ProPlanEn

präsentiert

Modellierung von Windparks

Dr. Wolfgang Schlez

12/11/2025

33. Spreewindtage

ProPlanEn

Wind Energy Advisory

Beratung durch die Experten von ProPlanEn

Forschung und Entwicklung

- Produktentwicklung
- Softwaretools
- Prozessanalyse
- Auftragsforschung
- Strategische Studien
- und mehr ...

Unabhängige Dienstleistungen

- WakeBlaster SaaS
- Windgutachten
- Windparkanalyse
- Projektbegleitung
- Schulungen
- und mehr ...

Gründer: Dr. Wolfgang Schlez

> 30 Jahre in Windenergie

> 90 Veröffentlichungen

Wir helfen unseren Kunden ihre Projekte zu verwirklichen - weltweit

(c) ProPlanEn, 2025

WAKE BLASTER

ProPlanEn

Warum modellieren wir Windparks?

Planungsphase

- Jahresertrag
- Zeitlicher Verlauf
- Unsicherheiten
- Windparkauslegung
- Standortbedingungen

Betriebsphase

- Wertermittlung
- Abweichungen
- Ertragssteigerung
- Lebensdauer

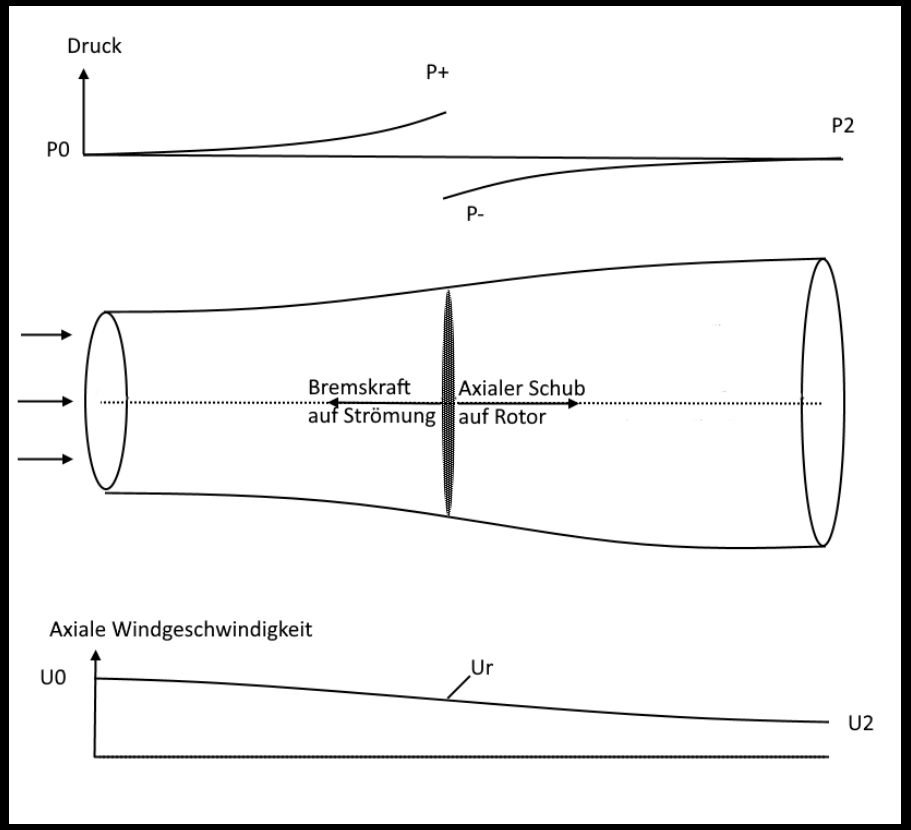
WAKE BLASTER

Hintergrund

- Grundlagen der Nachlaufströmung
- 50 Jahre Modellentwicklung
- Stand heute

(c) ProPlanEn, 2025

Axiale Impulstheorie (Betz)



Annahmen/Vereinfachungen:

- Fluid nicht komprimierbar
- Keine Reibung
- Rotor wird Scheibe ersetzt
- Homogene Strömung
- Konstante Schubverteilung
- Keine Drehung der Strömung
- Umgebungsluftdruck P0=P2
- Keine radiale Komponente

(c) ProPlanEn, 2025

Struktur der Nachlaufströmung

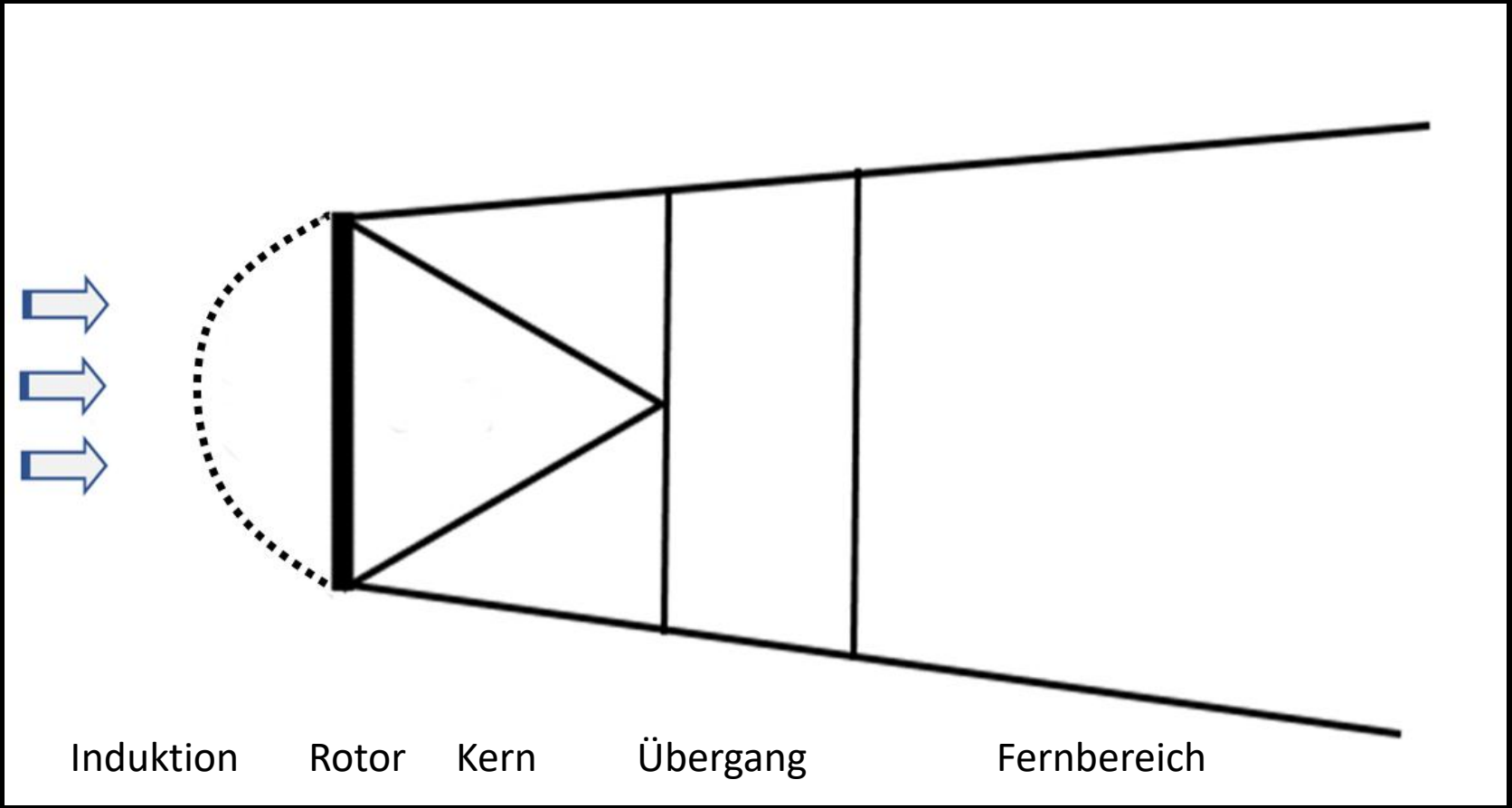
ProPlanEn

Induktionszone
- **Aka Blockage**

Nahbereich
- Kernzone erodiert
- WEA bestimmt Tiefe

Übergangsbereich
- Übergang zu Gaußprofil

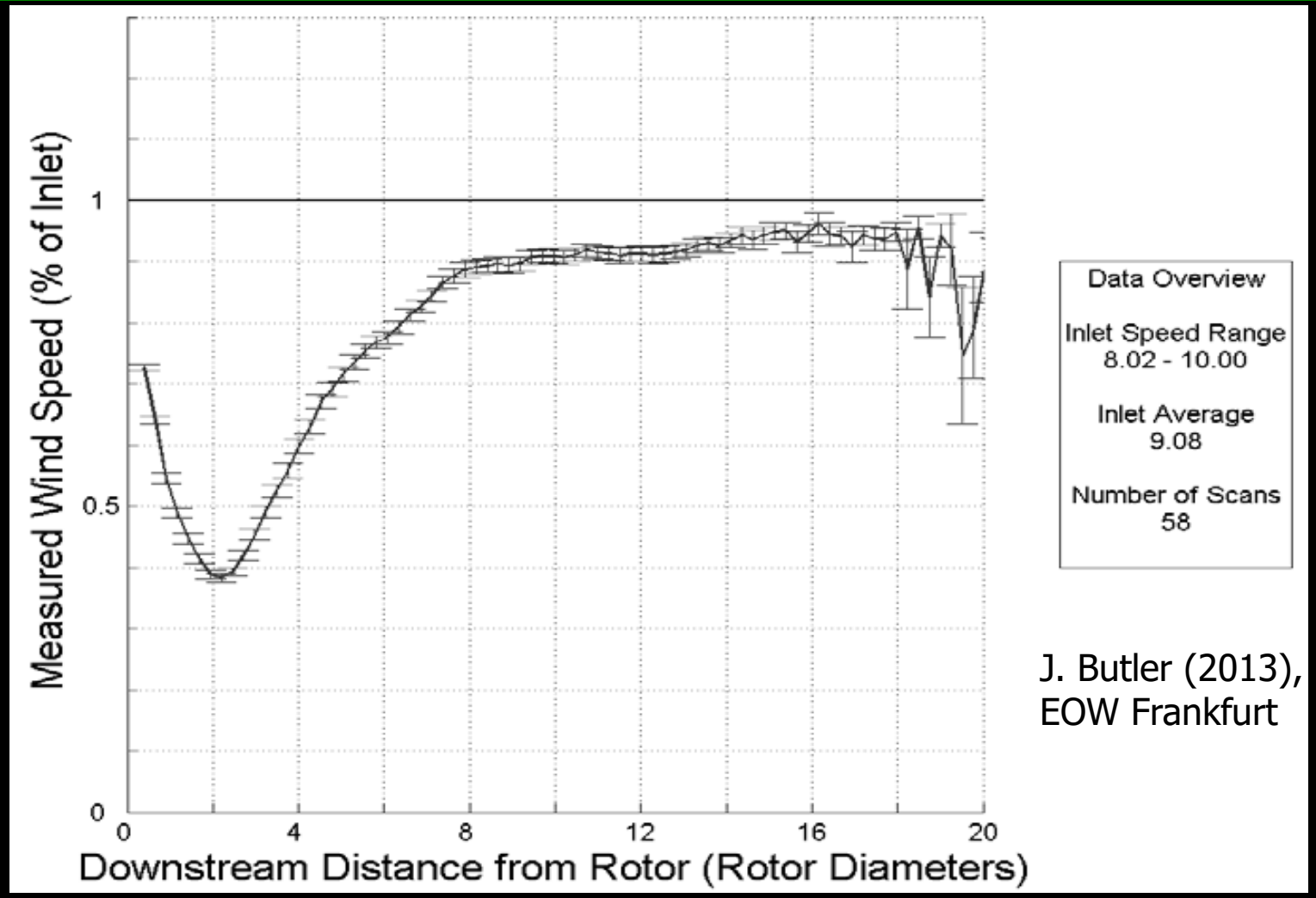
Fernbereich
- Gaußprofil



(c) ProPlanEn, 2025

WAKE BLASTER

Messung der Nachlaufströmung



J. Butler (2013), EOW Frankfurt

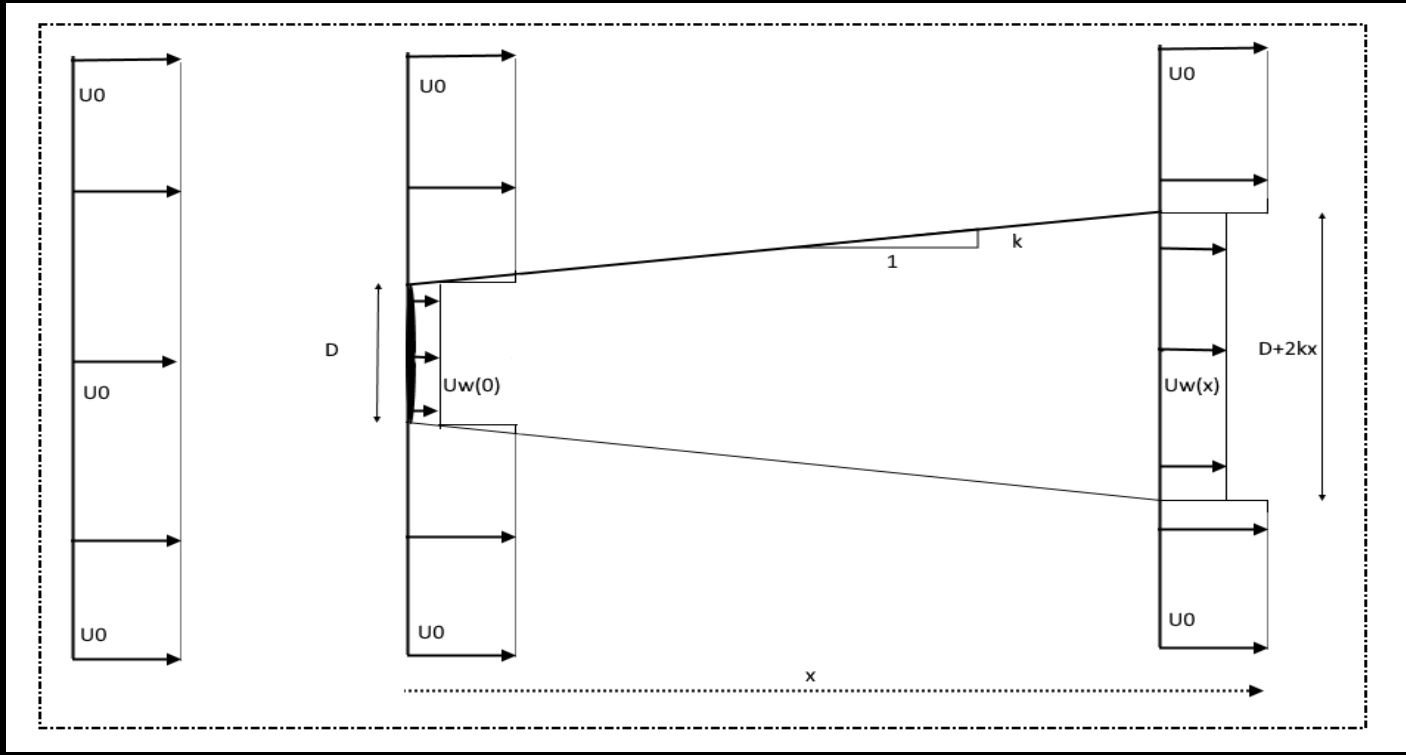
(c) ProPlanEn, 2025

WAKE BLASTER

Jensen/PARK – Modell einer Nachlaufströmung

Wichtige Annahmen:

- Lineare Aufweitung (k)
- (Impulserhaltung)
- (Massenerhaltung)
- Modelliert Einzelwakes



PARK Modell nach NO Jensen (1983)

(c) ProPlanEn, 2025

Es war einmal… (1992)

5 Enercon E16-50kW in Norddeich

Linear design

Wakestudie mit 2 Windmessmasten

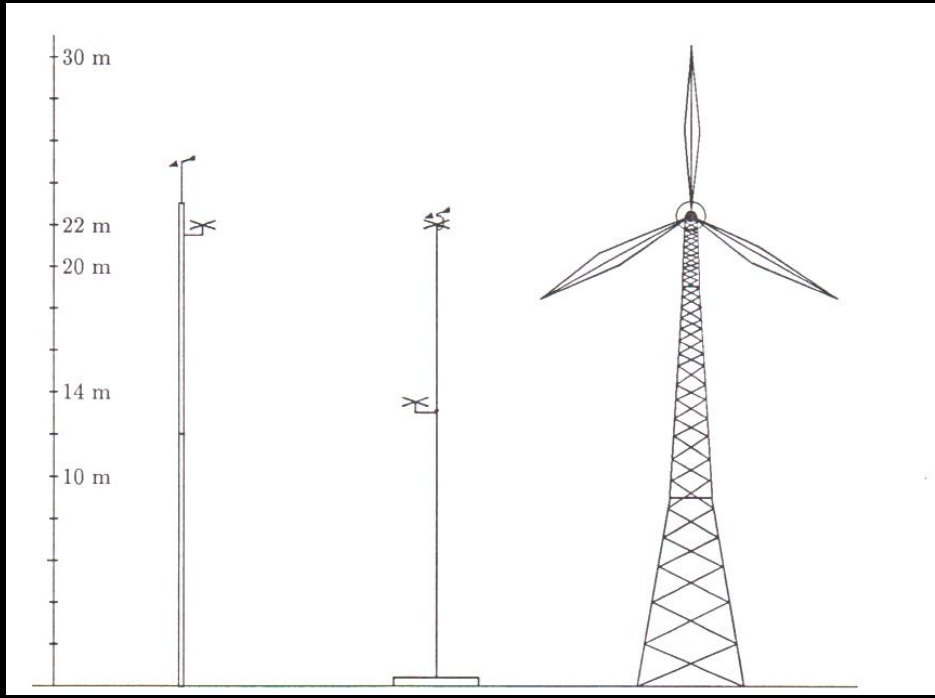
Betreiber: Stadtwerke Norden

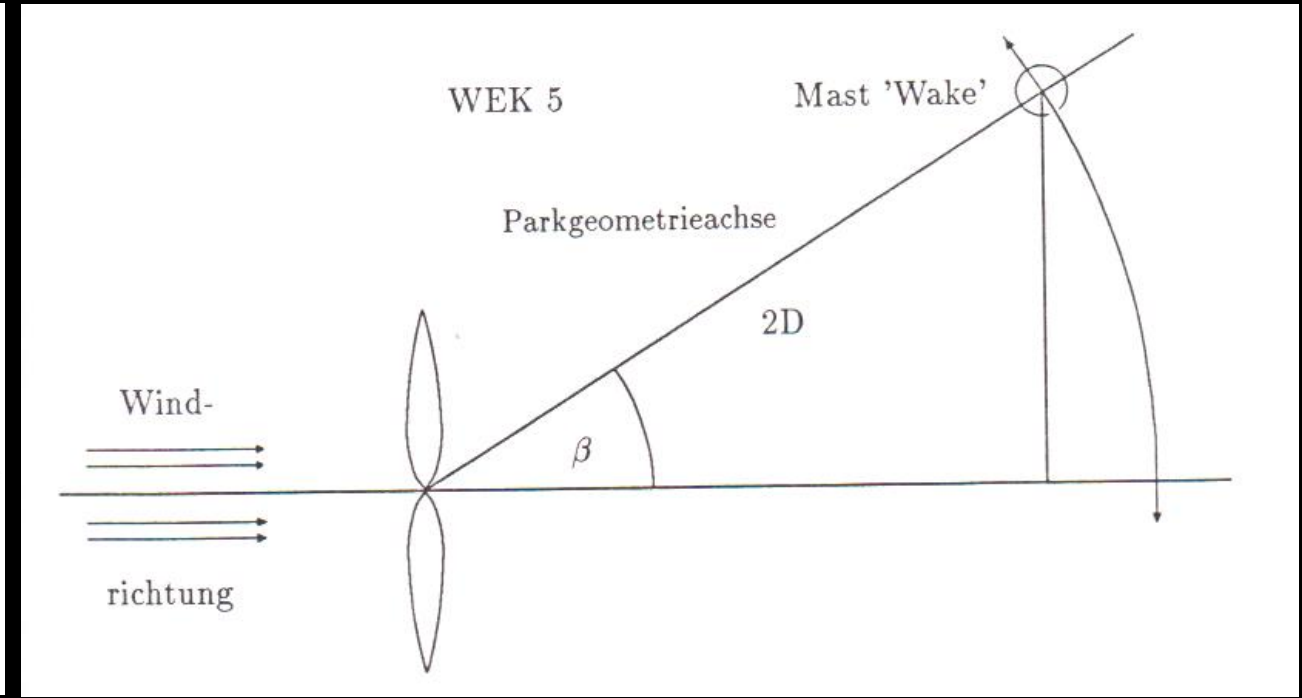
AG PPRE, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Vorgestellt: 8. Internationales Sonnenforum Berlin 1992

(c) ProPlanEn, 2025

Messaufbau

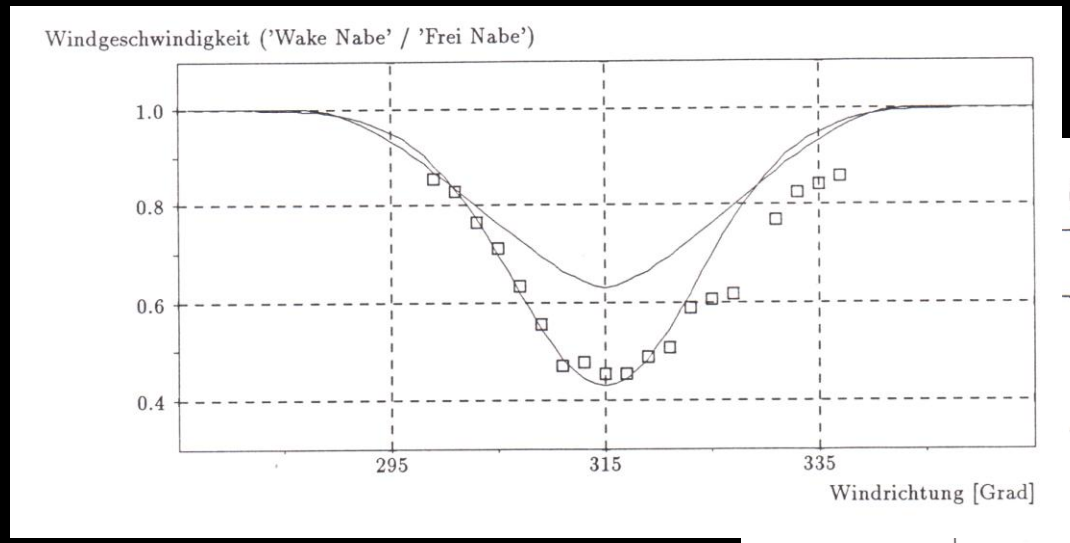




Durch natürliche Variation der Windrichtung…
ändert sich die Position des Mastes relativ zur Nachlaufströmung

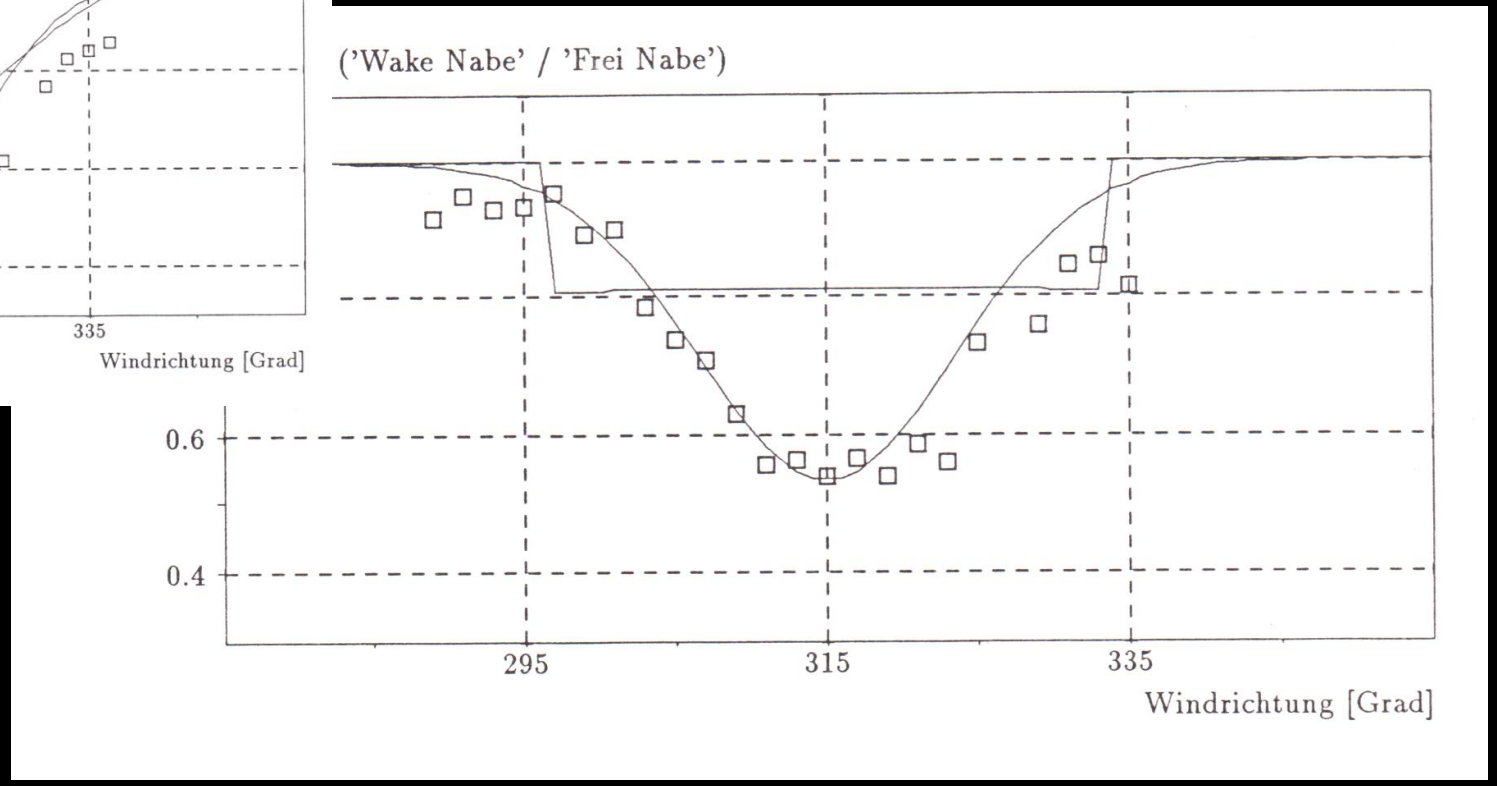
(c) ProPlanEn, 2025

Ergebnisse at 2D



Ainslie und Vermeulen Modelle (9.2 m/s)

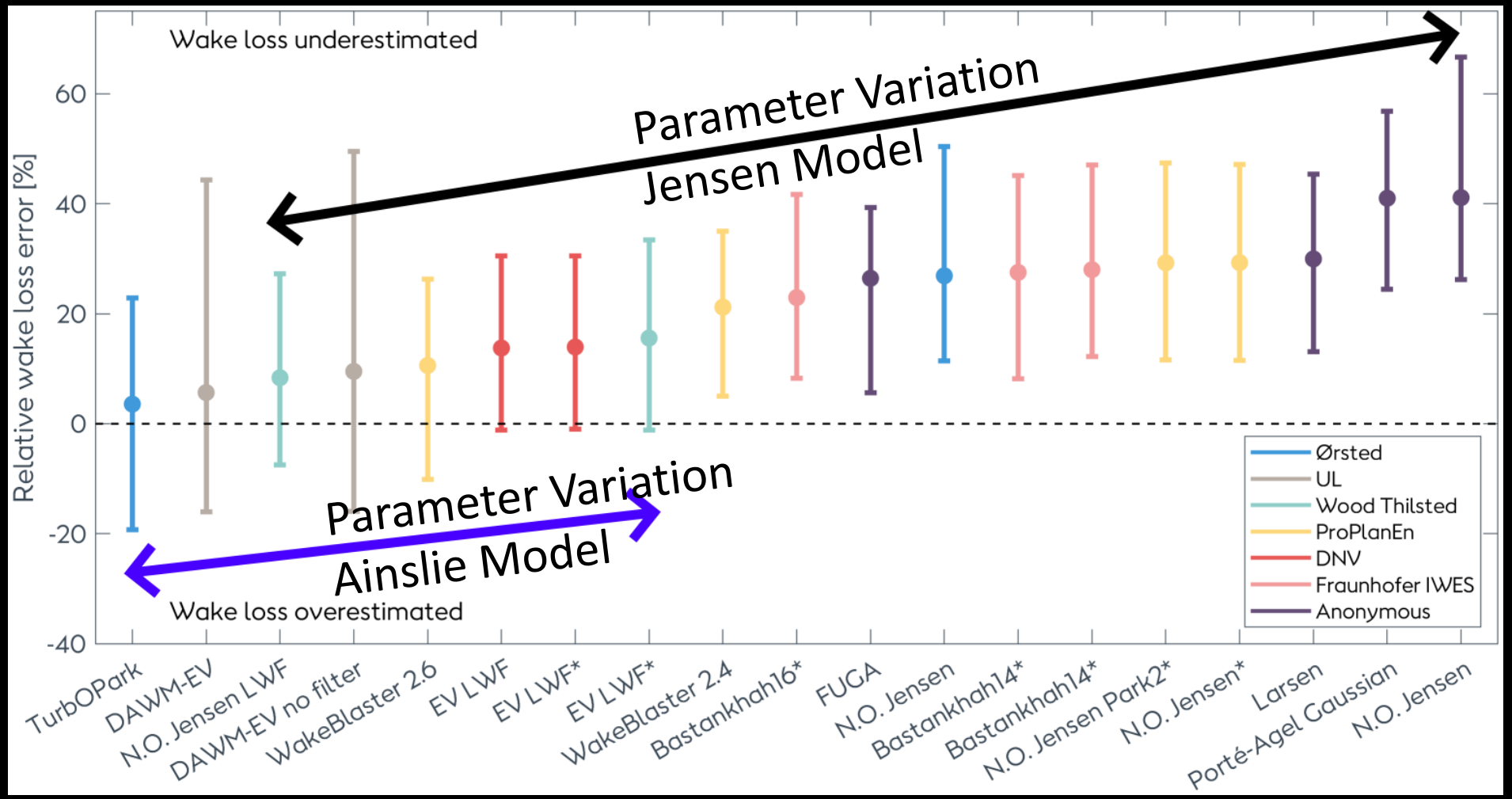
Ainslie und PARK Modelle (10.7 m/s)



Gewinner: Ainslie aka EV
Single Wake Modell mit 2 freien Parametern, Gauss Profil, Umgebungsturbulenz + I_added

(c) ProPlanEn, 2025

Parameter Variations



Modified from: Ewa Johansson: Benchmarking results from multiple wake models on operational data from offshore wind farms; Wind Euope Tech Workshop 2023, Oersted

(c) ProPlanEn, 2025

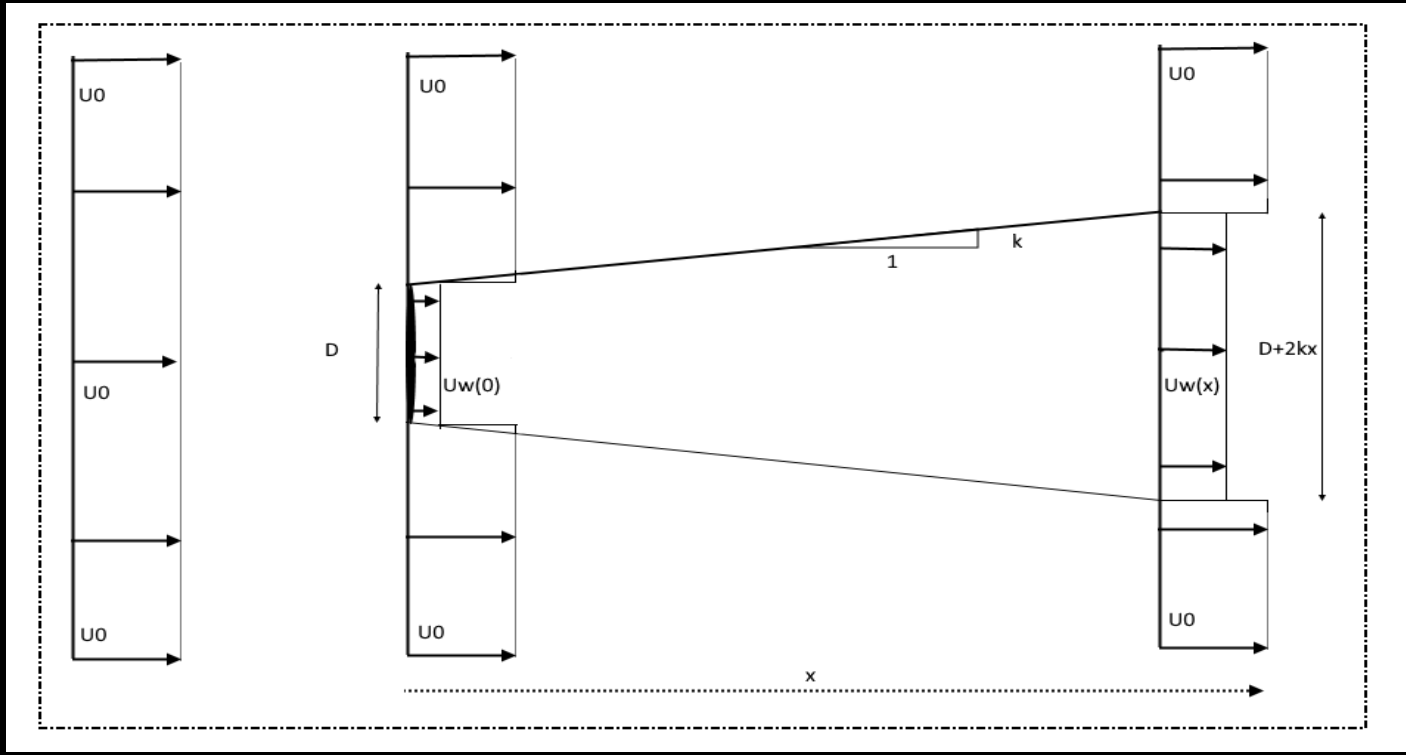
WAKE BLASTER

PARK – Modell einer Nachlaufströmung

Bewährtes Modell aber:

- Impulserhaltung verletzt
- k situationsbedingt
- Keine 3D Effekte

Nicht mehr „Stand der Technik“



PARK Modell nach NO Jensen (1983)

(c) ProPlanEn, 2025

Ist das Ainslie Modell die Lösung?

PRO
- Gaussian Profile
- Momentum and Mass conservation
- Schnell : Feste Funktion f(Ti, ct)
- Umgebungsturbulenz

Verwandte Implementierungen:
- Turbopark
- DWM

Contra
- Empirische Wake-Überlagerung
- Empirisches Turbulenzmodell
- Empirische LWF Korrektur
- Empirische close spacing Korrektur
- No ground interaction
- Nahbereich fixiert bei 2D
- Keine Stabiltätsabhängigkeit

Nicht mehr „Stand der Technik“

(c) ProPlanEn, 2025

Herausforderung Nachlaufströmung

Stand der Technik (1990)

- Single Wake Model
- Profil axialsymmetrisch
- Empirische Gleichungen
- Umgebung überlagert
- Turbulenz empirisch generiert

Beispiele: Park/Jensen 1983, EV/Ainslie 1988

Stand der Technik (2020)

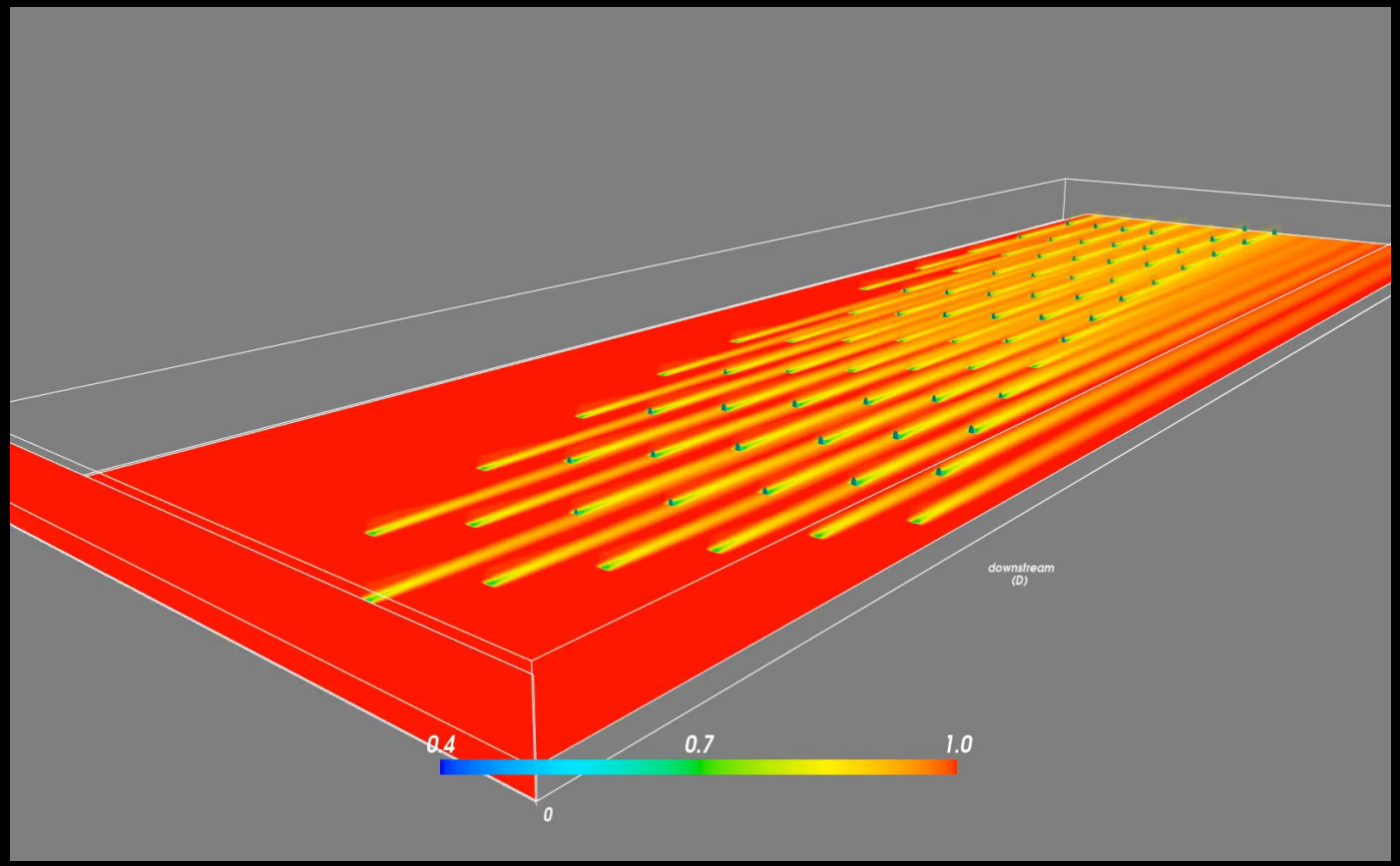
- Windparkmodell
- Variable Profilform
- Numerische Lösung
- Umgebung interagiert
- Turbulenz numerisch generiert

Beispiel: WakeBlaster (Bradstock 2019)

(c) ProPlanEn, 2025

WakeBlaster – ein aktuelles Modell

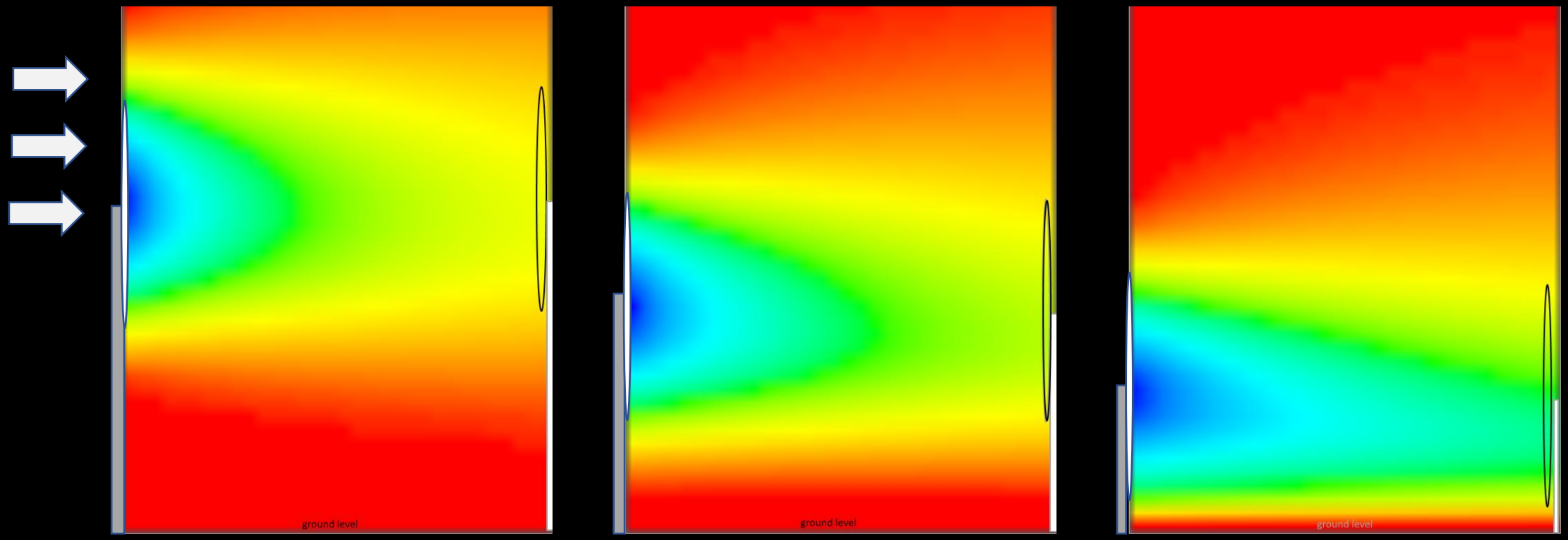
Numerisches (RANS) Modell
- Erhaltungsgrößen
- Überlagerung Wake-Wake
- Überlagerung Wake-Profil
- Variable Nahbereichslänge
- Ti Erzeugung und Zerfall
- Leistungskurvenkorrektur
- Variable Anlagenhöhen
- Variable Geschwindigkeit
- Variable Stabilität, Ti
- Zeitreihenmodus



Berechnungen werden von den Softwarepaketen **WindPRO** und **Openwind** unterstützt.

(c) ProPlanEn, 2025

Verification – Variation der Nabenhöhe



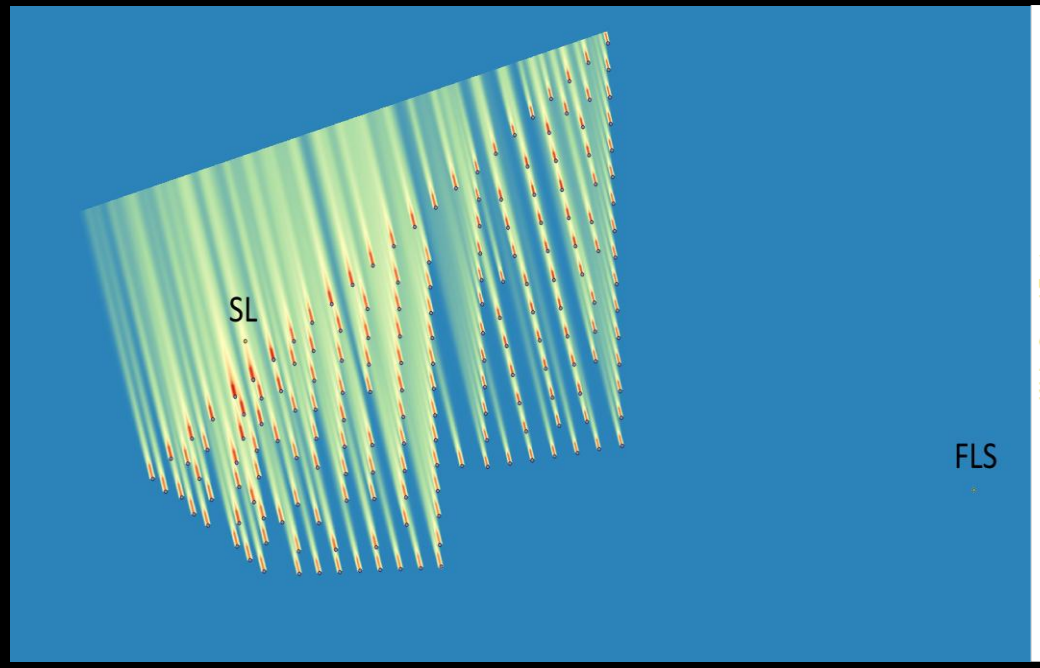
Die Wechselwirkung mit der bodennahen Grenzschicht deformiert die Wake

(c) ProPlanEn, 2025

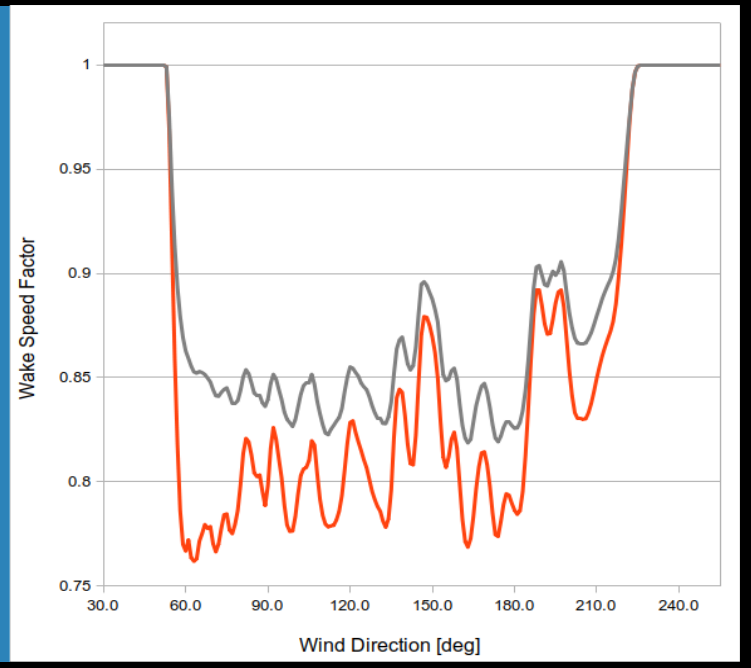
WAKE BLASTER

Anwendung zur Korrektur von Messungen

Experiment



Korrektur der Messung



Schwarze Kurve: Korrektur der Messung für neutrale Schichtung (v2.4)

Rote Kurve: Korrektur mit aus Ti abgeleiteter Stabilität (v2.6)

Experiment: WakeBlaster 2.6 (variabel) verringert verglichen mit WakeBlaster 2.4 (neutral) den Unterschied der resultierenden freien Windgeschwindigkeiten (SL vs FLS).

(c) ProPlanEn, 2025

WAKE BLASTER

Moderne Modelle (z.B. WakeBlaster) bieten...

Modellierung von 3D Effekten:

- Wechselwirkung zwischen Wakes
- Wechselwirkung mit der Grenzschicht

Genauere Ergebnisse für:

- Windparks und Windparkcluster
- Nicht neutrale Stabilität

Weniger Empirische Korrekturen

- Große Windparks
- Eng aufgestellte Anlagen
- Überlagerung von Wakes
- Generierte Turbulenzen

Erleichterungen im Betrieb:

- Weniger fallspezifische Einstellungen
- Modellierung von zeitlicher Variabilität
- Schnell genug für Industrie
- Wakes bis zu 150 km (1000 D)

(c) ProPlanEn, 2025

Antworten: Wie kann ich…

… WakeBlaster bestellen:

https://proplanen.info/orderwakeblaster

https://www.emd-international.com/windpro/online-ordering/

Preise* für eine Firmenlizenz:

- EUR 300: 01 Monat
- EUR 3000: 12 Monate

… WakeBlaster nutzen:

- via WindPRO
- via Openwind
- via API (Python, Matlab, …)
- ProPlanEn beauftragen

… mich informieren:

https://proplanen.info/wakeblaster

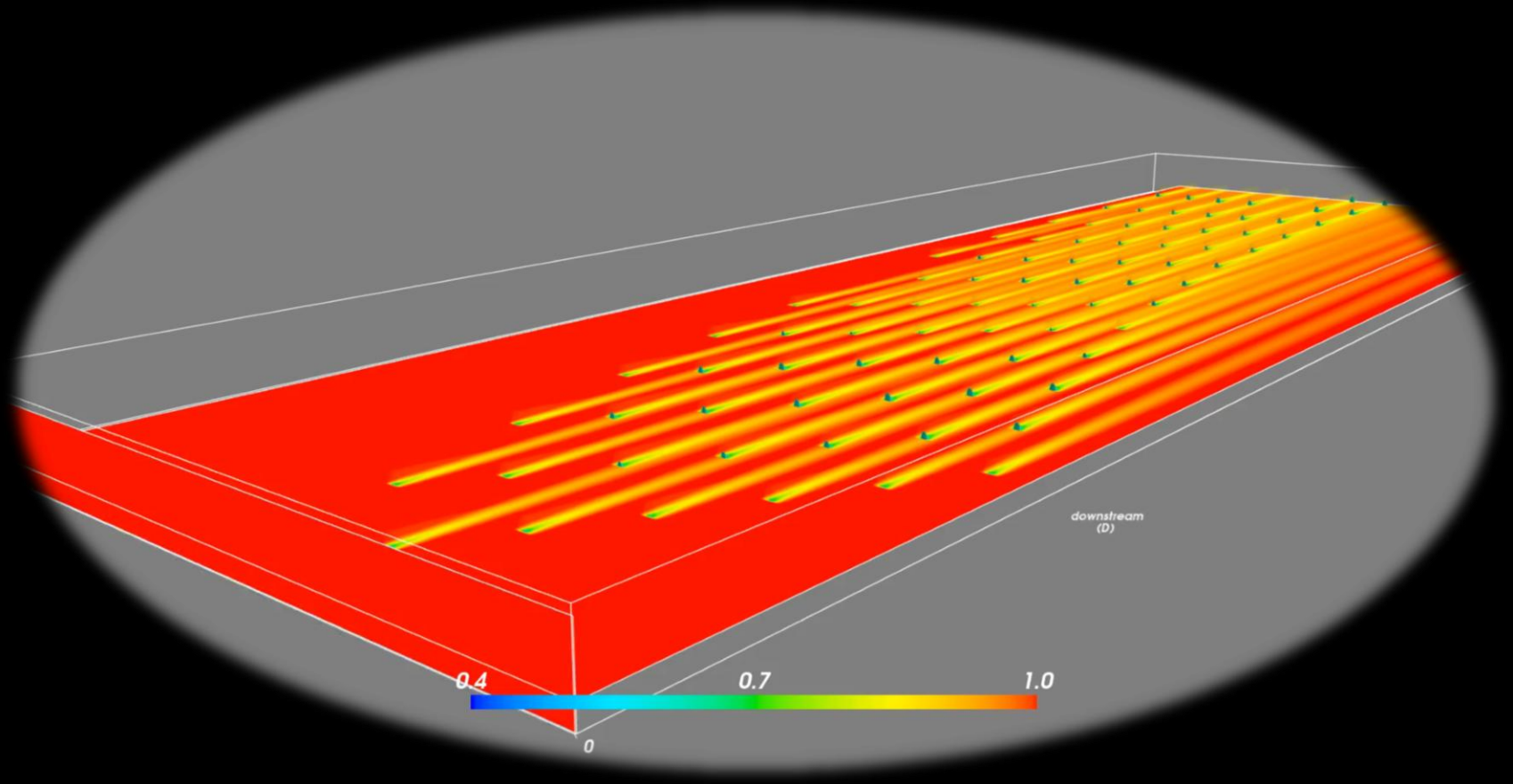
*Inklusive 30k Szenario Berechnungen pro Monat. Für Windparks bis zu 500 WEA, Berechnung erfolgt auf bis zu 64 vcores, größere Environments für bis zu 10k WEA und 1250 vcores sind verfügbar. Alle Preise verstehen sich als Nettopreise, ohne Umsatzsteuer und sind gültig für Bestellungen bis 31.12.2025.

(c) ProPlanEn, 2025

WAKE BLASTER

Fragen?

ProPlanEn



- **More Information:**
- info@proplanen.com
- https://proplanen.info/wakeblaster
- https://www.linkedin.com/in/drwolfgangschlez

WAKE BLASTER

Herausforderung Modellierung von Wakeverlusten

WEA	Downstream	Upstream	Horizontal	Vertikal
Luftdichte	Nahbereich	Induktion	Überlagerung	Stabilität
Turbulenz	Fernbereich	Gravitationswellen	Verdrängung	Rauhigkeits-änderung
Scherung über Rotor	Wake Ablenkung	Kompressibilität	Ablenkung	Drehung, Inversion
Schubbeiwert	Wake Steuerung	WEA Wechselwirkung	Kompressibilität	Mesoskal. Wirkung

(c) ProPlanEn, 2025