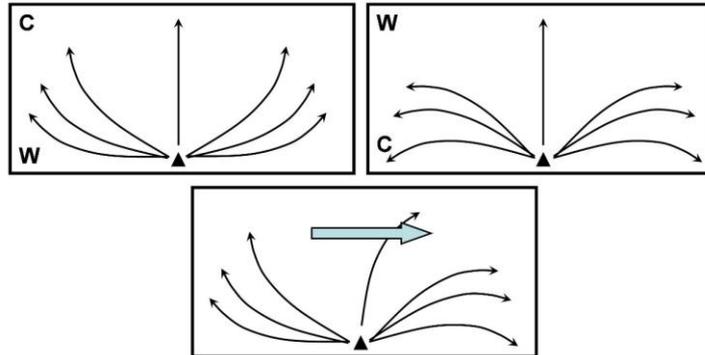


Schallausbreitung ist von den meteorologischen Bedingungen abhängig

Einflussfaktoren:

- Temperatur
- Temperaturschichtung
- Luftfeuchte
- Windprofil

kann mit Schallausbreitungsmodellen berechnet werden



Genauigkeit von Vorhersagemethoden

Mastmessungen vs.
Fernsondierung

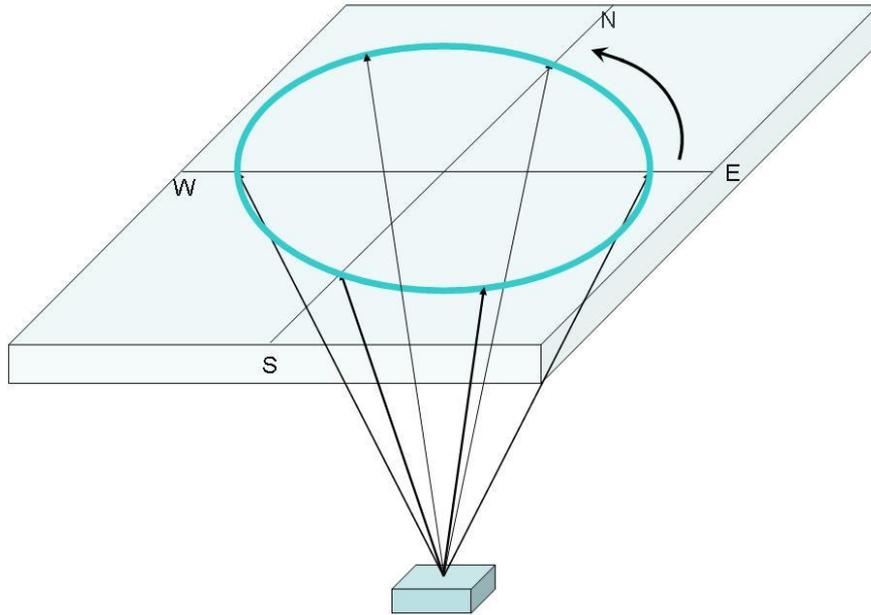
analytische Modelle
EFFWAKE

LES, CFD und mesoskalige
numerische Modelle

Kurzfristvorhersagen
(nowcasting)

generelle Entwicklung der
Wettervorhersagemodelle

Mastmessungen vs. Fernsondierung



Mastmessungen:

Punktmessung, in situ, Instrumente
im Windkanal kalibrierbar

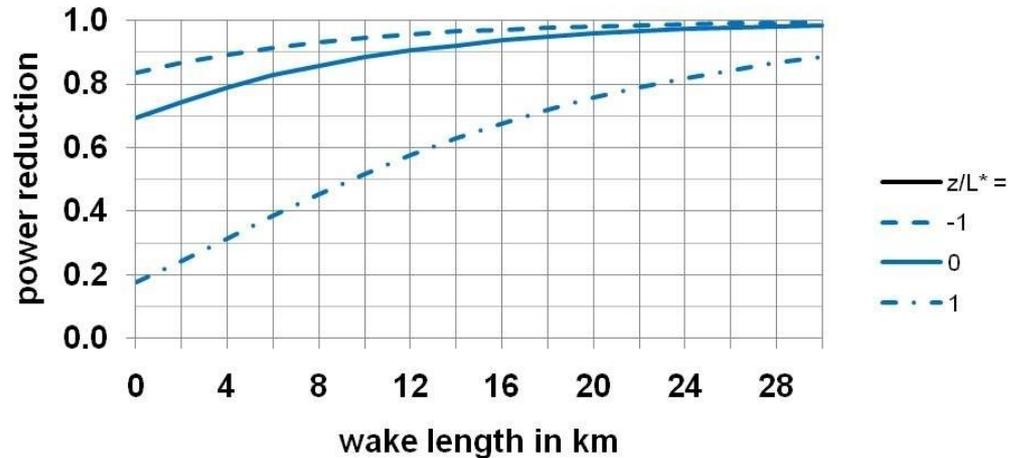
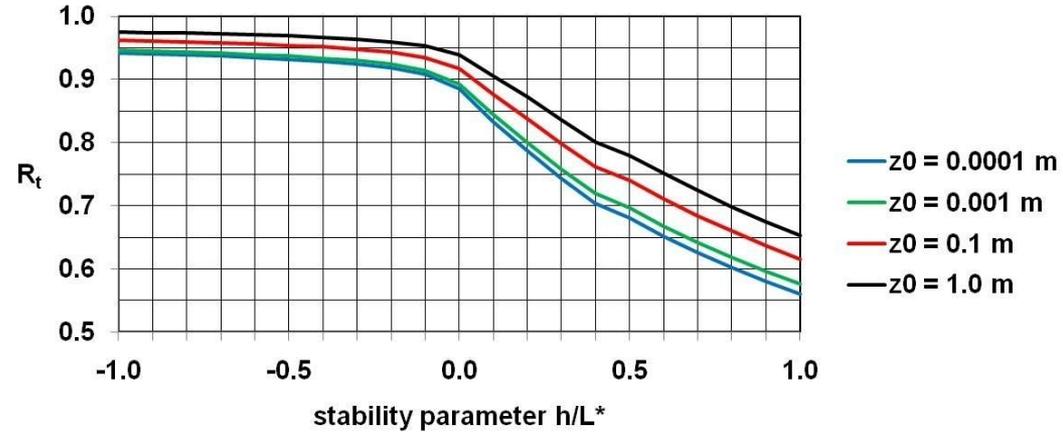
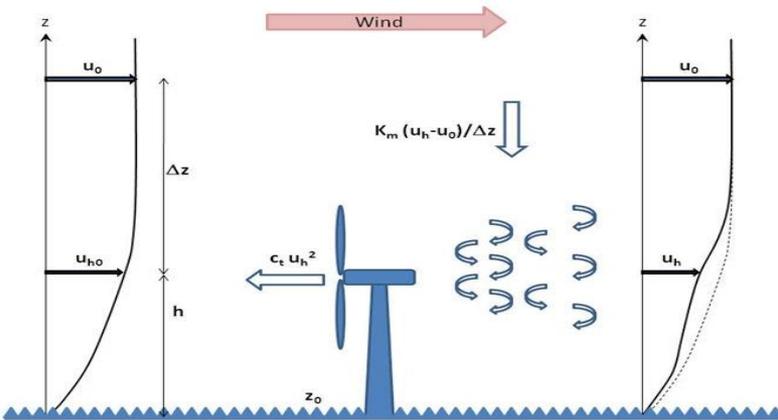
Fernsondierung:

Volumenmessung, vom Boden aus,
braucht Homogenitätsannahmen,
nicht kalibrierbar

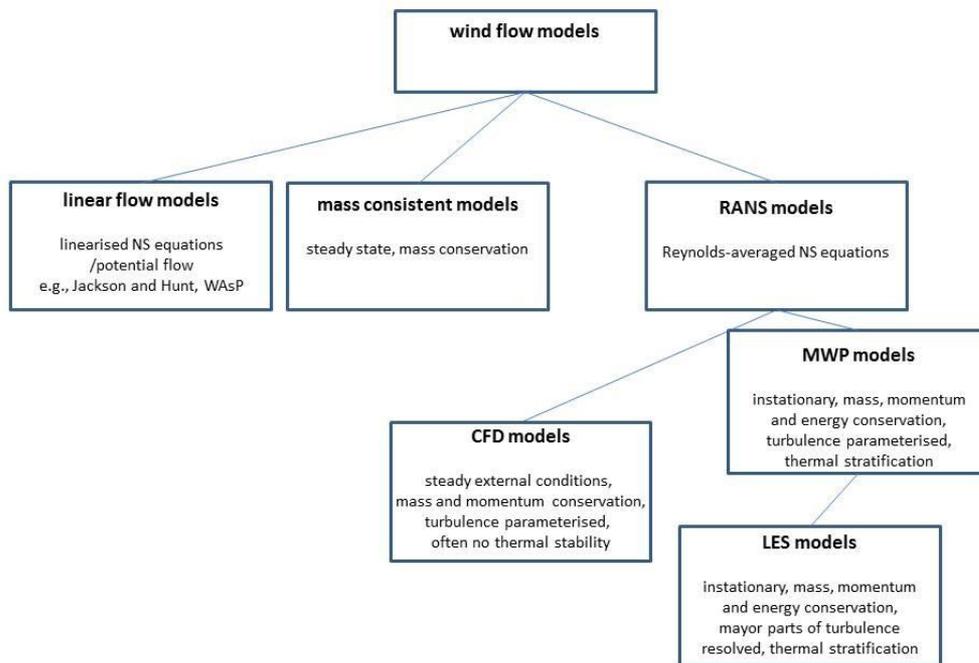
bei größeren Nabhöhen ist die
Fernsondierung dennoch im Vorteil

analytisches Modell EFFWAKE

einfaches Modell für unendlich großen Windpark, basiert auf Gleichgewicht von Impulsverbrauch und Nachlieferung durch Turbulenz



LES, CFD und mesoskalige numerische Modelle



Messungen können immer nur über einen begrenzten Zeitraum gemacht werden

für die Zukunft und für langfristige Aussagen brauchen wir die numerische Modellierung

- Vorhersagen
- Szenarienrechnungen
- Klimaänderungen

Kurzfristvorhersagen (nowcasting)

Vorhersageansätze

- Klima (langfristiges Mittel)
- Persistenz (morgen ist es so wie heute)
- Vorhersagemodell (am besten, braucht aber auch die aufwändigste Datenbasis)

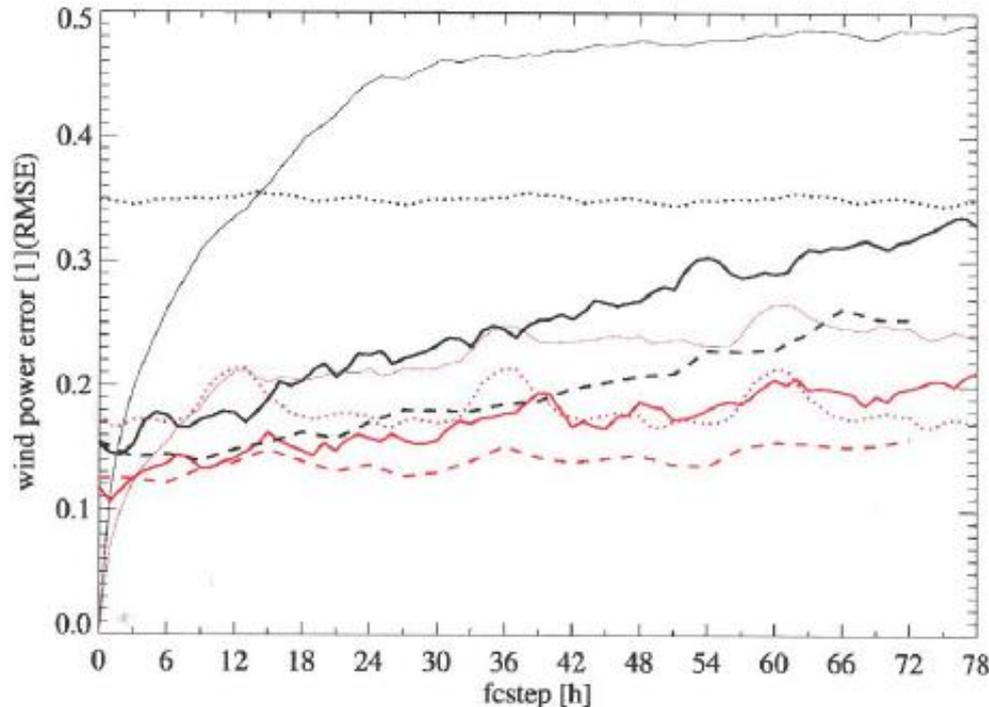
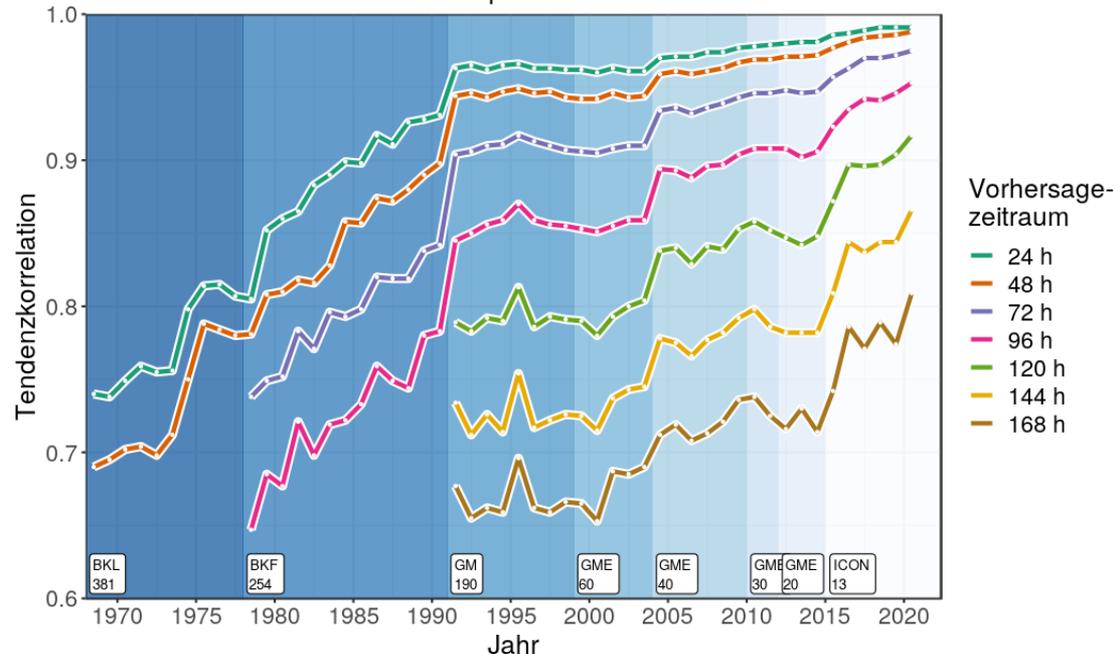


Fig. 5.7 aus von Bremen, L., A. Wessel, 2015: Kurzfrist-Windleistungsvorhersage. Promet 39, 181-192.

generelle Entwicklung der Wettervorhersagemodelle

Verifikationsergebnisse der Luftdruckvorhersage [N.N.]
Gebiet Nordatlantik und Mitteleuropa



in den letzten 50 Jahren wurden enorme Fortschritte bei den Vorhersagemodellen erzielt

- bessere Gleichungen (Fortschritt Theorie)
- bessere Eingangsdaten (Fortschritt Messgeräte)
- bessere Computersysteme (Fortschritt Elektrotechnik und Elektronik)

Meteorologische Daten für ein verbessertes Windparkmanagement

Nacellen-gestützte Lidar und Böenvorhersage

Kurzfristvorhersagen (genauer Tagesgang)

Tagesgänge der Windgeschwindigkeit onshore und ‚morning dip‘

Kurzfristvorhersagen (z.B. Überschreiten der cut-off Geschwindigkeit)

Vorhersage von Tropfenspektren (leading-edge erosion)

Vorhersage von Temperatur und Feuchte (icing)

Nacellen-gestützte Lidar und Böenvorhersage

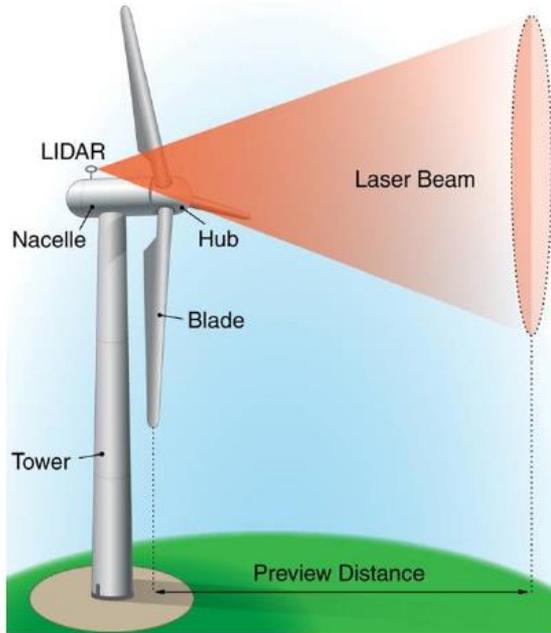


Fig. 4. Illustration showing a lidar mounted on top of the wind turbine nacelle showing a circular scanning pattern from a continuous-wave lidar. (Illustration by Al Hicks, NREL)

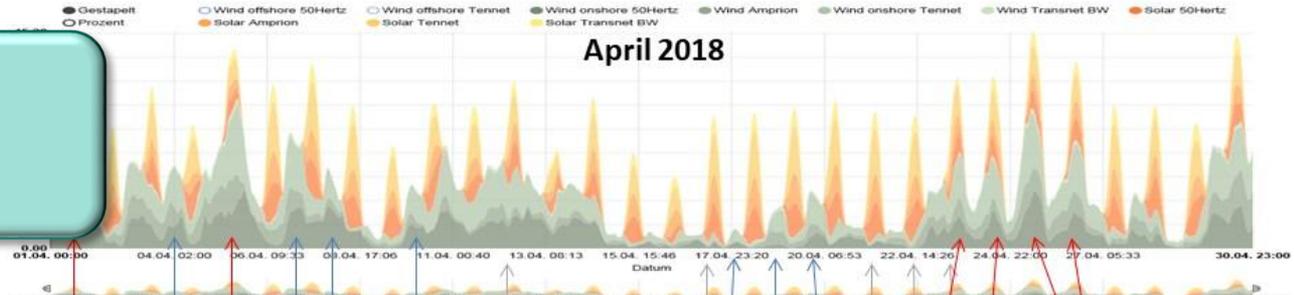
<https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65879.pdf>

kurzfristige Regulation der Blattparameter
zur Verringerung schädlicher Belastungen

Blick 200 m voraus, 10 m/s Windgeschwindigkeit

→ 20 Sekunden Reaktionszeit

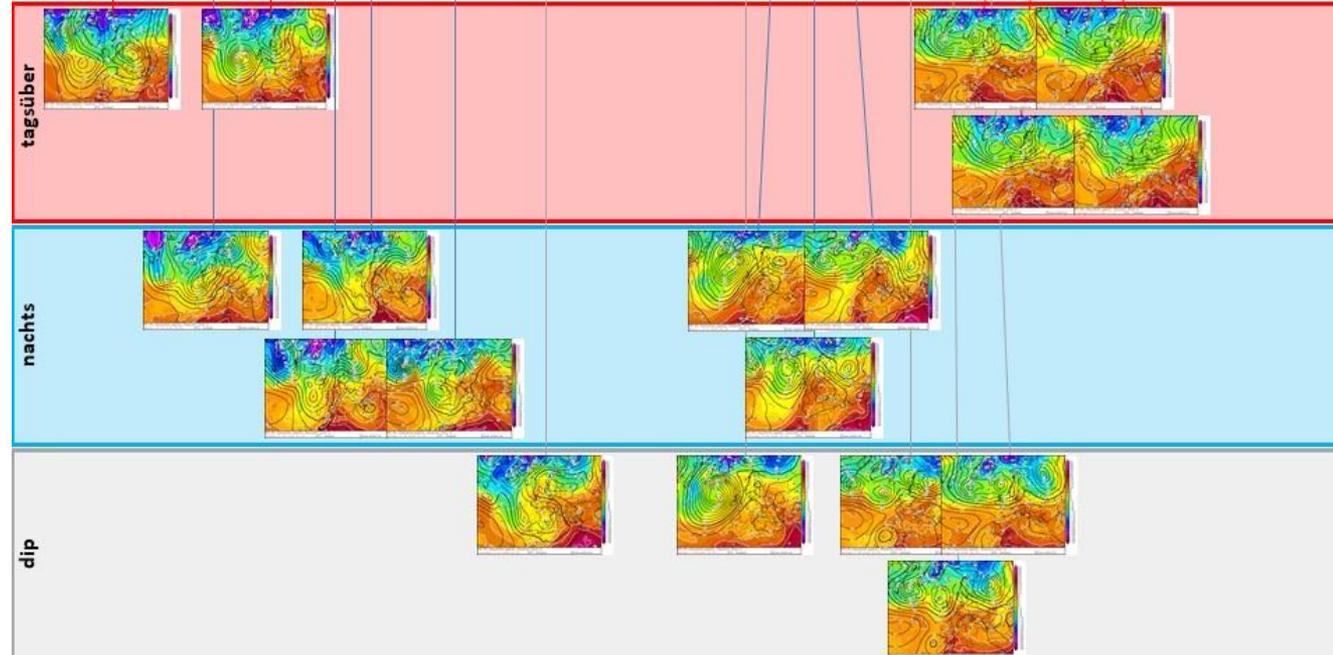
Kurzfristvorhersagen (genauer Tagesgang)



Tagesgang der
Winderträge sind
wetterlagenabhängig

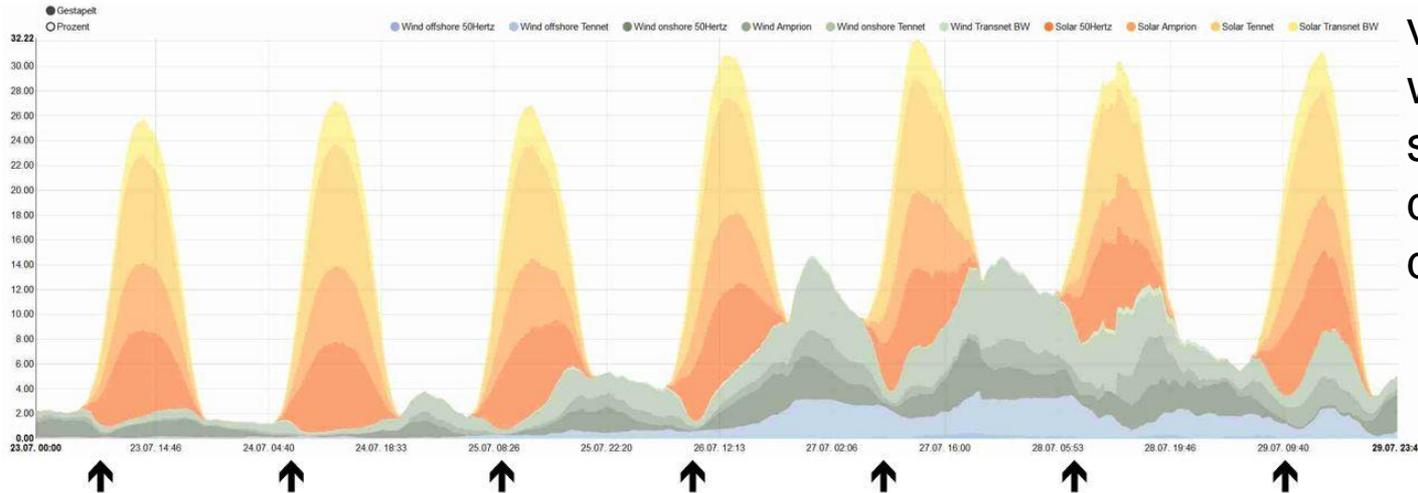
prinzipiell drei Typen:

- Max. tagsüber
- Max. nachts
- Dip morgens



Tagesgänge der Windgeschwindigkeit onshore und ‚morning dip‘

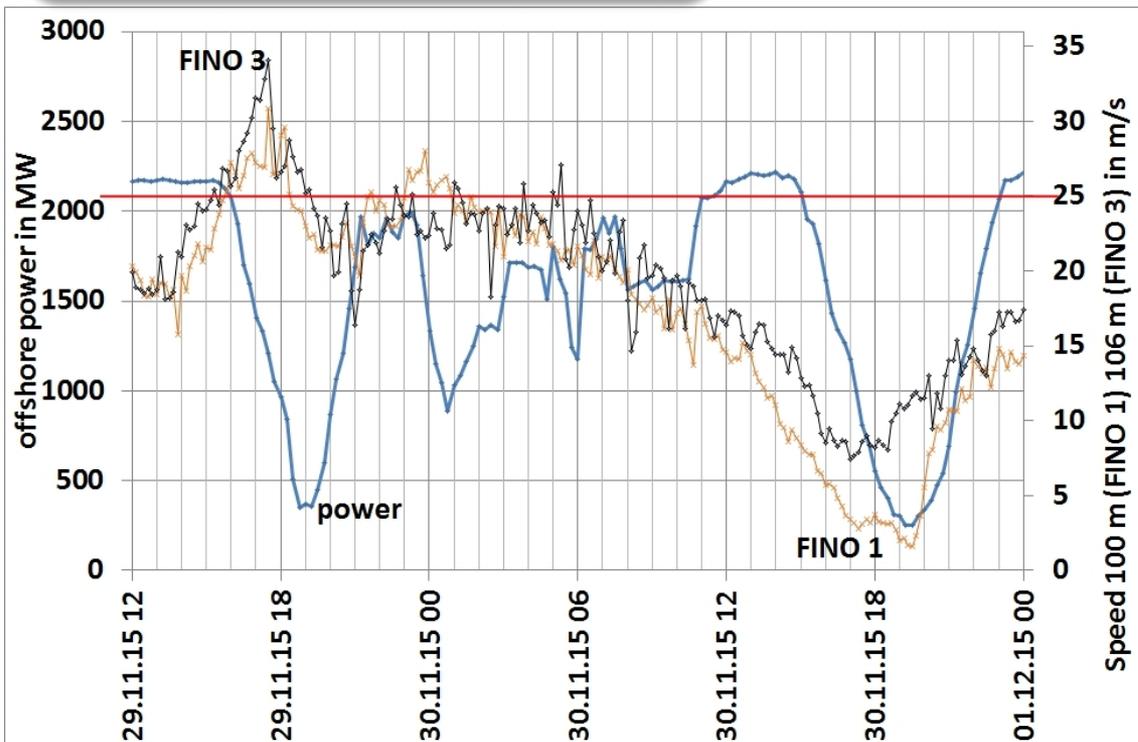
Low-level jets ↑, morning “dip” ↑



vor allem Hochdruckwetterlagen können sehr starke Tagesgänge der Windgeschwindigkeit hervorbringen

Wind energy (green and light blue) and solar (orange) yield in Germany
23 July 2018 to 29 July 2018 (<https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE&year=2018&week=30&source=sw>)

Kurzfristvorhersagen (z.B. Überschreiten der cut-off Geschwindigkeit)

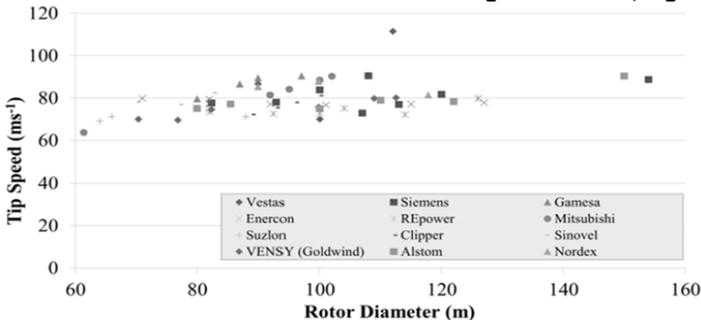


kurzfristige großflächige Überschreitung der cut-off Geschwindigkeit kann zu schweren Rückwirkungen auf das Stromnetz führen

Vorhersage von Tropfenspektren (leading-edge erosion)



Keegan et al. 2013, Fig. 3



Keegan et al. 2013, Fig. 2

Regentropfen und Hagelkörner beschädigen die Blattkanten von Rotorblättern der Windturbinen

Faktoren sind:

- Niederschlagsart
- Tropfengröße
- Blattgeschwindigkeit (tip speed)

Vorhersage möglich über:

- Niederschlagstyp (Schauer, Gewitter, Regen, ...)
- Temperatur
- Wetterlage

Vorhersage von Temperatur und Feuchte (icing)

Reifansatz (rime) und Eisbildung (glaze) schlecht für Aerodynamik und Gewichtsverteilung

Faktoren sind:

- Lufttemperatur (um oder unter 0°C)
- Luftfeuchte
- Vorhandensein von unterkühlten Tröpfchen

Vorhersage möglich über:

- Niederschlagstyp (Schauer, Gewitter, Regen, ...)
- Temperatur
- Wetterlage



<https://www.suisse-eole.ch/de/windenergie/einfluss-auf-menschen/eiswurf/>

FACHAUSSCHUSS Energiemeteorologie (ENMET)



DMG

Deutsche Meteorologische Gesellschaft



derzeit ausstehend: 6. Fachtagung Energiemeteorologie

Kontakt:

Vorsitzender

Dr. Detlev Heinemann

Universität Oldenburg

E-Mail: detlev.heinemann@uni-oldenburg.de

Stellvertretende Vorsitzende

Dr. Marion Schroedter-Homscheidt

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Vernetzte Energiesysteme, Oldenburg

E-Mail: Marion.Schroedter-Homscheidt@dlr.de

Jahrgang 39 Heft 3/4

promet

meteorologische fortbildung

Meteorologische Aspekte
der Nutzung erneuerbarer Energien



Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



Green Energy and Technology



Stefan Emeis

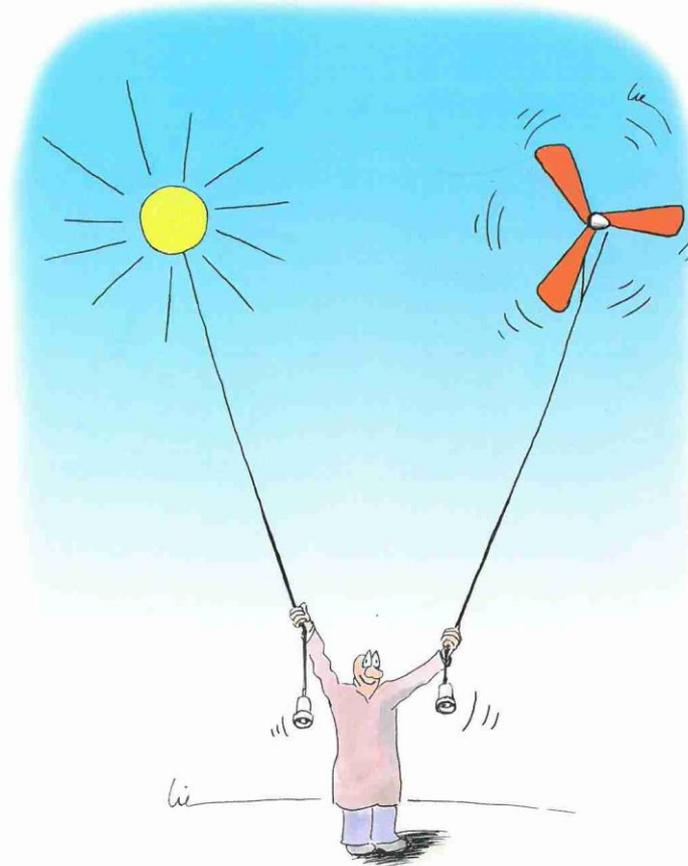
Wind Energy
Meteorology

Atmospheric Physics for Wind
Power Generation

 Springer

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

**Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit**



mit freundlicher Genehmigung
des Künstlers
Erik Liebermann