



Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH

---

# Dokumentation über den anemos Windatlas für Europa 10 km

---

anemos  
Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH  
Böhmsholzer Weg 3, D-21391 Reppenstedt  
Tel.: 04131-8308-100  
[www.anemos.de](http://www.anemos.de) | [kontakt@anemos.de](mailto:kontakt@anemos.de)



Deutsche  
Akkreditierungsstelle  
D-PL-17580-01-00

---

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
1. Einleitung.....	3
2. Das WRF-Modell.....	4
3. Eingangsdaten .....	5
4. Optimierung der Modelleinstellungen .....	5
5. Statistische Verifikation mit Windmessungen .....	5
6. Literatur .....	8

## 1. Einleitung

Der **anemos Windatlas** für Europa 10 km (**EU-10km.E5**) stellt eine langjährige Zeitreihen-Datenbasis der atmosphärischen Parameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, Luftdruck, relative Feuchte, Luftdichte, Niederschlag, lang- und kurzwelliger Einstrahlung dar. Die zeitliche Auflösung des Windatlas beträgt 10 Minuten und deckt mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 km<sup>2</sup> vollständig Zentraleuropa, sowie große Teile des Mittelmeeres und Nord- & Ostsee ab. Die Entwicklung des anemos Windatlas ist in Abbildung 1 als Prozesskette dargestellt. Dabei gibt es zwei wesentliche Punkte:

- Optimierung der Modelleinstellungen mit anschließender WRF Hauptsimulation (Downscaling)
- Verifikation der WRF Hauptsimulation mit Windmessungen

Genauere Erläuterungen der Punkte aus Abb. 1 befinden sich in den folgenden Abschnitten.

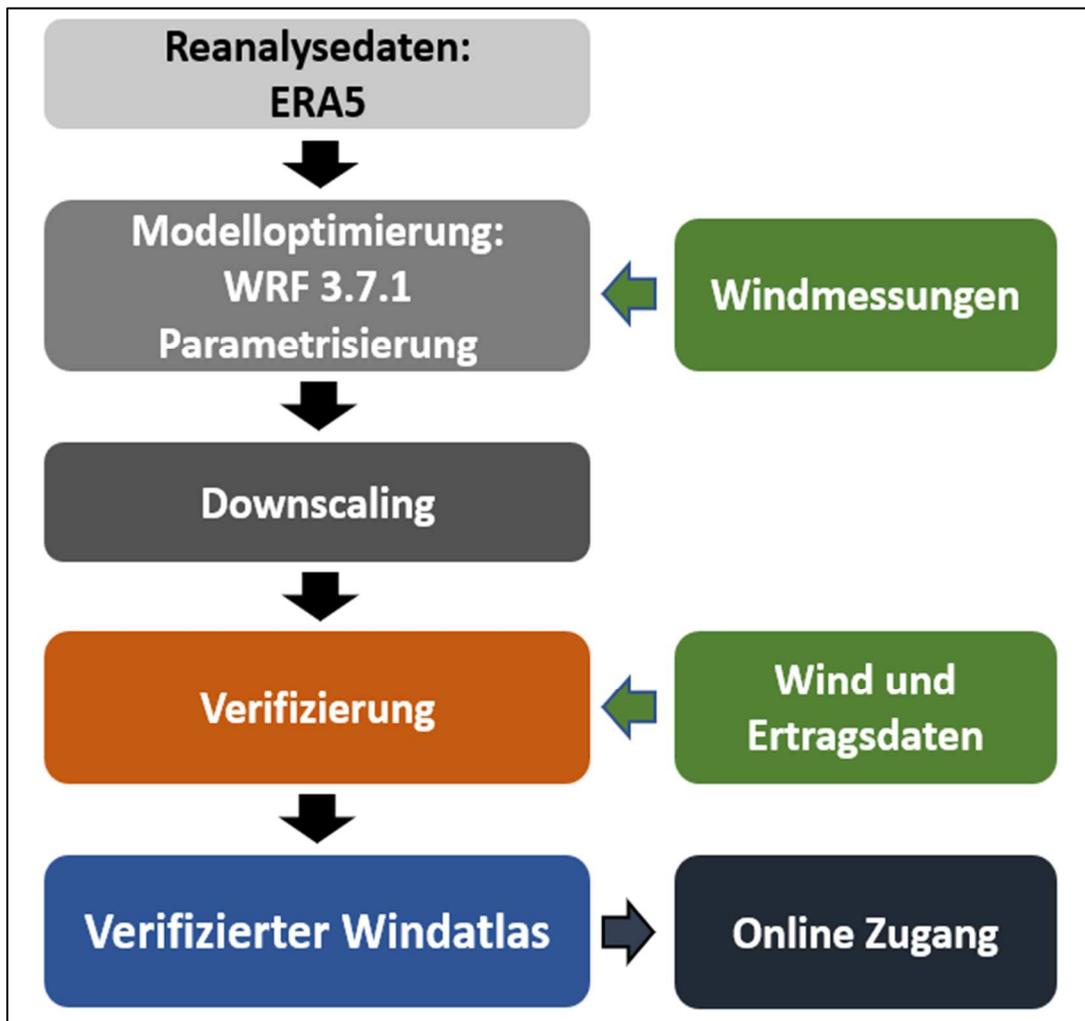


Abb. 1: Entwicklungsschritte des anemos Windatlas Europa 10 km.

## 2. Das WRF-Modell

Der **EU-10km.E5** wurde mit dem mesoskaligen numerischen Wettervorhersagemodell **WRF** (**Weather Research & Forecasting Model** mit der Version 3.7.1) simuliert. Das WRF-Modell ist ein „state of the art“ Wettervorhersagesystem (gekoppeltes Atmosphären-Landoberflächen Modell) der nächsten Generation und wurde in den 1990 er Jahren am **NCAR** (**National Center for Atmospheric Research**) mitentwickelt.

WRF kalkuliert nicht-hydrostatisch (explizite Berechnung der Vertikalwindgeschwindigkeit) und berechnet für jeden Zeitschritt die Navier-Stokes Gleichungen, welche die atmosphärische Strömung beschreiben. Mesoskalige Prozesse, wie zum Beispiel Land-See Windsysteme, können durch die hohe zeitliche und räumliche Auflösung (10 min, 10 km) vom Modell hinreichend gut aufgelöst werden. Für mikrophysikalische Prozesse sowie Konvektion, Strahlung, oder Grenzschichtprozesse werden Parametrisierungen verwendet.



*Abb. 2: Domain des anemos Windatlas Europa 10 km. Domain mit 10 x 10 km<sup>2</sup>.*

Für die Simulation des **EU-10km.E5** Windatlas wird eine Domain verwendet (siehe Abb. 2). Die Domain deckt weite Teile Europas ab und besitzt eine räumliche Auflösung von 10 x 10 km<sup>2</sup>.

Während der Simulation werden jede Stunde neue Input-Daten in das WRF-Modell assimiliert, welche das Modell in die richtige Richtung forcieren (Nudging-Verfahren). Die atmosphärischen Zustandsvariablen werden im Modell in 10-Minuten Schritten für jeden Gitterpunkt ausgegeben. Die Simulation umfasst den Zeitraum von 1999 bis heute und wird kontinuierlich erweitert. Die vertikale Modellstruktur der Atmosphäre ist mit 50 Höhen-Schichten sehr hoch aufgelöst. Allein in den besonders für Windenergieanlagen relevanten unteren 300 m liegen 14 der 50 Vertikallevel.

### 3. Eingangsdaten

Als Antriebsdaten des WRF-Modells werden sowohl Bodendaten (Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Schnee, etc.) als auch alle wichtigen atmosphärischen Parameter (Wind, Temperatur, Druck, relative Feuchte, etc.) benötigt. Für den **EU-10km.E5** werden die weltweit verbreiteten ERA5 Reanalysedaten als atmosphärische Antriebs- und Eingangsdaten verwendet. Die ERA5 Reanalysedaten sind im Vergleich zu den vorherigen ERA-Interim Reanalysedaten qualitativ hochwertiger hinsichtlich Konsistenz und Korrelation. Somit können die Vorteile der ERA5 Reanalysedaten wie Konsistenz, Homogenität, Länge der Zeitreihe, ständige Aktualisierung, Verfügbarkeit über Land und Meer durch die Simulation mit dem WRF-Modell erhalten bzw. verstärkt werden. Auf der anderen Seite werden mit dem **EU-10km.E5** die Nachteile der ERA5 Reanalysedaten wie die relativ geringe räumliche (ca. 30 x 30 km<sup>2</sup>) und zeitliche Auflösung (1 h) überwunden.

Die ERA5 Reanalysedaten werden ebenfalls für die Bodendaten verwendet. Dadurch ist eine Konsistenz der Strahlungs- und Wärmeflüsse zwischen Boden und Atmosphäre gegeben. Die Bodendaten besitzen durchgehend vier Bodenlevel und beinhalten u.a. Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Schnee.

Die Geländehöhen sind dem **SRTM** Datensatz (**S**huttle **R**adar **T**opography **M**ission, USGS EROS Data Center) entnommen und dem Modellgitter entsprechend interpoliert. Die Daten wurden im Jahre 2000 erhoben und stehen in einer horizontalen Auflösung von ca. 90 m zur Verfügung. Die vertikale Auflösung beträgt 1 m. Alle Informationen über die Vegetation und Rauigkeiten innerhalb des Simulationsgebietes liefert der USGS Datensatz (United States Geological Survey). Die Daten stehen auf einem Modellgitter mit einer räumlichen Auflösung von 1 km zur Verfügung.

### 4. Optimierung der Modelleinstellungen

Vor der eigentlichen Hauptsimulation wurden die Modelleinstellungen und Parametrisierungen (wie zum Beispiel Grenzschichtschema, Bodenschema, Strahlungsschema, etc.) getestet und für die relevanten atmosphärischen Parameter (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) optimiert. Die Modelleinstellungen wurden mit den anemos Windatlanten (D-3km.M2, D-3km.E5 etc.) verglichen und mit Windmessungen (Messmasten und LiDAR) verifiziert (siehe Abb. 1). Durch diese Testphase zeigt sich, wie das bodennahe Windfeld auf unterschiedliche Parametrisierungen und Schemata reagiert (Sensitivitätstests). Die den Beobachtungen am nächsten kommende Einstellung wird im letzten Test über ein Jahr simuliert und anschließend ebenfalls verifiziert. Bei guter Prognosegüte wird anschließend die Hauptsimulation kontinuierlich fortlaufend (> 20 Jahre) gestartet.

### 5. Statistische Verifikation mit Windmessungen

Die wichtigste Aufgabe nach der Durchführung der Hauptsimulation ist die intensive Verifikation anhand zahlreicher Windmessungen. Für die Verifikation des **EU-10km.E5** wurden insgesamt 96 Windmessungen verwendet. Die Verifikation zeigt die Prognosegüte und Qualität der Hauptsimulation an. Verifiziert werden statistische Kenngrößen wie Mittelwert, Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) bzw. Korrelation ( $R$ ), Bias, RMSE und Extremwerte (QQ-Verteilung). Außerdem werden Vertikalprofile, Tagesgänge, Windrosen, Häufigkeitsverteilungen mit Weibull-Parametern überprüft.

Die grobe Verteilung der Standorte ist in Abb. 3 durch rote Kreise dargestellt. Dabei stehen 96 Stationen mit Messungen zwischen 40 m und 140 m Höhe zur Verfügung. Zusätzlich werden in Abb. 5 die Ergebnisse der Verifikation mit insgesamt 75 Messungen exemplarisch für die 100 m Messhöhe gezeigt. Hierfür wird der Bias der Windgeschwindigkeit an vier Offshore und 71 Onshore Stationen sowie das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ , stündliche Werte) berechnet und graphisch dargestellt. Somit ist eine vergleichende Auswertung zwischen den Messungen und dem Windatlas möglich. Die Boxen stellen das 25 % - 75 % Quartil, d. h. die mittleren 50 % der Daten, und die Whisker (Antennen) das Minimum bzw. Maximum dar. Der Mittelwert (Median) ist durch ein Kreuz (Strich in der Box) markiert.

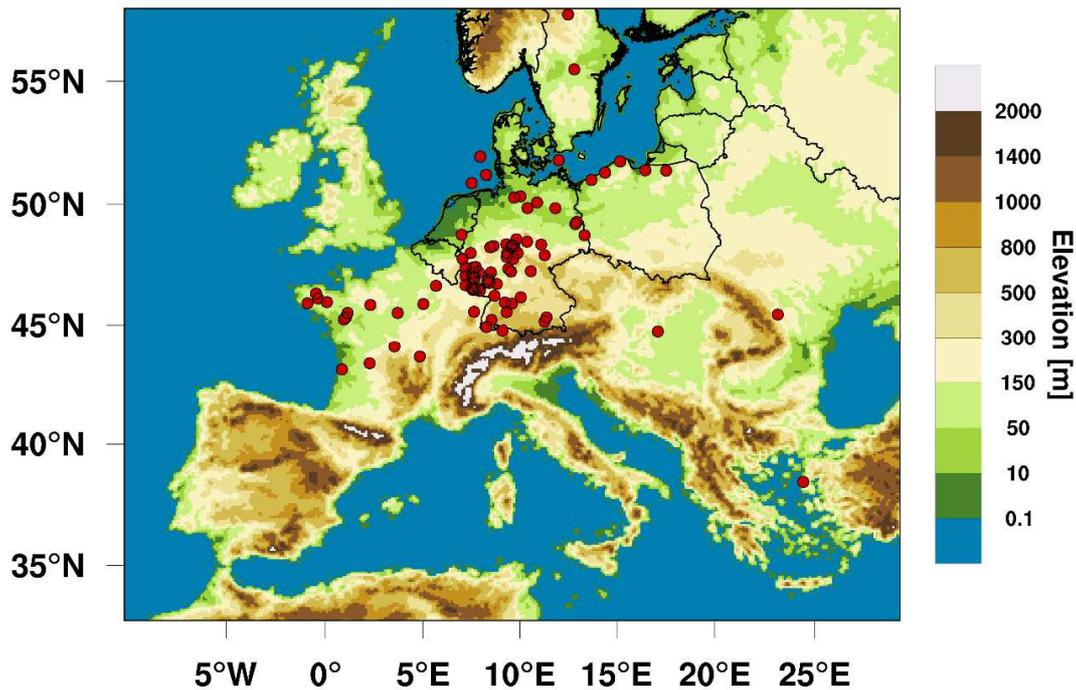


Abb. 3: Schematische Darstellung der für die Verifikation verwendeten Messungen.

Zunächst wird der Bias und das  $R^2$  zwischen Messungen und Simulation in der höchsten Messhöhe (Top-Anemometer) betrachtet. Abb. 4(a) zeigt, dass der mittlere Bias für die Onshore Messungen positiv und für die Offshore Messungen negativ ist. Zudem zeigt sich, dass das  $R^2$  für die Offshore Standorte höher ist als für die Onshore Standorte (Abb. 4 (b)). Der Bias liegt im Mittel für alle Onshore Stationen bei +10 %. Für die Offshore Messungen ergibt sich ein mittlerer Bias von -2.7 %. Die Standardabweichung für alle Standorte liegt bei 10.2 %. Das  $R^2$  für die Offshore Messungen ist mit 91.2 % deutlich höher als das der Onshore Messungen mit 71.5 %.

Abb. 5(a) zeigt die Abweichung in Prozent zwischen der Windgeschwindigkeit jeder Messung und den 10 km Windatlas-Zeitreihen sowie das entsprechende  $R^2$  (Abb. 5(b)) für 100 m Höhe über Grund. Der Bias liegt im Mittel für alle Stationen bei 14 %. Für die Onshore Messungen ergibt sich ein mittlerer Bias von 15 % und für die Offshore Messungen von -3 %. Die Standardabweichung für alle Stationen liegt bei 11.6 %. Das  $R^2$  der Offshore Messungen liegt mit 91.2 % deutlich höher als das der Onshore Messungen mit 70.7 %.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass der Bias bei der Betrachtung der Stationen in 100 m Höhe höher ist als bei der Betrachtung der höchsten Messhöhe einer Station. Zudem zeigt sich, dass die  $R^2$  bei der Betrachtung der 100 m geringer sind als bei der Betrachtung der Messungen auf höchster Messhöhe. Dies ist damit zu erklären, dass niedrigere Messhöhen durch den stärkeren Bodeneinfluss meist einen höheren Fehler aufweisen als höhere Messhöhen. Damit erklärt sich auch das bessere  $R^2$  bei Betrachtung der höchsten Messhöhe. Des Weiteren ist anzumerken, dass die Offshore Standorte die Ergebnisse mit allen Messungen aufgrund des geringeren Bias und des höheren  $R^2$  leicht verbessern.

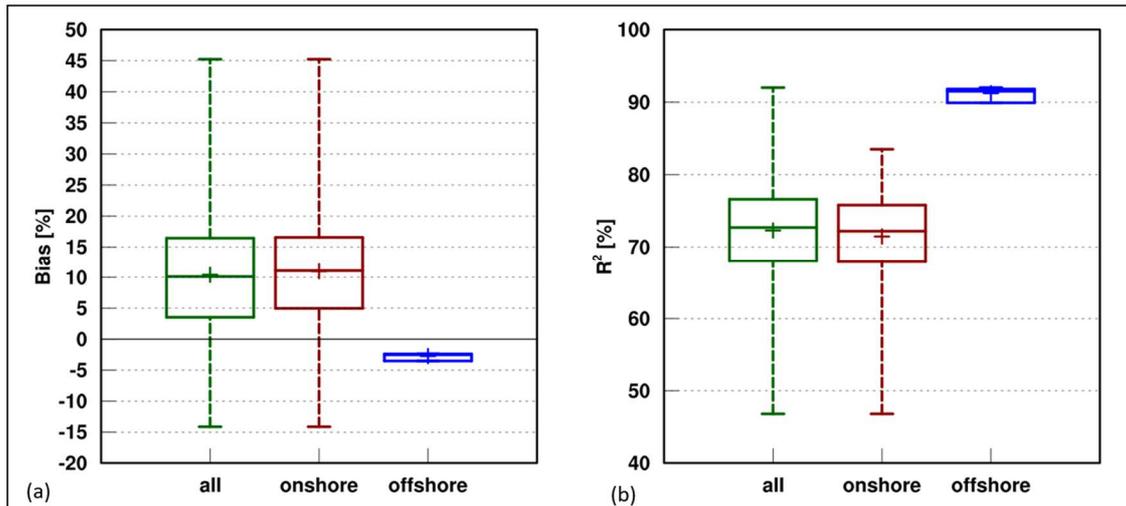


Abb. 4: Boxplot zwischen 96 unabhängigen Messungen und dem anemos Windatlas in Höhen zwischen 40 m und 140 m über Grund. Dargestellt sind der Bias (a) und das  $R^2$  (b).

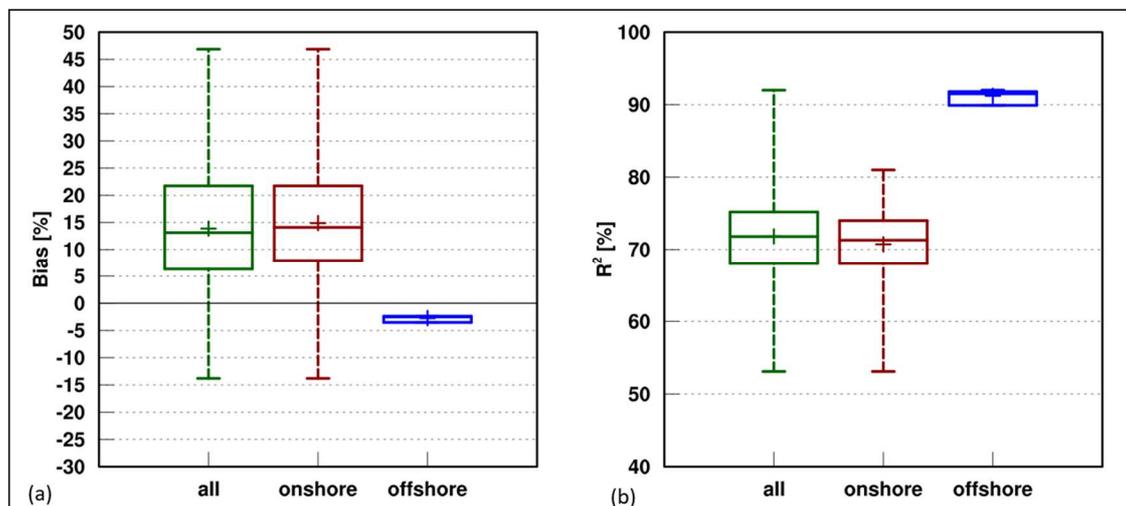


Abb. 5: Boxplot zwischen 75 unabhängigen Messungen und dem anemos Windatlas in 100 m Höhe über Grund. Dargestellt sind der Bias (a) und das  $R^2$  (b).

## 6. Literatur

Christoffer, J. und M. Ulbricht-Eissing, 1989: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland, Bericht des DWD, Nr. 147

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate . Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), date of access. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

Farr, T. G., et al., 2007: The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183; <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmBibliography.html>

Howard, Tom und Clark Peter, 2007: Correction and downscaling of NWP wind speed forecasts, Meteorol. Appl. 14: 105-116

Keil, M., M. Bock, T. Esch, A. Metz, S. Nieland, A. Pfitzner, 2010: CORINE Land Cover Aktualisierung 2006 für Deutschland. Abschlussbericht zu den F+E Vorhaben UBA FKZ 3707 12 200 und FKZ 3708 12 200, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum Oberpfaffenhofen, Januar 2010

Mengelkamp, H.-T., 2015: Wind-, Ertrags- und Erlösgutachten für Windenergieanlagen, promet – meteorologische Fortbildung, Hrsg. Deutscher Wetterdienst, Jahrg. 39, Nr. 3/4, 193-202

Mengelkamp, H.-T., 1999: Wind Climate Simulation over Complex Terrain and Wind Turbine Energy Output Estimation, Theor. Appl. Climatol, 63, 129-139

Mengelkamp, H.-T., H. Kapitza und U. Pflüger, 1997: Statistical-dynamical downscaling of wind climatologies, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67&68, 449-457

Schneider, M., J. Bethke, A. Glücksmann, H.-T. Mengelkamp, 2016: Der neue anemos Windatlas für Deutschland – Korrektur und Verifikation mit Windmessungen und Ertragsdaten, 25. Spreewindtage, 09. November, Potsdam

Staffell, Iain und Pfenninger Stefan, 2016: Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output, Energy 114, 1224-1239

Thogersen, M.L. et. al., Measure-Correlate-Predict Methods: Case Studies and Software Implementation, EMD International A/S

Traup, S. und B. Kruse, 1996: Winddaten für Windenergienutzer, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

Troen, I. und E.L. Petersen, 1989: European Wind Atlas. Risø National Laboratory, Roskilde. 656 pp. ISBN 87-550-1482-8

Weiter, A., M. Schneider, D. Peltret und H.-T. Mengelkamp: Electricity production by wind turbines as a means for the verification of wind simulations. Meteorol. Z. doi: 10.1127/metz/2019/0924

WRF, 2017, User's Guides for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System, Version 3, WRF users page, [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/contents.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html)