

# **Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland**

**Dirk Schindler**

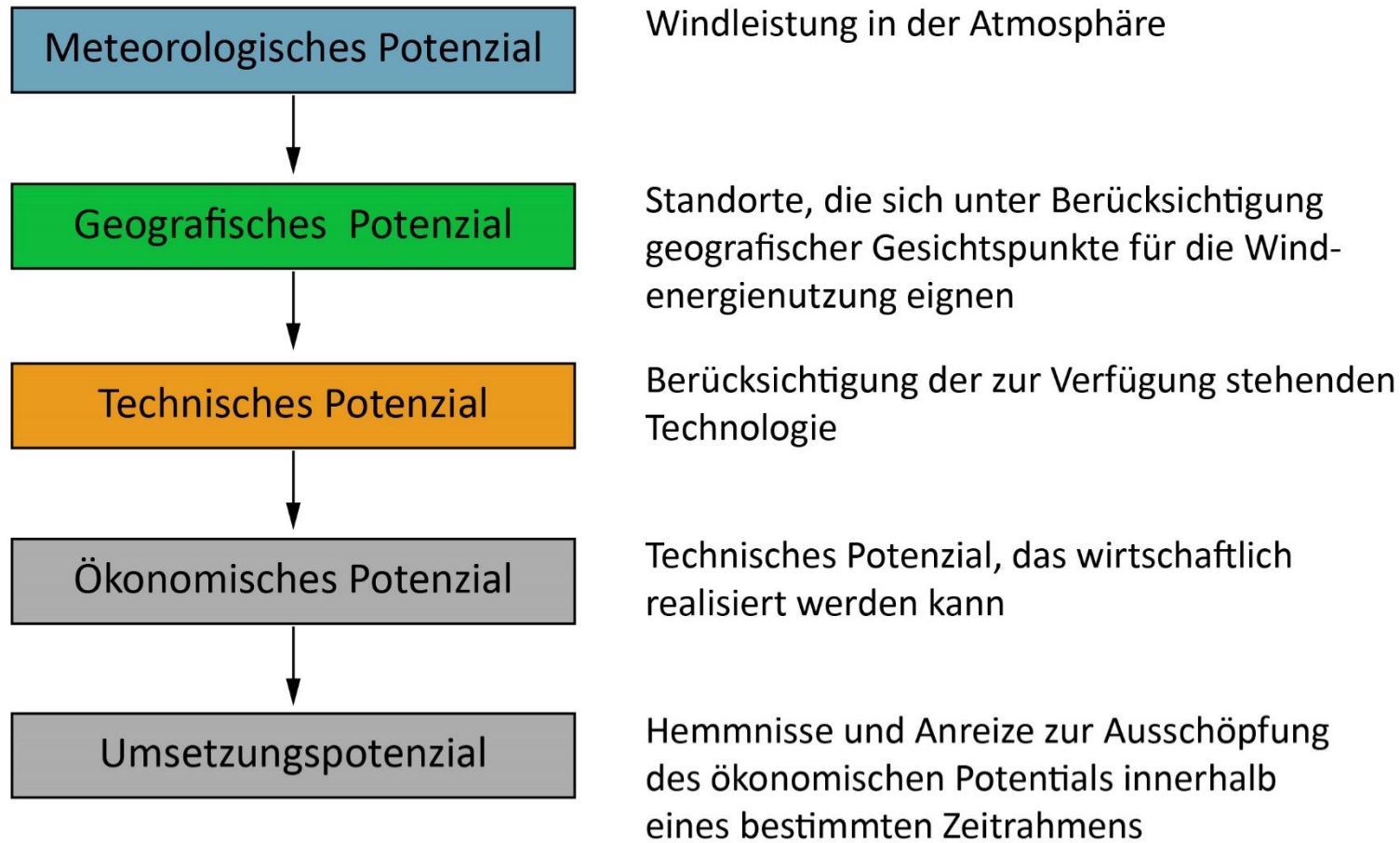
**Professur für Umweltmeteorologie, ALU Freiburg**

**[dirk.schindler@meteo.uni-freiburg.de](mailto:dirk.schindler@meteo.uni-freiburg.de)**

# Hintergrund

## Abschätzung von Windenergiepotenzialen

Windenergiepotenziale werden auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen meist nach dem folgenden Muster abgeschätzt:

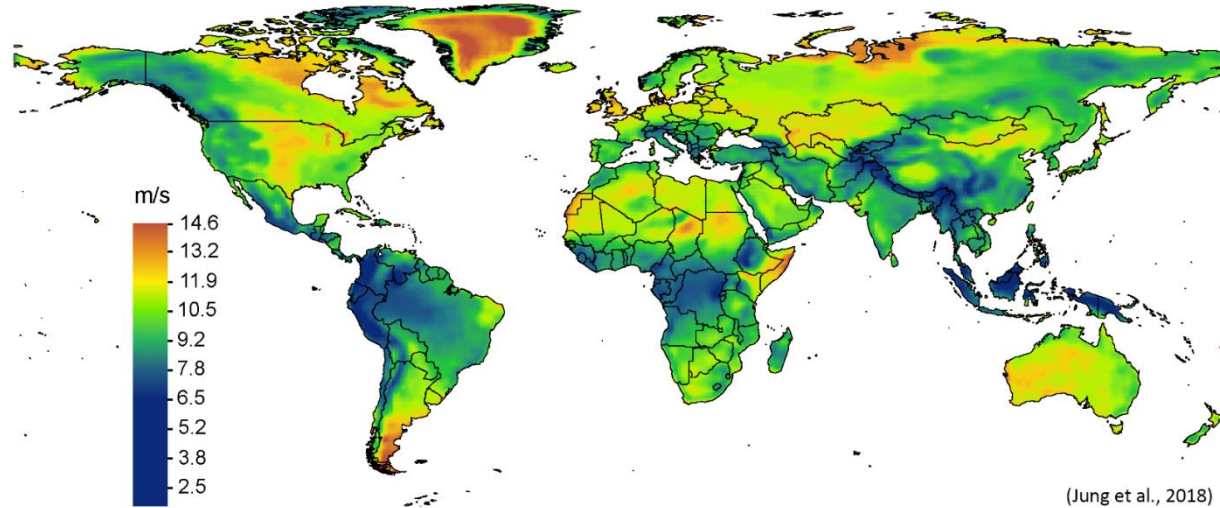


# Hintergrund

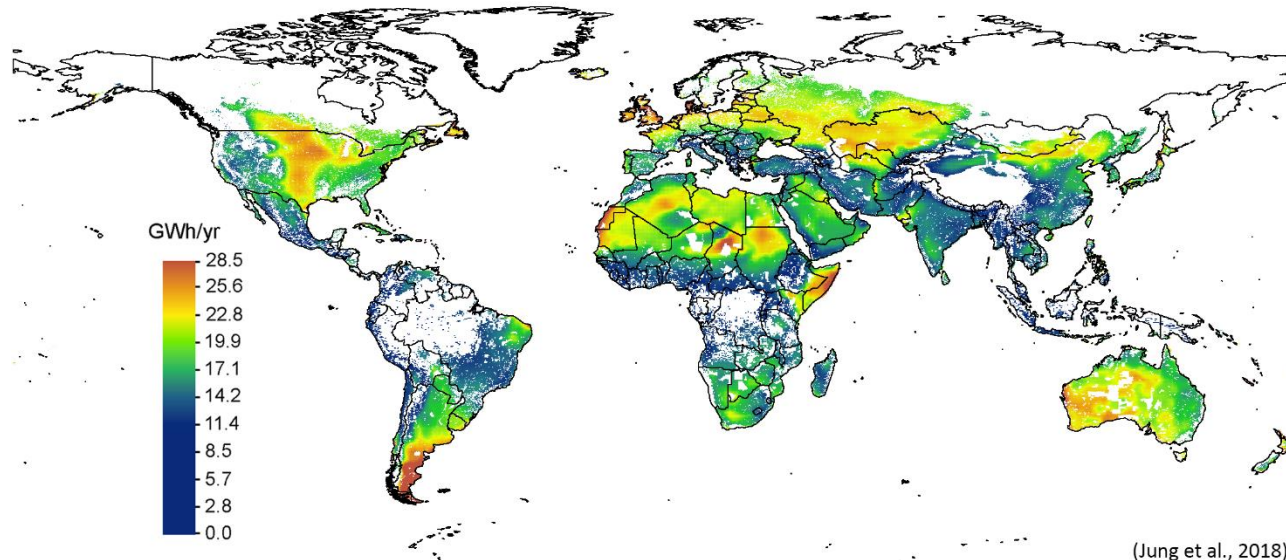
Vom Groben ins Detail

## Abschätzung des globalen technischen Windenergiepotenzials

Mittlere Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe im Zeitraum 2008-2010 ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ )



Mittleres technisches Windenergiepotenzial in 100 m Höhe im Zeitraum 2008-2010



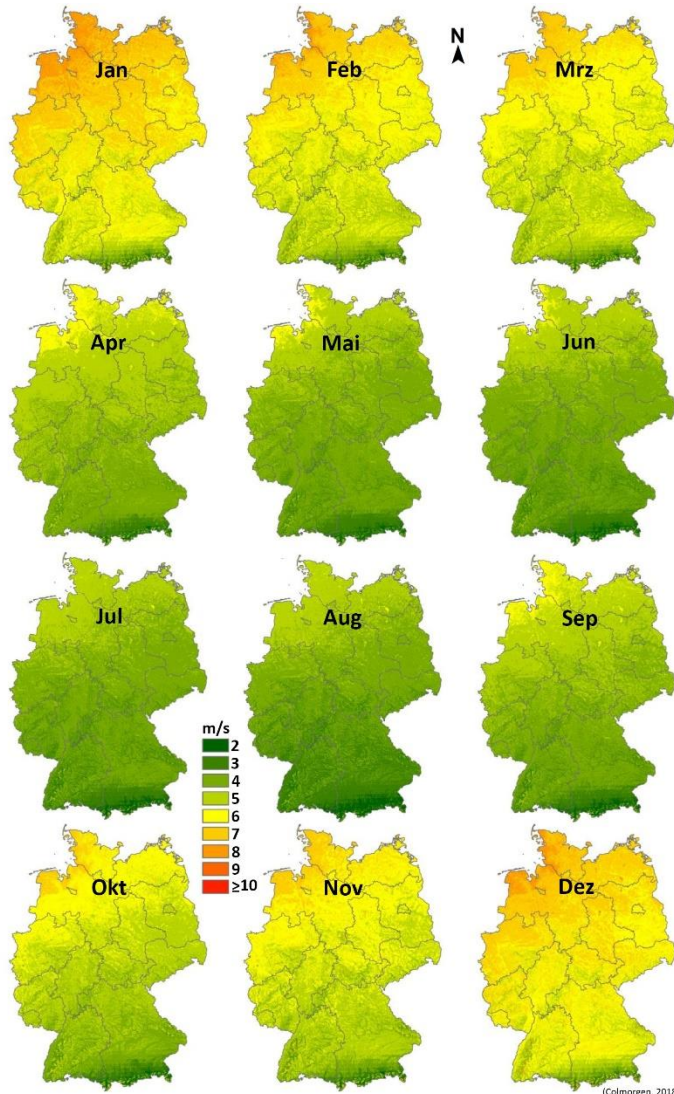
Bedeutende  
Ausschlussflächen:  
Permafrostregionen,  
tropische Wälder

# Hintergrund

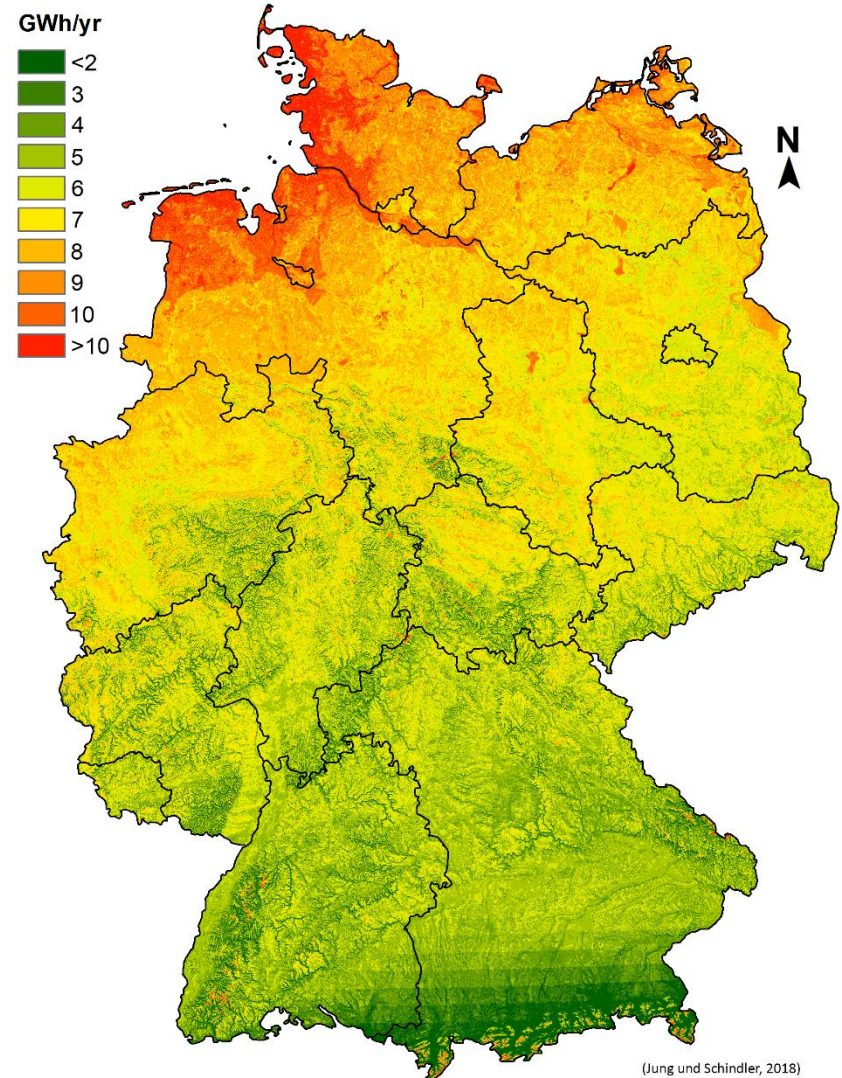
Vom Groben ins Detail

## Abschätzung des technischen Windenergiepotenzials in Deutschland

Mittlere monatliche Windgeschwindigkeit in  
140 m Höhe 1979-2014 (200 m × 200 m)



Mittlerer jährlicher Windenergieertrag in  
140 m Höhe 1979-2014 (200 m × 200 m)

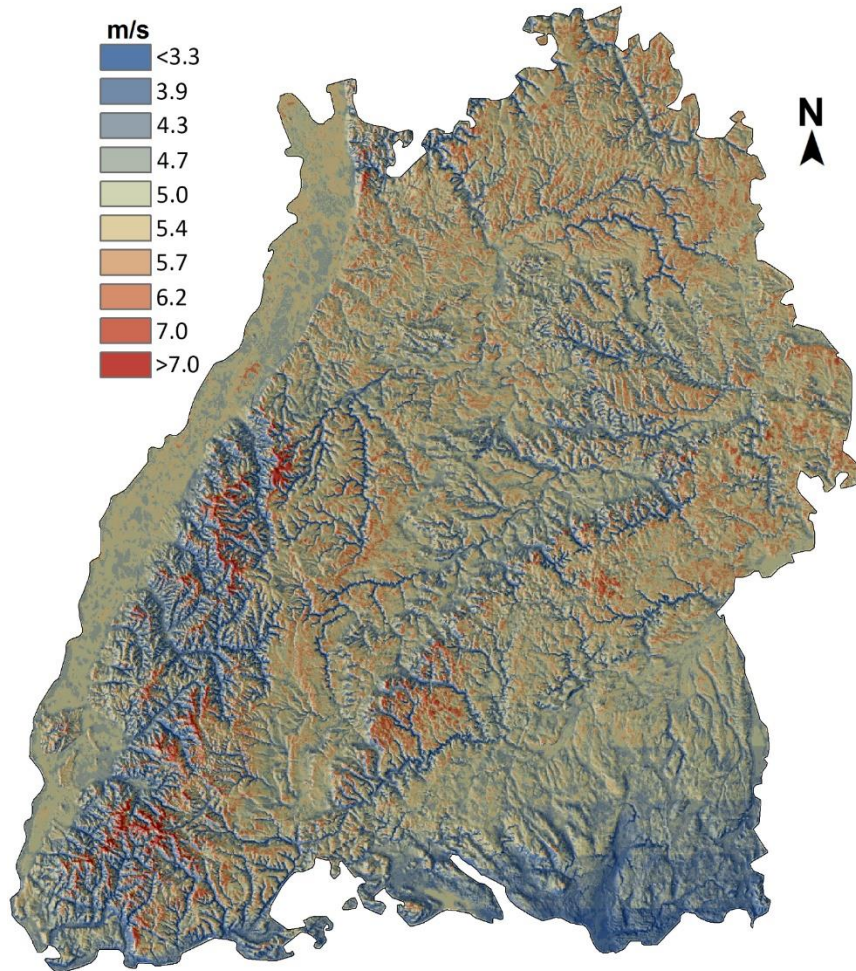


# Hintergrund

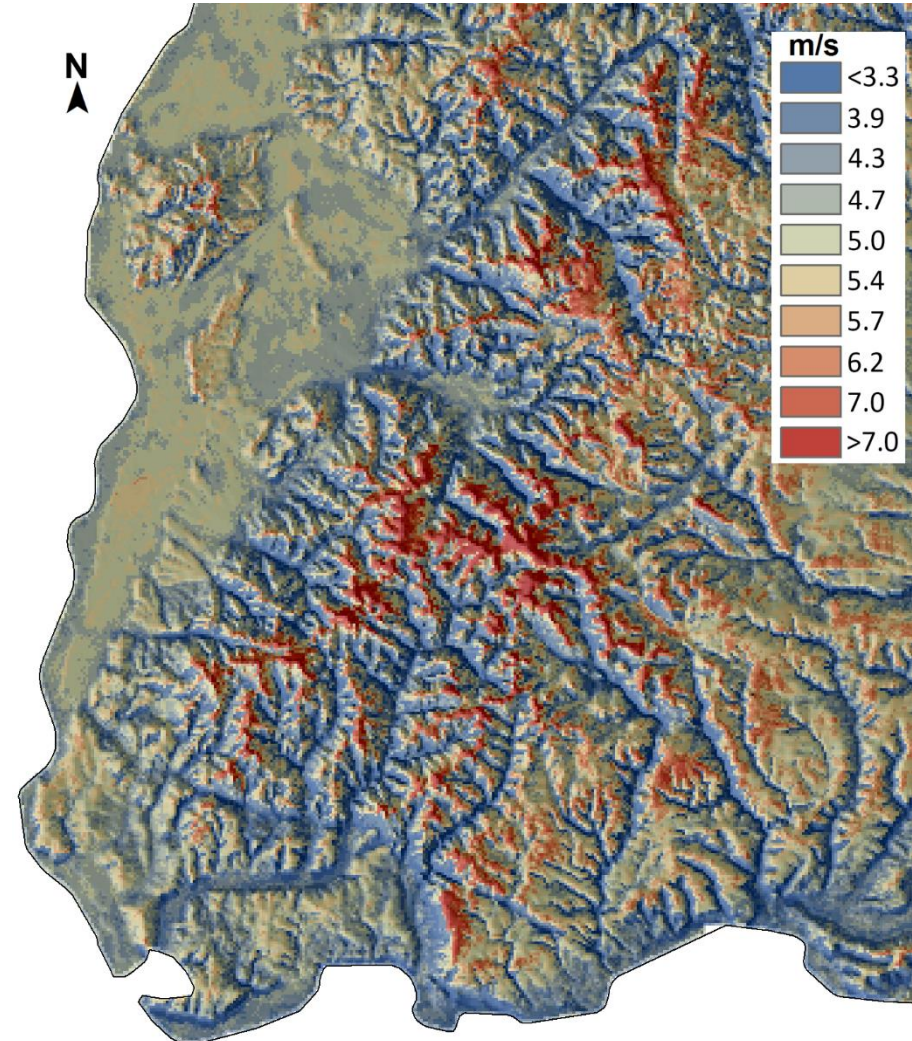
Vom Groben ins Detail

## Abschätzung des technischen Windenergiepotenzials in Baden-Württemberg

Mittlere Windgeschwindigkeit in 140 m Höhe  
1979-2014 (200 m × 200 m)



Mittlere Windgeschwindigkeit in 140 m Höhe  
1979-2014 (200 m × 200 m)

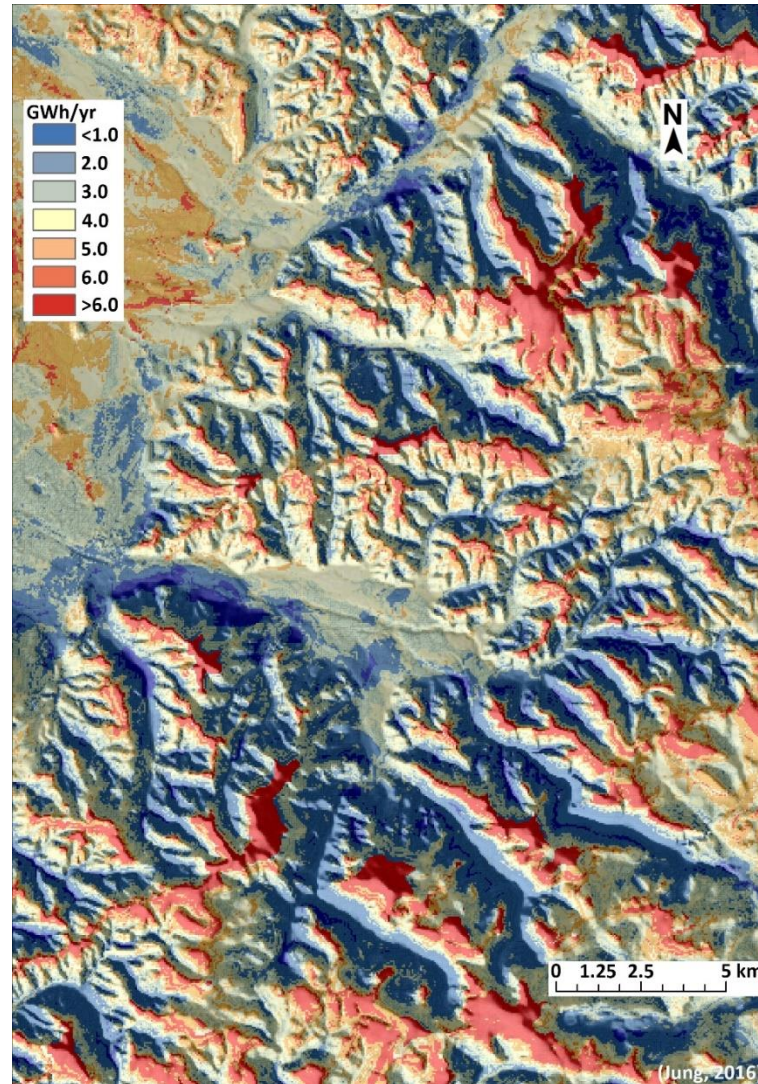


# Hintergrund

Vom Groben ins Detail

## Abschätzung des technischen Windenergiepotenzials im Raum Freiburg

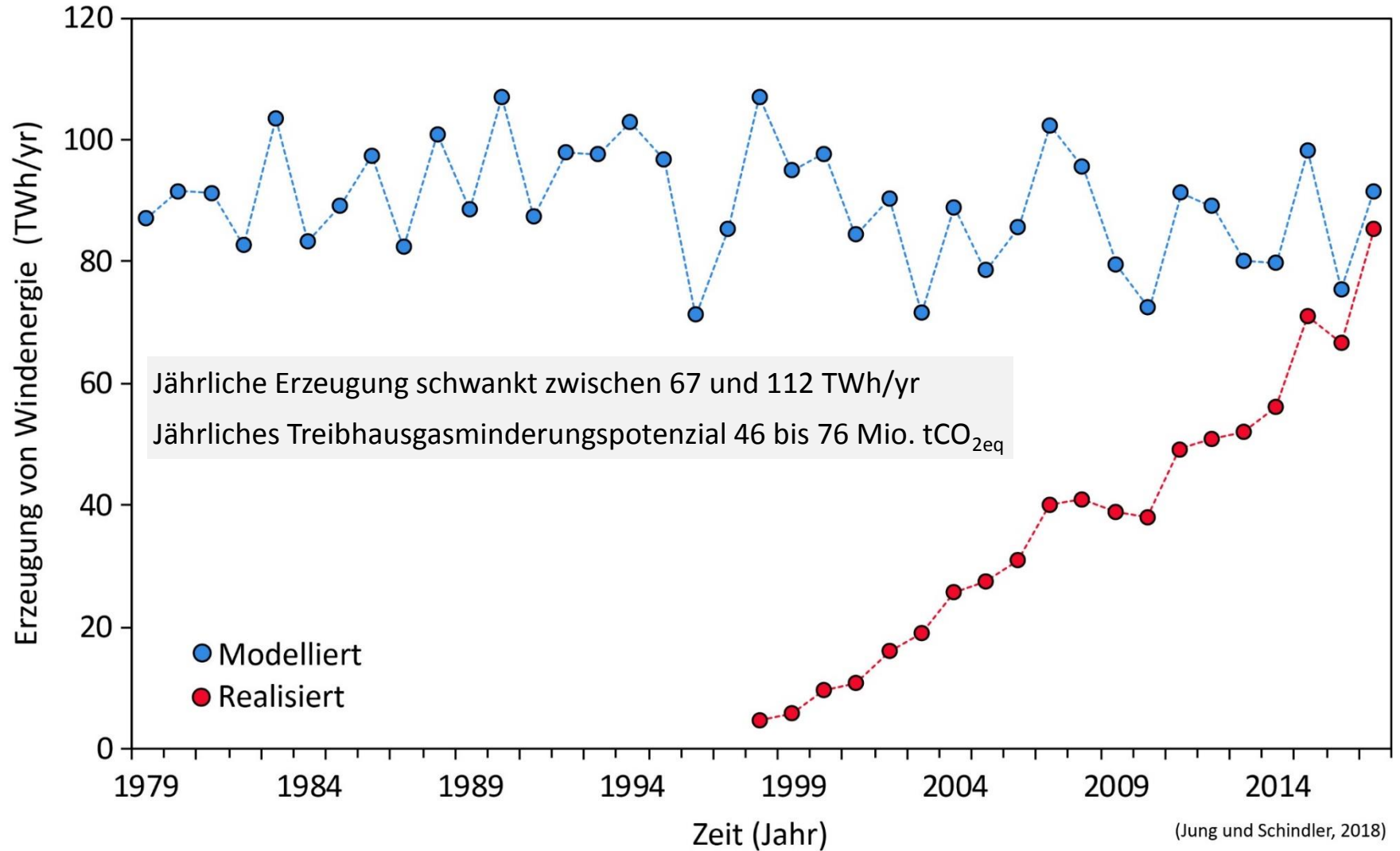
Mittlerer jährlicher Windenergieertrag 1979-2010 für eine 2.5 MW Windenergieanlage mit einer Nabenhöhe von 100 m (50 m × 50 m) in der Region Freiburg



# Hintergrund

## Langfristige Variabilität der Windenergieerzeugung in Deutschland 1979-2017

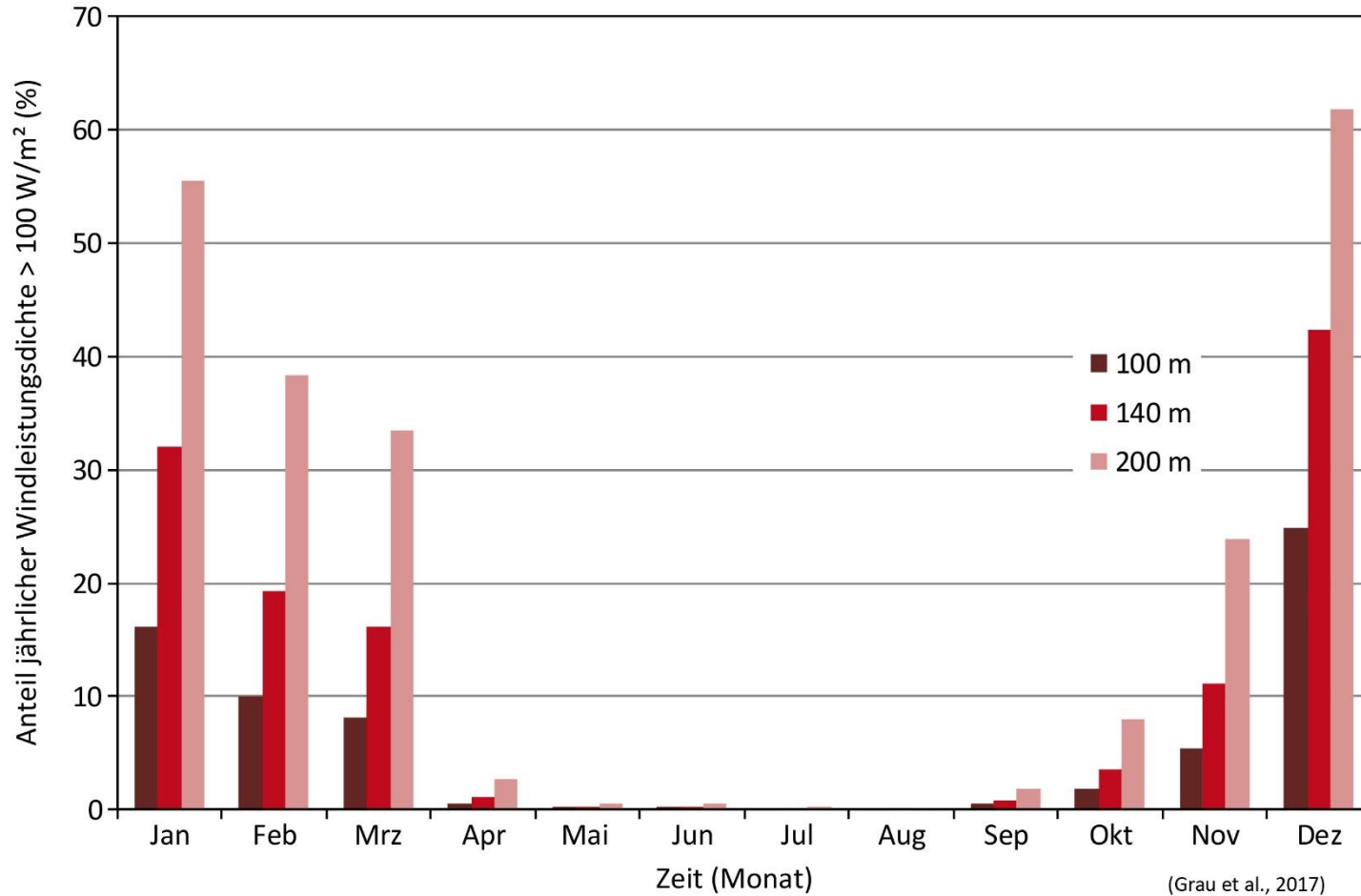
Berechnungsgrundlage: Windenergieanlagenbestand 2017



# Hintergrund

## Saisonale Variabilität der Windleistung in Baden-Württemberg

Mittlere Windleistungsdichte **größer als  $100 \text{ W/m}^2$**  in verschiedenen Nabenhöhen 1979-2010



→ Sehr deutlich ausgeprägter Jahresgang, klares Maximum in den Wintermonaten



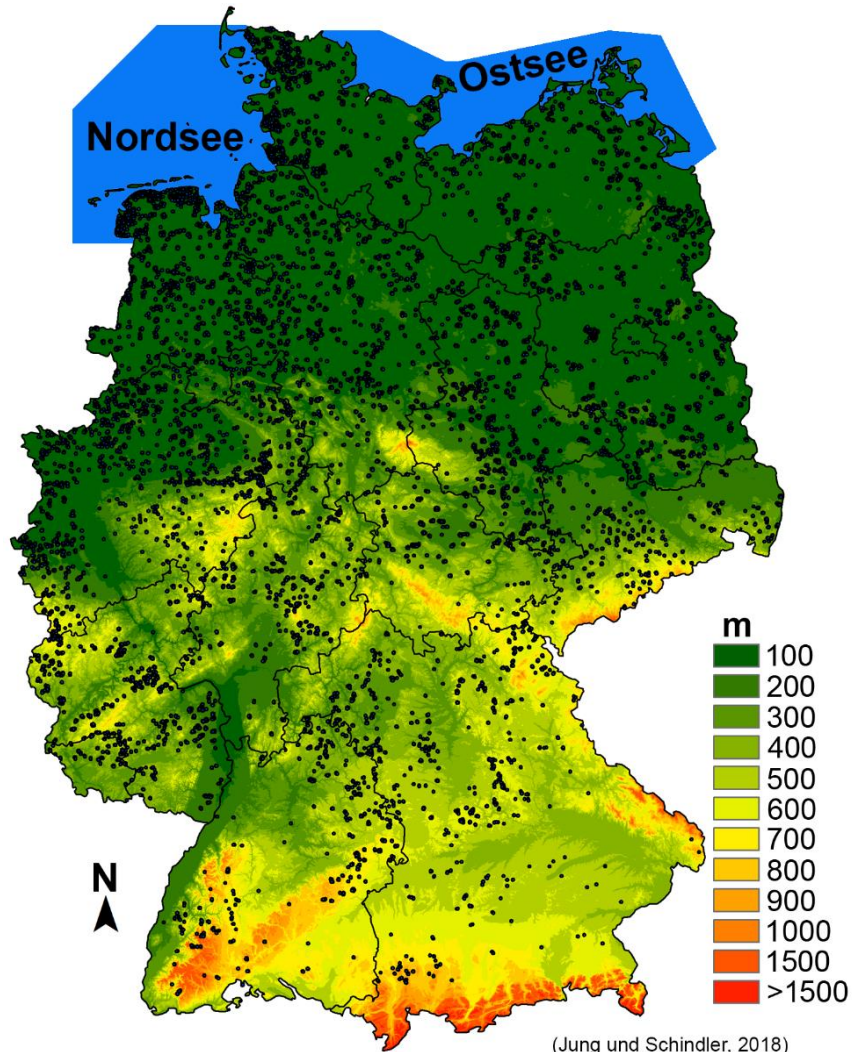
# Hintergrund

## Windenergiebezogene Ausbauziele der Bundesregierung

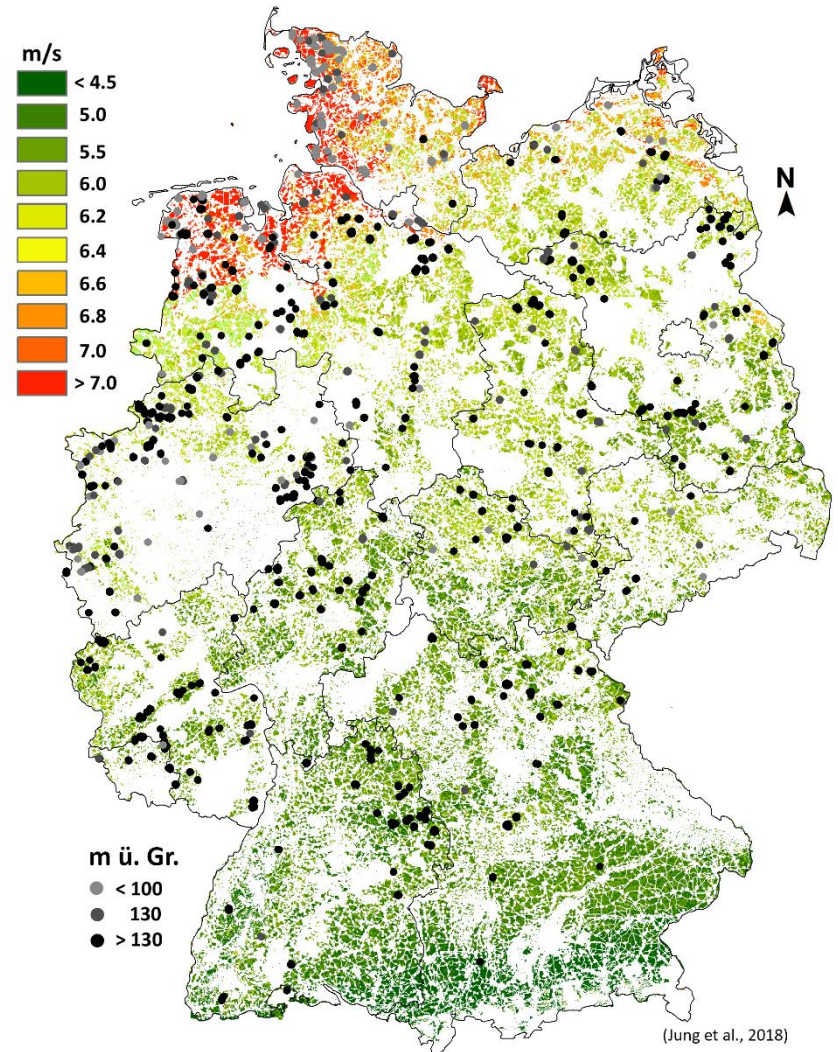
- Bis **2030** sollen Erneuerbare Energien (EE) **65 %**, bis **2050** mindestens **80 %** des deutschen Bruttostromverbrauchs (2017: ~ 600 TWh) decken.
- **2017 installierte EE-Leistung** zur Stromerzeugung betrug ~ **111.9 GW**, davon **Windleistung** ~ 50.8 GW *onshore* und ~ 5.4 GW *offshore*, verteilt auf ~ 28 700 bzw. ~ 1 200 Anlagen.
- 2017 wurden
  - ~ 1 800 *Onshore*-Windenergieanlagen (~ 5.3 GW)
  - ~ 220 *Offshore*-Windenergieanlagen (~ 1.3 GW)zugebaut.
- Ziele des Ausbaus der Windenergie bis 2030 (installierte Leistung):
  - *Offshore* 15.0 GW
  - *Onshore* 69.6 GW
- Der mittlere Kapazitätsfaktor betrug 2016 und 2017 in Deutschland ~ 0.20 bzw. ~ 0.24.
- **Fragestellung:** Wie kann der Windenergieanlagenbestand optimiert werden, damit Windenergie in Deutschland im Jahr 2030 möglichst effizient erzeugt wird und 40 % (~ 250 TWh/yr) zur Deckung des Bruttostromverbrauchs beiträgt?

# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

Installierte Windenergieanlagen mit Angaben zur Geländehöhe (m)



2017 neu installierte Windenergieanlagen mit Angabe zur Nabenhöhe (m)

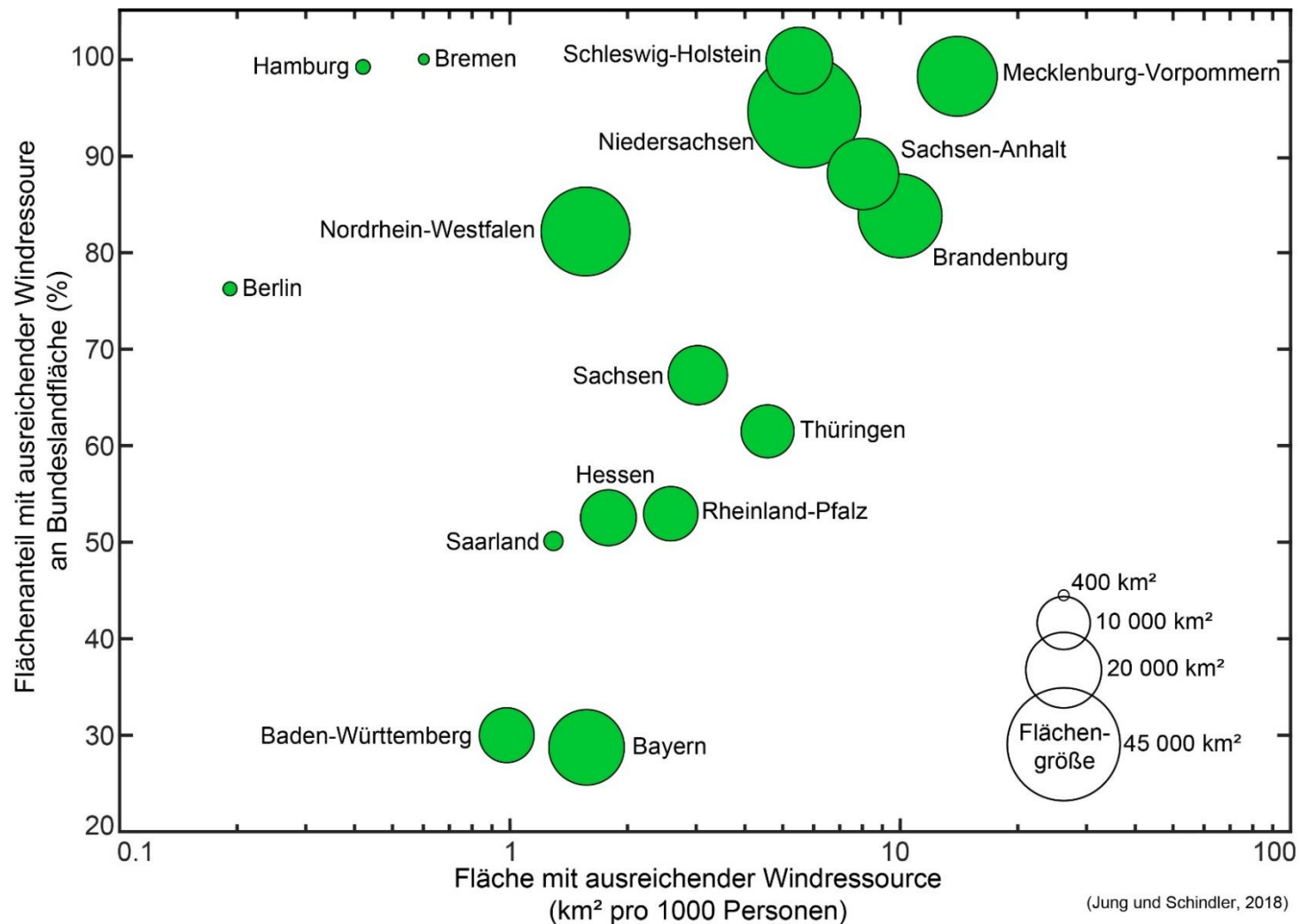


# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

## Meteorologisches Potenzial in den Bundesländern

Vergleich des Flächenanteils, in dem der Kapazitätsfaktor > 0.2, mit der Bundeslandfläche und

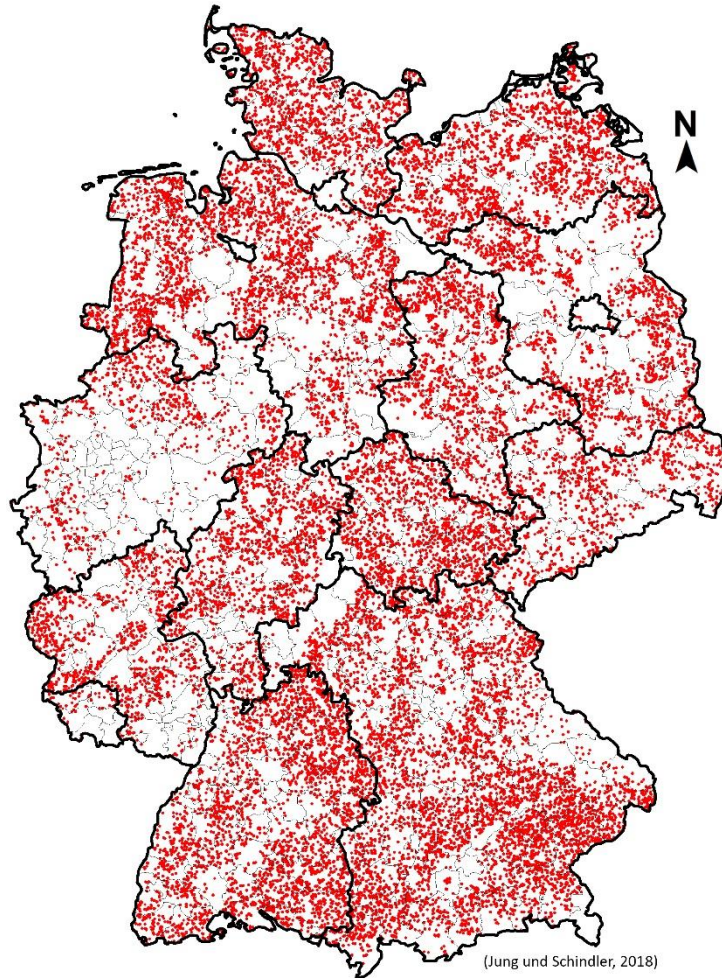
Vergleich der Fläche (km<sup>2</sup>) mit Kapazitätsfaktor > 0.2 in den Bundesländern



# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

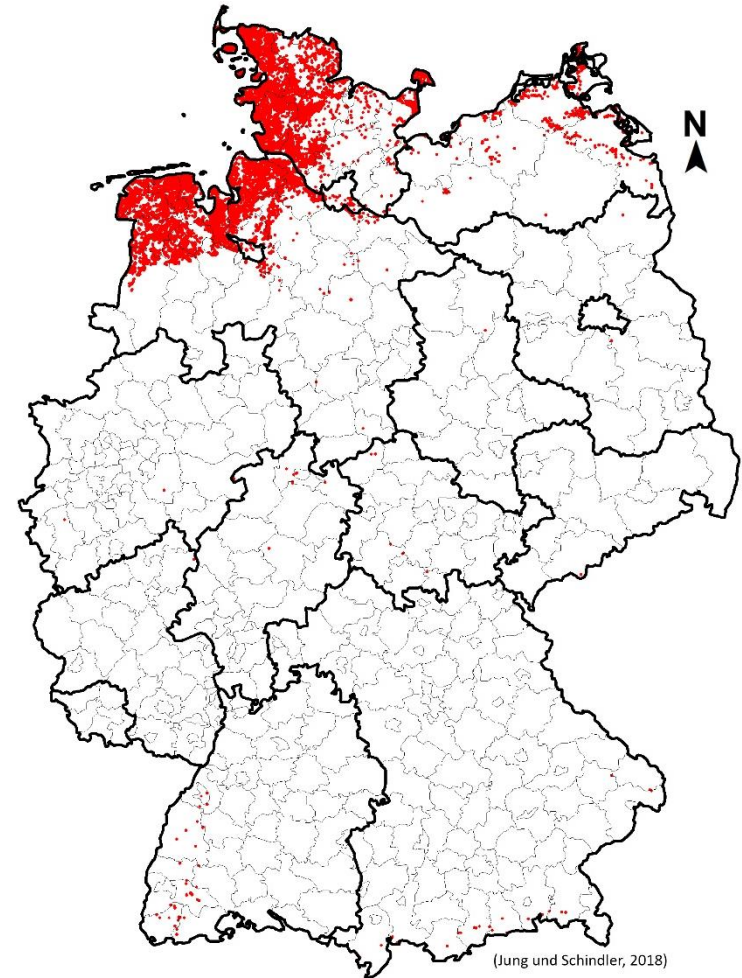
## Szenarien mit der Prämisse „Maximierung mittlerer jährlicher Windenergieertrag“

Standorte, an denen es möglich ist, Windenergie zu nutzen (Kapazitätsfaktor > 0.2)



→ 52 100 Anlagen zur Erreichung von Ausbauziel notwendig

Standorte, an denen das technische Potenzial am größten ist (ohne Repowering)

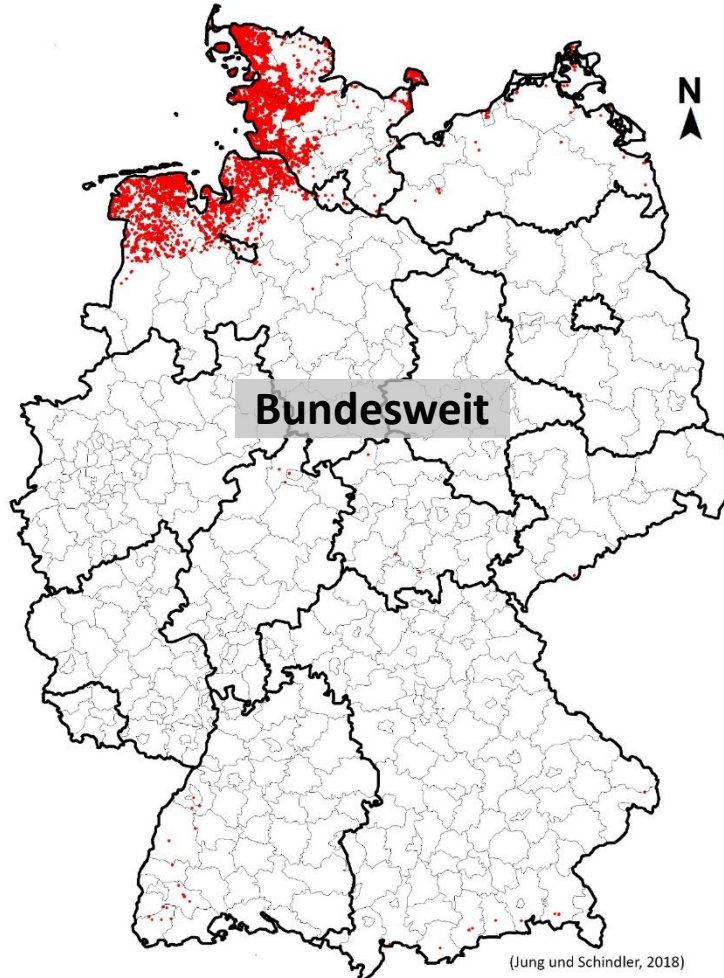


→ 41 100 Anlagen zur Erreichung von Ausbauziel notwendig

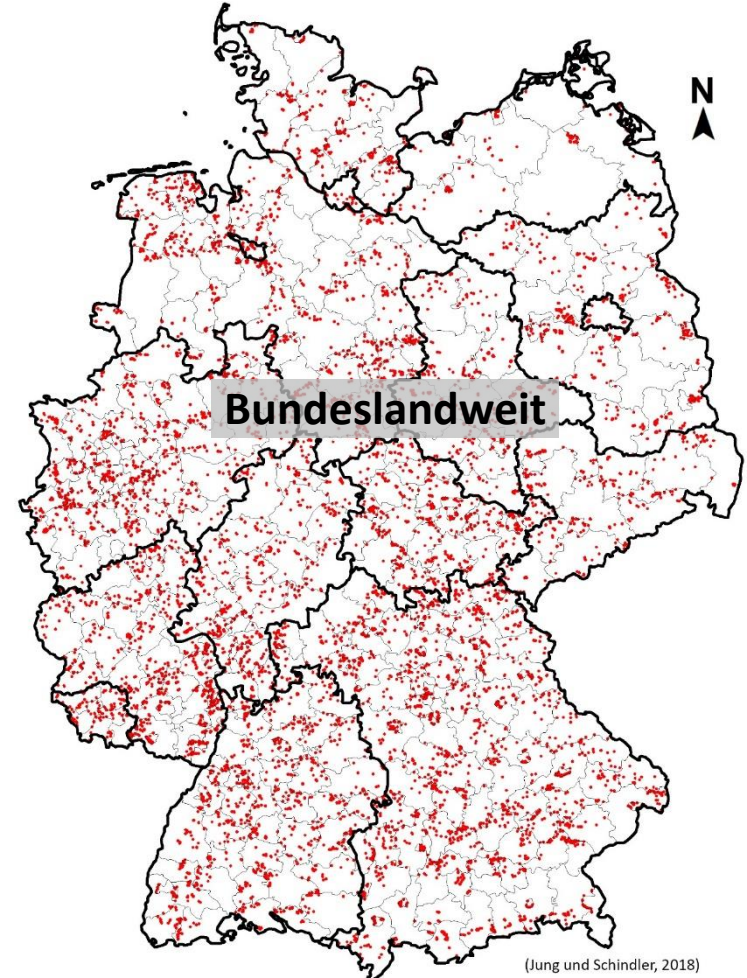
# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

## Szenarien mit der Prämisse „Minimierung Anzahl der Windenergieanlagen“

Standorte, an denen das technische Potenzial am größten ist, inklusive Repowering



→ 33 800 Anlagen zur Erreichung von  
Ausbauziel notwendig

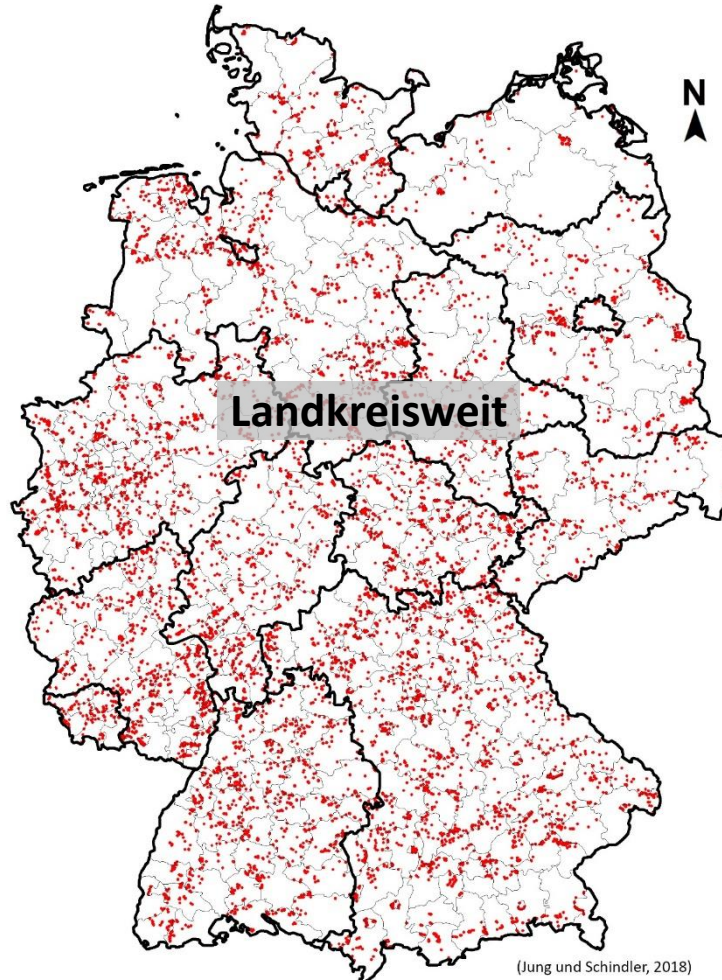


→ 35 800 Anlagen zur Erreichung von  
Ausbauziel notwendig

# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

## Szenarien mit der Prämisse „Minimierung Anzahl der Windenergieanlagen“

Standorte, an denen das technische Potenzial am größten ist, inklusive Repowering

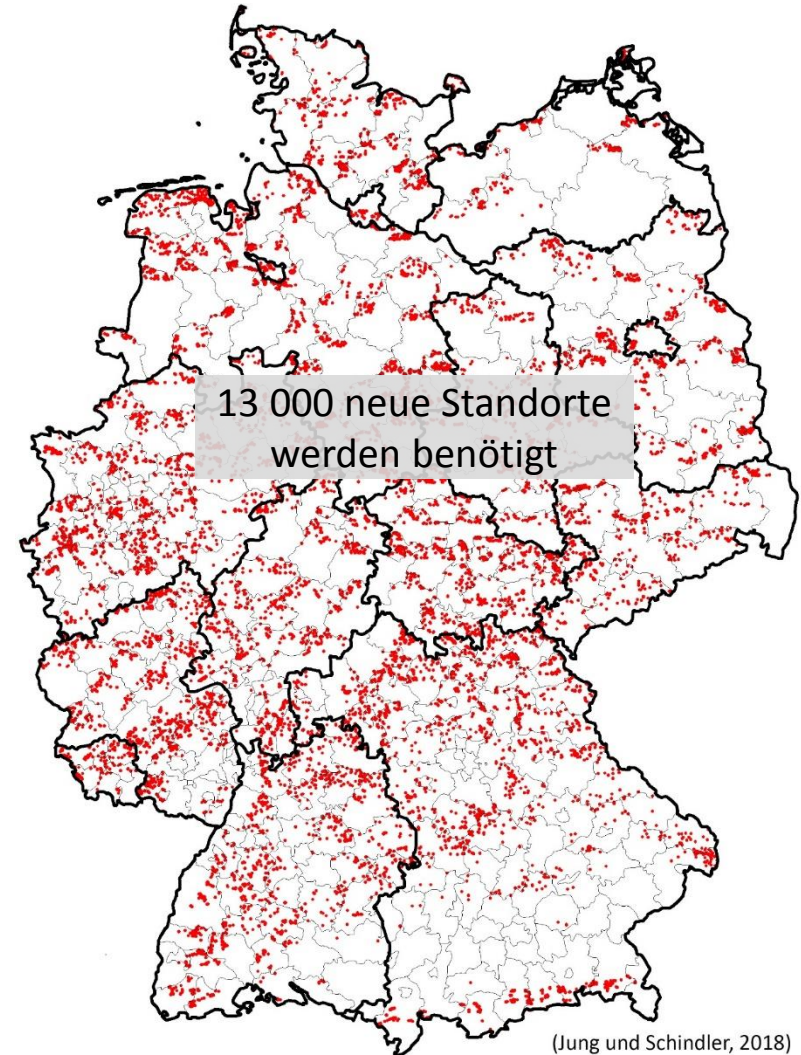
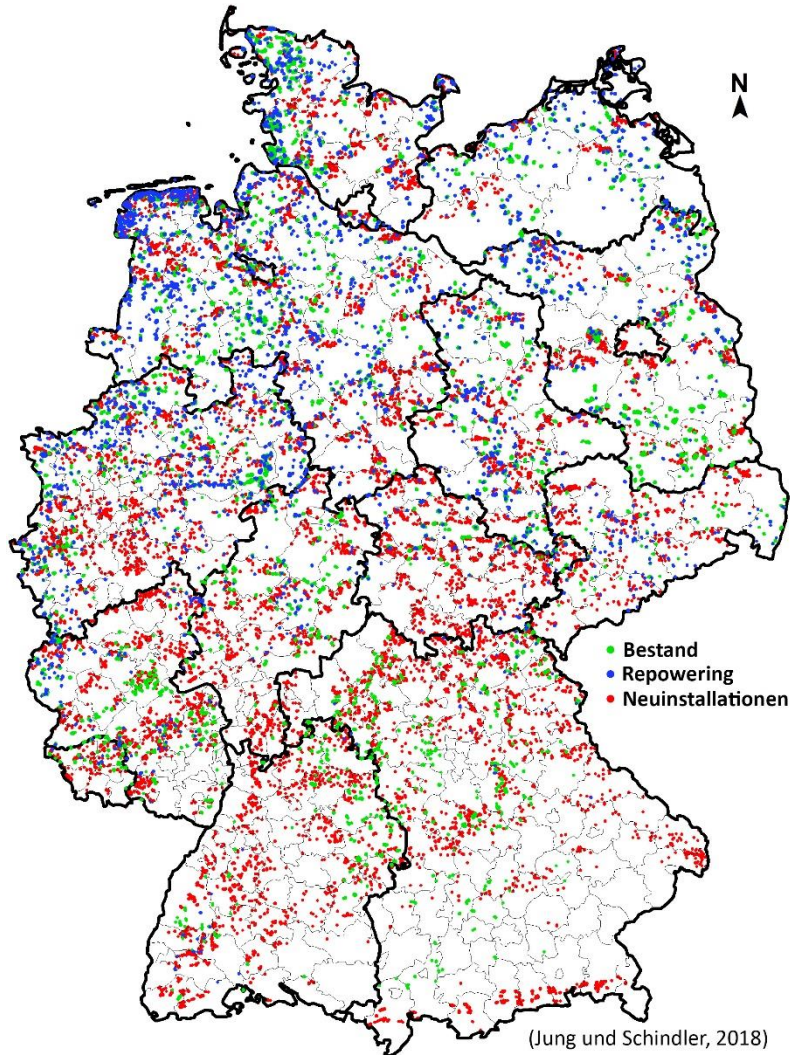


→ 36 700 Anlagen zur Erreichung von Ausbauziel notwendig

# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

## Szenarien mit der Prämisse „Minimierung Anzahl der Windenergieanlagen“

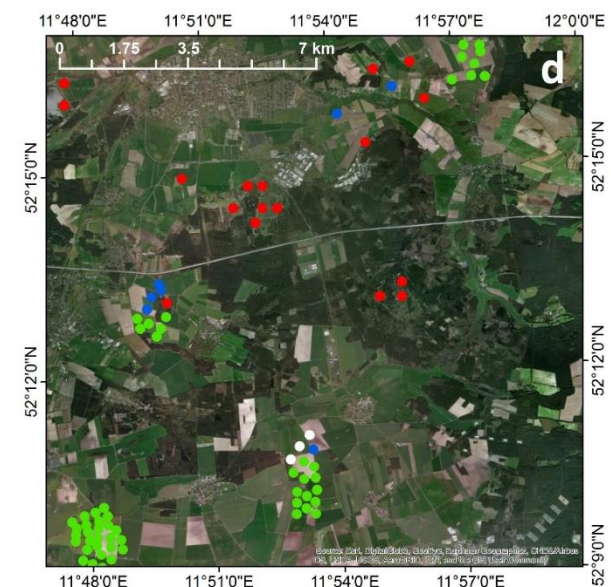
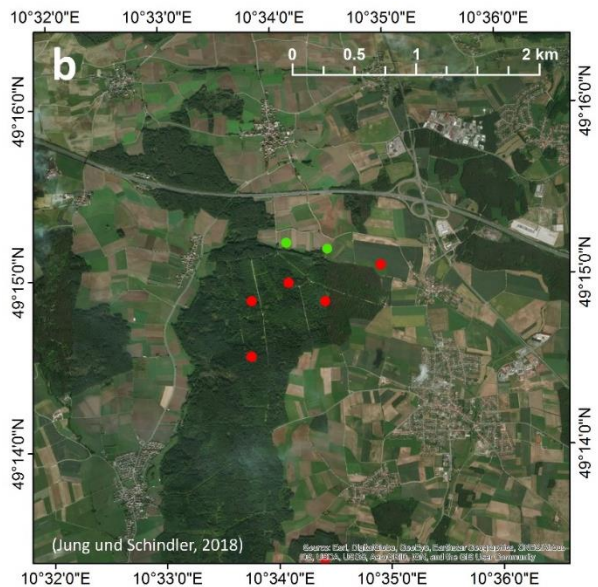
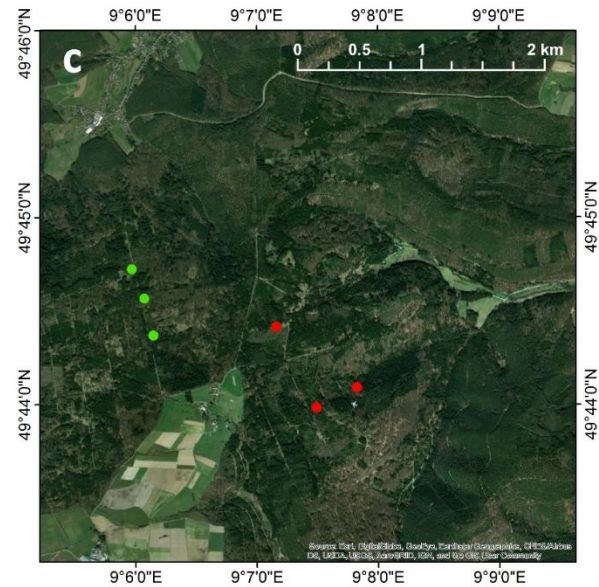
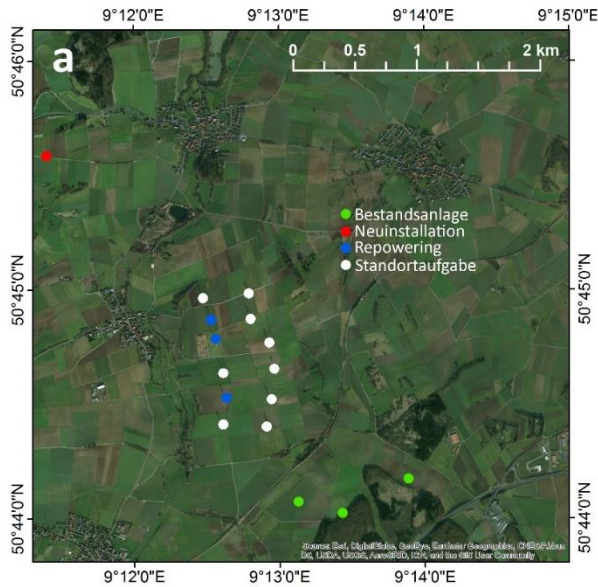
Optimales Szenario ist eine Kombination aus modernen Anlagen im derzeitigen Bestand, Repowering und Neuinstallationen



→ 36 200 Anlagen zur Erreichung von Ausbauziel notwendig

# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

## Optimierungsbeispiele





# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

## Schlussfolgerungen

- Verfügbarkeit von Windenergie in Deutschland unterliegt einer **großen raumzeitlichen Variabilität**, die ganz wesentlich durch großräumige Strömungen in der Nordhemisphäre gesteuert wird (inter- und intraannuelle Variabilität der Windgeschwindigkeit)
- **Räumlich hochaufgelöste Szenarien** des technischen Windenergiepotenzials ermöglichen die Abschätzung von Effizienzsteigerungen eines veränderten Anlagenbestandes gegenüber dem aktuellen Anlagenbestand
- **Technische Weiterentwicklungen** von Windenergieanlagen eröffnen große Möglichkeiten zur Verbesserung der Nutzungseffizienz von Windenergie durch Neuinstallationen und Repowering
- Die **Planungsebene**, auf der die Standorte mit dem besten technischen Potenzial ausgewählt werden, bestimmt die Verteilung und Anzahl der Windenergieanlagen maßgeblich mit

# Quellen

- Colmorgen, F., 2018: Kleinskalige Modellierung des Jahresgangs des Windenergieertrags in Deutschland mit dem Wind Speed-Wind Shear-Modell. Masterarbeit. Professur für Umweltmeteorologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Grau, L., Jung, C., Schindler, D., 2017: On the Annual Cycle of Meteorological and Geographical Potential of Wind Energy: A Case Study from Southwest Germany. Sustainability 9, 1169; doi:10.3390/su9071169.
- Jung, C., 2016: High Spatial Resolution Simulation of Annual Wind Energy Yield Using Near-Surface Wind Speed Time Series. Energies 9, 344; doi:10.3390/en9050344.
- Jung, C., Schindler, D., 2018: The role of air density in wind energy assessment - A case study from Germany. Energy Conversion and Management, *under review*.
- Jung, C., Schindler, D., 2018: 3D statistical mapping of Germany's wind resource using WSWs. Energy Conversion and Management 159, 96-108.
- Jung, C., Schindler, D., 2018: On the inter-annual variability of wind energy generation – A case study from Germany. Applied Energy 230, 845-854.
- Jung, C., Schindler, D., Grau, L., 2018: Achieving Germany's wind energy expansion target with an improved wind turbine siting approach. Energy Conversion and Management 173, 383-398.
- Jung, C., Schindler, D., Laible, J., 2018: National and global wind resource assessment under six wind turbine installation scenarios. Energy Conversion and Management 156, 403-415.

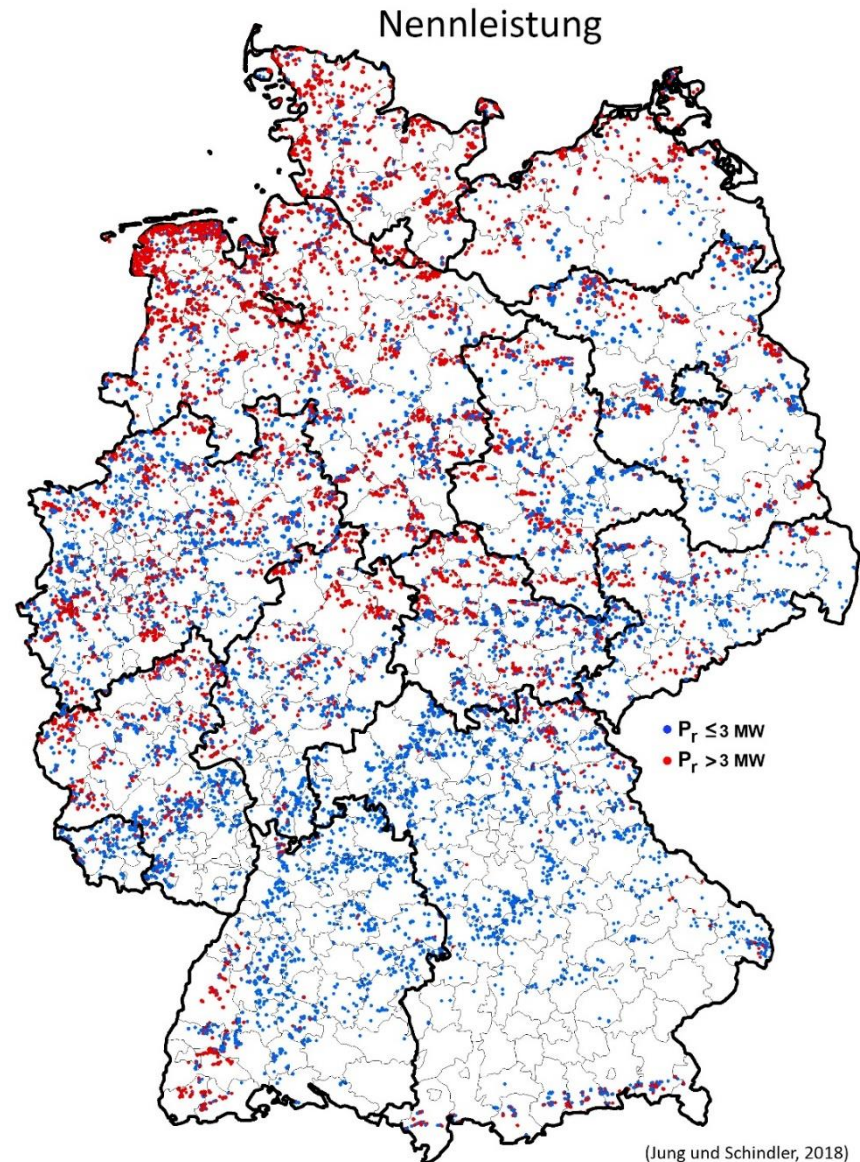
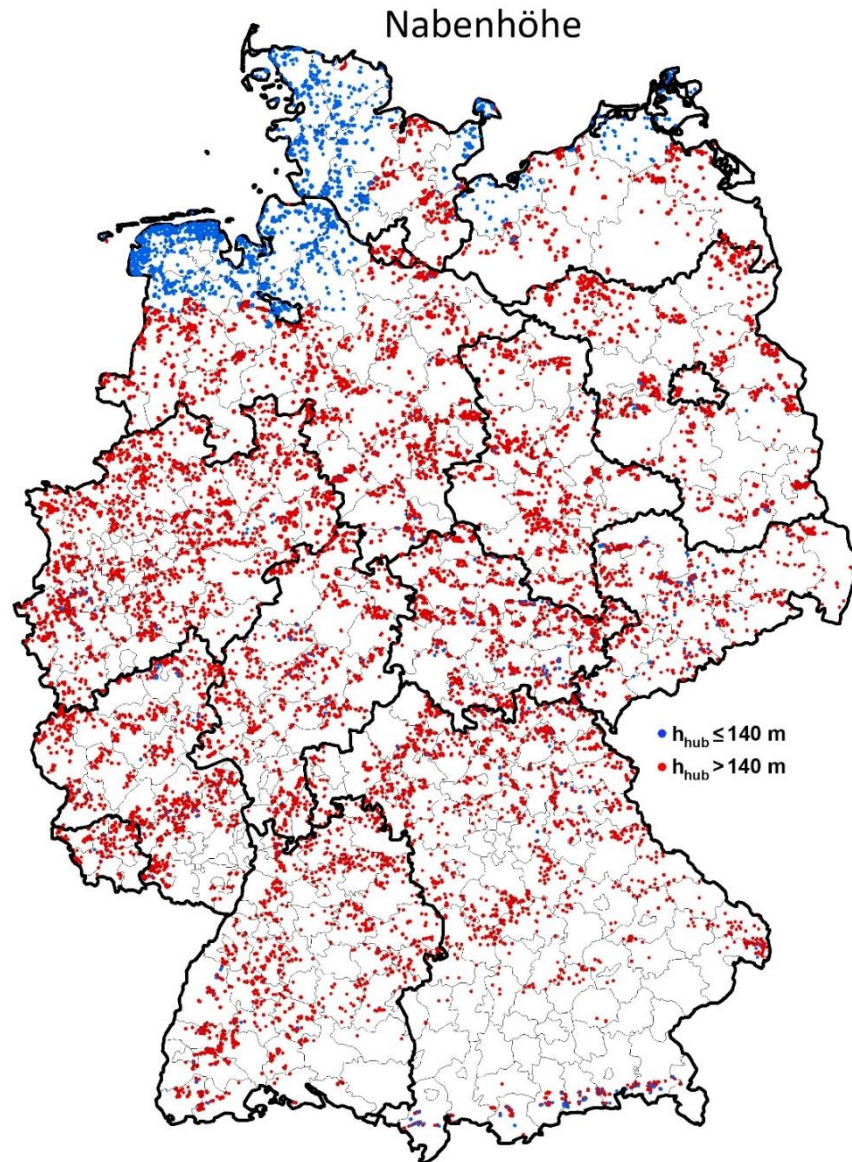
# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

## Geografische Restriktionen (Grau et al., 2017)

- Gebiete, in denen die Geländehöhe größer als 2 000 m ist
- Hänge, deren Neigung mehr als 15° beträgt
- Wasserflächen, Feuchtgebiete, Moore, Wasserschutzgebiete
- Urbane Räume und Wohngebiete mit einer Pufferzone von 700 m
- Industriegebiete mit einer Pufferzone von 250 m
- Verkehrsinfrastruktur mit einer Pufferzone von 100 m entlang von Straßen, von 50 m entlang von Gleisen und von 1 000 m um Flugplätze
- Landwirtschaftliche Flächen
- Gebiete, die besonders geschützt sind (Naturschutzgebiete, Nationalparks, Bannwälder, Naturdenkmäler, ...) mit einer Pufferzone von 200 m
- Vogelschutzgebiete mit einer Pufferzone von 700 m

# Optimierung des Windenergieanlagenbestandes in Deutschland

## Kriterien für Repowering und Neuinstallationen



(Jung und Schindler, 2018)