



Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH

Dokumentation

über den

anemos Windatlas

für Frankreich 3 km

anemos
Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH
Böhmsholzer Weg 3, D-21391 Reppenstedt
Tel.: 04131-8308-100
www.anemos.de | kontakt@anemos.de



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-17580-01-00

| Inhaltsverzeichnis | Seite |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1. Einleitung..... | 3 |
| 2. Das WRF-Modell..... | 4 |
| 3. Eingangsdaten | 5 |
| 4. Optimierung der Modelleinstellungen | 5 |
| 5. Statistische Verifikation mit Windmessungen als Vorbereitung für das Remodelling..... | 6 |
| 6. Remodelling | 6 |
| 7. Standortspezifische Zeitreihen der Windgeschwindigkeit..... | 6 |
| 8. Verifikation nach dem Remodelling | 7 |
| 9. Literatur | 9 |

1. Einleitung

Der neue **anemos Windatlas** für Frankreich 3 km (**F-3km.M2**) stellt eine langjährige Zeitreihen-Datenbasis der atmosphärischen Parameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, Luftdruck, relative Feuchte, Luftdichte, Niederschlag, lang- und kurzweiliger Einstrahlung dar. Die zeitliche Auflösung des Windatlas beträgt 10 Minuten und deckt mit einer räumlichen Auflösung von 3 x 3 km² vollständig Frankreich, Belgien, Schweiz und Korsika sowie die Küstengebiete des Atlantischen Ozeans und des Mittelmeeres ab. Die Entwicklung des anemos Windatlas ist in Abbildung 1 als Prozesskette dargestellt. Dabei gibt es drei wesentliche Punkte:

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

Genauere Erläuterungen dieser drei Punkte aus Abb. 1 befinden sich in den Abschnitten 4 - 8.

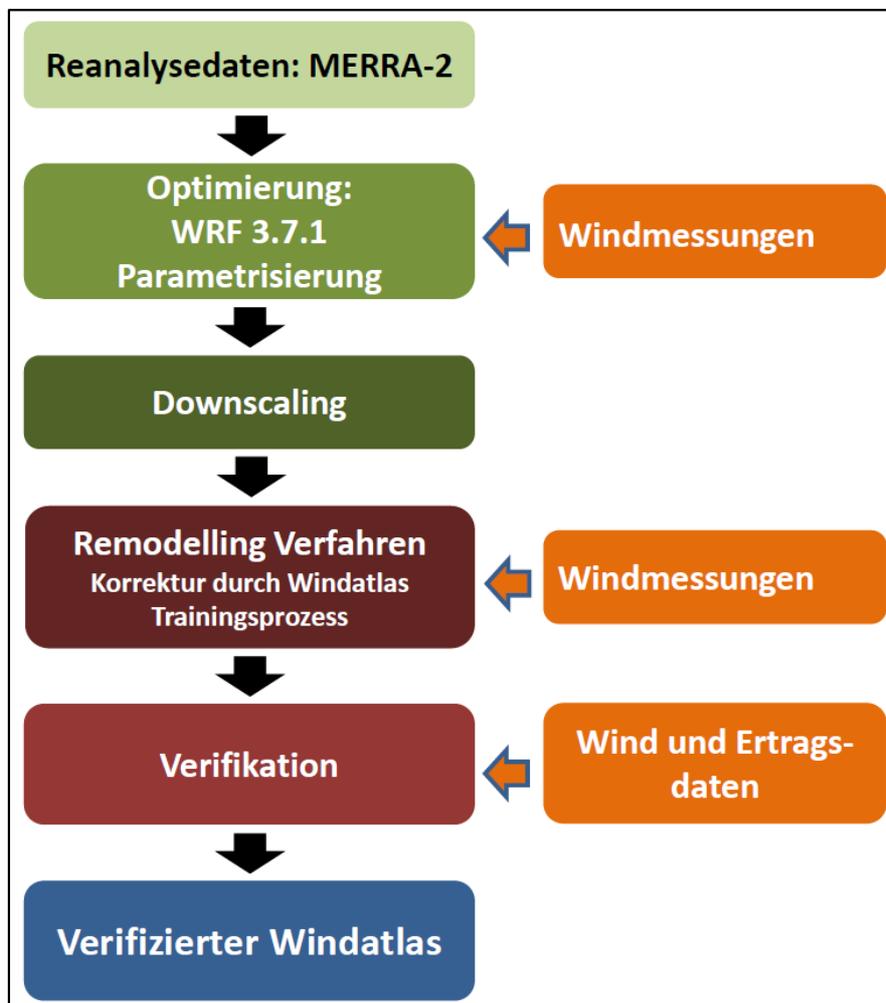


Abb. 1: Entwicklungsschritte des neuen anemos Windatlas Frankreich 3 km.

2. Das WRF-Modell

Der **F-3km.M2** 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 oder hochreichende Konvektion (Gewitterzellen), können durch die hohe zeitliche und räumliche Auflösung (10 min, 3 km) vom Modell hinreichend gut aufgelöst werden. Für mikrophysikalische Prozesse sowie flache Konvektion, Strahlung, oder Grenzschichtprozesse werden Parametrisierungen verwendet.

Das WRF-Modell erlaubt durch seine Fähigkeit zum multiplen Nesting eine simultane Berechnung mehrerer Modell-Domänen mit unterschiedlichen Gitterauflösungen (Abb. 2). Mit dem multiplen Nesting-Verfahren sind regional hochaufgelöste Simulationen der atmosphärischen Zirkulation möglich, die unter Verwendung von detaillierten Bodeninformationen den Einfluss von Vegetation, Rauigkeit und Orographie berücksichtigen.

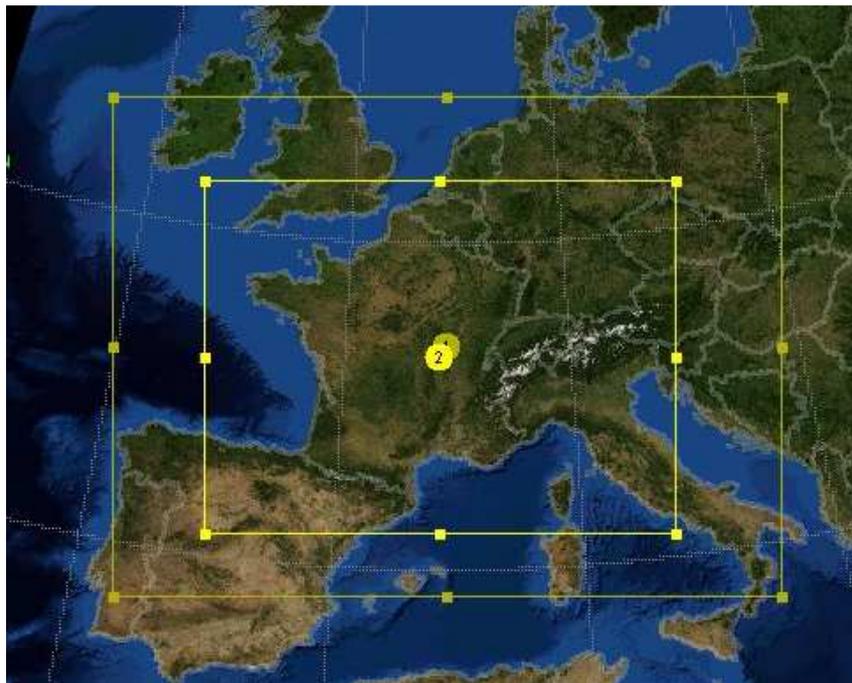


Abb. 2: Multiples Nesting-Verfahren mit zwei Domains des anemos Windatlas Frankreich 3 km. Domain 1 mit 15 x 15 km² und Domain 2 (Nest) mit 3 x 3 km².

Für den **F-3km.M2** wird ein Nest mit zwei Domains verwendet (siehe Abb. 2). Das Simulationsgebiet besteht aus einer äußeren, größeren Domain, in welche eine hochaufgelöste innere Domain genestet ist. Die äußere Domain deckt weite Teile West- und Zentraleuropas ab und besitzt eine räumliche Auflösung von 15 x 15 km². In die äußere Domain ist die feiner aufgelöste Frankreich Domain genestet mit einer räumlichen Auflösung von 3 x 3 km². Während

der Simulation kommunizieren beide Domains miteinander. Die äußere Domain stellt die Randwerte für die innere Domain bereit, während letztere die äußere Domain mit den höher aufgelösten Kalkulationen versorgt.

Während der Simulation werden alle drei Stunden 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 2007 bis heute und wird kontinuierlich erweitert. Die vertikale Modellstruktur der Atmosphäre ist mit 25 Höhen-Schichten sehr hoch aufgelöst. Allein in den besonders für Windenergieanlagen relevanten unteren 250 m liegen acht der 25 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 **F-3km.M2** werden die weltweit verbreiteten MERRA-2 Reanalysedaten als atmosphärische Antriebs- und Eingangsdaten verwendet. Die MERRA-2 Reanalysedaten sind im Vergleich zu den vorherigen MERRA Reanalysedaten qualitativ hochwertiger hinsichtlich Konsistenz und Korrelation. Somit können die Vorteile der MERRA-2 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 **F-3km.M2** die Nachteile der MERRA-2 Reanalysedaten wie die relativ geringe räumliche (0.5° Breite, 0.625° Länge entsprechend etwa $50 \times 50 \text{ km}^2$) und zeitliche Auflösung (3 h) überwunden.

Für die Bodendaten wird der **CFS** Datensatz (NCEP **C**limate **F**orecast **S**ystem) verwendet. Dieser besitzt durchgehend vier Bodenlevel und beinhaltet Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Schnee. Der CFS Datensatz hat eine zeitliche Verfügbarkeit von sechs Stunden und eine räumliche Auflösung von (0.2° Breite, 0.2° Länge).

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 **CORINE** Datensatz der Europäischen Umweltagentur **EEA** (**E**uropean **E**nvironment **A**gency). Diese Informationen basieren auf den Daten des Landsat-7-Satelliten im Maßstab 1:100.000. Die Daten stehen auf einem Modellgitter mit einer räumlichen Auflösung von 100 m 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 dem Windatlas für Deutschland (D-3km.M2) 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 anschließend für die Hauptsimulation (> 10 Jahre) verwendet.

5. Statistische Verifikation mit Windmessungen als Vorbereitung für das Remodelling

Die wichtigste Aufgabe nach der Durchführung der Hauptsimulation ist die intensive Verifikation anhand zahlreicher Windmessungen. Für die Verifikation des **F-3km.M2** wurden 24 Messungen verwendet.

Zum einen erhält man aus der Verifikation die Prognosegüte und Qualität der Hauptsimulation und zum anderen werden systematische Fehler im letzten Schritt, dem *Remodelling* (Abschnitt 6), behoben und die Qualität des Atlas wird verbessert. 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.

6. Remodelling

Nach der vollständigen Verifikation der Hauptsimulation mit allen verfügbaren Windmessungen wird der Windatlas im vorletzten Schritt der Prozesskette durch das Remodelling optimiert. Es wird anhand der Abweichungen und deren Abhängigkeiten bei der Verifikation aus Abschnitt 5, mit 18 Windmessungen ein sektorielles *Training* durchgeführt. Die verbleibenden Windmessungen werden für die anschließende unabhängige Verifikation des Remodelling Verfahrens benötigt.

Durch das *Training* werden Skalierungsparameter mithilfe einer multiplen linearen Regressionsanalyse entwickelt, welche anschließend auf die Windatlas-Zeitreihen angewendet werden. Es wird nach Abhängigkeiten der Skalierungsparameter von der Subgrid-Topographie gesucht und bei ausreichender Signifikanz verwendet. Infolgedessen können durch die im *Training* entwickelten Skalierungsparameter alle Gitterzellen mithilfe der Subgrid-Informationen (Orographie, Rauigkeit, etc.) korrigiert werden. Letztendlich verbessert das Remodelling die statistischen Kenngrößen sowie auch die Häufigkeitsverteilung mit Weibull-Parameter und das Vertikalprofil.

7. Standortspezifische Zeitreihen der Windgeschwindigkeit

Im Rahmen des Remodelling-Verfahrens wurde eine standortspezifische Höhenkorrektur mithilfe von CFD Simulationen an verschiedenen, komplexen Messstandorten entwickelt. Mit dem CFD Modell Meteodyn werden die 3 km x 3 km Atlaszeitreihen der Teststandorte hochaufgelöst modelliert. Die orographischen Informationen sind dem SRTM-Datensatz (3 arcsec ~ 90 m) entnommen. Da die Höhenkorrektur ein Teil des Remodelling Prozesses ist, um den

Höhenunterschied zwischen Atlaszelle und Messung zu berücksichtigen, stellt die standortspezifische Höhenkorrektur vor allem in komplexen Regionen eine deutliche Verbesserung der mittleren Windgeschwindigkeit dar. Im flachen Gelände hat die Höhenkorrektur keinen signifikanten Einfluss aufgrund der geringen Höhenunterschiede. Die Höhenkorrekturfunktion wird beim Auslesen von Zeitreihen der Windgeschwindigkeit auf jeden Zeitschritt angewendet. Durch das Remodelling-Verfahren mit standortspezifischer Höhenkorrektur und der intensiven Verifikation mit Messdaten stellt der neue Windatlas den aktuell besten Datensatz für Frankreich dar.

8. Verifikation nach dem Remodelling

Im Anschluss an das Remodelling werden die Windatlas-Zeitreihen mit 39 Windmessungen verifiziert. Die grobe Verteilung der Standorte ist in Abb. 3 durch rote Kreise dargestellt. Die Messungen konzentrieren sich auf Nord- und Zentralfrankreich sowie Südwestdeutschland.

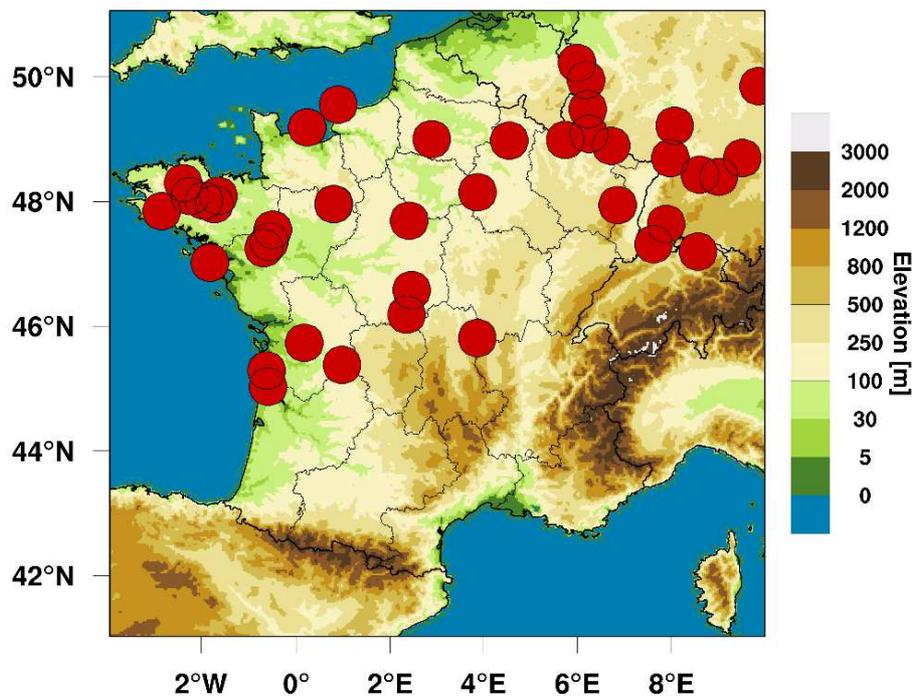


Abb. 3: Schematische Darstellung der für die Verifikation verwendeten Messungen.

Die Ergebnisse der Verifikation werden in Abb. 4 exemplarisch für die Messhöhen zwischen 40 m und 100 m gezeigt. Hierfür wird der Bias der Windgeschwindigkeit an den drei Offshore- und 36 Onshore-Stationen gebildet und graphisch dargestellt. Abb. 4 zeigt die Abweichung in Prozent der Windgeschwindigkeit jeder Messung für das Endprodukt inklusive Remodelling (F-3km.M2). Der positive Bias der Onshore Messungen kann durch das Remodelling behoben werden, sodass die meisten Stationen nach dem Remodelling im Bereich von $\pm 7\%$ (87% der Messungen) liegen, was eine signifikante Verbesserung darstellt. Auf Stundenbasis ergibt sich für die mittlere Korrelation (R) ein Wert von 84.9% und der Bias liegt bei -0.03%. Die Standardabweichung liegt mit 4.66 % unter der 5 %-Marke.

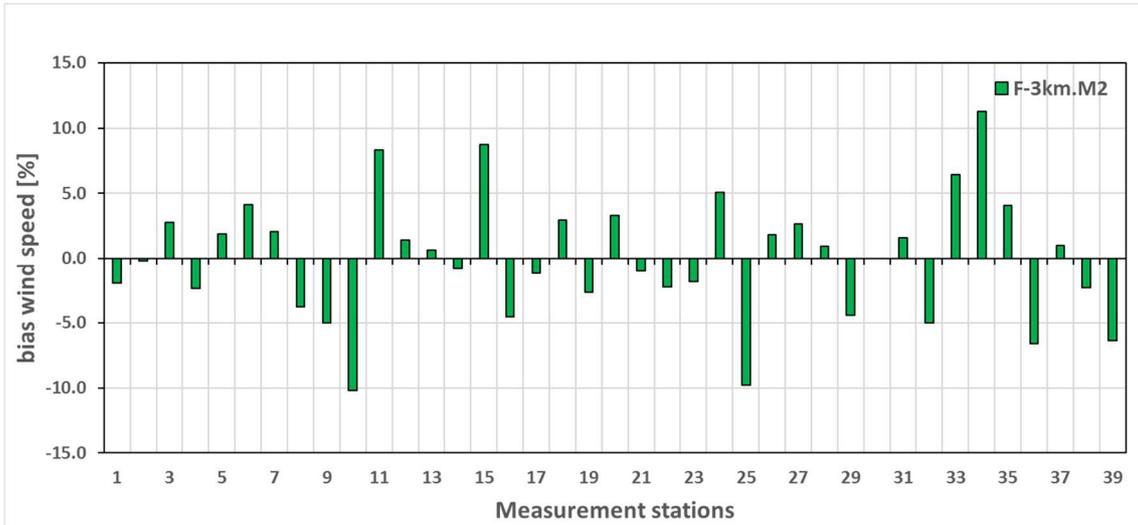


Abb. 4: Bias der mittleren Windgeschwindigkeit zwischen den 39 internen Messungen und F-3km.M2 (grün). Die Messhöhen liegen zwischen 40 m und 100 m über Grund.

9. Literatur

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

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>

Gelaro, R. et al., 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), AMS, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1

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

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah MW, Ebisuzaki W, Higgins J, Janowiak KC, Mo C, Ropelewski A, Leetmaa R, Reynolds, Jenne R (1996) The NCEP/NCAR reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77:437–471

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., 1988: On the energy output estimation of wind turbines, *Int. Journal of Energy Research*, 12, 113-123

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

Mengelkamp, H.-T., T. Sperling, 2005: Windindizes werden von Produktionsdaten unabhängig, *Erneuerbare Energien*, 2, 25-27

Rienecker, M.M., M.J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M.G. Bosilovich, S.D. Schubert, L. Takacs, G.-K. Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A. da Silva, et al., 2011: MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, 24, 3624-3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1

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 and 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

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