



# Zukünftige Änderungen der Windenergie-Potentiale über Europa in einem großen CMIP5 Multi-Modell Ensemble

Mark Reyers<sup>(1)</sup>, Julia Moemken<sup>(1)</sup>, Joaquim G. Pinto<sup>(1,2)</sup>

(1) Inst. Geophysics & Meteorology, Univ. Cologne, Germany; (2) Dep. Meteorology, Univ. Reading; Kontakt: mreys@meteo.uni-koeln.de

**1 Einleitung** Einige neuere Studien untersuchen den Einfluss der Klima-Änderung auf regionale Windenergie-Potentiale, betrachten dabei jedoch oftmals nur einzelne GCMs, da deren Regionalisierung viel Rechenzeit beansprucht. Für die vorliegende Studie verwenden wir ein kosten-effizientes statistisch-dynamisches Downscaling-Verfahren (SDD), welches es erlaubt Zukunfts-Szenarien von großen GCM Ensembles im Hinblick auf Windenergie zu regionalisieren. Es wird die zukünftige Änderung regionaler Windenergie-Potentiale über Europa für die Mitte und das Ende des 21. Jahrhunderts in einem Ensemble von insgesamt 22 CMIP5-Modellen analysiert.

## 2 METHODIK

- **SDD** basiert auf der Klassifizierung von Wetterlagen (WL; Jones et al., 1993) und COSMO-CLM Simulationen (0.22°)
- 77 WL werden betrachtet (z.B. Nordwest, West, ..., mit verschiedenen Druck Gradienten; siehe Abb. 1)
- detaillierte Beschreibung des **SDD** in Reyers et al. (2015a)

**SDD** wird angewendet zur Bestimmung zukünftiger Änderungen von:

- Mittlerer jährlicher Windenergie Output (*Eout*)
- Intra-annuelle Variabilität von *Eout* (hinsichtlich des jahreszeitlichen *Eout* im Winter DJF und Sommer JJA)
- Inter-annuelle Variabilität von *Eout* (hinsichtlich der Standardabweichung des jährlichen *Eout*)

Untersucht werden RCP4.5 and RCP8.5 Szenarien von 22 CMIP5 Modellen für die Perioden 2021-2060 und 2061-2100

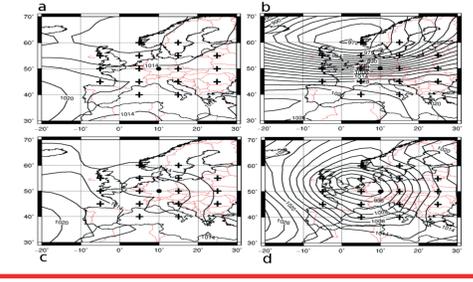


Abb. 1: Klimatologien der Wetterlagen (a) West mit einem Druckgradienten von 0-5hPa pro 1000km, (b) West mit 35-40hPa pro 1000km, (c) Zyklonal mit 0-5hPa pro 1000km, (d) Zyklonal mit 20-25hPa pro 1000km. An den mit Kreuzen gekennzeichneten Gitterpunkten wurde der Bodendruck zur WL Klassifizierung benutzt.

## 3 EVALUIERUNG DER CMIP5 MODELLE

- CMIP5 Modelle überschätzen meist die westlichen WL verglichen zu Reanalysen (Tab. 1)
- Vier Modelle weisen realistische Auftrittshäufigkeiten auf (grün unterlegt in Tab. 1)
- CMIP5 Ensemble-Mittel überschätzt *Eout* für die historische Periode 1961-2000 (siehe Abb. 2)
- Bias-Korrektur der Häufigkeiten hat jedoch nur einen geringen Einfluss auf Zukunfts-Projektionen (nicht gezeigt)

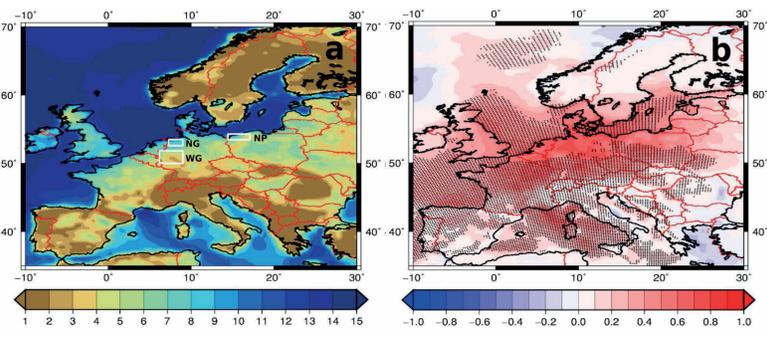
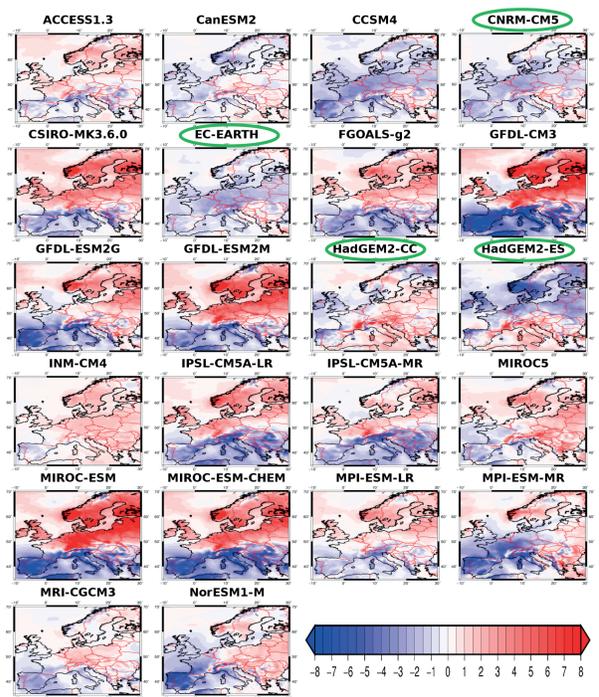


Abb. 2: (a) Mittlerer jährlicher Eout in 10<sup>3</sup>MWh für ERA-Interim. (b) Differenz des jährlichen Eout des Ensemble-Mittels der historischen Läufe der CMIP5-Modelle zu ERA-Interim. Punkte kennzeichnen Gitterpunkte an denen 18+ CMIP5 Modelle Eout überschätzen.

MODEL	W	W+ (P-15)	SW, W, NW
ERA-Interim	9.58	4.54	27.61
ACCESS1.3	+1.00	+1.97	-0.35
CanESM2	+3.02	+3.45	+6.06
CCSM4	+7.47	+7.36	+13.10
CNRM-CM5	-0.05	+0.59	+0.44
CSIRO-MK3.6.0	-2.02	-1.21	-4.46
EC-EARTH	+0.51	+1.06	+0.21
FGOALS-g2	-1.67	-1.52	-2.58
GFDL-CM3	+1.88	+1.85	+4.39
GFDL-ESM2G	+3.56	+2.86	+8.16
GFDL-ESM2M	+2.31	+2.01	+4.80
HadGEM2-CC	-0.68	0	-2.67
HadGEM2-ES	-0.62	-0.06	-2.56
INM-CM4	+2.67	+2.94	+4.30
IPSL-CM5A-LR	+4.58	+4.08	+9.34
IPSL-CM5A-MR	+4.24	+4.03	+10.24
MIROC5	-3.83	-2.37	-7.84
MIROC-ESM	+3.62	+3.11	+9.13
MIROC-ESM-CH	+2.84	+2.82	+7.38
MPI-ESM-LR	+1.65	+1.56	+5.22
MPI-ESM-MR	+3.22	+2.50	+8.07
MRI-CGCM3	+3.56	+4.01	+6.56
NorESM1-M	+6.54	+5.38	+12.43

Tab. 1: Auftrittshäufigkeit der WL West (2. Spalte), WL West mit starkem Druckgradient (3. Spalte), und Summe aller westlichen WL (4. Spalte) für ERA-Interim und die CMIP5 Modelle.

## 4 ÄNDERUNG DES JÄHRLICHEN WINDENERGIE-POTENTIALS



- Zukunfts-Änderungen unterscheiden sich deutlich zwischen den einzelnen Modellen (Abb. 3)
- Vier Modelle mit realistischen westlichen WL Häufigkeiten (vgl. Tab.1) weisen Abnahme von *Eout* auf (grün umrandet in Abb. 3)
- Ensemble-Mittel: Zunahme in Mittel- und Nord-Europa, Abnahme in Süd-Europa (Abb. 4)
- Stärkere und stabilere Änderungen für 2061-2100 → 15+ Modelle haben den selben Trend (Abb. 4)

Abb. 3: Änderungen des jährlichen Eout in % für RCP8.5 (2061-2100) minus den historischen Läufen (1961-2000) in den einzelnen CMIP5 Modellen.

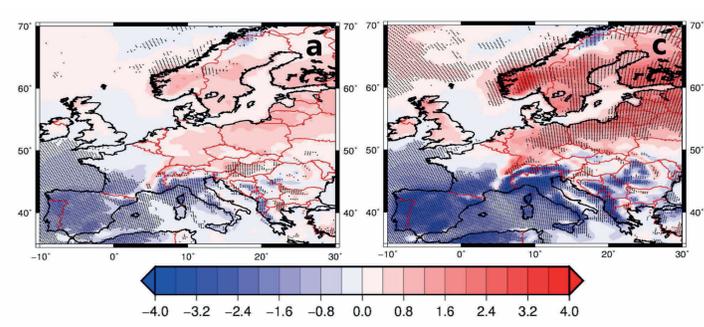


Abb. 4: Änderungen des jährlichen Eout in % für das Ensemble-Mittel unter RCP8.5 für 2021-2060 (links) und 2061-2100 (rechts) minus historischer Periode (1961-2000). Punkte kennzeichnen Gitterpunkte an denen 15+ Modelle das selbe Vorzeichen wie das Ensemble-Mittel aufweisen.

## 5 ÄNDERUNG DER INTRA- UND INTER-ANNUELLEN VARIABILITÄT

- Modelle zeigen meist Zunahme von *Eout* über Nord-Europa und Abnahme über Süd-Europa im Winter, und umgekehrt für Sommer (Abb. 5a-d)
- Deutliche Verstärkung der **intra-annuellen** Variabilität über Nord-Europa, v.a. für 2061-2100 (15+ Modelle, siehe Abb. 5e-f)

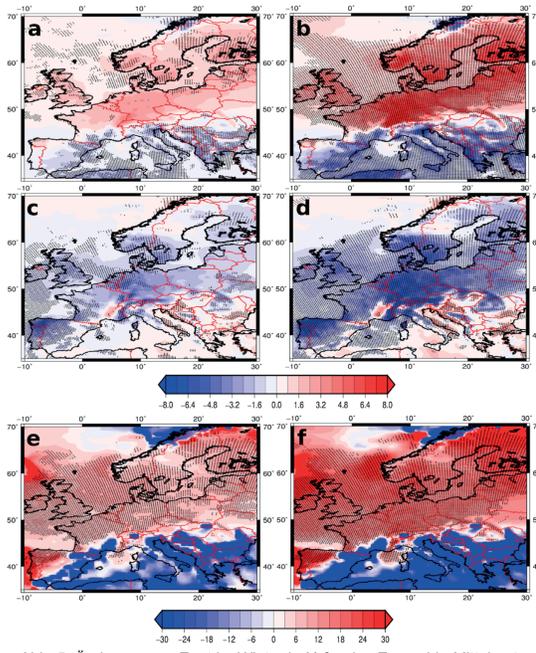


Abb. 5: Änderung von Eout im Winter in % für das Ensemble-Mittel unter RCP8.5 für (a) 2021-2060 und (b) 2061-2100. (c), (d) für Sommer. Änderung der intra-annuellen Variabilität (Winter minus Sommer) für (e) 2021-2060 und (f) 2061-2100. Punkte kennzeichnen Gitterpunkte an denen 15+ Modelle das selbe Vorzeichen wie das Ensemble-Mittel aufweisen.

- Änderung der **inter-annuellen** Variabilität weist starke Streuung zwischen den einzelnen Modellen auf (Abb. 6)
- Median um Null, Zu- und Abnahmen variieren zwischen -40% und +40%
- Sehr große Unsicherheit

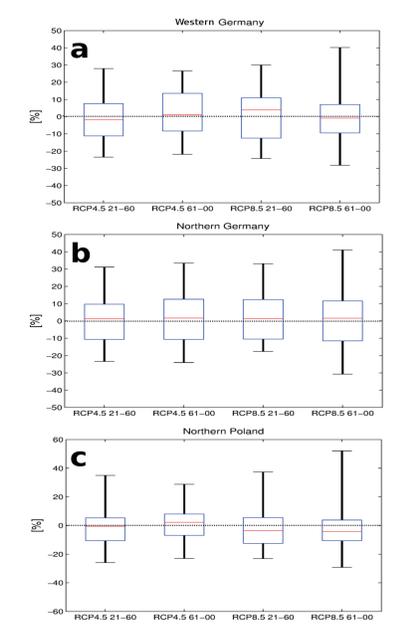


Abb. 6: Box-Whisker Plots für die Änderung der inter-annuellen Variabilität von Eout in % in den 22 Ensemble Mitgliedern für (a) West Deutschland, (b) Nord Deutschland, und (c) Nord Polen (vgl. Abb. 2a).

## 6 Schlussfolgerungen

- Moderate zukünftige Zunahme von *Eout* über Nord- und Zentral-Europa im Ensemble-Mittel
- Mehr *Eout* über dem Baltikum und weniger *Eout* über Süd-Europa in der Periode 2061-2100 in 15+ Modellen
- Zunahme der intra-annuellen Variabilität in 15+ Modellen und somit eine höhere Unregelmäßigkeit in der Windenergie-Erzeugung über weiten Teilen Europas
- Zuverlässige Aussagen über Änderungen der inter-annuellen Variabilität sind aufgrund der hohen Unsicherheit zwischen den Modellen nicht möglich

### LITERATUR:

- Jones PD, Hulme M, Briffa KR (1993): *Int. J. Climatol.* **13**: 655-663
- Reyers M, Pinto JG, Moemken J (2015a): *Int. J. Climatol.* **35**: 229-244
- Paper eingereicht als: Reyers M, Moemken J, Pinto JG (2015b): *Int. J. Climatol.*; doi:10.1002/joc.4382