



**Generierung räumlich und zeitlich hoch aufgelöster  
onshore Windeinspeisezeitreihen von 2000 bis 2015 für  
Deutschland**

Raik Becker, Daniela Thrän

15. Symposium Energieinnovation Graz, 15.02.2018



**HELMHOLTZ**  
ZENTRUM FÜR  
UMWELTFORSCHUNG  
UFZ

# Motivation

## Bedarf an hoch aufgelösten Einspeisezeitreihen:

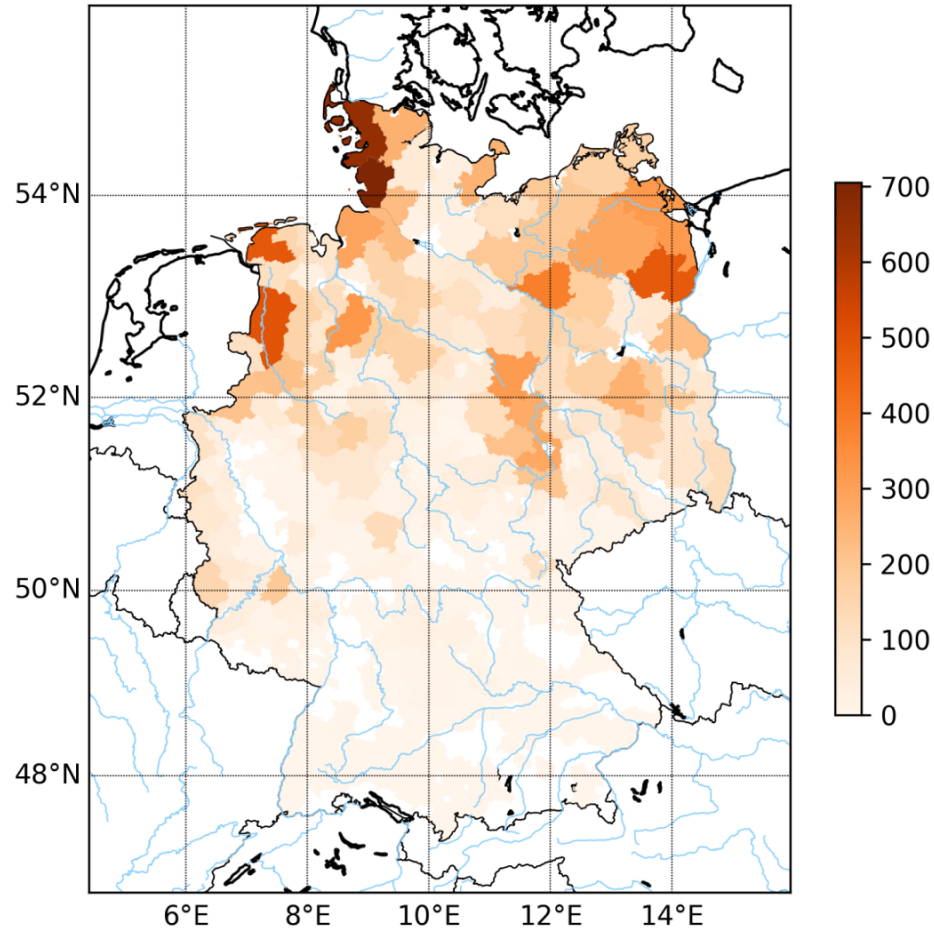
- Regionales Monitoring der Energiewende
- Energiesystem- und Netzmodelle
- Räumliche Marktwertbestimmung von Erneuerbaren
- [...]

## Ziel:

- Stündliche Einspeisezeitreihen für alle erneuerbaren Energien mit hoher räumlicher Auflösung (zunächst historisch)
- Geeignete Veröffentlichung der finalen Datensätze

# Motivation

Wind power generation in MW:  
2013-01-01 00:00:00



# Agenda

1. Datengrundlage
2. Modell
3. Ergebnisse
4. Zusammenfassung



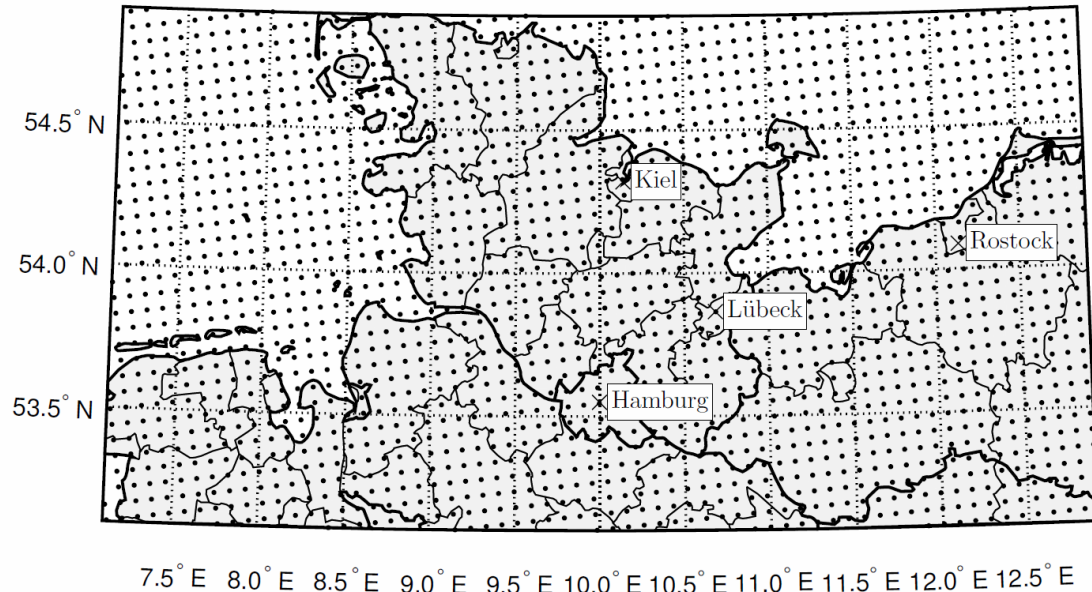
# DATENGRUNDLAGE

# Wetterdaten – Optionen

1. Messdaten (Wetterstationen)
  - Räumlich geringe Auflösung
  - Low-level jet bei Wind
2. Assimilationsdaten (bspw. COSMO-DE/EU)
  - Oftmals kurze Historie
  - Modellverbesserung nur in neueren Daten
3. Reanalyse-Daten (bspw. COSMO-REA2/6)
  - Konsistenter Datensatz
  - Nutzung aller Modellverbesserungen

# Reanalyse-Daten

- Neuberechnung alter Beobachtungsdaten mit neuen Modellen
- Konsistenter Datensatz über langen Zeitraum
- Synthese verschiedener Beobachtungsnetzwerke möglich
- COSMO-REA6: 6x6km-Netz, 1997-2015 [1,2]



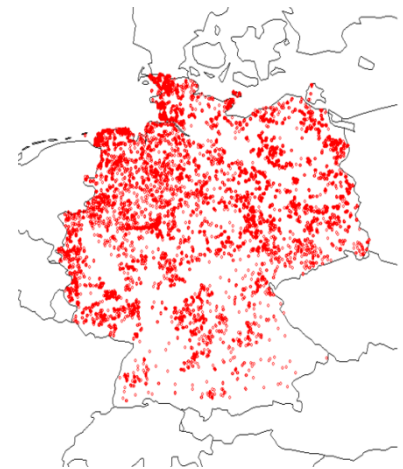
# Windanlagendaten

## Ursprung:

- 16 Landesbehörden (Bsp.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg)
- Zusammengetragen im BfN-Projekt EE-Monitor

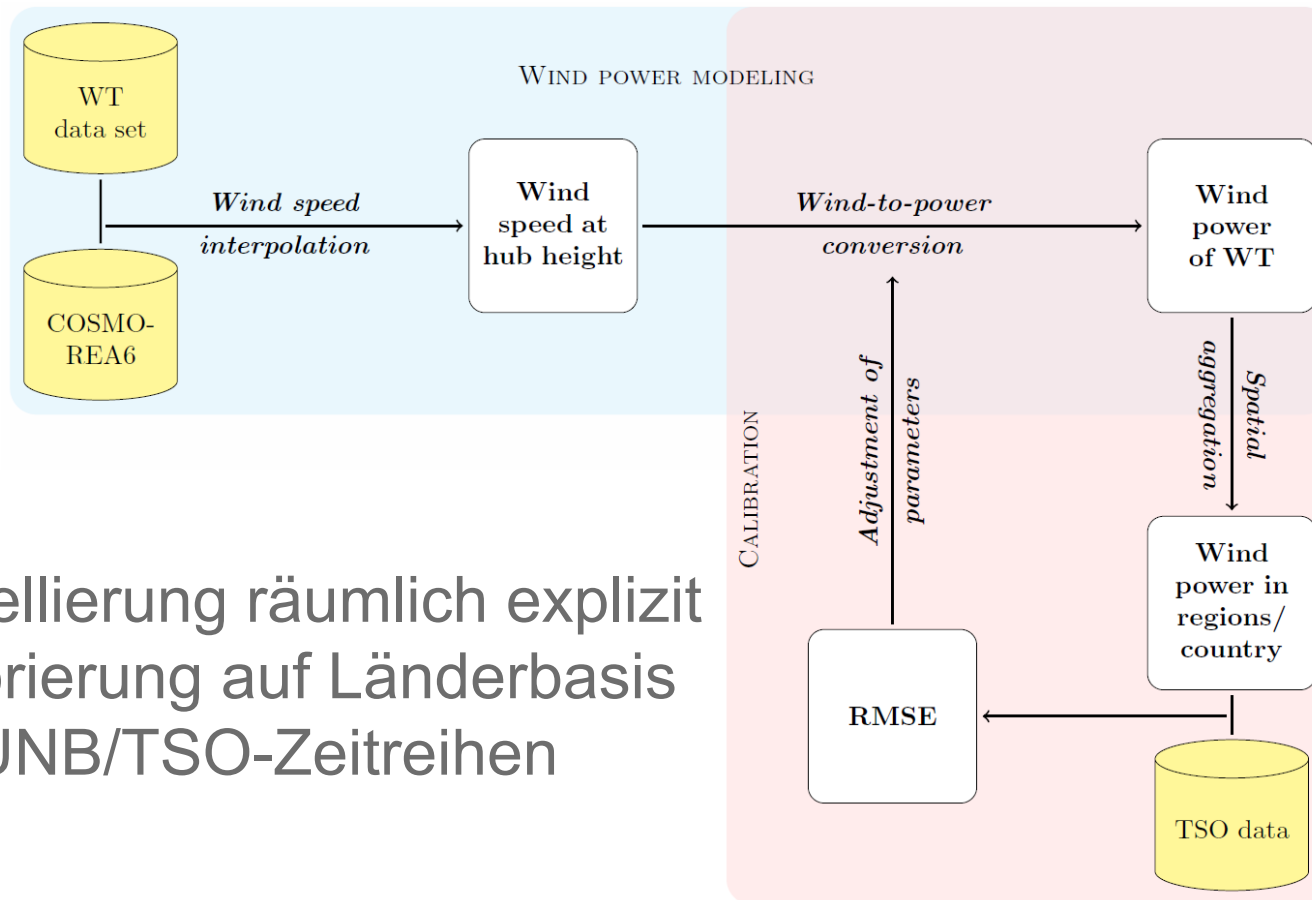
## Vervollständigung:

- Lückenfüllung mit Machine-Learning-Ansatz random forests [3]
  - 23187 Anlagen
  - 38,10 GW in 2015



# MODELL

# Modell



- Modellierung räumlich explizit
- Kalibrierung auf Länderbasis mit ÜNB/TSO-Zeitreihen



# Leistungskurve

## Ansatz:

- Standardisierte Leistungskurve + Gauß-Filter (Glättung, da stündlich Windgeschwindigkeitsmittelwerte)
- Nenngeschwindigkeit wird mit Rotordurchmesser für jede Anlage gesondert berechnet

$$I(v) = \begin{cases} 0 & \text{if } v < v_{\min} \\ \frac{v^3 - v_{\min}^3}{v_r^3 - v_{\min}^3} & \text{if } v_{\min} \leq v \leq v_r \\ 1 & \text{if } v > v_r \\ 0 & \text{if } v > v_{\max} \end{cases}$$

$$v_r = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P_r \cdot 10^3}{1.225 \cdot \pi \cdot C_p \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}}$$

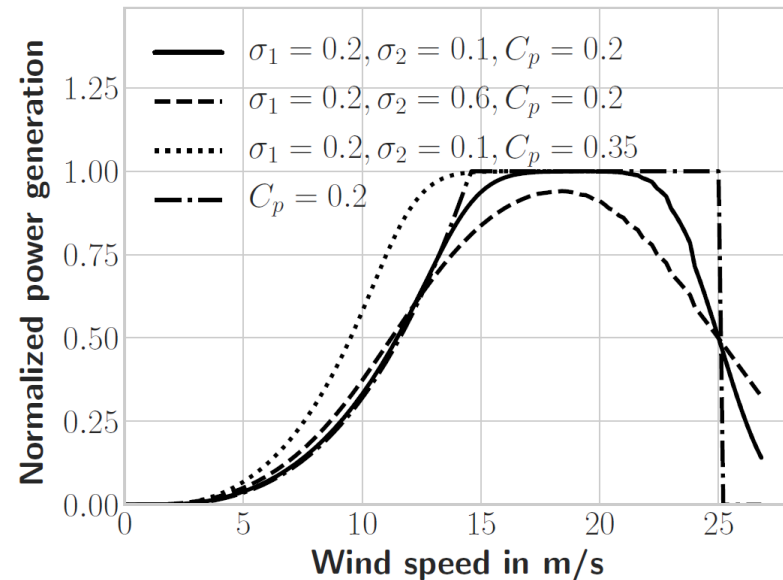
$$P = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \int_{-4\sigma}^{4\sigma} I(v - n) \cdot \exp\left(\frac{-n^2}{2 \cdot \sigma}\right) dn$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \cdot v$$

# Leistungskurve

Zu optimierende Parameter:

- $c_{min}$  Anlaufgeschwindigkeit
- $c_{max}$  Abregelgeschwindigkeit
- $C_p$  Leistungskoeffizient
- $\sigma_1$  Gauß-Filter (Glättung der Leistungskurve)
- $\sigma_2$  Leistungskurve



# ERGEBNISSE

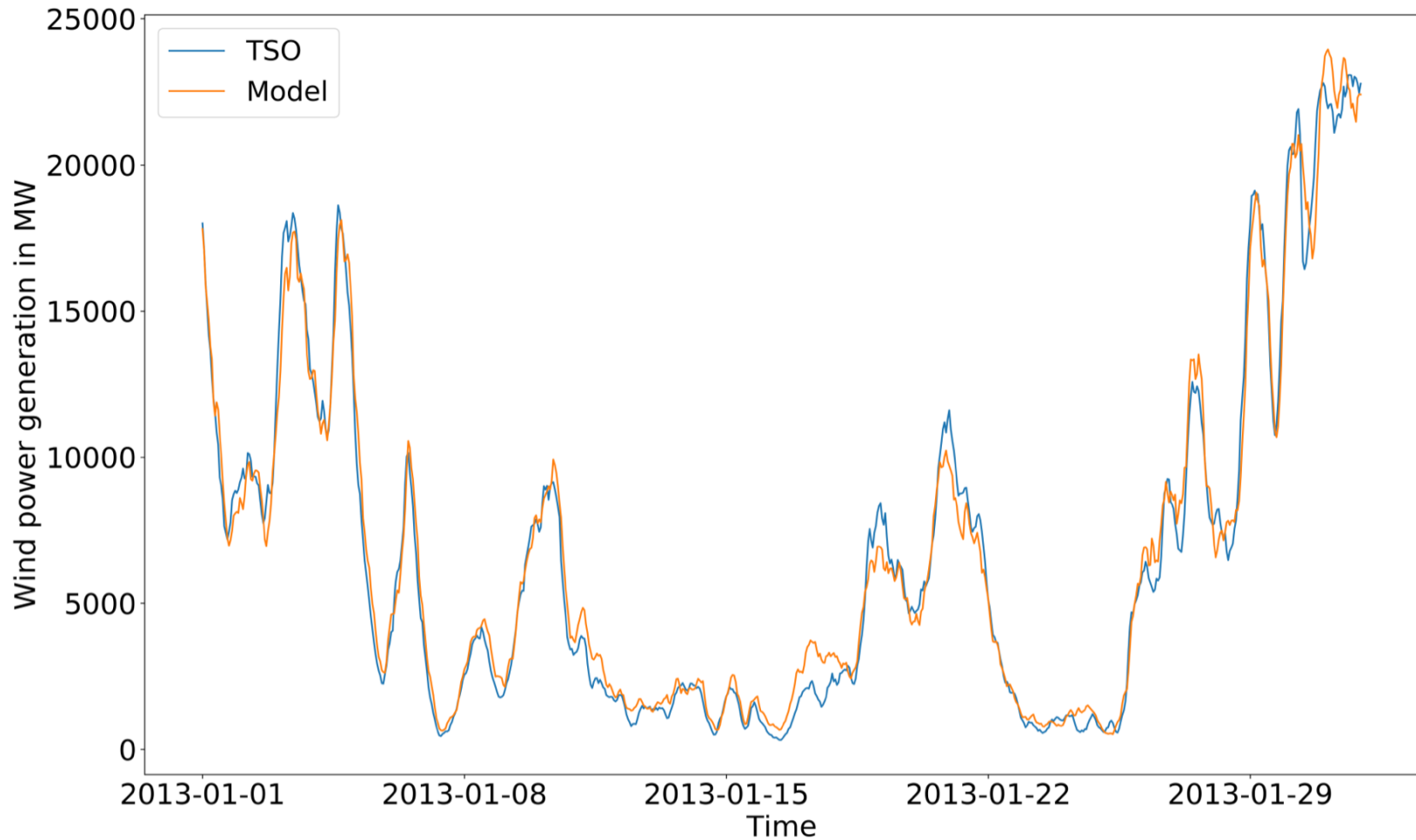
# Kalibrierungsergebnisse

- Vergleich mit räumlich aggregierten stündlichen TSO-Zeitreihen für Deutschland

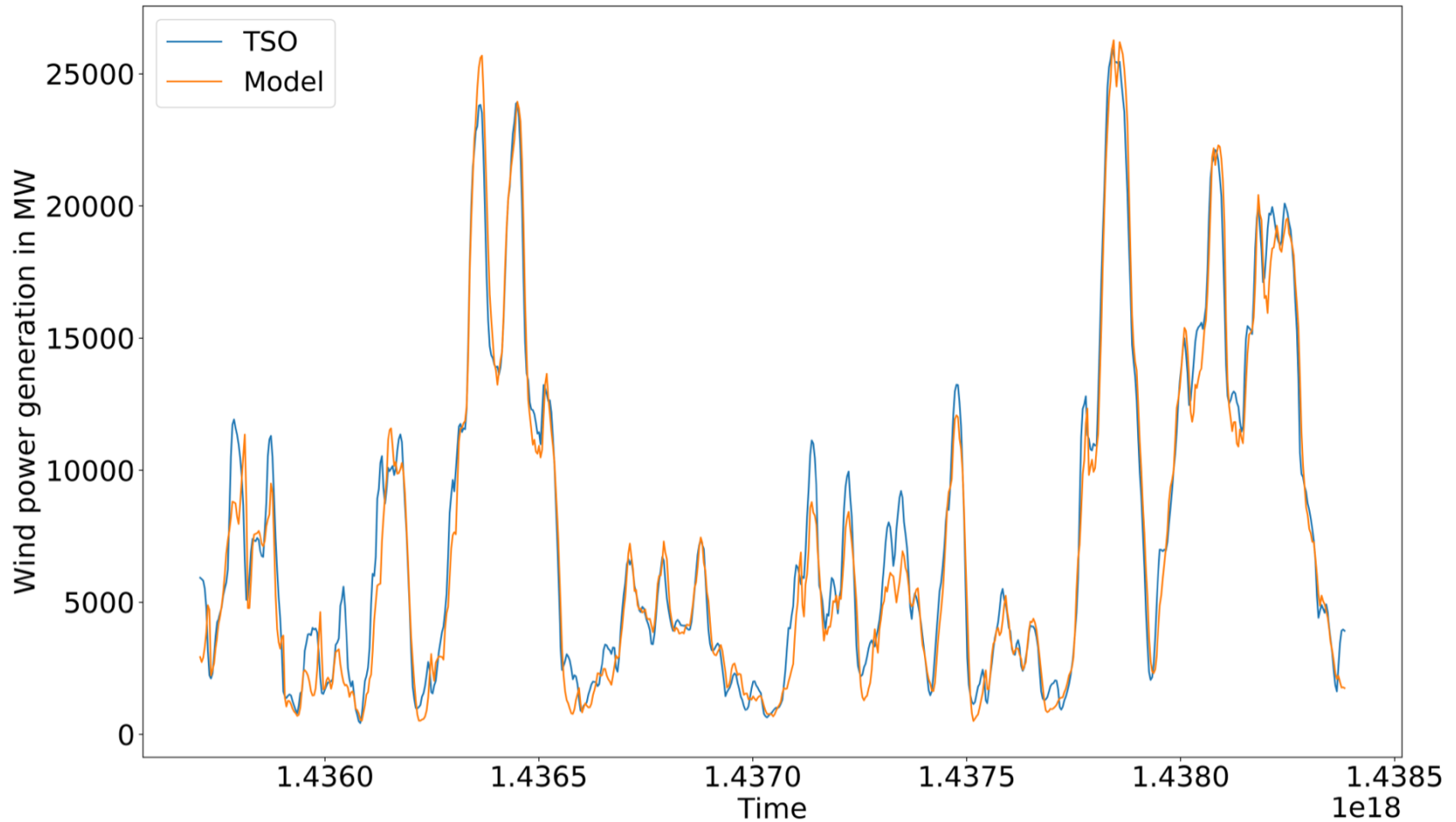
Jahr	$v_{min}$ in m/s	$v_{max}$ in m/s	$C_p$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	RMSE in MW	$R^2$
2012	2,5	24	0,27	0,5	0,5	835,50	0,965
2013	2,5	22	0,27	0,5	0,5	880,30	0,967
2014	2,5	23	0,25	0,5	0,7	966,17	0,968
2015	2,5	24	0,28	0,5	0,6	1294,38	0,971
$\emptyset$	2,5	23,25	0,2675	0,5	0,575		

- Anwendung des Mittelwertes auf alle verbleibenden Jahre

# Modell vs. TSO: Jan. 2013



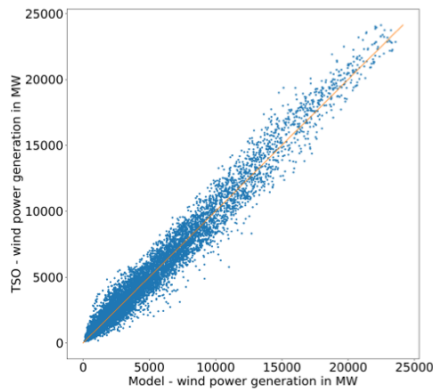
# Modell vs. TSO: Juli 2015



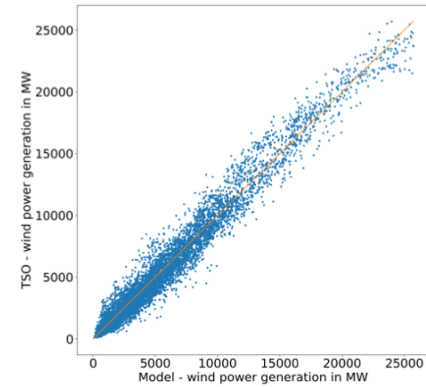


# Modell vs. TSO: Scatter

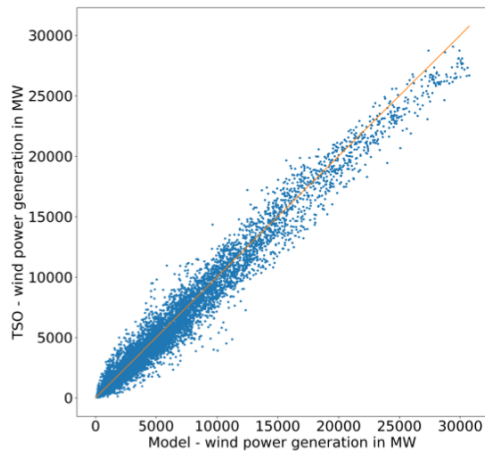
2012



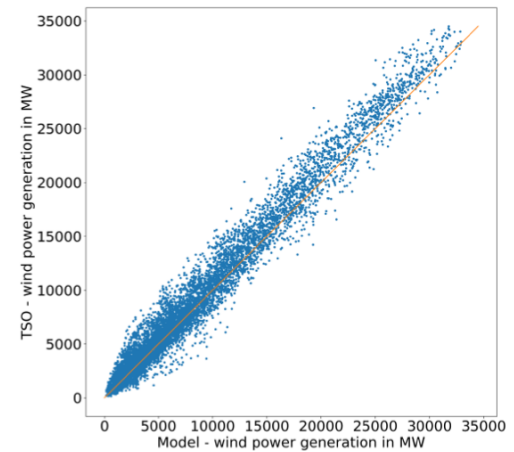
2013



2014

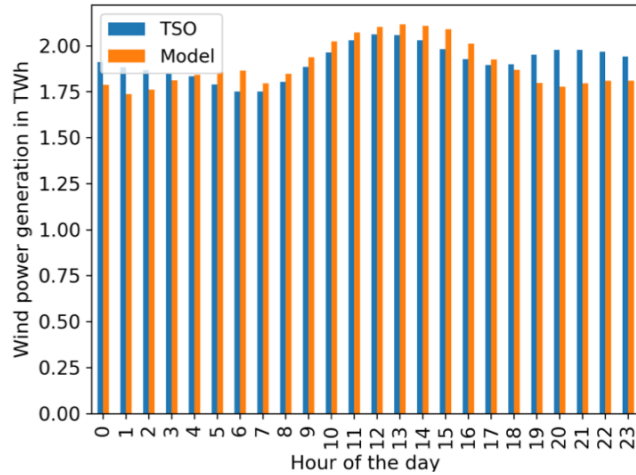


2015

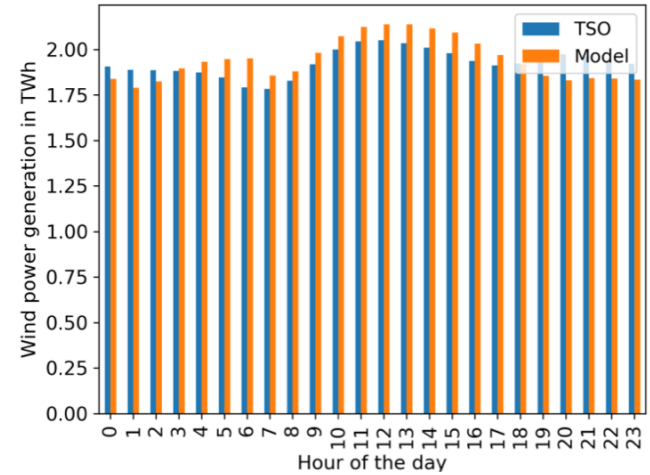


# Modell vs. TSO: Tagesstruktur

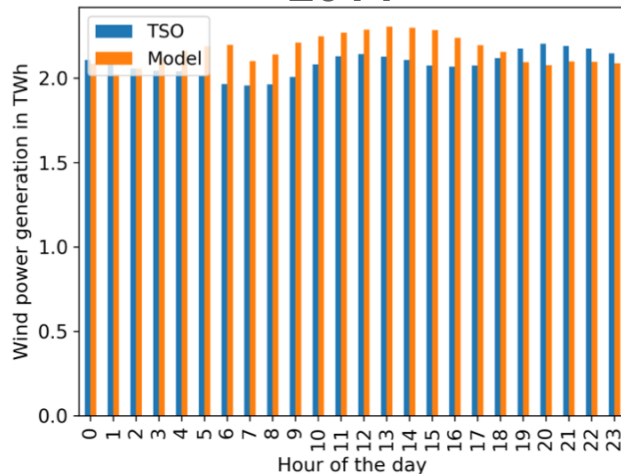
2012



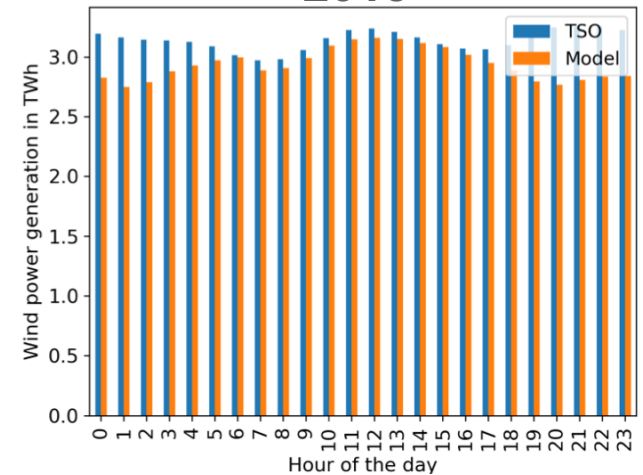
2013



2014

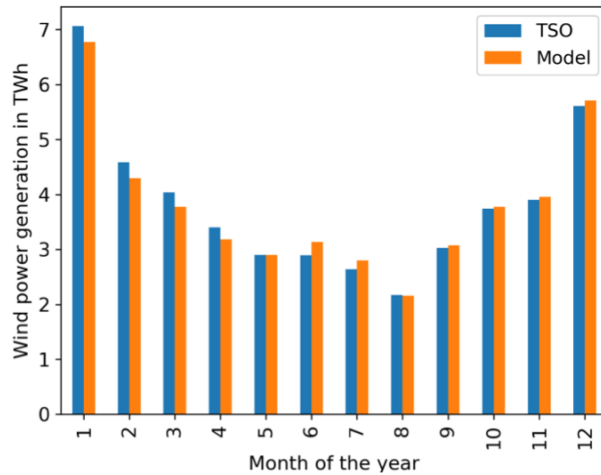


2015

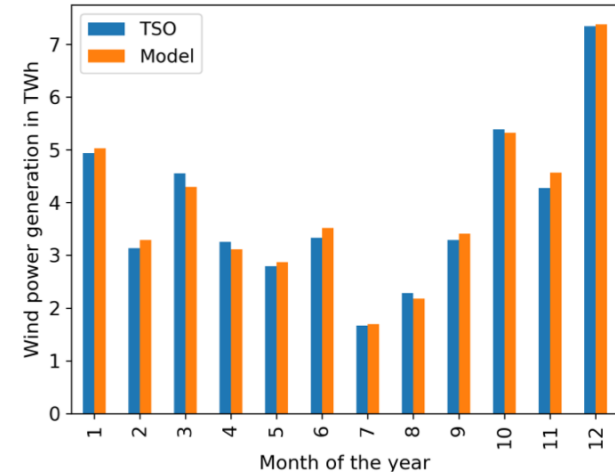


# Modell vs. TSO: Monatl. Energiemengen

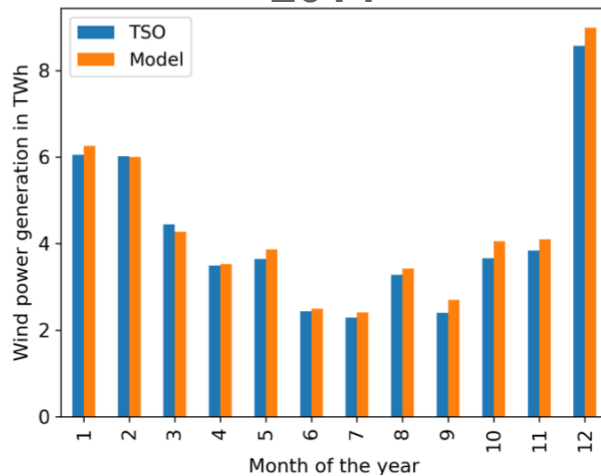
2012



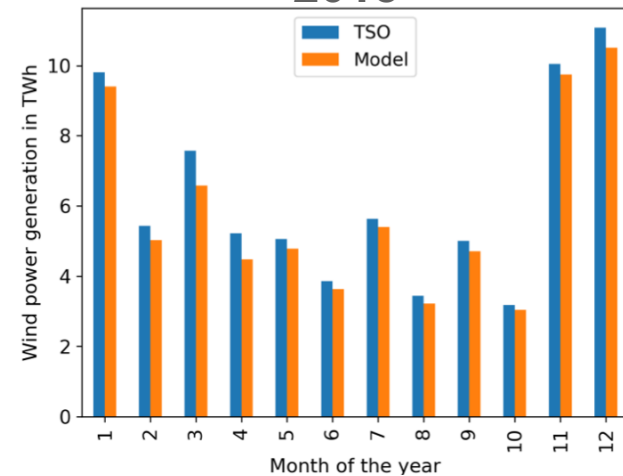
2013



2014



2015

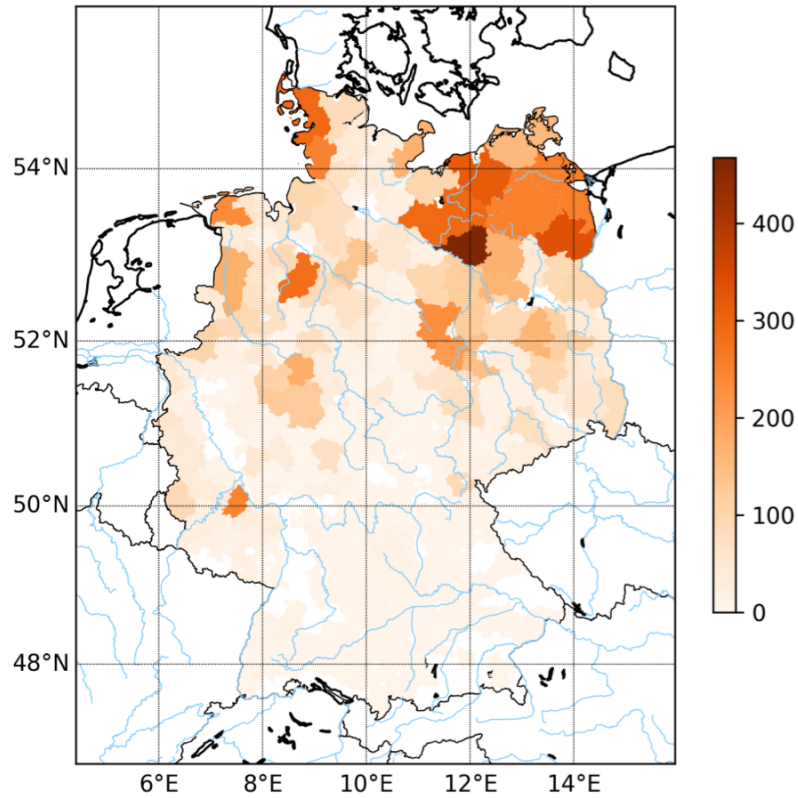


# Modell vs. TSO: Jährliche Energiemengen in TWh

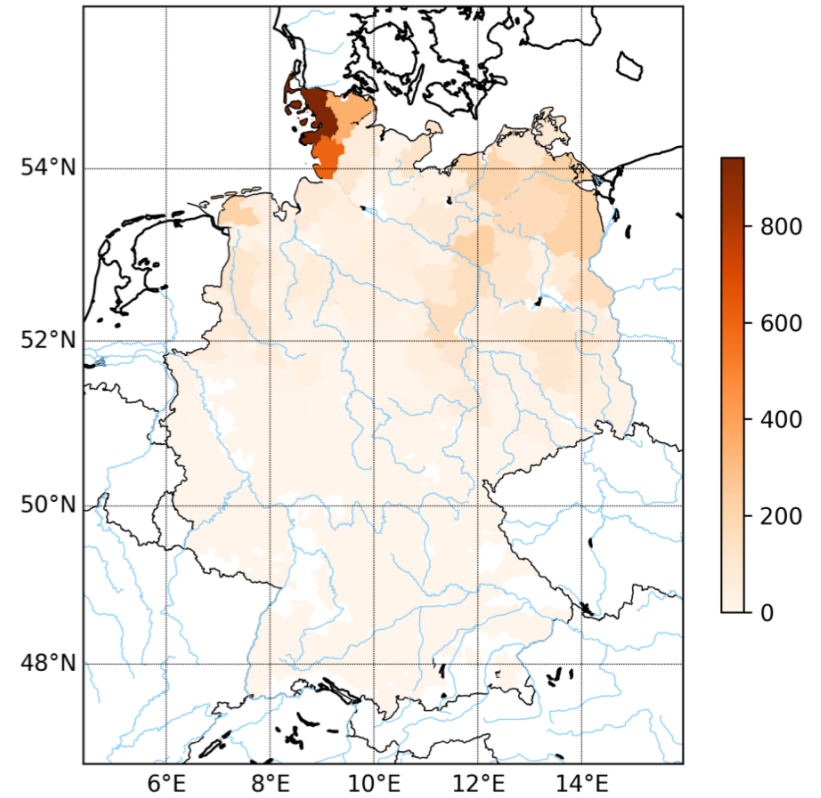
Jahr	Modell	BMWi	ÜNB
2012	45,54	49,95	45,98
2013	46,69	50,80	46,25
2014	52,04	55,91	50,07
2015	70,53	70,91	75,35

# NUTS3

Wind power generation in MW:  
2014-01-01 00:00:00



Wind power generation in MW:  
2015-01-01 00:00:00



# ZUSAMMENFASSUNG



# Zusammenfassung

- Räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Einspeisezeitreihen erbringen einen Mehrwert:
  - Regionales Monitoring der Energiewende möglich
  - Energiesystem- und Netzmodelle benötigen feinere Granularität
- Regionale Reanalyse-Modelle sind gut geeignet für solche Zwecke
- Nächste Schritte:
  - Korrektur mit installierten Leistungen auf Bundeslandebene
  - Veröffentlichung des Datensatz im Februar/März 2018 unter der DOI [10.5281/zenodo.1156956](https://doi.org/10.5281/zenodo.1156956)

# QUELLEN

# Quellen

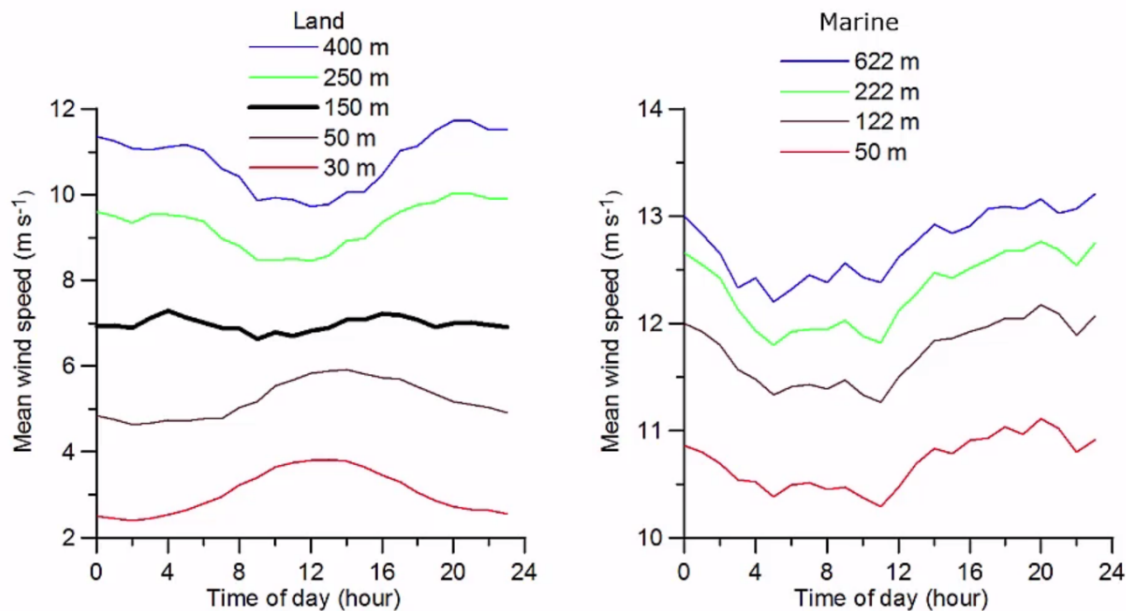
- [1] Hans Ertel Centre for Weather Research
- [2] C. Bollmeyer, J. D. Keller, C. Ohlwein, S. Wahl, S. Crewell, P. Friederichs, A. Hense, J. Keune, S. Kneifel, I. Pscheidt, S. Redl, S. Steinke, Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 141 (686) (2015) 1–15.
- [3] R. Becker, D. Thrän (2017): Completion of wind turbine data sets for wind integration studies applying random forests and k-nearest neighbors. Applied Energy 208C (2017), pp. 252-262.

# BACKUP



# Beispiel: Low-level jet

## Diurnal wind variability



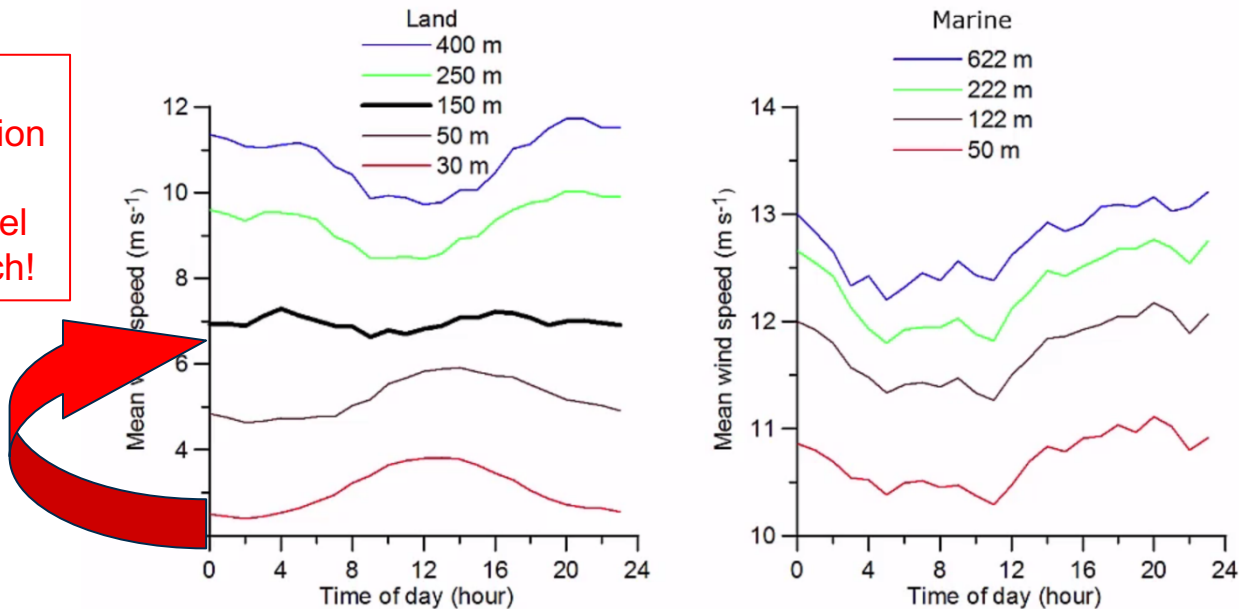
*Gryning et al., 2016: Boundary-Layer Meteorology*

Quelle: DTU Department of Wind Energy (2017), Lecture 4 Wind Profiles

# Beispiel: Low-level jet

## Diurnal wind variability

Einfache Transformation durch Höhenformel nicht möglich!



*Gryning et al., 2016: Boundary-Layer Meteorology*

Quelle: DTU Department of Wind Energy (2017), Lecture 4 Wind Profiles