



AWES 2018 in Wien

15.03.2018

Simulation und Optimierung von Windparks

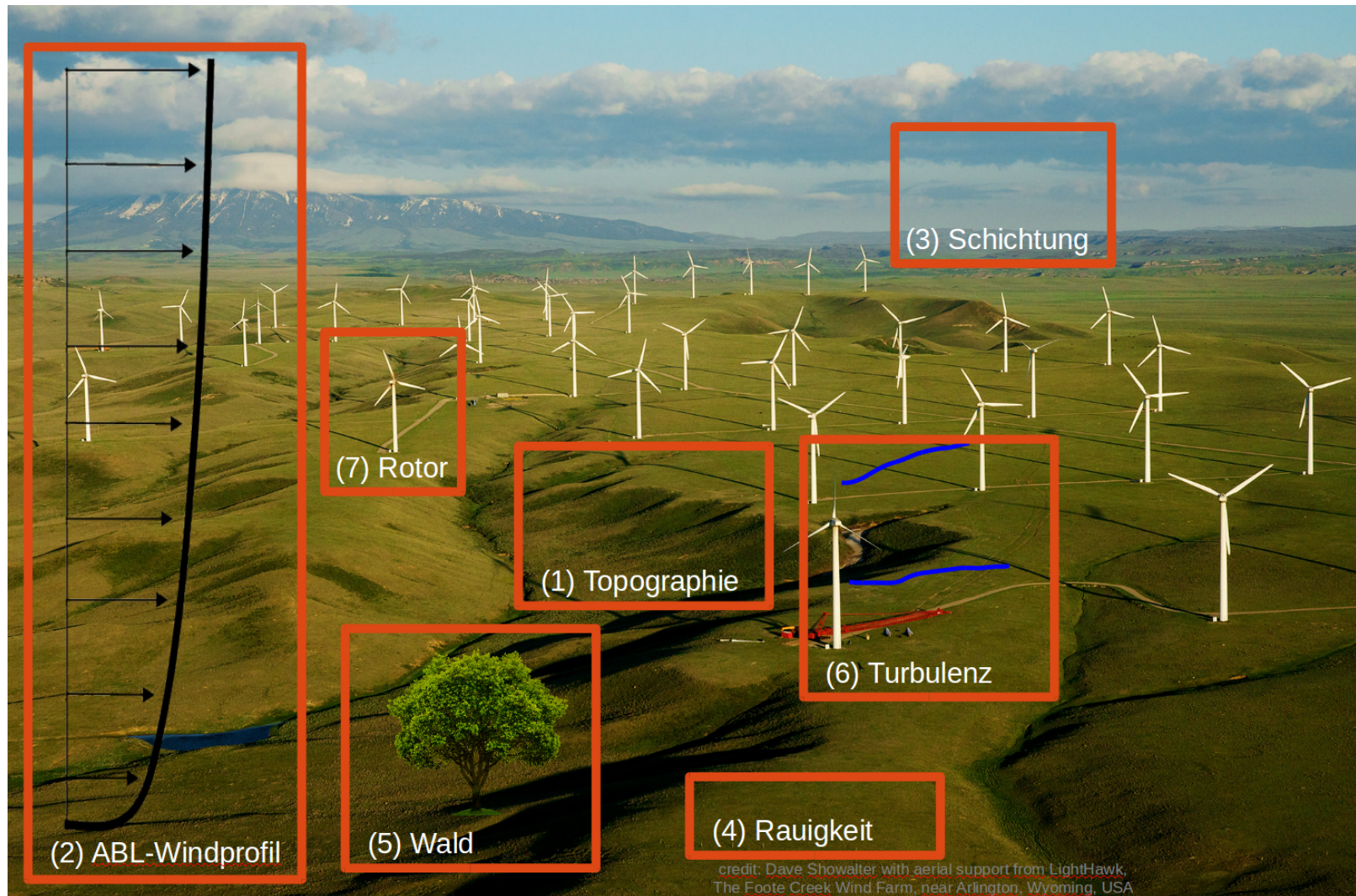
Dr. Jonas Schmidt, Hassan Kassem, Dr. Martin Dörenkämper,
Lukas Vollmer, Dr. Bernhard Stoevesandt



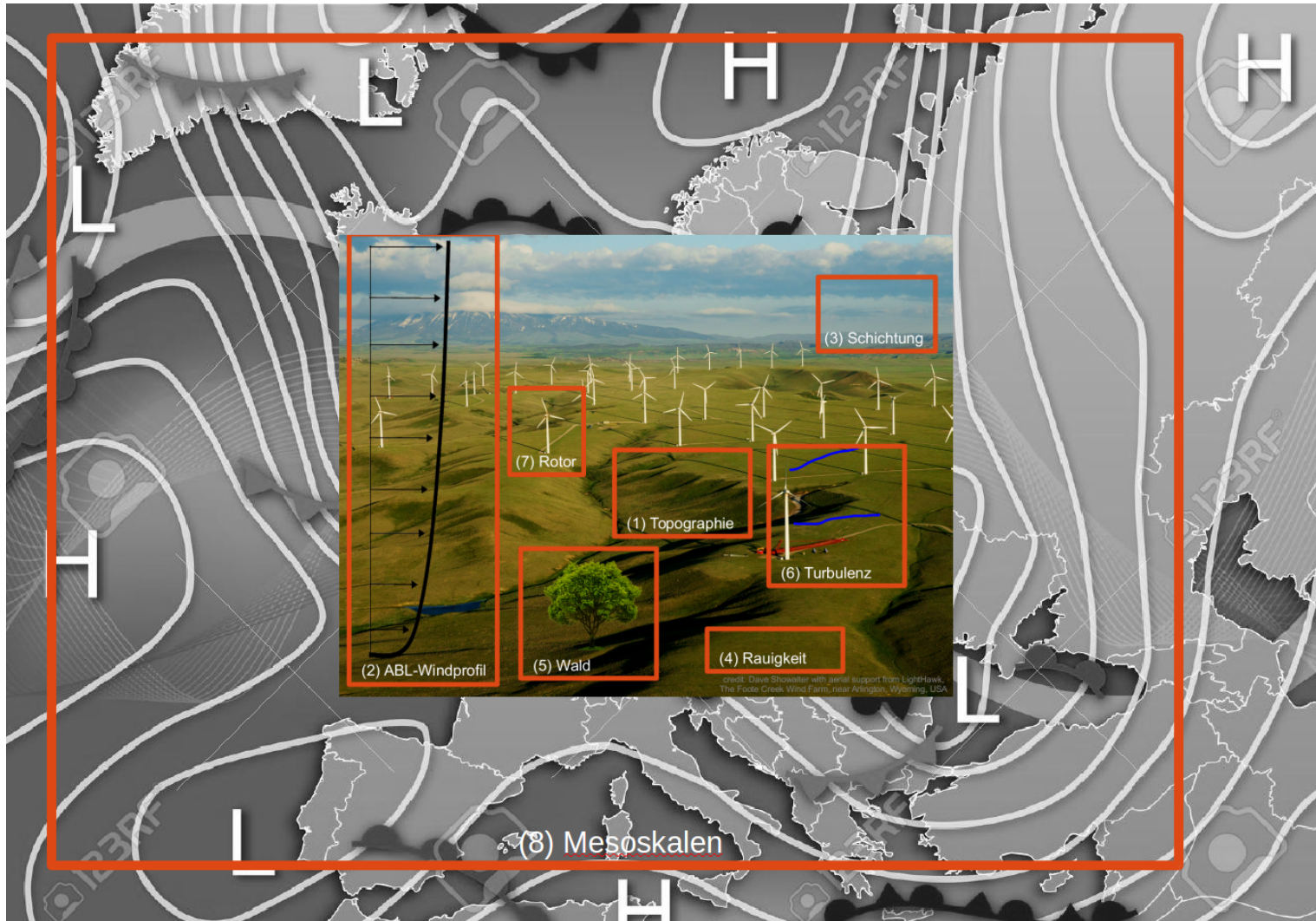
Inhalt

- Windparks aus Modellierungsperspektive
- Windparksimulation mittels CFD-Methoden
- Windparksimulation mittels einfacher Modelle
- Windparkoptimierung
- Zusammenfassung

Windparks aus Modellierungsperspektive



Windparks aus Modellierungsperspektive



Windparks aus Modellierungsperspektive

Modellierung = Konzentration auf das Wesentliche.

...aber welche Details sind wesentlich?

- ↖ Welche Zustände beschreiben die meteorologischen Gegebenheiten?
- ↖ Wie genau muss die Topographie aufgelöst sein?
- ↖ Welche Geländeeigenschaften spielen eine Rolle (Wald, Wasser, Wiesen)?
- ↖ Wie genau müssen Windenergieanlagen modelliert werden?
- ↖ Wie wichtig sind Nachlaufeffekte und Nachlauf-Überlagerungen?

...und wie schnell/günstig werden Ergebnisse benötigt?



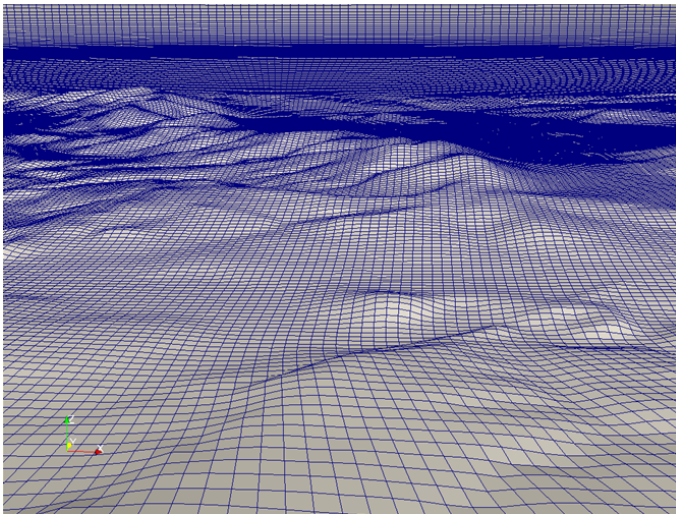
Inhalt

- ↪ Windparks aus Modellierungsperspektive
- ↪ **Windparksimulation mittels CFD-Methoden**
- ↪ Windparksimulation mittels einfacher Modelle
- ↪ Windparkoptimierung
- ↪ Zusammenfassung

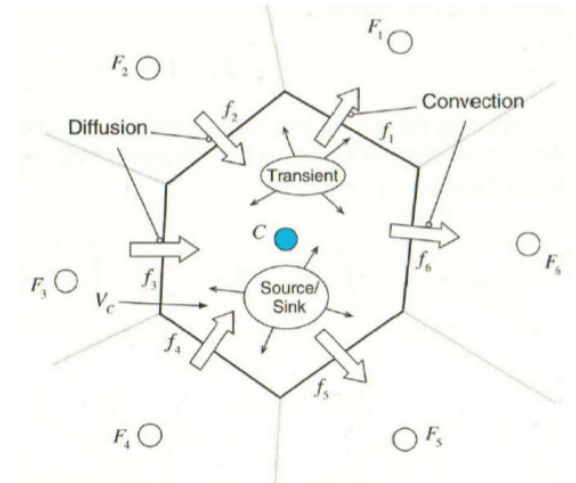
Windparksimulation mittels CFD

CFD = Computational Fluid Dynamics

- ↖ 3D-Gitter eines Volumens von vielen km³: ~10 Millionen Zellen
- ↖ Die Auflösung variiert innerhalb der Domäne: 1-100 m
- ↖ In jeder Zelle werden Strömungs- und Turbulenz-Gleichungen gelöst
- ↖ Typischerweise ~10 Stunden auf 24 Prozessoren



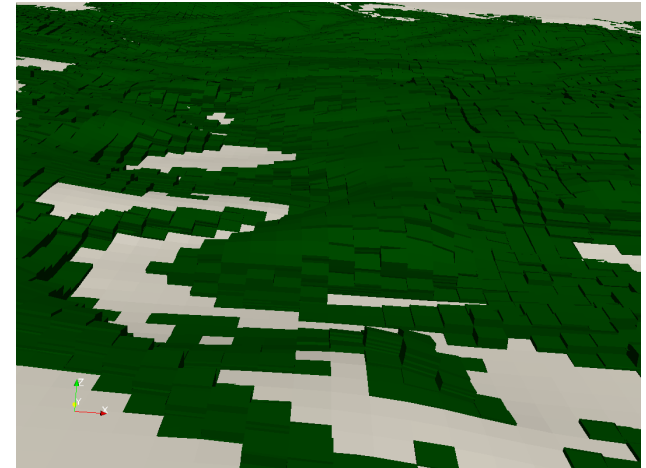
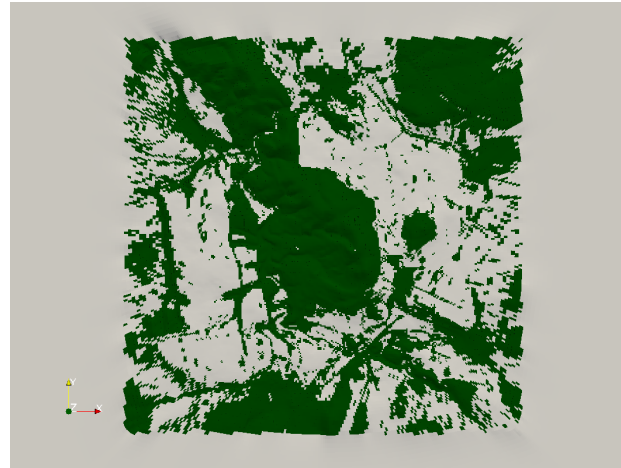
Mesh: IWES *terrainMesher*



Windparksimulation mittels CFD

Beispiel für CFD-Detailarbeit: **Waldmodelle**

Rödeser Berg, Kassel



$$F_{Di} = -C_{Di} \alpha(z) \rho |U| U_i$$

$$S_k = \rho C_{Di} \alpha(z) (\beta_P \frac{1}{3} |U|^3 - \beta_d |U| k)$$

$$S_\epsilon = \rho C_{Di} \alpha(z) (C_{\epsilon 4} \beta_P |U|^3 \epsilon / k - C_{\epsilon 5} \beta_d |U| \epsilon)$$

Model

Svensson (1990)

Green (1992)

Liu (1998)

Sanz (2003)

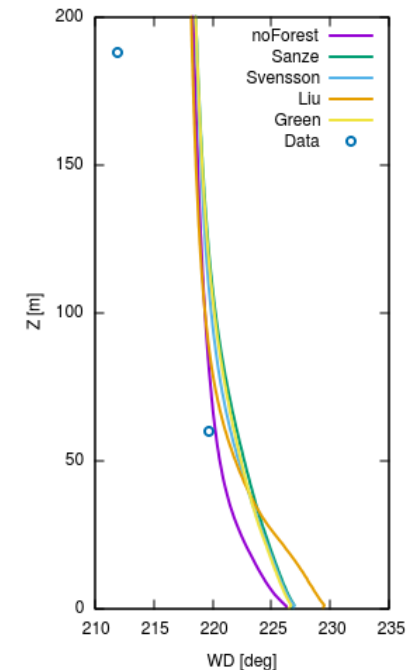
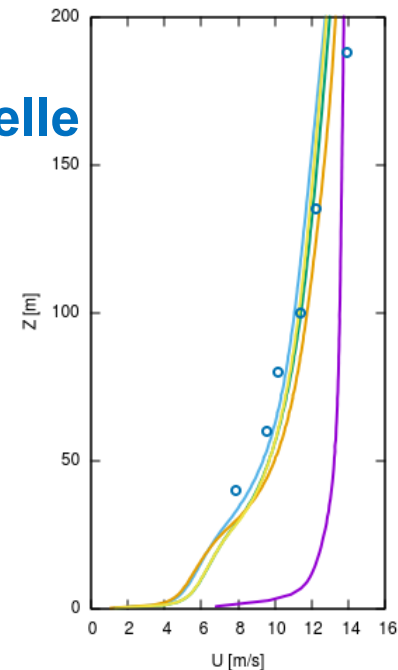
Lopez (2013)

Windparksimulation mittels CFD

Beispiel für CFD-Detailarbeit: **Waldmodelle**

Rödeser Berg, Kassel

(Daten von NEWA/Wakebench, 2018)



$$F_{\downarrow i} = -C_{\downarrow D} a(z) \rho |U| U_{\downarrow i}$$

$$S_{\downarrow k} = \rho C_{\downarrow D} a(z) (\beta_{\downarrow P} \uparrow |U|^{\uparrow 3} - \beta_{\downarrow d} |U| k)$$

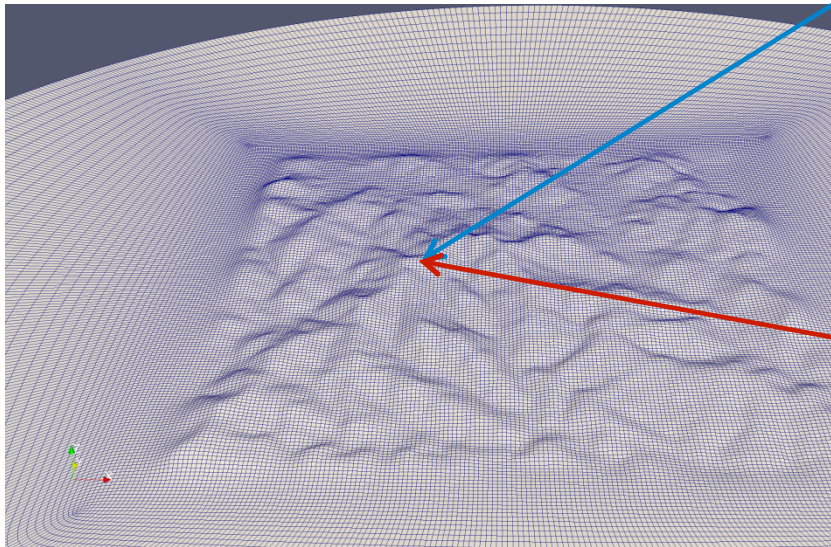
$$S_{\downarrow \epsilon} = \rho C_{\downarrow D} a(z) (C_{\downarrow \epsilon 4} \beta_{\downarrow P} |U|^{\uparrow 3} \epsilon/k - C_{\downarrow \epsilon 5} \beta_{\downarrow d} |U| \epsilon)$$

Model
Svensson (1990)
Green (1992)
Liu (1998)
Sanz (2003)
Lopez (2013)

Windparksimulation mittels CFD

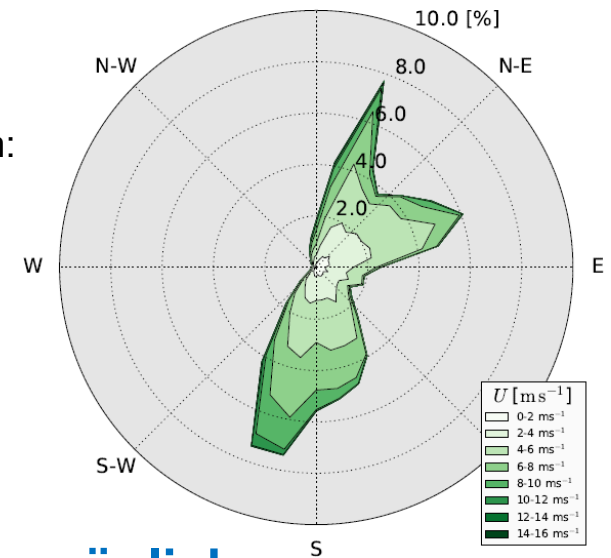
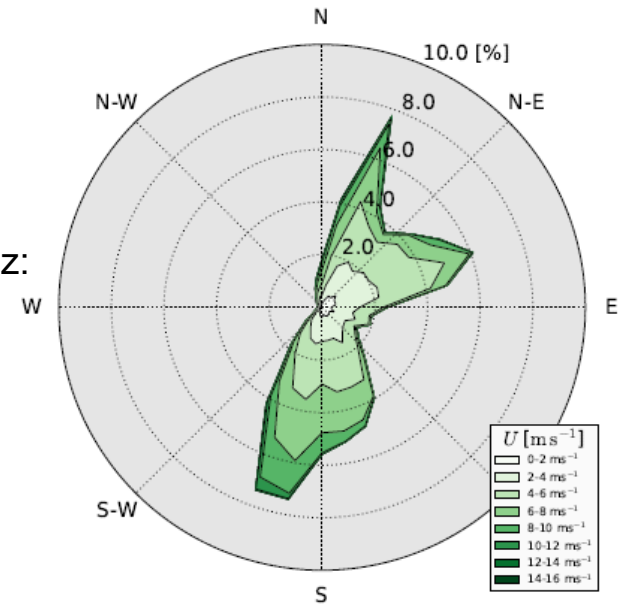
Simulation **Wind/Stabilitätsverteilung**

360 Zustände



Referenz:

Simulation:



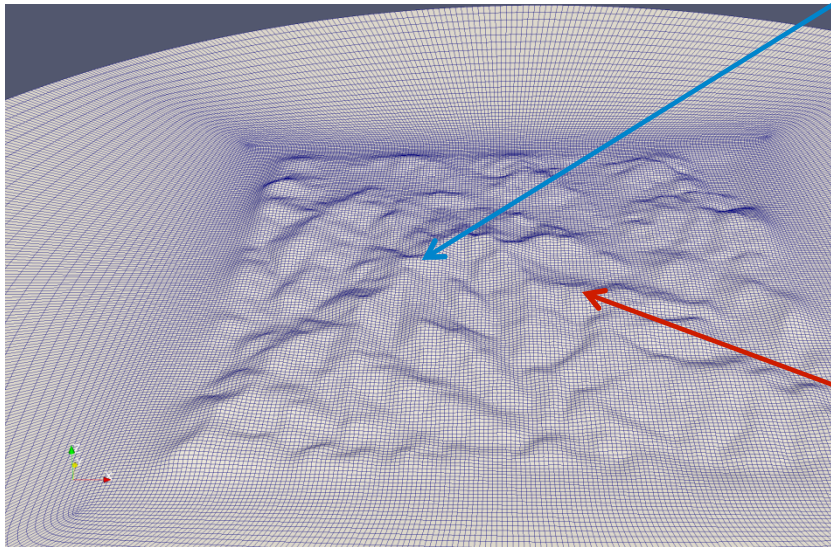
- ↪ Simuliere genügend Einlaufsituationen
- ↪ Auswertung der Frequenz am Referenzpunkt
- Gute Ergebnisse am Referenzpunkt sind **stets möglich**.

Mesh: IWES *terrainMesher*

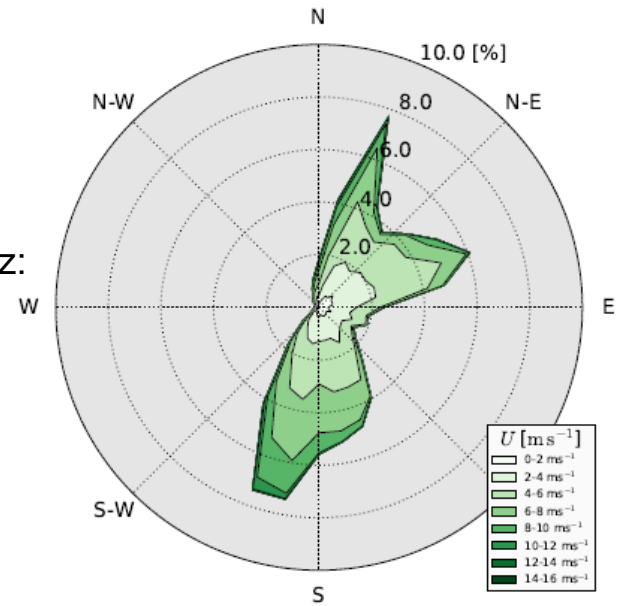
Windparksimulation mittels CFD

Simulation **Wind/Stabilitätsverteilung**

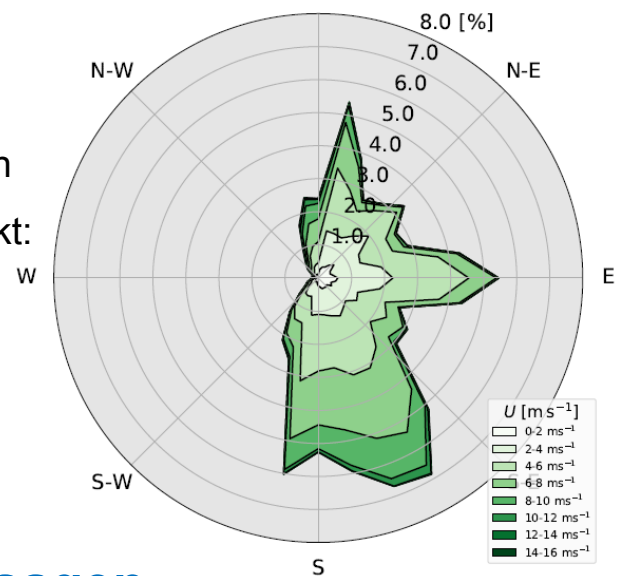
360 Zustände



Referenz:



Vorhersage an
anderem Punkt:



→ An allen anderen Punkten erhält man **Vorhersagen**.

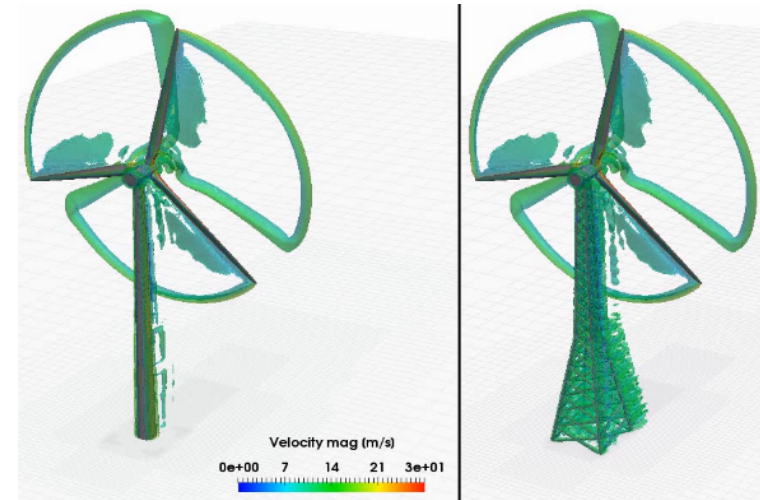
Mesh: IWES *terrainMesher*

Windparksimulation mittels CFD

Drei Methoden der Rotormodellierung:

a) Voll aufgelöster Rotor

- ↪ Instationär: URANS, LES, Hybrid
- ↪ Sehr viele Zellen, ungeeignet für Windparks



Windparksimulation mittels CFD

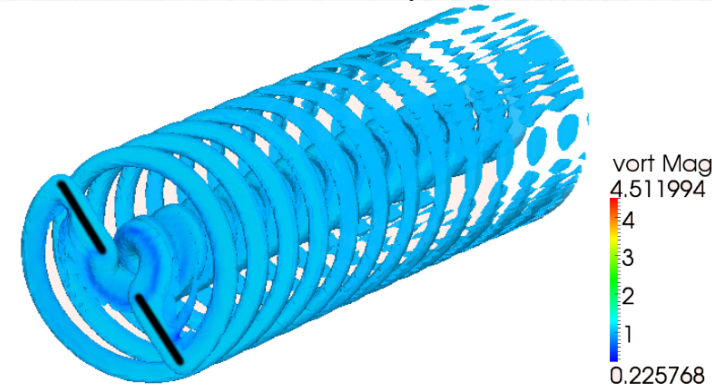
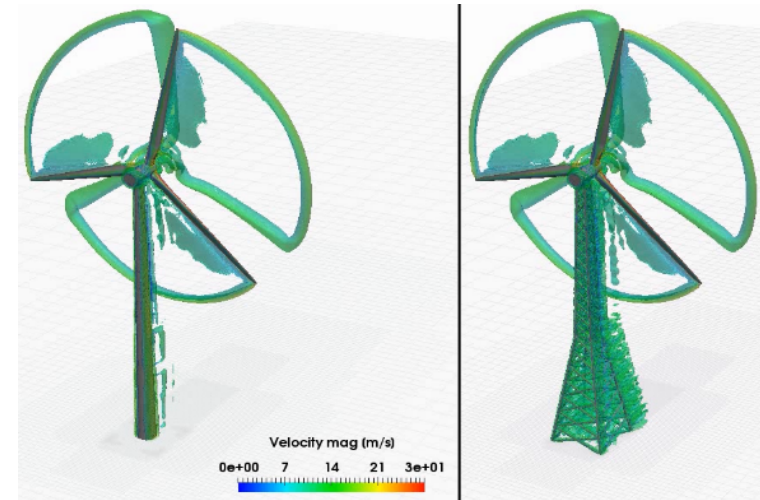
Drei Methoden der Rotormodellierung:

a) Voll aufgelöster Rotor

- ↪ Instationär: URANS, LES, Hybrid
- ↪ Sehr viele Zellen, ungeeignet für Windparks

b) Aktuator-Linien

- ↪ Instationär: URANS, LES
- ↪ Viele Zellen, sehr aufwändig für Windparks



Windparksimulation mittels CFD

Drei Methoden der Rotormodellierung:

a) Voll aufgelöster Rotor

- ↪ Instationär: URANS, LES, Hybrid
- ↪ Sehr viele Zellen, ungeeignet für Windparks

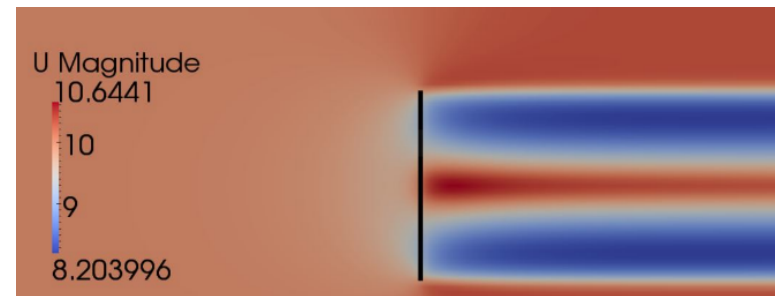
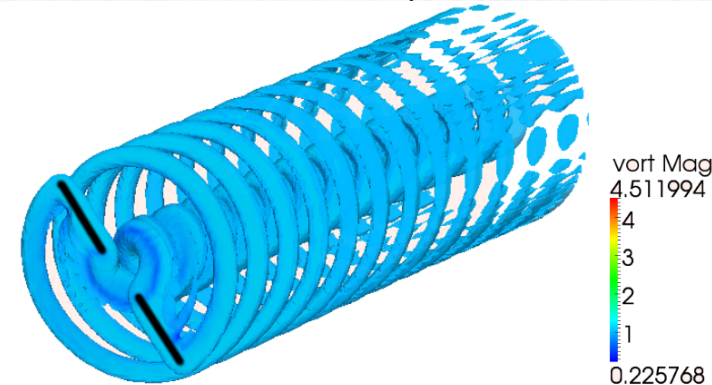
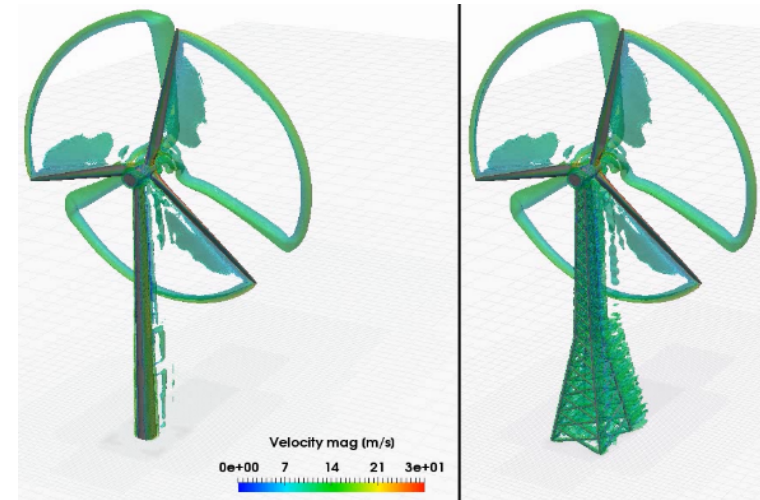
b) Aktuator-Linien

- ↪ Instationär: URANS, LES
- ↪ Viele Zellen, sehr aufwändig für Windparks

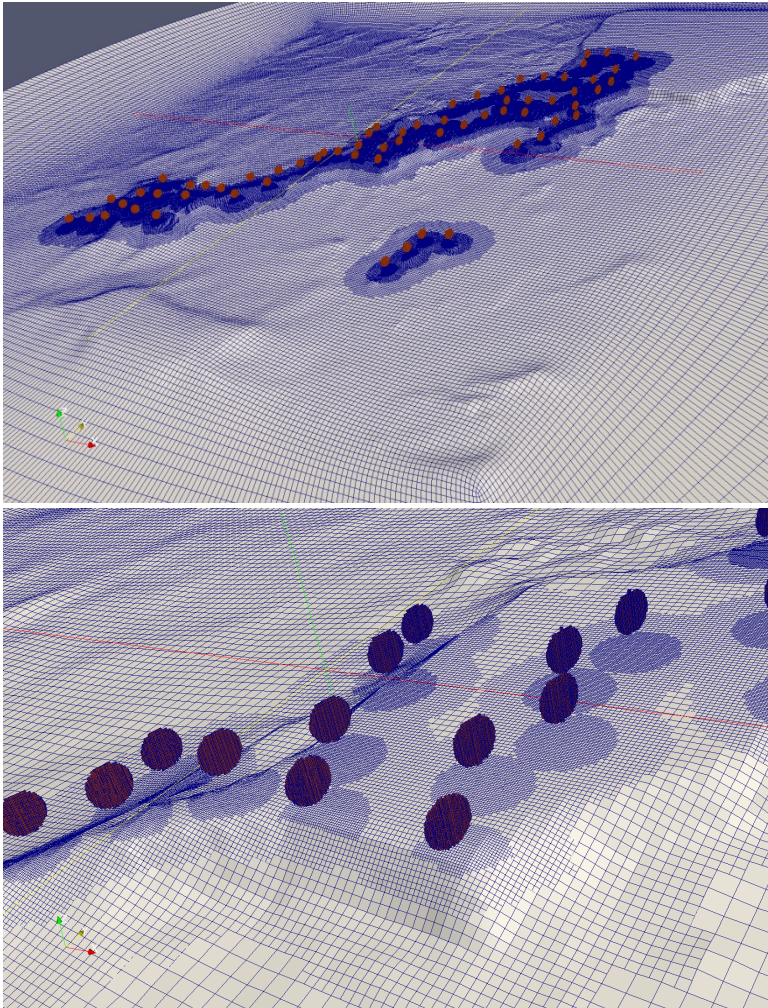
c) Aktuator-Scheibe

- ↪ Stationär: RANS
- ↪ Vergleichsweise wenig Zellen

↪ **Gut geeignet für Windparks**

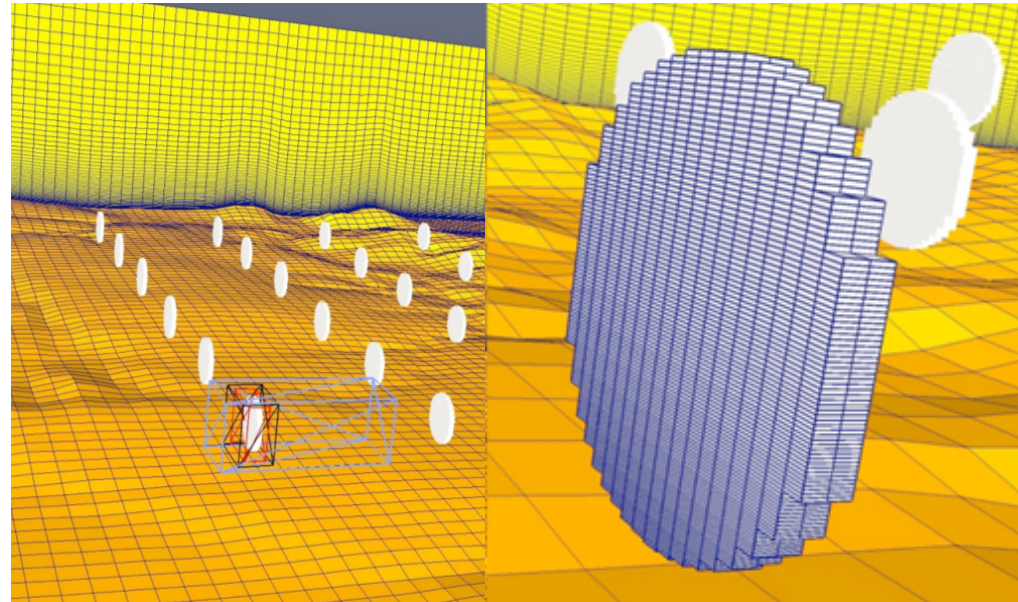


Windparksimulation mittels CFD

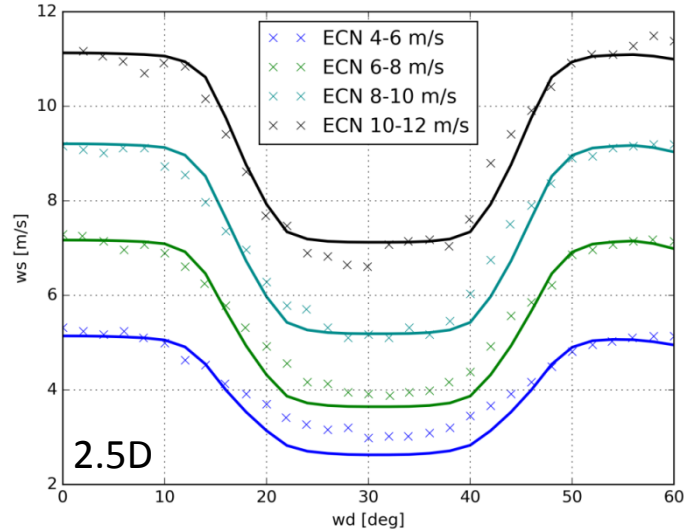
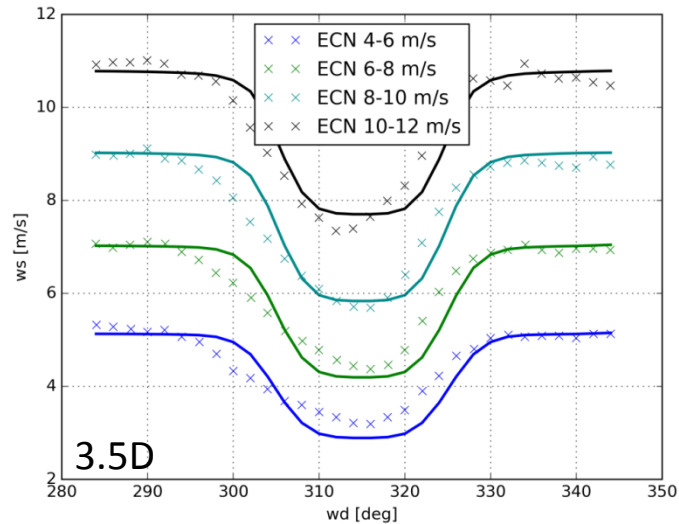


Aktuator-Scheibe

- ↪ Geschachtelte Zellverfeinerung am Rotor
- ↪ In den Rotorzellen wirken Kraftterme
- ↪ Guter „Fern“-Nachlauf (ab $\sim 2D$ Abstand)



Windparksimulation mittels CFD



Aktuator-Scheibe

- Geschachtelte Zellverfeinerung am Rotor
- In den Rotorzellen wirken Kraftterme
- Guter „Fern“-Nachlauf (ab $\sim 2D$ Abstand)

Wieringermeer, Niederlande. (Daten von Schepers et al.

2012)

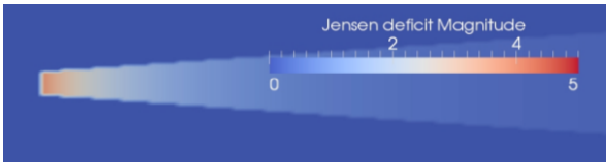


Inhalt

- ↪ Windparks aus Modellierungsperspektive
- ↪ Windparksimulation mittels CFD-Methoden
- ↪ **Windparksimulation mittels einfacher Modelle**
- ↪ Windparkoptimierung
- ↪ Zusammenfassung

Windparksimulation mittels einfacher Modelle

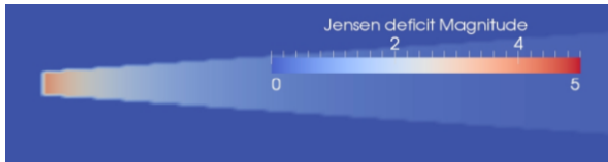
- ↪ Einfache Modelle lösen *kein* komplexes Differentialgleichungssystem in großen 3D-Rechengittern
- ↪ Häufig keine Differentialgleichung → *Lokale* Auswertung einer Formel
- ↪ Beispiel: Jensen-Nachlaufmodell



$$\Delta \mathbf{v} = - \left(\frac{1 - \sqrt{1 - c_t}}{(D_w/D)^2} \right) v_{\text{eff}} \mathbf{e}_x$$
$$D_w(x) = D + 2kx$$

Windparksimulation mittels einfacher Modelle

- ↪ Einfache Modelle lösen *kein* komplexes Differentialgleichungssystem in großen 3D-Rechengittern
- ↪ Häufig keine Differentialgleichung → *Lokale* Auswertung einer Formel
- ↪ Beispiel: Jensen-Nachlaufmodell



$$\Delta \mathbf{v} = - \left(\frac{1 - \sqrt{1 - c_t}}{(D_w/D)^2} \right) v_{\text{eff}} \mathbf{e}_x$$
$$D_w(x) = D + 2kx$$

- ↪ Für jedes physikalische Phänomen wird ein Modell benötigt:

Einzelnachlauf-Defizit, Einzelnachlauf-Turbulenzintensität, Nachlaufüberlagerung, Teilnachlauf, Topographiekorrektur, thermische Effekte, ...

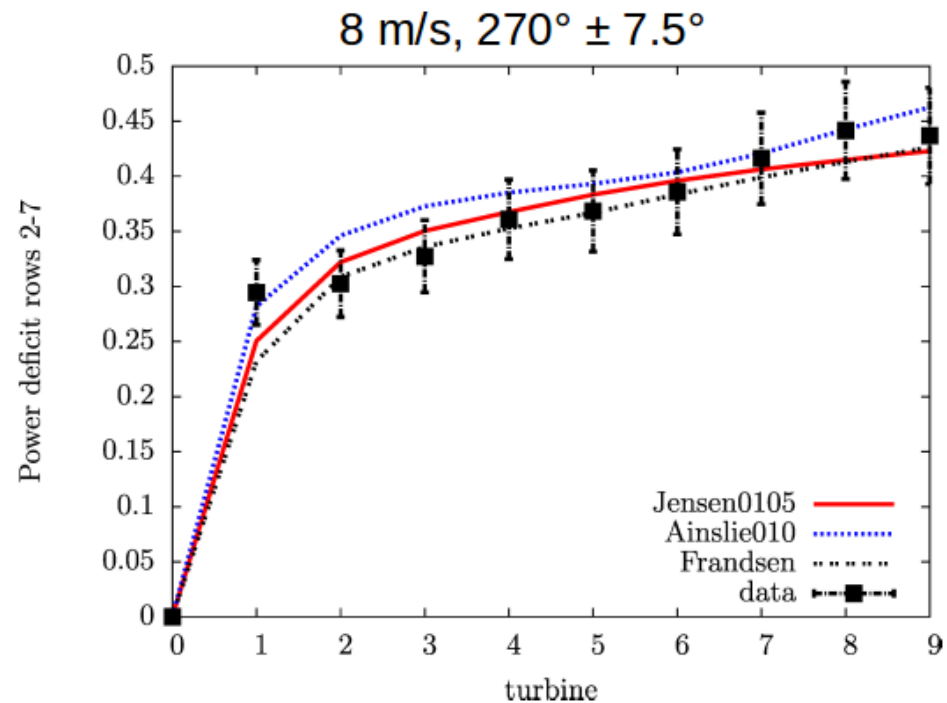
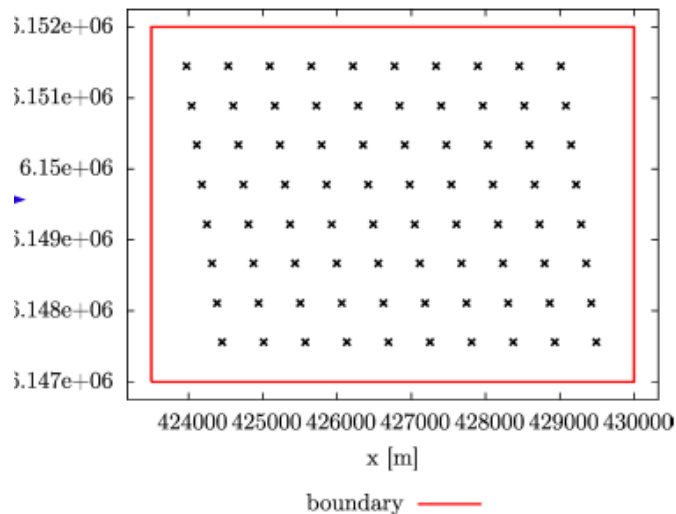
→ Einfache Modelle sind *schnell*, aber *inkonsistent*.

Windparksimulation mittels CFD

Wie gut sind einfache Modelle?

Das kommt auf den Einzelfall an, *nicht immer* schlechter als CFD.

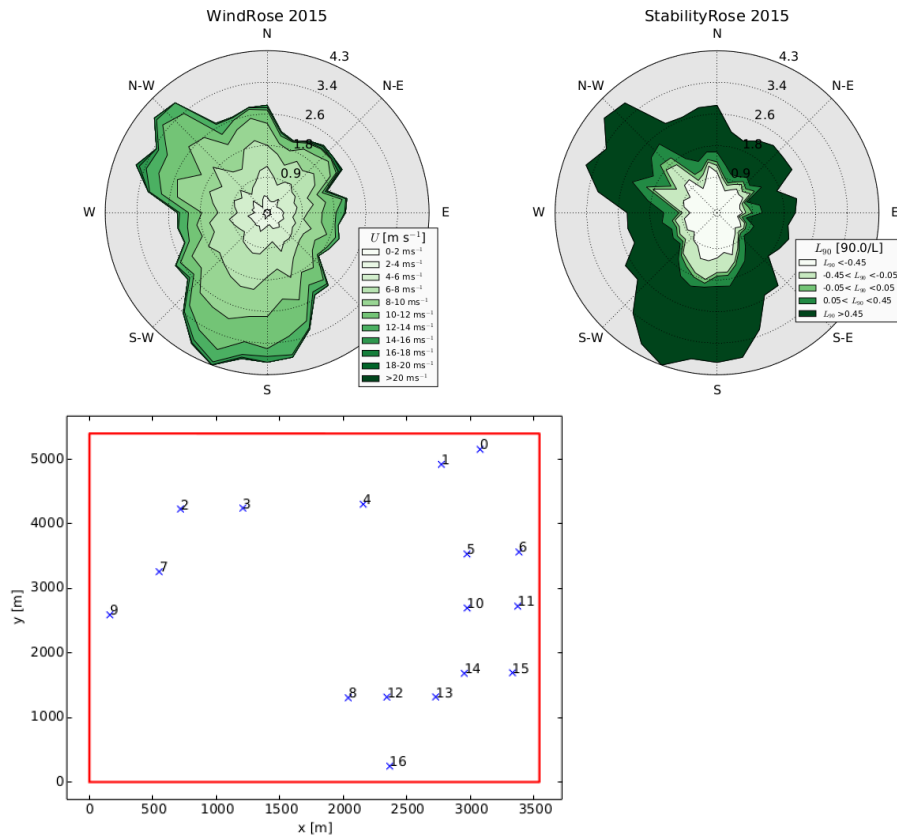
Wind farm Horns Rev 80 Turbines



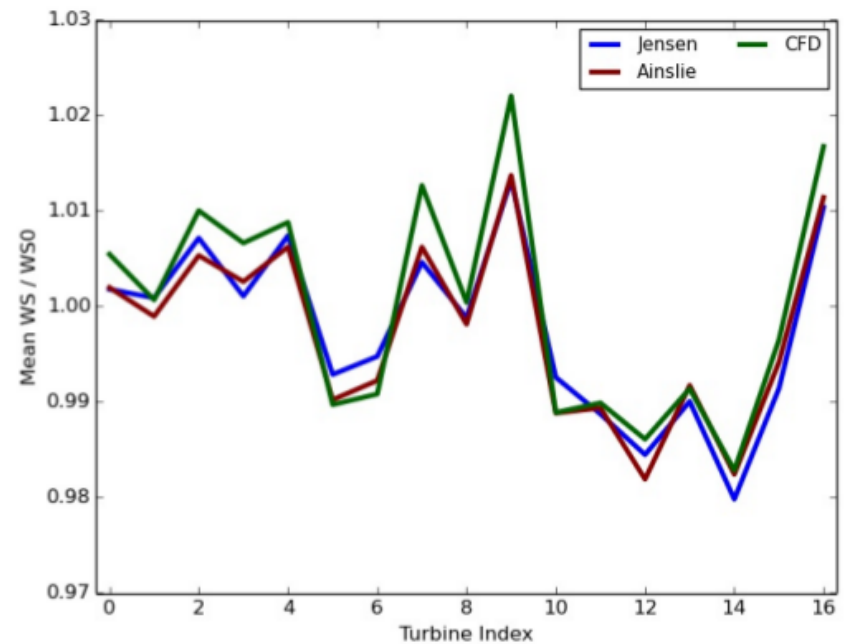
Windparksimulation mittels CFD

Wie gut sind einfache Modelle?

Das kommt auf den Einzelfall an, *nicht immer* schlechter als CFD.



Unterschied CFD vs. Jensen:





Inhalt

- Windparks aus Modellierungsperspektive
- Windparksimulation mittels CFD-Methoden
- Windparksimulation mittels einfacher Modelle
- **Windparkoptimierung**
- Zusammenfassung

Windparkoptimierung

**Optimierung = Auswahl besserer Werte der Optimierungsvariablen,
so dass diese den Wert der gewählten Zielfunktion verringern.**

Typische Zielfunktionen f :

- ↖ Annual Energy Production AEP: $f = \text{constant} / \text{energy}$
- ↖ Cost of Energy CoE: $f = \text{investment} / \text{yield}$
- ↖ Levelized Cost of Energy LCOE: $f = (\text{investment} + \text{O\&M}) / \text{yield}$

Typische zusätzlich zu erfüllende Optimierungsbedingungen:

- ↖ Damage Equivalent Loads jeder WEA unterhalb gegebener Schwelle
- ↖ Minimaler Turbinenabstand nicht überschritten
- ↖ Geräuschentwicklung, Umwelteinwirkung, andere Vorgaben...

Windparkoptimierung

Einfachster Fall:

Eine Windrichtung

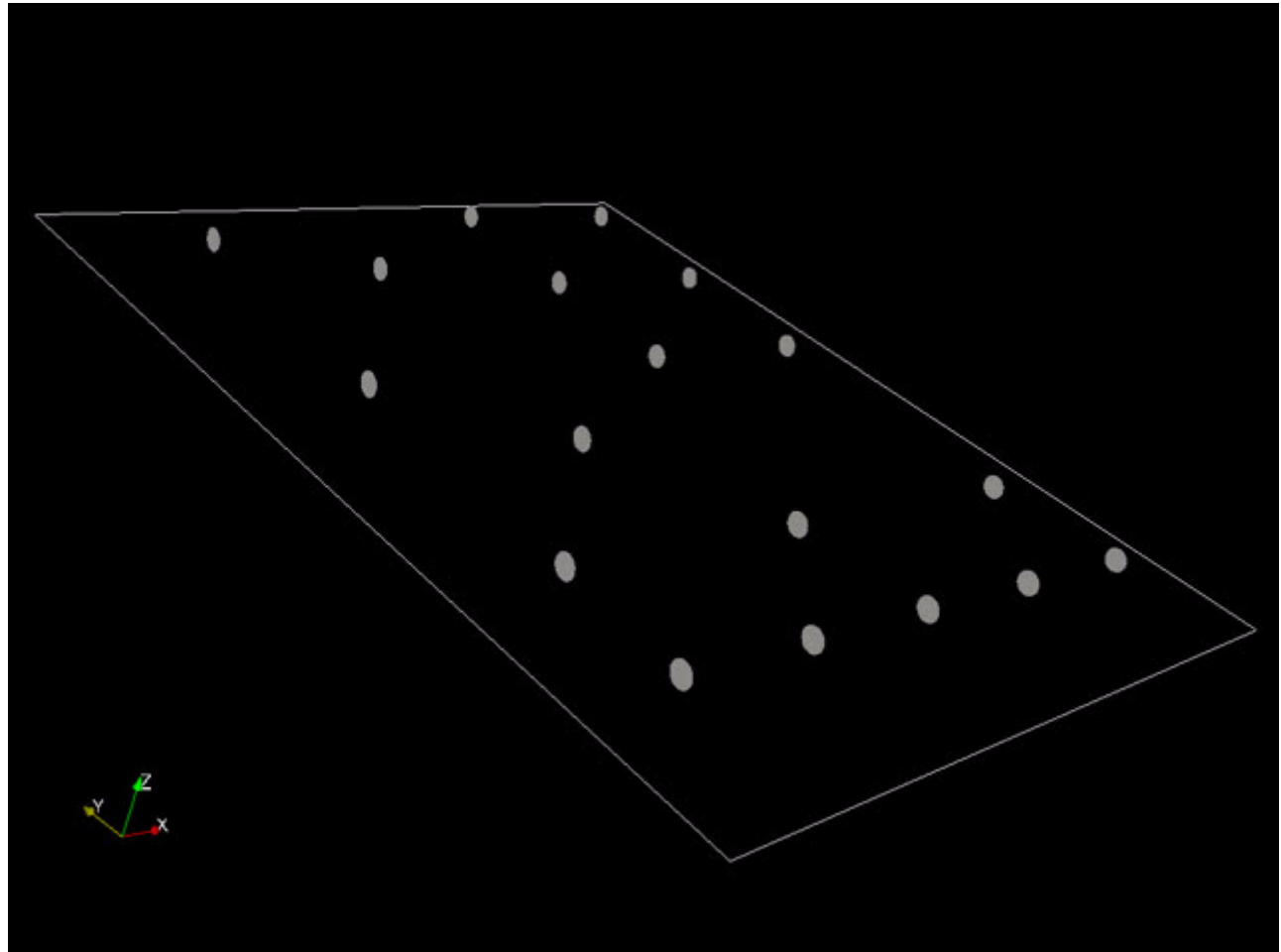
Flaches Gelände

Analytisches Wakemodell

Zielfuntion AEP

Geometrische Constraints

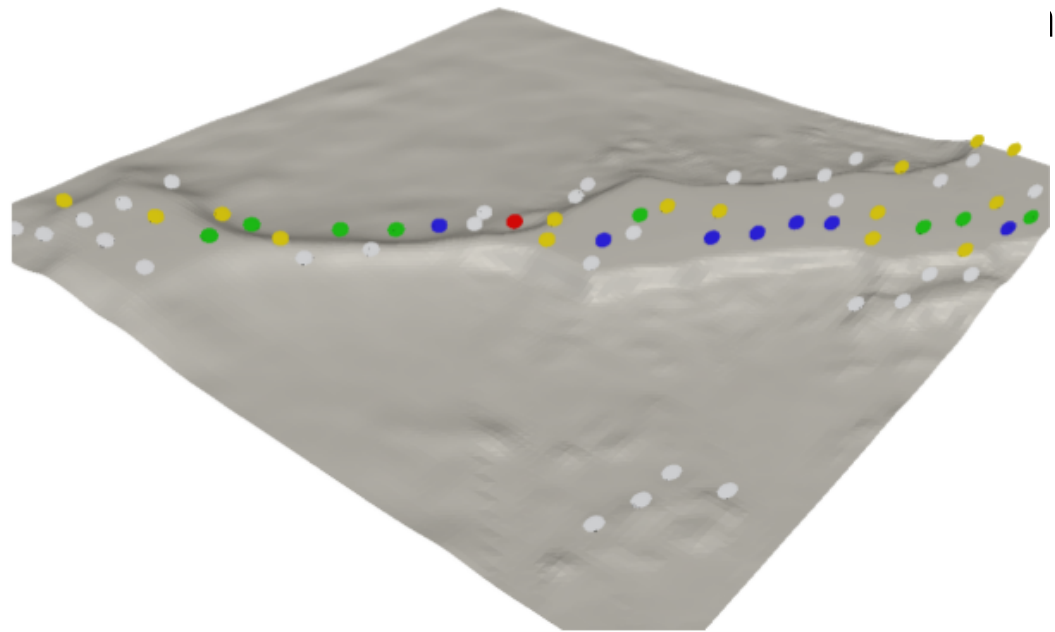
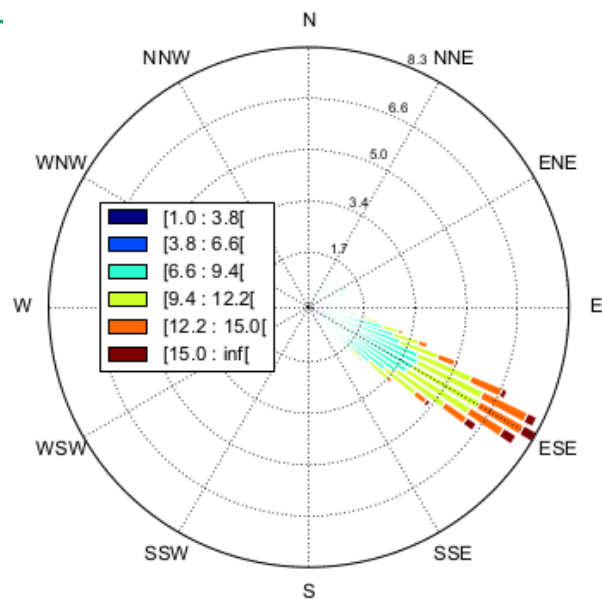
Lokale Optimierung



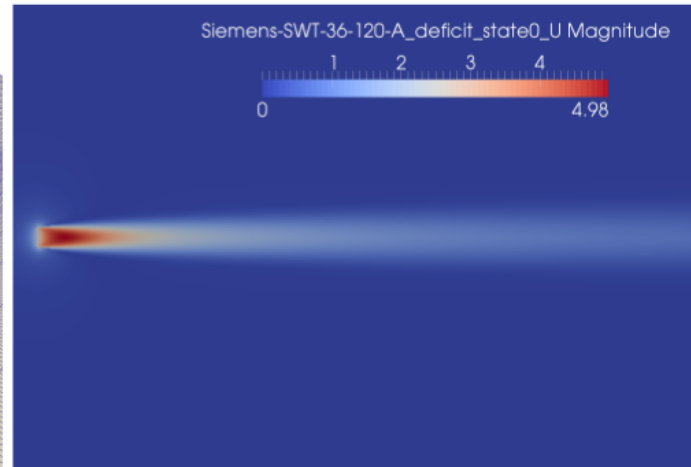
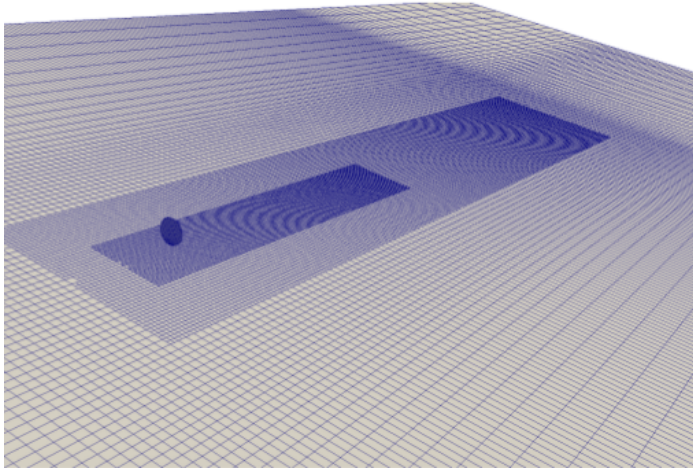
IWES-Entwicklung: *flapFOAM*

flapFOAM verwendet CFD-Ergebnisse für die Windpark-Optimierung.

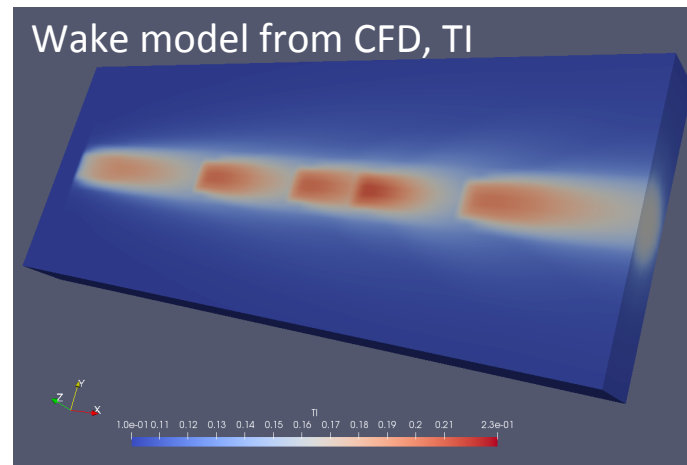
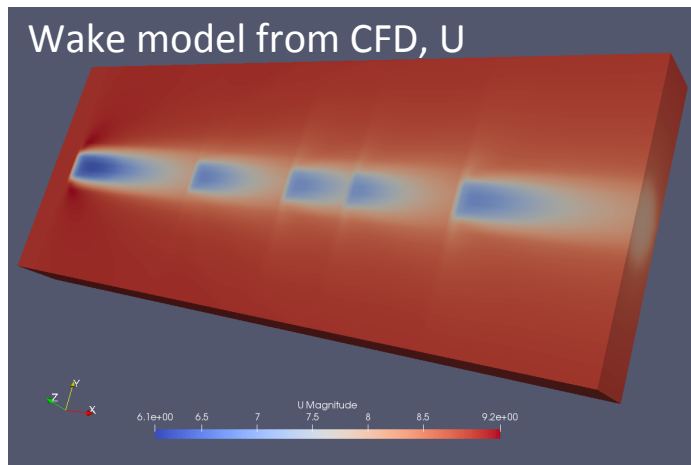
← Hintergrund-Windfelder aus CFD: Komplexes Gelände, Thermik, ...



IWES-Entwicklung: *flapFOAM*



Einzelnachlauf-CFD

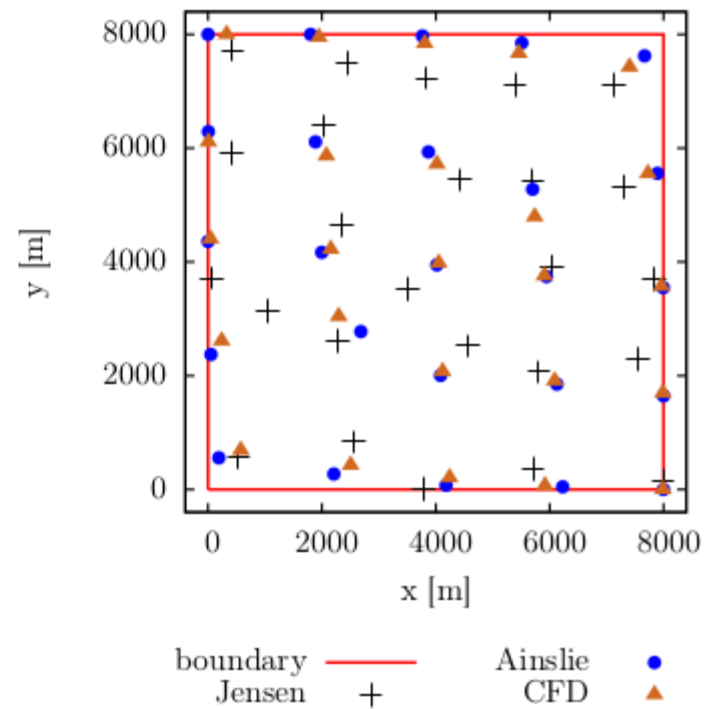
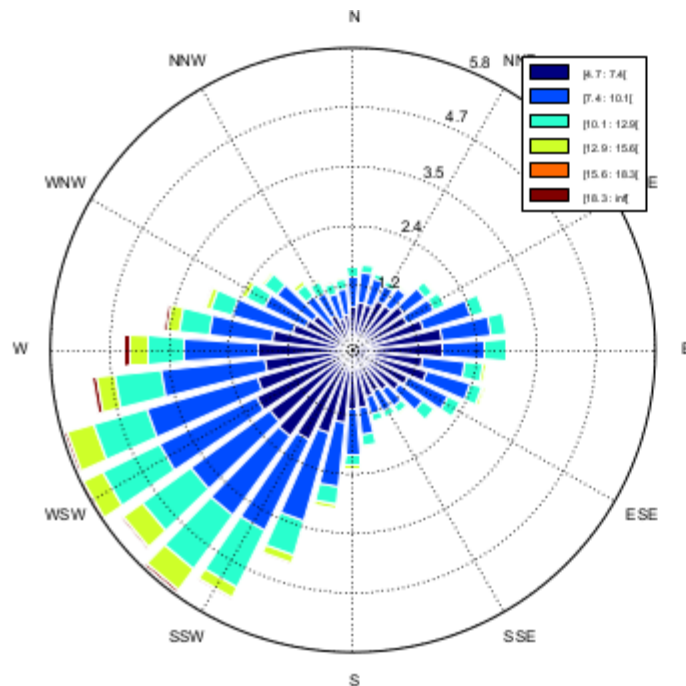


flapFOAM-Ergebnis:
5 WEA in einer Reihe,
Wind von links

Mesh: IWES *terrainMesher*

IWES-Entwicklung: *flapFOAM*

Abschätzung: Größenordnung 5% Unsicherheit durch Nachlaufmodelle in Optimierungsergebnissen





Inhalt

- ↪ Windparks aus Modellierungsperspektive
- ↪ Windparksimulation mittels CFD-Methoden
- ↪ Windparksimulation mittels einfacher Modelle
- ↪ Windparkoptimierung
- ↪ **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- Windparksimulationen umfassen zahlreiche physikalische Phänomene:
Windprofile, Topographie, thermische Schichtung, Rauigkeit, Rotormodell, Nachläufe
- Simulationen mit CFD benötigen 3D-Gittermodell (und viel Zeit).
Gute Ergebnisse für Waldeffekte, Nachläufe, Thermik, Windverteilungen etc. sind möglich.
- Einfache Modelle sind schnell, aber inkonsistent.
Gute Ergebnisse in einfachen Fällen sind möglich, Unterschiede zu CFD nicht immer groß.
- Windpark-Optimierung wird häufig mit einfachen Modellen gerechnet.
- **Unser Ansatz:** Hintergrundwindfeld + Einzelnachläufe aus CFD-Resultaten.

→ CFD wird für Optimierungsprobleme nutzbar.

- Jede Modellauswahl geht mit Unsicherheiten einher, z.B. Wakemodell.



Acknowledgement

Die Arbeiten des Fraunhofer IWES wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „SmartWindFarms“ vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert (Förderkennzeichen 325851B).

Die dargestellten Ergebnisse beruhen zum Teil auf Rechnungen, welche auf den Rechenclustern „FLOW“ und „EDDY“ der Universität Oldenburg, Deutschland, durchgeführt wurden.



THANKS FOR YOUR ATTENTION

Questions?

Jonas.Schmidt@iwes.fraunhofer.de

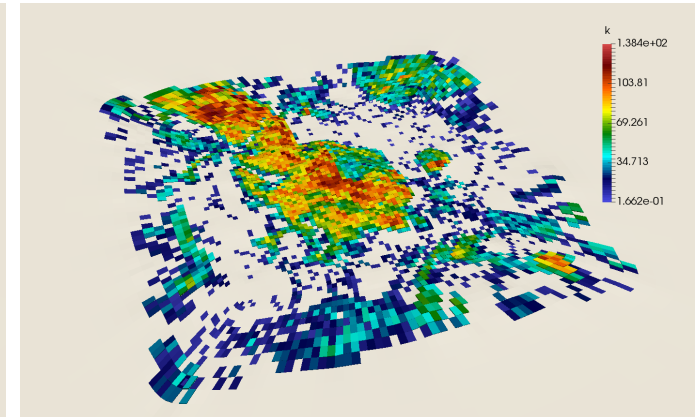
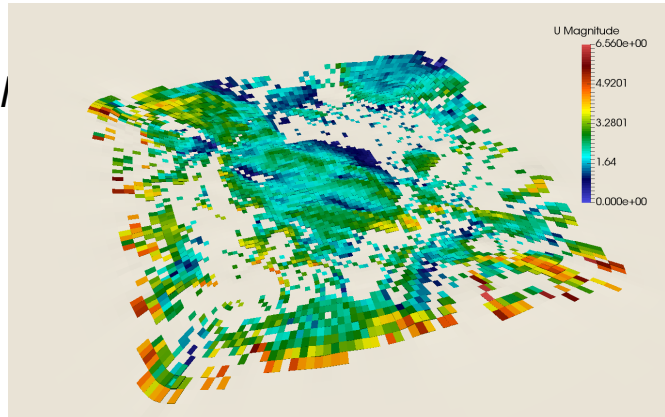


ANHANG

Windparksimulation mittels CFD

Beispiel für CFD-Detailarbeit: **Waldmodelle**

Rödeser Berg, Kassel



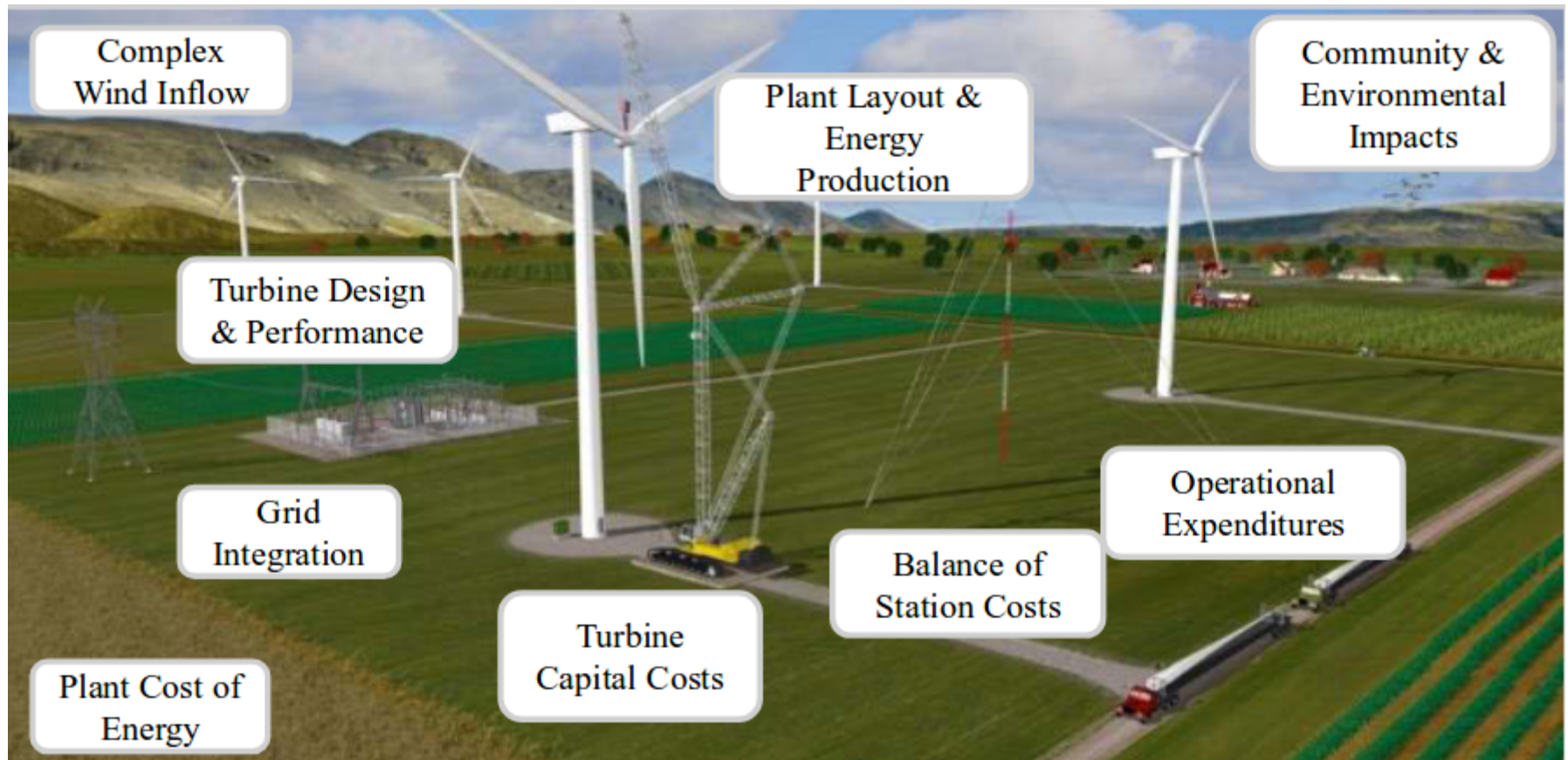
$$F_{\downarrow i} = -C_{\downarrow D} a(z) \rho |U| U_{\downarrow i}$$

$$S_{\downarrow k} = \rho C_{\downarrow D} a(z) (\beta_{\downarrow P} \uparrow |U|^3 - \beta_{\downarrow d} |U| k)$$

$$S_{\downarrow \epsilon} = \rho C_{\downarrow D} a(z) (C_{\downarrow \epsilon 4} \beta_{\downarrow P} |U|^3 \epsilon / k - C_{\downarrow \epsilon 5} \beta_{\downarrow d} |U| \epsilon)$$

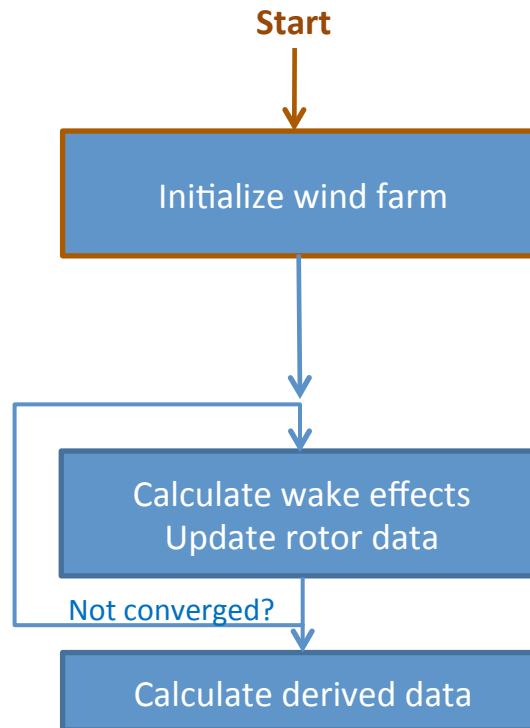
Model
Svensson (1990)
Green (1992)
Liu (1998)
Sanz (2003)
Lopez (2013)

Windparkoptimierung

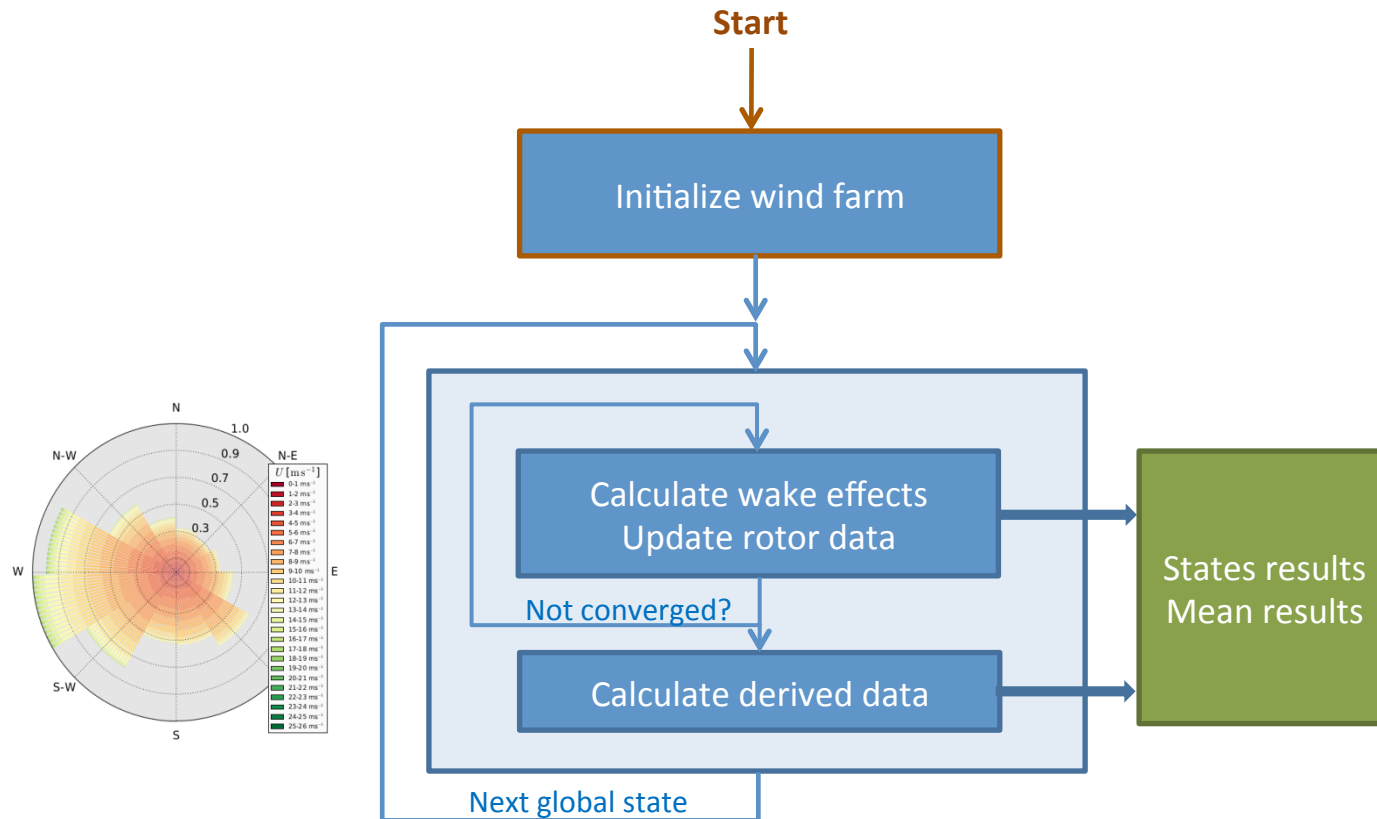


Grafik: Al Hicks, NREL

Wind farm modelling: *flapFOAM*



Wind farm modelling: *flapFOAM*



Wind farm optimization: *flapFOAM*

